



الخرسانة المسلحة (1)

اختصاص مدني عام





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية

الخرسانة المسلحة (1)

د.م غسان علي محمود د.م قاسم علي زحيلي د.م سليمان إبراهيم ناصيف
أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية مدرس في قسم الهندسة الإنشائية

1432-1433 هـ
2011-2012 م

جامعة دمشق



فهرس المحتويات Contents

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
05	فهرس المحتويات.....
19	الباب الأول: مدخل إلى الخرسانة المسلحة.....
21	الفصل الأول : الخرسانة والخرسانة المسلحة (المكونات الرئيسية)
23	1-1- تمهيد.....
30	1-2- الخرسانة في الشروط العادية.....
31	1-2-1- تصنيف الخرسانة.....
33	1-2-2- الخواص الأساسية لمكونات الخرسانة.....
47	1-2-3- الخواص الأساسية للخرسانة الطرية.....
53	1-2-4- الميزات الميكانيكية والفيزيو- كيمياوية للخرسانة.....
72	1-3- الخرسانة في الظروف الخاصة.....
72	1-3-1- تسريع الحصول على المقاومة المطلوبة.....
75	1-3-2- الخرسانة في الطقس الحار.....
77	1-3-3- الخرسانة في الطقس البارد.....
78	1-4- أمثلة توضيحية.....
83	الفصل الثاني: مقاومة الخرسانة المتصلبة في المنشآت القائمة.....
85	1-2- مقدمة.....
85	2-2- الاختبارات قبل التنفيذ.....
85	2-3- الاختبارات أثناء التنفيذ.....
87	2-4- الاختبارات بعد الانتهاء من التنفيذ.....
98	2-5- أمثلة توضيحية.....
103	الفصل الثالث: الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح.....
105	1-3- مقدمة.....
105	2-3- أنواع التسليح.....

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
106	3-3- الخواص الميكانيكية لقضبان التسليح
109	1-3-1- اختبار قضبان التسليح على الشد
112	2-3-3- التسليح الصلب في العناصر الخرسانية الخلبة
114	3-3-3- تسليح الخرسانة مسبقة الإجهاد
117	4-3-3- أشكال التسليح في عناصر الخرسانة المسلحة
123	الفصل الرابع: التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح
125	1-4- تمهيد
128	2-4- التماسك بين التسليح والخرسانة
131	1-2-4- استخدام القضبان الملساء
132	2-2-4- استخدام القضبان ذات النتوءات
133	3-2-4- إجهاد التماسك وطول الإرساء
137	4-2-4- التماسك الموضعي في حالة الانحناء
139	3-4- أطوال التثبيت الأساسية وفق الكود العربي السوري
142	4-4- تأمين أطوال تثبيت قضبان التسليح
146	5-4- وصل قضبان التسليح
149	6-4- التحقق من التماسك
154	7-4- توقيف أطراف قضبان التسليح
157	الباب الثاني: حساب المقاطع الخرسانية المسلحة
159	الفصل الأول: الجمل الإنشائية ومبادئ الحساب
161	1-1- تمهيد
161	2-1- حول العناصر والنظم الإنشائية الحاملة من الخرسانة المسلحة
171	3-1- التصميم الإنشائي
173	1-3-1- تطور الحالة الإجهادية - التشوهية في المقاطع العرضية
177	2-3-1- طرائق الحساب المستخدمة
178	3-3-1- حالات الحدود الحديدية وفق الكود العربي السوري

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
183	الفصل الثاني: العناصر الخاضعة للانحناء - الجوائز.....
185	1-2- مقدمة.....
187	2-2- انحناء الجوائز المتجانسة.....
191	2-3-2- سلوك جوائز من الخرسانة المسلحة عند الانحناء.....
196	2-3-1- إجهادات مرنة والمقطع غير متشقق.....
197	2-3-2- مثال توضيحي (1).....
198	2-3-3- إجهادات مرنة والمقطع متشقق.....
199	الفصل الثالث : تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة إجهادات التشغيل... ..
201	1-3- مقدمة.....
202	2-3- الفرضيات الأساسية في التصميم.....
203	3-3- الإجهادات المسموح بها.....
203	3-3-1- وفق الكود السوري.....
204	3-3-2- الإجهادات المسموح بها وفق الكود الأمريكي <i>ACI</i>
205	3-4- تحليل المقاطع المستطيلة أحادية التسليح.....
205	3-4-1- مقدمة.....
208	3-4-2- حالة التحقيق.....
210	3-4-3- حالة التصميم.....
213	3-4-4- الموقع المثالي للحمور السليم.....
214	3-4-5- العزم الأعظمي للمقطع بتسليح أحادي.....
214	3-4-6- مثال توضيحي.....
218	3-4-7- استعمال الجداول.....
218	3-4-7-1- حالات التحقيق.....
221	3-4-7-2- حالات التصميم.....
222	3-5- حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح.....
222	3-5-1- مقدمة.....
222	3-5-2- تصميم المقاطع ثنائية التسليح...

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
224	3-5-3- تحقيق المقاطع ثنائية التسليح.....
226	3-6- أمتلة توضيحية على المقاطع المستطيلة الأحادية والثنائية التسليح...
238	3-7- حساب الجوائز ذات المقاطع بشكل T.....
238	3-7-1- مقدمة.....
239	3-7-2- العرض الفعال لجناح الضغط.....
242	3-7-3- تحقيق المقاطع بشكل T.....
243	3-7-4- العزم المقاوم للمقاطع بشكل T.....
245	3-8- أمتلة على المقاطع بشكل T.....
	الفصل الرابع :
249	تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة حالة الحد الأقصى.....
251	4-1- مقدمة.....
252	4-2- الموثوقية والأمان للعناصر الخرسانية.....
257	4-3- تراكيب الأحمال المصعدة.....
257	4-3-1- وفق الكود السوري.....
258	4-3-2- وفق الكود الأمريكي ACI (من العام 1971 وحتى 1999).....
259	4-3-3- وفق الكود الأمريكي ACI (منذ العام 2002 وحتى الآن).....
259	4-4- الفرضيات الأساسية للانحناء.....
264	4-5- تحليل الجوائز الخرسانية المسلحة.....
264	4-5-1- مقدمة.....
264	4-5-2- حساب قدرة تحمل جوائز ذو مقطع عرضي عام.....
265	4-5-3- الأشكال المحتملة لانتهيارات المقاطع.....
266	4-6- تحليل الجوائز ذات المقاطع المستطيلة الأحادية التسليح.....
266	4-6-1- حساب قدرة تحمل جوائز ذي مقطع مستطيل.....
269	

رقم الفقرة وعنوانها	الصفحة
3-6-4 حالة فولاذ التسليح لم يصل للسيلان $f_s < f_r$	272
4-6-4 مخطط تدفقي <i>Flowchart</i> لتحليل الجوائز المستطيلة أحادية التسليح... ..	273
7-4 المقاطع المحكومة بالانهيار على الشد والضغط.....	280
8-4 نسبة التسليح العظمى μ_{smax}	282
9-4 - عوامل تخفيض المقاومة.....	285
1-9-4 - تمهيد.....	285
2-9-4 وفق الكود الأمريكي <i>ACI-318</i>	285
3-9-4 وفق الكود السوري.....	288
10-4 مساحة التسليح الدنيا.	289
11-4 - تطبيق.....	291
12-4 - العوامل المؤثرة على العزم المقاوم للجوائز الأحادية التسليح.	295
13-4 - تصميم الجوائز الخرسانية ذات المقاطع المستطيلة والأحادية التسليح.....	297
1-13-4 - توضع التسليح.....	297
2-13-4 - ترتيبات التسليح.....	298
3-13-4 - العلاقة بين ارتفاع الجائز والسهم.....	298
4-13-4 - طبقة التغطية للفولاذ والتباعد بين القضبان.....	301
5-13-4 - العمق الفعال d	302
6-13-4 - المجاز الفعال للجوائز.....	302
7-13-4 - أخذ عرض المسند بالحسبان عند حساب العزوم السالبة.....	303
8-13-4 - العلاقات المستخدمة في تصميم المقاطع أحادية التسليح.....	303
9-13-4 - مخطط تدفقي <i>Flowchart</i> لتصميم الجوائز المستطيلة أحادية التسليح.. ..	305
14-4 - حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح.....	308
1-14-4 - دراسة تأثير تسليح الضغط على المقاومة والسلوك.....	309

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
311	2-14-4- العلاقات الأساسية.....
	3-14-4- مخطط تدفقي <i>Flowchart</i> لتحليل وتصميم الجوائز المستطيلة ثنائية
313	التسليح.....
317	15-4- تحليل الجوائز ذات المقاطع غير المستطيلة (المقاطع T و L).....
317	1-15-4- مقدمة.....
318	2-15-4- حساب العزم المقاوم ΩMn
322	3-15-4- تحديد فيما إذا $f_s = f_y$
323	4-15-4- مخطط تدفقي <i>Flowchart</i> لتحليل وتصميم الجوائز ذات المقاطع T ..
329	16-4- أمثلة توضيحية.....
345	الفصل الخامس: المقاطع الخاضعة للضغط المركزي (الأعمدة القصيرة) ...
347	1-5- تمهيد.....
347	2-5- الأعمدة.....
350	1-2-5- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي.....
358	1-1-2-5- الحساب وفق طريقة الاجهادات المسموح بها.....
364	2-1-2-5- الحساب وفق طريقة حد المقاومة القصوى.....
368	3-1-2-5- اشتراطات الأبعاد والتسليح.....
373	3-5- أمثلة حسابية توضيحية.....
391	الفصل السادس: المقاطع الخاضعة للضغط اللامركزي.....
393	1-6- تمهيد.....
394	2-6- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي.....
395	1-2-6- العلاقات الحسابية.....
395	1-1-2-6- حالات التحقيق.....
410	2-1-2-6- حالات التصميم.....
411	3-6- الأعمدة الطويلة (للاطلاع).....
420	4-6- الجدران الخرسانية المسلحة الحاملة.....

الصفحة	رقم الفقرة وعنوانها
426	5-6- أمثلة حسابية توضيحية
445	الفصل السابع: الحساب وفق حالة حد التشقق.....
447	1-7- تمهيد.....
456	2-7- حساب العناصر التي يسمح فيها بتشكيل التشققات.....
456	1-2-7- المقاطع الخاضعة للشد المركزي.....
459	2-2-7- المقاطع الخاضعة للشد الألامركزي.....
461	3-7- العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات.....
464	4-7- الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الشد.....
465	5-7- التحكم بسعة التشققات.....
469	6-7- أمثلة حسابية توضيحية
483	الفصل الثامن: الحساب وفق حالة حد التشكل (السهوم)
485	1-8- تمهيد.....
493	2-8- السهوم في المقاطع المرنة المتجانسة.....
502	3-8- السهوم في المقاطع الخرسانية المسلحة.....
510	4-8- التحقق من السهوم المسموح بها.....
513	5-8- أمثلة حسابية توضيحية.....
521	الفصل التاسع: تأثير التشوهات الحجمية والسيلان في الخرسانة المسلحة
523	1-9- مقدمة
524	2-9- خواص الخرسانة الانسيابية.....
527	3-9- تقلص الخرسانة و انتفاخها.....
545	4-9- التشوهات الناجمة عن التغيرات الحرارية.....
546	5-9- التشوهات الناجمة في الخرسانة تحت تأثير الأحمال المطبقة.....
551	6-9- معامل تشوه الخرسانة.....
554	7-9- التشوهات طويلة الأمد في الخرسانة السيلان أو الزحف.....

583

المراجع

587

معجم المصطلحات العلمية باللغتين العربية والإنكليزية.....

603

جداول ملحقه.....



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
" و ما أوتيتم من العلم إلا قليلا"
صدق الله العلي العظيم

Introduction مقدمة

تعدّ الخرسانة (البيتون) من أهم مواد البناء المستخدمة في الوقت الحاضر، ويعود استخدامها بمكونات مختلفة إلى ما قبل سبعة آلاف عام قبل الميلاد، إذ وجدت تطبيقاتها المتعددة لدى الإغريق والرومان والفرعنة وحضارات أخرى قديمة، الأمر الذي أكدته تحريات أثرية متعددة، وتشهد عليه العديد من الأوابد التاريخية، وقد تطورت هذه المادة واكتسبت خواصها الأساسية المتداولة الآن عبر الزمن من خلال تعديل أشكال مكوناتها وخواصها، وظهرت منها في أيامنا هذه أنواع أكثر تقدماً بالنسبة لما يعرف بالخرسانة العادية ولجهة تحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية وغير ذلك، وبما يتجاوب مع الحاجات والأشكال المعمارية والهندسية للإنسان، وأصبح الحديث يتزايد حول أهمية استعمال بعض الأنواع الخاصة المعروفة نسبياً، ومنها الخرسانة الرغوية Foamed Concrete والخرسانة الثقيلة Heavy Concrete والأنواع الأخرى المتقدمة حديثة العهد ولا سيما الخرسانة عالية الأداء High performance concrete والخرسانة فائقة الأداء (الخرسانة الناعمة الفعالة) Ultra- High performance concrete والخرسانة ذاتية التراص (الخرسانة الانسيابية) Self-compacting Concrete وخرسانة اليوم الواحد One-day Concrete (يتم اكتساب المقاومة المطلوبة على الضغط في اليوم الأول من تاريخ الصب) والخرسانة المسلحة بالألياف ذات المنشأ العضوي كالألياف الكربونية والزجاجية Organic-based Fiber reinforced concrete أو الأسلاك الفولاذية الطويلة أو القصيرة وغير ذلك، حيث لكل منها تطبيقات هندسية مناسبة خاصة به خلافاً لغيره، ومن الصعب الحديث عن ذلك حتى باختصار شديد ضمن مقرر دراسي يتم إعداده وفق خطة دراسية محددة من حيث المفردات والزمن، ولذلك ستكون الخرسانة المسلحة العادية هي أساس البحث في هذا الكتاب. ومن أجل ذلك، لا بد من توفير المعلومات الأساسية حول القضايا الأساسية التالية:

- الخرسانة العادية ومكوناتها المختلفة
- مجالات الاستخدام
- مبررات الاستخدام
- طرائق الاستخدام
- خواص الخرسانة الطازجة والمتصلبة ومكوناتها الأساسية والطرائق المخبرية المتبعة لتحديدتها
- الخرسانة المسلحة العادية وميزات التسليح
- طرائق الحساب المتبعة في مرحلتي التحليل الإنشائي وتصميم المقاطع والعناصر الخرسانية المسلحة، إضافة لمواضيع أخرى متعددة.
- تتكون الخرسانة المسلحة العادية - كمادة مصنعة بشكل أساسي من مادتين رئيسيتين:

- الخرسانة العادية بمكوناتها الأساسية: الإسمنت، الحصىات بنوعها الناعم / الرمل / الخشن / البحص / الماء وبعض الإضافات الخاصة وغير ذلك.
- قضبان التسليح الفولاذية الموزعة والمتراطة فيما بينها ضمن الخرسانة وفق اشتراطات معتمدة.

تمثل الخرسانة بأنواعها المختلفة المادة الرئيسة المستخدمة للبناء والإنشاء في معظم المنشآت الهندسية المعاصرة، المطمورة منها والمكشوفة على السواء، وقد تبوات هذا الموقع خلال عقود كثيرة مضت، وهي مرشحة للمحافظة على هذا الدور لعقود أخرى قادمة، وقد حصلت الخرسانة المسلحة على حصة وافرة من هذا التطور نتيجة الاختبارات المتعددة والممارسة العملية، واكتسبت الكثير من الميزات الإيجابية الإضافية، وتم تجاوز الكثير من سلبياتها، الأمر الذي يمكن ملاحظته من خلال السهولة المتنامية في تصنيعها، الدقة في طرائق الحساب، المرونة المعمارية المجربة، تكنولوجيا الإنشاء، والأداء المتميز والفعال في فترات الاستثمار، سواء بمفردها أو بأدائها مع مواد إنشائية أخرى (المنشآت المختلطة)، وغير ذلك.

اجتمعت في الخرسانة المسلحة العادية جملة من الميزات الإيجابية تتعلق بسهولة الإنشاء (الليونة المعمارية) والمقاومة الجيدة على الضغط والصلابة وديمومة الاستثمار ضمن الشروط المناسبة وغير ذلك، قلما تتميز بها مادة إنشائية أخرى، الأمر الذي لم تقصر بابراره المراجع ذات العلاقة، وهذا ما يقلل باستمرار من نتائج السلبيات التي ما تزال تعانيها الخرسانة المسلحة العادية حتى الآن ومنها: ضعف مقاومتها على الشد، ووزنها الذاتي الكبير وغير ذلك، وهذا ما أدى إلى ظهور أنواع متقدمة منها، كما أشير إليه أعلاه.

لقد قام مؤلفو الكتاب بإعداده ليغطي مقرر الخرسانة المسلحة (1)، لطلاب السنة الثالثة باختصاص مدني عام وفقاً للخطة الدراسية الجديدة وتمشياً مع توجيهات الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة بشكل أساسي، وفق منهجية علمية واضحة ولغة سليمة وبسيطة يمكن للطلاب من خلالها العمل ذاتياً لفهم المواضيع الواردة في الكتاب، وبما يتوافق مع الساعات التدريسية النظرية والعملية المقررة أسبوعياً، وهي أربع ساعات نظرية وأربع ساعات عملية من أربع ساعات نظرية وأربع ساعات عملية، وقد تم عرض محتويات الكتاب ضمن بايين هما (إضافة للفهرس والمقدمة وقاموس المصطلحات العلمية المستخدمة والمراجع وغير ذلك):

(1) الباب الأول تحت عنوان: " مدخل إلى الخرسانة المسلحة "

ويتألف من أربعة فصول تعالج مواضيع حيوية حول الخواص الأساسية لكل من الخرسانة والتسليح المستخدم، واستعراض ظاهرة التماسك بين الخرسانة والتسليح.

❖ الفصل الأول تحت عنوان: " الخرسانة والخرسانة المسلحة المكونات الرئيسة) "

يقدم هذا الفصل معلومات ضرورية حول الخرسانة العادية من حيث التصنيف والمكونات الأساسية وتحديد الخواص الفيزيو-ميكانيكية في الحالة العادية وضمن بعض الشروط الخاصة، ويتضمن عدداً من الأمثلة الحسابية الإيضاحية حول تحديد مقاومة الخرسانة على الضغط والشد وغير ذلك.

❖ الفصل الثاني بعنوان: "مقاومة الخرسانة المتصلبة في المنشآت القائمة".

يركز على طرائق تحديد مقاومة الخرسانة المتصلبة بالطرائق المتلفة (اختبار الجزرات الخرسانية) وغير المتلفة كطريقة المطرقة الخرسانية وطريقة النبضات فوق الصوتية وغير ذلك، وقد زود هذا الفصل أيضاً بعدد من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل الثالث بعنوان: "الخواص الميكانيكية لفلواذ التسليح".
يستعرض أنواع التسليح المستخدم في الخرسانة المسلحة وأشكاله وتحديد الخواص الميكانيكية وغير ذلك من المعلومات الضرورية للحسابات الإنشائية.

❖ الفصل الرابع بعنوان: "التماسك بين الخرسانة وفلواذ التسليح".

تم التركيز هنا على موضوع التماسك بين الخرسانة وقضبان التسليح المغموسة فيها وآلية هذا التماسك والعوامل المؤثرة به تبعاً لنوع القضبان لمساء أو ذات نتوءات سطحية، وتم استعراض كيفية تحديد أطوال التثبيت وطرائق وصل القضبان وتثبيتها وكيفية التحقق من التماسك وأماكن توقيف القضبان عند الضرورة وغير ذلك، وتضمن هذا الفصل أمثلة حسابية توضيحية.

(2) الباب الثاني تحت عنوان: "حساب المقاطع الخرسانية المسلحة".
يتألف هذا الباب من تسعة فصول تبحث في حساب المقاطع الخرسانية المسلحة وفق حالة حد المقاومة القصوى وحالة حد الإجهادات المسموح بها وحالة حد التشققات وحالة حد السهوم، أعد الأستاذ الدكتور غسان محمود الفصول التالية بجزأها النظري والعملي وهي: الخامس والسادس والسابع والثامن، وساهم مع الدكتور قاسم زحيلي بإعداد الفصل التاسع بقسميه النظري والعملي، بينما قام الدكتور سليمان ناصيف بإعداد الفصول المتبقية كاملة بقسميها النظري والعملي وهي الفصل الثاني والثالث والرابع. وقد تم إعداد بقية الكتاب بمشاركة جميع المؤلفين.

❖ الفصل الأول تحت عنوان: "الجمال الإنشائية الحاملة ومبادئ الحساب".

يقدم معلومات حول النظم الإنشائية الأكثر استخداماً والتصنيف العام للعناصر الإنشائية الخرسانية المسلحة ويستعرض المبادئ العامة للتصميم الإنشائي وأسس

الحساب في إطار حالات حدود الاستثمار الحديدية وحالة حد المقاومة القصوى كإحدى حالات حدود الانهيار الحديدية وغير ذلك.

❖ الفصل الثاني وعنوانه: " العناصر الخاضعة للانحناء الجوائز".

يتحدث هذا الفصل عن طبيعة انحناء الجوائز المتجانسة والميزات الأساسية لأداء الجوائز الخرسانية المسلحة والحالة الإجهادية المرافقة في الحالتين: حالة عدم التشقق وحالة شكل التشققات، وتم توضيح ذلك بمثال توضيحي.

❖ الفصل الثالث بعنوان: " تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة إجهادات لتشغيل (طريقة المرونة)".

يستعرض هذا الفصل أهم فرضيات طريقة الإجهادات المسموح بها لتصميم المقاطع الخرسانية المسلحة الخاضعة للانحناء وقيم الإجهادات المسموح بها وفق الكود السوري والكود الأمريكي بهدف المقارنة، وقد تم البحث في تحقيق وتصميم المقاطع المستطيلة أحادية التسليح وثنائية التسليح، وكذلك المقاطع من الشكل T و L، وتم عرض العلاقات الحسابية الأساسية وإمكان الاستفادة من الجداول الجاهزة، وتم عرض العديد من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل الرابع تحت عنوان: " تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة حالة حد المقاومة القصوى".

تم تسليط الضوء في البداية على موضوع الموثوقية ومفهوم الأمان توطئة للدخول في طريقة الحساب وفق حالة حد المقاومة القصوى وفرضياتها الأساسية لجهة تراكيب الأحمال المعتمدة وما يتعلق بحالات تحقيق وتصميم المقاطع المستطيلة أحادية التسليح وثنائية التسليح، وكذلك المقاطع من الشكل T و L وطبيعة انهيار الجوائز الخرسانية المسلحة على الانحناء وتأثير نسب التسليح المستخدمة في هذا الموضوع، وتم استعراض الشروط البعدية واشتراطات التسليح المطلوبة، ودعمت هذه المعلومات بالمخططات التدفقية لخطوات الحساب وكذلك بالأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل الخامس بعنوان: " المقاطع الخاضعة للضغط المركزي (الأعمدة القصيرة)".

يستعرض هذا الفصل القضايا الأساسية المرتبطة بتحقيق وتصميم الأعمدة الخرسانية المسلحة القصيرة الخاضعة لأحمال ضاغطة مركزية بطريقتي الإجهادات المسموح بها وحد المقاومة القصوى، وتوطئة لذلك تم استعراض التصنيفات المتبعة للأعمدة مع التركيز على قضايا التحنيب والتسليح والتعريف بالأعمدة المسندة وغير المسندة جانبياً واشتراطات البعاد والتسليح وغير ذلك، وتم إيضاح ذلك بالأمثلة الحسابية المناسبة.

❖ الفصل السادس تحت عنوان: " المقاطع الخاضعة للضغط

اللامركزي".

تم التركيز في هذا الفصل على مسائل تحقيق وتصميم مقاطع الأعمدة الخرسانية المسلحة الخاضعة للضغط اللامركزي بطريقة حد المقاومة القصوى من خلال عرض العلاقات الأساسية والاشتراطات المطلوبة في الأعمدة القصيرة أو الطويلة (للاطلاع)، وكذلك في الجدران الحاملة من الخرسانة المسلحة، وكان التركيز واضحاً على خصائص ورسم مخططات الترابط الحديدية الداخلية وكيفية استخدامها لتحقيق الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي، وتم عرض مجموعة من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل السابع تحت عنوان: " الحساب وفق حالة حد

التشقق".

يعالج هذا الفصل حالة حد التشقق كإحدى حالات حدود الاستثمار الحديدية، وكيفية حساب العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات تحت تأثير الشد المركزي أو اللامركزي، وكذلك العناصر التي يسمح بتشكيل التشققات فيها. ويستعرض هذا الفصل أشكال التشققات الناتجة وأسبابها التي تعود للمراحل الزمنية المرتبطة بتشبيد المنشآت الخرسانية المسلحة، وهنا تم باختصار عرض وسائل التحكم بسعة التشققات الناتجة، وتم أيضاً عرض عدد من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل الثامن تحت عنوان: " الحساب وفق حالة حد التشكل

(السهوم)".

تم التركيز في هذا الفصل على مسألة السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة الخاضعة للانحناء وتحقيقها كحالة أساسية من حالات الاستثمار الحديدية، وذلك تحت تأثير الأحمال اللحظية والأحمال طويلة الأمد بشكل أساسي، وكمدخل إلى هذا الموضوع الحساس عرضت باختصار بعض القضايا الأساسية المرتبطة بمفهوم السهوم في العناصر المتجانسة (الحالة المرنة)، وأدرجت في نهاية الفصل مجموعة من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

❖ الفصل التاسع تحت عنوان: " تأثير التشوهات الحجمية

والسيلان في الخرسانة المسلحة".

يستعرض هذا الفصل أهم الخواص الانسيابية للخرسانة نتيجة الحرارة والانكماش والزحف وتأثير ذلك في الأداء الإنشائي العناصر الخرسانية المسلحة، وبخاصة التغيرات الحاصلة في الإجهادات والتشوهات في كل من الخرسانة والتسليح وتغير معامل المرونة وغير ذلك، وتم إيضاح ذلك بمجموعة من الأمثلة الحسابية التوضيحية.

إن ما يصبو إليه مؤلفو هذا الكتاب أن يكون التوفيق قد حالفهم بتقديم المعلومات الضرورية والكافية لأبنائهم الطلبة وزملائهم المهندسين والمختصين فيما يتعلق بالمفردات والمواضيع التي تطرق لها الكتاب، وأن تكون طريقة معالجة وتقديم هذه المعلومات قد أتت على مستوى طموحاتهم، ويسرهم في الختام أن يهدوا هذا العمل العلمي المتواضع لكل من قرر السير في طريق التحصيل العلمي الطويل، بهدف تحقيق حياة كريمة خاصة له والمساهمة في بناء بلدنا الحبيب سورية، ونهضة أمتنا العربية وشموخها، غير خائف من متاعب هذا الطريق ولا من طوله وتعرجاته المختلفة، ومع جزيل الشكر لكل من ساهم وقدم خيراً لهذا الكتاب لاسيما السادة الزملاء أعضاء لجنة التقييم العلمي واللغوي.

دمشق أيار 2011

والله ولي التوفيق

المؤلفون

الباب الأول

مدخل إلى الخرسانة المسلحة

An Entry to Reinforced Concrete

الفصل الأول: الخرسانة والخرسانة المسلحة والمكونات الأساسية

الفصل الثاني: مقاومة الخرسانة المتصلبة في المنشآت القائمة

الفصل الثالث: الخواص الميكانيكية للتسليح

الفصل الرابع: التماسك بين الخرسانة والتسليح



الفصل الأول

الخرسانة والخرسانة المسلحة (المكونات الرئيسية) Concrete and Reinforced Concrete (Main Ingredients)

1-1- تمهيد

1-2- الخرسانة في الشروط العادية

1-2-1- تصنيف الخرسانة

1-2-2- الخواص الأساسية لمكونات الخرسانة

1-2-3- الخواص الأساسية للخرسانة الطرية

1-2-4- الميزات الميكانيكية والفيزيو - كيميائية للخرسانة

1-3- الخرسانة في الظروف الخاصة

1-3-1- تسريع الحصول على المقاومة المطلوبة

1-3-2- الخرسانة في الطقس الحار

1-3-3- الخرسانة في الطقس البارد

1-4- أمثلة توضيحية



1-1 - تمهيد Preface:

ما تزال الخرسانة والخرسانة المسلحة منذ عقود كثيرة من الزمن حتى الآن، وستبقى لمدة طويلة أخرى كما يبدو مادة البناء الرئيسية المستخدمة في معظم المنشآت الهندسية على اختلاف تنوعها وجمالها الإنشائية وطبيعتها الاستثمارية، وذلك على الرغم من التطور العلمي الهائل في مجال مواد البناء، وظهور العديد من المواد البديلة الأخرى.

ما الخرسانة المسلحة؟

تعدّ الخرسانة المسلحة RC مادة بناء أساسية مركبة يتم تحضيرها من اتحاد مادتين أساسيتين هما: الخرسانة Concrete وقضبان التسليح الفولاذية Reinforcing Steel Bars التي يتم توزيعها في الجسم الخرساني وفق قواعد معينة سيتم الحديث عنها لاحقاً. بالنسبة للخرسانة هي مادة قوية (ذات مقاومة عالية نسبياً على الضغط وضعيفة على الشد) وذات ديمومة طويلة، ويمكن صبها وفق أي شكل معماري، أو أبعاد تتراوح من العناصر الإنشائية البسيطة في الأبنية العادية، وحتى المنشآت الضخمة، ويتحقق تكاملها وتنوعها باستخدام أفضل أشكال الخرسانة والتسليح، وفيما يتعلق بالتسليح، فالمقاومة على الشد والضغط أكبر بكثير مما هو عليه في الخرسانة، لكن مقاومته ضعيفة جداً للعوامل البيئية، وهو يتأثر بالمواد الكيماوية المختلفة، ويعاني بشكل أساسي من ظاهرة الصدأ، كما أن القضبان الفولاذية دون الخرسانة، لا تشكل جسماً متكاملأً صلباً. بشكل فولاذ التسليح - على شكل قضبان ملساء أو محلزنة - في العناصر الخرسانية المسلحة نحو 6% → 0.15 تقريباً من حجم هذه العناصر، أي إن نسبة حجم التسليح مقارنة مع حجم الخرسانة قليلة جداً، ويتم تحديد النسب الدنيا والعظمى وفقاً لنوع العنصر وطبيعة الأحمال المطبقة عليه وغير ذلك، على أن تستخدم النسب الاقتصادية قدر الإمكان، وتجتمع في الخرسانة المسلحة أهم الميزات الإيجابية لكل من الخرسانة والتسليح، إذ يتم فيها تجاوز الكثير من السلبيات المميزة لكل منهما على انفراد.

جاءت فكرة الخرسانة المسلحة كمادة إنشائية انطلاقاً من الميزات الإيجابية والسلبية لكل من الخرسانة وفولاذ التسليح على انفراد، الشكل (1-1)، إذ إن:

- مقاومة الخرسانة في الضغط Compressive Strength أكبر بكثير مما هو عليه في حالة الشد Tensile Strength، بينما يتميز فولاذ التسليح بمقاومة مرتفعة على الشد، وكذلك على الضغط أيضاً عند تأمين استقراره على التحنيب الجانبي Lateral Buckling.

- يتطلب إنتاج العناصر الفولاذية وتحضيرها بالشكل المطلوب نفقات كبيرة مقارنة مع الخرسانة التي يمكن تحضيرها بسهولة من مواد متوافرة ورخيصة.

- تحتاج العناصر الفولاذية إلى صيانة دائمة، كونها أكثر عرضة من الخرسانة لمختلف المؤثرات الكيماوية والعوامل الضارة الأخرى.

هذا يعني أن اتحاد الخرسانة مع قضبان التسليح المغموسة فيها بفضل ظاهرة التماسك *Bond Phenomenon* التي تحصل بينهما يؤمن الميزات الميكانيكية والفيزيائية الضرورية وغيرها من الإيجابيات الأخرى المطلوبة في مواد الإنشاء المستخدمة، ويضمن الأداء اللازم للعناصر المنفذة منها وفقاً لطبيعة الإجهادات الناتجة عن الأحمال المطبقة المباشرة وغير المباشرة، وهي بشكل عام إجهادات ضاغطة *Compressive Stresses*، أو إجهادات شادة *Tensile Stresses*.

الخرسانة	الفولاذ	شد
سيئة	جيد	steel
جيدة	جيد ولكن القضبان النحيفة قابلة للتخيب	ضغط
معتلة	جيد	قص
جيدة	معتدل لكنه يصدأ في حال عدم الحماية	بمومة
جيدة	سيء لكنه يعاني فقداناً سريعاً للمقاومة بوجود الحرارة المرتفعة	concrete
		مقاومة الحريق

الشكل (1-1) شكل يوضح ميزات هامة للخرسانة العادية وفولاذ التسليح

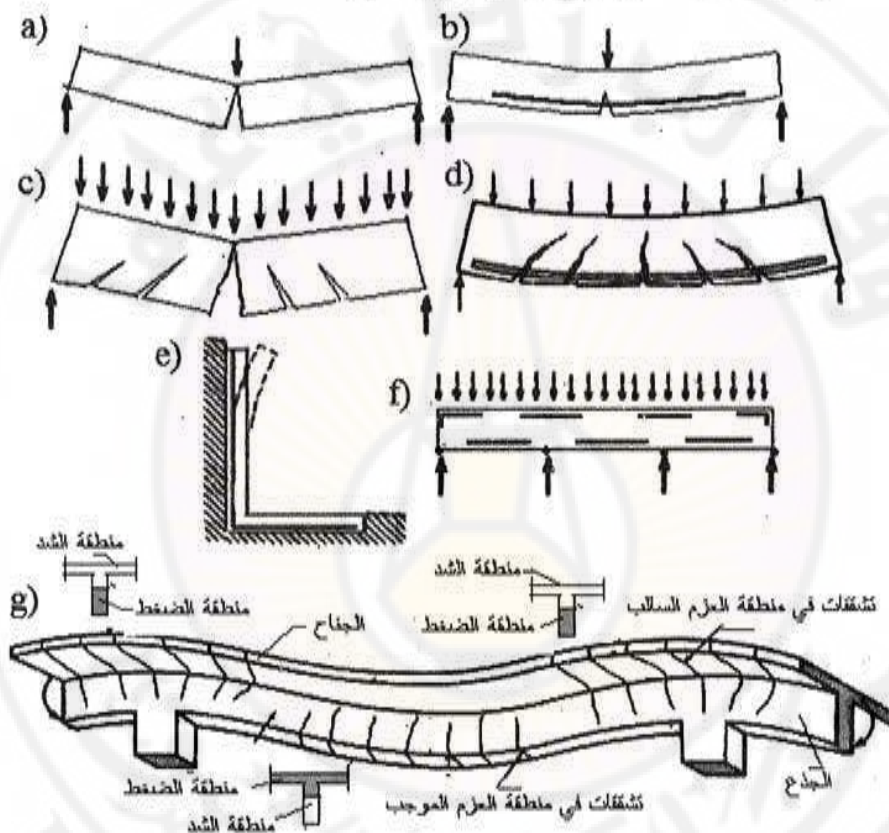
في العناصر الإنشائية المختلفة، يتم استثمار قدرة الخرسانة الجيدة على الضغط في المناطق المضغوطة بشكل أساسي، إضافة للتسليح عند الضرورة، ومن أجل تخفيض المقاطع العرضية إلى الحدود المعقولة في العناصر المعرضة للضغط بشكل أساسي، ويتم استخدام قضبان التسليح في المناطق الخاضعة لإجهادات شادة، إذ يقوم التسليح عندئذ بامتصاص هذه الإجهادات بشكل أساسي، وهذا ما سيتم توضيحه في الفصول القادمة، الشكل (1-2).

يتم إنتاج العناصر الخرسانية المسلحة بطرائق مختلفة لتكون غالباً:

- عناصر مصبوبة مباشرة في موقع البناء *Cast-in Place Members*
- عناصر مسبقة الصنع *Precast Members*، يتم تحضيرها في المصانع الخاصة مسبقاً، ثم تنقل إلى مواقع البناء ويتم ربط بعضها ببعض وفق أساليب معينة.

- عناصر مسبقة الإجهاد *Prestressed Members*، يتم توليد إجهادات شد مسبقة في فولاذ التسليح بطريقة الشد اللاحق أو السابق *Pre-tension or Post-tension*، الأمر الذي يولد إجهادات ضاغطة على الخرسانة تعمل على الحد بدرجة كبيرة من تشكل التشققات *Cracks* فيها نتيجة لتخفيض الإجهادات الشادة المتولدة عن الأحمال المختلفة.

- عناصر خرسانية مسلحة بالألياف *Fibred- Reinforced Concrete Members*، حيث يستعاض عن قضبان التسليح جزئياً أو كلياً بمركبات ليفية مصنعة.



الشكل (1-2) تشقق الخرسانة واستخدام التسليح المشدود (التسليح الثانوي غير مرسوم):

- (a) كمره خرسانية خاضعة لحمولة مركزة دون تسليح
- (b) كمره خرسانية خاضعة لحمولة مركزة مع تسليح مشدود
- (c) كمره خرسانية دون تسليح خاضعة لحمولة موزعة بانتظام
- (d) كمره خرسانية خاضعة لحمولة موزعة بانتظام مع تسليح في منطقة الشد، (c) جدار استنادي
- (f) كمره خرسانية مستمرة مع تسليح في مناطق الشد
- (g) انحناء وتشقق كمره مستمرة من الخرسانة المسلحة (أحمال مطبقة من الأعلى)

- عناصر خرسانية مسلحة بالأسلاك المعدنية، حيث يستعاض عن قضبان التسليح بأسلاك معدنية صغيرة القطر يتم توزيعها على شكل شبكات وغير ذلك، وتكون المقاطع الناتجة رقيقة وذات مقاومة وصلابة عالية نسبياً، مقارنة مع العناصر الخرسانية المسلحة العادية.

- عناصر خرسانية مسلحة بمقاطع الفولاذ البروفيلي (القاسي)، مع استخدام قضبان عادية محيطية.

وإضافة لذلك، يمكن أن يتم إنتاج عناصر ذات مقاطع عرضية مجنحة مختلطة على شكل T تعمل ككمرات $Beams$ فيها الجذع Web من الفولاذ البروفيلي القاسي والبلاطة العلوية من الخرسانة، أو من خرسانة مسبقة الصنع مع خرسانة مصبوبة في الموقع، وهذا ما يسمى العناصر المختلطة $Composite Members$ ، وتتحدد درجة الأداء المشترك فيها وفقاً لدرجة الارتباط بين العناصر المكونة لها، وطبيعة الإجهادات الناشئة وغير ذلك.

تتميز العناصر الإنشائية المنفذة من الخرسانة المسلحة العادية بجملة من المحاسن وعدد من المساوئ يمكن إيجازها كما يلي:

- (أ) المحاسن $Advantages$: من أكثر ما تتميز به العناصر الخرسانية ما يلي:
- الديمومة $Durability$ ، إذ يمكن استثمار هذه العناصر لفترات طويلة دون فقدانها للخواص التصميمية الميكانيكية والفيزيائية وغيرها ضمن شروط الاستثمار العادية، أي القدرة على الاحتفاظ بالمقاومة الثابتة والمستقرة (بفضل انعدام التفاعلات الكيماوية بين الخرسانة والتسليح المغموس فيها وميكانيكية الالتحام الشديد بين هاتين المادتين)، وهي قادرة على تحسين قدرة تحملها $Load-Bearing Capacity$ ، إضافة للكثير من خواصها الإيجابية الأخرى مع مرور الزمن بالرغم من أن تزايد المقاومة يصبح ضعيفاً بعد مرور 28 يوماً من تاريخ الصب، بينما تتطلب مواد الإنشاء الأخرى كالفولاذ والخشب الرعاية الدائمة والمكلفة، ويمكنها أن تفقد الكثير من مقاومتها التصميمية مع الزمن.
 - مقاومة الحريق والحرارة المرتفعة بفضل قدرة الخرسانة على القيام بذلك وحماية التسليح بداخلها من تأثير اللهب والحرارة المرتفعة، وفي هذا الصدد من المفضل ألا تزيد درجة الحرارة على $300^{\circ}C$.
 - انخفاض مستوى الحماية الضرورية من العوامل الضارة كالمواد الكيماوية وغيرها مقارنة مع العناصر الفولاذية المعرضة للصدأ وغيره من الأفعال المؤذية.

- الصلابة *Rigidity*، وذلك لأن المقاطع الخرسانية المسلحة كبيرة بشكل عام مقارنة مع المقاطع الفولاذية مثلاً، الأمر الذي يخفض كثيراً من السهوم *Deflections* ، والتشوهات الأخرى ويبقيها ضمن شروط الاستثمار الملائمة، ويحسن أداءها تحت تأثير الأحمال الديناميكية *Dynamic Loads*، وتزداد هذه الصلابة مع زيادة صلابة عقد الارتباط *Connection Joints* بين العناصر الإنشائية .
- الأداء الميئي *Monolithic Behavior* للعنصر الخرساني المسلح ككتلة متكاملة تحت تأثير الحمولات الستاتيكية *Static Loads* بشكل أساسي، ويمكنها أيضاً أن تعمل كجملة متكاملة مع العناصر الأخرى عند صبها معاً صباً مستمراً ، وهذا ما جعل من الأساسات الخرسانية المسلحة مثلاً *RC Foundations* أساسات ناجحة فوق التربة غير المتجانسة والمعرضة لهبوطات تفاضلية *Differential Settlements* .
- المرونة المعمارية *Architectural Buildability*، أي سهولة صب الخرسانة وفق أشكال القوالب المختلفة المطلوبة معمارياً، ويعود الفضل في ذلك إلى طراوة الخرسانة الطازجة التي توفر إمكانية تكيفها مع المتطلبات الإنشائية والمعمارية، ولا يتطلب صب الخرسانة بدأ عاملة ماهرة كما هو الحال في المنشآت المعدنية وغيرها، إضافة لإمكانية استخدام الوسائل التقنية المتعددة في تسهيل التعامل مع الأعمال الخرسانية المختلفة.
- إمكانية استخدام المواد الرخيصة المتوافرة محلياً لصناعة الخرسانة كجزء أساسي في الخرسانة المسلحة، وهذا ما يقلل الكلفة النهائية المرتبطة بتحضير الخرسانة ونقلها وغير ذلك.
- إمكانية التحكم بالتركيب الحبي للخرسانة واستعمال الأنواع المناسبة من الإسمنت والتدرج المناسب للحصويات التي تكون بنسبة كبيرة من الحصويات الناعمة وبعض الإضافات الخاصة مثل السيليكا فيوم (غبار السيلك *Silica Fume*) والملدنات *Plasticizers* للحصول على أنواع خاصة من الخرسانة ذات ميزات ميكانيكية وفيزيائية عالية يمكن استخدامها في الحالات الخاصة للتدعيم والأبنية العالية والعناصر التي تتطلب مقاومة عالية على الضغط، وذلك دون زيادة التكاليف زيادة كبيرة، وهذه الأنواع المتقدمة من الخرسانة ذات درجة تراص عالية (الفراغات شبه معدومة). ومن هذه الأنواع المتقدمة من الخرسانة ذات استخدامات متعددة مثل: الخرسانة عالية المقاومة والأداء والخرسانة فائقة الأداء *Ultra high performance concrete (UHPC)* التي تتميز بالمقاومة العالية

على الضغط (أكبر من $150MPa$ وقد تتجاوز مقاومة الفولاذ بشكل كبير) ولكنها تتكسر بشكل هش) لذلك تضاف إليها الألياف القصيرة المعدنية أو العضوية وغيرها لتأمين المطاوعة المطلوبة) والخرسانة ذاتية التراص *Self-compacting concrete* التي لا تحتاج للرج وخرسانة اليوم الواحد *One day concrete* التي يمكن أن تكتسب المقاومة على الضغط بعد يوم واحد من الصب ضمن شروط محددة وغير ذلك.

ب) المساوئ *Disadvantages*: لا تخلو العناصر الخرسانية المسلحة من عدد من الميزات السلبية التي لا تقل بشكل عام من أهميتها في معظم الإنشاءات الهندسية، ومنها ما يلي:

أ- الوزن الذاتي الكبير للخرسانة المسلحة، إذ يعدّ الوزن الحجمي *Unit Weight* للخرسانة المسلحة في الأحوال العادية، مساوياً $25kN/m^3$ (من أجل نسبة تسليح لا تزيد على 1%)، على أن يؤخذ الوزن الزائد نتيجة استخدام الحصىات الثقيلة أو عند استخدام نسب تسليح كبيرة، وللخرسانة غير المسلحة $22kN/m^3$ إذا كان الركام المستخدم (الحصىات *Aggregates*) كلسياً و $24kN/m^3$ إذا كان الركام سيليسياً (بازلت، حجر بركاني، رمل وحصى فراتي)، وذلك عند عدم وجود معطيات وزنية دقيقة. يسبب هذا الوزن الكبير أحمالاً شاقولية إضافية كبيرة تضاف إلى الأحمال المطبقة أصلاً، مقارنة مع غيرها من المواد الإنشائية البديلة الأخرى، ويعود ذلك بالدرجة الأولى إلى انخفاض مقاومة الخرسانة على الضغط بنسبة كبيرة مقارنة مع الفولاذ، الأمر الذي ينتج عنه بالنهاية مقاطع عرضية كبيرة عند التصميم، ولذلك يصبح من الضروري السعي دائماً لاستخدام الجمل الإنشائية المناسبة، إضافة لتحسين مقاومة الخرسانة عن طريق الاختيار الأمثل لمركباتها والرعاية المطلوبة، وكذلك استخدام التسليح بالشكل المناسب والتوزيع المناسب أيضاً ضمن المقاطع العرضية، وعند استعمال الركام من النوع الثقيل، أو عند استخدام نسب عالية للتسليح يؤخذ بالحسبان الوزن الإضافي الناتج.

ب- العمل المضني المرتبط بأعمال الخرسانة المسلحة، وهذا يرتبط بشكل أساسي بما يلي:

- 1) أعمال تحضير وتثبيت وفك القوالب *Forms* من أجل صب الخرسانة
- 2) أعمال تحضير ونقل وصب وحرص الخرسانة في القوالب المجهزة
- 3) أعمال تحضير قضبان التسليح بالشكل المطلوب تصميمياً وتوزيعها في القوالب قبل صب الخرسانة وفق الاشتراطات المعمول بها

من الطبيعي أن تنخفض الجهود المبذولة باستخدام التكنولوجيا الآلية ما أمكن، والابتعاد عن الأساليب اليدوية، وهذا ما يحدث بشكل خاص عند استخدام العناصر مسبقة الصنع مثلاً.

ج- طول مدة العمليات التكنولوجية الرطبة المرتبطة بتصلب الخرسانة، إذ يستغرق اكتساب المقاومة اللازمة في الشروط النظامية وباستخدام الأنواع العادية من الإسمنت نحو 28 يوماً، ويصبح الوقت أطول في درجات الحرارة المنخفضة، ولذلك يتم في مثل هذه الحالة استخدام طرائق تكنولوجية معينة وأنواع خاصة للإسمنت وغير ذلك لتسريع عملية التصلب، أو يمكن اللجوء إلى استعمال العناصر الخرسانية المسلحة مسبقة الصنع.

د- سهولة تشكل التشققات *Crack Formation* وظهورها بسبب ظاهرة الانكماش *Shrinkage Phenomenon*، وهي الظاهرة التي تعانيها الخرسانة حديثة الصب، وتسبب نشوء إجهادات شادة قد تزيد على مقاومة الخرسانة على الشد *Tensile Strength*. يتطلب هذا الأمر اتخاذ الإجراءات التي تحد من ظاهرة الانكماش بأساليب معمارية وحسابية وتكنولوجية وغير ذلك.

هـ- التأثير بالكيماويات الضارة، خاصة التسليح عند وجود التشققات والعيوب المختلفة في الخرسانة التي تعاني هي أيضاً تأثير عدد من الظواهر الكيماوية، كعملية الكربنة والتآكل الهيدروجيني وغير ذلك، ويمكن تصنيف المؤثرات الكيماوية الضارة على العناصر الخرسانية المسلحة وفقاً لشدة الضرر كما يلي:

1) تعذ الأحماض *Acids* أشد ضرراً على الخرسانة، إذ تتفاعل مع المركبات الكلسية الموجودة في الإسمنت مسببة تخريب البنية الداخلية، ولأن الطبقات الخارجية من الخرسانة تعاني أكثر من غيرها، يصبح التسليح تحت رحمة هذه الكيماويات مباشرة، وهو الأكثر حساسية للأحماض، بخاصة حمض الكبريت وحمض كلور الماء ومركبات الكلور (الكلوريدات *Chlorides*).

2) في حال تأثير الأحماض ذات الطابع البطيء، يمكن استخدام الخرسانة المسلحة بشرط أن تكون الخرسانة مرصوفة جيداً (بطرائق ميكانيكية).

3) عند تنفيذ الأساسات الخرسانية المسلحة المعرضة لتأثير المياه الملوثة كيميائياً (مياه الصرف الصحي مثلاً)، ينبغي استخدام وسائط العزل المناسبة، ويمكن عندئذ استعمال إسمنت خبث أفران الصلب أو الإسمنت الغضاري في الخرسانة وفقاً لدرجة التآكل المحتملة.

4) يؤثر حرق وقود المصانع المتضمن مركبات الكبريت سلباً في الخرسانة المسلحة بدرجة كبيرة، وتؤثر الدهون العضوية والسكر بدرجة أقل، هنا يمكن استخدام الخرسانة

المرصوصة ميكانيكياً، مع زيادة محتوى الإسمنت على الحد الطبيعي، وكذلك زيادة سمك طبقة الحماية الخرسانية للتسليح.

و- تعدّ عوامل التمدد الحراري والناقلية الصوتية عالية في الخرسانة المسلحة، إذ يزيد معامل التمدد الحراري للخرسانة بنحو مرتين ونصف عما هو عليه في القرميد، ويزيد كذلك معامل الناقلية الصوتية، وهنا يفضل استخدام الخرسانة الخفيفة *Light Concrete* (الخرسانة ذات الفراغات الداخلية).

ز- يحتاج صب العناصر الخرسانية المسلحة إلى استهلاك كميات كبيرة من الخشب كقوالب تقليدية غير قابلة في معظمها لإعادة الاستخدام، ويمكن الإقلال من استهلاك الأخشاب باستعمال قوالب غير خشبية، أو استخدام العناصر مسبقة الصنع.

ح- المصاعب المرتبطة بتغيير الجمل الإنشائية القائمة من الخرسانة المسلحة، وهذا موضوع حيوي عند ضرورة إعادة تأهيل المنشآت *Structure Rehabilitation*، ويشمل ذلك إجراءات الصيانة *Maintenance* والإصلاح *Repair* والترميم أو التدعيم *Retrofit* والتقوية *Strengthening* وغير ذلك.

ط- عدم إمكانية استخدام بقايا الخرسانة المسلحة مرة أخرى لتحضير عناصر جديدة، وإن حدث ذلك ففي مجالات ضيقة جداً غير مهمة إنشائياً.

ي- ضرورة التحكم بظرواوة الخرسانة لتلبي متطلبات الصب في العقد الإنشائية المختلفة *Structural Joints*، وذلك بهدف انتشار الخرسانة في مناطق كثافة التسليح والحصول على مقاطع أكثر اكتنازاً وترصاً (دون تعشيش).

وفي كل الأحوال، لا بدّ من أخذ الإيجابيات الكبيرة للخرسانة المسلحة وتفوقها على السلبيات المذكورة أعلاه، وهي النقاط التي يمكن تجاوزها في أكثر الحالات، وهذا ما يحدث فعلاً منذ سنين طويلة.

1-2- الخرسانة في الشروط العادية *Concrete under Normal Conditions*

تمثل الخرسانة والتسليح المكونات الرئيسية للخرسانة المسلحة، وفيما يلي بعض الخواص الأساسية للخرسانة بشكل عام مع التركيز على الخرسانة العادية.

تشكل الخرسانة الحجم الأكبر في العناصر الخرسانية المسلحة مقارنة مع فولاذ التسليح، وهي مادة مركبة يتم تحضيرها اعتماداً على اتحاد مجموعة من المواد الجزيئية

التي ترتبط فيما بينها كيميائياً بعد الصب. تتركب الخرسانة العادية بشكل عام من خلط مجموعة من المواد الأساسية بنسب محددة تضمن الحصول على خواص الخرسانة المطلوبة، الشكل (1-3). والخرسانة بشكل عام ذات مقاومة جيدة على الضغط وضعيفة على الشد، وتأخذ شكل القوالب المصبوبة فيها، وهي مقاومة للعوامل البيئية بشكل كبير نسبياً مقارنة مع الفولاذ. والمكونات الأساسية للخرسانة العادية:

- الإسمنت.
- الحصىات (رمل + حصص).
- الماء.
- إضافات أخرى متنوعة لتحسين خاصة أو أكثر في الخرسانة.

1-2-1- تصنيف الخرسانة Concrete Classification:

يمكن تصنيف الخرسانة وفقاً لمعايير متعددة منها الوزن الحجمي وطريقة التصنيع و نوع الحصىات وطريقة الصب والمقاومة على الضغط، الأداء والديمومة وغير ذلك. فمثلاً:

▪ وفقاً لمعيار الوزن الحجمي ونوع الحصىات:

- الخرسانة الخفيفة *Light Concrete*، وهي الخرسانة التي يقل وزنها الحجمي عن $18kN/m^3$ ، ويتم تحضيرها باستخدام حصىات خفيفة الوزن أو بتشكيل فراغات معينة عبر تمرير تيارات هوائية أثناء الصب، أو باستخدام إضافات خاصة معينة، حيث تتشكل بذلك بنية تشبه الإسفنج لوجود الفراغات فيها، الأمر الذي يبرر استخدام مصطلح الخرسانة الإسفنجية *Sponge Concrete*، وتستخدم الخرسانة الخفيفة في مجالات متعددة كمواد عازلة أو كعناصر إنشائية غير حاملة.

- الخرسانة العادية باستخدام حصىات مصنعة (غير طبيعية) أو رسوبية وغيرها ذات بنية إسفنجية، ويكون الوزن الحجمي مساوياً $22KN/m^3 \rightarrow 18$.

- الخرسانة العادية باستخدام حصىات باطنية المنشأ *Mineral Aggregates*، أو حصىات رسوبية *Sediment Aggregates*، ويكون الوزن الحجمي للخرسانة مساوياً $26kN/m^3 \rightarrow 22$ ، وتستخدم الخرسانة العادية في العناصر الإنشائية الحاملة لتأمين قدرة التحمل *Load-Carrying Capacity*، وكذلك مقاومة العوامل الجوية والميكانيكية والكيميائية بدرجات مختلفة.

- الخرسانة الثقيلة *Heavy Concrete* باستخدام حصويات خاصة ثقيلة، ويكون الوزن الحجمي أكبر من $26kN/m^3$ ، وتستخدم الخرسانة الثقيلة لأهداف خاصة لمقاومة الأشعة الكهرومغناطيسية وغير ذلك.

▪ وفقاً لطريقة التحضير والصب والتصنيع:

- الخرسانة المصبوبة في الموقع *Cast-in Place Concrete*، حيث يتم وضعها ضمن قوالب معينة، ويتم رجمها بالطرائق المناسبة (توفر مرونة معمارية شبه مطلقة، يمكن تغيير التصميم في أي وقت والصب مباشرة دون عوائق، ارتباطات العناصر الإنشائية صلبة ومتجانسة، وهذا ما يقلل الأخطار المتعلقة بتآكل التسليح وغير ذلك).

- الخرسانة مسبقة الصنع *Precast Concrete*

- الخرسانة مسبقة الإجهاد، *Prestressed Concrete*

- الخرسانة المرشوشة *Sprinkled Concrete* بالضغط باستخدام وسائل ضخ معينة

- الخرسانة المقذوفة *Shotcrete*

▪ وفقاً لمعيار المقاومة على الضغط:

- الخرسانة الضعيفة (خرسانة النظافة والأعمال الثانوية كالردم مثلاً)

- الخرسانة العادية (للأعمال الخرسانية في المنشآت والعناصر الحاملة العادية)

- الخرسانة عالية المقاومة والخرسانة فائقة المقاومة للاستخدام في حالات ومنشآت ذات طبيعة خاصة.

▪ وفقاً لمعيار مجالات الاستخدام للخرسانة:

يصنف الخرسانة وفق طبيعة المنشأة المستخدم في صيها فنقول عنه:

- خرسانة للأعمال المدنية

- خرسانة للأعمال الصناعية

- خرسانة للمنشآت المائية

- خرسانة للطرق ... الخ

▪ معيار قوام الخرسانة الطازجة:

يعبر عنه باستخدام مصطلحات تجربة هبوط المخروط أو انتشار الخرسانة الطازجة على طاولة خاصة

- أ - الخرسانة جامدة القوام : يبلغ هبوط المخروط لهذا الخرسانة بين (0 إلى 5) سم
- ب- الخرسانة مائعة القوام : يبلغ هبوط المخروط لهذا الخرسانة بين (5 إلى 10) سم ، يبلغ أيضاً قطر انتشار الخرسانة الطازجة على الطاولة بحدود (40 إلى 50) سم
- ج- الخرسانة سائلة القوام: حيث يبلغ هبوط المخروط لهذا الخرسانة الطازجة بحدود (10 إلى 18) سم، ويبلغ قطر انتشار الخرسانة الطازجة على الطاولة بحدود (50 إلى 60) سم.

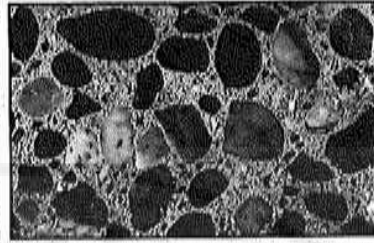
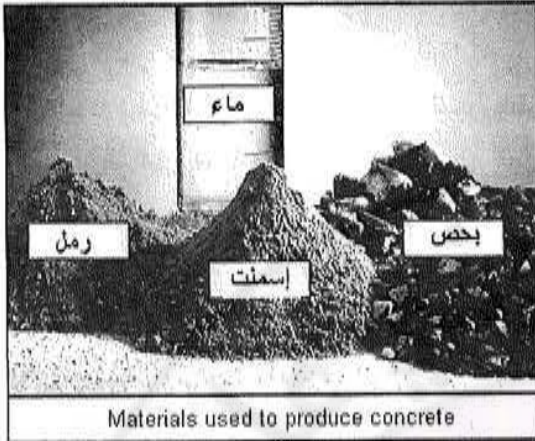
1-2-2- الخواص الأساسية لمكونات الخرسانة:

تمثل الحصىات، الإسمنت، الماء والإضافات المناسبة أهم مكونات الخرسانة

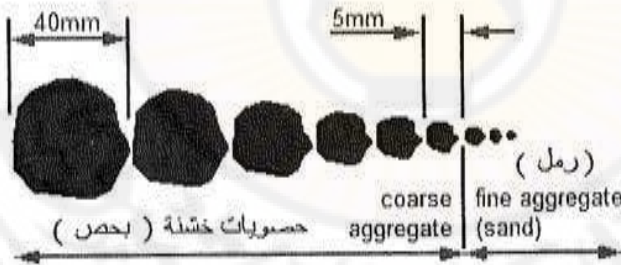
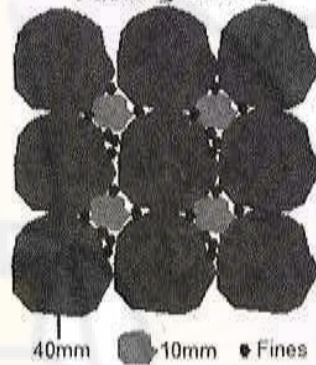
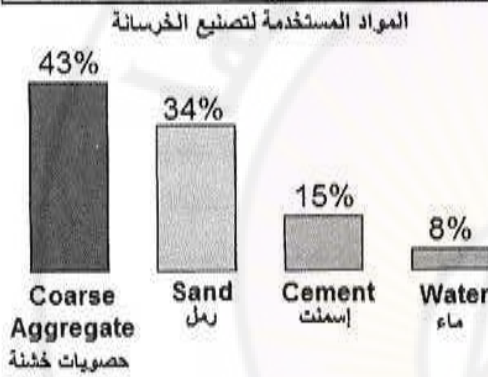
▪ الحصىات *Aggregates*:

تشكل الحصىات (الركام) بنوعيهما الناعم *Fine Aggr.* (الرمل *Sand*) والخشن *Coarse Aggr.* (البحص أو الزلط *Gravel*) نحو 90% → 70 من الحجم الكلي للخرسانة الناتجة، أي إنها العنصر المسيطر من الناحية الحجمية ، وهي تحدد بشكل أساسي الوزن الحجمي للخرسانة الناتجة ويحدد تدرجها الحبي *Granular Grading* ومقاومتها مع نوعية الإسمنت المستخدم العامل الأساسي في تحديد المواصفات النهائية للخرسانة الناتجة. تكون الحصىات الطبيعية (من الصحراء أو مجاري الأنهار) ملساء السطح عادة ومستديرة، دون حاجة لتكسيرها كما هو الحال في الحصىات ذات المنشأ الانفداعي التي تكون في البداية على شكل صخور ينبغي تكسيرها وتنعيمها وفقاً للحجم المطلوب، وتكون الحبيبات الحصىة الناتجة ذات حواف حادة. وتستخدم في الوقت الحاضر حصىات مصنعة ذات طبيعة خاصة (خبث الحديد، الطين المحروق مثلاً)، الشكل (1-3-أ ، ب). يمثل الرمل الجزء الناعم من الحصىات، وهو يقوم بملء الفراغات بين حبيبات الحصىات الكبيرة، وتمر حبيباته من فتحات للمهزات قطرها حتى 5mm، وأما الحصىات الخشنة فهي ذات حبيبات تمر من فتحات للمهزات حتى 40mm أو أكثر من ذلك في حالات معينة، وفي كل الأحوال، يجب أن تتميز الحصىات المستخدمة في الخرسانة بعدد من الخواص أهمها:

- الصلابة ومقاومة الصقيع، كما هو الحال بالنسبة للصخور البازلتية والجرانيتية
- مقاومة على الضغط لا تقل عن 50MPa (لا تقل عن ضعف مقاومة الخرسانة المطلوبة على الضغط بشكل عام)

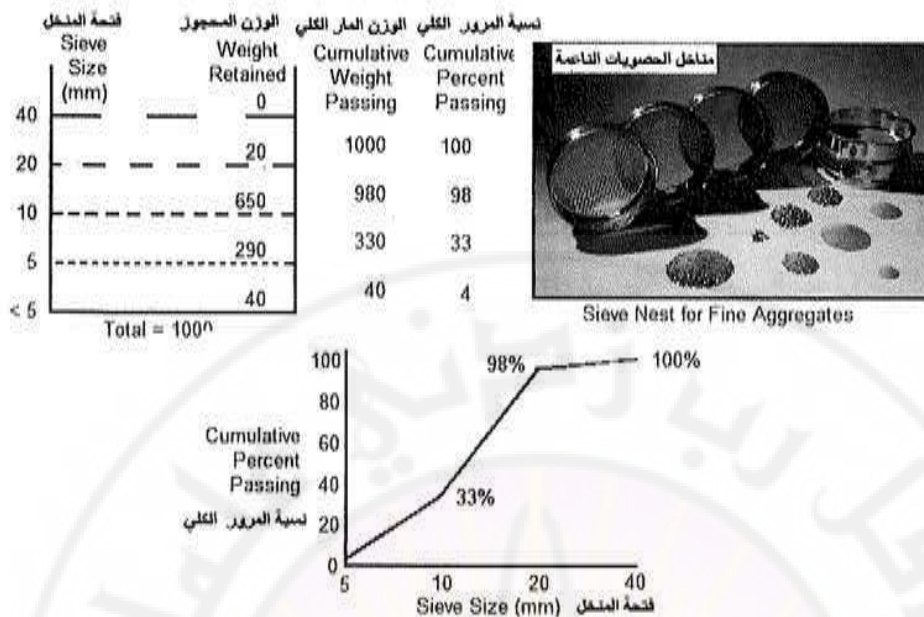


تأثير مقاس الحبيبة على شدة التغليف
Effect of Particle Size on Packing Density



الشكل (1-3-أ) مكونات الخرسانة العادية الأساسية ونسبها التقريبية وشكل المقطع العرضي بعد التصلب

- لا تتعدى القدرة الامتصاصية للسوائل *Liquid Absorbability* مقدار 4% ، وفي حالات خاصة 2% في المنشآت المعرضة للصقيع والرطوبة الشديدة
- يجب أن تكون الحصويات غير قابلة للتحلل بالماء، وأن لا تحوي عناصر قابلة للتحلل أو لتغيير الحجم حين تعرضها للعوامل الطبيعية



الشكل (1-3-ب) استخدام المهزات من أجل التحليل الحبي للحصويات.

- يجب أن يكون عامل التمدد الحراري للحصويات مساوياً تقريباً لعامل التمدد الحراري للمونة الإسمنتية خشية حدوث إجهادات حرارية.
- يتم اختيار المقاس الاعتباري للحبيبات الحصوية وفقاً لنوع العناصر والمنشآت الخرسانية المسلحة المنوي تشييدها (عناصر عادية وعناصر كتلية *Massive Members* وعناصر خفيفة التسليح وعناصر كثيفة التسليح وعناصر رقيقة وعناصر سميكة وخرسانة نظافة وغير ذلك)، ويشكل عام يجب أن يكون أقل من ربع المقاس الأصغر للجزء المطلوب صبه بالخرسانة، وكذلك أقل من أصغر مسافة بين أسياخ التسليح *Reinforcement*.
- يجب أن تكون الحصويات نظيفة، أي خالية من الفضلات والمواد العضوية كأوراق الشجر ونفايات الأخشاب والدهون والسكريات والغضار والغبار والجبس والمركبات الكبريتية وغير ذلك من المواد الضارة لكل من الخرسانة والتسليح (يفضل غسل الحصويات قبل استخدامها).
- من المسائل الهامة عند اختيار الحصويات الداخلة في تركيب الخرسانة، كما ذكر أعلاه، موضوع التدرج الحبي، أي إن تكون أقطار الحبيبات الحصوية متسلسلة قدر الإمكان من حيث القطر، ومن حيث النسب الوزنية لمحتوى الشرائح الممثلة للأقطار

المستخدمة، الأمر الذي يتم من خلاله تحقيق النسب المارة من والمحجوزة على المهزات النظامية *Regular Sitos* المعروفة.

يُعد التدرج الحبي للحصويات من أهم العوامل التي تؤثر في الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة. بشكل عام، يفضل أن يكون للحصويات في الخرسانة تدرجاً حبيباً مستمراً، أي أن يتم خلط الحبيبات ذات الحجوم المختلفة والمكونة للحصويات وفق نسب معينة، وبحيث تحقق للخلطة حجماً أصغرياً للفراغات بداخلها. ويمكننا القول إن التركيب الحبي المناسب من أهم الشروط التي يجب أن تحققها الحصويات.

تعطي الكودات منحنيات حبية حدية معتمدة على الخبرة والتجارب (منحنيات حبية نظامية)، ويتم مقارنتها مع الإحصارات والتدرج الحبي المتوفر في المقالع. تبين لنا المنحنيات الحبية المجال الذي يسمح فيه أن يتغير التركيب الحبي للحصويات.

إذا كان المنحني الحبي للحصويات واقعاً تحت المجال الجيد فهذا يعني أن الحصويات المدروسة فقيرة بالمواد الرملية، وإذا لم نستطع تصحيح معامل نعومة هذه الحصويات في الورشة العادية، فعند ذلك نلجأ إلى الاستغناء عن الحبيبات الناعمة بوضع كمية كبيرة من الإسمنت لسد هذه الفراغات في التدرج الحبي، الشيء الذي يؤدي إلى استهلاك كمية كبيرة من الإسمنت، وهو الأمر الذي يُعد غير اقتصادي.

وإذا كان المنحني الحبي للحصويات المدروسة يقع فوق المجال المستخدم، فهذا يعني أن الأجزاء الناعمة من الحصويات نسبتها عالية، وإذا لم نستطع أن نخلطها ونعدل تدرجها الحبي في الورش العادية، الشيء الذي يؤدي إلى كون الحصويات الكبيرة لا يستند بعضها إلى بعض بشكل مباشر، ويصبح السطح النوعي للحصويات كبيراً جداً مؤدياً إلى استهلاك كمية أكبر من الإسمنت لإكمال تفاعل هذا السطح النوعي الكبير للحصول على المقاومة التصميمية المطلوبة. وإذا كان عيار الإسمنت محدد، ولم نستطع زيادة كمية الإسمنت في موقع الجبل، أو لم نتمكن من تعديل معامل نعومة الرمل، عندئذٍ تتطلب نعومة السطح استهلاك كمية أكبر من الماء حتى تؤمن سهولة تشغيل مناسبة، ومن ثم تكون الخرسانة الناتجة ذات مقاومة ميكانيكية صغيرة أقل من المقاومة التصميمية للخلطة الخرسانية.

إذا كان المنحني الحبي يقع في المجال الجيد، يعني ذلك أن الفراغات المتوضعة بين الحبيبات الكبيرة مملوءة بشكل جيد بإحاطة الحبيبات الصغيرة، ويتم ضمان الحصول على حصويات ذات درجة تراص أعظمية، ومن ثم إلى استهلاك قيم صغرى للإسمنت والحصول على مقاومات

ميكانيكية عالية. يمكننا تحسين التدرج الحبي للحصويات بخلط نسب مختلفة للحصويات، ويتم تحديد نسب الخلط هذه بعد برنامج تجريبي أولي. وقبل تحضير أو جلب الإحضارات المتوفرة في المقالع لا بد من معرفة أي من المنحنيات المثالية يجب مقارنتها مع الإحضارات المتوفرة في المقالع من رمل وبحص. يتم اختيار التدرج المطلوب وفقاً للطريقة المتبعة (يمكن مراجعة المصادر ذات العلاقة، ولا سيما المقررات المعنية بتكنولوجيا الخرسانة ومواد البناء) بعد معرفة عدد من العوامل الأساسية كالمقاومة المطلوبة على الضغط للخرسانة ونوعية الحصويات وأهمية المنشأ وغير ذلك. وفي كل الأحوال، يجب أن يؤمن التدرج الحبي للحصويات الشروط الأساسية التالية المطلوبة في الخرسانة الناتجة بشكل عام:

- شروط التراص *Compactness Condition*، أي وجود أقل نسبة ممكنة من الفراغات، وهي النسبة التي يجب ألا تزيد على 20% في الخرسانة العادية وعالية الجودة، ولا على 25% في الخرسانة منخفضة الجودة

- شروط الطراوة *Consistency Condition*، أي أن تكون ليونة الخرسانة الطازجة مناسبة للصب مع أقل محتوى من الماء في الخلطة

- شروط قابلية التشغيل *Workability Condition*، أي أن تحافظ الخرسانة حديثة الصب على انسجام مكوناتها دون انفصال الحبيبات الحصوية عن بعضها وفقاً للقطر (ظاهرة الانفصال *Segregation*)، وكذلك إمكانية انتشارها السليم في القوالب أثناء عمليات الرج بهدف تحقيق التراص المطلوب، ويتم التأكد من ذلك مخبرياً عن طريق تجربة هبوط مخروط أبرامس وغيرها كما سيرد لاحقاً.

أنواع الحصويات:

تقسم الحصويات إلى ثلاثة أنواع حسب وزنها:

أ- الحصويات الطبيعية:

إن معظم الحصويات العادية ذات منشأ طبيعي كالبحص الطبيعي والرمل الطبيعي أو الحجارة المكسرة من الصخور بأنواعها الغرانيتية أو الأحجار الكلسية أو الأحجار الرملية. يتراوح الوزن النوعي للحصويات الطبيعية ما بين 2200 و 2800 كغ/م³، ويمكن اعتبار رقم 2.6 طن/م³ كقيمة وسطية، وتتراوح مقاومة الحصويات على الضغط من 140 إلى 600 كغ/سم²، وتقسم الحصويات الطبيعية عادة إلى نوعين رئيسيين حسب حجم مقاس حبيباتها:

* الحصىات الناعمة أو الرمل: تتألف من الذرات التي تمر من منخل طول ضلعه فتحته 5 مم، ويكون الرمل عادة إما طبيعي كالرمل البحري أو النهري، أو هو ناشئ عن طحن الأحجار والصخور إلى ذرات ناعمة (رمل مكسرة).

* الحصىات الخشنة أو البحص: تتألف من الذرات المحجوزة على منخل ضلعه فتحته 5 مم، ويكون البحص أيضاً إما طبيعي (نهري أو بحري) أو ناشئ عن تكسير كتل الحجارة والصخور الكبيرة.

ب - الحصىات خفيفة الوزن:

تستعمل حين تكون المقاومة على الكسر ذات أهمية بسيطة بالنسبة إلى وزن الخرسانة الناتجة الذي يجب أن يكون خفيفاً، وتستعمل عدة مواد خفيفة الوزن لهذا الغرض منها: حجر الخفان والكلينكر الفحمي والخبث الرغوي وغيرها، ويتراوح الوزن النوعي للحصىات هنا في المجال 1400 إلى 1600 كغ/م³.

تكون الخرسانة خفيفة الوزن إذا كانت ناتجة من استعمال لحصىات ذات وزن حتمي يتراوح ما بين 400 و 1700 كغ/م³ (بالمقارنة مع 2500 كغ/م³)، وبالإضافة إلى استعمال الحصىات خفيفة الوزن يمكن الحصول على خرسانة خفيفة باستعمال خرسانة تحوي فراغات هوائية مقصودة (خرسانة رغوية) .

ج - الحصىات ثقيلة الوزن:

تستعمل هذه الحصىات حين يُراد الحصول على خرسانة عالية الكثافة كالمستعملة في جدران المفاعلات الذرية منعاً للإشعاع، ويتراوح الوزن النوعي للخرسانة الناتجة من 3000 إلى 6000 كغ/م³، ويُستعمل لهذه الحصىات حجر البارييت أو شحف وبوردة الحديد أو الفولاذ وغير ذلك.

إن شكل الحصىات يؤثر في نوعية الخرسانة، فمثلاً الحصىات المدورة الطبيعية كالأحجار الفراتية تعطي للخرسانة الطازجة سهولة التشغيل، حيث يمكن رص الخرسانة وجعلها أكثر تماسكاً، ومن الممكن أن يكون نقلها بواسطة المضخات سهلاً طالما أنها غير قابلة لفصل مكوناتها حسب نسبة البحص إلى الرمل، أما إذا كانت الحصىات صفحية أو إبرية (محضرة في المقالع نتيجة كسر الأحجار الكبيرة إلى بحص وطحن البحص إلى رمل) فإن الخرسانة الطازجة تصبح أصعب تشغيلاً بالنسبة للصب، ومن ثم تكون عناصر الخرسانة موجودة على شكل طبقات غير متجانسة.

• الإسمنت Cement:

يمثل الإسمنت المادة الرابطة للحصويات بوجود الماء اللازم لتفاعلات الهدرجة الإسمنتية التي تقود إلى عمليات الأخذ والتصلب اللاحق للخرسانة المصبوبة. وفي الخرسانة، يتم عادة استخدام الإسمنت البورتلاندي من أحد الأنواع التالية: العادي وسريع التصلب والأبيض والمخلوط وخبث الأفران والإسمنت المقاوم للكبريتات وغير ذلك. وفي الخرسانة المسلحة يستخدم الإسمنت البورتلاندي العادي، مع إمكانية استعمال كل نوع آخر إذا توافرت الخبرة السابقة في استعماله بنجاح. عدا الإسمنت عالي الألويمين الذي لا يسمح باستخدامه إلا في حالات خاصة وبعد التبرير المناسب. وفي كل الأحوال يجب أن يلبي الإسمنت المستخدم الاشتراطات والمواصفات القياسية المعترف بها والمحددة في الشروط الخاصة بكل مشروع.

يدخل في تركيب الإسمنت مجموعة من المكونات الجزئية لأكاسيد بعض المعادن المختلفة ومركبات أخرى لأكاسيد المواد الأساسية أهمها:

- الأليت، وهو سيليكات الكالسيوم الثلاثية $3CaO.SiO_2$ ، ويرمز له C_3S بنسبة تساوي 62.7% تقريباً.

- البيليت، وهو سيليكات الكالسيوم الثنائية $2CaO.SiO_2$ ، ويرمز له C_2S بنسبة تساوي 10.2% تقريباً.

- ألومينات الكالسيوم الثلاثية $3CaO.AL_2O_3$ ، ويرمز له C_3A بنسبة تساوي 8% تقريباً. - رابع ألومينات الكالسيوم الحديدية $4CaO.AL_2O_3.Fe_2O_3$ ، ويرمز له C_4AF بنسبة تساوي 6.2% تقريباً.

عند خلط الإسمنت بالماء، تتشكل الروبة الإسمنتية *Cementitious Milk* أو ما يسمى أحياناً المستحلب الإسمنتي، وهي تحيط بحبيبات الرمل مشكلة المونة الإسمنتية *Cementitious Grout*، وتحيط المونة بحبيبات والبحص رابطة بعضها مع بعض، ومع انتهاء تفاعلات التصلب تتشكل الخرسانة المتصلبة كتلة مترابطة، الشكل (1-3-أ)، وتكتسب مقاومتها المطلوبة التي تتعلق بدرجة جودة الإسمنت والحصوبات وتدرجها الحبي وغير ذلك من العوامل.

دور الإسمنت في صناعة البناء الحديثة واستعمالاتها الأساسية :

تتزايد الحاجة باستمرار للإسمنت وذلك للدور الأساسي الذي يلعبه في مجالات البناء الحديثة

كما يلي:

- 1- في صناعة الخرسانة المسلحة كمادة إنشائية وهي خليط من الحصى والاسمنت مضافاً إليه حديد التسليح
- 2- مونة لأحجار البناء كمادة لاصقة جيدة الربط
- 3 - أعمال الطينة والتليس
- 4- استعمالات أخرى: كتل صلبة وأسابيب إسمنتية وغيرها.

الاستعمالات الأساسية للإسمنت البورتلاندي العادي:

- إن هذا النوع هو الأفضل والأكثر اقتصاداً من أنواع الإسمنت الأخرى، لذلك يُستعمل في معظم أنواع البناء العادي، حيث لا يطلب:
- أ- مقاومة خاصة للمواد الكيميائية وبخاصة للكبريتات مثل الأشغال في ماء البحر أو ضمن المياه الجوفية
 - ب - سرعة تماسك عالية
 - ج - سرعة تصلب عالية كما في الأشغال السريعة
 - د - حرارة تفاعل منخفضة
 - هـ - ألوان خاصة.

أنواع الإسمنت البورتلاندي الأخرى:

أ- الإسمنت البورتلاندي سريع التصلب:

يتصلب هذا النوع من الإسمنت بسرعة أكبر من الإسمنت البورتلاندي العادي، وذلك في المراحل الأولى من عملية التصلب واستعمال هذا النوع مناسب من أجل الحالات التي يُرغب الحصول فيها على متانة سريعة، نظراً لضرورة فك القوالب خلال مدة قصيرة. يشبه تركيب هذا الإسمنت تركيب الإسمنت العادي مع زيادة نسبة المواد الكلسية عن المواد الأخرى، ويطلق إلى بودرة أكثر نعومة من النوع الأول. ونذكر هنا أن الفرق بين هذا النوع والنوع العادي كامن في سرعة التصلب وليس في الوقت اللازم لبدية التصلب (سرعة التماسك)، هذا الوقت تقريباً واحدٌ للنوعين، ويمكن القول أنه بعد ستة أشهر تقريباً يصبح لمونه الإسمنت المصنوعة من النوعين المتأله نفسها. من مساوي هذا الإسمنت زيادة سرعة انتشار الحرارة الناتجة من التفاعل وزيادة سرعة التقلص الناتج وحجمه.

من الاحتياطات الواجب إتباعها عند التنفيذ أو الاستعمال:

- 1- عدم الاستعمال في حجوم كبيرة
 - 2- ضرورة عدم استعمال خلطات غنية بالإسمنت لأن هذا يؤدي إلى زيادة حجم التقلص
 - 3- العناية بفواصل التمدد
 - 4- العناية بالتسليح المقاوم لتأثير التقلص
- ب - الإسمنت البورتلاندي سريع التصلب: (سرعة تصلب عالية جدا)
يحصل على هذا النوع بإضافة عاملٍ مسرِّعٍ إلى الإسمنت سريع التصلب وقد يكون بزيادة نسبة 2 % تقريبا من $CaCl_2$ بهدف تسريع التماسك.
وبذلك يكون له ميزات الإسمنت سريع التصلب نفسها مع زيادة في سرعة التماسك بحدود الضعف . كما أن له مساوي الإسمنت سريع التصلب نفسها، يُضاف إليه خطرُ تآكل فولاذ التسليح وذلك لأن سرعة التماسك والتصلب الزائدة تزيد من التقلص وتزيد أيضاً من الشقوق ومن أبعادها ومن ثم يزداد احتمال التآكل.
من الاحتياطات الواجب إتباعها عند التنفيذ الاحتياطات المتبعة نفسها عند استعمال الإسمنت سريع التصلب مع الأخذ بعين الاعتبار:

- 1 -العناية بما يُسمى طبقة الوقاية بهدف الحد من خطر تآكل التسليح
- 2 -التأكد من الانتهاء من صب الخرسانة ورجّها بعد إضافة الماء بما لا يزيد على عشرين دقيقة.

ج - الإسمنت البورتلاندي من ناتج أفران الصلب:

يستعمل في تحضيره وصنعه الخبث الناتج من أفران الصلب بدلاً من الأحجار الكلسية أو الحوَار بالإضافة إلى الغضار ونسبة محددة من الكلينكر الإسمنتي العادي، وهذا النوع من الإسمنت بطيء في انتشار حرارة التفاعل ومن ثم فهو بطيء في التصلب، و مقاومته النهائية أعلى بقليل من الإسمنت البورتلاندي العادي .ومن الاحتياطات الواجب إتباعها والتأكد من اكتساب المقاومة الكافية عند فك القوالب.

د - الإسمنت البورتلاندي المنخفض الحرارة:

إن الفرق بينه وبين الإسمنت البورتلاندي العادي هو فرق كيميائي بالدرجة الأولى حيث تتم زيادة نسبة C_2S وتخفيض نسبة C_3S و C_3A . مع زيادة في النعومة

لتعويض الضعف في قوام الخرسانة التي لحقها التغيير في النسب السابقة، وذلك للحصول على اللزوجة العادية الطبيعية التي لا تكون فيها الخرسانة مائعة ولا جافة. ومن ميزات هذا النوع من الإسمنت إمكانية استعماله في الكتل الضخمة بسبب انخفاض كمية الحرارة الناتجة من التفاعل الكيميائي، حيث أن الحرارة الناتجة من الإسمنت البورتلاندي العادي 80 كالوري/غ، بينما الحرارة الناتجة من الإسمنت البورتلاندي المنخفض الحرارة تتراوح بين 40 و 60 كالوري/غ. ومن مساوئه الضعف النسبي في المقاومة عن الإسمنت العادي والبطيء في التصلب والتماسك. ومن الاحتياطات الواجب إتباعها عند الاستعمال: عدم استعماله في الحالات التي تحتاج إلى مقاومة عالية أو سرعة في التنفيذ، ويفضل استعماله في الجدران الاستنادية *Retaining walls* والسدود الثقيلة لأنها كتل كبيرة والإجهادات فيها قليلة وتتطلب وزناً كبيراً وحرارة ناتجة قليلة.

1 - ضرورة مراعاة الفترة اللازمة لفك القوالب.

هـ- الإسمنت البورتلاندي المقاوم للكبريتات:

إن الفرق بين هذا النوع من الإسمنت والإسمنت البورتلاندي العادي هو فرق كيميائي أيضاً، حيث يتم الحصول على هذا النوع بتخفيض نسبة C_3A إلى أقل حد ممكن (بحدود 5%) وذلك باعتبارها أقل مركبات الإسمنت استقراراً.

من ميزات هذا النوع من الإسمنت مقاومته العالية للمركبات الكبريتية ولذلك فهو يُناسب الأعمال البحرية وأعمال الأساسات في المناطق ذات المياه الجوفية السطحية وبشكل خاص المياه الحاوية على أملاح كثيفة مع احتفاظه بنفس خواص الإسمنت البورتلاندي العادي.

و- الإسمنت البورتلاندي الأبيض:

يُستعمل هذا النوع لأغراض تزيينية معمارية ويتم الحصول على اللون الأبيض باستعمال الحوار الأبيض والغضار البورسلاني (الخزفي) بدلاً من الحجر الكلسي و الغضار العادي الذي يحتوي عادة على شوائب، خاصة أكسيد الحديد. ومن الناحية الميكانيكية له خواص ومواصفات الإسمنت البورتلاندي العادي نفسها، إلا أنه أكثر كلفة من الناحية الاقتصادية.

ز- الإسمنت البورتلاندي الملون:

إسمنت بورتلاندي عادي أو أبيض يُضاف إليه مواد ملونة، بحيث تكون هذه المواد الملونة ذات مواصفات فيزيائية وكيميائية وخاصة:

- 1 -الاتصاف باللون المطلوب
 - 2 -ثبات اللون بتأثير الضوء والعوامل الأخرى
 - 3 -تركيب كيميائي لا يؤثر بالإسمنت ولا يتأثر به
 - 4 -عدم وجود أملاح قابلة للانحلال بالماء
- فإذا كانت المواد الملونة غير مؤثرة في مقاومة الإسمنت فإن للإسمنت الملون له نفس خواص الإسمنت العادي نفسها. و جدير بالذكر أن الكلفة الاقتصادية تصبح أكبر بكثير فيما يلي بعض أنواع الإسمنت غير البورتلاندي:

أ- الإسمنت عالي الألومينية : يختلف هذا النوع بتركيبه و خواصه عن الإسمنت البورتلاندي العادي ، حيث أن مواده الأولية هي البوكسيت (Al_2O_3) + الحوار أو الحجارة الكلسية، وأن تصنيعه مختلف كلياً عن طريقة الإسمنت البورتلاندي من حيث نوع الفرن وسير العمل ودرجات الحرارة، ومن خواصه:

- 1 -السطح النوعي 2500 إلى 3200 سم²/ غ
 - 2 -سرعة التصلب: عالية جداً (80% من المقاومة تُكتسب بعد 24 ساعة من إضافة الماء).
 - 3 -فترة التماسك البدائي: نحو 45 دقيقة
 - 4 -فترة نهاية التماسك: نحو الساعتين (أسرع من البورتلاندي العادي).
 - 5 -حرارة التفاعل عالية: (9 كالوري / غ / ساعة في الفترة الأولى من التصلب بالمقارنة مع 3.5 كالوري/ غ / ساعة للإسمنت البورتلاندي العادي).
 - 6 -مقاومة عالية للكبريتات.
 - 7 -انخفاض المقاومة مع الزمن بوجود الجو الحار والرطب معاً.
- إن أهم استعمالات الإسمنت عالي الألومينية الحصول على مقاومة عالية بسرعة وعند ضرورة مقاومة المركبات الكبريتية. ومن الاحتياطات الواجب إتباعها:

- 1 -عدم استعمال خلطات غنية بالإسمنت
- 2 -عدم الاستعمال في كتل كبيرة، وذلك بسبب الحرارة العالية الناتجة من التفاعل وسرعة التصلب التي تزيد بالتقلص

3 -الانتباه إلى انخفاض المقاومة بوجود الجو الرطب والحار معاً

ب - الإسمنت الطبيعي: يُحصل عليه بشي وطحن نوع من الصخر يُسمى الصخر الإسمنتي، وهو صخر طبيعي يحوي الكلس والغضار معاً. ومن خواصه:

- 1 -سرعة التصليب منخفضة
- 2 -حرارة التفاعل منخفضة
- 3 -المقاومة الناتجة منخفضة

تعود هذه الخواص لعدم اكتمال المركبات الكيميائية ذات الخواص الإسمنتية، وأن استعملاته محدودة تنحصر في العناصر والمجالات التي يُطلب فيها وظيفة إنشائية هامة، ولذلك يمكن استعماله مثلاً في مجالات الورقة الإسمنتية.

ج- إسمنت السوبر سولفات: هو يُصنَع من معالجة خبث أفران الصلب بنسبة (80 إلى 85%) مع البحص بنسبة (10 إلى 15%) مع الكلينكر الإسمنتي الناتج من صناعة الإسمنت البورتلاندي العادي بنسبة 5% تقريباً. ومن خواصه الأساسية مقاومته الجيدة للمركبات الكيميائية الضارة بالإسمنت البورتلاندي وأهم استعملاته في الأعمال البحرية وقساطل النقل وفي الكتل الكبيرة لانخفاض الحرارة الناتجة من استعماله. لا بد من إتباع ما يلي:

- 1 -عدم تعرضه لحرارة عالية، حيث أن ذلك يؤدي إلى انخفاض مقاومته
- 2 -عدم استعماله في المعالجات البخارية
- 3 -يجب مراعاة عدم استعمال خلطات فقيرة بالإسمنت، حيث يتطلب ذلك كمية كبيرة من الماء اكبر منها في الإسمنت البورتلاندي العادي، لذلك وينصح بأن تكون نسبة الماء إلى الإسمنت بحدود 50 إلى 60%.

أنواع أخرى متفرقة، ذات استعملات محدودة:

أ - الإسمنت المتوسع:

يزداد حجمه نتيجة تشرّبه للماء، وهو قابل للانتفاخ ويستعمل في حالات معينة محدودة، علماً أن الخرسانة تعمل على الضغط وحديد التسليح يعمل على الشد في العناصر الخرسانية المسلحة عند استخدامها.

ب - إسمنت حقول النفط:

يستخدم في حقول النفط في أعمال الطينة والمونة لأنابيب النفط.

• ماء الخلط *Mixture Water*:

من المفروض أن يكون الماء المستخدم في الخلطات الخرسانية، وفي عمليات غسل الحصى نظيفاً وخالياً من المواد الضارة كالزيوت والأحماض والقلويات والأملاح الأخرى التي

تؤثر سلباً في الخرسانة أو التسليح، ويشترط ألا تزيد أملاح الكلوريدات الذائبة على 0.5 غرام في اللتر، وأملاح الكبريتات على 0.3 غرام في اللتر، ومجموع الأملاح على 2 غرام في اللتر، ويستخدم الماء الصالح للشرب كماء للخلط في كل الأحوال، ويمكن استخدام الماء غير الصالح للشرب إذا كان:

- زمن الشك الابتدائي *Initial Setting* (المرحلة الأولى من الأخذ) لعينات الإسمنت المجهزة بهذا الماء لا يزيد بأكثر من 30 دقيقة على زمن الشك الابتدائي لعينات الإسمنت نفسه باستخدام الماء الصالح للشرب، وبحيث لا يقل زمن الشك الابتدائي عن 45 دقيقة.

- مقاومة الضغط بعد 7 أيام أو 28 يوماً للقوالب القياسية التي يستعمل في خلطها هذا الماء لا تقل عن 90% من مقاومة الضغط للعينات المماثلة المخلوطة بماء صالح للشرب.

من ناحية أخرى، لا يسمح باستخدام ماء البحر في خلط الخرسانة المسلحة، وإن كان يجوز استعماله عند الضرورة في الخرسانة العادية (غير المسلحة *Plain Concrete*)، مع زيادة كمية الإسمنت للوصول إلى مقاومة الخرسانة المطلوبة، إذ يتم تحديد مقدار الزيادة وفق تجارب نظامية خاصة بذلك.

• الإضافات *Additives*:

تستخدم عند الضرورة مواد معينة تتم إضافتها إلى محتويات الخلطة الخرسانية لتحسين أو ترجيح خاصة أو أكثر من الخواص المطلوبة في الخرسانة الناتجة وفقاً للظروف المحلية المحيطة، على ألا يكون لهذه الإضافات تأثيرات ضارة مباشرة أو غير مباشرة على الخرسانة والتسليح. ومن المفروض تحديد الحد الأقصى للكمية المستخدمة من كل نوع من الإضافات مقدراً كنسبة مئوية من وزن الإسمنت. ويشترط في الخرسانة ذات الإضافات ألا تقل مقاومة الضغط والانحناء وقوة التماسك مع التسليح فيها عن 85% من القيم المناظرة في حالة الخرسانة دون إضافات. ومن الإضافات المستخدمة من أجل الإسمنت والخرسانة ما يلي:

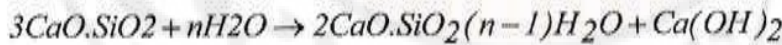
- إضافات مسرعة لأخذ الإسمنت (الماء الزجاجي، كلور الكالسيوم، الصودا وغير ذلك)، وذلك عند صب الخرسانة في المنشآت المظلمة المعرضة لضغط المياه الجوفية مثلاً.

- إضافات مسرعة لتصلب الخرسانة *Accelerators* (مثلاً كلور الكالسيوم، بنسبة لا تزيد على 2%) بهدف زيادة المقاومة الأولية للخرسانة.

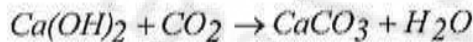
- إضافات مثبطة (مؤخرة لزمن بداية تماسك الخرسانة *Deactivators*) مثل بيكاربونات الصودا والنشأ وحمض الثرثار والجص وغيره)
- إضافات تمكن الإسمنت من الأخذ في حالة الصقيع (مثلاً كلور الكالسيوم والصودا، مع عدم جواز استخدام الصودا في الخرسانة المسلحة).
- إضافات ملدنة *Plasticizing Additives* محسنة لقوام الخرسانة الطازجة (الخبث المطحون، مسحوق الدولوميت، الكلس ، الغضار وغير ذلك).
- إضافات راصة *Compacting additives* بهدف زيادة كثافة الخرسانة ومقاومتها للمياه الملوثة (مياه الصرف الصحي مثلاً)، وهذه المواد تسبب تخفيض مقاومة الخرسانة وتصعب عمليات الأخذ والتصلب كما هو معروف.

أخذ الخرسانة وتصلبها *Cohesion and Hardening of Concrete* :

بعد خلط مكونات الخرسانة وفق النسب المعيارية المطلوبة، تبدأ التفاعلات الكيماوية المرتبطة بأخذ وتصلب المونة الإسمنتية المحيطة بالحصويات (تفاعلات الهدرجة الاسمنتية)، إذ تتشكل عجينة إسمنتية *Cement Paste* لدنة تضم الحبيبات الحصوية (عملية الأخذ التي تنتهي خلال فترة 10 ساعات في الأحوال العادية) ثم تتصلب العجينة في المرحلة التالية، الأمر الذي يكسب الخرسانة أكثر من 70% من مقاومتها المطلوبة بعد 28 يوماً تقريباً، ويستمر تزايد المقاومة بشكل بطيء بعد ذلك لعدة سنوات لاحقة. يتفاعل الماء (بحدود 25% من وزن الاسمنت) مع سيليكات الكالسيوم اللامائية التي تمثل الجزء الأكبر من مكونات الإسمنت البورتلاندي، وينتج عن هذا التفاعل هيدروكسيد الكالسيوم وسيليكات الكالسيوم المائية وفقاً للتفاعل التالي:



وتحت تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو يبدأ هيدروكسيد الكالسيوم بالتناقص التدريجي، متيحاً المجال لظاهرة الكربنة *Carbonization Phenomenon* في الخرسانة الطازجة التي تؤثر سلباً في بنية الخرسانة وفق التفاعل التالي:



إن وجود مركب $Ca(OH)_2$ مطلوب لحماية الخرسانة من التآكل بسبب ظاهرة الكربنة، حيث تتشكل كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ الأكبر حجماً على شكل مادة بيضاء هشة تغطي

السطح المكربن، وتحدث هذه العملية بالنسبة للخرسانة المتصلبة خلال وقت طويل في الظروف العادية، ويقوم التفاعل السابق بتخفيض درجة القلوية PH إلى أقل من 10، الأمر الذي يسبب لاحقاً تآكل التسليح (عندما تكون درجة القلوية في الخرسانة مرتفعة ، أي نحو 12.5، يتشكل عادة غشاء من أكسيد الحديد على سطح القضبان مانعاً إياها من التآكل).

1-2-3- الخواص الأساسية للخرسانة الطرية:

من أهم هذه الخواص قابلية التشغيل والتماسك البنيوي .

✓ قابلية التشغيل *Workability*:

هي حالة الطراوة أو التي يمكن صب الخرسانة عندها في القوالب بشكل مريح، وهي تتعلق بمحتوى الماء في الخلطة الخرسانية، وتختار حسب طريقة الصب ونوع العناصر المصبوبة وطريقة الرج وغير ذلك. ولنسبة الماء أثر كبير في المقاومة مستقبلاً، وقابلية النزف المائي عند الضغط، فكلما ازداد محتوى الماء نسبة إلى الإسمنت $\frac{w}{c}$ قل الضغط اللازم لخروج الماء من

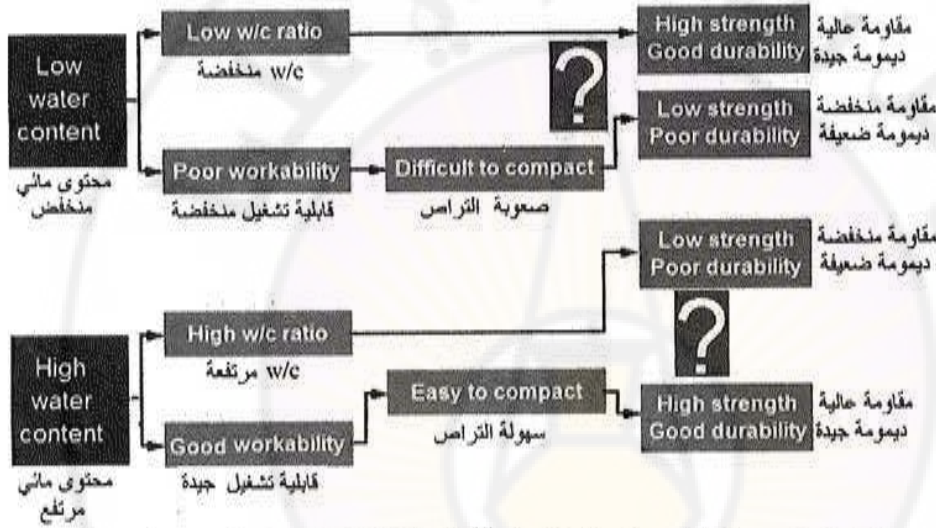
الخرسانة الطرية. وبشكل عام، مع زيادة النسبة $\frac{w}{c}$ يحصل ما يلي:

- تنفصل حبيبات الإسمنت إلى الخارج
 - تزداد نسبة الفراغات
 - تنخفض المقاومة والديمومة مستقبلاً في الخرسانة
- وكلما زادت درجة الرص في الخرسانة (نتيجة الرج *Vibration*) زادت المقاومة والديمومة، الشكل (1-4) والشكل (1-5)، كما يؤثر شكل الحصىات على ذلك كما هو موضح في الجدول (1-1)، ومع زيادة الإسمنت بالنسبة للحصىات تزداد مقاومة النزف *Bleeding* من الخرسانة، ولكن تبقى قابلية التشغيل كما هي نتيجة لانخفاض محتوى الحصىات بالنسبة للإسمنت. وبشكل عام، تتعلق قابلية التشغيل بالعوامل الأساسية التالية:

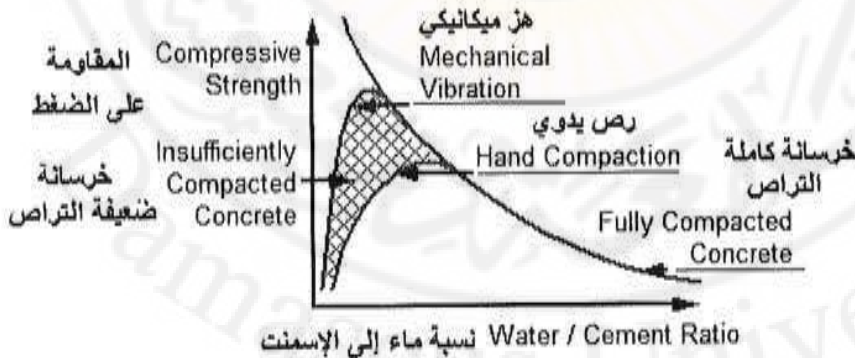
- نسبة الماء إلى الإسمنت
- الحصىات (المحتوى بالنسبة للإسمنت، الشكل، الأبعاد، البنية)
- عيار الإسمنت
- طريقة الخلط
- التدرج الحبي *Granular Grading*

Aggregates	الحصويات	قابلية التشغيل
Angular	ذات زوايا	تقل
Rounded	مدورة	تزداد
Smooth	ملساء السطح	تزداد
Rough	خشنة السطح	تقل
Large	كبيرة المقاس	تزداد
Small	صغيرة المقاس	تقل

الجدول (1-1) قابلية تشغيل الخرسانة حسب نوع الحصويات المستخدمة



الشكل (4-1) رسم تخطيطي يوضح أثر النسبة $\frac{W}{C}$ في قابلية التشغيل ومقاومة الخرسانة الناتجة



الشكل (5-1) العلاقة بين النسبة $\frac{W}{C}$ ومقاومة الخرسانة الناتجة.

- نوع الإضافات

- عوامل الطقس وغير ذلك.

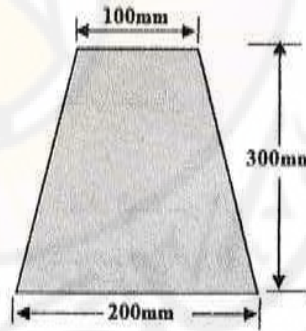
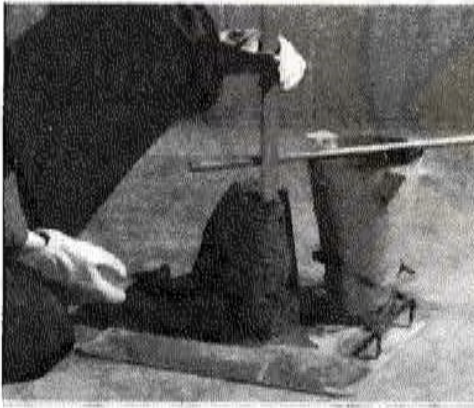
يبدو من الشكل (1-4) وجود مشكلة يجب تجاوزها، إذ يوجد احتمالين في كل حالة حسب محتوى الماء إلى الإسمنت (بفرض كمية الإسمنت ثابتة). الأنسب هنا إنتاج خرسانة بأقل درجة ممكنة لقابلية التشغيل للحصول على المقاومة المرتفعة والديمومة الجيدة.

قياس قابلية التشغيل:

تقاس قابلية تشغيل الخرسانة بوسائل مخبرية متعدد منها: اختبار هبوط مخروط أبرامس واختبار الانسياب (للخرسانة ذاتية التراص مثلاً) وجهاز إعادة الشكل واختبار معامل الرص (الدمك) واختبار فب *Vebe* (لقياس استجابة الخرسانة للهرز) واختبار كرة الاختراق. فيما يلي نظرة على اثنتين من هذه الوسائل:

(أ) اختبار هبوط مخروط أبرامس *Abrams Slump Test*:

هو الأقدم والأكثر شيوعاً (المواصفات الأمريكية *ASTM C143-78*)، ويستخدم هنا قالب على شكل مخروط ناقص، الشكل (1-6).

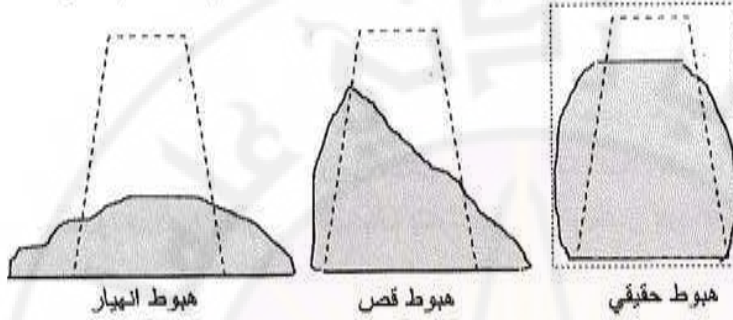


الشكل (1-6) مخروط أبرامس

يتم إنجاز اختبار مخروط أبرامس كما يلي:

- يملأ القالب بالخرسانة الطازجة على ثلاث طبقات متساوية الحجم

- يتم دمك كل طبقة 25 مرة بقضيب معدني قطره $16mm$ ومدور في نهايته
- يسوى سطح المخروط جيداً
- يرفع القالب راسياً
- يقاس مقدار هبوط الخرسانة بالمليمتر (الفرق بين ارتفاع الخرسانة بعد الهبوط وارتفاع المخروط)، وتوجد ثلاثة أنواع من الهبوط، ولا بد من إعادة الاختبار في حالة هبوط القص (الخرسانة جافة)، وهبوط الانهيار (الخرسانة طرية جداً أو فقيرة)، الشكل (1-7).



الشكل (1-7) أنواع هبوط الخرسانة

تتحدد قابلية تشغيل الخرسانة *Concrete Workability* ودرجة حركتها وطراوتها عند الصب في الموقع، وقدرتها على تعبئة القوالب دون فراغات، والسماح بإدخال وسائط الراج وغير ذلك من خلال تحديد قوامها الفعلي الذي يتعلق بجملة من العوامل أهمها: نسبة ماء الخلط إلى الاسمنت، نوعية الحصىيات المستخدمة (التركيب الحبي، درجة النعومة، المقاس الأعظم، النظافة والكتامة وغير ذلك). ولاختيار القوام اللازم لا بد من الأخذ بالحسبان عدد من العوامل، أهمها:

- الوسائط المستخدمة في رج الخرسانة وصبها في مكانها، أبعاد العناصر الإنشائية المراد صبها أو رجها، كثافة التسليح المستخدم وطريقة توزيعه (التفريد *Arrangement*). ولا بد أن يتوافق قوام الخلطة الخرسانية مع طريقة الصب المستخدمة العناصر المصبوبة. وضمن هذا الإطار، في حال عدم وجود قيم أخرى من الاشتراطات المحلية أو الشروط الخاصة بالمشروع، واستخدام المعلومات المبينة في الجداول (1-3) إلى (1-4).

الجدول (2-1) تحديد نوع الاختبار المطلوب لتحديد قابلية التشغيل حسب وظيفة الخرسانة المطلوبة.

نوع الاختبار	نوع الخرسانة المطلوبة	
اختبار <i>Vebe</i>	الطرق المنفذة البيا.	1
اختبار مخروط أبرامس (25-75mm)	الكمرات الخرسانية المسلحة العادية، الجدران والأعمدة.	2
اختبار الانسيابية (قابلية التشغيل عالية)	الخرسانة ذاتية التراص مع قابلية تشغيل عالية للأساسات الوتدية.	3
اختبار <i>Vebe</i>	الكمرات مسبقة الإجهاد بخرسانة ذات قابلية تشغيل ضعيفة ومنتجة في المصانع.	4
اختبار مخروط أبرامس (25-110mm)	الخرسانة المقذوفة.	5
اختبار مخروط أبرامس (100-125mm)	الخرسانة كثيفة التسليح.	6

الجدول (3-1) الحد الأعلى لهبوط مخروط أبرامس من أجل العناصر الخرسانية المسلحة.

الحد الأعلى للهبوط، [mm]	العنصر
150	الأجزاء السميكة.
75	بلاطات الطرق بالخرسانة غير المسلحة.
100	أساسات وجدران خرسانية غير مسلحة.
75	جدران وركائز الأساسات بالخرسانة المسلحة.
75	البلاطات والأرضيات والأعمدة والجدران الخرسانية المسلحة.

الجدول (4-1) علاقة قوام الخرسانة مع هبوط مخروط أبرامس وقابلية التشغيل.

مجال الاستخدام المفضل	حالة الخرسانة		هبوط مخروط أبرامس، [mm]
	قابلية التشغيل	القوام	
أعمال خاصة (خرسانة عالية الجودة مع رج ميكانيكي قوي جداً) .	منخفضة جداً	جامد جداً	0-25
قطاعات خرسانية ذات مقاومة عالية مع رج ميكانيكي قوي.	منخفضة	جامد	25-50
قطاعات خرسانية مسلحة عادية مع رج عادي.	متوسطة	مانع	50-100
قطاعات خرسانية صغيرة أو كثيفة التسليح غير مناسبة للرج الميكانيكي (استخدام رج بدوي).	عالية	سائل	100-150

ب) اختبار الانسيابية *Flow Test* :

يستخدم خاصة للخرسانة المزودة بإضافات خافضة لنسبة الماء في الخلطة مثل الملدنات عالية الجودة *Super-Plasticizers* والمستخدمة في أنواع خاصة من الخرسانة المتقدمة: الخرسانة ذاتية التراص والخرسانة فائقة الأداء وغيرها. يحتوي الجهاز على منضدة خشبية معلقة بصفيحة معدنية على شكل مربع طول ضلعه 700mm ومثبت بحيث يمكن رج إحدى نهايتيه بمقدار 40mm ، ويوضع على المنضدة قالب على شكل مخروط بارتفاع 200mm وقطر علوي 130mm ، وقطر سفلي 200mm ، الشكل (8-1).

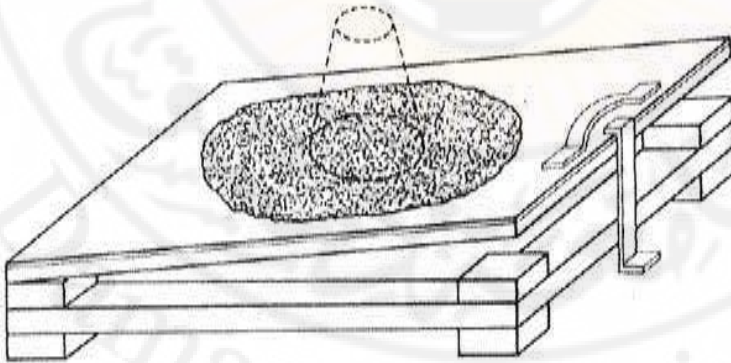
يعمل الجهاز كما يلي:

- يملأ القالب بالخرسانة الطازجة على طبقتين متساوية الحجم
- تدمك كل طبقة بعصا خشبية 10 مرات
- يسوى سطح المخروط وتزال الخرسانة الفائضة
- يرفع القالب راسياً
- ترفع المنضدة وترج 15 مرة في الثانية
- يأخذ معدل قيمتي لقطر انتشار الخرسانة D على المنضدة، ثم يقاس انسياب الخرسانة F

$$F = \frac{D - 200}{200} \times 100$$

بالعلاقة التالية:

على أن تكون الخرسانة في هذه الحالة متماسكة ومتجانسة، ويمكن العودة إلى المراجع للاطلاع على قياس قابلية التشغيل باستخدام الطرائق الأخرى.



الشكل (8-1) جهاز اختبار الانسيابية

للحد من فقدان رطوبة الخرسانة الطازجة، لا بد من اتخاذ الإجراءات المناسبة لمعالجة الخرسانة بهدف توفير الشروط الملائمة لاستكمال عملية الهدرجة والتصلب السليم، وكذلك الديمومة المطلوبة. و س الطرائق المستخدمة (إضافة للترطيب اللازم) تغطية السطح الخرساني بأغشية من البوليثين *Polythene Sheets* أو غيره أو برش مواد مشكلة لأغشية واقية وغير ذلك.

✓ التماسك البنيوي (عدم انفصال الحبيبات *Segregation*):

من الضروري أن تحافظ الخلطة الخرسانية على تماسك مكوناتها ، أي إن لا يحدث انفصال لهذه المكونات وخاصة الحصىوات الخشنة عن الأنعم قبل تنفيذ عملية الصب خلال النقل

والتسليم وغير ذلك، الشكل (1-9). وتحصل عملية الانفصال على شكلين أساسيين:

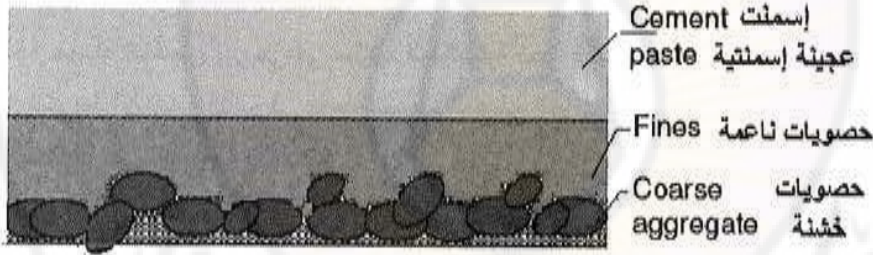
- الخلطة جافة، حيث يمكن أن تتفصل الحصىوات بعضها عن بعض وعن بقية المكونات.

- الخلطة رطبة، حيث يظهر ذلك من خلال حصول:

+ النزف *Bleeding* (خروج الماء من الخلطة).

+ الهبوط اللدن *Plastic Settlement*.

+ الانكماش اللدن *Plastic Shrinkage*.



الشكل (1-9) انفصال الحبيبات في الخرسانة

1-2-4- الميزات الميكانيكية والفيزيو-كيمياوية للخرسانة المتصلبة:

Mechanical and Physico-Chemical Characteristics of Hardened Concrete

فيما يلي أهم الملامح العامة لعدد من الميزات الميكانيكية والفيزيو-كيمياوية التي ينبغي معرفتها وفقاً للكود العربي السوري بشكل أساسي وباختصار شديد، مع إمكانية العودة إلى الكود المذكور وملحقاته وغيره من المراجع عند الضرورة لمعرفة التفاصيل.

• الخواص الفيزيائية والكيميائية:

أ- الوزن الحجمي *Unit Weight*:

يمكن عدّ الوزن الحجمي للخرسانة العادية (غير المسلحة)، في حال عدم توافر معطيات أكثر دقة، مساوية:

- $22kN/m^3$ إذا كانت الحصىات جيرية (كلسية).

- $24kN/m^3$ إذا كانت الحصىات سيليسية *Siliceous Aggr.*

ومن أجل الخرسانة المسلحة، يمكن عدّ الوزن الحجمي في الأحوال العادية مساوياً: $25kN/m^3$. وإذا تم استخدام أنواع خاصة من الحصىات الثقيلة، أو كانت نسبة التسليح كبيرة نسبياً يجب أخذ ذلك بالحسبان بإدخال الإضافة الناتجة في الوزن الذاتي.

ب- مقاومة الحريق *Fire Resistance*:

ينبغي الحديث عن مقاومة الخرسانة لدرجات الحرارة المرتفعة نتيجة الحرائق هنا بالأخذ بالحسبان وجود التسليح، أي كخرسانة مسلحة، إذ إن الخرسانة ذات مقاومة مرتفعة نسبياً للحرارة المرتفعة وقادرة على الحفاظ على خواصها الأساسية دون تغيير كبير، طالما يجري انتشار الحرارة فيها بشكل أبطأ مما هو عليه بالنسبة للتسليح الذي يسخن بسرعة ويعاني تغييراً واضحاً في قيم إجهاد الخضوع *Yield Stress* والتشوّهات الحرارية وغير ذلك. تمر العناصر الخرسانية المسلحة بمرحلة انخفاض تدريجي في ميزاتها الميكانيكية تحت تأثير حرارة اللهب، وهنا لابدّ من تحقيق الشروط الأساسية التالية في مرحلة تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة:

(1) المحافظة على المقاومة الإنشائية

(2) مقاومة انتشار اللهب

(3) مقاومة انتقال الحرارة

يطبق الشرط الأول على جميع عناصر المنشأ، وأما الشرطان الثاني والثالث فيتم تطبيقهما على العناصر التي لها وظيفة الفصل بين الفراغات كالأسقف *Floors* والجدران *Walls*. ومن أهم العوامل التي لها علاقة بتحديد مقاومة العنصر الخرساني للحريق:

(1) نوعية الخرسانة المستخدمة

(2) نوعية التسليح المستخدم

(3) سمك الغطاء الخرساني للتسليح *Reinforcement Concrete Cover*

(4) أبعاد العنصر الخرساني

(5) تقشر وتلف طبقات العزل وسمكها إن وجدت

يكون أداء الخرسانة المصنعة باستخدام حصويات كلسية أفضل لمقاومة الحريق من الخرسانة المصنعة باستخدام حصويات سيليسية، وذلك فيما يتعلق بدرجة الحرارة التي تتحملها الخرسانة مع المحافظة على مقاومتها، أو بالنسبة لمعامل التمدد الطولي الحراري *Longitudinal Thermal Coefficient*، أو بالنسبة لتفتت الغطاء الخرساني نتيجة الحرارة المرتفعة بسمك نحو 40mm . وبصورة عامة تبقى الخرسانة المسلحة محافظة على مقاومتها في الضغط حتى درجة حرارة 250°C ، إذ تبدأ المقاومة بالتناقص فوق هذه الدرجة.

بالنسبة للتسليح، يتصرف الفولاذ المشغول على الساخن في حال الحريق بصورة أفضل من الفولاذ المشغول على البارد، إذ إن مقاومة النوع الأخير تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة. ولا تتعرض إجهادات الخضوع في التسليح المشغول على الساخن للنقصان حتى درجة حرارة 400°C ، وتتناقص هذه الإجهادات مع ارتفاع درجات الحرارة حتى تصل إلى نحو 50% من قيم إجهادات الخضوع بدرجات الحرارة الاعتيادية عندما تصل درجة الحرارة إلى 550°C ، وهذه درجة حرجة بالنسبة للتسليح، وينبغي العمل على عدم تجاوزها خلال الفترة التي يعدّ المنشأ الخرساني فيها مقاوماً للحريق.

يتم تحديد سمك الغطاء الخرساني المطلوب لحماية قضبان التسليح بحيث يحمي التسليح من ارتفاع درجة الحرارة لمدة معينة فوق الدرجة الحرجة للتسليح بهدف ضمان استقرار المنشأ *Structure Stability*. وعندما يزيد سمك الغطاء الخرساني على 40mm ، يجب عندئذ وضع تسليح إضافي ضمن الغطاء الخرساني لمنع من التفتت *Crushing* (خاصة عند استخدام الحصويات السيليسية *Siliceous Aggregates*)، ويكون هذا التسليح الإضافي على شكل شبكة الأسلاك الفولاذية لا يقل وزنها عن 5kN/m^2 (قطر الأسلاك 2mm على تباعد 100mm). وعندما يكون سمك الغطاء الخرساني أقل من المطلوب، من الممكن عندئذ أن ينهار الغطاء قبل وصل التسليح إلى الدرجة الحرجة.

يتم تحديد مقاومة العناصر الإنشائية للحريق تحت تأثير الأحمال الاستثمارية (غير حدية)، ويتضمن الكود العربي السوري مجموعة من الجداول التي تحدد السماكات الدنيا للسقوف والجدران والأعمدة الخرسانية لمقاومة الحريق، وكذلك السماكات الدنيا للغطاء الخرساني للتسليح في العناصر الإنشائية الأساسية من الخرسانة المسلحة لمقاومة الحريق خلال فترات مختلفة في حال استخدام الحصويات السيليسية، مع إمكانية تخفيض الحدود الدنيا المبينة في هذه الجداول

في حالات استخدام الحجر الكلسي كحصويات خشنة. ويجب ألا يقل سمك الغطاء الخرساني للتسليح الرئيس عن 25mm لمقاومة فترة 4 ساعات، وعن 15mm لمدة نقل عن ذلك.

ج- المقاومة الكيماوية *Chemical Resistance*:

تتأثر المنشآت الخرسانية ببعض المواد الكيماوية كالزيوت النباتية والدهون والمحاليل السكرية والكبريتات والكلوريدات ومياه البحر والمياه الجوفية المتضمنة هذه المواد، إذ يسبب التعرض الطويل لهذه الكيماويات تغيراً مستمراً في خواص الخرسانة وتلفها في المحصلة النهائية. ومن أجل تخفيض الضرر الناجم عن تأثير الكيماويات المختلفة على الخرسانة، يمكن استخدام إجراءات متعددة: تكنولوجية (استخدام الحصويات الصلبة غير المسامية، مع العناية بالخرسانة للوصول بها إلى درجة عالية من التراص والكتامة ضد تسرب السوائل، وتأمين السمك الكافي لغطاء التسليح الخرساني، استخدام أنواع خاصة من الإسمنت المقاوم للمواد الكيماوية وغير ذلك)، تصميمية و مواد عازلة مناسبة لسطوح الخرسانة وغير ذلك.

د- التغيرات الحجمية الحرة *Free Volumetric Changes*:

تحصل التغيرات الحجمية الحرة (لأسباب غير الحمولة المطبقة مباشرة) بسبب الحرارة (التقلص *Contraction* والتمدد *Expansion*)، ظاهرة الانكماش *Shrinkage* في الخرسانة، فروق الهبوطات التفاضلية، تشكل التشققات وغير ذلك.

أ) تأثير الحرارة: يؤخذ معامل التمدد الحراري للخرسانة العادية $\alpha_t = 10^{-5}$ للدرجة المئوية الواحدة، أي 0.1mm لكل درجة مئوية في المتر الطولي.

ب) تأثير الانكماش: بسبب الانكماش كما هو معروف (ظاهرة تحدث داخل الخرسانة حديثة الصب بشكل أساسي) تقلصاً في حجم الخرسانة، وعندما تكون الحركة مقيدة (غير حرة بفعل التسليح أو الارتباط مع عناصر معيقة) تنشأ إجهادات شادة في الخرسانة قد تتجاوز مقاومة الخرسانة على الشد مسببة تشكل التشققات *Crack Formation*. وتتأثر قيمة انكماش الخرسانة بعوامل متعددة أهمها تبخر الماء الحر في الخرسانة، وهو يستمر لمدة طويلة، مع أن الجزء الأكبر منه يحصل في الأيام الأولى من بداية الصب والأشهر الأربعة التالية، ويتوقف بمضي نحو ثلاث سنوات. تتعلق درجة تبخر الماء من الخرسانة، ومن ثم تشوهات الانكماش بعوامل متعددة أهمها:

+ رطوبة الوسط المحيط، حيث يقل الانكماش مع زيادة الرطوبة
 + نسبة الماء إلى الإسمنت، حيث يزيد الانكماش مع زيادة هذه النسبة
 + سمك العنصر الخرساني، يزيد الانكماش مع انخفاض هذا السمك، وزيادة تسطح العنصر الخرساني
 + الزمن، حيث يزداد الانكماش مع الزمن، مع أن الجزء الأكبر منه يحصل في الأيام الأولى من بداية الصب والأشهر الأربعة التالية، ويتوقف بمضي نحو ثلاث سنوات.
 + نوعية الخرسانة، حيث يزداد الانكماش كلما خف وزن الحصى المستخدمة، وتخفض درجة تراص الخرسانة ويزداد عيار الإسمنت في الخلطة الخرسانية.
 لتحديد قيم تشوهات الانكماش النسبي في المنشآت الخرسانية العادية المسلحة، وكذلك التشوهات الناجمة عن تشكل التشققات والهبوطات التفاضلية، ويمكن العودة إلى المراجع ذات العلاقة عند الضرورة.

هـ- التماسك مع التسليح *Bonding with the Reinforcement* :

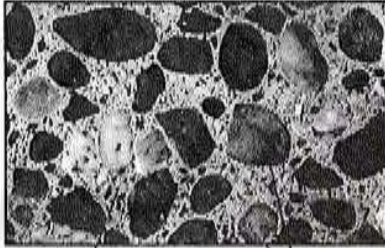
بعد التماسك بين الخرسانة وسطح قضبان التسليح من المتطلبات الأساسية لتأمين الأداء المشترك تحت تأثير أحمال الاستمرار بين مكونات الخرسانة المسلحة، وتزداد مقاومة التماسك مع العوامل التالية:

+ وجود نتوءات مستقيمة أو دائرية أو حلزونية أو غيرها على سطح القضبان
 + جودة الخرسانة المستخدمة ودرجة تراصها (كثافتها) باستعمال كميات كافية من الإسمنت مع تخفيض كميات الماء إلى الحد الذي تتأمن معه قابلية التشغيل المناسبة
 + وجود خشونة ضرورية في سطوح القضبان الملساء، ويمنع منعاً باتاً استخدام قضبان تسليح إذا وجد على سطحها دهون، طلاءات، زيوت، بيتومين أو كل مادة أخرى تخفض من الاحتكاك وقابلية التلاصق والالتحام بين التسليح والخرسانة، الأمر الذي يؤدي إلى إضعاف قوى التماسك المطلوبة.

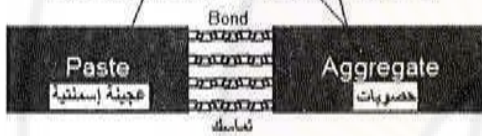
- الميزات الميكانيكية *Mechanical Characteristics*
 من أهم هذه الميزات التي يجب معرفتها في الخرسانة ما يلي:

المقاومة على الضغط وعلى الشد وعلى القص وعلى الفتل وعلى الدهس وغير ذلك، وكذلك معايير التشكل الطولي ومعايير التشكل العرضي. وفيما يلي عرض مختصر لهذه الخواص. كما هو معلوم تتعلق مقاومة الخرسانة المتصلبة بشكل أساسي بما يلي:

- التماسك بين الحصى والعمية الاسمنتية
- مقاومة الحصى وترتيبها الحبي وشكلها
- مقاومة العمية الإسمنتية، الشكل (10-1)، وإضافة إلى ذلك: طريقة الرص والرعاية المطلوبة والعمر والرعاية والعوامل البيئية وغير ذلك



الشكل (10-1) الخرسانة المتصلبة والتماسك بين العمية الإسمنتية والحصى



❖ المقاومة على الضغط وعلى الشد *Compressive and Tensile Strength*:

تحدد المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط f'_c (هي القيمة التي تحدد درجة جودة الخرسانة C *Concrete Quality Class* في الوقت نفسه)، والمقاومة المميزة في الشد اعتماداً على اختبارات تجريبية لعينات قياسية عمرها 28 يوماً محفوظة تحت الماء في درجة حرارة 20 ± 2 درجة مئوية وضغط جوي نظامي، ويجب ألا يزيد عدد العينات التي يحتمل أن تنخفض مقاومتها عن المقاومة المميزة بأكثر من 10% طبقاً للمعايير الإحصائية. ويمكن اعتماد نسب احتمالية أخرى شريطة أن تكون متناسبة مع طبيعة المنشأ ونوعية التنفيذ وغير ذلك.

يمكن تصنيف درجات جودة الخرسانة واستخدامها كما في الجدول (1-5)، مع أنه من الضروري أن تكون $f'_c \geq 18 \text{ MPa}$ كأحد الاحتياطات لمقاومة الزلازل.

لا تستخدم خرسانة بجودة أكبر من C35 إلا في حالة الخرسانة مسبقة الإجهاد أو لأغراض إنشائية خاصة، وفي الحالات التي يتم فيها استخدام أنواع متقدمة من الألياف وتسلح خاص

ذي مواصفات محددة وغير ذلك. وطبيعي أن تكون تكنولوجيا إنتاج الخرسانة عالية الجودة مختلفة عن التكنولوجيا العادية، إذ يتم استخدام إضافات معينة وحصويات مطعّمة بمواد أخرى مناسبة.

الجدول (1-5) تصنيف درجات جودة الخرسانة

C35	C30	C25	C20	C18	C15	C12	C10	C8	C5	درجة الجودة
35	30	25	20	18	15	12	10	8	5	f'_c [MPa]
خرسانة مسبقة الإجهاد			خرسانة مسلحة			خرسانة عادية		نظافة	ردم	مجال الاستخدام

يجري تحديد المقامات المميزة على الشد وعلى الضغط مع تصميم الخلطات الخرسانية أو دونها عند الضرورة. يقصد بتصميم الخلطة الخرسانية تحديد الكميات المثالية اللازمة من الإسمنت والماء والرمل والحصص (الناعم والخشن) وغير ذلك لإنتاج متر مكعب من الخرسانة قابلة تشغيل معينة.

حالة تصميم الخلطات الخرسانية (قبل التنفيذ أو في مرحلة التصميم):

- المقاومة المميزة في الضغط f'_c :

قبل إجراء الحسابات التصميمية، يجب تحديد المقاومة المميزة للخرسانة المطلوبة في الضغط (على أساس عينات نظامية أسطوانية الشكل بقطر 15cm وارتفاع 30cm، أو ما يعادلها باستخدام معاملات التصحيح المناسبة)، والتي على أساسها يجري تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة والعادية، الشكل (1-11). هنا، يجب أن يتم اختيار مركبات الخلطات الخرسانية لتحقيق هذه المقاومة على الأقل بعد إجراء العمليات الإحصائية المطلوبة، أي أن تكون عيارات الإسمنت والماء والحصص بنوعيه الناعم والخشن لإنتاج $1m^3$ من خرسانة ذات قابلية تشغيل معينة وذات مقاومة متوسطة في الضغط \bar{f}' محققة للعلاقة التالية:

$$\bar{f}' = f'_c + k s \Rightarrow ; \quad (1-1)$$

$$\Rightarrow f'_c = \bar{f}' - k s = \bar{f}'(1 - k \delta)$$

حيث: $\delta = \frac{s}{\bar{f}'}$ - الانحراف المعياري النسبي

k - معامل النسبة الاحتمالية، وتتعلق قيمته بعدد عينات الاختبار المقبولة، وعلى احتمال أن تكون نسبة 10% من العينات ذات مقاومة على الضغط أقل من f'_c . ويمكن اعتماد القيمة 1.31 إذا كان عدد العينات لا يقل عن 30 عينة، والقيمة 1.38 إذا كان هذا العدد يقل عن 9 عينات. والقيمة 1.34 عندما لا يقل عدد العينات عن 15. وفي الحالات الأخرى يمكن العودة إلى الجدول (6-1).

s - الانحراف المعياري *Standard Deviation* ويحسب بالعلاقة:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f'_i - \bar{f}')^2}{n-1}} \quad (1-2)$$

حيث:

f'_i - مقاومة العينة الأسطوانية بقطر 150mm وارتفاع 300mm بعد 28 يوماً من الصب،
 $\bar{f}' = \frac{\sum f'_i}{n}$ - وسطي مقاومات العينات الأسطوانية، n - عدد عينات الاختبار بحيث لا يقل عن 15 في حال تصميم الخلطة ولا عن 30 في حال ضبط الجودة خلال التنفيذ.

هنا يمكن تمثيل العلاقات الواردة أعلاه باستخدام منحنى توزيع غاوس الاحتمالي الطبيعي η - كثافة التكرار *Density of Frequency*، وتشير المنطقة المظللة إلى عدد العينات التي يحتمل أن تعطي مقاومات أقل من المقاومة المميزة.

من أجل استخدام العلاقات السابقة يجب أخذ النقاط التالية بالحسبان:

+ إذا كان تصنيع الخرسانة في مجايل مركزية تحتفظ بسجلات لنتائج كسر العينات الأسطوانية (باستخدام مكابس ضغط مناسبة)، بعدد لا يقل عن ثلاثين أسطوانة مأخوذة من خرسانة مصنعة من المواد نفسها، ولا تزيد على ستة أشهر، وتحت إشراف مماثل، يمكن عندئذ استخدام هذه النتائج لحساب الانحراف المعياري s من العلاقة (1-2)، بشرط أن تكون $s \geq 3MPa$ لخرسانة لا تقل جودتها عن C30، ثم حساب المقاومة المتوسطة من العلاقة:

$$\bar{f}' = f'_c + 1.31s_{30} \quad (1-3)$$

حيث :

s_{30} - الانحراف المعياري لعدد من العينات لا يقل عن 30.

+ عندما لا يتم إنتاج الخرسانة في مجبل مركزي، أو كان يتم بمجبل مركزي لا يحتفظ بسجلات
لنتائج الكسر تحقق الشروط الواردة أعلاه، يمكن عندئذ حساب المقاومة المتوسطة التي يجب
الحصول عليها لخرسانة ذات درجة جودة لا تقل عن $C15$ من العلاقة:

$$\bar{f}' = f'_c + 8MPa ; \quad (1-4)$$

وكبديل عن العلاقة (1-4) يمكن اعتماد المقاومة المتوسطة المطلوبة مساوية إلى 1.25 مرة من
المقاومة المميزة المطلوبة.

الجدول (1-6) قيم العامل (k) بالنسبة لعدد الاختبارات (العينات) واحتمالات حدوث قيم أقل
من القيمة المميزة

نسب احتمالية حدوث مقاومات أقل من المقاومة المميزة						عدد الاختبارات (العينات)
25 %	20 %	15 %	10 %	5 %	2,5 %	
0,76	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	3
0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	4
0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,57	5
0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	6
0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,36	7
0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	8
0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	9
0,70	0,88	1,09	1,37	1,81	2,23	10
0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	15
0,69	0,87	1,06	1,32	1,73	2,09	20
0,68	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	25
0,68	0,85	1,05	1,31	1,70	2,04	30
0,67	0,84	1,04	1,28	1,65	1,96	∞

عادة تصنع ثلاث جבלات تجريبية *Experimental Patches* مختلفة من الخلطة
الخرسانية المصممة باستخدام المواد نفسها من حيث النوعية والكمية، وبالشروط المتوقعة، وقد
يتم ذلك في المخبر على مسؤولية المهندس المختص نفسها، وتؤخذ 3 عينات أسطوانية نظامية
من كل جبلية على الأقل للاختبار بعد 28 يوماً من الصب، كما يمكن أن تؤخذ 3 عينات أخرى
على الأقل من كل جبلية للاختبار بعد 7 أيام، على أن يتم حفظ ورعاية العينات وفق الشروط

النظامية، ومن ثم يتم اختبارها بالطريقة المطابقة للقواعد ذات العلاقة. وتعدّ نسب الخلطة مقبولة إذا كان متوسط نتائج كسر العينات، وعددها لا يقل عن 9، محققاً للمترابحة:

$$\bar{f}_{28} \geq f'_c + 1.38s_9 ; \quad (1-5-a)$$

حيث: s_9 - الانحراف المعياري لعدد من العينات لا يقل عن 9.

\bar{f}_{28} - متوسط نتائج كسر العينات بعد 28 يوماً.

وإذا كان عدد العينات لا يقل عن 15 تعدّ نسب الخلطة مقبولة عندما:

$$\bar{f}_{28} \geq f'_c + 1.34s_{15} ; \quad (1-5-b)$$

حيث: s_{15} - الانحراف المعياري لعدد من العينات لا يقل عن 15.

\bar{f}_{28} - متوسط نتائج كسر العينات بعد 28 يوماً.

يمكن في بعض الحالات الخاصة المبررة قبول نسب الخلطة الخرسانية المصممة

إذا كان متوسط نتائج الكسر بعد 7 أيام من الصب \bar{f}_7 وعددها لا يقل عن 9 محققاً

للمترابحة (1-6-a) أو المترابحة (1-6-b) إذا كان عدد العينات لا يقل عن 15،

(وذلك عند استخدام الإسمنت العادي ذي التصلب الطبيعي):

$$\bar{f}_7 = 0.7(f'_c + 1.38s_9) ; \quad (1-6-a)$$

$$\bar{f}_7 = 0.7(f'_c + 1.34s_{15}) ; \quad (1-6-b)$$

تحتسب قيمة الانحراف المعياري s_9 و s_{15} بتطبيق العلاقة (1-2) أعلاه. وكبدل

عن العلاقات أعلاه يمكن استخدام العلاقات التالية (عندما لا يقل عدد العينات عن

15 على الترتيب):

$$\bar{f}_{28} \geq 1.25f'_c ; \quad (1-6-c)$$

$$\bar{f}_7 = 1.25(0.7f'_c) ; \quad (1-6-d)$$

خطوات اختبار مقاومة الخرسانة على الضغط مخبرياً:

1. تجميع أجزاء القالب (مكعب أو أسطوانة أو موشور) وربطها بإحكام وتنظيف

أسطحها الداخلية من الشوائب ثم تدهن بطبقة رقيقة من الزيت.

2. تجهيز عينة من الخرسانة تكفي لصنع ثلاث عينات على الأقل أو حسب العدد

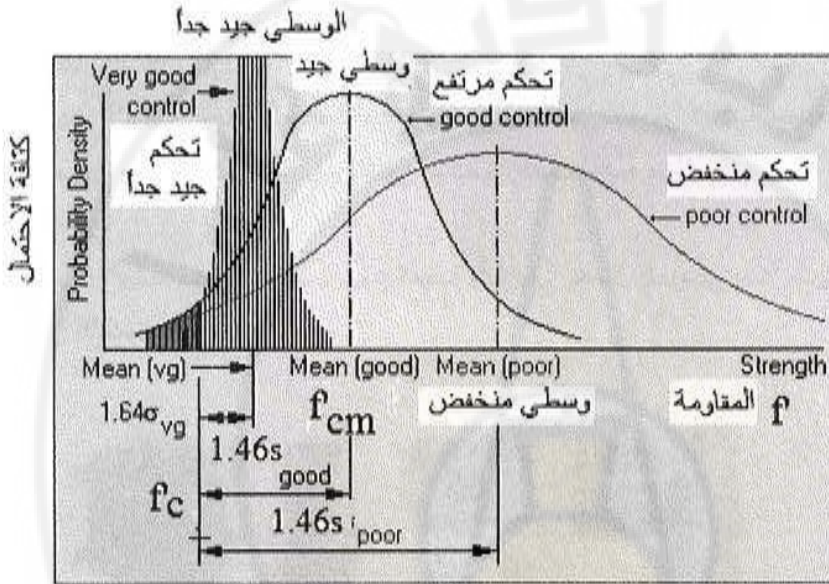
المطلوب.

3. صب الخرسانة في القالب على ثلاث طبقات يتم دمك كل منها جيداً (بالهزاز) دون حصول انفصال حبيبي أو يدوياً بمعدل 25 وخذة بقضيب الدمك).
4. تحفظ العينات في جو رطب خال من الاهتزازات مع تغطيتها إن أمكن لتقليل تبخر الماء من العينة لمدة 24 ساعة .
5. تفك القوالب بعد مضي 24 ساعة وتستخرج العينات وتوضع في حوض المعالجة لحين إجراء الاختبار عليها.
6. تخرج العينات من الحوض وتنشف من قطرات الماء العالقة وتوضع في ماكينة الاختبار، الشكل (11-1).
7. إجراء الاختبار على العينات مع مراعاة أن يكون محور العينة منطبقاً على المحور الرأسي للماكينة وأن يكون سطحاً العينة المعرضان للضغط أملسين وناعمين.
8. تحميل العينة تدريجياً حسب نوع العينة وأبعادها بحمل تدريجي يبدأ من الصفر حتى الانكسار.



الشكل (11-1) صب العينات واختبارها لتحديد المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط

9. تسجل النتائج في جدول خاص يحدد أبعاد العينة ومواصفاتها وتاريخ الاختبار وعمر العينة وغير ذلك، وبعد الانتهاء من الاختبار يتم تحديد مقاومة كسر كل عينة كما يلي: تساوي مقاومة كسر العينة الخرسانية مقدرة بالـ kg/cm^2 حمولة الكسر مقدرة بالـ kg مقسومة على مساحة مقطع العينة بالـ cm^2 ، ثم يتم إجراء العمليات الإحصائية المطلوبة لتحديد المقاومة المميزة على الضغط للخرسانة المدروسة.



الشكل (12-1) منحنى غاوس الاحتمالي عند حساب المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط

- المقاومة المميزة في الشد f_{ct} :

تحدد المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط بطرائق مخبرية غير مباشرة، لأن تحديد هذه المقاومة بطريقة الشد المباشر يحتاج لشروط خاصة لن يتم الحديث عنها هنا، وأهم هذه الطرائق اختبار الشد بالفلق واختبار الشد بالانحناء، مع تطبيق المعايير الإحصائية المعروفة.

اختبار الشد بالفلق *Tension Testing by Splitting*

يجري الاختبار باستخدام عينات قياسية أسطوانية بقطر 150mm وطول 300mm عمرها 28 يوماً، مع تطبيق شروط الحفظ والرعاية النظامية، حيث يتم فلق العينات تحت تأثير حملي ضغط متساويين يعملان على رأسين متقابلين، الشكل (1-13) والشكل (1-14-أ)، ويجري تحديد مقاومة الخرسانة للشد بالفلق من العلاقة:

وفي حال استخدام عينات مكعبية، حيث: a - طول ضلع المكعب، الشكل (1-14-ب):

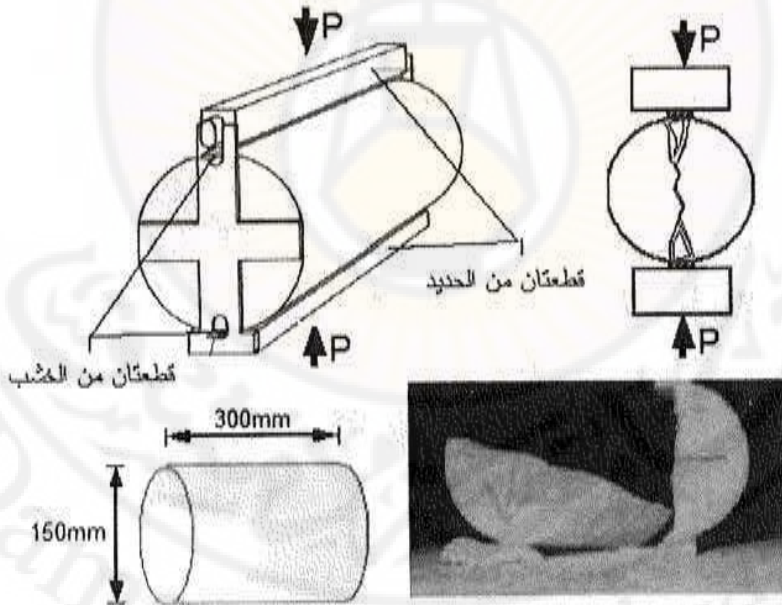
وكذلك: P - حمولة الكسر الكلية المطبقة، L - طول عينة الاختبار.

وتكون مقاومة الخرسانة للشد f_{ct} مساوية نحو 0.85 من f_{sp} ، أي إن:

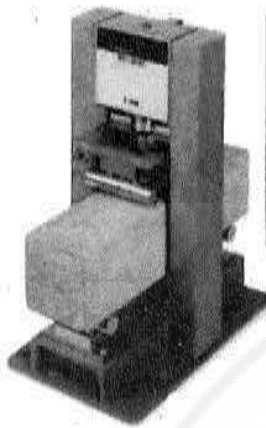
$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi d L}; \quad (1-7)$$

$$f_{ct} = \frac{0.55P}{dL}; \quad (1-8)$$

$$f_{ct} = \frac{0.55P}{a^2}; \quad (1-9)$$



الشكل (1-13) اختبار شد الخرسانة بفلق عينات أسطوانية



تثبيت العينة
في ماكينة الاختبار

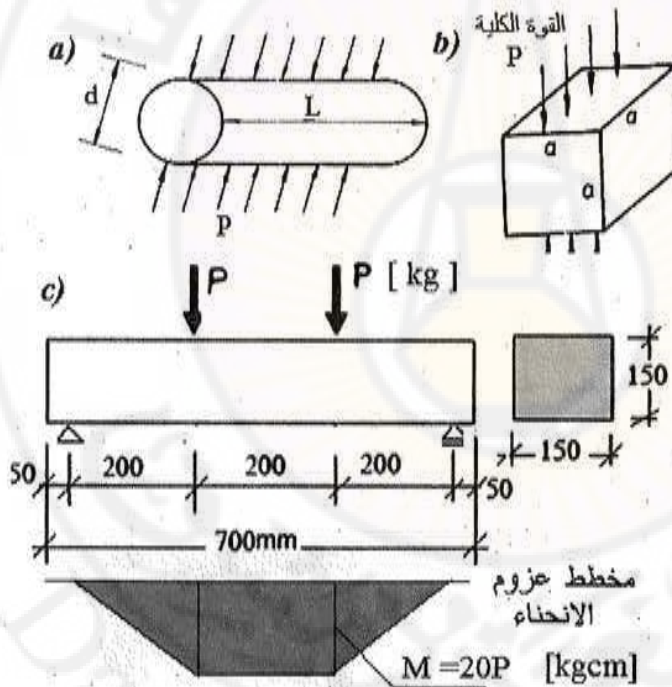


قالب عينة الانحناء



مترار ديمك كهربائي

الشكل (14-1) اختبار شد
الخرسانة بالانحناء.



مخطط عزوم
الانحناء

$$M = 20P \text{ [kgcm]}$$

الشكل (15-1) اختبار مقاومة الشد في الخرسانة بالفلق والانحناء وفق الكود السوري:

- (a) عينات أسطوانية بالفلق
- (b) عينات مكعبية بالفلق
- (c) اختبار الشد بالانحناء البسيط

اختبار الشد بالانحناء *Tension Testing by Bending*

يتم الاختبار هنا باستخدام عينات موشورية الشكل مقطوعها العرضي مربع طول ضلعه 100mm أو 150mm وطولها 550mm أو 700mm ، ومحملة على الانحناء بحملين مركزيين متمائلين P يبعد كل منهما 150mm أو 200mm عن المسند (الركيزة) ، كما يوضح الشكل (14-1) والشكل (15-1-c). وتحدد مقاومة الشد في الانحناء f_{cb} لقطاع مربع ضلعه a بالعلاقة:

$$f_{cb} = \frac{6M}{a^3} ; \quad (1-10)$$

وتؤخذ مقاومة الخرسانة في الشد مساوية % 60 من f_{cb} ، أي:

$$f_{ct} = \frac{3.6M}{a^3} ; \quad (1-11)$$

حيث :

M - عزم الانحناء المسبب للكسر ، a - طول ضلع مقطع العينة بالمليمتر .
ومن المفروض تعديل النتائج باستخدام عوامل التصحيح المناسبة عند استخدام عينات ذات عمر مختلف عن 28 يوماً ، كما سيرد لاحقاً .

حالة عدم تصميم خلطة خرسانية:

يمكن اعتماد القيم المميزة للمقاومة الميكانيكية في حالة الخرسانة المحضرة بالطرائق النظامية التي لا تتعدى درجة جودتها $C25$ (ولا يقل مقدار هبوط أبراس عن القيم المعتمدة لكل حالة راهنة) كما يلي:

(a) تحديد f'_c في الخرسانة المراقبة *Controlled Concrete*:

عندما تكون الخرسانة مراقبة، أي:

- يتم تقسيم الحصويات إلى شرائح حجمية وفقاً لقطر الحبيبات.
- استخدام المعايير الوزنية.
- أخذ رطوبة الحصويات بالحسبان عند تحديد عيار الماء في الخلطة.
- وجود إشراف دائم على تصنيع الخرسانة ومراقبتها ورعايتها وفق الأصول، مع أخذ عينات أسطوانية نظامية واختبارها لمراقبة الجودة، يمكن عندئذ اعتماد القيم الواردة في الجدول (1-7) لتحديد المقاومة المميزة في الضغط.

الجدول (7-1) المقاومة المميزة المحتملة على الضغط في الخرسانة المراقبة

400	350	300	$[kg/m^3]$ ، عيار الاسمنت
25	20	18	$[MPa]$ ، f'_c

(b) تحديد f'_c في الخرسانة غير المراقبة *Uncontrolled Concrete*:

في حالة الخرسانة غير المراقبة (أي المصنعة بإهمال واحد أو أكثر من الإجراءات أعلاه)، يمكن اعتماد مقاومات الضغط المميزة المبينة في الجدول (1-8-1).

الجدول (1-8-1) المقاومة المميزة المحتملة للخرسانة غير المراقبة

400	350	300	250	200	150	100	$[kg/m^3]$ ، عيار الاسمنت
20	18	15	12	10	8	5	درجة جودة الخرسانة f'_c ، $[MPa]$

(c) تحديد مقاومة الشد المميزة المحتملة f_{ct} في الخرسانة:

يمكن الاستناد في هذه الحالة على قيم f'_c لتحديد مقاومة الشد المحتملة وفقاً للعلاقة:

$$f_{ct} = 0.44 \sqrt{f'_c} ; \quad (1-12)$$

يمكن اعتماد مقاومات الشد المميزة المحتملة كما في الجدول (1-8-1) ب).

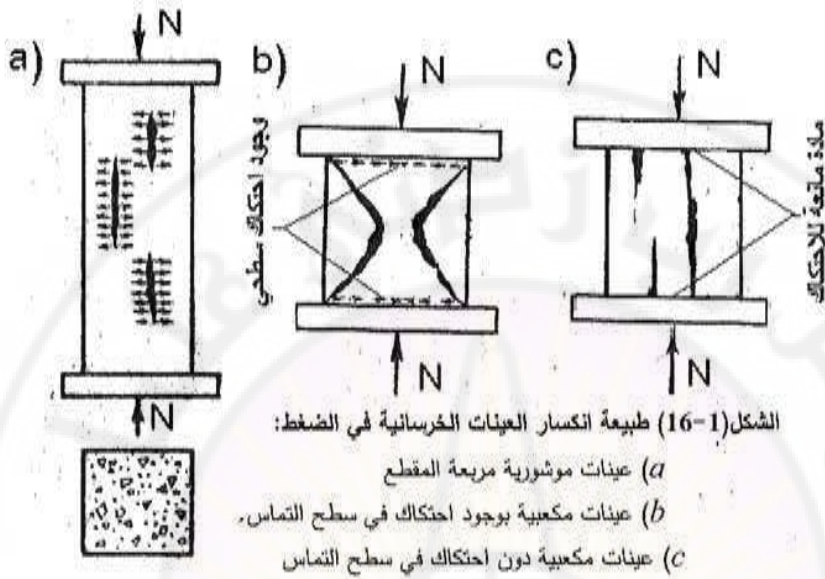
الجدول (1-8-1) ب) المقاومة المميزة المحتملة على الشد في الخرسانة المراقبة

C25	C20	C18	C15	C12	C10	درجة جودة الخرسانة f'_c
2.2	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	المقاومة المحتملة للخرسانة في الشد f_{ct} ، $[MPa]$

عوامل التصحيح *Correction Coefficients*:

من المفروض إجراء التصحيح اللازم لنتائج كسر العينات عندما تختلف أبعادها وأشكالها عن العينات الاسطوانة القياسية، أو عندما يختلف عمر العينات عن 28 يوماً، إذ إن طبيعة انكسار العينات في الضغط تختلف وفقاً للشكل والأبعاد، إضافة لنعومة سطح التلامس بين

مستويات الاستناد وسطح العينة. ولكي يكون الأمر أكثر وضوحاً، يمكن الإمعان في الشكل (16-1) الذي يوضح شكل التشققات الناتجة قبيل الانكسار في العينات الخرسانية الموشورية والمكعبة مثلاً.



الجدول (9-1) عوامل التصحيح لاختلاف الشكل والأبعاد

معامل التصحيح	الأبعاد ، [mm]	شكل العينة
1.00	القطر 150 والارتفاع 300	أسطواني
0.97	القطر 100 والارتفاع 200	
1.05	القطر 250 والارتفاع 500	
1.00	150 × 150 × 300	موشوري
1.05	150 × 150 × 450	
1.05	200 × 200 × 500	
0.78	100 × 100 × 100	مكعبية
0.80	150 × 150 × 150	
0.83	200 × 200 × 200	
0.90	300 × 300 × 300	

يبين الجدول (9-1) عوامل التصحيح المعتمدة في الكود [1]، ولتحديد مقاومة الكسر المتوقعة المكافئة للعينات الأسطوانية النظامية بقطر 15cm وارتفاع 30cm، يجب ضرب نتائج الكسر للعينات ذات الأبعاد الأخرى بهذه العوامل قبل إجراء المعالجات الإحصائية اللازمة. وبالنسبة للتصحيح المتعلق بالعمر يمكن استعمال الجدول (10-1)، ويجب تعديل قيم المقاومة على الشد قبل إدخالها بالحسابات حسب الجدول (11-1) إذا ثبت أن الإسمنت يحقق المواصفات من حيث سرعة التصلب الأولي والنهائي، وإلا فيمكن اعتماد النتائج دون تعديل من أجل عينات بعمر لا يتعدى 60 يوماً للإسمنت البورتلاندي العادي أو سريع التصلب و 90 يوماً للإسمنت المقاوم للكبريتات حسب تقدير المهندس المشرف.

الجدول (10-1) عوامل تصحيح اختبارات الضغط لاختلاف العمر

العمر بالأيام	3	7	28	60	90	360 أو أكثر
إسمنت بورتلاندي عادي	2.50	1.50	1.00	0.95	0.90	0.80
إسمنت بورتلاندي سريع التصلب	1.80	1.30	1.00	0.97	0.95	0.90

الجدول (11-1) عوامل تصحيح اختبارات الشد لاختلاف العمر

العمر بالأيام	3	7	28	90	360 أو أكثر
إسمنت بورتلاندي عادي	2.00	1.40	1.00	0.95	0.90
إسمنت بورتلاندي سريع التصلب	1.50	1.30	1.00	0.95	0.90

ملاحظات: يفضل إنجاز ما يلي (مع مراعاة عوامل التصحيح):

1. من أجل العينات الخرسانية المصنعة في المخبر والمعالجة في المخبر يجب تحقيق الشروط التالي على الأقل: لا تقل المقاومة على الضغط بعد 28 يوماً من الصب عن المقاومة المتوسطة التصميمية المطلوبة (الدنيا).
 2. من أجل العينات الخرسانية المأخوذة من الورشة والمختبرة في شروط المخبر النظامية، يجب تحقق الشرطين التاليين:
- لا تقل المقاومة على الضغط بعد 28 يوماً من الصب عن المقاومة المتوسطة المطلوبة (الدنيا).
 - لا يتعدى الفرق بين أكبر وأصغر قيمة لعينات الاختبار منسوبة إلى القيمة الوسطية لهذه العينات النسبة 20%.

❖ معايير التشكل الطولي (معامل المرونة *Modulus of Elasticity*):

يمثل معامل المرونة اللحظي في الخرسانة E_{CO} ميل القطعة المستقيمة التي تمثل الحالة المرنة *Elastic State* على منحنى الإجهاد-التشوه النسبي في الخرسانة، بالنسبة لمحور التشوهات (محور الفواصل). ويؤخذ هذا المعامل (مقدراً بالـ $[MPa]$) في حالة الأحمال اللحظية *Short-Term Loads* أو المتغيرة تغيراً سريعاً، أو عندما تكون إجهادات التشغيل أقل من 55% من إجهاد الكسر f'_{cj} من العلاقة التالية:

$$E_{CO} = 6645 \sqrt{f'_{cj}} ; \quad (1-13)$$

حيث:

f'_{cj} - مقاومة الخرسانة الأسطوانية في الضغط بعمر t يوماً عند تحديد معامل المرونة مقدرة بالـ $[MPa]$.

وفي حالة الأحمال طويلة الأمد *Long-Term Loads*، وعدم وجود تسليح ضغط في المقاطع المعرضة لعزوم انحناء، يمكن تحديد معامل المرونة اللحظي من العلاقة:

$$E_{CO} = 2215 \sqrt{f'_{cj}} \approx \frac{E_{CO}}{3} ; \quad (1-14)$$

إذ يسبب تأثير الحمولة طويل الأمد انخفاضاً مستمراً مع الزمن لهذا المعامل بسبب التشوهات الناجمة عن ظاهرة السيلان (الزحف *Creep*).

❖ معايير التشكل العرضي *Transverse Strain Modulus*:

يتعلق هذا المعامل في حالة التشوهات المرنة للخرسانة بنسبة بواسون $\nu = 0.20$ (حسب الكود السوري) عادة والتي تمثل النسبة بين قيمة التشوه العرضي إلى قيمة التشوه الطولي المرافقة، ويمكن تحديد هذا المعامل من العلاقة:

$$G = \frac{E_{CO}}{2(1+\nu)} ; \quad (1-15)$$

❖ التشوهات الحجمية *Volumetric Deformation*:

تعاني العناصر الخرسانية تأثير التشوهات الحجمية نتيجة عوامل أخرى ذاتية (غير الأحمال المباشرة مثل التشوهات الحرارية وتشوهات الانكماش اللدن والجاف والتشوهات الناجمة عن أفعال كيميائية بسبب ظاهرة الكريونة وتأثير صدأ التسليح وغير ذلك، إضافة إلى خضوع الخرسانة تحت تأثير الحمولة الثابتة طويلة الأمد إلى تشوهات إضافية بنفس اتجاه الحمولة، تتزايد مع الزمن، وتحدث هذه التشوهات ببطء كما لو أن الخرسانة تزحف. ولهذه الظاهرة)

ظاهرة الزحف (*Creep Phenomenon*) تأثيرات كبيرة على الحالة الإجهادية للعناصر الخرسانية المسلحة ووضعيات الاستثمار (تزايد السهوم *Deflections* مثلاً عن الحدود المسموحة)، وقد تؤدي في حالات كثيرة إلى نتائج كارثية، عندما لا يتم أخذها بالحسبان تصميمياً أو بإجراءات أخرى.

من أهم العوامل التي لها علاقة بهذه الظاهرة ما يلي:

- نسبة إجهادات التحميل إلى المقاومة، إذ يزداد الزحف مع زيادة إجهادات التشغيل.
 - رطوبة الوسط المحيط، إذ يزداد الزحف مع تناقص الرطوبة.
 - عمر الخرسانة عند التحميل، إذ إن الزحف ينخفض كلما ازداد عمر الخرسانة.
 - نسبة الإسمنت في الخرسانة، إذ يزداد الزحف بازدياد هذه النسبة.
 - نسبة ماء الخلط، إذ يزداد الزحف مع ازدياد كمية ماء الخلط بالنسبة لكمية الإسمنت.
 - سمك العنصر الخرساني، إذ يزداد الزحف مع تناقص هذا السمك.
 - الزمن، إذ إن الزحف يزداد مع مرور الزمن.
 - نسبة تسليح الضغط إلى مساحة المقطع العرضي للعنصر.
- ولتحديد قيمة التشوهات الناتجة عن الزحف، وتأثيرها في العناصر الخرسانية المسلحة، يمكن مراجعة الفصل التاسع من هذا الباب الثاني، أو العودة إلى المراجع ذات العلاقة، مثل [1].

1-3-3 الخرسانة العادية في الظروف الخاصة:

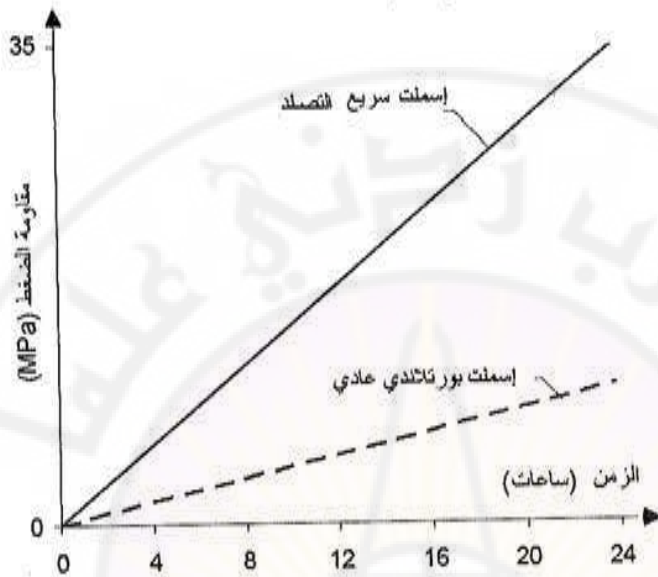
فيما يلي بعض التوجيهات المختصرة التي يمكن من خلالها تحسين أداء الخرسانة العادية لتلبي متطلبات بعض الظروف الخاصة، ولا سيما تسريع عملية اكتساب المقاومة وتحسين الأداء ضمن شروط الطقس الحار والطقس البارد، على أن يتم الرجوع للمراجع المختصة للمزيد من التفاصيل.

1-3-3-1 تسريع الحصول على المقاومة المطلوبة:

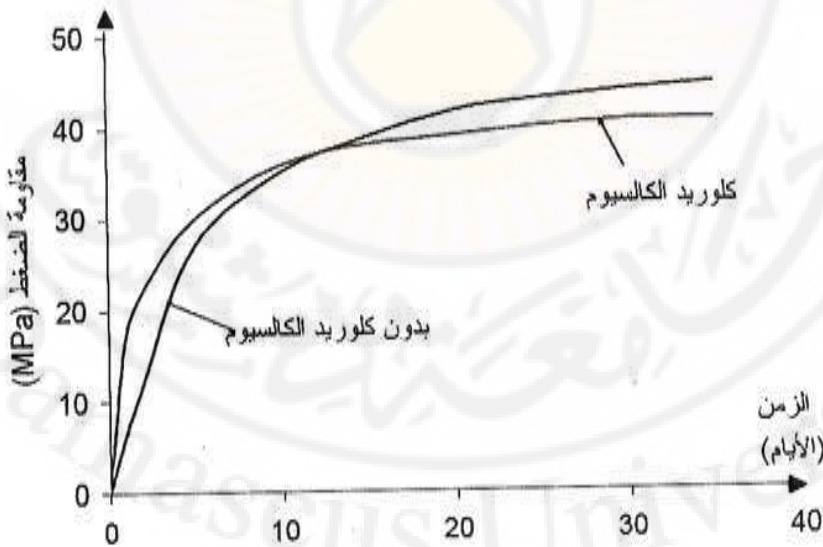
لتسريع عملية اكتساب المقاومة (مثلاً لضرورات الترميم والتدعيم السريع وغير ذلك)، يتم اكتساب المقاومة المبكرة باستخدام:

- إسمنت سريع التصلب، الشكل (1-17)
- إضافات خاصة (مسرعات التصلب *Accelerators*)، الشكل (1-18)

هي مواد أخرى غير الحصى والبنت والإسمنت والماء تتم إضافتها أثناء تحضير الخلطات الخرسانية، ومن هذه المواد كلوريد الكالسيوم $CaCl_2$ الذي يسبب ارتفاع درجة الحرارة ومن ثم ازدياد سرعة تفاعلات الهدرجة الإسمنتية.



الشكل (17-1) تأثير استعمال الإسمنت سريع التصلب على اكتساب المقاومة المبكرة في الخرسانة العادية



الشكل (18-1) تأثير استعمال كلوريد الكالسيوم على اكتساب المقاومة في الخرسانة العادية على الضغط

يعتمد استعمال الإضافات على:

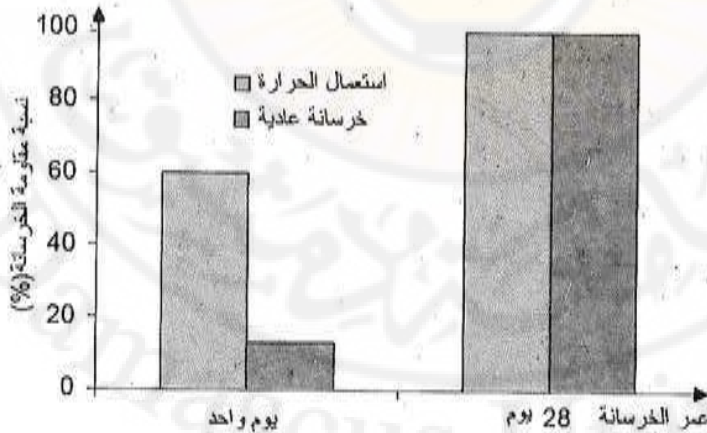
- النسبة المستخدمة
- نوع الإسمنت
- درجة الحرارة المحيطة

النسب المعيارية لمكونات الخلطة الخرسانية

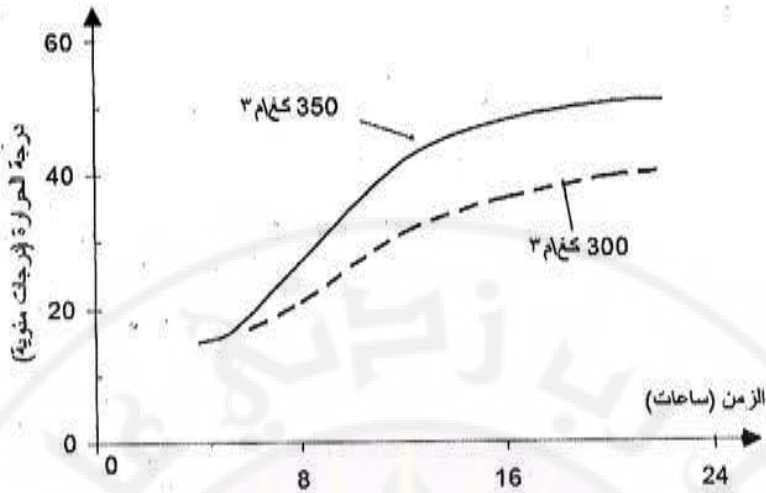
يستخدم كلوريد الكالسيوم كمادة سائلة تضاف إلى ماء الخلط بالنسب المحددة، ولا بد من التنويه هنا إلى ضرورة استعمال هذه المادة بنسب ضعيفة في الخرسانة المسلحة والخرسانة مسبقة الإجهاد (لتفادي الأثر السلبي على التسليح).

• الحرارة، وهي الطريقة الأكثر استعمالاً، خاصة من أجل الخرسانة مسبقة الصنع، حيث تزداد سرعة تفاعلات الهدرجة الإسمنتية المؤدية للتصلب، الشكل (1-19). هنا توجد عدة طرائق لتسخين الخرسانة منها:

- استعمال الماء الساخن أو الهواء الساخن (المعالجة بالبخار تحت الضغط).
- الاستفادة من حرارة التفاعلات الكيماوية (كمية الإسمنت ونوعه)، حيث تتعلق كمية الحرارة الناتجة بكمية الإسمنت ونوعه، الشكل (1-20).
- استعمال الكهرباء، حيث يستخدم التسليح لتمرير التيار الكهربائي.



الشكل (1-19) تأثير الحرارة على اكتساب المقاومة في الخرسانة العادية على الضغط

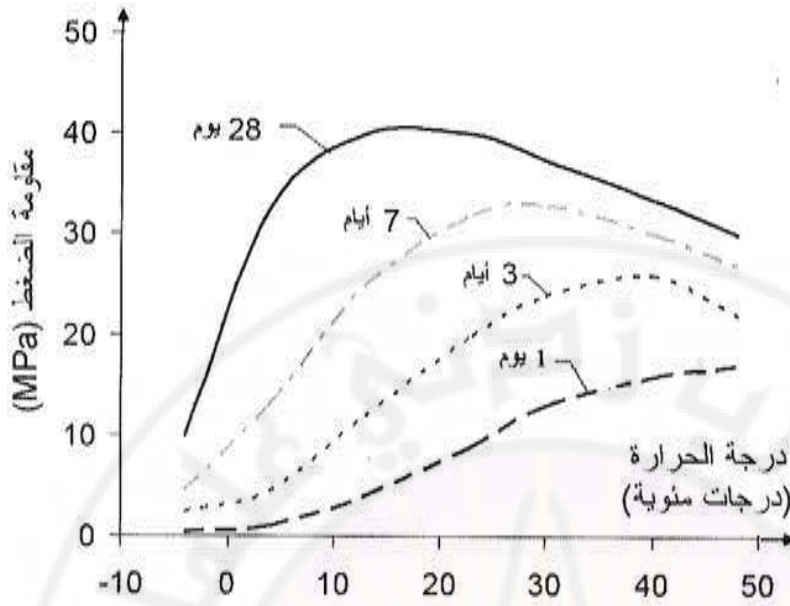


الشكل (1-20) تأثير زيادة كمية الإسمنت في درجة الحرارة في الساعات الأولى بعد الخلط

1-3-2- الخرسانة في الطقس الحار:

- تتطلب أعمال الخرسانة في الطقس الحار عناية *Curing* أكبر مما هو عليه في الطقس العادي بسبب عدد من المشاكل الإضافية ولا سيما:
- الحاجة إلى كمية ماء أكبر في الخلطة الخرسانية
 - سرعة الانخفاض في قابلية التشغيل
 - احتمال حدوث تشققات مبكرة لدنة
 - ضرورة معالجة الخرسانة الطرية لتجنب التبخر السريع
- يتطلب كل ذلك استهلاك كميات إضافية من الماء إلى الخلطة، وهذا ما يسبب انخفاض النوعية (المقاومة، الديمومة، الكتامة) وزيادة تشوهات الانكماش نتيجة التبخر.
- تأثير درجة الحرارة:

كما ورد أعلاه، كلما ازدادت درجة الحرارة في الخرسانة أثناء الصب، زادت سرعة اكتساب المقاومة المبكرة، وتكون المقاومة النهائية أقل نسبياً، لأن سرعة التفاعلات الكيماوية المرتبطة بالتصلب تخلق عد تجانس بنيوي وتشكل الفراغات ضمن المونة الإسمنتية والخرسانة ككل، الشكل (1-21).



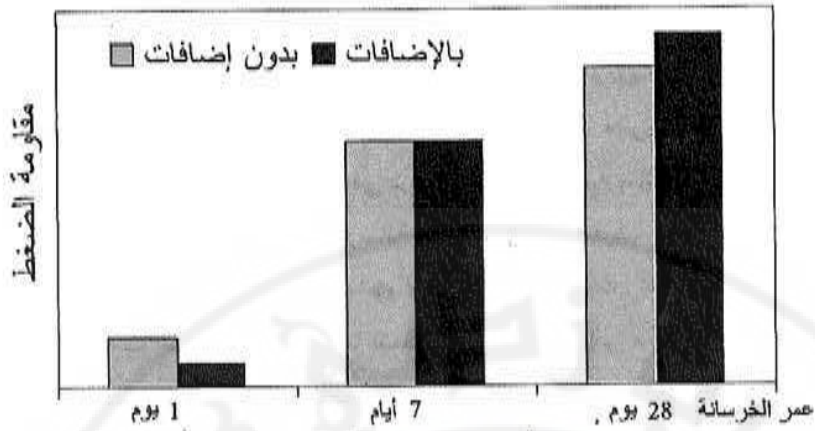
الشكل (1-21) تأثير درجة الحرارة على اكتساب مقاومة الخرسانة في الضغط

لذلك يفضل تخفيض درجة حرارة الخرسانة أثناء الصب. ويشار هنا إلى الاختلاف بين وضع الخرسانة في الموقع عما هو في المخبر بسبب عدد من العوامل التي تساعد على جفاف الخرسانة (انخفاض قابلية التشغيل) وإكمال التفاعلات الكيماوية وظهور التشققات وانخفاض الديمومة، ومن هذه العوامل:

- رطوبة الجو
- التعرض لأشعة الشمس
- سرعة الرياح والطريقة المتبعة في المعالجة

■ تأثير تبريد مواد الخرسانة:

يفضل ألا تزيد درجة الحرارة في الخرسانة الطرية على 16 درجة مئوية، وهذا من الصعب تحقيقه في الطقس الحار، ويجب السعي عندئذ كي لا تتجاوز درجة الحرارة في الخرسانة الطرية 22 درجة مئوية. هنا يكون لتبريد الحصى دور الأكبر مقارنة مع المكونات الأخرى كالإسمنت والماء، إذ تمثل كمية الحصى نسبة تصل من 70% إلى 80% تقريباً من الوزن الكلي للخرسانة. ومن الطرائق المستعملة في تبريد الحصى:



الشكل (1-22) تأثير إضافات تخفيض زمن الشك على اكتساب مقاومة الخرسانة في الضغط

- الحماية من أشعة الشمس والترطيب المستمر
- استعمال المبردات
- غطس الحصىيات في الماء البارد داخل الخزانات الخاصة بذلك
- وفي هذا المجال، يمكن اتخاذ بعض الاحتياطات الكفيلة بخفض درجة الحرارة قبل صب الخرسانة مثل:
- رش حديد التسليح وأرضية الصب والكوفراج *Forms* بالماء البارد مع المحافظة على الرطوبة.
- الصب في الصباح الباكر أو بالليل
- نقل وصب الخرسانة في أقرب مكان
- تفادي تمديد فترة الخلط
- تفريغ الخرسانة قبل مضي ساعة زمنية قدر الإمكان
- يمكن استعمال إضافات مبطنة لزمن الشك *Retarding Additives* مثل: الجبس، السكر والزنك، ويتعلق ذلك بالنسبة المستعملة، نوع الإسمنت، نسب الخلطة ودرجة الحرارة وغير ذلك. وتتعلق المقاومة على الضغط في الخرسانة المتضمنة مثل هذه الإضافات بالعمر، الشكل (1-22).

1-3-3- الخرسانة في الطقس البارد:

تجري التفاعلات المرتبطة بتكون الخرسانة بشكل بطيء بوجود الطقس البارد (درجات حرارة منخفضة)، ولذلك يجب حماية الخرسانة الطرية من التجمد حتى الوصول إلى مقاومة على الضغط نحو $3.5MPa$ ، وهذا يحدث في درجات الحرارة العادية خلال 24 ساعة تقريباً، بينما في حالة التجمد تنخفض مقاومة الخرسانة إلى نحو 50% تقريباً في الساعات الأولى من الصب، وذلك بسبب تأخير تفاعلات الماء والإسمنت، ومن ثم تأخر التصلب واكتساب المقاومة، وتتوقف التفاعلات الكيماوية تقريباً عندما تنخفض درجة الحرارة إلى مستو أقل من $(-10C^{\circ})$. ومع ذلك يمكن إجراء الصب طول فترة الشتاء بإتباع عدد من الإجراءات منها:

- عدم صب الخرسانة فوق أرضيات متجمدة، حيث يتم فقدان الحرارة من الخرسانة واحتمال تجمد الطبقات السفلى وتباين درجات الحرارة مع الأجزاء العلوية وتشكل التشققات.
- تغطية الخرسانة حديثة الصب بوسائل مناسبة تمنع فقدان حرارة التفاعلات الداخلية مثل استعمال الورق الكتيم والألواح البلاستيكية وبعض المركبات الكيماوية الملونة بالأسود، وكذلك وضع حواجز عازلة حول المنشأ وتوفير الحرارة في الوسط الداخلي للحجرات المصبوبة وغير ذلك.
- استعمال الإسمنت سريع التصلب
- مضاعفة كمية الإسمنت البورتلاندي العادي المستخدم
- استعمال الإضافات المسرعة لعملية الشك *Setting* مثل كلوريد الكالسيوم
- تسخين ماء الخلط وأحياناً الحصىيات المستخدمة في صناعة الخرسانية بالبخار.

1-4- أمثلة توضيحية:

مثال (1): يطلب حساب المقاومة المميزة لخرسانة تم صب وكسر 12 عينة أسطوانية منها

ضمن الشروط النظامية، وتم الحصول على النتائج التالية بالـ kg/cm^2 :

(168، 168، 175، 197، 197، 197، 202، 211، 214، 214، 242، 251).

الحل:

حساب المتوسط الحسابي لمقاومات العينات المكسورة:

$$\bar{f}' = \frac{\sum f_i}{12} = 203 \text{ kg/cm}^2$$

حساب الخطأ المتوسط التربيعي:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\Delta f_i')^2}{n-1}} = 23.9 \text{ kg/cm}^2$$

الانحراف المعياري النسبي:

$$\delta = \frac{S}{\bar{f}'} = \frac{23.9}{203} = 0.12 \text{ kg/cm}^2$$

وبافتراض أن الاحتمال المعتمد أن تكون نسبة محددة أقل من المقاومة المميزة مقداره 5% وبما أن عدد الاختبارات 12، من الجدول (12-1)، نحسب قيمة k ونساوي 1.78. وتحدد المقاومة المميزة الدنيا كالتالي:

$$f'_c = \bar{f}'(1 - \delta k) = 203(1 - 1.78 \times 0.12) = 106 \text{ kg/cm}^2$$

وبافتراض أن الاحتمال المعتمد أن تكون نسبة محددة أقل من المقاومة المميزة 10% وعدد الاختبارات $n=12$ يكون $k=1.36$ ، وبناء عليه:

$$f'_c = \bar{f}'(1 - \delta k) = 203(1 - 1.36 \times 0.12) = 170 \text{ kg/cm}^2$$

وعندما يكون الاحتمال المعتمد أن تكون نسبة محددة أقل من المقاومة المميزة 20% وعدد الاختبارات $n=12$ يكون $k=0.87$ ، وبناء عليه:

$$f'_c = \bar{f}'(1 - \delta k) = 203(1 - 0.87 \times 0.12) = 182 \text{ kg/cm}^2$$

مثال (2): جانز بسيط من الخرسانة العادية (دون تسليح) طول مجازه 60 cm ومقطعة مربع طول ضلعه 15 cm خاضع لتأثير حملتين مركزيين مطبقتين في نقطتي الثلث ضمن المجاز تساوي كل منهما P ، فإذا كانت مقاومة الخرسانة المستعملة على الشد المباشر $f_{ct} = 30 \text{ kg/cm}^2$ ، ما قيمة القوة P التي تسبب انكسار الجانز؟ الشكل (1-23).

الحل:

$$f_{cb} = \frac{M y}{I}$$

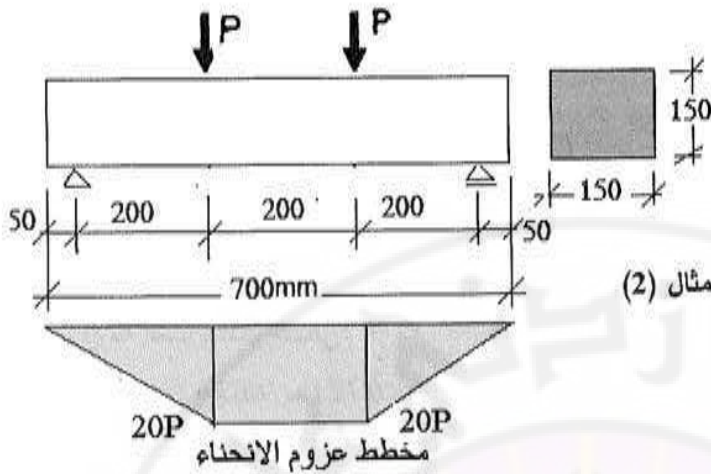
مقاومة الشد بوجود الانحناء:

$$f_{ct} = 0.6 f_{cb} = 0.6 \times \frac{M y}{I}$$

مقاومة الشد الصافي نتيجة الانحناء:

$$M = 20 P ; I = \frac{a a^3}{12} = \frac{a^4}{12} ;$$

ولأن:



$$f_{ct} = 0.6 \times \frac{M \times \frac{a}{2}}{a^4} = \frac{3.6 M}{a^3}$$

$$20 = 3.6 \times \frac{20P}{15^3} \Rightarrow P = 937.5 \text{ kg}$$

ينتج:

مثال (3): أثناء تنفيذ خلطة خرسانية في المخبر تم اختبار ست عينات معالجة وفق الشروط المخبرية النظامية وهي: ثلاث عينات أسطوانية الشكل $30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ اختبرت على الفلق بعد 28 يوم، وكانت نتائج الكسر فيها كما يلي: 16250 kg , 16300 kg , 16225 kg ، واختبرت العينات الثلاث الأخرى وهي عينات موشورية $70 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ على الانحناء بعد سبعة أيام، وهي محملة في نقطتي الثلث، وكانت القوة الكاسرة 640 kg , 652 kg , 660 kg والمطلوب:

تحديد مقاومة الشد للخرسانة المستعملة في حالتها الفلق والانحناء.

الحل:

1- مقاومة الشد نتيجة الفلق:

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi d l} \Rightarrow f_{ct} = 0.85 \times \frac{2P}{\pi d l}$$

$$f_{ct} = 0.85 \times \frac{2 \times \frac{16250 + 16300 + 16225}{3}}{\pi \times 30 \times 15} = 19.56 \text{ kg/cm}^2$$

2 - مقاومة الشد نتيجة الانحناء:

$$f_{cb} = \frac{6M}{a^3}; f_{ct} = 0.6 \times \frac{6M}{a^3}$$

$$f_{ct} = 0.6 \times \frac{6.20P}{(15)^3} = 13.9 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{بعد 7 أيام:}$$

$$f_{ct} = 1.4 \times 13.9 = 19.44 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{بعد 28 يوماً:}$$

حيث:

P - متوسط حمولات الكسر للعينات المقروضة.

مثال (4): أثناء التحقق من خواص الخرسانة المستعملة في تنفيذ عنصرين حاملين من منشأ، أخذت مجموعة عينات من كل عنصر أثناء صبه وعولجت حسب الشروط النظامية، فوجد أن مقاومتها على الكسر في الضغط كما يلي:

$$1- \text{المجموعة الأولى ثلاث اسطوانات } 15 \times 30: 184 \quad 195 \quad 224 \text{ kg/cm}^2$$

$$2- \text{المجموعة الثانية ثلاثة مكعبات } 20 \times 20 \times 20: 190 \quad 260 \quad 270 \text{ kg/cm}^2$$

فإذا كانت المقاومة المتوسطة التصميمية (المطلوبة) 200 kg/cm^2 ، بين مدى تحقيق كل من المجموعتين لشروط المقاومة.

الحل:

العينات أخذت من الورشة واختبرت في شروط نظامية، لذا فهناك شرطان يجب تحقيقهما:

1- ألا تقل قيمة المقاومة المتوسطة للعينات عن المقاومة المتوسطة المطلوبة.

2- ألا يتعدى الفرق بين أكبر قيمة وأصغر قيمة للعينات منسوبة إلى المقاومة المتوسطة

النسبة % 20.

* المجموعة الأولى:

$$\bar{f}' = \frac{184 + 195 + 224}{3} = 201 > 200 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{ok.}$$

$$\frac{224 - 184}{201} < 20 \% \quad \text{ok.}$$

أي إن المجموعة الأولى محققة لشروط المقاومة.

$$\bar{f}' = \frac{190 + 260 + 270}{3} = 240 \text{ kg/cm}^2 \quad * \text{ المجموعة الثانية:}$$

التحويل إلى المقاومة الأسطوانية:

$$240 \times 0.83 = 199.2 < 200 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{not ok.}$$

$$\frac{270 - 190}{240} > 20 \% \quad \text{not ok.}$$

أي إن المجموعة الثانية غير محققة لشروط المقاومة.

مثال (5): أثناء تنفيذ منشأ خرساني أعدت عينات في المخبر وأخذت عينات أخرى من الخرسانة المستعملة في التنفيذ، وعُولجت جميع العينات وفق الشروط النظامية فكانت مقاومتها على الضغط عند كسرها كما يلي:

عينات المخبر: 177, 170, 153 kg/cm² بعد سبعة أيام

عينات الموقع: 245, 203, 185 kg/cm² بعد 28 يوماً

فإذا كانت المقاومة المتوسطة للخرسانة المطلوبة 200 kg/cm²، بيّن مدى تحقيق العينات لشروط المقاومة.

الحل :

- من أجل عينات المخبر:

$$\bar{f}' = \frac{177 + 170 + 153}{3} = 166.7 \text{ kg/cm}^2$$

تحويل المقاومة المتوسطة بعد سبعة أيام إلى المقاومة بعد 28 يوماً:

$$166.7 \times 1.5 = 250 > 200 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{ok}$$

ومن ثم تكون عينات المخبر محققة لشروط المقاومة.

- من أجل عينات الموقع:

$$\bar{f}' = \frac{245 + 203 + 185}{3} = 211 > 200 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{ok.}$$

$$\frac{245 - 185}{211} > 20 \% \quad \text{not ok.}$$

ومن ثم تكون عينات الموقع غير محققة لشروط المقاومة.

الفصل الثاني

مقاومة الخرسانة المتصلبة في المنشآت القائمة

Hardened Concrete Strength in Existed Structures

1-2- مقدمة

2-2- الاختبارات قبل التنفيذ

3-2- الاختبارات أثناء التنفيذ

4-2- الاختبارات بعد الانتهاء من التنفيذ

5-2- أمثلة توضيحية



2 + مقدمة Introduction

تتم عملية تحديد مقاومة الخرسانة المتصلبة في المنشآت القائمة (مثلاً في حالات التحري عن أسباب العيوب ولأضرار التي تعانيها المنشآت القائمة) باستخدام واحدة أو أكثر من طرائق اختبارات الخرسانة المتصلبة، وبشكل عام، تشمل مراحل تقويم مقاومة الخرسانة في المنشآت الاختبارات الأساسية التالية:

- (1) الاختبارات التمهيدية قبل التنفيذ
- (2) الاختبارات أثناء التنفيذ
- (3) الاختبارات بعد الانتهاء من التنفيذ

2 2 - الاختبارات قبل التنفيذ:

أي قبل البدء بتصنيع وصب الخرسانة في المنشأ، وهي الاختبارات المتعلقة بتصميم الخلطات الخرسانية لتحديد نسبة مكوناتها المطلوبة للحصول على مقاومة الخرسانة التصميمية (المقاومة المميزة على الضغط)، فقد تم استعراض ذلك في الفصل السابق (الأول). وسيتم التركيز هنا على الاختبارات (2) و (3).

2 3 - الاختبارات أثناء التنفيذ:

يشترط الكود العربي السوري أخذ عينات من الخرسانة أثناء تصنيعها بهدف التأكد من تحقيقها للمقاومة المطلوبة والفرضيات التي تم اعتمادها عند تصميم الخلطات الخرسانية وصحة نسب ومكوناتها ونوعيتها وغير ذلك.

(1) من أجل الخرسانة ذات المقاومة المميزة على الضغط $f'_c \leq 200kg/cm^2$ ، يلزم تحضير مجموعات من ثلاث عينات على الأقل لكل:

- 3 أيام صب خرسانة ضمن أسبوع تقويمي واحد

- حجم $100m^3$ من الخرسانة

- مساحة $500m^2$ من السطح المصبوب. وبحيث يتم أخذ العدد الأكبر الممكن من العينات

لتحقيق جميع الشروط أعلاه. ولا بد من تحقيق اشتراطات الكود بشكل مماثل للعينات

المحضرة في الاختبارات التمهيدية، ويتم اختبارها بعد 28 يوماً من الصب أو بعد 7 أيام

لتحديد المقاومة بهدف التأكد المبكر من مقاومة الخرسانة أو بهدف تحديد المقاومة الفعلية من أجل فك الكوفراج.

(2) من أجل الخرسانة ذات المقاومة المميزة $f'_c > 250 \text{ kg/cm}^2$ يلزم مضاعفة عدد عينات الاختبار.

تعد الخرسانة محققة لشرط المقاومة إذا كانت نتائج العينات للشروط النظامية، أي بعد تصحيحها / إذا كانت غير أسطوانية بقطر $\phi = 15 \text{ cm}$ وارتفاع يساوي 30 sm ، وعند كسرها بعمر 28 يوماً إذا تحققت الشرطان التاليان:

أ. أن يزيد وسطي المقاومات لكل ثلاث عينات متتالية على المقاومة المميزة بمقدار 10 kg/cm^2 على الأقل، وذلك للخرسانة من جودة 200 kg/cm^2 وما دون. وبمقدار 20 kg/cm^2 على الأقل للخرسانة من جودة 250 kg/cm^2 وما فوق.
ب. ألا تقل مقاومة كل العينات الثلاث عن 0.85 من المقاومة المميزة f'_c ، وفي حال توفر تسع عينات أو أكثر للجزء الواحد من المنشأ ذاته فيمكن قبول الخرسانة إذا تحققت ما يلي:

- الشرط (أ) أعلاه

- ألا تقل مقاومة كل من العينات عن 0.80 من المقاومة المميزة f'_c

بالنسبة للمجابل المركزية المحتفظ بها بسجلات نتائج مقاومة كسر العينات الخرسانية ضمن شروط محددة، يلزم تطبيق المعايير الإحصائية المحدد في الكود (راجع الفصل الأول):

▪ تحديد المقاومة الوسطية (بعد الضرب بعوامل التصحيح المطلوبة):

$$\bar{f}' = \frac{\sum f'_i}{n} ; \quad (2-1)$$

▪ حساب الانحراف المعياري للمقاومات الناتجة بعد تصحيحها:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f'_i - \bar{f}')^2}{n-1}} ; \quad (2-2)$$

▪ تعد الخرسانة مقبولة إذا كان:

$$\bar{f}' \geq f'_c + 1.1 s ; \quad (2-3)$$

▪ يجب استبعاد المقاومات الشاذة (الصغيرة جداً والكبيرة جداً) والتي تقع خارج المجال

[f'_{min} , f'_{max}] ، أي المحدد بالعلاقة:

$$f'_i \geq \bar{f}' \pm 2.33 s ; \quad (2-4)$$

وإعادة الحساب من جديد. في حال تحقق الشروط أعلاه، تعد الخرسانة مقبولة، وإلا يتم اللجوء للاختبارات على الخرسانة المنفذة .

2-4- الاختبارات بعد الانتهاء من التنفيذ:

في حال عدم تحقيق النتائج أثناء التنفيذ لاشتراطات الكود، تحسب المقاومة المميزة الفعلية للخرسانة المنفذة (في جزء منها) باستخدام اشتراطات الكود كما يلي:

- من أجل ثلاث عينات، تحسب المقاومة المميزة كما يلي:

$$\text{من أجل } f'_c \leq 200 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_c = \bar{f}' - 10 ; \quad (2-5)$$

$$\text{من أجل } f'_c > 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_c = \bar{f}' - 20 ; \quad (2-6)$$

ويشترط ألا تقل أي مقاومة ناتجة للعينات (بعد التصحيح) عن $0.8 f'_c$ ، وإذا قلت إحداها عن ذلك فتكون المقاومة المميزة الاحتمالية مساوية:

$$f'_c = \frac{\min f'_i}{0.85} ; \quad (2-7)$$

حيث:

$\min f'_i$ - قيمة أدنى مقاومة للعينات الثلاث (بعد التصحيح). مقدره بالـ kg/cm^2 .

- من أجل تسع عينات أو أكثر:

تحسب المقاومة المميزة كما في العلاقتين (2-5,6) حسب الحال، ويشترط ألا تقل أي مقاومة ناتجة للعينات (بعد التصحيح) عن $0.8 f'_c$ ، وإذا قلت إحداها عن ذلك فتكون المقاومة المميزة الاحتمالية مساوية:

$$f'_c = \frac{\min f'_i}{0.80} ; \quad (2-8)$$

حيث: $\min f'_i$ - قيمة أدنى مقاومة للعينات التسع (بعد التصحيح). مقدره بالـ kg/cm^2 .

- حالة المجاهل المركزية، تحسب المقاومة المميزة الاحتمالية من العلاقة:

$$f'_c = \bar{f}' - 1.1 s ; \quad (2-9)$$

وذلك بعد حذف المقاومات الشاذة وفق العلاقة (2-4). وإذا تبين أن المقاومة المميزة الاحتمالية لخرسانة لعنصر منفذ من المنشأ أو جزء منه (بموافقة المصمم) فيمكن عندئذ قبول الخرسانة لهذا العنصر أو جزء منه، يجب قبل رفض الخرسانة اللجوء إلى إجراء اختبارات الخاصة إضافية منها:

❖ تقدير المقاومة السطحية للخرسانة بالاختبارات غير المخربة *Non-destructive Tests*

ومنها الاختبارات التالية:

- اختبار مطرقة الكرة
- اختبار قياس النبضات فوق الصوتية
- اختبار طرائق الإشعاع
- اختبار المطرقة الخرسانية (مطرقة شميدت)

❖ الاختبارات المخربة مثل:

- اختبار الجزرات الخرسانية
- اختبار مقاومة القلع

❖ إجراء تجارب التحميل وغير ذلك

وفيما يلي بعض التفاصيل المتعلقة بعدد من الاختبارات المنوه عنها أعلاه:

1) مطرقة الكرة (مقاومة الاختراق) Penetration Resistance

يستدعي هذا النوع من الاختبارات قياس تأثير قذف كرة حديدية على سطح الخرسانة، الشكل (1-2)، يقاس بعد ذلك عمق اختراق الضربة، ويمكن إيجاد علاقة بين عمق الاختراق ومقاومة الخرسانة على الضغط.



الشكل (1-2) جهاز مطرقة الكرة
(Windsor Probe)

2) اختبار مقاومة القلع *Pull-out resistance*:

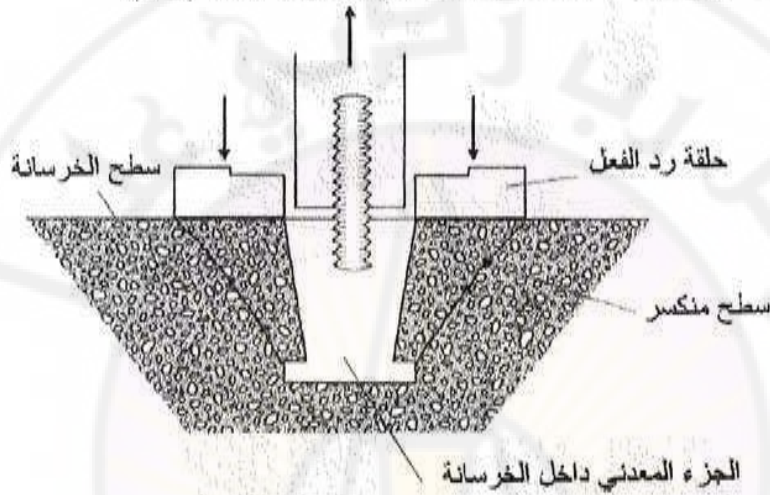
يتطلب هذا الاختبار، الشكل (2-2)، تحديد القوة اللازمة لاقطلاع قطعة حديدية مزروعة داخل

الخرسانة أثناء صبها ثم قياس المقاومة على القص f_p بالعلاقة $f_p = \frac{F}{A}$ ، حيث:

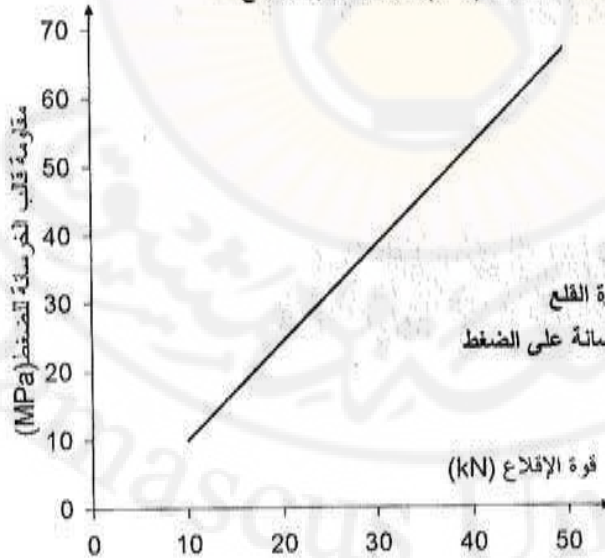
F - القوة اللازمة لاقطلاع القطعة الحديدية.

A - مساحة الخرسانة المقلوعة.

وتوجد علاقة بين القوة F ومقاومة الخرسانة على الضغط، الشكل (3-2).



الشكل (2-2) جهاز اختبار الاقطلاع



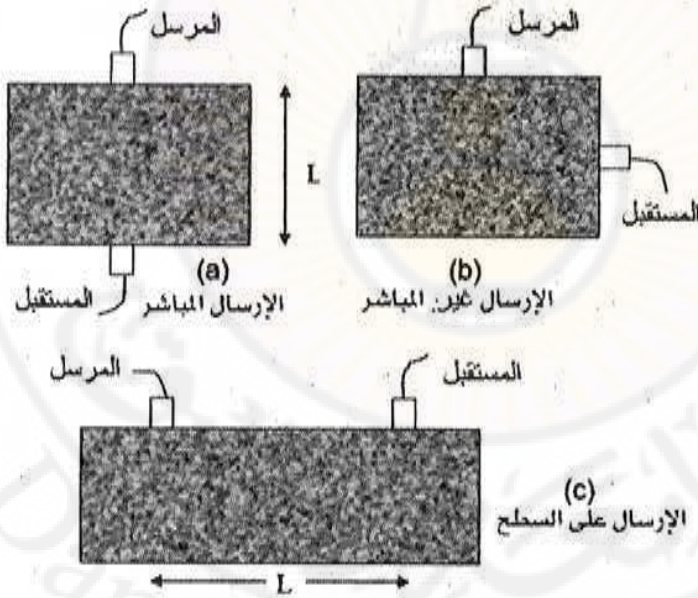
الشكل (3-2) العلاقة بين قوة القلع ومقاومة الخرسانة على الضغط

3) اختبار قياس النبضات فوق الصوتية *Ultrasonic Pulse Velocity Test* :

تمرر هنا موجات صوتية عبر الخرسانة، الشكل (4-2)، ويتم قياس زمن المرور (T) بين المرسل والمستقبل، الشكل (5-2) بدقة الخطأ نحو 1%. ويستحسن استعمال الإرسال المباشر في عمود الخرسانة إن أمكن، وفي بعض الحالات يستحيل استعمال الطريقة a في أساسات الخرسانة أو البلاطات، وعندئذ تستعمل الطريقتان b و c .



الشكل (4-2) جهاز قياس النبضات فوق الصوتية



الشكل (5-2) جهاز قياس النبضات فوق الصوتية

تحسب بعد ذلك سرعة الصوت V بالعلاقة $V = \frac{L}{T}$ ، حيث L - المسافة بالمتر، و T - الزمن بالثانية. ويمكن ربط سرعة الصوت V في الخرسانة ومعامل مرونة الخرسانة بالعلاقة $V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ، حيث: ρ - الوزن الحجمي للخرسانة. لذلك يمكن بعد معرفة معامل مرونة الخرسانة تقويم جودة الخرسانة التي أجري عليها الاختبار. يستعمل هذا الاختبار عادة بهدف:

- معرفة وجود تشققات داخل الخرسانة في المنشأ (السدود مثلاً)
- مراقبة جودة الخرسانة
- تحديد الاختلاف في دمك الخرسانة (الرص *Compacting*) من مكان إلى آخر.

يبين الجدول (1-2) قيمة درجة جودة الخرسانة المحتملة وفقاً لسرعة النبضات فوق الصوتية

الجدول (1-2) درجة جودة الخرسانة المحتملة وفقاً لسرعة النبضات فوق الصوتية.

$2 \geq V$	$V = 2 \rightarrow 3$	$V = 3 \rightarrow 3.5$	$V = 3.5 \rightarrow 4.5$	$4.5 < V$	سرعة الموجت فوق الصوتية km/s
جودة سيئة $f'_c \leq 18MPa$	جودة جيدة $f'_c \geq 18MPa$	جودة مقبولة $f'_c \geq 15MPa$	جودة جيدة $f'_c \geq 18MPa$	جودة عالية $f'_c \geq 22MPa$	درجة جودة الخرسانة

4) اختبار المطرقة الخرسانية (طريقة الارتداد *Rebound Method*):

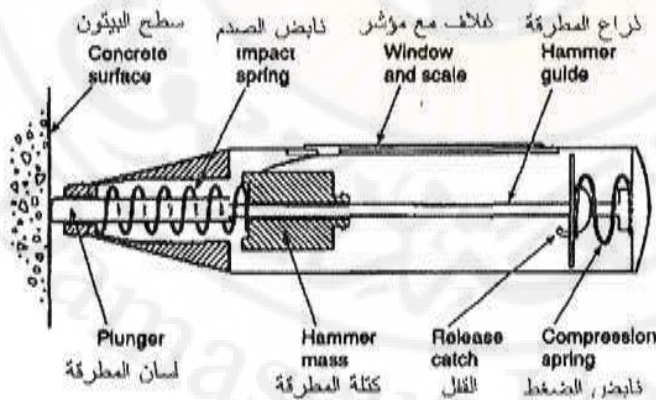
تستعمل المطرقة الخرسانية الرقمية أو العادية، وتتألف مطرقة شميدت العادية، الشكل (2-6)، من كتلة متحركة تتطلق مع طاقة بدائية (قوة دفع) تصدم سطح الخرسانة، وينتج عن ذلك توزع للطاقة الأولية كما يلي:

- طاقة تشوه لدن في الخرسانة المصدومة
- جزء من الطاقة المرنة يرتد مع الكتلة المتحركة ويقاس بمقدار رجوع النابض المتصل في هذه الكتلة بمؤشر خاص.

ولا بد من تحقيق الشروط المطلوبة للمعايرة وإجراء العمليات الإحصائية اللازمة للقراءات المسجلة، والانتباه إلى عدم تطابق شروط الاكتناز بين الخرسانة المتصلبة الفعلية وعينات من نفس النوع.

يتم تحديد مقاومة الخرسانة المتصلبة من خلال إيجاد المنحني بين مقاومة الخرسانة في الضغط ومؤشر نابض الارتداد (الصدمة)، وتستخدم هنا بعض الطرائق:

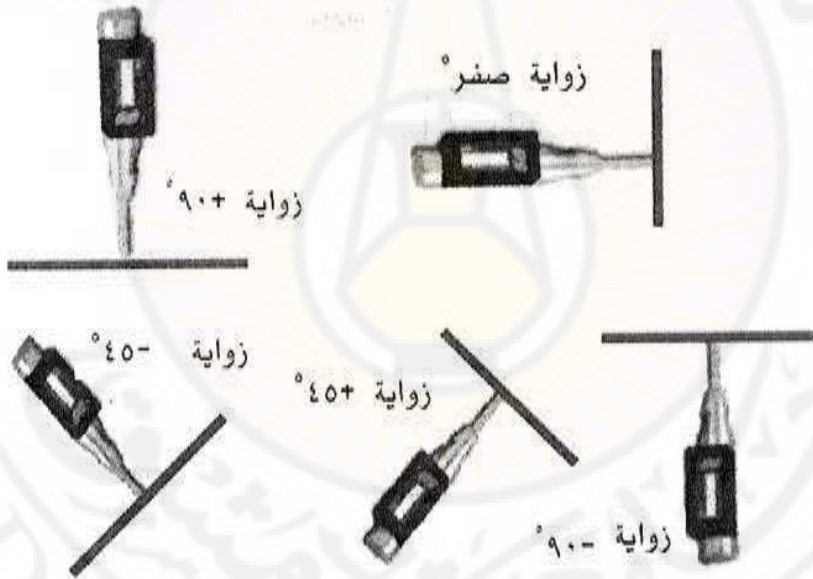
- (1) طريقة منحني المعايرة
- (2) طريقة عوامل التصحيح لمنحني المعايرة
- (3) طريقة منحني الشركة الصانعة وغير ذلك، ومن أجل التفاصيل يمكن العودة إلى المراجع ذات العلاقة



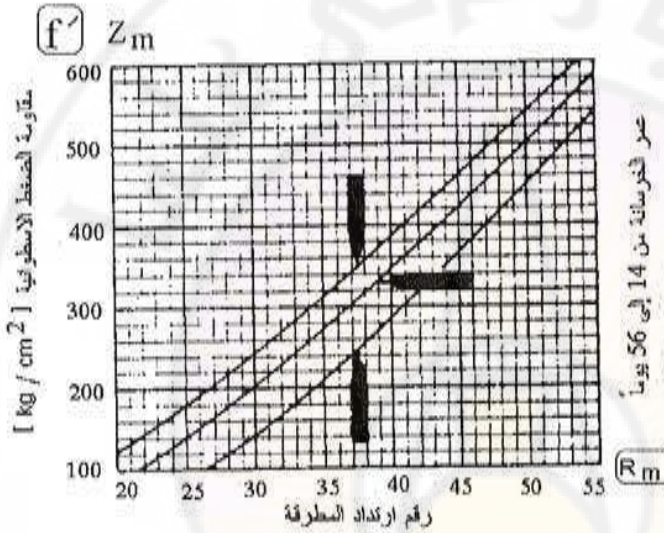
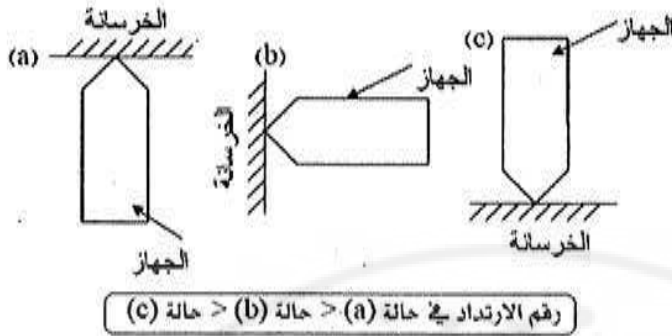
الشكل (2-6) مكونات مطرقة شميدت الخرسانية

يجري الاختبار وفق الخطوات التالية:

1. تنظيف السطح المراد اختباره من الدهان والطينة بأداة تنعيم معينة (حجر الصنفرة مثلاً) حتى الوصول إلى سطح الخرسانة.
2. تحديد مساحة الاختبار من سطح الخرسانة وبما لا يقل عن 200cm^2
3. تحديد زاوية المطرقة، الشكل (2-7)
4. الضغط تدريجياً على المطرقة حتى يتم سماع صوت الصدمة، ثم يؤخذ رقم الارتداد الموافق على شاشة المطرقة
5. تكرر الخطوة السابقة حتى الحصول على 10 قراءات في مساحة 200cm^2
6. يؤخذ متوسط القراءات العشر ويسمى رقم الارتداد Rm
7. من منحنيات شميدت أو غيرها من الطرائق يتم تحديد مقاومة الخرسانة بمعرفة رقم الارتداد وزاوية المطرقة، الشكل (2-8).



الشكل (2-7) زوايا وضع المطرقة أثناء الاختبار



الشكل (8-2) تغير المقاومة الاسطوانية للخرسانة على الضغط مع رقم الارتداد

تقويم النتائج:

1) خرسانة بعمر يقل عن 90 يوماً:

$$f'_c \leq 200 \text{ kg/cm}^2$$

- من أجل خرسانة المميزة هي الأصغر من:

$$f'_c = 1.25 \bar{f}'_i - 10$$

$$f'_c = \min f'_i / 0.85$$

$$f'_c > 250 \text{ kg/cm}^2$$

- من أجل خرسانة المميزة هي الأصغر من:

$$f'_c = 1.25 \bar{f}'_i - 20$$

$$f'_c = \min f'_i / 0.85$$

(2) خرسانة بعمر يزيد على 90 يوماً:

- من أجل خرسانة $f'_c \leq 200 \text{ kg/cm}^2$:

$$f'_c = 1.1\bar{f}' - 10$$
$$f'_c = \min f'_i / 0.8$$

تكون المقاومة المميزة هي الأصغر من:

- من أجل خرسانة $f'_c > 250 \text{ kg/cm}^2$:

$$f'_c = 1.1\bar{f}' - 20$$
$$f'_c = \min f'_i / 0.8$$

تكون المقاومة المميزة هي الأصغر من:

حيث \bar{f}' - المقاومة المتوسطة الموافقة للعينات الأسطوانية النظامية بعد الضرب بعوامل تصحيح الأبعاد والشكل، f'_i - مقاومة الكسر للعيينة i .

(5) اختبار الجزرات الخرسانية *Concrete Core Tests*

بعد هذا الاختبار من الاختبارات المتلفة للخرسانة المتصلبة، حيث تؤخذ جزرات خرسانية من جزء من المنشأ لتحديد المقاومة الفعلية *Potential Strength* على الضغط. ويتم اللجوء على هذا الاختبار لكون اختبارات المطرقة الخرسانية وغيرها من الطرائق غير المتلفة غير دقيقة وتعطي المقاومة الاحتمالية بشكل تقريبي، وهي تتطلب معرفة عميقة وخبرات متراكمة حول جميع الظروف المؤثرة على دقة النتائج.

تتعلق دقة النتائج الناجمة عن اختبار الجزرات الخرسانية بنوع العينات (الشكل والأبعاد)، طريقة معالجة الخرسانة، عمر الخرسانة، درجة تراس الخرسانة، وجود تسليح أو عدمه، مكان أخذ الجزرات وغير ذلك. تؤخذ الجزرات عادة بقطر 10 cm باستعمال جهاز خاص يعمل على الكهرباء أو الوقود السائل من مواقع لا تشكل خطورة أو ضعفاً للعناصر الإنشائية، ولا تستدعي قطع قضبان التسليح، ويستحسن قبل أخذ الجزرات التأكد من عدم وجود تسليح باستعمال جهاز الكشف عن الحديد مثلاً، ويمكن الحصول على جزرات بأقطار أخرى عند الضرورة. ويفضل أخذ الجزرات من رؤوس الأعمدة والجدران وليس من وسطه قدر الإمكان تجنباً لقطع الأساور العرضية والتأثير في تحنيب القضبان الطولية الأمر الذي يتطلب معالجة واهتمام كبيرين لتأمين استمرار سلامة العمود، ويجب تجنب نحو 30 cm في أعلى العمود أو الجدار على الأقل. وبالنسبة للجوائز تؤخذ الجزرات من المنطقة العلوية الوسطى. ويكون طول الجزرة ضعف قطرها بشكل عام، وبحيث لا يقل الطول عن ثلاثة أرباع القطر، ويكون في البلاطات مساوياً سمك البلاطة عادة وبما لا يزيد على 40 cm . وعادة يكون عدد الجزرات اللازم مساوياً للعدد

المستخدم في اختبارات الخرسانة أثناء التنفيذ، ويجري تشذيبها وتسوية سطوحها بحيث تكون متعامدة مع محورها الطولي (يمكن استخدام مادة الكبريت للتسوية)، ويجب استبعاد الجزرات التي لا تلبى المواصفات.
أ- تصحيح نتائج الكسر:

يجب تصحيح النتائج لتحويلها إلى مقاومة أسطوانية نظامية (ارتفاع 30 سم وقطر 15 سم)، ويتم ذلك باستخدام عوامل التصحيح اللازمة، وهي عوامل الأبعاد (لا حاجة لعوامل تصحيح متعلقة بالعمر طالما أن عمر الخرسانة في المنشآت القائمة كاف لاكتساب الصلابة والمقاومة اللازمة)، الجدول (2-2). ويمكن العودة للكود من أجل التفاصيل، كما يجب ضرب النتائج بمعامل التصحيح 1.25 بهدف الوصول إلى القيم النظرية التصميمية المطلوبة.



الشكل (2-9) أخذ الجزرة وشكل العينة المعدة لاختبار الضغط

الجدول (2-2) عوامل التصحيح بالنسبة للأبعاد

2	1.75	1.5	1.25	1.1	1.0	0.75	$\frac{h}{10}$
0.97	0.95	0.93	0.91	0.87	0.83	0.68	المعامل

ب- تحليل النتائج: تستخدم الأسس نفسها عند تحليل اختبار العينات أثناء التنفيذ، كما جاء في الفقرة (2-4).

ملاحظة 1:

عندما لا تحقق النتائج المقاومة المطلوبة للعنصر الإنشائي يجب رفض الخرسانة واللجوء لتدعيمه.

ملاحظة 2:

يمكن أخذ نحو 8 % كفرق في المقاومة بين العينات المستخرجة بالاتجاه العمودي والأفقي للحفر، حيث إن الاتجاه الأفقي يعطي مقاومة أكبر من الاتجاه العمودي.

ج- معالجة وجود حديد التسليح:

يفضل إجراء الاختبار طبعاً على جزرات نظامية خالية من التسليح، ولكن في حال وجودها تشير بعض النتائج إلى أن الانخفاض في المقاومة المقاسة مقدر بنحو 10%، ويحدد معامل التصحيح كما يلي:

- في حال وجود سبيخ تسليح واحد فقط وعمودي على المحور الطولي للقالب، تستخدم العلاقة التالية:

$$1 + 1.5 \left(\frac{\phi_r}{\phi_c} \times \frac{h}{l} \right)$$

- في حال وجود أكثر من سبيخ واحد، تستخدم العلاقة التالية:

$$1 + 1.5 \left[\frac{\sum (\phi_r \cdot h)}{\phi_c \cdot l} \right]$$

حيث:

ϕ_r - قطر السبيخ الموجود.

ϕ_c - قطر القالب

h - المسافة بين محور سبيخ حديد التسليح وأقرب نهاية للقالب.

l - طول القالب.

2-5- أمثلة توضيحية:

مثال (1):

يطلب إيجاد المقاومة المميزة لنتائج كسر عينات أسطوانية $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ في المجموعتين التاليتين:

المجموعة الأولى (خلال الشهر الأول):

210, 100, 130, 150, 145, 135, 205, 220, 185, 180, 165, 136, 142, 162, 193,
175, 225, 260, 270, 255, 133, 220, 143, 161, 155, 195, 203, 213, 195, 142.

المجموعة الثانية (خلال الشهر الثاني):

184, 188, 203, 190, 154, 158, 159, 100, 155, 196, 210, 228, 204, 180, 195,
169, 148, 154, 175, 157, 193, 270, 200, 194, 188, 165, 171, 158, 203, 153.

الحل:

(1) المجموعة الأولى:

يلاحظ أن $k = 1.31 \Rightarrow n = 30$ ، راجع الجدول (1-6) في الفصل الأول، ومجال قيم كسر العينات $100 \rightarrow 270$ ، وينتج أن: $\bar{f}' = 180.07 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow s = 42.39 \text{ kg/cm}^2$
مجال القيم المقبولة:

$$f'_{min} = \bar{f}' - 2.33 s = 180.07 - 2.33 \times 42.39 = 81.3 < 100 \text{ kg/cm}^2 \text{ ok.}$$

$$f'_{max} = \bar{f}' + 2.33 s = 180.07 + 2.33 \times 42.39 = 278.8 > 270 \text{ kg/cm}^2 \text{ ok.}$$

إذا جميع القيم غير شاذة.

القيمة المميزة لمقاومة الخرسانة على الضغط:

$$\bar{f}'_c = \bar{f}' - 1.31 s = 180.07 - 1.31 \times 42.39 \approx 125 \text{ kg/cm}^2$$

(2) المجموعة الثانية:

يلاحظ أن $k = 1.31 \Rightarrow n = 30$ ، ومجال قيم كسر العينات $100 \rightarrow 270$ ، وينتج أن:

$$\bar{f}' = 180.07 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow s = 30.5 \text{ kg/cm}^2$$

مجال القيم المقبولة:

$$f'_{min} = \bar{f}' - 2.33 s = 109 > 100 \text{ kg/cm}^2 \text{ not ok.}$$

$$f'_{max} = \bar{f}' + 2.33 s = 251.1 < 270 \text{ kg/cm}^2 \text{ not ok.}$$

ولذلك يتم استبعاد القيمتين الشاذتين 100,270 ، ويصبح مجال القيم الجديد 228 → 148 ، هذا يعني أن: $s = 21.47 \text{ kg/cm}^2$; $\bar{f}' = 19.71 \text{ kg/cm}^2$; $k = 1.31$; $n = 28 \Rightarrow$

القيمة المميزة لمقاومة الخرسانة على الضغط:

$$\bar{f}'_c = \bar{f}' - 1.31 s = 179.71 - 1.31 \times 21.47 \approx 151 \text{ kg/cm}^2$$

وهو المطلوب.

مثال (2): بفرض أن مقاومات الخرسانة الواردة في المثال (1) هي نتيجة لقراءات أرقام الارتداد في المطرقة الخرسانية لخرسانة مقاومتها المميزة التصميمية $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$ ، وكانت المجموعة الأولى للخرسانة في الطابق الأول من المنشأ والمجموعة الثانية للخرسانة في الطابق الثاني من المنشأ نفسه. المطلوب التحقق من صحة المقاومة المميزة للخرسانة المتصلبة في كل من الطابقين.

الحل:

(أ) خرسانة الطابق الأول: من الواضح أن المقاومة الدنيا على الإطلاق 100 kg/cm^2 بعيدة عن بقية المقاومات، إذاً يمكن إهمالها، وتكون المقاومة التالية لها 130 kg/cm^2 ، أما المقاومة المتوسطة فتبقى كما كانت مساوية تقريباً $\bar{f}' \approx 180 \text{ kg/cm}^2$ ، تحسب المقاومة المميزة كما يلي:

$$f'_{c1} = 1.10 \times 180 - 10 = 188 \text{ kg/cm}^2 > 175 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{c2} = \frac{130}{0.8} = 162.5 \text{ kg/cm}^2 < 175 \text{ kg/cm}^2$$

المقاومة المميزة التصميمية غير محققة، وتعتمد المقاومة:

(ب) خرسانة الطابق الثاني: يمكن إهمال المقاومة الدنيا 100 kg/cm^2 وتعتمد المقاومة التي تليها 148 kg/cm^2 ، مع إبقاء المقاومة المتوسطة على حالها $\bar{f}' \approx 180 \text{ kg/cm}^2$ ، وينتج أن:

$$f'_{c1} = 1.10 \times 180 - 10 = 188 \text{ kg/cm}^2 > 175 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{c2} = \frac{148}{0.8} = 185 \text{ kg/cm}^2 > 175 \text{ kg/cm}^2$$

$\Rightarrow f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$. ok. المقاومة المميزة التصميمية محققة.

مثال (3): تم اختبار ثلاث جزرات خرسانية بالأبعاد المبينة بالجدول (2-3)، وكانت مقاومات الكسر الناتجة لها $156; 173; 141 \text{ kg/cm}^2$ ، والمطلوب تحديد المقاومة المميزة الاحتمالية لخرسانة هذه الجزرات.

الجدول (2-3)

رقم الجزرة	القطر d [cm]	الارتفاع h [cm]	$\frac{h}{d}$	معامل التصحيح	المقاومات [kg/cm ²]		
					المقاومة الناتجة	المقاومة الأسطوانية	المقاومة المصعدة
1	10	20	2	0.970	156	151.3	189.1
2	10	14	1.4	0.922	173	159.5	199.4
3	10	16.5	1.65	0.942	141	132.8	166

الحل:

يتم تصحيح مقاومات العينات بضربها بمعامل الشكل وبمعامل التصعيد 1.25، ثم تحسب المقاومة المميزة المطلوبة من وسطي المقاومات المصححة. وتكون المقاومة المميزة الاحتمالية

$$f'_c = \bar{f}' - 10 \quad \text{و} \quad f'_c \leq \frac{\min f'_i}{0.85} \quad \text{: مساوية القيمة الأصغر من :}$$

يلاحظ أن:

$$\bar{f}' = 184.8 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{متوسط المقاومات المصعدة:}$$

$$f'_c = 184.8 - 10 = 174.8 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{المقاومة المميزة وفق المتوسط:}$$

$$f'_c = \frac{166}{0.85} = 195.3 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{المقاومة المميزة وفق المقاومة الدنيا:}$$

هذا يعني أن المقاومة المميزة الاحتمالية تساوي 174.8 kg/cm^2 .

مثال (4): المطلوب تحديد المقاومة المميزة الاحتمالية لخرسانة الجزرات الثلاث التالية بعد

$$153; 108; 171 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{التصحيح بمعامل الشكل:}$$

الحل:

$$191.2; 135; 213.7 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{المقاومات المصححة على الترتيب:}$$

$$\bar{f}' = 180.0 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{متوسط المقاومات المصعدة:}$$

$$f'_c = 180 - 10 = 170 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{المقاومة المميزة وفق المتوسط:}$$

$$f'_c = \frac{135}{0.85} = 158.8 \text{ kg/cm}^2$$

المقاومة المميزة وفق المقاومة الدنيا:
هذا يعني أن المقاومة المميزة الاحتمالية تساوي 158.8 kg/cm^2 .

مثال (5):

المطلوب تحديد المقاومة المميزة الاحتمالية لخرسانة الجزرات التسع ذات المواصفات الموضحة في الجدول (4-2).

الحل:

$$\bar{f}' = 174.4 \text{ kg/cm}^2$$

متوسط المقاومات المصعدة:

$$f'_c = 174.4 - 10 = 164.4 \text{ kg/cm}^2$$

المقاومة المميزة وفق المتوسط:

$$f'_c = \frac{148.9}{0.80} = 186.1 \text{ kg/cm}^2$$

المقاومة المميزة وفق المقاومة الدنيا:

هذا يعني أن المقاومة المميزة الاحتمالية تساوي 164.4 kg/cm^2 .

الجدول (4-2)

المقاومات $[\text{kg/cm}^2]$			معامل التصحيح	$\frac{h}{d}$	الارتفاع h $[\text{cm}]$	القطر d $[\text{cm}]$	رقم الجزرة
المقاومة المصعدة	المقاومة الأسطوانية	المقاومة الناتجة					
160.5	128.6	141.1	0.91	1.25	12.5	10	1
199.1	127.3	135.2	0.942	1.65	16.5	10	2
174.3	139.5	151.3	0.922	1.4	14	10	3
148.9	119.1	128.1	0.93	1.5	15	10	4
195	156	164.2	0.95	1.75	17.5	10	5
215.4	173.1	180	0.962	1.9	19	10	6
200.1	160.1	165.1	0.97	2	20	10	7
163.1	130.4	134.5	0.97	2	20	10	8
152.2	121.7	146.7	0.83	1	19	10	9



الفصل الثالث

الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح

Mechanical Properties of Steel Reinforcement

1-3-1- مقدمة

2-3-1- أنواع التسليح

3-3-1- الخواص الميكانيكية لقضبان التسليح

3-3-1-1- اختبار قضبان التسليح على الشد

3-3-2-1- التسليح الصلب في العناصر الخرسانية الخفيفة

3-3-2-2- تسليح الخرسانة مسبقة الإجهاد

3-3-3-1- أشكال التسليح في عناصر الخرسانة المسلحة



3-1- مقدمة Introduction

يتمثل الدور الرئيسي لفولاذ التسليح في العناصر الخرسانية المسلحة في امتصاص الإجهادات الشادة في مختلف مقاطع العناصر الخرسانية وتعويض ضعف الخرسانة الملحوظ على الشد، حيث لا تستطيع الخرسانة بشكل عام مقاومة الإجهادات الشادة الكبيرة المتولدة، كما أنه يقوم بالمساهمة بمقاومة الإجهادات المماسية نتيجة القص والفتل وكذلك الإجهادات المضاغطة وتركيز الإجهادات والمساهمة في مقاومة سقوط وانسلاخ الخرسانة أثناء الحريق وغير ذلك. يُنفذ فولاذ التسليح في أغلبية المنشآت من الفولاذ المطاوع الطري *Mild Steel* ذي نسبة كربون منخفضة في تركيبه الكيميائي ويتمتع بقبالية جيدة لعمليات اللحام والتشغيل.

3-2- أنواع التسليح Reinforcement Types

يمكن أن ينجز التسليح المستخدم في الخرسانة من الأنواع التالية:

- القضبان الملساء *Plain Bars*
 - القضبان المحلزنة ذات النتوءات *Deformed lugged Bars*
 - الشبك الملحومة *Welded Meshes*
- ويتم ذلك وفقاً لأحد أنواع الفولاذ التالية:

1 - فولاذ طري عادي

2 - فولاذ عالي المقاومة، ويقسم إلى:

- فولاذ طري مصنع على البارد أو الساخن

- فولاذ قاس معالج على البارد

يشترط في الفولاذ عالي المقاومة (الطري والمعالج على البارد) ألا يكون سطحه أملس، وأن يكون به من النتوءات ما يكفي لإحداث التماسك اللازم مع الخرسانة. تكون الشبك الملحومة، إجمالاً من قضبان الفولاذ نصف القاسي متشابكة بعضها ببعض وملحومة على الكهرياء في نقاط التشابك وتستخدم في البلاطات والقشريات الرقيقة. إن الأقطار المستخدمة لقضبان التسليح : تستعمل قضبان التسليح المنعزلة الملساء منها أو المحلزنة بأقطار مختلفة أكثرها استخداماً الأقطار التالية: (6-8-10-12-14-16-18-20-22-24-25-28-30-32-34-40 مم)، وتكون أطوال القضبان مختلفة بين 3 و 12 م. عند استعمال قضبان تسليح ذات نتوءات، يؤخذ القطر النظري للدائرة التي تعطي الوزن نفسه للمتر الطولي إذا كانت

النتوءات مستمرة، أما إذا كانت النتوءات منقطعة فيؤخذ أصغر قطاع للقضيب، ويسمح بتفاوت نسبي بين الوزن الفعلي والوزن النظري على ألا يزيد على 5%. تتميز قضبان التسليح المحلزنة بتناسكها العالي مع الخرسانة وبمقاومة عالية ضد سحب التسليح من الخرسانة، وتحسب في الوقت نفسه خواص التشقق للعناصر الخرسانية المسلحة. يتم وصل قضبان التسليح المنعزلة عبر التراكب أو باستخدام اللحام. تستخدم الشبكات الملحومة في تسليح البلاطات والقشريات، وينفذ هذا التسليح على شكل شبكات تلتحم نقطياً في نقاط تقاطع التسليح المتعامدة، تكون أقطار القضبان المستخدمة متزاوجة في المجال $mm (10-3)$.

ملاحظة: يمكن بشكل عام تحديد القطر المكافئ للقضيب ذي النتوءات المستمرة (حلزونية أو طويلة مثلاً) ليكون مساوياً القطر النظري للدائرة التي تعطي الوزن نفسه للمتر الطولي من القضيب، ويمكن استخدام العلاقة: $\phi = 12.74 \sqrt{\frac{G}{L}}$ ، حيث: ϕ - قطر مقدرًا بالـ $[mm]$ و L - طول ما من القضيب مقدرًا بالـ $[mm]$ و G - وزن هذا الطول مقدرًا بالـ $[gr]$. ويجب ألا يزيد التفاوت في الوزن على 5% في كل الأحوال.

3-3- الخواص الميكانيكية لقضبان التسليح Rebar Mechanical Properties

من أهم الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح ما يلي:

- إجهاد الخضوع العادي (أو إجهاد الضمان، أو إجهاد الخضوع الافتراضي $f_{0.2}$ Proof Yield Stress)، مع التنويه إلى أن الشركات الصانعة تعطي لقضبان التسليح حدّ السيلان الأدنى لهذه القضبان.

- المقاومة على الشد $Tensile Strength$

- النسبة المئوية للاستطالة عند الكسر

يبين الجدول (3-1) أنواع قضبان التسليح الأكثر استخداماً مع الخواص الميكانيكية لها.

يؤخذ عادة الرسم البياني للفولاذ الحاصل من الاختبارات وفي حال عدم وجود اختبارات وفقاً

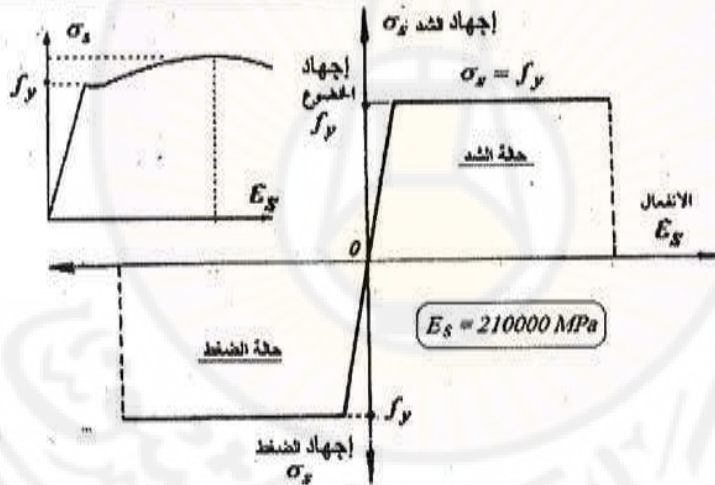
للمواصفات المعمول بها يؤخذ الرسمان البيانيان في الشكلين (3-1 و 3-2).

- في أنواع الفولاذ العادي وعالي المقاومة والتي تظهر فيه خاصية الخضوع يُعدّ إجهاد الخضوع

الإجهاد المطابق لمزجلة الخضوع ويرمز لهذا الإجهاد بـ f_y .

الجدول (1-3) الخواص الميكانيكية لأنواع الفولاذ الأكثر استخداماً وفق الكود العربي السوري

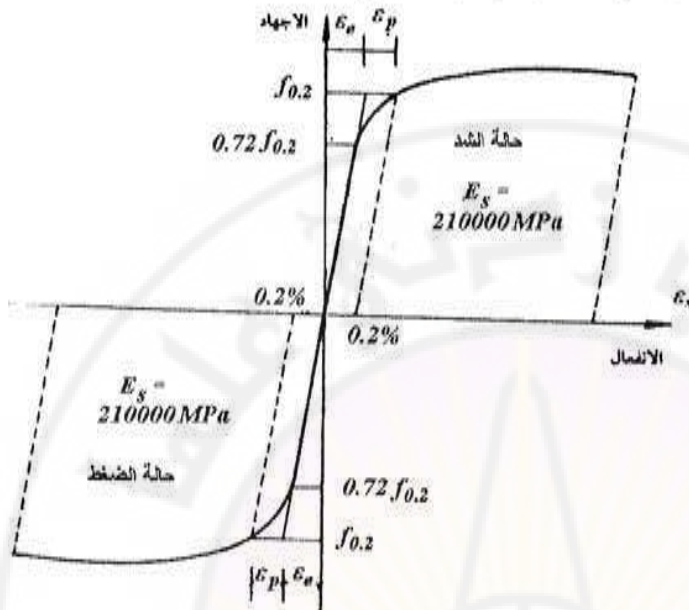
النسبة المئوية الدنيا للاستطالة القصوى	الحد الأدنى لإجهاد الخضوع f_y أو إجهاد الضمان $f_{0.2}$ MPa	الحد الأدنى لمقاومة الشد (الانقطاع) f_{su} MPa	نوع الصلب (الفولاذ) والرمز	الأسياخ أو القضبان
20	240	370	فولاذ طري عادي المقاومة Φ	مساواة
16	300	440	فولاذ طري متوسط المقاومة H	ذات نتوءات
12	400	500	فولاذ طري عالي المقاومة T	ذات نتوءات
10	400	500	فولاذ قاسي متوسط المقاومة على البارد T	ذات نتوءات



الشكل (1-3) المنحنى الافتراضي (الحسابي) لعلاقة الإجهاد - الانفعال في الفولاذ الطري العادي

- أما الفولاذ المعالج على البارد وبعض الأنواع الأخرى من الفولاذ عالي المقاومة الذي لا تظهر فيه خاصية الخضوع فيعدّ إجهاد الخضوع الذي يترك تشوهاً متبقياً مقداره 0.2% ويرمز لهذا الإجهاد بـ $f_{0.2}$. اعتمدت هذه القيم على طول أصلي قبل الاختبار من العينة مقدارها خمسة

أمثالي قطرها. وبناء على ذلك يتم وضع القضيب في المكبس الهيدروليكي ويُبَيَّن المنحني الناتج عن المكبس الهيدروليكي مجال إجهاد حد الخضوع وحد السيلان وعتبة السيلان وحد الانقطاع.



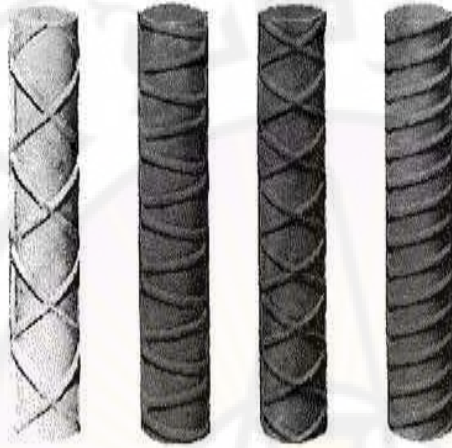
الشكل (2-3) المنحني الافتراضي لعلاقة الإجهاد - الانفعال في الفولاذ عالي المقاومة

يبين الشكل (1-3) إجهاد حد الخضوع لحديد التسليح عندما يعمل على الشد والضغط كما يظهر المنحني قيمة مُعامل المرونة لحالتي الشد والضغط. كما يبيِّن الشكل (2-3) مجال التشوهات المرنة ϵ_e ومجال التشوهات اللدنة ϵ_p ، حيث إن المجال الأعظمي للتشوهات المرنة في حالة الشد $0.72f_{0.2}$.

أما في حالة الضغط فتساوي $f_{0.2} (0.58 \rightarrow 0.64)$. وهذا يعني أن الإجهادات والتشوهات المرنة في حالة الشد أكبر منها في حالة الضغط. أما في حالة خروج قضيب حديد التسليح من الحالة المرنة إلى الحالة اللدنة فإن إجهاد حد الخضوع للشد على الشد يساوي $f_{0.2}$. أما في حالة الضغط فيتناقص هذا الإجهاد مقارنةً في حالة الشد من $f_{0.2} (0.8 \rightarrow 0.9)$. من المنحني البياني نستنتج أن فعالية عمل حديد التسليح على الشد أفضل من عمله على الضغط، علماً أن عامل المرونة أثناء الشد والضغط واحد.

يُعدّ إجهاد الخضوع f_y المقارمة الميكانيكية المميزة للصلب والتي يبنى التصميم على أساسها، ويجب أن يكون حدّه الأدنى مكفولاً من البائع أو المنتج وإلا وجب تحديده على أساس تجارب مخبرية معترف بها وإجهاد حد الخضوع مبين في الشكل أعلاه.

يُوضح الشكل (3-3) أنواع قضبان حديد التسليح المحلزنة وأنواع النتوءات بينها والمسافة بين النتوءات $Lugs$ ، كما يبيّن المقطع العرضي لكل قضيب على حده، ويظهر من الشكل النتوءات المحلزنة ومسقطها الأفقي.



الشكل (3-3) بعض أنواع قضبان حديد التسليح عالية التماسك (ذات النتوءات)

3-3-1- اختبار قضبان التسليح على الشد:

الهدف من هذا الاختبار هنا ما يلي:

- (1) تحديد مقاومة حديد التسليح على الشد.
- (2) دراسة أداء حديد التسليح تحت تأثير حمولة الشد وتعيين التشوه النسبي الحاصل ومدى التغيير الناتج عن الشد، وتستخدم هذه البيانات عند تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة وكذلك لتحديد مقدار التسليح المطلوب في المقطع لمدروس، وأهم الأجهزة المطلوبة لإجراء الاختبار:

- ماكينة الشد الخاصة

- حساسات التشوه، الشكل (3-4)

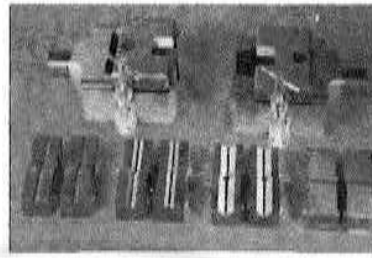
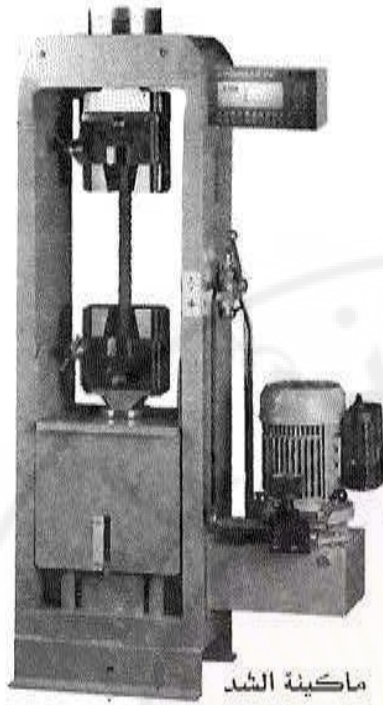
خطوات الاختبار الرئيسية:

1. تجهيز عينة الشد وتحديد طولها وقطرها الأصليين.
2. تثبيت عينة الاختبار بين فكي الماكينة بحيث:
 - يتم انطباق محور العينة مع محور الفكين (محور الماكينة) وتثبيتها وفق الأصول.
 - تكون النتوءات الموجودة على السيخ في اتجاهات فك الماكينة لزيادة التماسك بين العينة والفك.
3. إدخال بيانات العينة في وحدة الإدخال وكذلك معدل التحميل
4. تحميل العينة بحمل ابتدائي بسيط لتثبيت العينة، ثم يوضع حساس الاستطالة على العينة.
5. تشغيل الماكينة لتطبيق الحمولة على العينة بالتدرج وبمعدل تحميل ثابت من البداية وحتى الانقطاع.
6. عند انقطاع العينة إلى جزأين (ليس بالضرورة أن يكونا متماثلين)، يتم تحديد حمولة الانقطاع، ويتم بعد ذلك حساب النتائج.

لا بد من ملاحظة ما يلي:

- مرحلة المرونة: تحصل في بدايات التحميل على العينة ويراقتها تغير طفيف في الطول وتعود العينة على الوضع الأصلي بعد زوال الحمولة المطبقة.
 - مرحلة الخضوع (السيلان): تبدأ بعد مرحلة المرونة، وتترافق بانخفاض مقاومة السيخ للشد مع زيادة واضحة في طول العينة، ويبقى التغير في الطول بعد زوال الحمل، ولكن دون نقص يذكر في المقطع العرضي.
 - مرحلة اللدونة: وتبدأ بعد مرحلة الخضوع، وتتميز بزيادة ملحوظة في مقاومة العينة للشد مع زيادة في الطول مصحوبة بانخفاض المقطع العرضي (تكوين ما يسمى الرقبة)، وتنتهي هذه المرحلة بانقطاع العينة إلى جزأين.
- وبعد انتهاء الاختبار، يتم تحديد النتائج كما يلي:

$$\frac{\text{أقصى حمل}}{\text{مساحة مقطع العينة}} = \text{مقاومة الحديد للشد}$$
$$\frac{\text{الاستطالة الكلية}}{\text{الطول الأصلي للعينة}} = \text{الانفعال}$$

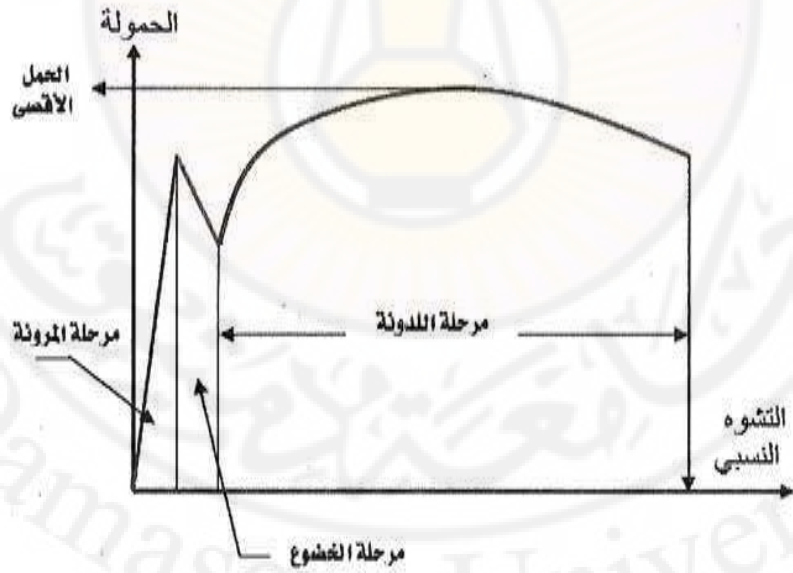


ماسك عينات الشد
يدوي الكتروني



حساسات الانفعال في عينات الشد

الشكل (3-4) أجهزة اختبار شد حديد التسليح



الشكل (3-5) مخطط علاقة الحمولة - التشوه النسبي (الانفعال) عند اختبار شد حديد التسليح

مثال توضيحي:

يطلب تحديد مقاومة عينة من الحديد على الشد قطرها 8mm ومقدار الانفعال (التشوه النسبي) فيها وكذلك معامل المرونة E_s (بترك للطالب) إذا كان الطول الأصلي للعينة 22cm وكانت نتائج الشد كما يلي:

2.8	2.2	1.9	1.6	1.3	1.5	1.12	0.9	0.5	0.1	0.0	الحمولة [T]
17.0	14.0	10.0	8.0	4.0	2.0	1.5	1.0	0.2	0.04	0.0	الاستطالة [mm]

مقاومة الحديد للشد:

$$\frac{2.8 \times 1000}{3.14 \times 0.4^2} = 5573.25 \text{ kg/cm}^2$$

التشوه النسبي:

$$\frac{17}{220} = 0.077$$

3-3-2- التسلح الصلب في العناصر الخرسانية الخليطة:

يُعرف التسلح الصلب في العناصر الخرسانية الخليطة بأنه عنصر فولاذي يمتلك معامل صلابة عالياً لمقارنة مع طولها، ويستعمل أثناء تنفيذ العناصر الخرسانية الخليطة كمعصر مقاومة أثناء التنفيذ ويمكن إنجاز التسلح الصلب على أحد الشكلين التاليين:

- على شكل عناصر فولاذية مصنعة (بروفيلية)

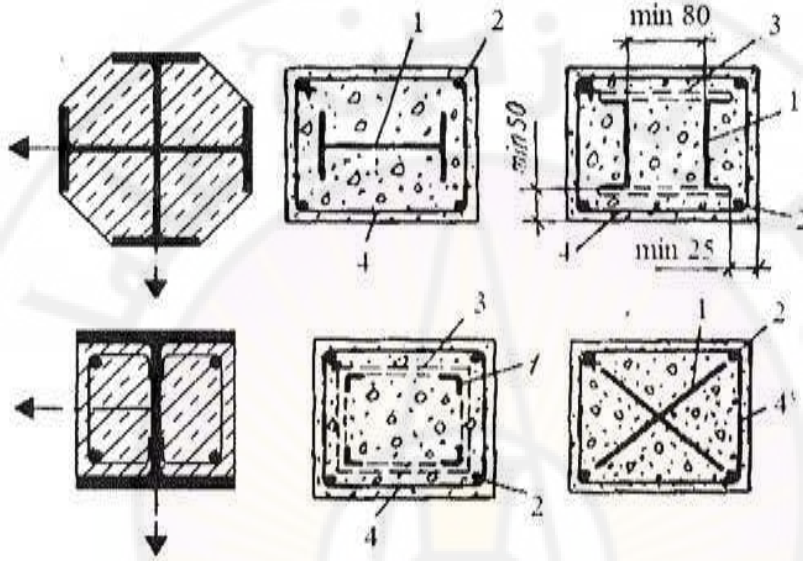
- على شكل هياكل فولاذية ملحومة

يستخدم التسلح الصلب على شكل عناصر فولاذية مصنعة (بروفيلية) ملحومة بعضها ببعض أو متصلة بواسطة البراغي أو البرشمة بشكل خاص أثناء تنفيذ المنشآت الخرسانية العالية. إن الميزة الأساسية للتسلح الصلب في العناصر الخرسانية الخليطة تتمثل بإمكانية استخدام التسلح الصلب كعناصر حاملة أثناء تنفيذ المنشأ، ومن ثم تقود إلى توفير كبير في استخدام الدعامات اللازمة للكوفراج.

يستخدم التسلح الصلب على شكل هياكل ملحومة بشكل خاص عند تنفيذ المنشآت المائية الكتلية أو المنشآت الصناعية الثقيلة. تؤمن الهياكل الفولاذية الملحومة بشكل فراغي استخدام

مادة الفولاذ بشكل مناسب وذلك باستغلال التوزيع الهندسي الجيد للعناصر الفولاذية كالزوايا المصنّعة أو قضبان التسليح الملحومة. تكون هذه الهياكل الفولاذية على شكل جوائز شبكية فراغية إما بشكل جوائز أفقية وإما بشكل أعمدة شاقولية.

تُحسب الهياكل الفولاذية الصلبة على أساس أنها منشآت فولاذية خاضعة للحمولات المطبقة أثناء التنفيذ وكمنشآت خرسانية مُسلّحة بعد التنفيذ خاضعة لحمولات الاستثمار.



الشكل (3-6-1) تسليح الأعمدة المختلفة

1- البروفيلات المعدنية بمقاطعها المختلفة ، 2- حديد التسليح الإنشائي الشاقولي ، 3- حديد التسليح العرضي

يُبين الشكل (3-6-1) تسليح الأعمدة المختلفة وهي اتصال صفائح متعامدة أو أربع زوايا معدنية أو بشكل مجريبتين أو بشكل جسر معدني (I). ومن أجل اتصال هذه البروفيلات المعدنية ، يتم الوصل فيما بينها بصفائح تأخذ الشكل الأفقي أو المائل. وبعد تجهيز هذه العناصر بوضع حديد تسليح إنشائي كما هو في شكل الأعمدة العادية (قضبان طولية وعرضية). وظيفة هذا التسليح هنا تشكيل طبقة حماية للبروفيلات المعدنية، ولذلك يتم صب الخرسانة الطازجة ضمن القالب الخشبي أو المعدني المهيأ، ولأن تماسك الخرسانة الملامسة لهذه البروفيلات المعدنية يكون ضعيفاً، يُوضع فوقه حديد التسليح العادي كما ذكر آنفاً، وتأخذ الخرسانة مقاومتها العظمى ضمن النواة الخرسانية المحصورة داخل البروفيلات المعدنية على

شكل زوايا أو محصور بين مجريتين، ويوضح الشكل أعلاه توضع البروفيلات المعدنية ضمن الكتلة الخرسانية المحاطة بحديد تسليح إنشائي طولي وعرضي لحمايتها من التآكل وفصل الخرسانة عن البروفيلات المعدنية.

يوضح الشكل (3-6-ب) توضع البروفيلات المعدنية وخاصة على شكل I ضمن جوائز خرساني:

الحالة الأولى (a): الجوائز الخرساني يقع ضمن منطقة الشد وتحت المحور السليم الحالة الثانية (b): توضح مقطع في جوائز وبلاطة حيث يتوضع البروفيل المعدني في أسفل منطقة الجوائز وتحت منطقة الضغط للجوائز الذي يعمل بشكل T.

الحالة الثالثة (c): توضح أن الجوائز المعدني يتوضع على كامل جسد الجوائز ويفصله في أطراف الجوائز طبقة الحماية والوقاية المولفة من الخرسانة المسلحة أنفة الذكر لحمايته، أي في منطقة الشد والضغط معاً.

الحالة الرابعة (d): توضح أن طرف البروفيل المعدني الأعلى يلامس منطقة الضغط في الجوائز الذي يعمل بشكل (T).

الحالة الخامسة (e): توضح وجود البروفيل المعدني تحت منطقة الضغط مباشرة كما هو موضح بالشكل.

الحالة السادسة (f): توضح أن جسد البروفيل المعدني يتوضع في منطقة الشد والضغط للجوائز الموضح بالشكل والذي يعمل بشكل (T). لا تخضع هذه العناصر المختلطة إلى النسب الدنيا والعظمى لحديد التسليح في الأعمدة والجوائز ولها طرائق حساب خاصة، حيث:

A_{s2} - يوضح توضع البروفيلات المعدنية

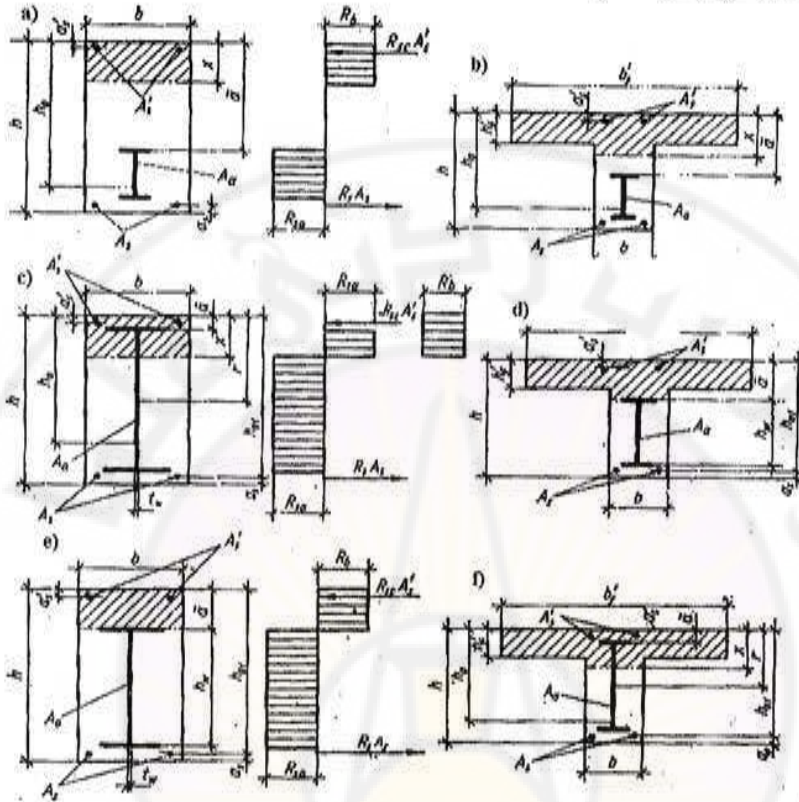
A_s, A'_s - يوضح التسليح العلوي والسفلي

3-3-3- تسليح الخرسانة مسبقة الإجهاد:

يستخدم فولاداً خاص لتنفيذ العناصر الخرسانية المسبقة الجهد *Prestressed Concrete* حيث تكون مقاومة هذا التسليح عالية ويتم ذلك إما باستخدام فولاذ ذي تركيب كيميائي خاص، وإما بمعالجة الفولاذ القديم لتحسين مقاومته الميكانيكية بزيادة قيمتها.

لقد علم أن نسبة الكربون في الفولاذ العادي تتراوح ما بين (1-3)%. أما في حال تصنيع الفولاذ الخاص للخرسانة المسبقة الإجهاد فإن نسبة الكربون في الفولاذ تزداد (5-9)%. وتزداد

في الوقت نفسه درجة قساوة الفولاذ. في هذه الحالة يُحدَّد القطر الأعظمي الممكن استخدامه من هذه القضبان كي يمكن عكفها.

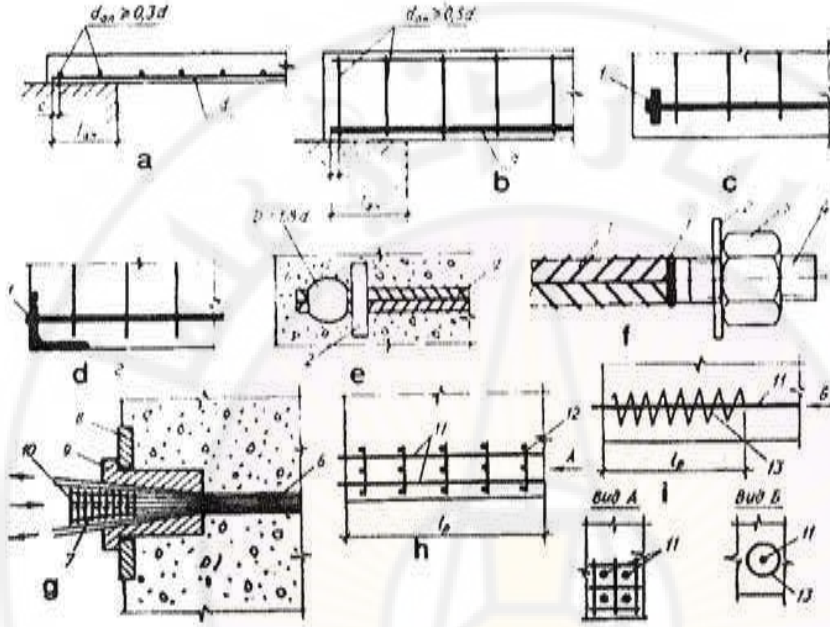


الشكل (3-6-ب) توضع البروفيلات المعدنية في جانز خرساني

هناك أنواع متعددة من قضبان التسليح المستخدمة في تنفيذ العناصر الخرسانية المسبقة الإجهاد نذكر منها:

- أ- أسلاك من أجل العناصر الخرسانية المسبقة الإجهاد ذات الشد المسبق حيث يتم نقل الإجهادات بين التسليح والخرسانة عن طريق التماسك. وتبلغ أقطار هذه الأسلاك ما بين $(1-7) \text{ mm}$. يمكن أن تكون هذه الأسلاك ملساء أو محلزنة.
- ب- أسلاك مجدولة على شكل ضفائر، وتكون الضفيرة مؤلفة من سلكين أو أكثر، تستخدم هذه الضفائر من أجل تصنيع العناصر الخرسانية المسبقة الإجهاد ذات الشد المسبق.

ج- الكابلات على شكل جزم، وتستخدم من أجل تنفيذ العناصر الخرسانية المسبقة الجهد ذات الشدّ اللاحق ويتم ذلك بغير تبسيط التنفيذ وتقليل عدد الأسلاك في العنصر، كما هو موضح بالشكل (7-3).



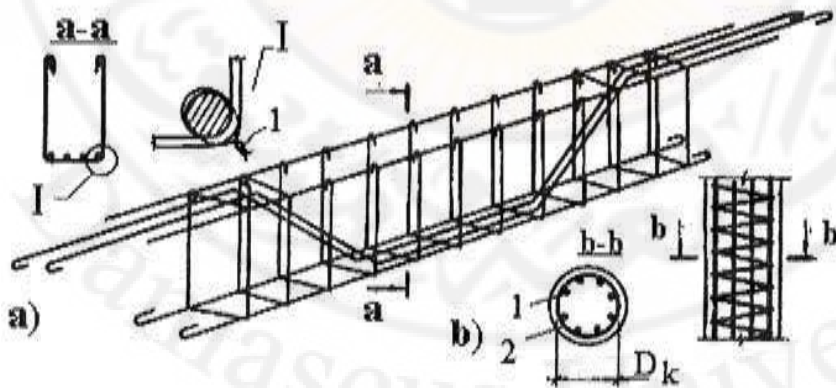
الشكل (7-3) استخدام الكابلات على شكل حزمات

- a- تثبيت موضع الشبكة الملحومة على نقاط الارتكاز - b- تثبيت استناد هيكل معدني ملحوم
c- تثبيت قضيب العزقة المتوضع في حديد التسليح قبل الصب. d- العناصر المعدنية المضافة
e- رأس معرض للشد f- الإجهاد المسبق للقضيب على الخرسانة
g- شد القضبان لاحقة الإجهاد المتوضعة ضمن التيب (الأنبوب) المعدني
h- تداخل القضبان مسبق الإجهاد ضمن شبكات التسليح
i- تداخل القضبان مسبق الإجهاد ضمن الأنابيب المعدنية المحلزنة: 1- اللحام 2- رنديلة معدنية 3- القضيب
4- قلوطة القضيب 5- العزقة 6- حزمة القضبان 7- الظفر المشدود 8- منطقة ارتكاز الصفيحة المعدنية
9- قاعدة الاستناد 10- سداة عدم الرجوع 11- التسليح مسبق الإجهاد 12- شبكة التسليح 13- الأنبوب
المعدني المحلزن.

3-3-4 أشكال التسليح في عناصر الخرسانة المسلحة:

يتم تصنيع فولاذ التسليح للعناصر الخرسانية المسلحة في الورشة من أجل الأعمال الصغيرة والعادية، أما من أجل الأعمال المتوسطة والكبيرة فيتم تصنيع فولاذ التسليح في ورشة متخصصة، وتستخدم تقنية مرتفعة لضمان جودة الصنعة والدقة في تنفيذ الأشكال والأبعاد الهندسية لقضبان التسليح. يطلع مهندسو أي شركة متعهدة لمشروع ذي دقة عالية وجودة تنفيذ، مع العناصر الفنية فيها على المخططات التنفيذية، وخاصة ما يتعلق بحديد التسليح، ويتم تدارس وإنجاز مخططات إيضاحية تنفيذية، ومن ثم يتقرر هل يتم تصنيع حديد التسليح ضمن موقع المشروع أم يتم توريد هذا الحديد مصنعاً من قبل شركة أخرى. وإذا تم إعطاء تعهد لشركة أخرى لصنع حديد التسليح المراد تنفيذه، يتم عندئذ إرسال المخططات التنفيذية الإيضاحية لهذه الشركة وكذلك أطوال حديد التسليح الطولي والعرضي، ويثبت ويجهز في الورشة ضمن الكوفراج المعد للعناصر الإنشائية، أو من الممكن إحضاره جاهزاً كهيكل معدني ملحوم نقطياً للأعمدة والجوائز والبلاطات.

لو أخذنا هيكل معدني في أي عنصر إنشائي لجائز وحاولنا دراسة فولاذ التسليح الموجود فيه فإننا سنجد الأشكال التالية: يوضح الشكل (3-8) الحديد العامل والفعال الذي يقاوم العزم الموجب والحديد العامل والفعال الذي يقاوم العزم السالب، وطريقة تكسيح حديد التسليح عند الانتقال من التسليح الموجب إلى التسليح السالب في نقطة انعدام العزم، كما يوضح الشكل حديد تسليح التعليق الإنشائي وأيضاً التسليح العرضي المقاوم للإجهادات القاسية، ويوضح عكفات حديد التسليح للحديد المطاوع العادي).



الشكل (3-8) نماذج من هياكل التسليح (جائز، عمود)

يبين الشكل (3-8-*a*) منظور هيكل معدني لجانز، ويوضح المقطع *a-a* الأسورة العرضية التي يستند إليها التسليح العامل والفعال في الأسفل وتسلح التعليق عند العكفات العلوية، كما توضح العقدة *I* الزاوية القائمة لتوضع الحديد العامل والفعال مع الأسورة، أما الشكل (3-8-*b*) فيوضح الهيكل المعدني لتسليح عمود دائري مسلح حلزوني، ويبين المقطع *b-b* قطر العمود وتوضع التسليح العرضي والشاقولي، حيث:

- 1- سلك التريبط
- 2- التسليح الحلزوني
- 3- التسليح الشاقولي.

أ - التسليح الرئيسي *Main Reinforcement* :

ينتج التسليح الرئيسي في العناصر الخرسانية المسلحة من خلال إعداد المذكرات الحسابية وتمثل نسبة التسليح هذه غالبية كمية التسليح المستخدمة. ففي العناصر الخاضعة للانعطاف يوضع التسليح الرئيسي في منطقة إجهادات الشد وقد يوضع في منطقة الضغط في العناصر ثنائية التسليح. يُوزع التسليح في العنصر الخرساني المسلح طبقاً للمواصفات الفنية المعتمدة، أو اعتماداً على خبرة المصمم حيث تعطي أكبر فعالية أثناء سلوك المنشأ. تنفيذياً يُطلب تحديد جميع الأطوال الجزئية والطول الكلي لكل قضيب تسليح و تحديد كميات كل نوع من قضبان التسليح الرئيسية حتى يُصار إلى تنفيذها في الورشة ضمن مخططات تنفيذية تُجهز من قبل المنفذ. ويعرف التسليح العامل والفعال في الجوائز: التسليح السفلي الذي يقاوم العزم الموجب، التسليح العلوي الذي يقاوم العزم السالب ضمن طول تماسك يُحدد حسب القطر والمجاز، كما يوضع التسليح العامل والفعال في الإطارات عند امتصاص التسليح للعزم الناتج عن الوثاقفة في العقدة التوازنية). أمّا في الأعمدة فيكون التسليح العامل والفعال في أغلب الأحيان هو التسليح الشاقولي. أمّا إذا كان هذا العمود مصمماً بشكل حلزوني فإن التسليح العرضي الحلزوني يكون أيضاً عاملاً وفعالاً. أمّا بالنسبة للبلاطات التي تعمل باتجاه واحد فإن التسليح العامل والفعال يتوضع على المجاز الأعظمي وبوازي المجاز الأصغر. أمّا البلاطة التي تعمل باتجاهين فإن التسليح الرئيسي والثانوي هما تسليحان عاملان وفعالان. أمّا في العناصر مسبقة الإجهاد للبلاطات والجوائز المسبقة الصنع فإن كافة التسليح مسبق الإجهاد هو تسليح عامل وفعال.

ب - القضبان المكسحة *Bent-up Bars* :

تستعمل هذه القضبان لتحقيق إحدى الغايتين التاليتين: إما لمقاومة الإجهادات الشاذة الرئيسية في العنصر الخرساني، ويتم رفع هذه القضبان حسابياً تبعاً لمغلف القوى القاصّة ويُحدّد بالدقة أبعاد هذه القضبان وأماكن تكسيحها وتوقيفها ودرجة تكسيحها حيث تتراوح هذه الزاوية ما بين (30 و 60) درجة. أما الغاية الثانية فهي استخدام قضبان التسليح في منطقة العزوم السالبة لامتصاص القوى الشاذة المتولدة، في هذه الحالة يتم رفع قضبان التسليح و توقيفها تبعاً لمغلف العزوم للعنصر الخرساني المدروس. يتم أيضاً تحديد الأطوال الكلية و الجزئية لهذه القضبان و شكلها الهندسي ليصار إلى تنفيذها بدقة حيث يمكنها القيام بالغاية المناطة بها على أكمل وجه، أي إن التكسيح يتم عند الانتقال من العزم السالب إلى الموجب وفي النقطة التي ينعدم فيها العزم وأيضاً من الممكن إجراء عملية التكسيح عند نقطة المفصل في الإطار بين رقبة الأساس وعمود الإطار. وعملية التكسيح دوماً توفر في أطوال التماسك بين قضبان حديد التسليح، أي إنه لا داعي لعمل أطوال تماسك أو تراكم عندما يكون هنالك تكسيح بين انتقال حديد التسليح من العزم الموجب إلى السالب أو تحقيق التسليح المفصلي .

ج - التسليح الإنشائي *Structural Reinforcement* :

ويعرف التسليح الإنشائي بأنه التسليح الذي لا يؤخذ بعين الاعتبار أثناء تصميم ودراسة العناصر الإنشائية ضمن المذكرة الحسابية، ويوضع هذا التسليح حسب خبرة المهندس المنفذ أو ضمن المخططات التنفيذية المساعدة للمخططات التصميمية الأساسية، وهذا التسليح أقطاره تتراوح ما بين 6 ملم و 12 ملم. ومن أنواع التسليح الإنشائي: تسليح التعليق للجوائز، التسليح التوزيعي في البلاطة التي تعمل في اتجاه واحد، التسليح المقاوم للإجهادات الناتجة عن النقل في البلاطة التي تعمل باتجاه واحد، وهو يتوضع فوق التسليح العامل وبوازي المجاز الأطول، وأيضاً بوضع في الجوائز التي ارتفاعها الكلي $h_f \geq 65cm$ وذلك لمقاومة أثر انكماش الخرسانة.

د - قضبان التعليق *Suspension Reinforcement* :

يختار هذا النوع من التسليح من اعتبارات إنشائية تأخذ بعين الاعتبار الخبرة الهندسية المتراكمة كي نحصل على عناصر خرسانية ذات مقاومة عالية. يستعمل عادة تسليح التعليق

لتثبيت التسليح العرضي في مكانه وللحصول على شبكة تسليح غير مشوهة هندسياً وثابتة تحت تأثير شروط التنفيذ.

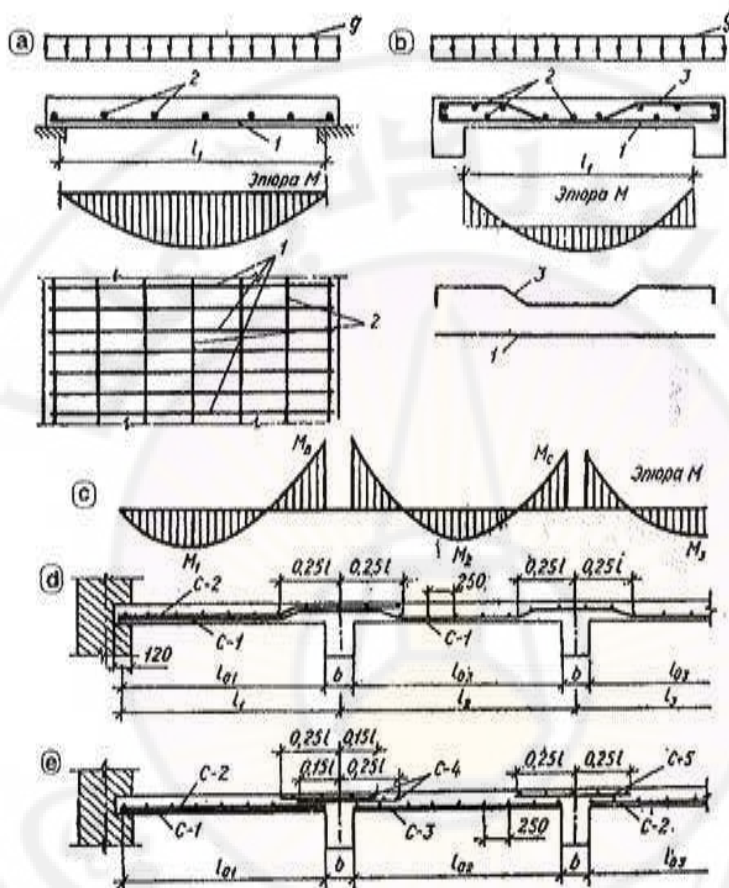
هـ - التسليح العرضي *Transverse Reinforcement* :

يكون التسليح العرضي للعناصر الخرسانية المسلحة على شكل قضبان طولية مكسحة أو على شكل أتاري (أساور) مغلقة أو أتاري مفتوحة في المنطقة العلوية أو على شكل أتاري مائلة. تُستخدم الأتاري (الأساور العرضية) *Stirrups* لامتصاص الإجهادات الشادة الرئيسية المتولدة في العناصر الخرسانية المسلحة، وتقوم الأتاري بمهام أخرى منها تشكيل هيكل ثابت الشكل للتسليح، وتثبت بواسطته قضبان التسليح المختلفة في أماكنها المحددة، وتقوم الأتاري أيضاً بتخفيف التقلص في العناصر الخرسانية المسلحة ورفع درجة التماسك بين الخرسانة والتسليح وبشكل غير مباشر تقوم الأتاري بتحسين الخواص الميكانيكية والانسيابية للخرسانة. إن الوظيفة الأساسية للأتاري في الأعمدة هي تشكيل هيكل معدني مع القضبان الشاقولية وهذه الأتاري تعمل على الشد لمقاومة الإجهادات العرضية وتمنع من حدوث تنامي التشوهات والإجهادات العرضية وهي تزيد من قدرة تحمل العمود، أي إنه كلما قلت المسافة بين الأتاري ازدادت قدرة تحمل العمود وتحسين استثنائه أي إن الأتاري العرضية إذا ما تحولت إلى تسليح حلزوني تزيد من قدرة تحمل العمود مرة ونصفاً.

و- تسليح التقلص *Shrinkage Reinforcement* :

يستخدم هذا التسليح في الجوائز الخرسانية المسلحة التي يزيد ارتفاعها على 65 سم. يُسهّم هذا التسليح في منع تقلص هذه الجوائز أو تخفيف الإجهادات الناتجة من تقلص الخرسانة. يُضاف لذلك ما ذكر عن تسليح التقلص في التسليح الإنشائي في البلاطات التي تعمل باتجاه واحدٍ واتجاهين. يُستعمل هذا التسليح في البلاطات التي تعمل باتجاهين، أي في العناصر التي تكون سماكتها صغيرة بالنسبة لبعديها الآخرين. يقوم هذا التسليح بمقاومة العزوم في الاتجاه المتعامد مع التسليح الرئيسي إن وجدت (العزوم)، ويساعد أيضاً على تخفيض تقلص الخرسانة كما يساعد على توزيع أفضل في توزيع الحمولات الناتجة من البلاطة على الجوائز المحيطة بالبلاطات يُختار ويوزع هذا التسليح تبعاً لاعتبارات إنشائية وتنفيذية تعتمد على الخبرة. كما يوضح الشكل تسليح البلاطة التي تعمل باتجاه واحدٍ واتجاهين حيث يكون التسليح الموازي

للمجاز الأعظمي هو تسليح توزيعي، ويعمل أيضاً كتسليح لمقاومة الإجهادات الناتجة عن النقل، أما التسليح الموازي للمجاز الأصغر فهو تسليح عامل وفعال كما هو مبين بالشكل (9-3).

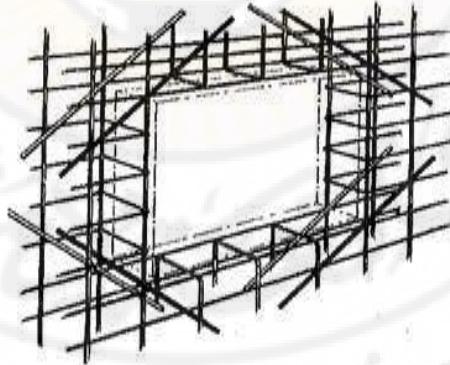
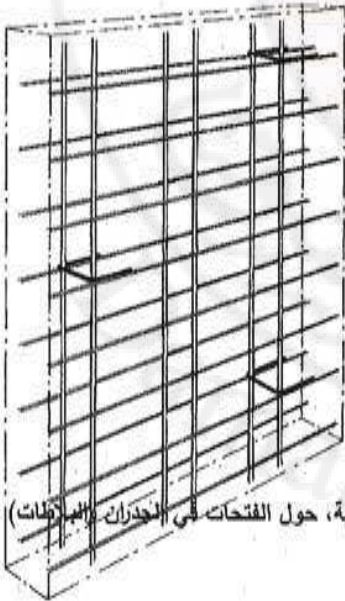
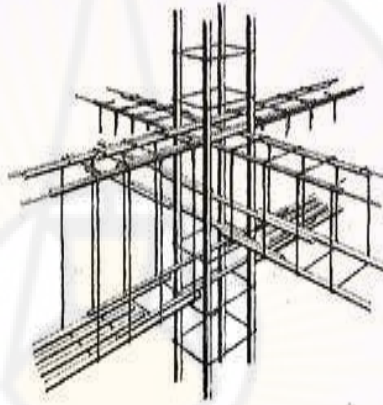
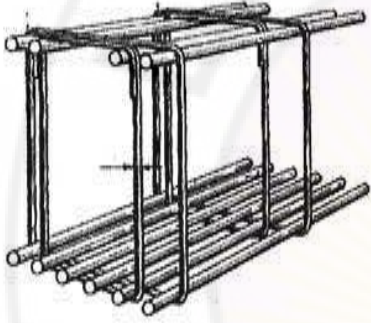


الشكل (9-3) نماذج تسليح البلاطات الخرسانية

- (a) بلاطة وحيدة المجاز تستند استناداً حراً على مسندين (b) بلاطة وحيدة المجاز تستند على جانبيين (c) توزع العزوم عند المجازات والمساند لبلاطة مستمرة (العزوم السالبة والموجبة) (d) تبين تسليح بلاطة متعددة المجازات مصنعة على الكوفراج مباشرة (للتسليح السالب والموجب) (e) تبين أيضاً بلاطة متعددة المجازات ذات تسليح شبكي عامل وفعال
- 1 - التسليح العامل والفعال الذي يقاوم العزم الأعظمي
- 2 - التسليح الإنشائي (تسليح توزيعي يقاوم الإجهادات الناتجة عن تقلص الخرسانة)، - نقاط تكسيح التسليح

ز- التسليح الثانوي Secondary Reinforcement:

ويسمى أحياناً تسليح التوزيع؛ وهو يُستعمل في البلاطات التي تعمل باتجاهين، أي في العناصر التي تكون سماكتها صغيرة بالنسبة لبعديها الآخرين. يقوم هذا التسليح بمقاومة العزوم في الاتجاه المتعامد مع التسليح الرئيسي إن وُجدت (العزوم) ويُساعد أيضاً على تخفيض تقلص الخرسانة كما يُساعد على توزيع أفضل في توزيع الحمولات الناتجة من البلاطة على الجوائز المحيطة بالبلاطات يُختار ويُوزع هذا التسليح تبعاً لاعتبارات إنشائية وتنفيذية تعتمد على الخبرة. كما يوضح الشكل تسليح البلاطة التي تعمل باتجاه واحد وباتجاهين، إذ يكون التسليح الموازي للمجاز الأعظمي هو تسليح توزيعي ويعمل أيضاً كتسليح لمقاومة الإجهادات الناتجة عن النقل، أما التسليح الموازي للمجاز الأصغر فهو تسليح عامل وفعال كما هو مبين بالشكل (3-9)، ويبين الشكل (3-10) أيضاً نماذج أخرى لهياكل التسليح المستخدمة.



الشكل (3-10) نماذج أخرى لهياكل التسليح (جوائز، عقدة إطارية، حول الفتحات في الجدران والبلاطات)

الفصل الرابع

التماسك بين الخرسانة وفولاذ التسليح *Bond between Concrete and Steel Reinforcement*

- 1-4- تمهيد
- 2-4- التماسك بين التسليح والخرسانة
 - 1-2-4- استخدام القضبان الملساء
 - 2-2-4- استخدام القضبان ذات النتوءات
 - 3-2-4- إجهاد التماسك وطول الإرساء
 - 4-2-4- التماسك الموضعي في حالة الانحناء
- 3-4- أطوال التثبيت الأساسية وفق الكود العربي السوري
- 4-4- تأمين أطوال تثبيت قضبان التسليح
- 5-4- وصل قضبان التسليح
- 6-4- التحقق من التماسك
- 7-4- توقيف أطراف قضبان التسليح



4-1- تمهيد Preface:

من الأسباب الرئيسية التي تؤمن الأداء المشترك بين الخرسانة والتسليح المغموس فيها، في ظروف التحميل العادية المتوافقة مع الأحمال التصميمية، ظاهرة التماسك (الالتحام) بين الخرسانة والتسليح وتقارب عوامل التمدد والتقلص الحراري لهما تحت تأثير الأحمال اللحظية *Live Loads*، وتأمين الغطاء الخرساني الكافي لقضبان التسليح. بالنسبة للتماسك، فهو الخاصة التي تؤمن عملية انتقال الإجهادات من التسليح إلى الخرسانة المحيط به تلقائياً، الأمر الذي يتطلب تأمين هذا الالتحام عند تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة، وبشكل يضمن عدم إفلات (تمليص *Pullout*) التسليح من الخرسانة أو المساند، أو فك الالتحام فيما بينهما (نتيجة الإجهادات الفالقة *Splitting Stresses* بسبب الضغط الموضوعي) في أي مكان ضمن حدود الإجهادات التصميمية. وبالنسبة لتقارب عوامل التمدد والتقلص الحراري، فهذا واضح لأن:

- عامل التمدد الحراري لل فولاذ $c^{-1} 10^{-6} \times 12$ تقريباً

- عامل التمدد الحراري للخرسانة العادية بحدود $c^{-1} 10^{-6} \times (1 \rightarrow 0.7)$ تقريباً

وبالنسبة لتأمين الغطاء الخرساني *Concrete Cover* الكافي، فهو يهدف بالدرجة الأولى إلى حماية التسليح من التآكل بسبب العوامل الكيماوية الضارة وغيرها، وقد تم بيان السماكات اللازمة من الخرسانة لقضبان التسليح في فصول سابقة. هنا، لا بد من الذكر أن فعالية الخرسانة تتعلق بعوامل متعددة أهمها:

- درجة تراص الخرسانة، وهذا يتعلق بمحتوى ونوع الإسمنت وطريقة الرج *Vibration* والتدرج الحبي للحصويات *Aggregate Granular Grading* وغير ذلك.

- سمك الغطاء الخرساني

- عدم تجاوز سعة التشققات الحدود المسموحة، لأن التشققات تؤمن ممراً لعبور الكيماويات الضارة إلى التسليح.

- حماية الخرسانة من تأثير الكلوريدات، الأحماض، الغازات الضارة كغاز ثاني أكسيد الكربون الذي يسبب بوجود الرطوبة عملية الكربنة *Carbonation* التي تسبب ازدياداً تدريجياً في تفتت الخرسانة (ظاهرة الطبشرة *Chalking*)، وغير ذلك.

لقد بينت الاختبارات نشوء قوى تماسك بين الفولاذ والخرسانة المحيطة في مناطق التلامس، حتى لو كانت هذه المناطق صغيرة جداً، وينشأ عن هذه القوى إجهادات التماسك *Bond Stresses* تساوي محصلة قوى التماسك مقسومة على مساحة سطح التلامس. وتقوم قوى

التماسك المذكورة بمقاومة قوى الشد، أو الضغط في قضبان التسليح نتيجة الأحمال المطبقة، إذ تؤدي قوى الشد أو الضغط هذه إلى كسر طوق الخرسانة حول التسليح، الأمر الذي يسبب انفصاله عن الخرسانة، انفلاته أو انسحابه من مسانده.

إن ظاهرة التماسك معقدة جداً بسبب العوامل المتعددة المرتبطة بها، ومن أهم العوامل التي لها أثر في تحديد قيمة إجهاد التماسك الناتج، وضمان عدم انهيار التماسك ما يلي:

- نوعية سطح قضبان التسليح المستخدمة، أي استخدام القضبان عالية التماسك (القضبان ذات النتوءات السطحية *Deformed Bars*)، الشكل (4-1)، أو ذات السطح الأملس *Plain Bars* الأقل تماسكاً مع الخرسانة في حال عدم اتخاذ الاحتياطات اللازمة، كما سيرد لاحقاً.

- شكل قضبان التسليح، أي هل هي مستقيمة أم منحنية (معكوفة)
- شكل المقطع العرضي لقضبان التسليح، إذ تبين الاختبارات التجريبية أن فعالية التماسك حسب شكل المقطع العرضي تحقق النسب دائري:مربع:مستطيل = 57:84:100.

- أقطار قضبان التسليح المستخدمة ϕ ، إذ يزداد التماسك مثلاً في حالة الشد مع تناقص الأقطار المستخدمة (من أجل مساحة محددة ما)، بسبب زيادة السطح النوعي للتلامس، وهو

$$\frac{u_s}{A_s} = \frac{4}{\phi}$$

نسبة المحيط الكلي للقضبان إلى المساحة الكلية لمقاطعها العرضية، حيث

- سرعة تطبيق الأحمال، إذ يزداد التماسك مع ازدياد هذه السرعة، أي سرعة انتقال الإجهادات من التسليح إلى الخرسانة المحيطة.

- سمك الغطاء الخرساني للتسليح الطولي، إذ إن السماكات القليلة تسبب تشكل التشققات بسرعة نتيجة الإجهادات الشادة الكبيرة المنقولة إليها.

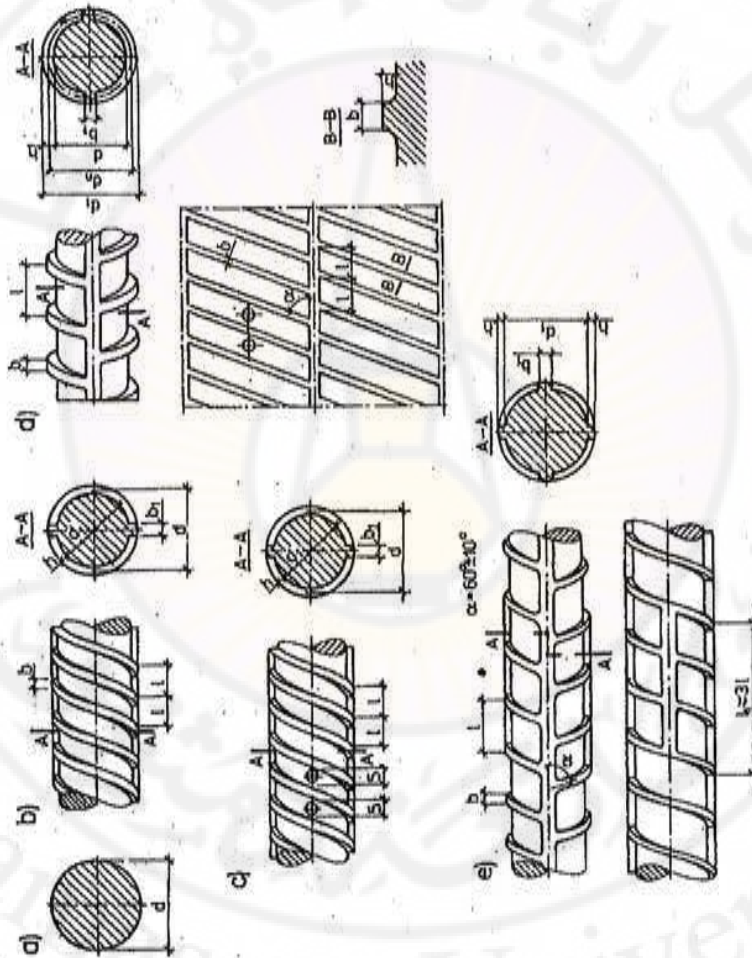
- درجة جودة الخرسانة (المقاومة المميزة على الضغط)، إذ يزداد التماسك مع ارتفاعها.

- التسليح العرضي ونسبته وغير ذلك، إذ يزداد التماسك مع زيادة هذه النسبة.

- اتجاه توضع القضبان، إذ يلاحظ أن ارتصاص الخرسانة حول القضبان الشاقولية يكون أكثر تجانساً مقارنة مع الوضع الأفقي للقضبان، حيث يمكن أن تتشكل فراغات أو خرسانة هشة أسفل القضيب تضعف التماسك لعدم فاعلية الرج والدمك في كثير من الأحيان.

- نظافة سطح القضبان من آثار الصدأ *Rust* القديم (الصدأ الحديث يرتبط بقوة مع كتلة القضيب الداخلية ويساعد على التماسك)، والدهون والزيوت والملوثات الأخرى.

تدخل هذه العوامل في حساب طول التثبيت اللازم لقضبان التسليح في الخرسانة وهو ما يسمى أحياناً طول الإرساء *Anchorage Length* الضروري للمحافظة على التماسك المطلوب بين الخرسانة والتسليح. ويكون هذا الطول أكبر في حالة قضبان الشد مقارنة مع حالة الضغط، إذ إن انضغاط قضيب التسليح يسبب زيادة مقطعه العرضي، الأمر الذي يزيد من حصر الخرسانة له، وزيادة التماسك نتيجة لذلك، على عكس القضبان المشدودة التي تعاني نقصان قطرها بسبب الشد، الأمر الذي يسهل عملية انفصالها عن الخرسانة المحيطة، ويمثل تماسك الشد نحو 48% من التماسك في حالة الضغط.



الشكل (1-4) بعض أشكال النتوعات السطحية في قضبان التسليح لرفع القدرة على التماسك مع الخرسانة

4-2- آلية التماسك بين التسليح والخرسانة:

بسبب أن الأحمال الخارجية لا تطبق مباشرة على التسليح، يتم انتقال هذه القوى إلى قضبان التسليح من الخرسانة المحيط بها وفق آلية معينة، ويتأثر هذا الانتقال بإجهاد القص الذي ينشأ في سطح التلامس بين الخرسانة والتسليح، وهو ما يدعى عادةً بإجهاد التماسك $Bond Stress$ ، وتختلف آلية الانتقال المذكورة اختلافاً جذرياً حسب سطح قضبان التسليح المستخدمة. يحصل التماسك بين الخرسانة وقضبان التسليح بشكل عام نتيجة لثلاث ظواهر رئيسية هي:

أ - ظاهرة التغيرية $Cohesion Phenomenon$ (تماسك الالتصاق $Cohesion Bond$):

ظاهرة تحصل بين المونة الإسمنتية وسطح قضبان التسليح. تُنجم ظاهرة التغيرية عن التماسك بين جزيئات المركبات الغروية في المونة الإسمنتية وسطح قضبان التسليح الملامسة لها. بعد تصلب هذه المركبات يُؤمن ذلك العمل المشترك بين هاتين المادتين المختلفتين، وأثبتت التجربة أن ظاهرة التغيرية تؤمن جزءاً من قوة التماسك بين الخرسانة والفلواز قد تصل نسبياً إلى 10% من قوة التماسك الكلية بين المادتين. يتم تجريبياً تحديد هذه القوة وذلك بالحساب تجريبياً لمقدار الإجهاد الفعلي الواجب تطبيقه كي نستطيع فصل عينة أسطوانية خرسانية عن سطح التماس مع صفيحة معدنية ناعمة السطح أو فصل هذه الصفيحة عن سطح بلاطة خرسانية، كما هو مبين بالشكل (4-2-4) لاحقاً. فإذا كانت القوة الفعلية المطبقة مقدارها F وسطح التماس A ، فإن إجهاد التماسك نتيجة التغيرية يحسب بالعلاقة $\sigma = \frac{F}{A}$ (إجهاد التماسك بالتغيرية $Cohesion$)، إذ يتم وضع صفيحة معدنية مصقولة على سطح بلاطة خرسانية بعد إزالة المياه السطحية الناتجة عن الخرسانة، وبعد فترة 28 يوماً من تصلب هذه البلاطة يتم إزالة هذه الصفيحة عن خرسانة البلاطة، وينتج عن ذلك إجهاد التغيرية. تعتمد ظاهرة التغيرية بشكل أساسي على نوعية الإسمنت ودرجة الصفة الدبقية، وأيضاً تأخذ فعاليتها حسب نعومة الإسمنت وخصائص عمله.

ب - ظاهرة التعشيق $Interlock Phenomenon$ (تماسك القص $Shear Bond$):

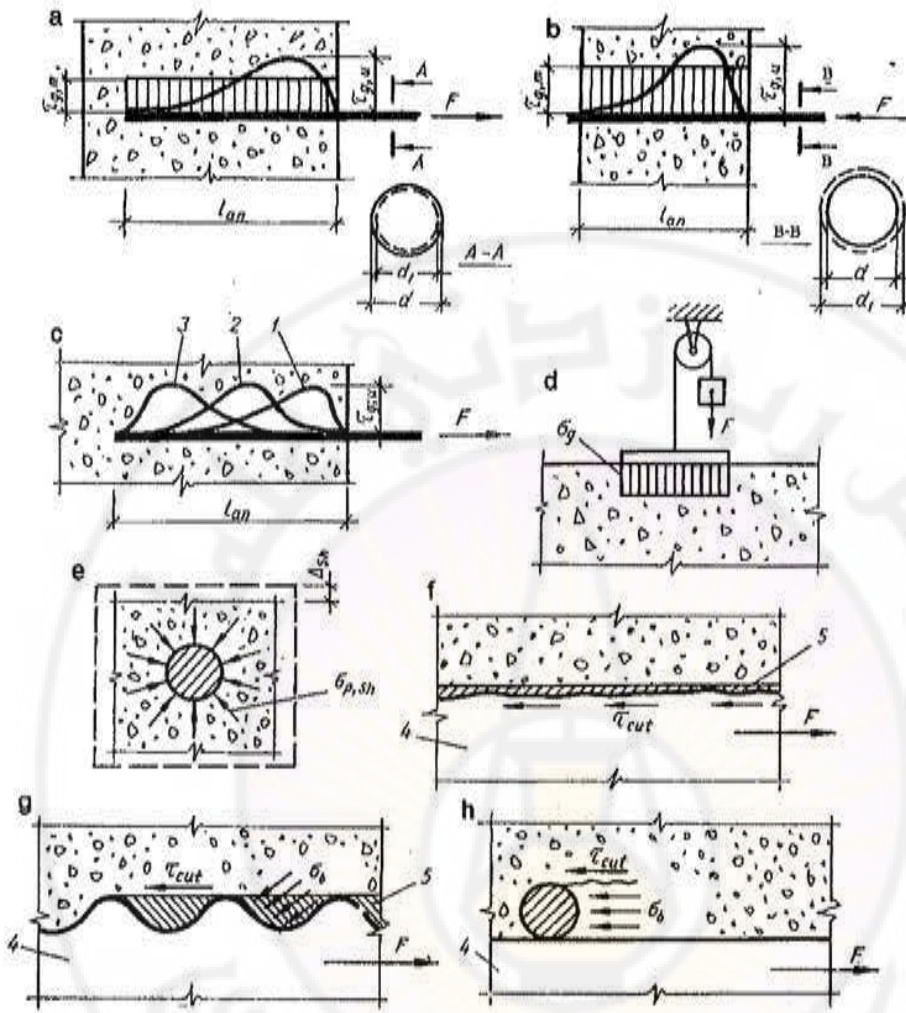
تتمثل بالتصاق المونة الإسمنتية للخرسانة وتداخلها مع النتوءات $Lugs$ والأخاديد على سطح قضبان التسليح، لذلك تُعدُّ خشونة سطح القضبان الفولاذية من أهم العوامل الأساسية لتأمين التلاصق. تدخل المونة الإسمنتية في النتوءات والأخاديد على سطح الفلواز والتي تتولد بسبب التصنيع، ففي القضبان الملساء تصل هذه النتوءات إلى $40-120 \mu$ ميكرون، أما القضبان المحزنة ذات النتوءات فإنها تتميز بتأمين التعشيق المثالي بين الخرسانة والفلواز حيث تصل

الننوءات إلى درجة من 1 دوزيم إلى واحد ميلي متر. ويحدث في القضبان الفولاذية أثناء تمليص قضبان التسليح عملية قص كاملة على سطح التماس بين سطح قضبان الفولاذ أو سطح الننوءات والخرسانة (انهيار التماسك على القص بسبب إجهادات القص الطولية). ويبقى جزء من الخرسانة بعد فصل قضيب التسليح على سطح قضيب التسليح. يذكر هنا أن مشاركة ظاهرة التعشيق في قوة التماسك الكلية تصل بين الخرسانة والفولاذ إلى 70%. وأيضاً تعتمد ظاهرة التعشيق على نوعية الإسمنت ونعومة الرمل، فكلما ازدادت كمية الإسمنت ونعومة الرمل ازدادت ظاهرة التعشيق، وأيضاً كلما ازدادت الثقوب في حديد التسليح أو خشونة حديد التسليح ازدادت ظاهرة التعشيق.

يلاحظ، عند إزالة الخرسانة عن قضبان التسليح المستخدمة في المنشآت التي تم هدمها أو إزالتها، أن ظاهرة التعشيق عندما يتم تحرير الخرسانة بشكل كامل عن هذه القضبان، ومهما تم غسلها في الماء، يبقى لون سطحها المكشوف مانلاً للبياض، الأمر الذي يعطي انطباعاً أن المونة الإسمنتية لا تخرج من الثقوب الموجودة بحديد التسليح مهما بذلنا من جهد لذلك. أي إنه لا ينصح باستخدام قضبان التسليح المستعملة سابقاً في المنشآت الجديدة، لأن التماسك يضعف بحدود 70% بسبب فقدانه ظاهرة التعشيق.

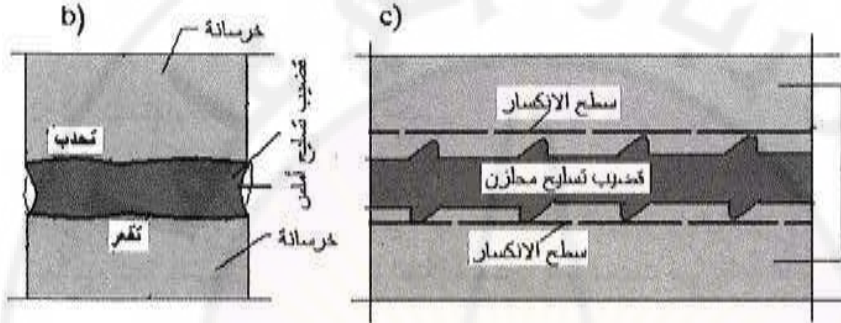
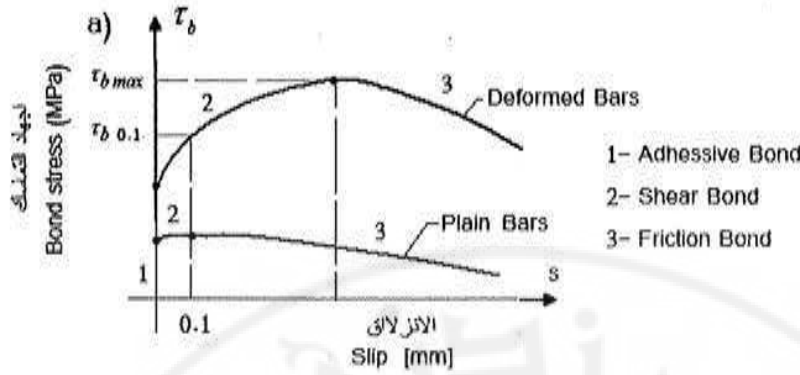
ج - ظاهرة الاحتكاك *Friction* (تماسك الاحتكاك *Friction Bond*):

تقوم ظاهرة الاحتكاك بين الفولاذ والخرسانة بتأمين جزء من التماسك بين هاتين المادتين. تصل قيمة هذه المشاركة في قوة التماسك الكلية بحدود (15-20%). لقد بينت التجربة أن قوة التماسك نتيجة الاحتكاك تزداد فجأة لحظة بدء انزلاق قضيب التسليح من الخرسانة، وذلك بسبب تغير حجم الخرسانة لتقلصها و ظهور انتفاخ قضبان التسليح المغمورة في كتلة الخرسانة. يمكن تقدير مستوى التماسك بين قضيب التسليح والخرسانة المحيطة به من خلال العلاقة بين إجهاد التماسك السطحي الناتج ومقدار الانزلاق *Slip* الحاصل لقضيب التسليح، وهذا ما هو موضح بشكل عام على الشكل (4-3-4- α).



الشكل (2-4) أداء ظواهر التماسك الثلاثة

- a* - سحب قضيب التسليح من الخرسانة، *b* - ضغط قضيب التسليح على الخرسانة (تماسك القص)،
c - سحب قضيب التسليح بتأثير حملات مقطعة 1- 2- 3 - تأثير ظاهرة التغيرية وطريقة تحديد إجهاد
التغيرية، *e* - ضغط الخرسانة على قضيب حديد التسليح الناتج عن تقلص الخرسانة، *f* - التصاق المونة
الإسمنتية مع حديد التسليح الأملس، *g* - تناوب على سطح حديد التسليح الإجهادات المماسية والعرضية،
h - تناوب الإجهادات المماسية والعرضية على المقطع العرضي لحديد التسليح في الشبكة الملحومة.
4 - قضيب التسليح، 5 - نقطة انقطاع الخرسانة عن حديد التسليح.



الشكل (3-4) التماسك بين قضبان التسليح الملساء وذات النتوءات

1-2-4- استخدام القضبان الملساء:

يكون سطح القضبان الملساء ناعماً نسبياً، إذ لا تتعدى التشوهات السطحية بضعة تحدبات وتقعرات سطحية، وحتى تكهفات طفيفة لا ترى بالعين المجردة عادة، الشكل (3-3-3-ب). لأن طبيعة مثل هذه التشوهات لا تتغير تغيراً كبيراً مع تغير أقطار قضبان التسليح، تبقى فاعلية تماسك القضبان الملساء مع الخرسانة متناسبة مع المحيط *Perimeter*، وتتحقق القدرة على التماسك هنا بفضل:

- التلاصق ما بين الملاط الإسمنتي و سطح القضبان (ظاهرة التفرية *Cohesion*).

- الاحتكاك الحاصل بين سطح القضبان والخرسانة المحيطة.

- التداخل الناشئ ما بين الخرسانة و سطح القضبان نتيجة لوجود التحدبات *Convexities* والتقعرات *Concavities* وغيرها من التشوهات السطحية نتيجة عدم انتظام السطح (ظاهرة التعشيش أو تماسك القص)، الشكل (3-4-ب).

ليس لقوى الضغط الناجمة عن ظاهرة الانكماش في الخرسانة أثر كبير في تأمين عملية التماسك، مقارنة مع الاحتكاك والتداخل (التعشيش)، ولذلك تنهار قوى التلاصق أولاً مع تزايد الأحمال المطبقة، تليها قوى التداخل الميكانيكي نتيجة التعشيش بسبب تجاوز قدرة تحمل الخرسانة على القص، ويصل الانهيار إلى نهايته عندما تتغلب الإجهادات الناتجة على قوى الاحتكاك المتبقية، ويظهر ذلك بخروج القضبان كلياً أو جزئياً من الخرسانة، مع انزلاق كبير، أي إن الانهيار هنا يكون انهيار انزلاق *Slippage Failure*، وينتهي بخروج القضبان من الخرسانة *Pullout Mode of Failure* من خلال قناة دائرية المقطع، ويحدث ذلك تقريباً في القضبان ذات النتوءات السطحية الخفيفة.

4-2-2-2- استخدام القضبان ذات النتوءات:

تمتلك قضبان التسليح ذات النتوءات السطحية قدرة أكبر على التماسك مقارنة مع القضبان المستديرة الملساء بفضل التراكب والتداخل الذي يحصل بين النتوءات والخرسانة.

تختلف آلية حصول التماسك هنا اختلافاً جذرياً عما يحدث في حالة القضبان ملساء السطح، إذ تتأمن القدرة على التماسك بفضل العوامل الأساسية التالية، الشكل (4-3-4):

- الضغط الحاصل من الخرسانة على النتوءات السطحية *Surface Lugs* في قضبان التسليح، إذ يشكل ذلك نحو 70% من قدرة التماسك الكلية.
- الاحتكاك الحاصل بين سطح التسليح والخرسانة، ويؤمن ذلك نحو 20% من التماسك الكلي.

- قوى التلاصق الكيماوي بين سطح التسليح والملاط الإسمنتي في الخرسانة المحيطة، وهذا يشكل نحو 10% من التماسك الكلي.

يخضع سطح التسليح، قبل بدء التحميل الخارجي، لتأثير إجهادات ضاغطة ناجمة عن ظاهرة الانكماش في الخرسانة *Concrete Shrinkage*، الأمر الذي يزيد من فاعلية الحصر الحاصل للخرسانة المحيطة. ومع بدء التحميل الخارجي، تبدأ عملية التماسك بالانهيار التدريجي، إذ يبدأ ذلك بفقدان التلاصق، ثم قوى الاحتكاك، وأخيراً قوى التداخل الميكانيكي ما بين النتوءات السطحية والخرسانة، حيث تظهر تشققات داخلية في الخرسانة بجوار النتوءات، وتصبح طبقة الخرسانة المحيطة على شكل مشط *Comb-Like Concrete*. ومع انكسار أسنان المشط الخرساني المتشكل بسبب الفلق أو الكسر، تصبح قضبان التسليح ومعها الخرسانة

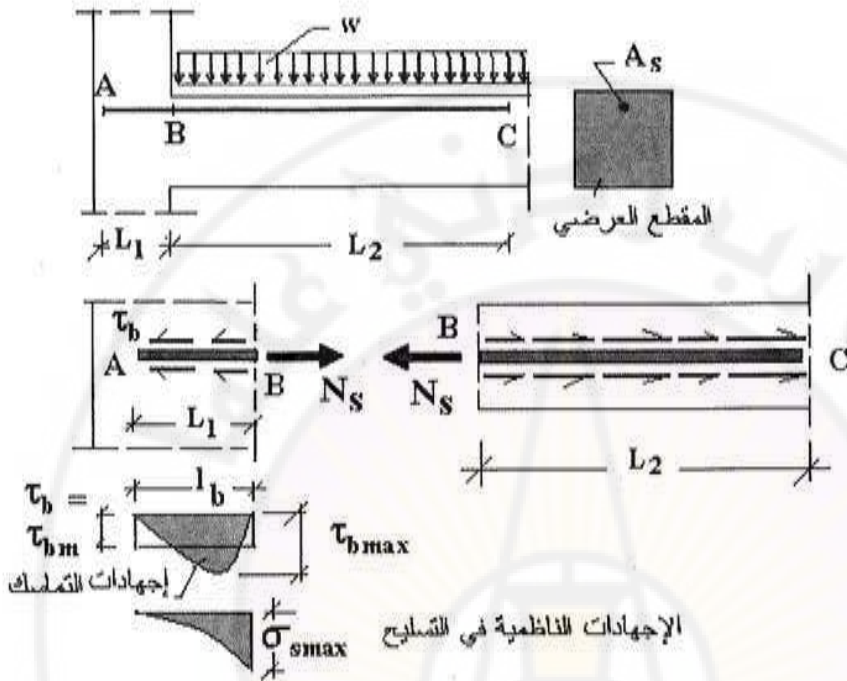
الموجودة ما بين النتوءات غير مرتبطة بالكتلة الخرسانية الأم، الأمر الذي يؤدي إلى إمكانية انفلات القضبان من مساندها، أو انزلاقها وغير ذلك، أي إن انهيار التماسك يكون نتيجة الإجهادات الفالقة بشكل أساسي *Splitting Mode of Failure*.

4-2-3- إجهاد التماسك وطول الإرساء:

بشكل عام، يمكن أن تكون القوة الطولية المطبقة في قضيب التسليح شادة، أو ضاغطة بسبب قوى مطبقة مباشرة (محورية أو لا محورية)، أو نتيجة تأثير عزوم الانحناء وغير ذلك. وتنشأ نتيجة للقوى المطبقة في قضيب التسليح (ألمس السطح) إجهادات مماسية بين سطح القضيب والخرسانة المحيط به تعمل على تحطيم إجهادات التماسك بين سطح القضيب والخرسانة τ_b ، ويكون توزيع إجهادات التماسك هذه توزعاً غير منتظم، إذ تظهر القيمة العظمى τ_{bmax} قرب بداية الانغماس، ثم تأخذ بالتناقص باتجاه نهاية الانغماس، وعادة تؤخذ الإجهادات موزعة بانتظام على طول مسافة الإرساء l_b بقيمة وسطية $\tau_b = \tau_{bm}$ ، وهذا موضح على الشكل (4-4-1) الذي يبين أيضاً عنصراً ظاهرياً من الخرسانة المسلح خاضعاً لحمولة موزعة بانتظام، والتسليح فيه عبارة عن قضيب واحد يخضع لقوة شد ما N_s تسبب وصول الإجهادات الشادة فيه إلى قيمة إجهاد الخضوع على الشد f_y (أو القيمة المسموح بها) في النقطة B (وجه المسند الداخلي، حيث قيمة عزم الانحناء أعظمية).

يبقى هذا الافتراض صحيحاً عندما يكون القضيب مثبتاً تثبيتاً جيداً من الجهتين، أي في الجزأين AB و BC، وبحيث لا ينسحب من أي منهما (عندما لا يكون التثبيت كافياً، أو أن يكون طول انغماس القضيب في الخرسانة صغير نسبياً، يمكن للقضيب عندئذ أن ينزلق إلى الخارج قبل الوصول إلى f_y). إن انفلات قضيب التسليح وانفصاله عن الخرسانة يمثل انهياراً للتماسك الموجود بينهما بسبب تجاوز الإجهادات المماسية الناتجة لقيمة إجهادات التماسك τ_b الحديدية (أو القيمة المسموح بها)، وكذلك مقاومة الضغط الموضعي والإجهادات الفالقة القادمة من النتوءات إن وجدت، ولذلك لا يمكن افتراض الوصول إلى حد الخضوع (أو القيمة المسموح بها) دون ضمان عدم انهيار التماسك بين الخرسانة والقضيب المغموس فيها، أو تأمين التثبيت اللازم في الطرف الثاني، أي دون وجود مسافة الإرساء اللازمة (l_b)

Length Development، والتي تعرف عادة بأنها المسافة من نهاية القضيب وحتى المقطع الذي يتم فيه ضمان قدرة التحمل القصوى للقضيب، أي الوصول على السيلان.



الشكل (4-4) تحديد طول الإرساء في القضبان المشدودة الملساء أو قليلة التماسك

• حالة القضبان الملساء أو قليلة التماسك:

يحدث انهيار التماسك هنا بانزلاق القضيب. وبفرض أن إجهاد التماسك ضد الانزلاق τ_b ، يلاحظ أن (من أجل الجزء المغموس من قضيب التسليح AB):

$$N_s = \tau_b u_s l_b \Rightarrow l_b = \frac{\phi f_y}{4 \tau_b} ; \quad (4-1)$$

حيث: u_s - محيط قضيب التسليح ذي القطر ϕ

l_b - طول الإرساء اللازم للقضيب

f_y - إجهاد الخضوع

ومن الواضح أن طول الإرساء هنا تابع خطي لمحيط القضيب، أي لقطره. وبالطريقة نفسها تعالج حالة الجزء BC.

• حالة القضبان ذات النتوءات (عالية التماسك):

يحدث انهيار التماسك هنا (بشكل أساسي) نتيجة قلق الخرسانة بسبب إجهادات الضغط الموضوعي القادم من النتوءات السطحية والذي ينتج عنه تأثير إجهادات شادة أفقية مسببة للقص الطولي في الخرسانة σ_{csh} وإجهادات شاقولية فالقة، إضافة لزيادة الإجهادات المماسية السطحية إلى القيمة الحدية أو المسموح بها، أي إن:

$$N_s = A_s f_y = \tau_b u_s l_b + A_{sav} \sigma_{csh} l_b \Rightarrow$$

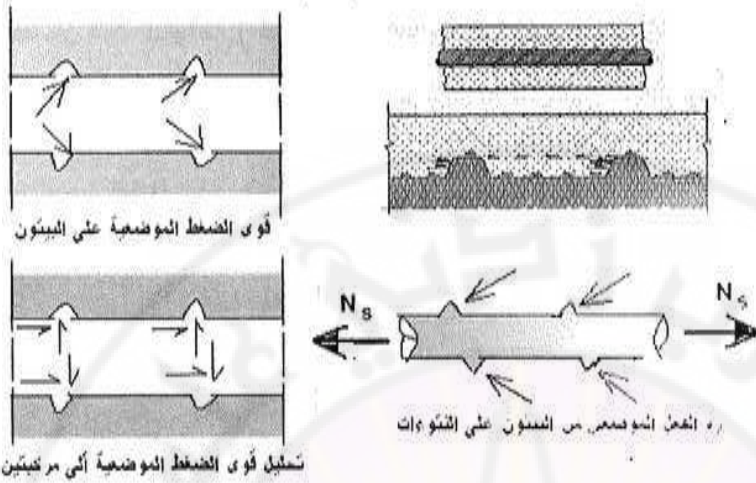
$$\Rightarrow l_b = \frac{f_y}{\tau_b \pi \phi + A_{sav} \sigma_{csh}} \times \frac{\pi \phi^2}{4}; \quad (4-2)$$

حيث A_{sav} - مساحة التحميل المكافئة من النتوءات على الخرسانة في واحدة الطول (1m). أي إن طول التماسك هنا تابع عكسي لهذه المساحة، وتابع طردي لمربع قطر القضيب المكافئ ϕ .

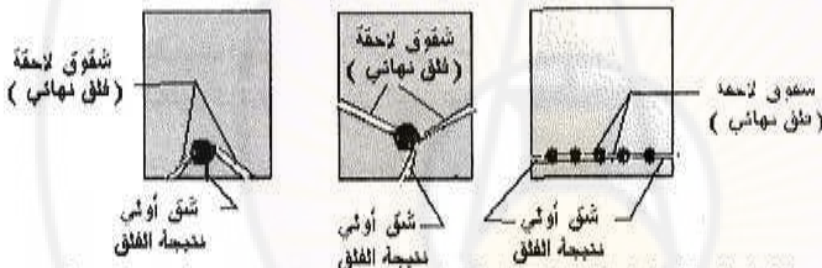
ملاحظة: يمكن بشكل عام تحديد القطر المكافئ للقضيب ذي النتوءات المستمرة (المحلزة مثلاً) ليكون مساوياً لقطر النظري للدائرة التي تعطي الوزن نفسه للمتر الطولي من القضيب، ويمكن استخدام العلاقة: $\phi = 12.74 \sqrt{\frac{G}{L}}$ ، حيث: ϕ - القطر مقدراً بال [mm] و L - طول ما من القضيب مقدراً بال [mm] و G - وزن هذا الطول مقدراً بال [gr]. ويجب ألا يزيد التفاوت في الوزن على 5% في كل الأحوال.

يوضح الشكل (4-4-ب) تأثير وجود النتوءات السطحية، إذ تؤثر النتوءات عبر مساحة التلامس مع الخرسانة بإجهادات ضغط موضعية على الخرسانة (مائلة بزواوية 45 درجة للحساب) يمكن تحليلها إلى مركبتين: أفقية σ_{csh} (قص طولي) وشاقولية σ_{csh} (إجهادات فالقة). ينشأ عن ذلك تشققات في الخرسانة المحيطة بقضبان التسليح موازية لهذه القضبان، الشكل (4-4-5)، وهي تحدث أولاً بين سطح القضيب وأقرب طرف من العنصر على التوالي، وفي حالة وجود عدة قضبان متجاورة، يتم ذلك أولاً بين سطح القضبان وأقرب طرف من العنصر على التوالي، ثم على المسافات بين القضبان المتجاورة بدءاً من الأقصر، ومن الواضح تأثير سماكة التغطية الخرسانية للقضبان. تؤكد الاختبارات التجريبية أن التماسك بين الخرسانة والتسليح في حالة

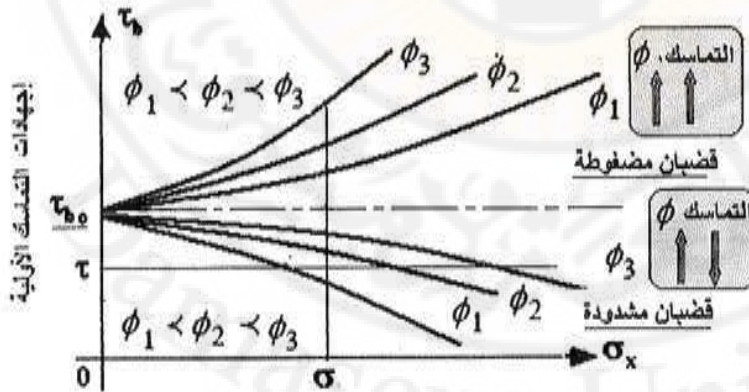
القضبان المضغوطة يزداد مع ازدياد الأقطار المستخدمة بينما يتناقص في حالة القضبان المشدودة مع ازدياد هذه الأقطار، الشكل (4-6).



الشكل (4-4 ب) إجهادات التماسك بين الخرسانة وقضبان التسليح عالية التماسك المغموسة فيه



الشكل (4-5) تشكل التشققات حول قضبان التسليح ذات التوتوات نتيجة القوى الفالقة



الشكل (4-6) تأثير أقطار القضبان المستخدمة على فعالية التماسك مع الخرسانة

4-2-4- التماسك الموضعي في حالة الانحناء:

في مناطق تغير عزوم الانحناء تنشأ إجهادات قص تؤثر كثيراً في عملية التماسك الموضعي بين قضبان التسليح والخرسانة المحيط بها.

بدراسة الشكل (7-4)، ولا سيما الجزء $a b$ من الظفر المدروس الخاضع لحمولة موزعة بانتظام، ينضح أن:

$$dN_s = \frac{dM}{z} ; \quad (4-3)$$

حيث: $dN_s = \pi \phi \tau_b dx + A_{sav} \sigma_{csh} dx$ - القوة الناتجة عن إجهادات التماسك الكلية بنوعيتها، z - ذراع المزدوجة الداخلية.

$$(\pi \phi \tau_b + A_{sav} \sigma_{csh}) dx = \frac{dM}{z} \Leftrightarrow$$

$$\pi \phi \tau_b + A_{sav} \sigma_{csh} = \frac{dM}{z dx} = \frac{V}{z} ; \quad (4-4)$$

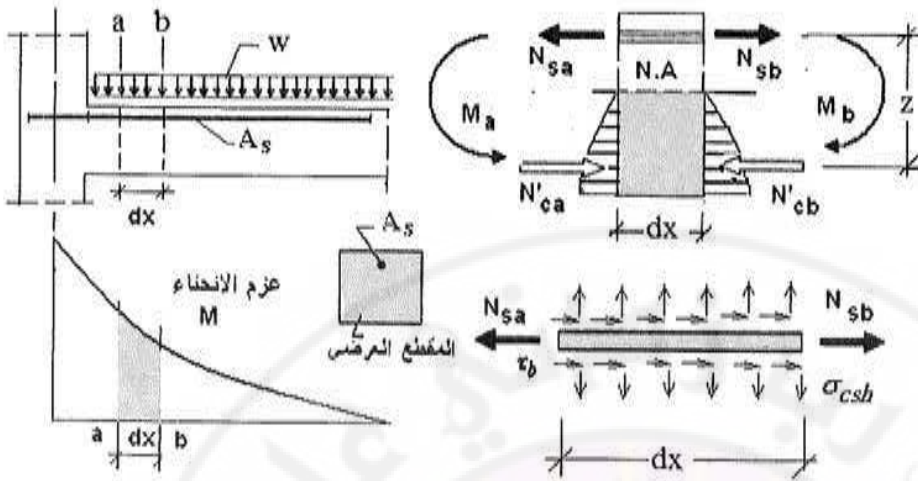
حيث:

V - قوى القص على المسافة ab بطول dx . وهذا يعني أن القدرة على التماسك في هذه الحالة تتعلق بقوة القص الناتجة، ومع ذلك لا يؤخذ ذلك بالحسبان كأساس للتصميم على التماسك لأسباب متعددة، ويبقى تحديد طول الإرساء هو العامل الأساسي. ومن الأسباب التي تضيق هامش الأمان ما يلي، الشكل (8-4):

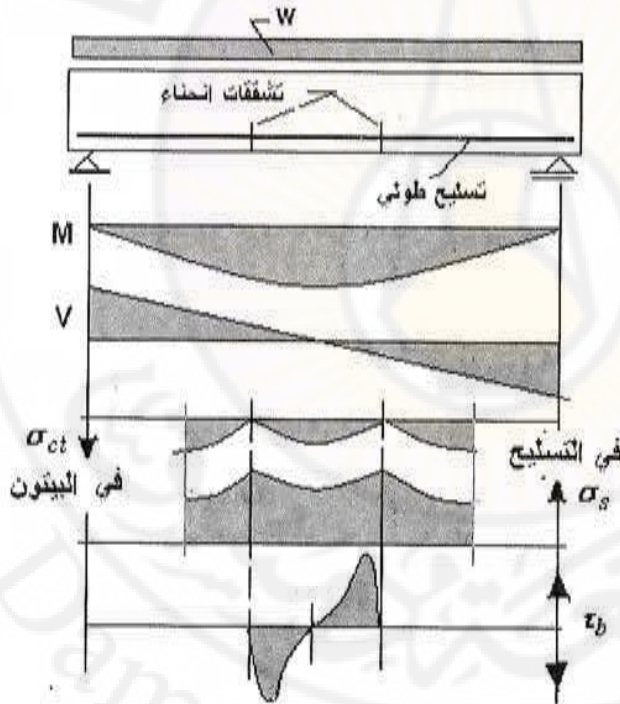
(أ) في مناطق تأثير عزوم الانحناء المنخفضة، تكون قوى القص كبيرة. هنا تكون الخرسانة غير متشققة ويقاوم جزءاً من الإجهادات الشادة، الأمر الذي يعني إجهادات مماسية أقل على سطح التسليح، وهذا بمعنى آخر يرفع القدرة على التماسك، وكان الإجهادات الشادة في التسليح قد تم زيادتها بشكل خاطئ: *Overestimated*.

(ب) في مناطق تأثير عزوم الانحناء الكبيرة، تكون قوى القص صغيرة. هنا تكون الخرسانة متشققة، أي إن الإجهادات الشادة تساوي الصفر في الشق، وذات قيم منخفضة بجوار الشق. وهذا يعني ارتفاع الإجهادات الشادة في التسليح بجوار الشق، وكأنه تم تخفيض قيمه بشكل خاطئ: *Underestimated*.

(ج) في مكان توقيف القضبان أو انحنائها، يحدث تغير مفاجئ في القوى الشادة في نفس التسليح، أي ازدياد الإجهادات السطحية بشكل كبير.



الشكل (7-4) التماسك الموضعي في حالة الانحناء



الشكل (8-4) عزوم الانحناء، قوى القص، الاجهادات الشادة في الخرسانة والتسليح و اجهادات التماسك المرافقة

4-3- حساب أطوال التثبيت الأساسية:

- طول التثبيت الأساسي في حالة القضبان المستقيمة المشدودة:
- أ- القضبان ذات النتوءات (عالية التماسك):

$$\min l_b = \frac{0.016\phi^2 f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.075\phi f_y ; \quad (4-5)$$

أو 300mm ، أيهما أكبر، على ألا يزيد قطر القضيب المستعمل على 35mm . وعملياً يمكن أخذ القيم التالية:

- 30ϕ عندما $\phi \leq 20\text{mm}$.
- 40ϕ عندما $20\text{mm} < \phi \leq 28\text{mm}$.
- 50ϕ عندما $28\text{mm} < \phi \leq 32\text{mm}$.

ب- القضبان الملساء:

$$\min l_b = \frac{0.79\phi f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.15\phi f_y ; \quad (4-6)$$

أو 300mm ، أيهما أكبر، على ألا يزيد القطر المستخدم على 25mm (عملياً 50ϕ لكل الأقطار المستخدمة)، على أن ينتهي القضيب بعكفة نظامية.

- طول التثبيت الأساسي في حالة القضبان المستقيمة المضغوطة:
- أ- القضبان ذات النتوءات (عالية التماسك):

$$\min l'_b = \frac{0.253\phi f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.05\phi f_y ; \quad (4-7)$$

ب-القضبان الملساء:

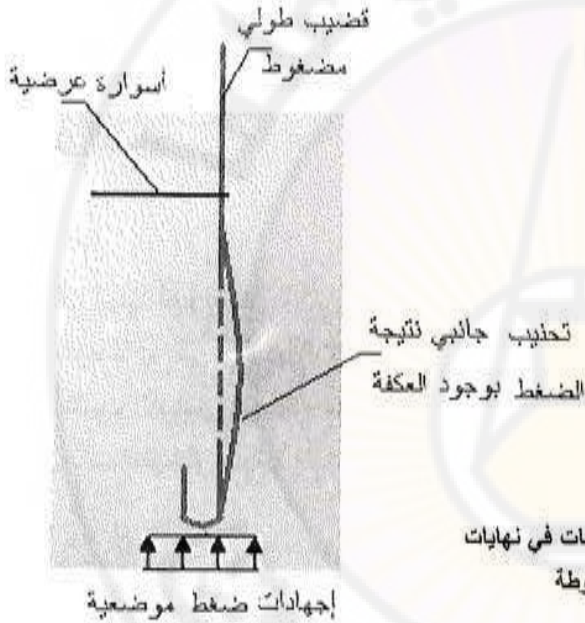
$$\min l_b = \frac{2l_b}{3} ; \quad (4-8)$$

حيث l_b - طول الإرساء في حالة القضبان الملساء المشدودة الناتج من تعديل الطول الأصغري (الأساسي) وفق الجدول (1-4).

ملاحظة: في حالة الزلازل يجري حساب أطوال التماسك باحتمال وجود شد في القضبان، وعلى أي حال. لا بد من أخذ الاشتراطات المتعلقة بالحساب الزلزالي، وقد تم ذكر ذلك في تفصيلات العقد الإنشائية عند اتصال عمودين. ويمكن العودة للكود العربي السوري للإطلاع على التفاصيل.

الجدول (1-4) معاملات لتعديل طول الإرساء الأساسي.

قيمة المعامل	نوع قضيب التسليح وموقعه
1.4	قضيب علوي (يزيد سمك الخرسانة تحته على 300mm
1.2	كل قضيب من رزمة مؤلفة من قضيبين
1.4	كل قضيب من رزمة مؤلفة من ثلاثة قضبان
$\frac{1.1 A_{sth}}{A_{spr}}$	قضبان تزيد مساحة مقطعها الفعلي A_{spr} على المساحة النظرية المطلوبة لعزم الانحناء A_{sth}
1.0	كل قضيب خلاف ذلك



الشكل (9-4) تأثير وجود العكفات في نهايات القضبان المضغوطة

يجدر بالذكر هنا ضرورة عدم استخدام العكفات في نهاية القضبان الملساء المضغوطة تجنباً لتحنيبها، وحصول إجهادات موضعية أمام العكفات، إضافة لكونها تعيق انتشار الخرسانة وتوزيع التسليح في الأعمدة، الشكل (9-4).

• حالة القضبان المحزمة (رزم القضبان) *Bundled Bars*:

عند ضرورة تجميع القضبان في رزم (حزم) في مناطق الإجهادات العالية، يساري طول التثبيت لقضيب ما موجود في رزمة من القضبان العاملة على الشد طول التثبيت الموافق

للقضيب المدروس فيما لو كان منفرداً، على أن يتم تكبير هذا الطول بمقدار 20% من أجل رزمة بثلاثة قضبان، و 33% من أجل رزمة فيها أربعة قضبان.

مثال توضيحي Illustrative Example:

يبين الشكل (4-10) ظفراً طوله عن وجه العمود الداخلي المرتبط به ميلياً $1.5m$. يخضع الظفر لتأثير حمولة مينة قدرها $14kN/m$ وحمولة حية قدرها $28kN/m$ ، والمطلوب تحديد التسليح المقاوم لعزوم الانحناء الناتجة، وأطوال التثبيت اللازمة، علماً أن $f'_c = 28MPa$; $f_y = 240MPa$.

الحل: بإتباع طريقة حد المقومة القصوى يتبين أن:
- الحمولة الحسابية المطبقة:

$$w_u = 1.5 \times 14 + 1.8 \times 28 = 71.4kN/m$$

- عزم الانحناء الحسابي الأكبر (عند وجه العمود):

$$M_u = \frac{71.4 \times (1.5)^2}{2} = 80.325kNm = 80.325 \times 10^{-3} MNm$$

- مساحة التسليح النظرية:

$$A_s = \frac{80.325 \times 10^{-3}}{0.9 \times 0.9 \times 0.34 \times 240} = 12.125 \times 10^{-4} m^2 = 12.125cm^2$$

يمكن اختيار $A_s = 3\phi 24 = 13.57cm^2$ (القطر لا يزيد على $25mm$). ولأن الاهتمام هنا منصب على حساب طول التثبيت اللازم لقضبان التسليح، يترك التحقق من عدم ضرورة استخدام التسليح الثاني للطالب.

- حساب طول التثبيت الأساسي: من أجل القضبان الملساء مثلاً، يجب أن يكون:

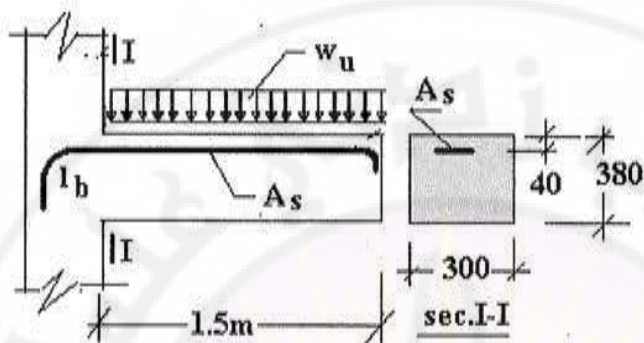
$$\min l_b = \frac{0.79\phi f_y}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.15\phi f_y$$

$$\min l_b = \frac{0.79 \times 24 \times 240}{\sqrt{28}} = 560.2mm \leq$$

$$\leq 0.15 \times 24 \times 240 = 864mm$$

أي إن:

وهذا يعني أن $min l_b = 864mm$ ، ويتعدى الطول الأدنى الناتج بالمعامل المناسب من الجدول (1-4) وهو $1.4 \times 1.1 \times \frac{12.152}{13.57}$ ، لأن القضبان هنا علوية، ويزيد مقطعها الفعلي على متطلبات عزم الانحناء، يكون طول التثبيت مساوياً $119.15cm$ ، وعملياً يساوي هذا الطول $50\phi = 50 \times 2.4 = 120cm$ ، وتعد هذه المسافة مقبولة.



الشكل (10-4) الظفر المدروس في المثال التوضيحي

4-4- تأمين أطوال تثبيت قضبان التسليح:

عندما يكون ممكناً تأمين طول التثبيت بالامتداد المستقيم للقضيب فهذا أمر جيد، ولكن عندما يتعذر ذلك يجب البحث عن طرائق تعويضية تؤمن الطول الضروري للإرساء، ومن أهم هذه الطرائق استخدام العكفات *Hooks* في نهاية القضبان الملساء، إذ تعمل العكفات على زيادة طول التثبيت من خلال استناده بالضغط على الخرسانة في مجال العكفة، ويقتصر استخدام العكفات على القضبان المشدودة وأساور التسليح العرضي،، ويقل استخدامها في القضبان ذات النتوءات عالية المقاومة، ولا تستخدم أبداً في القضبان المضغوطة. يبين الشكل (11-4) أشكال العكفات النظامية المستخدمة بزوايا انحناء $90^\circ; 135^\circ; 180^\circ$ من جهة المولد الخارجي، ونصف قطر انحناء r مقاساً من المولد الداخلي لقضيب التسليح (الوجه الداخلي) بما لا يزيد على 6ϕ ، ϕ - قطر القضيب المستخدم، وذلك وفقاً للجدول (4-2). تعدّ العكفة القائمة (90°) ضعيفة جداً في مقاومتها للإجهادات الشادة بسبب تعرضها للانزلاق والحركة إلى الخارج، ولذلك يتم تثبيتها عند الضرورة بقطع مستقيمة متعامدة معها باتجاه الداخل، وتعدّ العكفة الزاوية (135°) أكثر فاعلية من العكفة القائمة، وتعدّ

العكفة نصف الدائرية ($\alpha = 180^\circ$) الأكثر فاعلية ، وهي تؤمن تماسكاً جيداً مع الخرسانة.

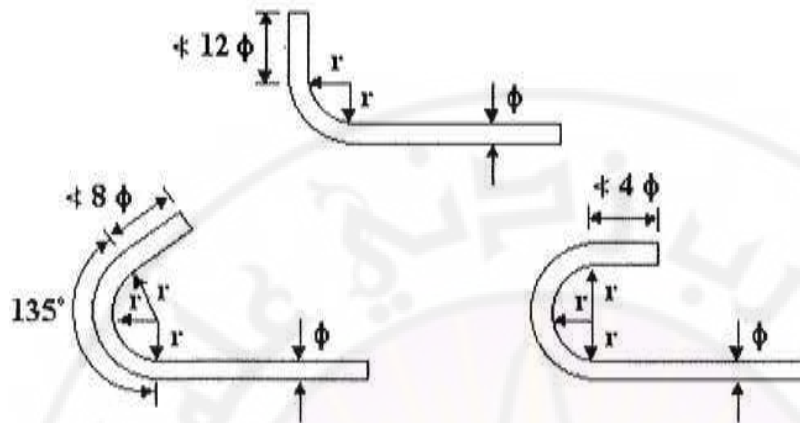
بوخذ طول التثبيت المكافئ للعكفة النظامية λ بانحناء 135° ; 90° مساوياً $4r$ في حالة التسليح العلوي، و $6r$ في الحالات الأخرى، على ألا يزيد هذا الطول في جميع الأحوال على 24 مرة قطر القضيب. ويحدد الطول المكافئ للعكفة λ ابتداءً من بداية الانحناء، وبحيث يجب تأمين الطول $\lambda - l_b$ بعد النقطة x (بداية الانحناء) باتجاه الامتداد المستقيم للقضيب، لضمان الإرساء الكامل، وبكلام آخر يجب أن تكون المسافة بين نهاية القضيب النظرية وبداية الانحناء مساوية $\lambda - l_b$. ولا يمكن زيادة طول الإرساء المكافئ للعكفة بزيادة طول جزئها المستقيم بعد بداية الانحناء. وبالنسبة للعكفة النظامية $\alpha = 180^\circ$ ، فهي تستخدم إلزامياً في نهاية كل قضيب مشدود من الفولاذ الطري الأملس، ويقاس طول التثبيت المكافئ لهذه العكفة ابتداءً من نهاية القضيب المعكوفة، إلا عند المسند الطرفي، فتقاس كما في الشكل (4-12). بالنسبة لتثبيت الأساور العرضية العادية فيتم عن طريق عكفات مهما كان نوع التسليح المستخدم، ويجب ألا يقل نصف قطر الانحناء في الأساور عن القيم المحددة في الجدول (4-2)، ويكون التماسك محققاً في حالة الأساور التي تحتضن التسليح السفلي، وتكون معكوفة (أساور مفتوحة) أو ملتفة حول التسليح العلوي (أساور مغلقة)، وفي حالة الفتل تكون مطوقة بالتراكب للمقطع العرضي، الشكل (4-13).

عندما لا تكفي العكفات لتأمين طول التثبيت اللازم لقضبان التسليح، أو بسبب عدم وجود مجال كاف للإرساء، يمكن اللجوء إلى إحدى الطرائق الإضافية التالية:

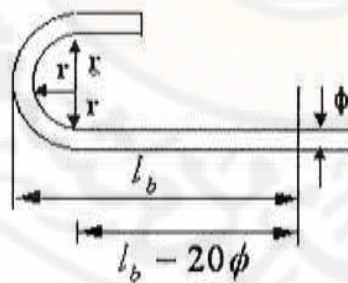
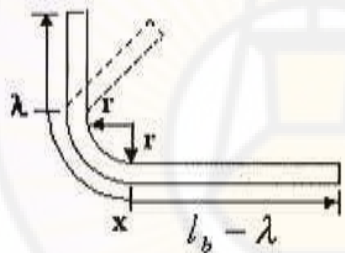
- استخدام التثبيت المشدودة (يكون فرعها المستقيمان مشدودين) التي يزيد نصف قطر انحنائها على 5 مرات قطر القضيب في حال التسليح الأملس، و 8 مرات في حال التسليح ذي النتوءات، وبعد الجزء المثني من السبخ، والجزء المستقيم الذي يليه بمثابة استمرار طبيعي له عند حساب طول التثبيت المكافئ.

- استخدام وسائل ميكانيكية للتثبيت تعتمد على ربط قضيب المراد تثبيته بوسيط عرضي يصنع زاوية قائمة مع اتجاه الشد، ويؤمن الاستناد الكافي بوساطة الضغط على الخرسانة المجاورة لهذا العنصر الوسيط، الشكل (4-14). أو تثبيت نهايات القضبان في المساند عن طريق اللحام إلى صفائح الحديد المناسبة وغير ذلك.

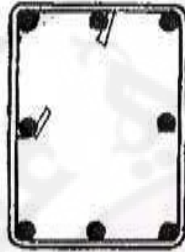
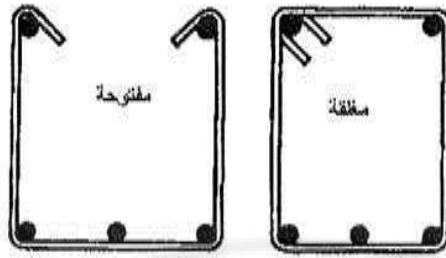
في كلتا الحالتين أعلاه يجب التحقق من كون إجهادات الضغط الموضوعية المتولدة في الخرسانة، لا تزيد على القيم المسموحة في حالة الضغط الموضوعي.



الشكل (4-11) أشكال العكفات النظامية

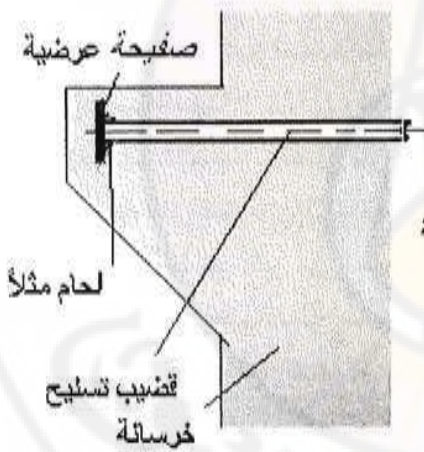


الشكل (4-12) أطوال التثبيت المكافئة للعكفات النظامية



مطوّقة للمقطع وحاصلة للتسليح الطولي
بالتراكم عند الفتل

الشكل (4-13) أنواع الأساور العرضية



الشكل (4-14) تثبيت القضبان الطولية بصفحة عرضية

الجدول (4-2) نصف قطر انحناء العكفات النظامية

مكان العكفة	تسليح طري أملس	تسليح ذو نتوءات عالي المقاومة
نهاية أسورة	2φ	2.5φ
نهاية قضيب مشدود	2.5φ	φ(3 → 5)

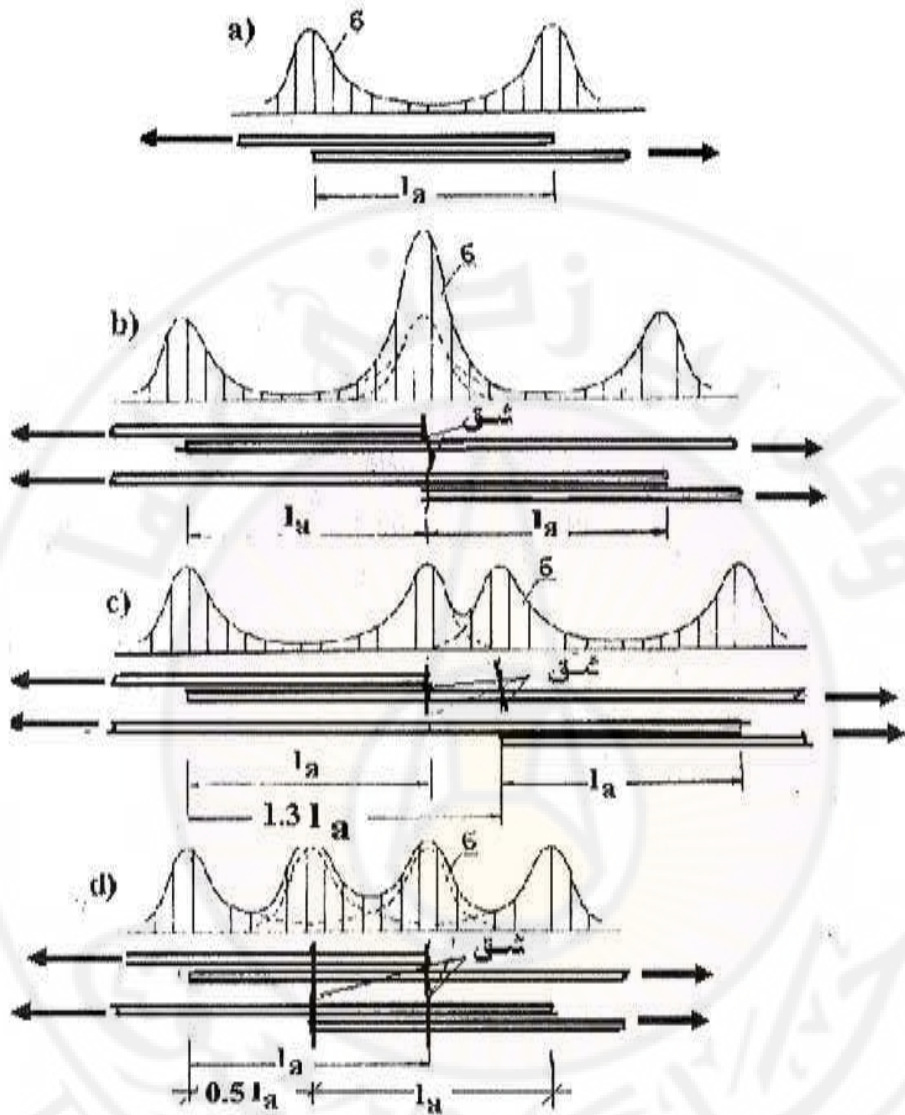
4-5- وصل قضبان التسليح:

مع أنه من المفضل السعي دائماً إلى استخدام قضبان مستمرة دون وصل على كامل طول البحر *Span* (طول قضيب التسليح عادة نحو 12m)، إلا أنه يمكن استخدام قضبان موصولة بطرائق تنفيذية مناسبة عند الضرورة، إذا كان من المتعذر أحياناً استخدام قضبان مستمرة على عدة بحور، وفي كل الأحوال يجب تحقيق وصل القضبان بعيداً عن المقاطع الحرجة على العزم والقصر، ويجري وصل القضبان بعدة طرائق أهمها:

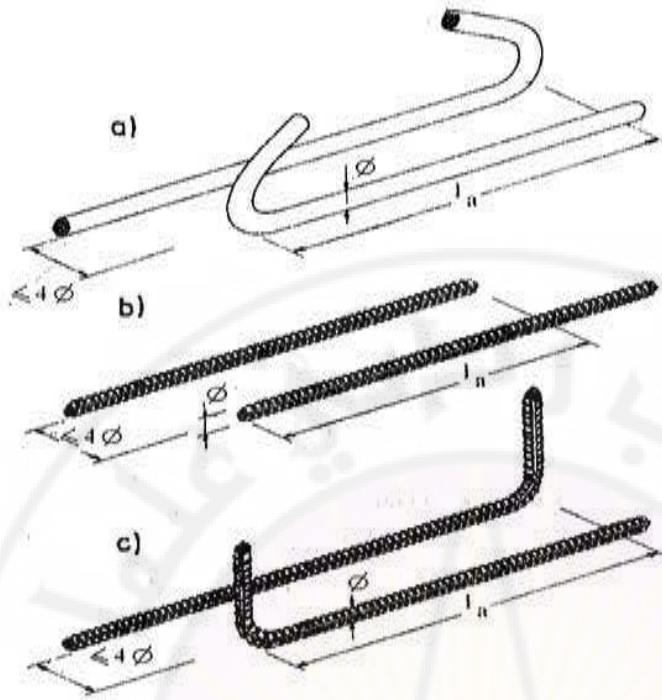
أ - الوصل بالترابك *Lap Joints*:

من المعلوم أن القوى الشادة المطبقة في قضيب التسليح تسبب تشكل إجهادات مماسية *Tangent Stresses* على سطح القضيب تنتقل إلى الخرسانة الملاصقة على شكل إجهادات ناظرية *Normal Stresses* (σ) باتجاه محور القضيب الطولي، ومن أجل تراكم واحد لقضبان التسليح، تكون الإجهادات الناظرية في الخرسانة الموجودة في منطقة التراكب (على طول منطقة الإرساء) كما في الشكل (4-15-a). وبفرض وجود تراكبين يشتركان في نهايتهما، يصبح توزيع الإجهادات الناظرية كما هو موضح في الشكل (4-15-b)، حيث تتراكم الإجهادات الناظرية في النهاية المشتركة للتراكبين، ولذلك يمكن أن ينشأ شق بسبب ذلك. ولذلك لا بد من ترك مسافة معينة ($1.3l_a$ ، حيث: l_a - طول التراكب) بين نهائي التراكبين كي لا تتركز الإجهادات الناظرية، ويصبح توزيع الإجهادات كما في الشكل (4-15-c). يمكن أن يكون التراكبان متداخلين بحدود $0.5l_a$ ، وبذلك تنشأ الحالة المبينة في الشكل (4-14-d)، مع أن الإجهادات الناظرية هنا أكبر من السابق، الأمر الذي يوفر فرصة أكبر لتشكل التشققات، يمكن أن يعوض بزيادة مقطع التسليح الموجود فعلاً. إضافة لذلك لا بد من مراعاة المسافة بين التراكبات باتجاه عرض المقطع، الشكل (4-16).

يتم تنفيذ وصلات الركوب بالنسبة للقضبان التي لا يزيد قطرها على 32mm، ولا يقل طول التراكب عن القيم المبينة في الجدول (4-3)، ويجب ألا يزيد عدد القضبان الموصولة في المكان الواحد على نصف عدد القضبان في المقطع، إذا كان معرضاً لعزوم انحناء مترافق أو غير مترافق مع قوة ضغط محورية، ويجب ألا يزيد على ثلث عدد القضبان في المقطع المعرض لقوى شد محورية مترافقة أو غير مترافقة مع عزوم انحناء، على أنه لا يستحسن، في العناصر المشدودة بقوى شد مطبقة على كامل المقطع العرضي، استخدام وصلات التراكب والاستعاضة عنها بوصلات اللحام *Welding Joints*، أو بالوسائط الميكانيكية المناسبة.



الشكل (4-15) توزيع الإجهادات الشادة الناعمية في منطقة وصل القضبان بالتراكب



الشكل (4-16) وصل القضبان بالتراكب

الجدول (4-3) أطوال تراكب قضبان التسليح

الحد الأدنى لطول التراكب	طول التراكب	نسبة التسليح المستخدم إلى التسليح المطلوب نظرياً	الحالة الإجهادية للقضبان
$35\phi + 100mm$	$1.3l_b$	أقل من 2	شد
$30\phi + 100mm$	$1.0l_b$	أكثر أو تساوي 2	شد
$25\phi + 150mm$	$1.3l_b$	جميع الحالات	ضغط

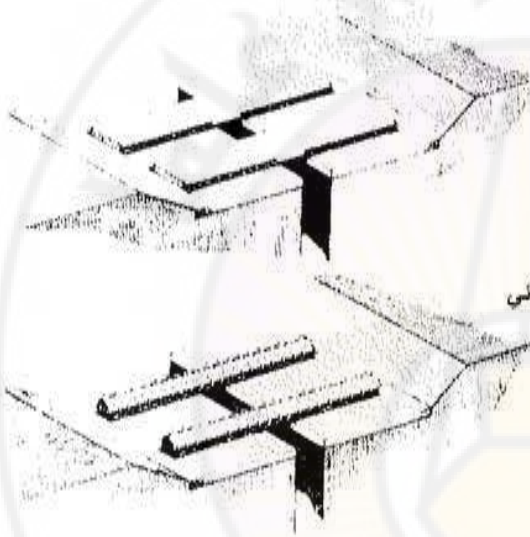
ب. وصلات اللحام الكهربائي *Electrical Joints*:

يسمح باستخدام طريقة الوصل باللحم الكهربائي لقضبان التسليح، إذا كان ذلك لا يسبب إضعافاً لقدرة تحملها، وبشرط ألا يزيد إجهاد الخضوع فيها على $f_y = 500 MPa$. ولذلك لا يسمح بلحام الفولاذ المعالج على البارد *Cold-Twisted Steel*، إلا إذا أخذ مقدار انخفاض المقاومة بالحسبان، و يجب أن تبقى محاور القضبان الملحومة على استقامة واحدة عند تنفيذ اللحام، كما يجب اختبار عينات من القضبان الملحومة لإثبات صلاحية اللحام، وبالنسبة لعدد القضبان

الملحومة في مكان واحد من المقطع، يمكن الاعتماد على ما ورد بالنسبة لوصلات التراكب. يوضح الشكل عدد من أساليب الوصل باستخدام الجبائر الخاصة أو القضبان المماثلة وذلك بطريقة اللحام الكهربائي، الشكل (4-17) .

ج . الوصلات الميكانيكية *Mechanical Joints*:

يتم ذلك عن طريق قلوطة نهايات القضبان وثبيتها بوساطة عزقات وصفائح، وبأبعاد كافية لتأمين انتقال الإجهادات على نحو كامل، أو بوسائط ميكانيكية أخرى مجربة ومصنعة بصورة خاصة لهذا الغرض، ولا يجوز استخدام الوصلات الميكانيكية إلا بعد إجراء تجارب خاصة على عينات تثبت صلاحيتها.



الشكل (4-17) وصل القضبان باللحام الكهربائي

4-6- التحقق من التماسك *Bond Control*:

توجد في كل قضيب تسليح نقاط أساسية تشكل خطورة على استمرارية التماسك بينه وبين

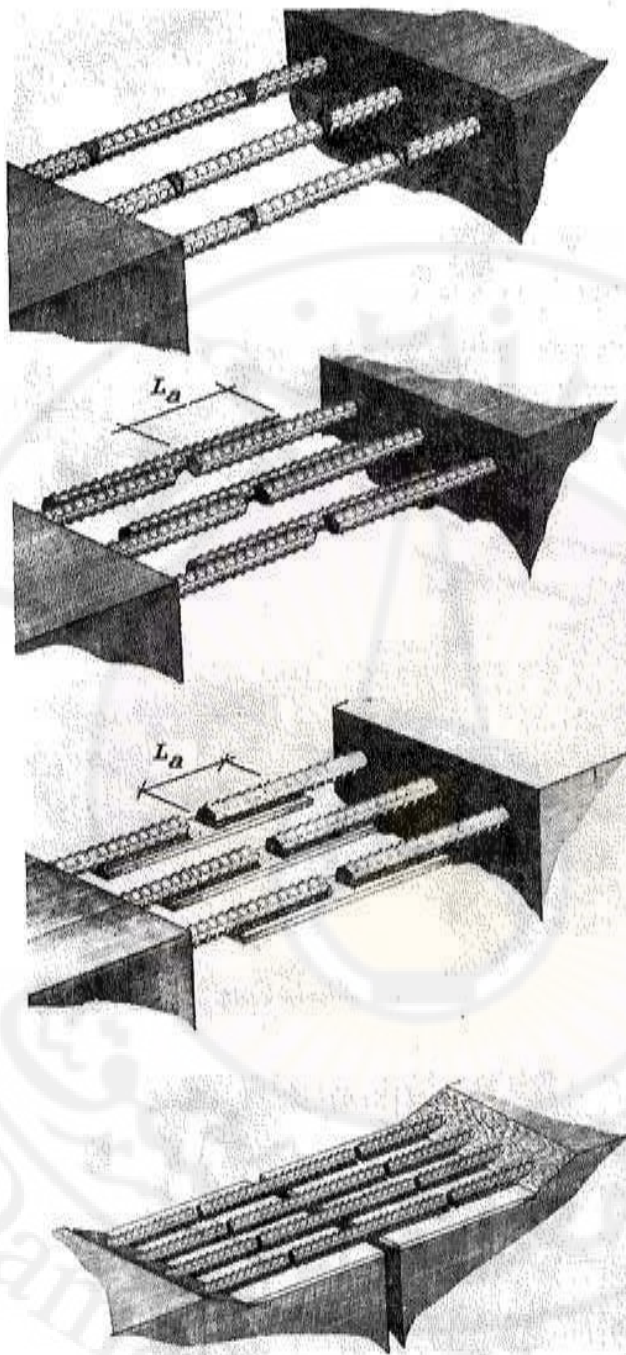
الخرسانة المحيطة به، وهذه النقاط هي، الشكل (4-18):

- النقاط التي يحدث فيها أكبر إجهادات شادة أو ضاغطة (وهي تعرف من مغلف العزوم عادة).

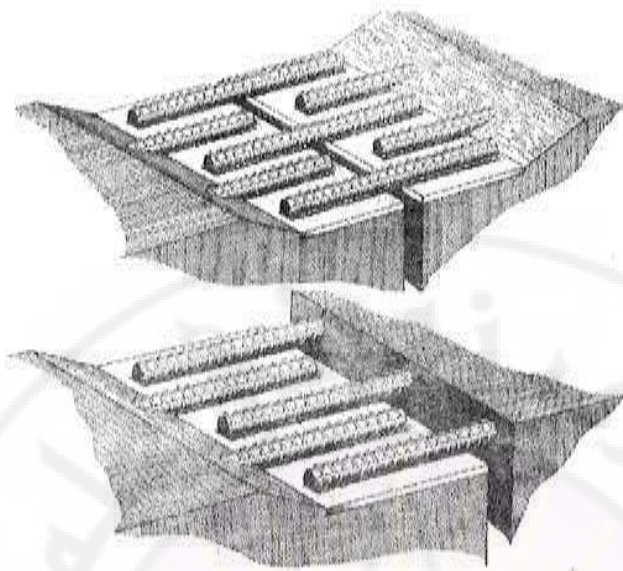
- الأماكن التي يتم عندها قطع القضبان لعدم الحاجة لها، أو تحنى قضبان أخرى مجاورة لها بهدف تكسحها *Bending-up* والاستفادة منها كتسليح ضغط وتسليح عرضي.

- نقاط انعدام عزوم الانحناء في قضبان التسليح الموجبة.

- النقاط التي تنتهي فيها القضبان الموجبة عند المساند غير المستمرة.



تابع الشكل (4-17) وصل القضبان باللحام الكهربائي



تابع الشكل (4-17) وصل القضبان باللحام الكهربائي

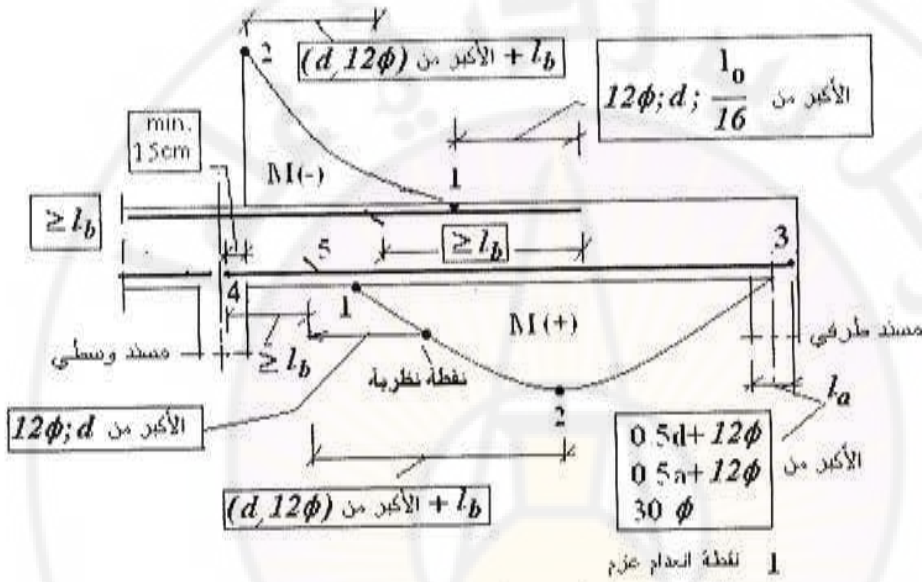
- حالة القضبان المشدودة السالبة (في منطقة العزم السالب):
يجب التأكد من أن طول القضيب ما بين المقطع الحرج (إجهادات الشد قصوى) وطرف القضيب لا يقل عن $l_b + l_a$ ، حيث: l_a - الأكبر من $(12\phi; d)$. وعند إيقاف عدد من القضبان قبل وصولها إلى المسند المجاور، الأمر الذي يسبب ارتفاع قيم الإجهادات الشادة في القضبان المستمرة المجاورة، يجب من جديد التحقق من توافر الطول اللازم بين نقطة التوقف النظرية وأطراف هذه القضبان المستمرة، بما لا يقل عن المقدار المذكور، وذلك إذا كان الشد في هذه القضبان بقيمة عظمى في نقطة الإيقاف النظرية المذكورة.

- حالة القضبان المشدودة الموجبة (في منطقة العزم الموجب):
يتم التحقق هنا وفقاً لمواقع النقاط الحرجة، وهي النقاط التي تكون فيها إجهادات الشد أعظمية، النقاط التي تتعدم فيها عزوم الانحناء، ونقاط انتهاء القضبان الموجبة عند المساند الطرفية، وكذلك النقاط التي لا حاجة بعدها لقضبان التسليح بالنسبة لعزوم الانحناء. وعند إيقاف عدد من القضبان قبل وصولها إلى المسند المجاور، الأمر الذي يسبب ارتفاع قيم الإجهادات الشادة في القضبان المستمرة المجاورة، يجب من جديد التحقق من توافر الطول اللازم بين نقطة التوقف

النظرية وأطراف هذه القضبان المستمرة، بما لا يقل عن المقدار المذكور، وذلك إذا كان الشد في هذه القضبان بقيمة عظمى في نقطة الإيقاف النظرية المذكورة.

أ - نقاط إجهادات الشد القصوى: يجب التأكد من أن طول القضيب ما بين هذه النقاط وأطراف القضبان لا يقل عن $l_b + l_a$ ، حيث:

l_a - الأكبر من $(12\phi; d)$ ، سواء أكان إجهاد الشد الأعظمي في هذه النقاط ناتجاً عن تأثير عزوم الانحناء القصوى، أم نتيجة لإيقاف واحد أو أكثر من القضبان فيها.



- 1 نقطة العزم عزم
- 2 نقطة إجهاد شد أعظمي
- 3 نهاية قضيب مستمر في مسند وسطي
- 4 نهاية قضيب مستمر في مسند طرفي
- 5 نهاية قضيب غير مستمر

الشكل (4-18) نقاط أساسية للتحقق في قضبان التسليح

ب - نقاط انعدام عزوم الانحناء *Contra flexure Points*: قد تكون الإجهادات المماسية نتيجة القص كبيرة في هذه النقاط، مما يرفع إجهادات التماسك، بينما مساحة التسليح الموجب قد تكون صغيرة نسبياً، الأمر الذي يتطلب التأكد من أن مساحة التسليح الموجب A_s وأقطاره محققة للشرط:

$$\frac{M_{urs}}{V_u} + l_a \geq l_b \quad (4-9)$$

حيث:

M_{urs} - العزم بالقيمة الحدية الذي تقاومه قضبان التسليح الموجبة الموجودة في المقطع العرضي في نقاط انعدام العزم، بافتراض أن إجهاد الشد في هذه القضبان يساوي قيمة إجهاد الخضوع f_y ، وأن ذراع المزدوجة الداخلية $z = 0.9d$ و $\Omega = 1$ ،
 V_{II} - قوة القص القصوى المطبقة في نقطة انعدام العزم، كما ورد أعلاه.

ج- النقاط عند المساند الطرفية (غير المستمرة):

يجب تحقيق ما يلي:

1- إذا وجدت مساند غير مستمرة للكمرات، يجب أن تحقق مساحة القضبان الموجبة الداخلة في المسند وأقطارها الشرط التالي (مع الأخذ بالحسبان أثر رد فعل المسند على تخفيض طول الإرساء اللازم):

$$\frac{M_{urs}}{V_{II}} + l_{a2} \geq l_b \quad (4-10)$$

حيث:

M_{urs} - العزم الحدي الموجب الذي يقاومه المقطع العرضي في محور المسند، بافتراض أن إجهاد الشد في قضبان التسليح المستمرة عبر محور المسند يساوي f_y ، وأن ذراع المزدوجة الداخلية $z = 0.9d$ ، و $\Omega = 1$.
 V_{II} - قوة القص القصوى المطبقة عند محور المسند.

l_{a2} - طول الاستمرار المستقيم للقضبان الموجبة ما بعد وجه المسند، يسمح بحساب الطول المكافئ للعكفات والثنيات عند حساب l_{a2} ، على أن تؤخذ بما لا يقل عن إحدى القيم التالية:

$$- \text{نصف عرض الركيزة (باتجاه الكمرة)} + 12\phi$$

$$- 12\phi + 0.5d$$

$$- 30\phi \text{ في كل الأحوال}$$

2- يمكن الاستغناء عن التحقق من الشرط أعلاه، إذا تحقق الشرطان التاليان بأن واحد:

- الأقل مساحة قضبان التسليح الداخلة في المسند غير المستمر، عند الحساب في حالة حد المقاومة القصوى عن $\frac{V_{II}}{\Omega f_y}$

- أن تنتهي قضبان التسليح الموجبة الداخلة ضمن المسند بعكفة نظامية، تبدأ استدارتها بعد محور المسند، أو ألا يقل طول الإرساء المستقيم لهذه القضبان ضمن المسند عن 25ϕ ابتداء من وجه المسند (في حال عدم وجود عكفة نظامية).

3- يستثنى مما سبق ذكره النهايات الطرفية للكمرات التي تشكل جزءاً من الهياكل الخرسانية المسلحة المصممة المصممة لمقاومة القوى الأفقية المتناوبة كالرياح والزلازل (قد يبين التحليل الإنشائي) تعرض التسليح السفلي في هذه الكمرات لقوى شادة عند العقد الطرفية، أي يجب هنا تأمين إرساء التسليح السفلي ضمن المسند لا يقل طوله عن l_b ابتداء من وجه المسند.

• حالة القضبان المضغوطة:

يجب التحقق من التماسك هنا، بالتأكد من أن طول القضيب ما بين مقطع الضغط الأقصى وطرف القضيب الحر، لا يقل عن طول التثبيت الأساسي في حالة القضبان المستقيمة المضغوطة l_b (ورد أعلاه).

4-7- توقيف أطراف قضبان التسليح *Curtailment of Rebars*:

أ- يجب أن تستمر قضبان التسليح التي لا حاجة لها لمقاومة عزم الانحناء في مقطع ما، مسافة إضافية (قبل قطعها أو تكسيحها) تساوي إما d أو 12ϕ أيهما أكبر.

ب- يجب أن يستمر ثلث التسليح السفلي على الأقل بالنسبة للكمرات المستمرة، ونصف التسليح بالنسبة للكمرات البسيطة، إلى مسافة لا تقل عن $150mm$ داخل المسند، مع أخذ أطوال التثبيت اللازمة بالحسبان.

ج- يجب أن يستمر ثلث التسليح السالب على الأقل، إلى ما بعد نقطة انعدام العزم، مسافة تعادل على الأقل 12ϕ أو $\frac{l}{16}$ البعد بين المسندين المتجاورين (المسافة بالضوء)، أو d أيهما أكبر.

د- بالنسبة للأظفار *cantilevers* التي تشكل جزءاً من كمرات أو بلاطات متصلة معها، يجب أن يستمر نصف التسليح العامل حتى طرف الظفر الحر على الأقل، ويمكن إيقاف الجزء المتبقي في نقطة تبعد عن وجه المسند مسافة لا تقل عن الأكبر من 0.5 طول الظفر (حتى محور المسند)، أو l_b بدءاً من وجه المسند الأمامي (الخارجي)، على أن يمد التسليح الظفري باتجاه الداخل (بدءاً من الوجه الأمامي للمسند)، مسافة لا تقل عن 1.5 مرة طول الظفر حتى محور المسند، أو l_b . وفي حال اتصال الظفر مع عمود، يجب أن يكون دخول التسليح في

العمود، بدءاً من الوجه الداخلي للمسند، لا يقل عن l/b ، وفي حالة الزلازل وغيرها تراعى الاشتراطات الخاصة بذلك.

هـ - يجب ألا يوقف جزء من قضبان التسليح الطولي في مقطع ما في منطقة الشد، عند تبين عدم الحاجة إليه بموجب مخططات عزم الانحناء، إلا إذا كان إجهاد القص في هذا المقطع لا يتجاوز ثلثي إجهاد القص الأقصى الذي يمكن أن يقاومه المقطع، أو إذا كانت مساحة التسليح المستمر بعد نقطة الإيقاف لا تقل عن ضعف المساحة المطلوبة نظرياً، وذلك في المقطع الموافق للنقطة المذكورة.

و- عند إهمال مساهمة الخرسانة في تحمل إجهادات القص اللازمة لحساب تسليح القص، يمكن الاستعاضة عن تمديد القضبان بالمقدار $0.5d$ بدلاً من d ، لتصبح القيمة $(d \text{ or } 12\phi)$ أينما وردت مساوية $(0.5d \text{ or } 12\phi)$.

من المسائل التي لها أثر كبير في عملية التماسك الترتيبات الخاصة بتوزيع قضبان التسليح في المقاطع العرضية، وبحيث يتأمن الحيز الكافي لانتشار الخرسانة وحرصها بشكل مناسب، إضافة لتأمين التغطية الخرسانية بسمك كاف لقضبان التسليح.



الباب الثاني

حساب المقاطع الخرسانية المسلحة

Calculation of RC Sections

- الفصل الأول: الجمل الإنشائية الحاملة ومبادئ الحساب
- الفصل الثاني: العناصر الخاضعة للانحناء - الجوائز
- الفصل الثالث: تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة إجهادات التشغيل
- الفصل الرابع: تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة حد المقاومة القصوى
- الفصل الخامس: المقاطع الخاضعة للضغط المركزي (أعمدة قصيرة)
- الفصل السادس: المقاطع الخاضعة للضغط اللامركزي
- الفصل السابع: الحساب وفق حالة حد التشقق
- الفصل الثامن: الحساب وفق حالة حد التشكل (السهوم)
- الفصل التاسع: تأثير التشوهات الحجمية والسيلان في الخرسانة والخرسانة المسلحة



الفصل الأول

الجمال الإنشائية الحاملة ومبادئ الحساب

Structural Bearing Systems and Methods of Calculation

(إعداد: د. م. غسان محمود)

- 1-1- تمهيد
- 1-2- حول العناصر والنظم الإنشائية الحاملة من الخرسانة المسلحة
- 1-3- التصميم الإنشائي
 - 1-1-3- تطور الحالة الإجهادية - التشوهية في المقاطع العرضية
 - 1-2-3- حالات الحدود الحديدية وفق الكود العربي السوري
 - 1-3-3- طرائق الحساب المستخدمة
 - 1-1-3-3- طريقة الإجهادات المسموح بها
 - 1-2-3-3- طريقة حد المقاومة القصوى

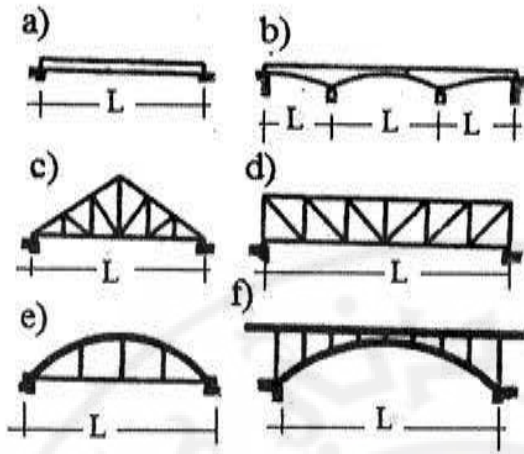


تتنوع الجمل الإنشائية الحاملة في المنشآت المنفذة من الخرسانة المسلحة كلياً أو جزئياً، وهذا يتعلق بطبيعة هذه المنشآت من الناحية المعمارية والاستثمارية والمواد المستخدمة وغير ذلك. إذ يمكن أن تكون المنشآت مكشوفة (الأبنية السكنية، الفنادق، المكتبات، الأبنية الصناعية، أبنية الخدمات العامة كالمجمعات الاستهلاكية ودور السينما والمسارح والصالات الرياضية، الجسور ومحطات الضخ ونقل الركاب والبضائع وخزانات المياه العالية والسطحية ومنشآت الري المختلفة وما شابهها وغير ذلك، أو مطمورة كلياً أو جزئياً وهي كثيرة أيضاً.

تبدأ عملية تصميم المنشآت الهندسية بوضع التصميم المعماري والإنشائي للجمل الحاملة في كلا الاتجاهين الأفقي والشاقولي، وإعطاء العناصر الإنشائية الشكل المطلوب لتحقيق الغاية الاستثمارية المنتظرة، وقدرة التحمل المطلوبة، ومتطلبات الاستقرار عن طريق تأمين الصلابة الفراغية للمبنى، ويعمل المهندسون الإنشائيون على تحليل أداء الجمل وعناصرها الإنشائية الحاملة كلياً وجزئياً بأخذ تأثير ارتباط العناصر المختلفة فيما بينها، طبيعة الأحمال الاستثمارية المطبقة والطائرة، خواص الخرسانة والتسليح وغيرها من المواد المستخدمة، وسائل التقنية المستخدمة في التنفيذ وغير ذلك. من أهم العناصر الإنشائية الحاملة : الأعمدة والكمرات (الجوائز) والبلاطات والجدران وغير ذلك، وبوجود هذه العناصر كلياً أو جزئياً تتشكل الجمل الإنشائية الحاملة. تكون المنشآت الهندسية الخرسانية المسلحة عادة مصبوبة في المكان ومسبقة الصنع، مسبقة الإجهاد ومنشآت مختلطة وغير ذلك، وتتكون النظم الإنشائية الحاملة من مجموعة من العناصر المختلفة المترابطة معاً بأشكال مختلفة، وهي تعمل كجملة مشتركة تتوزع الأدوار فيما بينها، إذ تتفاوت أهميتها من حيث الدور الإنشائي.

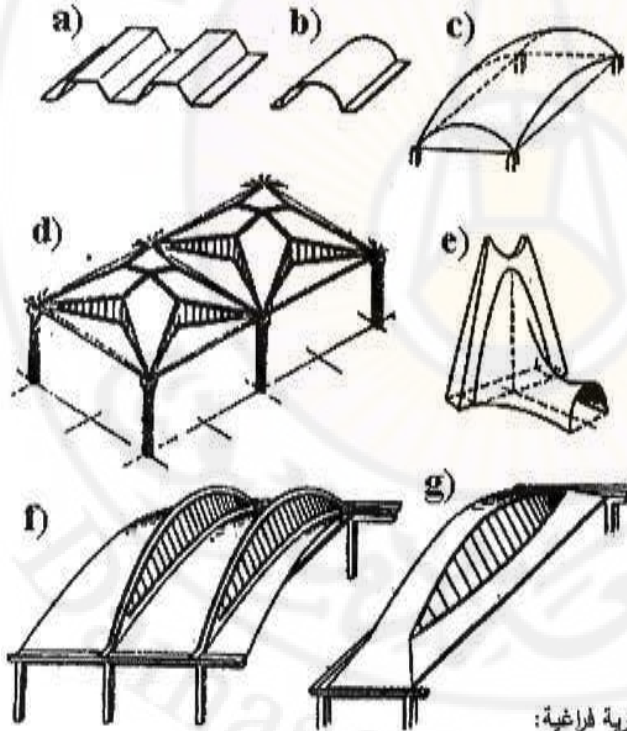
1-2- حول العناصر والنظم الإنشائية الحاملة من الخرسانة المسلحة:

- 1- بالنسبة للجمل الحاملة فقد تكون نظماً بسيطة مستوية الشكل (1-1) أو فراغية، الشكل (1-1)
2. وفي الأبنية، تكون الجملة الحاملة جدارية وإطارية أو هيكلية (أعمدة + كمرات + بلاطات) ومختلطة (جدران + إطارات). وتستخدم الجدران والقواطع في الأبنية للحصول على القاعات والغرف وغيرها، ويفضل في هذه الحالة استخدام الجمل الجدارية كحل إنشائي، إذ تعمل الجدران هنا كعناصر شاقولية تقاوم الأحمال الشاقولية المختلفة، وتوفر بأن واحد جملة القص *Shear Scheme* المقاومة لأحمال الرياح والزلازل المؤثرة جانبياً.



الشكل (1-1) نظم إنشائية مستوية:

(a) كمرية بسيطة، (b) كمرية مستمرة متغيرة المقطع.
 (c, d) جانز شبكي، (e) قوس مع شداد، (f) جسر قوسي.



الشكل (2-1) نظم قشرية فراغية:

(a) قشرية صفائحية متعرجة، (b) قشرية أسطوانية، (c) قشرية ثنائية القوس، (d) قشرية مخروطية.
 (e, g, f) أشكال أخرى للقشريات الفراغية.

يمكن أن توجد الجدران الحاملة بالاتجاه الطولي أو بالاتجاه العرضي أو كليهما معاً (الجدران المتصالبة)، وتكون الجدران في الأبنية غير الهيكلية إما مصبوبة في المكان أو مسبقة الصنع، وهذا ما توضحه الأشكال من (1-3) إلى (1-12).

من أهم العناصر الإنشائية الحاملة في الأبنية والمنشآت الهندسية (حسب تسلسل انتقال الأحمال وصولاً إلى التربة الحاملة):

- البلاطات بأنواعها
- الكمرات بأنواعها
- الأعمدة بأنواعها
- الجدران بأنواعها (بما في ذلك جدران القصر العاملة لمقاومة الأحمال الجانبية نتيجة الرياح والزلازل وغير ذلك) .
- الأساسات بأنواعها

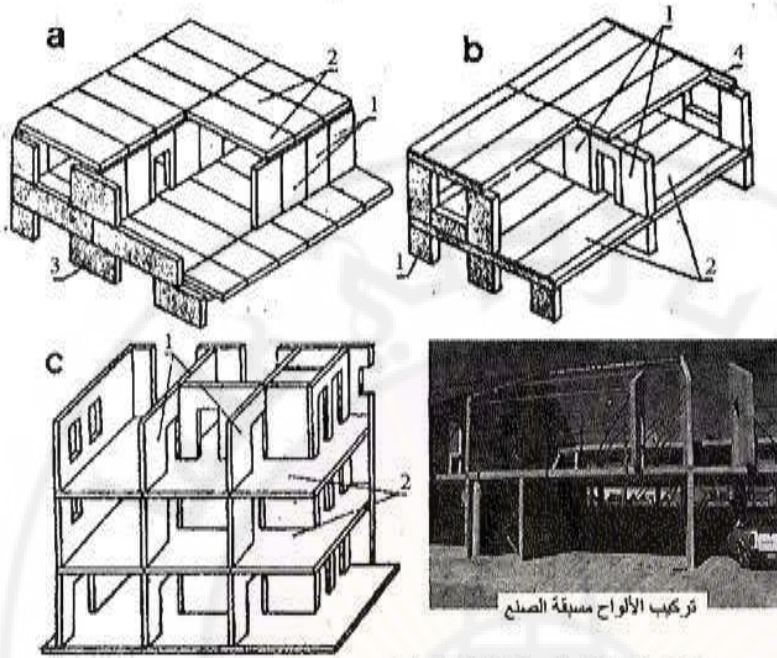
وبشكل عام، يمكن تصنيف العناصر الإنشائية الحاملة إلى:

- عناصر خطية ذات محور طولي مستقيم:
هي العناصر التي يكون بعدها بالاتجاه الطولي كبيراً مقارنة مع البعدين الآخرين الواقعين في المستوي المتعامد مع هذا الاتجاه، ومن هذه العناصر: الأعمدة *Columns*، الكمرات *Beams*، الشدادات *Ties* وغيرها.

- عناصر خطية ذات محور غير مستقيم:
هي عناصر مشابهة للعناصر السابقة، ولكن محاورها الطولية غير مستقيمة (منحنية، منكسرة كما في الإطارات والأقواس وبعض أنواع الأدراج وغير ذلك).

- عناصر حاملة مستوية:
هي العناصر التي يكون أحد أبعاد مقطعها العرضي (السماكة *Thickness*) أقل بكثير من البعدين الآخرين (الطول *Length* والعرض *Width*)، وتمثل هذه العناصر بلاطات السقوف *Floor Slabs* والأسطح والأرضيات (الحوائط *Mats*) بأنواعها المتعددة التي تتعرض لأحمال عمودية على مستوياتها، ومنها البلاطات المستندة إلى جوائز (كمرات) موجودة باتجاه واحد أو باتجاهين والبلاطات المستندة على أعمدة فقط، البلاطات المعصبة بأشكالها المفرعة أو بلاطات الهوردي باتجاه واحد أو باتجاهين، البلاطات الدائرية والمثلثية وغيرها من الأنواع المستخدمة محلياً وخارجياً، الشكل (1-7-1 أ و ب) وبلاطات تتحمل أحمال مطبقة في

مستوياتها كالجدران الحاملة *Bearing Walls*، والكمرات العميقة *Deep Beams* وجدران القص *Shear Walls* وغيرها.



الشكل (1-3) نماذج إنشائية لأبنية ذات جمل جدارية حاملة:

- (a) جدران حاملة عرضية، (b) جدران حاملة طولية (مسبقة الصنع).
 (c) جدران حاملة متصلة (مصنوعة في المكان).
 1 - جدران، 2 - بلاطات، 3 - كمرة عميقة، 4 - عتبات.

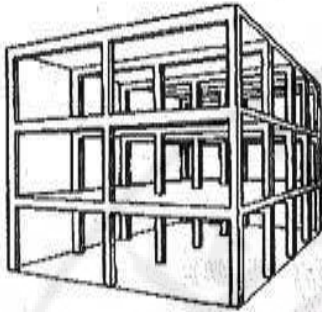
- عناصر فراغية:

وتتمثلها القشريات والغشائيات *Shells and Membranous Structures* والرقائق *Films* بأنواعها، العناصر الحاملة المتموجة والعناصر القوسية، وتتميز القشرية *Shell* عن القوس *Arch* بالسلك الصغير، وعدم نشوء الانزياح الجانبي *Lateral Displacement*، كما تكون الوضعية الإجهادية في القشرية فراغية، بينما تكون في القوس مستوية.

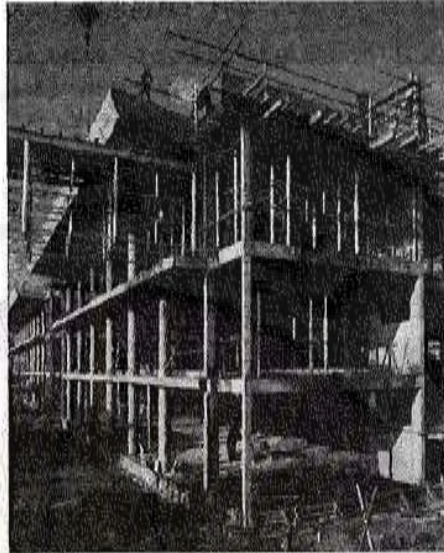
- عناصر ذات أشكال خاصة:

تشمل العناصر ذات الشكل الكتلي *Massive Members* (أبعاداً كبيرة في جميع الاتجاهات: أساسات وكتلاً للتثبيت *Fixing Block* وجدراناً سائدة كتلية وكاسرات الأمواج وأرصفت الموانئ

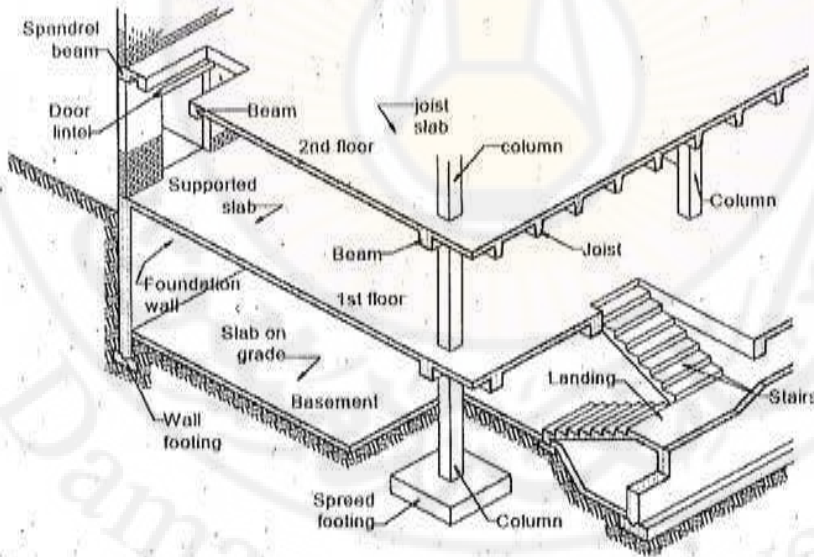
وقواعد الآلات والمطارق وغير ذلك)، وتشمل أيضا العناصر الحاملة المركبة التي يتم تجميعها من العناصر السابقة المسلحة (الخفيفة) ومنها: الإطارات والمنشآت الإطارية، الجدران الساندة *Retaining Walls*، هياكل الأبنية الحاملة وما شابه ذلك.



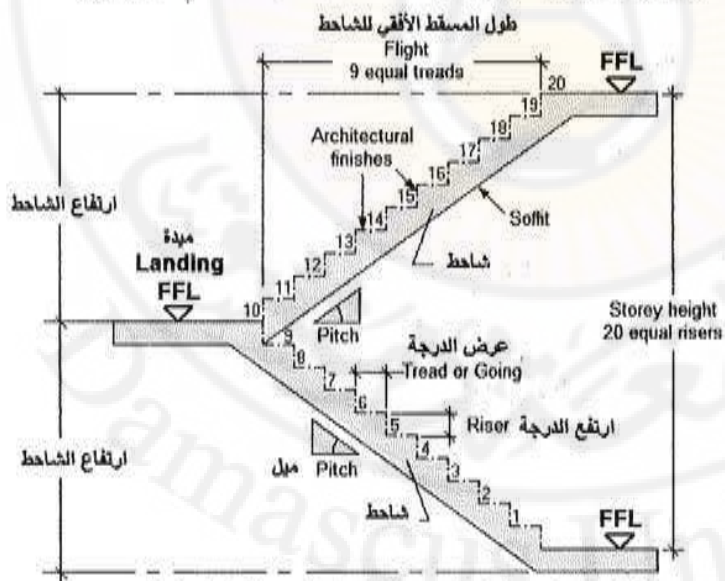
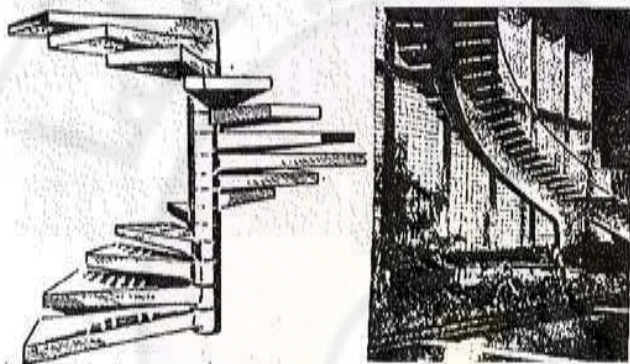
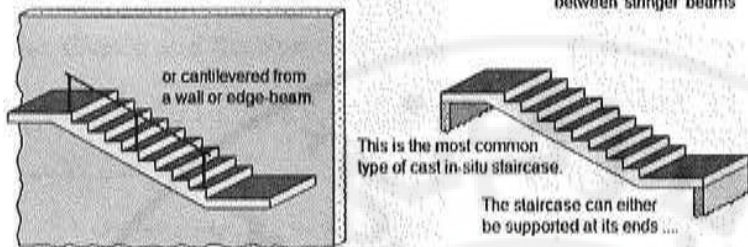
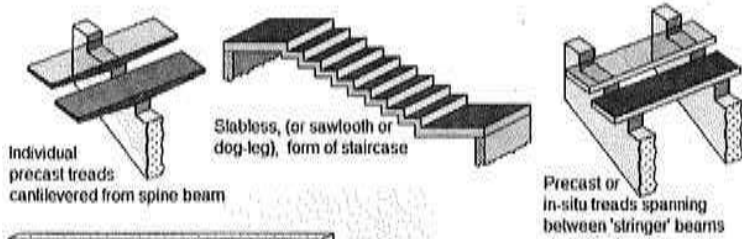
الشكل (1-4) مبنى ذو جملة إطارية حاملة.



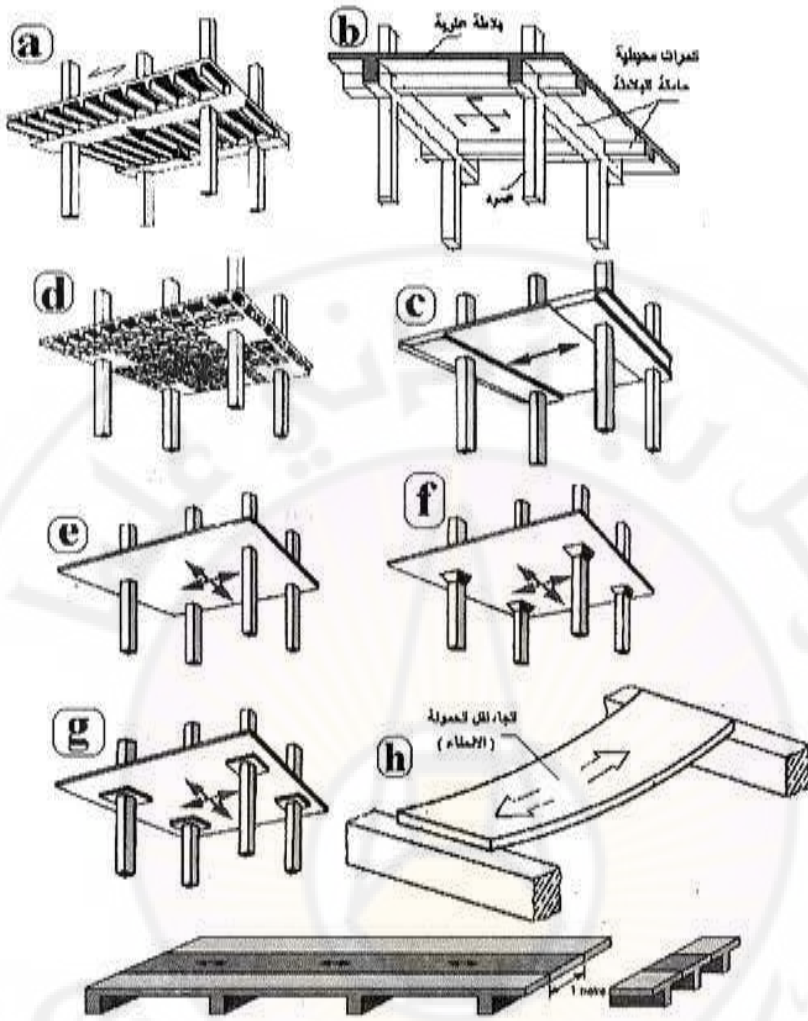
الشكل (1-5) مبنى هيكلي مصبوب في المكان قيد الإنشاء.



الشكل (1-6) الأعضاء الأساسية المكونة للجملة الحاملة في الأبنية الهيكلية.

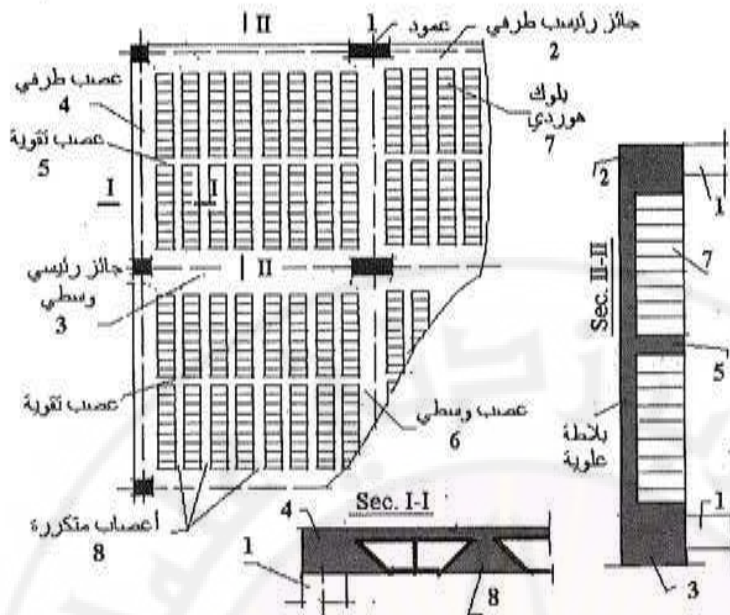


الشكل (1-6-ب) نماذج من الأدرج كعناصر إنشائية حاملة.

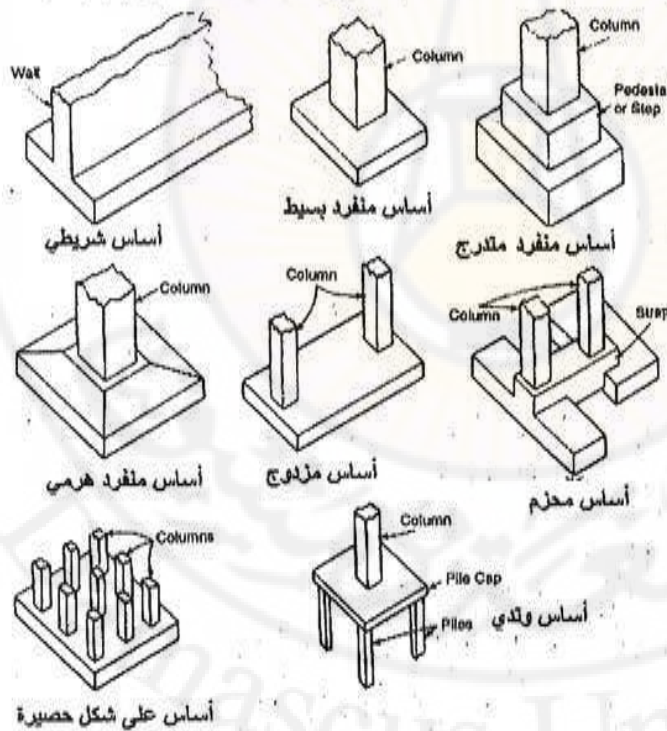


الشكل (1-7-1) نماذج من الجمل الإنشائية للبلطات الأكثر استخداماً كعناصر حاملة:

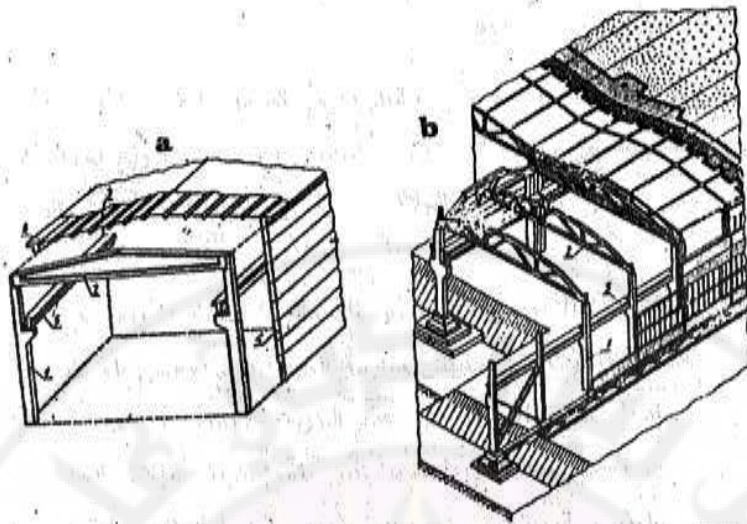
- (a) كمرية مصمتة ، (b) مستندة إلى كمرات محيطية.
 - (c) مصمتة ومستندة إلى شرائح بارزة عريضة فوق الأعمدة.
 - (d) معصبة، (e) مصمتة تستند إلى الأعمدة مباشرة (دون تيجان).
 - (f) فطرية (أعمدة مع تيجان)، (g) فطرية (أعمدة مع سقوط).
 - (h) بلطات مستندة إلى طرفين متقابلين فقط.
- (تشير الأسهم إلى اتجاه نقل الحمولات بشكل أساسي)



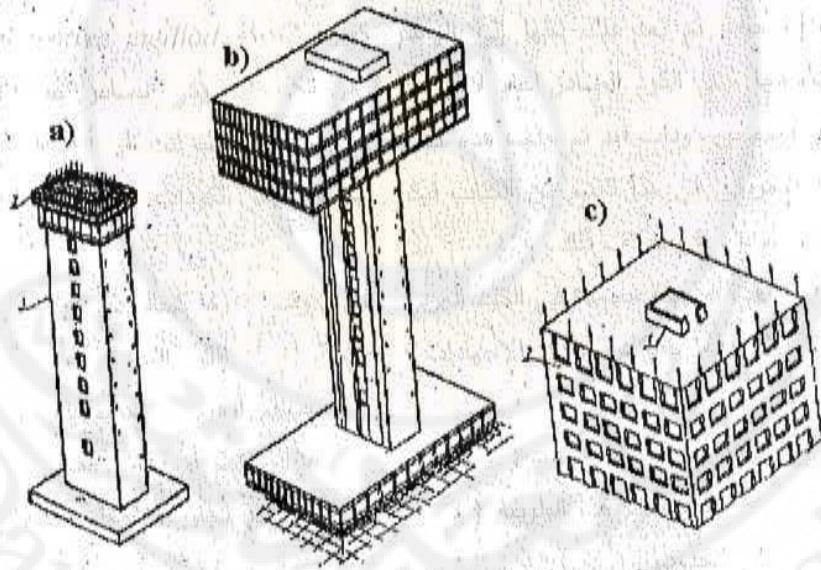
الشكل (1-7-ب) منظر من الأسفل (كوفراج) لجزء من بلاطة هوردي باتجاه واحد.



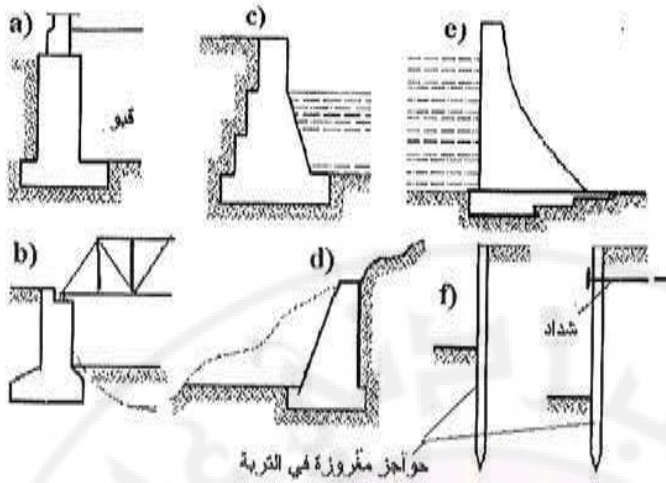
الشكل (1-8) نماذج من الأساسات كعناصر حاملة.



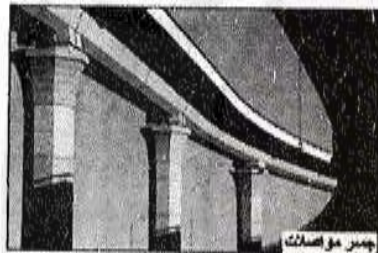
الشكل (1-9) أبنية صناعية مسبقة الصنع: (a) العناصر الإنشائية، (b) منظر عام،
 1 - عمود، 2- جانز (كمره) حامل علوي، 3- بلاطات سطحية، 4- ألواح جدارية،
 5- كمره جسرية ، 6- كمره طرفية.



الشكل (1-10) نماذج من نظم الأبنية العالية:
 (a) و (b) النواة المركزية في مرحلة التنفيذ، (c) بعد التنفيذ.
 1 - النواة، 2- جدران، 3- قالب منزلق.



الشكل (11-1) مقاطع شاقولية في عدد من الجدران الساندة.



جسر مواصلات



قناة مرافعة للري



نقل للتضاريف



إنشاءات رياضية



إنشاءات بحرية



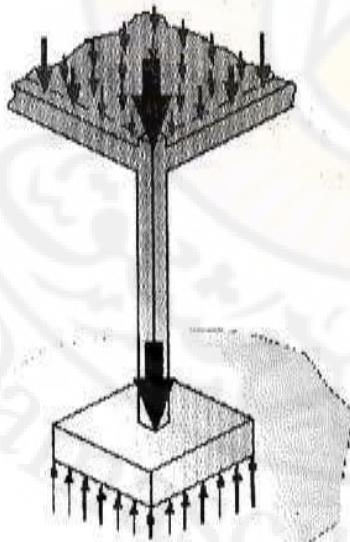
خزان ماء عال

الشكل (12-1) بعض المنشآت الأخرى.

1-3- الحساب الإنشائي للمنشآت *Calculations of Structures*

تشمل عملية الحساب الإنشائي للمنشآت وعناصرها الحاملة عدة مراحل أهمها:

1. التحليل الإنشائي *Structural Analysis* للمنشأة ككل (وفق المصورات المعمارية والمعطيات المتوفرة)، حيث تحدد هنا الأحمال المطبقة وما ينجم عنها من عزوم وقوى داخلية أخرى.
 2. تصميم الجملة الحاملة والعناصر المكونة لها، حيث يحدد شكل وطبيعة استناد العناصر.
 3. تصميم المقاطع *Section Design* في العناصر الإنشائية، حيث تحدد أبعاد المقاطع والتسليح وغير ذلك.
 4. التحقق من الأبعاد والتسليح *Reinforcement and Dimensions Checking out*
 5. التفاصيل الإنشائية *Structural Detailing*
- يتم تنفيذ خطوات التصميم الإنشائي وفق الترتيب التالي:
- تصميم البلاطات على أنواعها بما في ذلك بلاطات الأدرج
 - تصميم الأعصاب والجوائز الحاملة للبلاطات إن وجدت
 - تصميم الأعمدة والجدران الحاملة والرقبات *Pedestals*
 - تصميم الأساسات، يبين الشكل (13-1) انتقال الحمولة من البلاطة إلى الأساسات.



الشكل (13-1) انتقال الأحمال وتسلسل التصميم الإنشائي.

ومن أهم أهداف التصميم الإنشائي:

- الوصول إلى احتمال مقبول بأن أداء المنشأ خلال فترة استثماره المتوقعة سيكون مرضياً.
- أن يكون المنشأ قادراً على مقاومة كل الأحمال المطبقة والتشوهات الناتجة عنها والمعتمدة في التصميم بدرجة كافية من الأمان، وأن تكون ذات ديمومة مقبولة (القدرة على تحمل الظروف البيئية المحيطة، سوء الاستخدام العادي والحريق وغير ذلك) ، ويتم ذلك باستخدام المواد الإنشائية المناسبة وطرائق التصميم المناسبة.
- تحقيق الاقتصادية المطلوبة بالإقلال من كلفة البناء في مراحلها المختلفة.

يتم تصميم العناصر الإنشائية الخرسانية المسلحة بعد تحليل أدائها الإنشائي، ومعرفة المقاطع الجرجة وحالاتها الإجهادية تحت تأثير الحمولات التصميمية، ويجري اختيار قضبان التسليح وتوزيعها وفق قواعد وتوجيهات الكود المعمول به، وكذلك اختيار الأبعاد النهائية للعناصر بعد تحليل الحالة العامة للجملية الحاملة وتحقيقها لشروط المقاومة والاستقرار وغير ذلك. وضمن هذا الإطار، سيجري التركيز في الفصول القادمة على دراسة المقاطع العرضية تحت تأثير حالة إجهادية معينة، ثم يتم تصميم العناصر الإنشائية بعد أخذ الأشكال المختلفة للإجهادات المطبقة في العنصر الإنشائي كجملية متكاملة، وهذا يقود إلى تحليل الحالة العامة للجملية الحاملة ككل وتصميمها وفق القواعد المعمول بها.

يعتمد تحقيق التوافق الأفضل بين كلفة المنشآت الهندسية وأدائها الطبيعي وهي في حالة الاستثمار، بالاختيار الأفضل لنوعية المواد الأناسية الداخلة في تركيبها من ناحية، ومن ناحية أخرى بطريقة التصميم المتبعة لتحديد أبعاد العناصر الإنشائية وشكلها وطبيعة اتصال بعضها مع بعض وغير ذلك. وبالنسبة للمنشآت الخرسانية المسلحة، يصبح تحديد نوعية الخرسانة والتسليح (إضافة لتكنولوجيا التصنيع والرعاية وغير ذلك) تحديداً موقفاً جزءاً من الحل فقط ، ويبقى الجزء الثاني الذي لا يقل أهمية عن الجزء الأول متعلقاً بطريقة التصميم، إذ إن الخرسانة المسلحة مادة مركبة تتألف من مادتين لهما العديد من الخواص المختلفة، والخرسانة بحد ذاتها مادة مركبة أيضاً وتختلف خواصها المتعددة لاختلاف خواص مكوناتها الأساسية المعروفة (الإسمنت، الحصى، الماء). ومع أن الخرسانة وفولاذ التسليح قادران على العمل معاً لتحمل الإجهادات الداخلية المتولدة عن الأحمال الاستثمارية المطبقة والمتوقعة بفضل قوى التماسك *Bond Forces* الناشئة بينهما في منطقة التماس، لا بدّ من الأخذ بالحسبان التباين الواضح بينهما، خاصة فيما يتعلق بالميزات الميكانيكية، إذ إن معامل مرونة الفولاذ ثابت القيمة تقريباً في حالتي الضغط والتشد لمختلف أنواع الفولاذ المستخدم كتسليح في المنشآت الخرسانية المسلحة

العادية، وذلك في حدود الإجهادات العادية، بينما معامل مرونة الخرسانة يتغير تبعاً للنوع والعمر، ويتناقص مع تزايد الإجهادات التصميمية المطبقة. ومن العوامل التي تسبب هذا التباين أن أسياخ التسليح تتشوه تشوهاً مرناً *Elastic Deformation* في حدود الإجهادات التصميمية التي تقل كثيراً عن القيم الحدية، بينما تتشوه الخرسانة تشوهاً مرناً - لدناً *Elasto-Plastic Deformation*. ومن نقاط التباين الأخرى الجديرة بالاهتمام أن مقاومة الفولاذ على الشد وعلى الضغط متساوية تقريباً، لكن بالنسبة للخرسانة تزيد المقاومة على الضغط بأكثر من عشر مرات من المقاومة على الشد. وهكذا يصبح التعامل مع المقاطع الخرسانية المسلحة تعاملًا مع مقاطع مركبة غير متجانسة، الأمر الذي يعقد كثيراً مسألة تحديد التشوهات والإجهادات الفعلية في هذه المقاطع. ولذلك يبقى البحث عن طرائق أفضل في التصميم الشغل الشاغل للباحثين مع إنجاز عدد هائل من الأبحاث النظرية والتجريبية، ومع وجود عشرات المؤسسات والدوريات التي تعنى حصرياً بالخرسانة المسلحة. ولم تذهب هذه الأبحاث هدرًا، إذ تطورت طرائق الحساب المتبعة، وأفضت إلى تحقيق نتائج مرضية حتى الآن فيما يتعلق بتحقيق التوازن بين كلفة المنشآت الخرسانية المسلحة من ناحية (تحقيق مقاطع اقتصادية)، وأدائها المقبول في مراحل الاستثمار من ناحية أخرى. وقد تم قبول عدد من الطرائق الأساسية في الكودات الإنشائية لتحسن باستمرار في الطبقات المتتالية ومنها الكود العربي السوري [1] الذي يعتمد هنا كأساس للحساب في هذا الكتاب، طالما تعالج توجيهاته واشتراطاته المواضيع التصميمية ذات العلاقة. لقد اعتمدت الطرائق المعتمدة على تحليل الأداء التجريبي لتطور الحالة الإجهادية والتشوهية في المقاطع المعرضة للانحناء تحت تأثير أحمال متزايدة من الصفر حتى الانهيار، وتم قبول العديد من التسهيلات والافتراضات الضرورية لتحقيق التوافق الأقرب بين الواقع النظري (الحسابي) والتجربي.

1-3-1- تطور الحالة الإجهادية-التشوهية في المقاطع العرضية:

لتكن الكمرة البسيطة الخرسانية المسلحة *RC Simple Beam* بتسليح أحادي على الشد فقط (التسليح على الضغط إنشائي)، وذات المقطع العرضي المستطيل، الشكل (1-14)، والخاضعة لتأثير حمولة قصيرة الأمد موزعة بانتظام ومتزايدة من الصفر حتى الانهيار (الانكسار). من الواضح تشكل منطقتين في المقطع العرضي هما: منطقة الضغط *Compression Zone* في الأعلى ومنطقة شد في الأسفل *Tension Zone*، ويفصل بينهما المحور المحايد (محور

الخمول (*Neutral Axis (N.A.)*) الذي تنعدم فيه التشوهات والإجهادات، كما هو معروف. يمر المقطع العرضي خلال فترة التحميل بمراحل إجهادية متعددة تتضوي ضمن ثلاث مراحل رئيسية هي:

- مرحلة ما قبل التشقق، مرحلة التشقق، ومرحلة ما قبل الانهيار (الانكسار).

فيما يلي استعراض مبسط لما يحدث من تغيرات على توزيع الإجهادات الناطمية *Normal Stresses* والتشوهات في المقطع العرضي الذي يخضع لأكثر عزم انحناء.

A (مرحلة ما قبل التشقق (*I*) *Uncracked State* :

لا تظهر التشققات في هذه المرحلة، ويتم مقاومة الإجهادات الناطمية الشادة بمشاركة التسليح والخرسانة على السواء بفضل قوى التماسك الحاصل بينهما، وتقوم الخرسانة بامتصاص الإجهادات الضاغطة الناتجة في منطقة الضغط، وهنا يمكن تمييز قسمين أساسيين:

- القسم الأول I_a : تكون التشوهات الحاصلة في الخرسانة طفيفة، ويبقى مخطط الإجهادات الشادة والضاغطة مثلثياً (علاقة خطية تحكمها فرضية هوك المعروفة)، أي إن المقطع موجود في حالة الأداء المرن، ومن الواضح أن مركز ثقل المقطع واقع تحت محور الخمول على مسافة صغيرة نسبياً منه بسبب وجود التسليح الأكبر في منطقة الشد، وتساوي الحمولة في نهاية هذا القسم نحو $5\% \rightarrow 4$ تقريباً من حمولة الانكسار.

- القسم الثاني I_b : تظهر التشوهات اللدنة في الخرسانة في منطقة الشد، وينجم عن ذلك انخفاض في قيمة معامل المرونة، ويبدأ مخطط الإجهادات الناطمية الشادة بالانحناء، وتصبح قيمة الإجهادات في الألياف الطرفية المشدودة قريبة من المقاومة المميزة على الشد f_{ct} ، بينما يبقى مخطط الإجهادات الناطمية الضاغطة خطياً تقريباً، وينتقل المحور المحايد إلى الأعلى مسبباً انخفاضاً في ارتفاع منطقة الضغط x ، وتساوي الحمولة المطبقة في نهاية هذا القسم (نهاية المرحلة *I*) نحو $20\% \rightarrow 15$ من حمولة الانكسار.

B (مرحلة التشقق (*II*) *Cracked State* :

- القسم الأول II_a : تبدأ هذه المرحلة مع وصول الإجهادات الشادة في الألياف الطرفية للخرسانة إلى f_{ct} ، إذ يبدأ بالتكون شق ما في المقطع العرضي الحرج *Critical Cross-section* (المقطع الخاضع لأكثر عزم انحناء هنا)، ومع تزايد الحمولة المطبقة يزداد هذا الشق انفتاحاً، ويتعمق طولياً في جسد الكمر، وفي الوقت نفسه تتشكل تشققات أخرى أقل اتساعاً ويزداد عددها مع ازدياد نسبة التسليح على الشد، وهي قد تزداد اتساعاً أو ينخفض هذا الاتساع

مع زيادة الحمولة المطبقة، كما يرتفع المحور المحايد إلى الأعلى بشكل ملحوظ مسبباً انخفاض ارتفاع منطقة الضغط في المقطع، وعند استقرار عملية التشقق يكون أحد التشققات مسيطراً، وتبدأ التشوهات اللدنة بالظهور في الخرسانة المضغوطة بدءاً من الألياف الطرفية، ويأخذ مخطط الإجهادات الضاغطة شكلاً منحنيًا، ولكن دون وصول الإجهادات الضاغطة في الخرسانة إلى المقاومة المميزة f'_c .

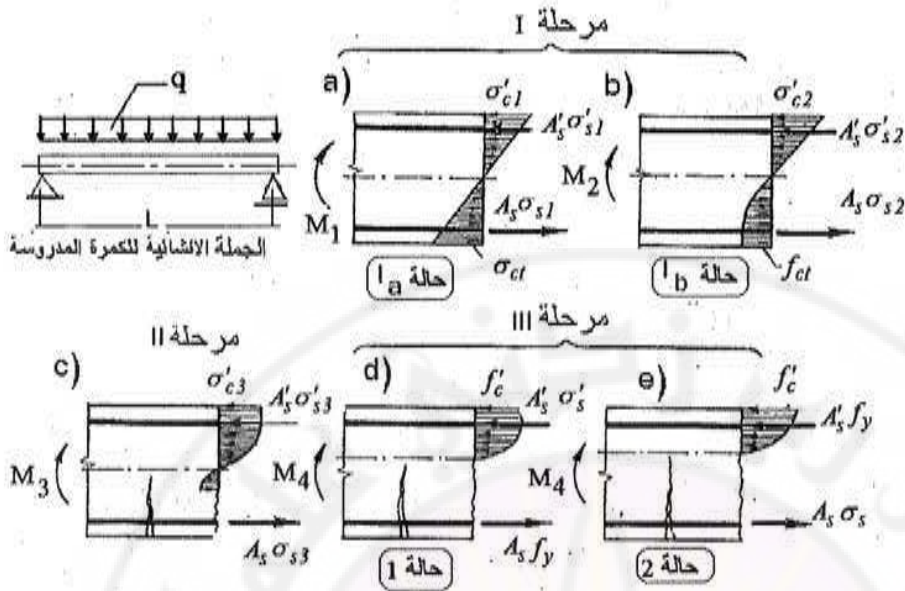
- القسم الثاني II_b : يزداد تطاول الشق المسيطر في عمق الكمرة، ويصل إلى المحور المحايد تقريباً، ويأخذ هذا المحور بالاقتراب شيئاً فشيئاً من الطرف المضغوط في المقطع، وتخرج الخرسانة من العمل بشكل كامل تقريباً في منطقة الشد، ويبقى التسليح المشدود وحده مقاوماً للإجهادات الناظرية الشادة، مع بقاء هذه الإجهادات ذات طابع مرن، وأما في منطقة الضغط فتصبح الإجهادات الضاغطة في الخرسانة قريبة من f'_c في الألياف الطرفية المضغوطة. وتساوي الحمولة المطبقة في نهاية المرحلة II نحو 50% تقريباً من حمولة الانكسار الكلية .

(C) مرحلة الانكسار (III) State of Collapse:

تبدأ هذه المرحلة عندما يصل عمق الشق المسيطر في المقطع المدروس إلى أكبر قيمة له (عمق منطقة الضغط أقل ما يمكن)، ويحدث الانهيار وفقاً لإحدى الحالتين التاليتين:

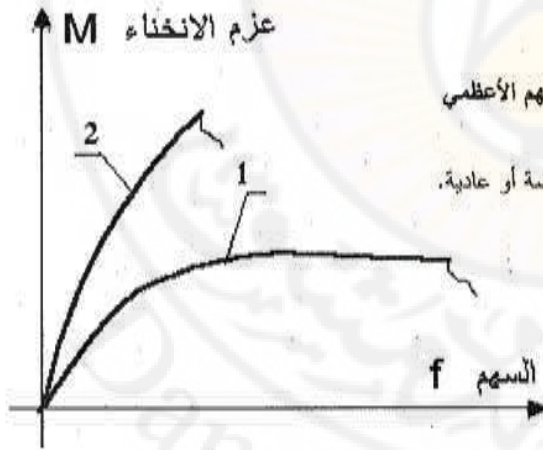
- نسبة تسليح الشد $Tension Reinforcement Ratio$ μ_s عادية أو منخفضة (الحالة 1):
تصل قيمة الإجهادات الشادة في التسليح إلى حد الخضوع f_y ، وتزداد التشوهات اللدنة بعد ذلك في الخرسانة (مع بقاء الإجهادات الضاغطة أقل من f'_c)، الأمر الذي يسبب زيادة السهم $Deflection$ بشكل كبير، وكذلك اتساع التشققات، مع بقاء قيمة العزم ثابتة تقريباً وأقل من قيمة العزم المسبب للانهيار M_f ، ويحدث الانكسار هنا ببطء نتيجة الدوران المتبادل حول ذروة الشق المسيطر، وهذا يعني وجود تحذير مسبق (انهيار لدن $Plastic Failure$)، الشكل (1-14).

- نسبة تسليح الشد $Tension Reinforcement Ratio$ μ_s كبيرة (الحالة 2):
عندما تتجاوز نسبة تسليح الشد القيم العظمى (سيتم الحديث عن ذلك لاحقاً)، لا تصل الإجهادات الشادة في التسليح إلى f_y ، بينما تصل الإجهادات الضاغطة في الخرسانة إلى f'_c ، وينتج عن ذلك تهشم الخرسانة بشكل مفاجئ $Brittle Failure$ ، وهذا الشكل من الانكسار خطير جداً، لأنه يحصل دون وجود الوقت الكافي لأخذ الاحتياطات اللازمة وتجنب الانهيار الكامل أو الجزئي بالوسائل المناسبة. وتكون السهوم الناتجة قبل الانكسار قليلة نسبياً مقارنة مع الحالة الأولى المبينة أعلاه، الشكل (1-15).



الشكل (14-1) المراحل الإجهادية الأساسية:

(a) القسم الأول من مرحلة ما قبل التشقق l ، (b) القسم الثاني من مرحلة ما قبل التشقق l ، (c) مرحلة التشقق II، (d) حالة الانهيار اللدن، (e) حالة الانهيار الهش.



الشكل (15-1) علاقة عزوم الانحناء - السهم الأعظمي

في الكمره المدروسة:

- (1) نسبة تسليح الشد منخفضة أو عادية.
- (2) نسبة تسليح الشد كبيرة

الجدير بالذكر هنا أن التقسيم المذكور أعلاه افتراضي قياساً على الاختبارات التجريبية المتعددة، وخاصة تلك الاختبارات التي تم إجراؤها في شروط خاصة توفر الصلابة الكافية لأجهزة

الاختبار وإمكانية أخذ القياسات المطلوبة (شروط التحكم بالانتقالات، أي التحميل بالانتقالات
(Loading by Displacements).

لقد أثمرت جهود الباحثين المستمرة إلى استنباط العديد من الطرائق لحساب المقاطع
الخرسانية المسلحة تحت تأثير مختلف الأحمال المطبقة، وتهدف هذه الطرائق إلى تصميم
المنشآت أو عناصرها المكونة بحيث يتم:

- ضمان الأداء السليم للمنشآت خلال مراحل الاستثمار المفترضة باحتمال مقبول.
- تأمين المقاومة اللازمة لكل أشكال الأحمال المحتمل تطبيقها على المنشآت، وكذلك
التشوّهات المرافقة المحتملة، وتحقيق الديمومة الأفضل بدرجة كافية من الأمان.
- يتم تحقيق المتطلبات المذكورة أعلاه من خلال:
- الاختيار المناسب لمواد الإنشاء من حيث الميزات الميكانيكية والفيزيوية - كيميائية وغيرها.
- إجراء الحسابات التصميمية وفق الطرائق المناسبة.
- المراقبة الدورية والمنظمة للمنشآت خلال فترات الإنشاء والاستثمار وغير ذلك.

1-3-2- طرائق الحساب المستخدمة *Used Calculation Methods*:

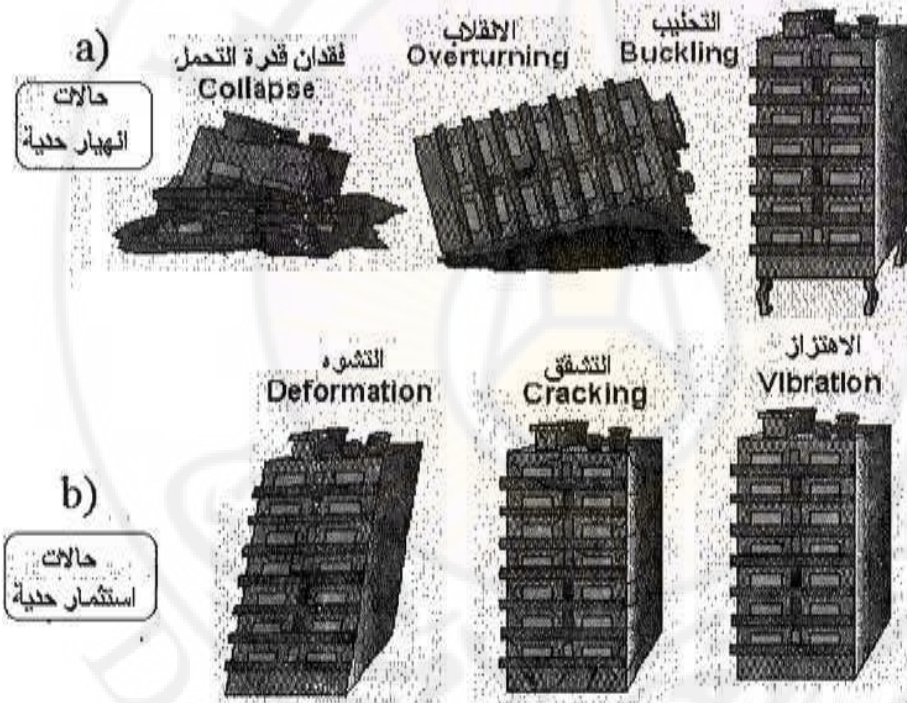
- من الطبيعي أن تكون كل طريقة أحدث أكثر توافقاً مع الأداء الفعلي للعناصر الإنشائية وأكثر
اقتصادية من الطريقة التي سبقتها، مع ضرورة الاختيار الأمثل للطريقة الحسابية المتبعة في
الحالات الخاصة، بغض النظر عن حداثة الطريقة. ومن أهم الطرائق الحسابية المتبعة حسب
ظهورها واعتمادها رسمياً في الكودات الإنشائية (المبدأ العام نفسه):
- طريقة الإجهادات المسموح بها (الطريقة الكلاسيكية أو طريقة إجهادات التشغيل).
 - طريقة التشوّهات اللدنة (طريقة الانكسار)
 - الطريقة الحديثة

يعتمد الكود العربي السوري SAC، في التصميم الإنشائي للمقاطع الخرسانية المسلحة ما
يسميه طريقة حالات الحدود *Limit States Method*، الأمر الذي سيتم الحديث عنه في
الفصول القادمة من حيث الفرضيات الأساسية وتحديد الأحمال والعلاقات الحسابية وعوامل
الأمان وغير ذلك.

1-3-3- حالات الحدود القصوى وفق الكود العربي السوري:

يقصد بالحالة الحدية التي يمكن أن يبلغها أحد المنشآت أو حالة عدم الصلاحية الوضعية التي يكف بها هذا المنشأ أو أحد عناصره أو مجموعة منها أو كلها عن القيام بتأدية الوظيفة أو مجموعة الوظائف المصمم من أجلها، وذلك بسبب فقدان قدرة التحمل أو نتيجة فقدان الاستقرار والصلاحية. وتهدف هذه الطريقة إلى تجنب الوصول إلى أي حالة حدية تصبح فيها شروط الاستثمار الطبيعي غير ممكنة كلياً أو جزئياً، أي:

- التحديد الدقيق للحالات الحدية التي تصبح فيها المنشآت أو عناصرها الإنشائية قابلة للانتهيار أو غير صالحة للاستثمار الطبيعي.
- التحليل الإنشائي لأداء المنشآت في كل حالة حدية وتجنب الوصول إليها.
- الاستفادة من قواعد الإحصاء الرياضي والاحتمالات عند تحديد عوامل الأمان المطلوبة.



الشكل (1-16) أداء الأبنية عند حصول عدد من حالات الحدود فيه مثلاً.

يعتمد الكود العربي السوري، طريقة حالات الحدود الحدية وهي الحدود الحدية للاستثمار والحدود الحدية للانتهيار، وفي هذا الصدد، يبين الشكل (1-16) كيفية أداء الأبنية وفق عدد من حالات حدود الانتهيار وحدود حالات الاستثمار، و فيما يلي عرض سريع لهذه الطريقة،

كونها طريقة تغطي المحاور الأساسية للطرائق السابقة، مع التركيز على حالات الاستثمار الحدية التي يتم بموجبها حساب المقاطع الخرسانية المسلحة في هذا الكتاب. إذ يقصد بالحالة الحدية التي يمكن أن يبلغها أحد المنشآت أو حالة عدم الصلاحية *Unreliability* الوضعية التي يكف بها هذا المنشأ أو أحد عناصره أو مجموعة منها أو كلها عن القيام بتأدية الوظيفة أو مجموعة الوظائف المصمم من أجلها، وذلك بسبب فقدان قدرة التحمل أو نتيجة فقدان الاستقرار والصلاحية. وتهدف هذه الطريقة إلى تجنب الوصول إلى أي حالة حدية تصبح فيها شروط الاستثمار الطبيعي غير ممكنة كلياً أو جزئياً، أي:

- التحديد الدقيق للحالات الحدية التي تصبح فيها المنشآت أو عناصرها الإنشائية قابلة للانهار أو غير صالحة للاستثمار الطبيعي.

- التحليل الإنشائي لأداء المنشآت في كل حالة حدية وتجنب الوصول إليها.

- الاستفادة من قواعد الإحصاء الرياضي والاحتمالات عند تحديد عوامل الأمان المطلوبة.

اعتمد الكود العربي السوري هذه الطريقة مضمناً إياها الحالات الحدية التالية:

1) في نطاق الاستثمار *Serviceability*: تدرس هذه الحالات بهدف تحقيق الاستثمار الطبيعي الأمان للمنشآت وتحقيق الغاية من إنشائها، إذ يمكن أن تفقد المنشآت القدرة على القيام بوظائفها الطبيعية كلياً أو جزئياً لأسباب لا تتعلق بفقدان المقاومة، بل بسبب التشوهات الكبيرة. هنا من المفروض دراسة الحالات حدود الاستثمار الحدية التالية:

أ) حالة حد تشكل التشققات (عدم تجاوز الإجهادات المسموح بها): تدرس هذه الحالة في العناصر المصممة وفقاً لطريقة الإجهادات المسموح بها المذكورة أعلاه، وبحيث لا تتجاوز الإجهادات الناتجة في الضغط وفي الشد القيم المسموح بها في فولاذ التسليح وفي الخرسانة، وذلك من أجل:

- العناصر والقطاعات المعرضة لضغط السائل كوسيلة لتأمين الكتامة المطلوبة *Impermeability* (لا تتوفر إجراءات كفيلة بمنع تسرب السوائل عبر هذه المقاطع).

- المنشآت المعرضة لأحمال ديناميكية (اهتزازية) أو أحمال متكررة تؤدي إلى تفعيل ظاهرة التعب *Fatigue Phenomenon Activation* المعروفة في الفولاذ.

- بعض المنشآت الخاصة التي يطلب تحديد مقاطعها تحت تأثير أحمال الاستثمار *Serviceability Loads* كالمداخن والمنشآت مسبقة الإجهاد، على أن يتم تحقيق هذه المقاطع

على حالات حدود الانهيار، وكذلك عند التحقق من حالات الاستثمار الأخرى (التشقق والسهوم وغير ذلك).

يمكن الاكتفاء بالتحقق من وضعية الإجهادات المسموح بها في الحالات التالية:

+ العناصر المعرضة للانحناء *Bending* والقص *Shear* (مع القتل *Torsion* أو من دونه) تحت تأثير أسوأ الأوضاع لتراكيب الأحمال المطبقة، ما عدا حالة إدخال الأحمال الطارئة الناشئة عن الزلازل *earthquakes* والانفجارات *Explosions* مثلاً.

+ الأعمدة القصيرة المعرضة للضغط البسيط، أو العناصر المضغوطة القصيرة أو الطويلة التي يمكن عداها خاضعة للضغط البسيط، أو العناصر المعرضة لشد أو ضغط لا مركزيين.

+ الأساسات المعرضة للانحناء أو القص.

+ الكمرات العميقة *Deep Beams* والجدران الحاملة *Bearing Walls* وجدران القص *Shear Walls* وما يماثلها، مع اعتماد تأثير الزلازل في الحساب.

+ المنشآت القشرية *Shell Structures*.

على أن تؤخذ $n=15$ عند الحساب في هذه الحالة (في حال عدم تحديدها بدقة).

ب) حالة حد التشقق المعيب *Limit State of Crack Opening*: تؤخذ هذه الحالة لتجنب الأضرار المرتبطة بمظهر التشققات وإمكانية صدأ التسليح *Steel Rusting* بفعل العوامل الكيماوية والرطوبة، ولذلك تم تحديد السعة العظمى للتشققات *Max. Crack Width* كما يلي:

$0.1mm$: الإنشاءات المعرضة لتأثير عوامل ضارة شديدة التأثير على الخرسانة.

$0.2mm$: الإنشاءات الموجودة في العراء والتي يمكن أن تتعرض لتأثير الرطوبة والأبخرة بكميات كبيرة.

$0.3mm$: الإنشاءات العادية المحمية من تأثير الوسط الخارجي.

على أن تؤخذ النسبة المعيارية عادة $n=10$ في هذه الحالة (في حال عدم تحديدها بدقة).

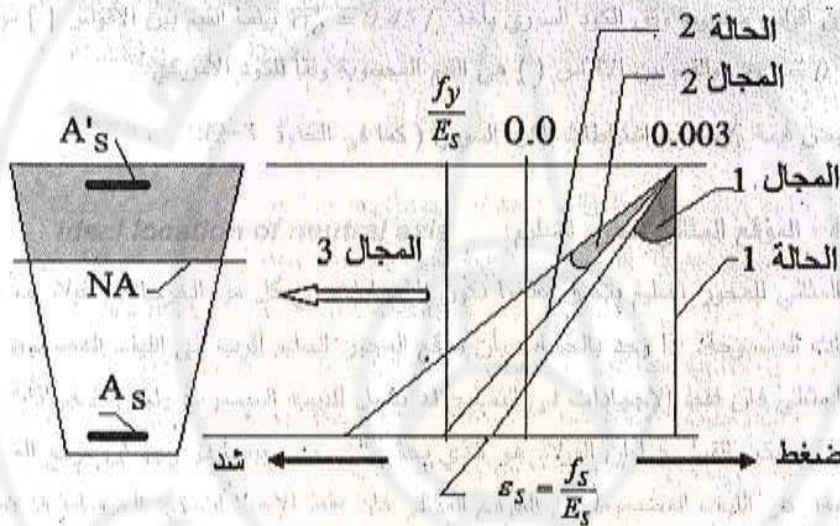
ج) حالة حد التشكل المعيب (حد السهم المعيب) *Limit State of Deflection*: تدرس هذه الحالة لضمان عدم تجاوز السهوم وزوايا الدوران الحدود المسموح بها تحت تأثير أحمال الاستثمار، وهذا له أهمية كبيرة في بلاطات السقوف والأسطح مثلاً. وتؤخذ النسبة المعيارية n كنسبة معامل المرونة في التسليح إلى معامل المرونة في الخرسانة.

2) في نطاق المقاومة *Resistance*: تدرس هنا الحالات التالية:

أ- حالة حد المقاومة القصوى *Ultimate Strength Limit State*:

يجب ألا تتجاوز الأحمال المطبقة القيم العظمى التي تسبب الوصول إلى المقاومات المميزة للخرسانة والتسليح، الأمر الذي قد يسبب فقدان قدرة التحمل كلياً أو جزئياً (حصول الانكسار)، ومن ثم فقدان التوازن الكلي أو الجزئي للمنشأ كجسم صلب، الأمر الذي قد يقود إلى الانهيار المتتالي نتيجة الانكسار الموضعي أو الانهيار الكلي للمنشأ. وقد بين الكود [1] أشكال الانهيار المحتملة في المقاطع الخرسانية المسلحة بتأثير الإجهادات الناظمية *Normal Stresses*

الشكل (17-1): الحالة 1: حالة انهيار العناصر المضغوطة مركزياً (لامركزية القوة المطبقة تساوي الصفر) *Centrically Compressed Members*، حيث يكون مخطط التشوهات النسبية في الضغط موزعاً بانتظام في المقطع وتساوي قيمته في التسليح والخرسانة على السواء 0.003 .



الشكل (17-1) أشكال الانهيار المختلفة

المجال 1: حالة انهيار العناصر المضغوطة لا مركزياً (اللامركزية صغيرة) *Eccentrically Compressed Members*، وكذلك المقاطع الخاضعة للانحناء بتسليح مشدود أكبر من التسليح التوازني، كما سيرد لاحقاً، وتكون قيمة أقصى تشوه في الخرسانة

المضغوطة القيمة 0.003 وفي مركز ثقل التسليح المشدود أقل من النسبة $\frac{f_y}{E_s}$

الحالة 2: حالة الانهيار التوازني *Balanced Failure*، حيث يكون التشوه النسبي الأقصى في مركز ثقل التسليح المشدود مساوياً $\frac{f_y}{E_s}$ ، وأقصى تشوه نسبي في الخرسانة المضغوطة القيمة 0.003 .

المجال 2: حالة انهيار المقاطع الخاضعة للضغط اللامركزي (اللامركزية كبيرة)، أو الانحناء بنسب تسليح على الشد أقل من النسبة التوازنية، حيث أقصى تشوه نسبي في الخرسانة المضغوطة القيمة 0.003 ، وفي مركز ثقل التسليح المشدود أكبر من النسبة $\frac{f_y}{E_s}$ ، ويضاف إلى ذلك حالات أخرى غير مذكورة في الكود.

المجال 3: حالة انهيار العناصر المشدودة *Tensioned Members* مركزياً أو لا مركزياً (اللامركزية صغيرة)، حيث التشوه النسبي في مركزي ثقل التسليح المشدود والمضغوط على السواء $\frac{f_y}{E_s}$ ، وتكون الخرسانة متشققة وتهمل بشكل كامل في الحساب.

أما حالة الشد اللامركزي (اللامركزية كبيرة)، فهي تشبه المجال 4 بفارق وحيد هو أن التسليح المشدود هو الأقرب من نقطة تطبيق قوة الشد، والتسليح المضغوط هو الأبعد عنها.
ب- حالة حد عدم الاتزان *Instable Limit State*:

يجب ألا يصل المنشأ جزئياً أو كلياً إلى الحالة التي يفقد عندها وضعية الاتزان *Stability* بسبب التحنيب الجانبي *Lateral Buckling* في العناصر المضغوطة الطويلة مثلاً، أو نتيجة حدوث التشققات *Cracks* أو تشكل السهوم *Deflections* وزوايا الدوران وغيرها من التشوهات المختلفة.

ج- حالة حد التعب *Fatigue Limit State*: وهي الحالة المرافقة لتأثير الأحمال المتكررة، حيث يعاني العنصر الإنشائي حالة التعب وضعف البنية الداخلية، ومن ثم انخفاض المقاومة والأداء المرسوم له.

بالنسبة لفرضيات الطرائق الحسابية المستخدمة في سياق هذا الكتاب، وما يتعلق ذلك من تفاصيل حول الإجهادات والأحمال المعتمدة وغير ذلك، فسيتم الحديث عنه في الفصول القادمة بالتفصيل.

الفصل الثاني

العناصر الخاضعة للانحناء - الجوائز *Members in Flexure – Beams*

(إعداد: د. م سليمان ناصيف)

1-2- مقدمة

2-2- انحناء الجوائز المتجانسة

2-3- سلوك جوائز من الخرسانة المسلحة عند الانحناء

2-3-1- إجهادات مرنة والمقطع غير متشقق

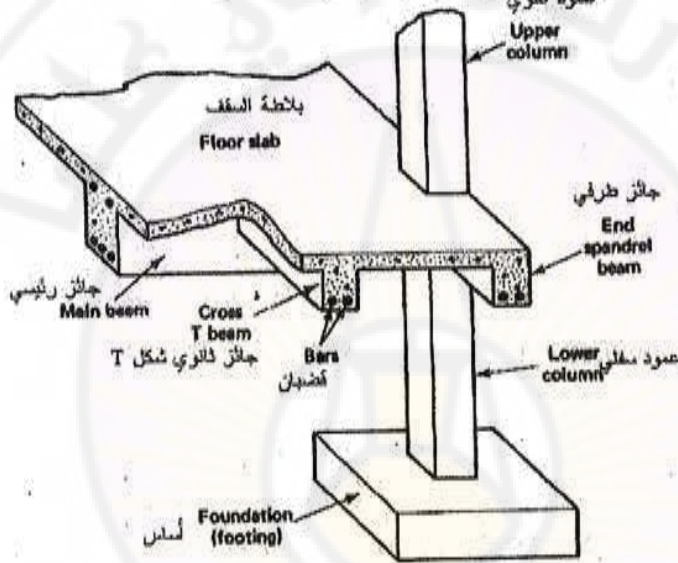
2-3-2 - مثال توضيحي (1)

2-3-3- إجهادات مرنة والمقطع متشقق



1-2- مقدمة Introduction

يمكن تقسيم معظم منشآت الخرسانة المسلحة إلى عناصر معرضة للانحناء *flexural elements* ومنها الجوائز *beams* والبلاطات *slabs* والأساسات *foundations* ، وعناصر معرضة للضغط المحوري *axial loads* (يكون في معظم الأحيان مترافقاً مع انحناء) ومنها الأعمدة *columns* والجدران *walls*. يبين الشكل (1-2) جملة إطارية *frame system* (جائز - عمود) نموذجية من الخرسانة المسلحة، تنتقل الأحمال من بلاطة السقف إلى الجوائز الثانوية ومنها إلى الرئيسية ثم إلى الأعمدة والأساسات.



الشكل (1-2) جملة إطارية (جائز-عمود) نموذجية من الخرسانة المسلحة
Typical reinforced concrete structural framing system

بلاطات السقف Floor slabs

هي العناصر الأفقية الرئيسية التي تنقل الأحمال الميتة والحية إلى العناصر الحاملة. قد تكون هذه البلاطات مصممة *solid slabs* مرتكزة على جوائز، أو بلاطات دون جوائز (بلاطات فطرية *flat slabs*) ترتكز مباشرة على الأعمدة، أو تكون بلاطات مفرغة (هوردي) أو غيرها من البلاطات.

الجوائز Beams

هي العناصر الإنشائية التي تنقل الأحمال من بلاطات الأسقف إلى الأعمدة الحاملة. يتم عادةً صب هذه الجوائز بشكل مستمر *monolithically* مع البلاطات ويكون تسليحها إما على وجه واحد هو الوجه السفلي المشدود وإما على الوجهين العلوي والسفلي. وبما أنها تصب مع البلاطة لذلك تشكل مقاطع بشكل T للجوائز الداخلية أو L عند محيط المبنى.

الأعمدة Columns

هي العناصر الشاقولية الحاملة للحملة الإنشائية للطابق. تتعرض هذه العناصر للضغط *compression* وبترافق في معظم الأحيان مع الانحناء *bending*. ولعناصر الأعمدة الأهمية الأكبر عند دراسة الأمان للمنشأ.

الجدران Walls

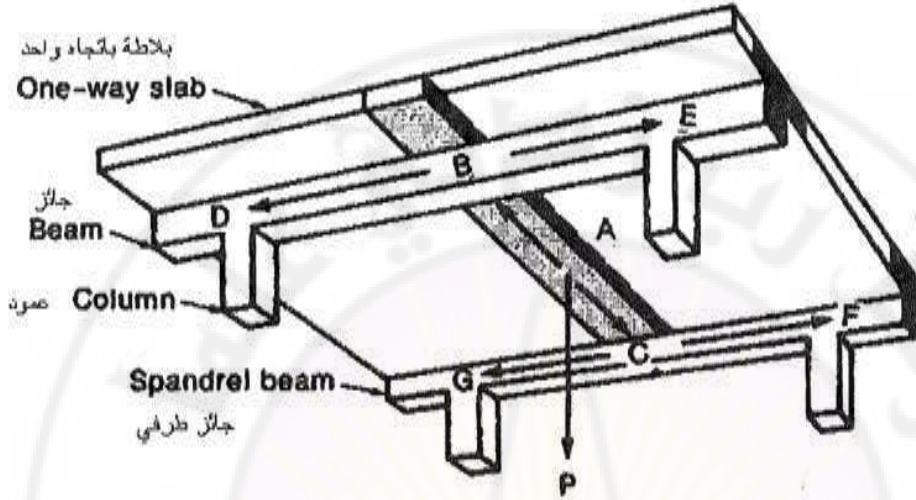
هي عناصر شاقولية قد تكون من الخرسانة المسلحة أو من مواد أخرى كالخرسانة أو الحجر أو غيره. تكون الجدران المسلحة سائدة للتربة خلفها (جدران استنادية *retaining walls*) أو جدران محبطة بالدرج *stairwell walls* أو جدران قص *shear walls* تقاوم الأحمال الأفقية الناتجة عن الرياح والزلازل.

الأساسات Foundations

هي العناصر الإنشائية التي تنقل أحمال المنشأ إلى التربة الحاملة. تكون الأساسات بعدة أشكال أبسطها الأساس المنعزل *isolated footing* المبين بالشكل (2-1) حيث: يعمل كبلطة مقلوبة تنقل الحمولة الموزعة من التربة إلى العمود. كما يوجد أنواع أخرى من الأساسات منها الأساسات المشتركة *combined footings* التي تسند أكثر من عمود واحد، والحصائر *rafts* التي تعمل كبلطة مقلوبة مع جوائز، والأوتاد *piles* التي تنقل الحمولات إلى طبقات التربة القاسية (الصخر).

يمكن أخذ البلاطة المستندة إلى الجوائز المبينة في الشكل (2-2) كمثال نموذجي للعناصر المنعطفة. في هذا الشكل يلاحظ بأنه بعد تطبيق الحمولة P في النقطة A فإن البلاطة ستقاوم هذه الحمولة بواسطة شريحة (مهشرة في الشكل) ثم تنتقل ردود أفعال البلاطة إلى الجوائز عند النقاط B و C، الجوائز تقاوم ردود أفعال البلاطة وتنقلها إلى الأعمدة عند النقاط D, E, F, &

G، وبالتالي تتعرض الأعمدة إلى حمولات محورية ناتجة عن الجوائز. في الشكل (2-2) تم افتراض بأن حمل البلاطة ينتقل باتجاه واحد، ومن ثم تسمى البلاطة -بلاطة باتجاه واحد- *one-way slab*، لو لم توجد الجوائز فإن البلاطة ستنتقل الحمل إلى الأعمدة في الاتجاهين، ولذلك تسمى البلاطة عندها بلاطة باتجاهين *Two-way slab*.



الشكل (2-2) انحناء بلاطة باتجاه واحد *One way flexure*

2-2- انحناء الجوائز المتجانسة *Bending of Homogenous Beams*

يعرف الجائز بأنه عنصر إنشائي يقاوم بالإضافة لوزنه الذاتي الأحمال الخارجية المطبقة عليه، فتنشأ فيه عزوم وقوى قاصة داخلية. الجوائز الخرسانية المسلحة هي عناصر غير متجانسة تتكون من مادتين مختلفتين تماماً هما الخرسانة وال فولاذ، ومن ثم تكون طرائق تحليل هذه الجوائز مختلفة عن الجوائز المصنوعة بشكل كامل من الفولاذ أو الخشب أو أي مادة إنشائية أخرى. ومع ذلك فإن المبادئ الأساسية المطبقة تكون متشابهة، وهذه المبادئ هي: في أي مقطع عرضي توجد قوى داخلية يتم تحليلها إلى مركبات ناظرية ومماسية للمقطع. المركبات الناظرية على المقطع هي إجهادات الانحناء *bending stresses* (تكون شداً في جهة من المحور السليم وضغطاً في الجهة الأخرى)، ومهمتها مقاومة عزم الانحناء المطبق على المقطع. أما المركبات المماسية للمقطع فهي إجهادات القص *shear stresses* تقاوم القوى العرضية أو القاصة.

يبين الشكل (3-2) جانزاً بسيطاً معرضاً إلى حمولة موزعة بانتظام w وحمولة مركزة P ، نتيجة تطبيق الأحمال ينشأ عزم انحناء في الجانز موزع كما في الشكل (b-3-2).
 يقاوم العزم الخارجي بواسطة عزم داخلي (الشكل c-3-2) ينشأ هذا العزم الداخلي عن مزدوجة مكونة من قوة ضاغطة C وقوة شادة T يبعد بعضها عن بعض مسافة Z تسمى ذراع المزدوجة (الشكل d-3-2).

من معادلات التوازن نجد:

$$C - T = 0 \Rightarrow C = T \quad (2-1)$$

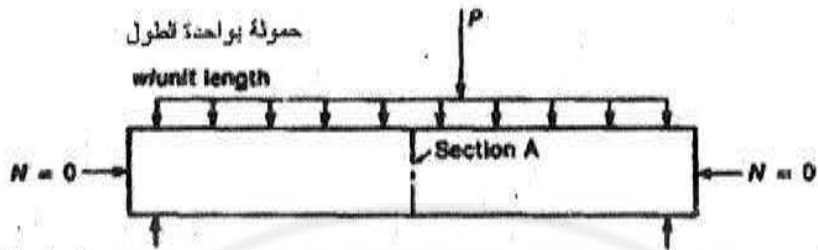
بحساب العزم حول نقطة تطبيق قوة الضغط (أو قوة الشد) نجد:

$$M = T \cdot Z \quad (2-2a)$$

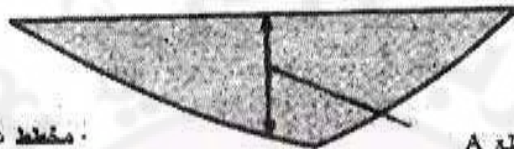
$$M = C \cdot Z \quad (2-2b)$$

بما أن $C = T$ ، فإن المعادلتين (2-2) متماثلتان.

تم الحصول على المعادلات أعلاه من التوازن وهي معادلات عامة يمكن تطبيقها على الجوائز المصنوعة من الفولاذ أو الخشب أو الخرسانة المسلحة.

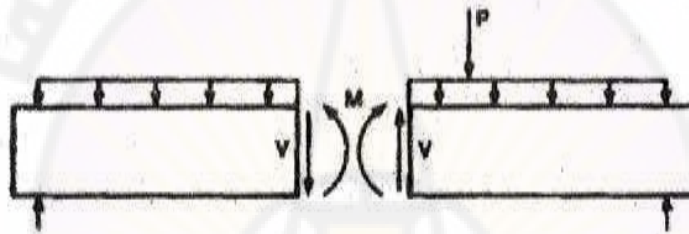


a) جثز

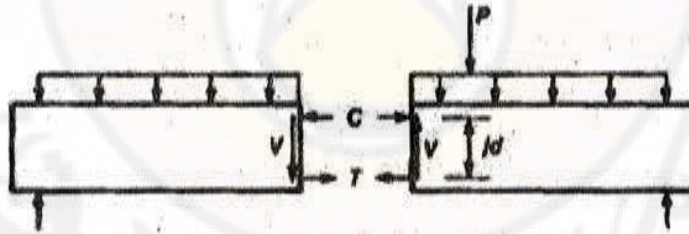


b) مخطط عزم الانحناء

عزم في المقطع A



c) مخطط الجسم الطليق مبيناً العزم وقوة القص



d) مخطط الجسم الطليق مبيناً العزم الداخلي كثنائية قوة ضغط وقوة شد

الشكل (2-3) القوى الداخلية في جازل *Internal forces in a beam*

الفرضيات الأساسية الخاصة بالانحناء هي:

- 1- المقطع العرضي الذي كان مستوياً قبل الانحناء يبقى مستوياً بعده، وهذا يعني ان التشوهات النسبية في الجائز فوق وتحت المحور السليم تكون متناسبة مع المسافة عن هذا المحور.
- 2- إجهاد الانحناء f عند أي نقطة يتعلق بالتشوه النسبي عند هذه النقطة بعلاقة معطاة بمنحني الإجهاد- التشوه للمادة كما هو مبين بالشكل (2-4-2) للجوائز المصنوعة من مادة متجانسة. من هذا الشكل نلاحظ أنه إذا كان التشوه الأعظمي في الألياف الخارجية الأبعد للمقطع أقل من القيمة ϵ_p يبقى الإجهاد يتناسب بشكل خطي مع التشوه للمادة، وتزداد الإجهادات الضاغطة والشادة على طرفي المحور السليم بشكل خطي مع بعدها عن هذا المحور كما في الشكل (2-4-2) (b).

أما إذا تجاوز هذا التشوه الأعظمي القيمة ϵ_p فإن الوضع هنا يصبح مختلفاً، ففي الأجزاء من المقطع العرضي حيث: $\epsilon > \epsilon_p$ فإن الإجهادات تصبح غير متناسبة خطياً مع التشوهات، وتكون قيمة الإجهادات عند منسوب معين f_p مثلاً (انظر الشكل (2-4-2) (c) متعلقة بالتشوه ϵ_p عند نفس المنسوب وفق منحني الإجهاد - التشوه للمادة. بمعنى آخر من أجل تشوه ما للجائز تكون قيمة الإجهاد هي نفسها المعطاة في منحني الإجهاد- التشوه للمادة.

- 3- عندما تكون الإجهادات في الألياف الخارجية أقل من f_p فإن الجائز يعمل ضمن مجال المرونة كما في الشكل (2-4-2) (b). في هذه الحالة يكون لدينا:

أ- يمر المحور السليم من مركز ثقل المقطع العرضي

ب- تتزايد قيمة إجهادات الانحناء بشكل خطي مع بعدها عن المحور السليم، وتكون قيمتها العظمى عند الليف الأبعد، وتعطى عند أي نقطة بالعلاقة:

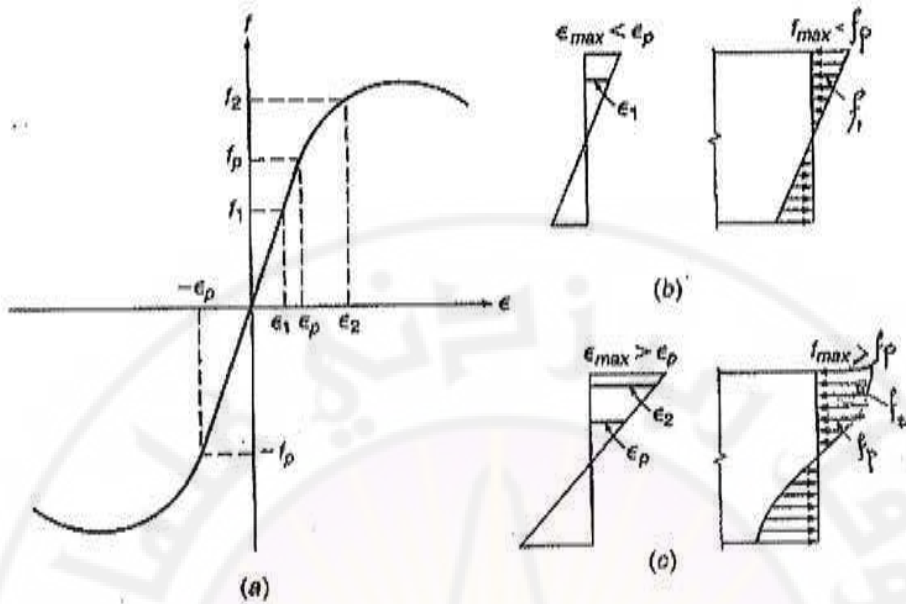
$$f = \frac{M}{I} y \quad (2-3a)$$

حيث:

f - إجهاد الانحناء على مسافة y من المحور السليم

M - عزم الانحناء الخارجي على المقطع

I - عزم العطالة *moment of inertia* للمقطع العرضي حول المحور السليم



الشكل (4-2) توزيع الاجهادات المرنة واللامرنة في الجوائز المتجانسة
Elastic and inelastic stress distribution in homogeneous beams

ويكون إجهاد الانحناء الأعظمي عند الألياف الخارجية مساوياً إلى:

$$f_{max} = \frac{M c}{I} = \frac{M}{S} \quad (2-3b)$$

حيث: c - المسافة من المحور السليم لليف الخارجي
 $S = I/c$ - معامل المقطع *section modulus* للمقطع العرضي

3-2- سلوك جانز من الخرسانة المسلحة عند الانحناء

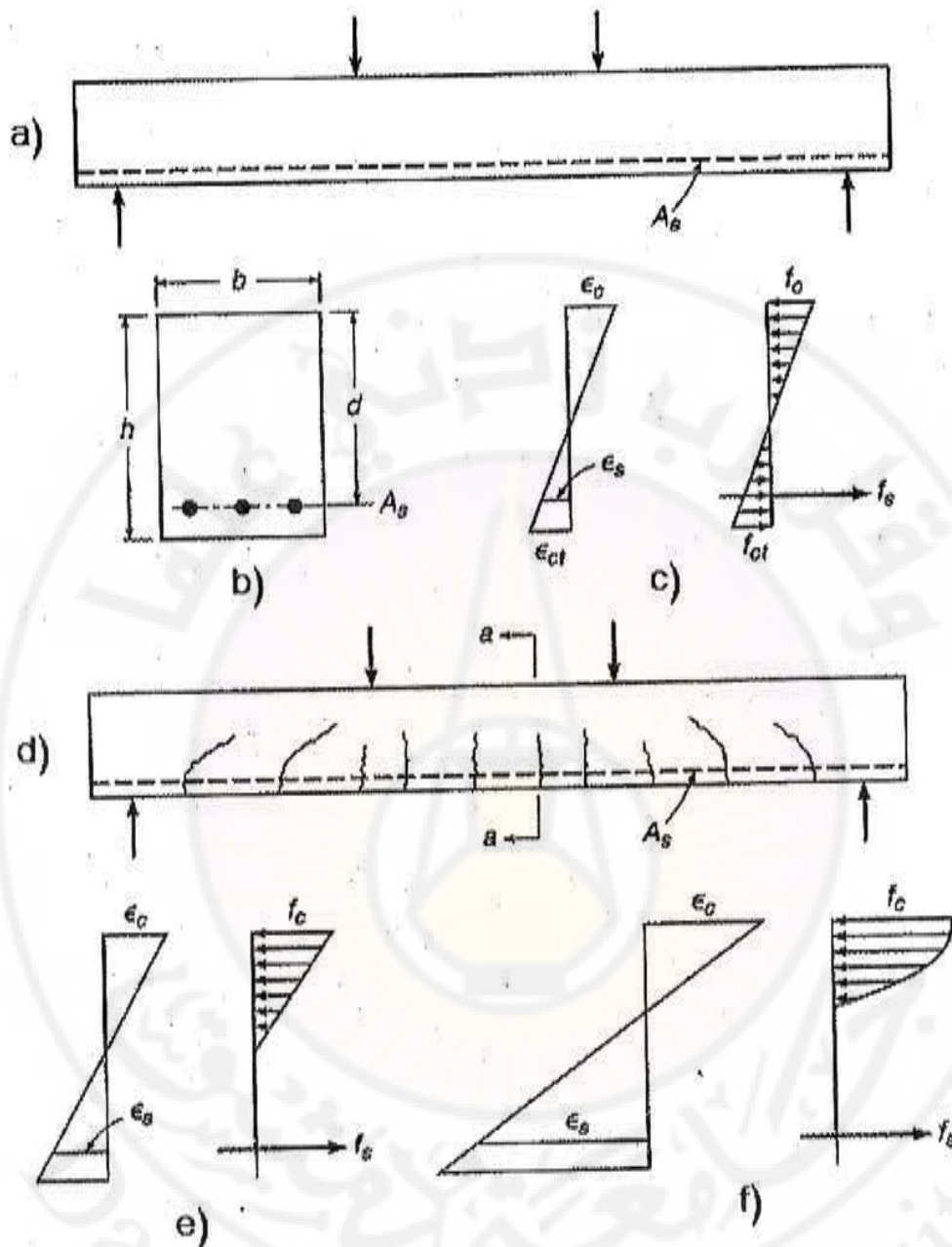
Behavior of Reinforced Concrete Beam in Bending

يعد استخدام الجوائز المصنوعة من الخرسانة فقط كعناصر تعمل على الانحناء غير مناسب، وذلك لأن مقاومة الشد نتيجة الانحناء (معامل الانقطاع *Modulus of rupture*) للخرسانة تساوي نسبة صغيرة من مقاومته على الضغط. ومن ثم فإن هذه الجوائز تنهار عند الوجه المشدود قبل بكثير من وصول الخرسانة عند الوجه المضغوط لقيمة الضغط التصميمية.

لهذا السبب يتم وضع قضبان تسليح عند الوجه المشدود قريبة من أبعد ليف مشدود وبحيث يحقق اشتراطات الحريق والصدأ للفولاذ. يتم مقاومة الشد الناتج عن الانحناء بفولاذ التسليح بينما تكون الخرسانة قادرة وحدها على مقاومة الضغط. يتم ضمان العمل المشترك بين الخرسانة والفولاذ إذا تحقق عدم حصول أي انزلاق نسبي بينهما، وهذا يمكن أن يتحقق باستخدام قضبان محلزنة بمقاومة تماسك عالية أو عند الضرورة استخدام ارساء *anchorage* خاص عند نهايات القضبان.

يبين الشكل (2-5) جانزاً بسيطاً من الخرسانة المسلحة مقطعه مستطيل مع العلم بأنه من الشائع استخدام مقاطع بأشكال مختلفة في معظم المنشآت الخرسانية. يتعرض هذا الجانز بالإضافة لوزنه الذاتي الى حملين مركزيين في الأعلى. عندما تزداد قيمة الحمولة المطبقة بشكل تدريجي من الصفر الى القيمة المسببة للانتهيار فإن ثلاث مراحل يمكن ملاحظتها على سلوك الجانز مبيّنة بالشكل.

- 1- في البداية عندما تكون قيمة الحمولة صغيرة نسبياً فإن إجهاد الشد في الخرسانة يبقى أقل من قدرة تحمل المقطع على الشد (معامل الانقطاع) ويعمل المقطع الخرساني بكامل ارتفاعه ولا تحدث أي شقوق في الجانز. يقاوم المقطع الإجهادات الضاغطة أعلى المحور السليم والشادة أسفله. في هذه المرحلة تكون التشوهات صغيرة، ويتشوه التسليح المشدود بنفس قيمة تشوه الخرسانة المجاورة. يبين الشكل (2-5-c) توزيع الإجهادات والتشوهات في الخرسانة والفولاذ على كامل ارتفاع المقطع حيث تتناسب هذه الإجهادات بشكل خطي مع التشوهات. في هذه المرحلة تكون إجهادات الضغط في الخرسانة صغيرة نسبياً (أقل بكثير من $0.5f_c$).
- 2- بزيادة الحمولات المطبقة تصل الإجهادات الشادة في خرسانة أسفل الجانز إلى قدرة تحمل الخرسانة على الشد وتبدأ عندها الشقوق بالظهور. تنتشر هذه الشقوق بشكل سريع للأعلى باتجاه المحور السليم الذي يستمر بالانزياح للأعلى مع زيادة التشققات الحاصلة، يبين الشكل 5d شكل وتوزيع هذه الشقوق في الجانز. في الجوائز المصممة بشكل جيد يكون عرض هذه الشقوق صغير نسبياً (شقوق شعرية *Hairline cracks* عرض أكبر شق بحدود 0.15mm) وهي مقبولة من وجهة نظر الصدأ والمظهر، ولكن وجودها يؤثر بشكل كبير في سلوك الجانز تحت تأثير الأحمال.



الشكل (5-2): سلوك جوائز من الخرسانة المسلحة تحت تأثير حمولة متزايدة
Behavior of reinforced concrete beam under increasing load

من الواضح أنه في مقطع متشقق مثل المقطع a-a المبين بالشكل (2-5-d) أن الخرسانة لا تنقل أي إجهادات شادة بعد التشقق وتنتقل قوة الشد من الخرسانة المتشققة إلى الفولاذ، وتخرج الخرسانة المتشققة عن العمل، ويصغر المقطع الخرساني الفعال المقاوم للعزم، كما هو مبين في مخطط توزيع الإجهادات في الشكل (2-5-e)، كما تنقص قساوة المقطع، ويبقى إجهاد الفولاذ ضمن حد المرونة. التشققات التي تحدث هنا هي المتوقع حدوثها أثناء تطبيق الأحمال الاستثنائية اليومية. في هذه المرحلة لا تتجاوز الإجهادات في الخرسانة تقريباً القيمة $f'_c/2$ ، ويبقى مخطط الإجهادات والتشوهات قريباً من الخطي.

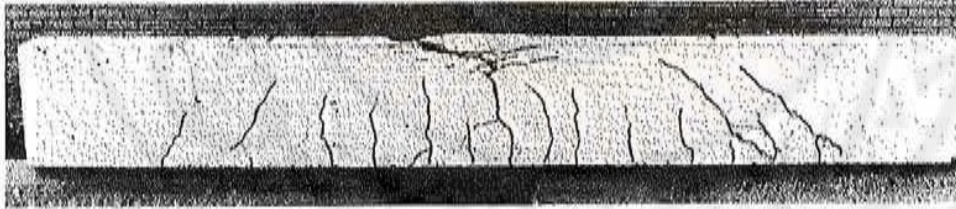
3- بزيادة الحملات المطبقة بشكل أكبر تزداد الإجهادات والتشوهات، وتصبح غير متناسبة خطياً، وتعطى العلاقة اللاخطية *nonlinear* بين الإجهادات والتشوهات بمنحني الإجهاد - التشوه للخرسانة، ومن ثم يكون توزيع الإجهادات على الجزء المضغوط للخرسانة بنفس شكل هذا المنحني، يبين الشكل (2-5-f) توزيع التشوهات والإجهادات عند قيمة حمولة قريبة من الحمولة الحدية. في هذه المرحلة يحصل انهيار للجائز بأحد أسلوبين: عند استخدام كمية معتدلة من التسليح، وعند وصول إجهاد الشد في الفولاذ إلى حد السيلان، يبدأ عندها التشوه بالازدياد، ويستطيل الفولاذ بشكل كبير، وتصبح قيمة التشوه أكبر من قيمة تشوه السيلان ϵ_s ، ويبدأ الجائز بالانحناء بشكل متسارع. ويكون المحور السليم قد ارتفع للأعلى، وبدأت الشقوق بالانتشار للأعلى إلى أن يحصل كسر أو تحطم في خرسانة منطقة الضغط في أعلى الجائز، ويعتبر عندها الجائز بأنه انهيار، وهذا يحدث عند حمولة أكبر بقليل من الحمولة المسببة لسيلان الفولاذ. هذا النوع من الانهيار هو انهيار تدريجي سبقه علائم ومؤشرات مرئية وعبوب ظاهرة مثل التوسع والانتشار الكبير للشقوق وزيادة ملحوظة في السهم.

وعندما يتم استخدام كمية كبيرة من التسليح (أو كمية معتدلة من الفولاذ ذي المقاومة العالية جداً)، فإن الخرسانة قد تصل إلى مقاومتها التصميمية قبل أن يبدأ الفولاذ بالسيلان، وتحطم الخرسانة المضغوطة عند تشوه نسبي قيمته تتراوح بين 0.003 و 0.004. هذا النوع من الانهيار على الضغط يكون مفاجئ وذو طبيعة انفجارية ويحدث بدون انذار مسبق. لذلك يكون من المناسب جداً تصميم أبعاد وتسليح الجائز بحيث يكون الانهيار نتيجة سيلان الفولاذ بدلاً من تحطم الخرسانة.

يبين الشكل (2-6) انهيار جانز بسيط على الانحناء. يمكن القول أنه على الرغم من أن الخرسانة هي مادة غير لدنة، قد تظهر الخرسانة المسلحة لدونة عالية قبل الانهيار (وذلك نتيجة للتشوه الكبير الذي يحدث في الفولاذ عند دخوله مرحلة السيلان ومن ثم حدوث انحناء كبير في الجانز قبل الانهيار).

عملياً يتم حساب مقاطع الخرسانة المسلحة بإحدى طريقتين: إما باعتبار الحمل المتوقع في مرحلة الاستثمار وإجراء الحسابات على اعتبار إن مخطط توزيع الإجهادات الضاغطة في الخرسانة هو خطي- هذه الطريقة تسمى طريقة إجهادات التشغيل *Working stress design* (وتسمى أيضاً طريقة المرونة أو الطريقة الكلاسيكية)، وهي موافقة للمرحلة من الحمولة المبينة بالشكل (2-5-e)، أو بإجراء الحسابات باعتبار مرحلة الانهيار (الشكل 2-5-f)، وهي حالة الأحمال أكبر من المتوقعة في مرحلة الاستثمار (الأحمال المصعدة) ثم يتم تحقيق المقطع على السهم والتشقق في مرحلة الاستثمار- هذه الطريقة تدعى طريقة حالات الحدود *Limit states design method*.

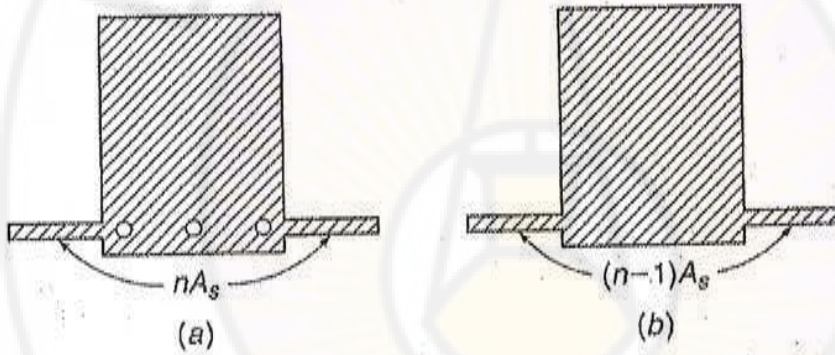
سيتم في هذا الكتاب شرح طريقتي التصميم المذكورتين مع التركيز على طريقة حالات الحدود كونها الطريقة الأحدث والأكثر انتشاراً.



الشكل (2-6) انهيار جانز بسيط على الانحناء
Simply supported beam in flexural failure

2-3-1- إجهادات مرنة والمقطع غير متشقق *Stress Elastic and Section Uncracked*

تكون الإجهادات الشادة في الخرسانة أصغر من معامل الانقطاع فلا تحدث أي شقوق شد، ويكون مخطط توزيع الإجهادات والتشوهات كما في الشكل (2-5-2) وهو نفسه لحالة الجانز المرن المتجانس، الاختلاف الوحيد هنا هو وجود فولاذ التسليح. في المجال المرن فإنه من أجل أي قيمة للتشوه يكون الإجهاد في الفولاذ يساوي n مرة ما هو في الخرسانة. يمكن الاستفادة من هذه الحقيقة في الحسابات وذلك باستبدال المقطع العرضي المكون من الخرسانة والفولاذ بمقطع تخيلي مكون من الخرسانة فقط. في هذا المقطع المكافئ *transformed section* يتم استبدال مساحة الفولاذ الفعلية بمساحة مكافئة من الخرسانة تساوي nA_s متوضعة عند منسوب التسليح. يبين الشكل (2-7) المقطع المكافئ غير المتشقق الممثل للجانز في الشكل (2-5-2b).



الشكل (2-7) المقطع المكافئ لجانز غير متشقق
Uncracked transformed beam section

بعد أن يتم الحصول على المقطع المكافئ يتم تحليل الجانز بتطبيق طرائق التحليل العادية للجانز المرنة المتجانسة، حيث يتم حساب خصائص المقطع (موقع المحور السليم، عزم العطالة، معامل المقطع وغيره)، وحساب الإجهادات بالمعادلتين (2-3).

2-3-2- مثال توضيحي:

جائز مقطعه مستطيل مبين بالشكل (2-5-b) أبعاده $d=60cm$ ، $h=65cm$ ، $b=25cm$ مسلح بقضبان $3\Phi 25$ ($A_s=14.37cm^2$) ، المقاومة الأسطوانية للخرسانة $f'_c=20MPa$ ومقاومة الشد على الانحناء تساوي $2.4MPa$ ، إجهاد السيلا للفلواز $f_y=420MPa$.
تؤخذ قيم معامل المرونة للفلواز والخرسانة: $E_s=2.1 \times 10^5 MPa$ و $E_c=2.1 \times 10^4 MPa$ المطلوب إيجاد الإجهادات الحاصلة نتيجة تطبيق عزم مقداره $M=50KN.m$
الحل:

$$n = E_s / E_c = 2.1 \times 10^5 / 2.1 \times 10^4 = 10$$

ومن ثم للحصول على المقطع المكافئ غير المتشقق يتم إضافة مساحة من الخرسانة مقدارها $(n-1)A_s = 9 \times 14.37 = 129.33 cm^2$ الشكل (2-7-b).

- نحسب موقع المحور السليم (بوضع العزم الستاتيكي حول المحور السليم = 0)

$$\frac{1}{2} b x^2 - \frac{1}{2} b (h-x)^2 - (n-1) A_s (d-x) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{25}{2} x^2 - \frac{25}{2} (65-x)^2 - 129.33(60-x) = 0$$

بالحل نجد $x=34.5cm$

- نحسب عزم عطالة المقطع حول المحور السليم:

$$I = \frac{b x^3}{3} + \frac{b (h-x)^3}{3} + (n-1) A_s (d-x)^2$$

$$I = \frac{25 x^3}{3} + \frac{25 (65-x)^3}{3} + 129.33(60-x)^2 = 662732.25 cm^4$$

- نحسب إجهاد الضغط في الخرسانة عند الليف الأعلى من العلاقة:

$$f_c = \frac{M}{I} x = \frac{50 \times 10^6}{6627322500} 345 = 2.6 MPa$$

- ونحسب إجهاد الشد في الخرسانة عند الليف الأسفل من العلاقة:

$$f_{ct} = \frac{M}{I} (h-x) = \frac{50 \times 10^6}{6627322500} 305 = 2.3 MPa$$

بما أن هذه القيمة هي أقل من مقاومة الشد على الانحناء المعطاة فلن تحصل أي شقوق شد في المقطع، ويكون الحساب باعتماد مفهوم المقطع المكافئ غير المتشقق صحيح.

- نحسب إجهاد الشد في الفلواز من العلاقة:

$$f_s = n \frac{M}{I} (d - x) = 10 \frac{50 \times 10^6}{6627322500} 255 = 19.24 \text{ MPa}$$

بمقارنة f_s و f_c بالمقاومة الأسطوانية للخرسانة وحد السيلان للفولاذ على التوالي نجد بأنه عند هذه المرحلة فإن الإجهادات الفعلية تكون صغيرة جداً.

2-3-3- إجهادات مرنة والمقطع متشقق *Stress Elastic and Section Cracked*

عندما يتجاوز إجهاد الشد f_c قيمة معامل المقطع فإن الشقوق تبدأ بالتشكل كما في الشكل (2-5-d). إذا كان إجهاد الضغط في الخرسانة تقريباً أقل من $0.5f_c$ ولم يصل الإجهاد في الفولاذ إلى السيلان فإن المادتين تستمران بالسلوك المرن أو بشكل قريب جداً من ذلك. هذه الحالة تحدث عموماً في المنشآت عندما تتعرض لشروط أحمال الاستمرار العادية. في هذه المرحلة وللتبسيط يتم افتراض بان شقوق الشد تنتشر في كل اتجاه متجهة إلى المحور السليم، وإن المقاطع المستوية قبل الانحناء تبقى مستوية بعده، ويكون توزيع الإجهادات والتشوهات هو المبين بالشكل (2-5-c). من أجل حساب الإجهادات والتشوهات يمكن استخدام مفهوم المقطع المكافئ، مع الأخذ بالاعتبار حقيقة أن كل الخرسانة المعرضة للشد يفترض بأنها قد تشققت، ومن ثم خرجت عن العمل. يتم تحليل المقطع وحساب الإجهادات وغيرها في هذه الحالة، وذلك عند دراسة طريقة إجهادات التشغيل.

الفصل الثالث

تصميم المقاطع المعرضة للانحناء بطريقة إجهادات التشغيل (طريقة المرونة)

Design of Sections in Bending by Working Stress Method

(إعداد: د. م. سليمان ناصيف)

1-3- مقدمة

2-3- الفرضيات الأساسية في التصميم

3-3- الإجهادات المسموح بها

1-3-3 وفق الكود السوري

2-3-3 الإجهادات المسموح بها وفق الكود الأمريكي ACI

4-3- تحليل المقاطع المستطيلة أحادية التسليح

1-4-3 مقدمة

2-4-3 حالة التحقيق

3-4-3 حالة التصميم

4-4-3 الموقع المثالي للحدود السليم

5-4-3 العزم الأعظمي للمقطع بتسليح أحادي

6-4-3 مثال توضيحي

7-4-3 استعمال الجداول

5-3- حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح

1-5-3 مقدمة

2-5-3 تصميم المقاطع ثنائية التسليح

3-5-3 تحقيق المقاطع ثنائية التسليح

3-6- أمثلة على المقاطع المستطيلة الأحادية والثنائية التسلية

مثال (1): (تسلية أحادي - تحقيق وإيجاد العزم الأعظم)

مثال (2): (تسلية أحادي - تصميم)

مثال (3): (تسلية أحادي - تصميم جزئي)

مثال (4): (تسلية أحادي - مقطع مثالي)

مثال (5): (تسلية ثنائي - تحقيق وإيجاد العزم الأعظم)

مثال (6): (تسلية ثنائي - تصميم جزئي)

مثال (7): (يحلّه الطالب)

مثال (8): (يحلّه الطالب)

3-7- حساب الجوائز ذات المقاطع بشكل T

3-7-1 مقدمة

3-7-2 العرض الفعال لجناح الضغط

3-7-3 تحقيق المقاطع بشكل T

3-7-4 العزم المقاوم للمقاطع بشكل T

3-8- أمثلة على المقاطع بشكل T

3-1- مقدمة Introduction

كما ذكرنا في الفصل السابق، تعتمد هذه الطريقة في تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة على اعتبار الأحمال المتوقعة في مرحلة الاستثمار، وباعتبار أن مخطط توزيع إجهادات الضغط في الخرسانة هو خطي، ومن ثم اعتبار العلاقة خطية بين الإجهادات والتشوهات، مع إهمال الخرسانة المشدودة.

من أجل أخذ احتمال زيادة الأحمال المطبقة عن الأحمال الاستثمارية، تأخذ هذه الطريقة عوامل أمان كبيرة في التصميم، حيث يتم تخفيض مقاومة الخرسانة في بعض الحالات إلى $0.45f_c$ وتخفيض مقاومة الفولاذ إلى $0.55f_y$. في هذه الطريقة لا يتم أخذ مرحلة الانكسار بعين الاعتبار، وبشكل عام تعطي هذه الطريقة تقريباً نفس نتائج طريقة حالات الحدود، وذلك عندما تكون كمية التسليح المشدود المستخدمة هي بحدود نصف الكمية العظمى المسموحة في الطريقة الحدية. بقيت هذه الطريقة معتمدة في التصميم في الولايات المتحدة الأمريكية حتى منتصف الستينات، ثم الانتقال بعدها إلى طريقة أخرى أكثر دقة هي طريقة حالات الحدود *limit states design*. لقد بقيت طريقة إجهادات التشغيل موجودة في الكود الأمريكي ACI حتى العام 1971، حيث تم بعد ذلك نقلها إلى الهامش بطريقة بديلة *alternative method* سمح باستخدامها حتى الكود الصادر عام 1999، أما في الكود الأمريكي الصادر عام 2002 وما صدر بعده من كودات فقد تم حذف هذه الطريقة من الملحق. لذلك ننوّه إلى أنه عندما يتم ذكر الكود الأمريكي في هذا القسم من الكتاب فيكون المقصود هو الكودات ACI للعام 1999 وما قبله، ما لم يتم ذكر خلاف ذلك.

لقد بقيت هذه الطريقة معتمدة في الكود العربي السوري وقد اعتبرها كحالة حد من حالات حدود الاستثمار ودعاها حالة حد تجاوز الإجهادات المسموحة، أي إن الكود السوري أدخل هذه الطريقة ضمن طريقة حالات الحدود، ثم أعطى للمهندس المصمم الخيار بتصميم عناصر الجوائز المعرضة للانحناء والفتل وتصميم الأعمدة المعرضة للضغط أو الشد المجوري والضغط اللامركزي، إما باستخدام هذه الطريقة (أي باستخدام حالة حد تجاوز الإجهادات) أو باستخدام طريقة حالات الحدود.

3-2- الفرضيات الأساسية في التصميم

1. المقاطع المستوية قبل الانحناء (الانعطاف) تبقى مستوية بعده (فرضية برنولي)، أي أن التشوهات في الخرسانة تكون موزعة بشكل خطي على المقطع، وتتناسب هذه التشوهات في كل من الخرسانة والفولاذ مع بعدها عن المحور السليم.
 2. تسلك الخرسانة والفولاذ سلوك المواد المرنة المتجانسة، أي يمكن تطبيق قانون هوك لكل من الخرسانة والفولاذ (يتناسب الإجهاد مع التشوه)، وهذا الافتراض يقود إلى الشكل المثلي لمخطط الإجهادات في منطقة الضغط. (في الواقع فإن فرضية أن الإجهاد يتناسب مع التشوه صحيحة عندما تكون الإجهادات في الخرسانة المضغوطة تقريباً أقل من نصف المقاومة على الضغط f'_c بعد 28 يوم).
 3. يتم إهمال عمل الخرسانة في منطقة الشد (أي يعتبر المقطع متشققاً بالكامل)، ويتحمل الفولاذ وحده كل إجهادات الشد في المقطع.
 4. تعطى النسبة المعيارية بين عامل مرونة الفولاذ وعامل مرونة الخرسانة قيمة ثابتة $n = E_s / E_c$. أي إن الإجهادات في التسليح مساوية n مرة قيمة الإجهادات في الخرسانة المحيطة به، وهذا يسمح باستخدام مفهوم المقطع الخرساني المكافئ *Transformed Section* بدلاً من المقطع الفعلي، إذ يتم استبدال مساحة مقطع التسليح بمساحة مكافئة من الخرسانة تساوي nA_s .
- في الكود السوري تم أخذ $n=15$ عند التصميم وفق هذه الطريقة، ويسمح بتخفيضها لتصبح $n=12$ وذلك عندما تكون $f'_c > 25MPa$.
- في الكود الأمريكي *ACI* تؤخذ قيمة n بالحساب كما يلي:
- بأخذ $E_s = 200000MPa$ و $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ فتكون القيمة هي $n=10$ من أجل $f'_c = 18MPa$ وتتنقص كلما ازدادت f'_c لتصبح $n=7$ من أجل $f'_c = 35MPa$.
5. يفترض أن سلامة العناصر تعتبر مؤمنة من حيث المقاومة إذا لم تتجاوز الإجهادات القصوى في كل من الخرسانة والفولاذ الحدود القصوى المسموح بها $\bar{\sigma}_c$ وهذه الحدود هي كما في الفقرة التالية.

3-3- الإجهادات المسموح بها

1-3-3- وفق الكود السوري

• حالة العناصر المعرضة للانحناء:

(أ) في الخرسانة:

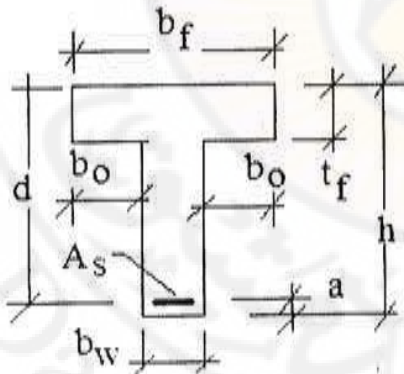
- في المقاطع المستطيلة لا يزيد الضغط على $0.55f'_c$ (بفضل أخذه لا يزيد على $0.45f'_c$ لتجنب الحصول على مقاطع غير اقتصادية مزدحمة بالتسليح).

- لا يزيد الضغط في المقاطع بشكل T (الشكل 1-3)، التي يكون فيها $t_f \geq 0.4d$ (مهما كان عرض الجناح b_f) على $0.55f'_c$.

- لا يزيد الضغط في المقاطع T التي لا يتجاوز عرض جناح الضغط فيها b_o من كل جهة، مرتين سمك الجناح t_f على $0.50f'_c$.

- في المقاطع بشكل T التي يتجاوز عرض جناح منطقة الضغط من كل جهة b_o مرتين سمك الجناح t_f ، ولا يتجاوز 6 مرات هذا السمك، تؤخذ قيمة الإجهاد المسموح به عند أقصى ليف مضغوط للقطاع من الجدول (1-3) تبعاً للنسبة $\frac{b_o}{t_f}$.

- ينوه عند حساب المقاطع المجنحة *Flanged Sections*، بالأقل العزم المقاوم لها عن العزم المقاوم للمقطع المستطيل بإهمال الجناح، وبافتراض الإجهاد المسموح به مساوياً إلى القيمة غير المخفضة والبالغة $0.55f'_c$.



الشكل (1-3) الرموز المستخدمة للمقطع T.

- في القطاعات المتناظرة الأخرى: $0.55f'_c$.

- ينوه هنا أيضاً إلى أنه من المفضل ألا يزيد الإجهاد المسموح به على الضغط في الخرسانة في المقاطع الخاضعة للانحناء البسيط على $0.45f'_c$ عند الاضطرار (لتجنب الحصول على مقاطع غير اقتصادية مزدحمة بالتسليح).

الجدول (1-3) الإجهاد المسموح به في الخرسانة للمقاطع حرف T

$\frac{b_o}{l_f}$	≤ 2	3	4	5	≥ 6
$\bar{\sigma}'_c$	$0.5f'_c$	$0.45f'_c$	$0.4f'_c$	$0.35f_c$	$0.3f'_c$

(ب) في التسليح :

- يؤخذ الإجهاد المسموح به في الفولاذ على الشد $\bar{\sigma}_s$ مساوياً $0.55f_y$ ، وفي حالة الضغط، تؤخذ الإجهادات المسموح بها في حالة العناصر المعرضة للانحناء في التسليح المضغوط مساوية للإجهادات في الخرسانة المحيطة مضروبة بالنسبة المعيارية $n=15$ شريطة ألا تزيد على $0.55f_y$. ويجدر بالذكر هنا ضرورة تخفيض قيم f_y عن القيم المميزة عند استخدام خرسانة ذات جودة منخفضة، كما في الجدول (2-3).

الجدول (2-3) تخفيض قيمة f_y عندما تكون قيمة f'_c منخفضة

f'_c	≤ 15	16.5	18	20	≥ 25
f_y					
240	240	240	240	240	240
280	240	250	260	280	280
300	250	260	270	300	300
360	-	300	320	360	360
400	-	-	360	400	400
500	-	-	-	440	500

3-3-2- الإجهادات المسموح بها وفق الكود الأمريكي ACI:

يتم أخذ الإجهاد المسموح في الخرسانة مساوياً لـ $0.45f'_c$ وفي الفولاذ كما يلي:

$$f_y = 280 \text{ MPa} \text{ من أجل } \bar{\sigma}_s = 0.5f_y -$$

$$f_y \geq 350 \text{ MPa} \text{ من أجل } \bar{\sigma}_s = 0.4f_y -$$

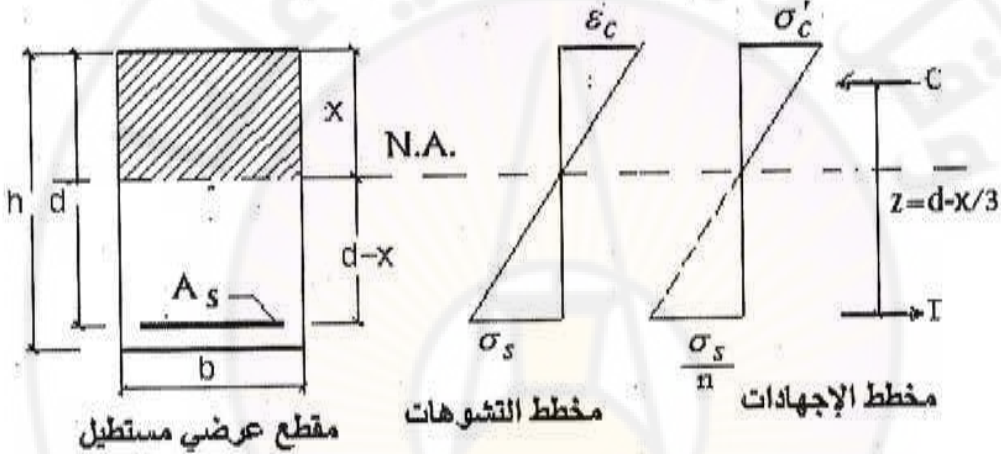
3-4-4 تحليل المقاطع المستطيلة أحادية التسليح

3-4-1 مقدمة:

ليكن لدينا مقطع مستطيل أبعاده $b \times h$ مسلح بمنطقة الشد بتسليح A_s ، ويتعرض لعزم انحناء M كما في الشكل (2-3). إن مخطط الإجهادات والتشوهات والرموز والأبعاد موضحة على الشكل حيث:

d : الارتفاع الفعال للمقطع العرضي وهو المسافة من مركز ثقل التسليح المشدود حتى أبعاد ليف مضغوط

x : ارتفاع منطقة الضغط (المسافة من المحور المحايد $N.A$ إلى أقصى ليف مضغوط)



الشكل (2-3) مقطع مستطيل مع مخططات توزيع الإجهادات والتشوهات

للتحليل سيتم اعتماد معادلتى التوازن، الأولى هي مجموع القوى الداخلية في الخرسانة وال فولاد مساوية للصفر، والثانية توازن العزم الداخلي مع العزم الخارجي، كما سيتم اعتماد فرضية توافق التشوهات.

- من فرضية أن العلاقة بين الإجهادات والتشوهات هي علاقة خطية، واستناداً إلى قانون هوك نكتب:

$$\epsilon'_c = \frac{\sigma'_c}{E_c} \quad \epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ومنه نكتب:

$$\frac{\epsilon_s'}{\epsilon_c'} = \frac{\sigma_s'}{\sigma_c'} \frac{E_c}{E_s} \quad (3-1)$$

من مخطط التشوهات وحسب قوانين تشابه المثلثات نكتب:

$$\frac{\epsilon_s'}{\epsilon_c'} = \frac{d-x}{x} \quad (3-2)$$

من العلاقتين (3-1) و (3-2) نجد:

$$\frac{\sigma_s'}{\sigma_c'} \frac{E_c}{E_s} = \frac{d-x}{x}$$

أو:

$$\frac{\sigma_s'}{n\sigma_c'} = \frac{d-x}{x} \quad (3-3)$$

- من معادلة التوازن الأولى (توازن القوى الداخلية):

$$\sum X = 0$$

$$\Rightarrow C = T \Rightarrow A_s \sigma_s' = \frac{1}{2} b x \sigma_c' \quad (3-4)$$

نعوض σ_s' بقيمة من العلاقة (3-3) فنجد:

$$A_s \frac{n\sigma_c'(d-x)}{x} = \frac{1}{2} b x \sigma_c'$$

بإختصار نجد:

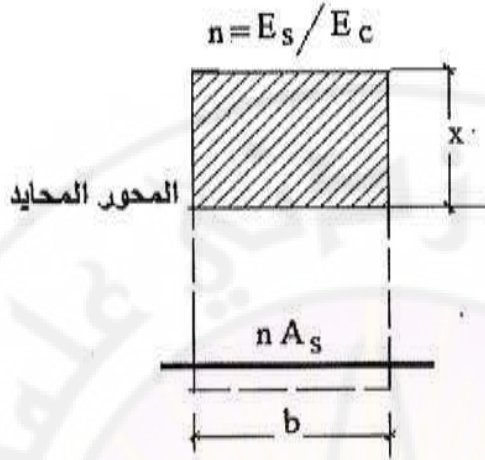
$$\frac{1}{2} b x^2 - n A_s (d-x) = 0 \quad (3-5)$$

من هذه العلاقة يمكن إيجاد x (موقع المحور السليم *neutral axis*)، ونلاحظ أن هذا الموقع لا يتعلق بالأحمال المطبقة، إنما يتعلق فقط بخصائص المقطع (العمق، العرض، مساحة التسليح) بالإضافة للنسبة n .

إن هذه العلاقة تعني أن العزم الستاتيكي للمقطع المكافئ (أي الجزء المضغوط من المقطع ومقطع الفولاذ مضروباً بالعامل n) بالنسبة للمحور السليم يساوي الصفر، وهي نفس العلاقة المعروفة من مقاومة المواد بالنسبة للمقاطع المتجانسة، ويكون x هو موقع المحور المار بمركز ثقل المقطع *center of gravity*. ويمكن كتابة هذه العلاقة بالشكل التالي:

$$S_c = 0 \quad (3-6)$$

وبذلك نكون قد حولنا المقطع الفعلي المؤلف من مادتين إلى مقطع مكافئ متجانس من مادة واحدة هي الخرسانة، وهذا المقطع يشمل الجزء المضغوط من الخرسانة ومساحة مكافئة لفولاذ الشد تساوي nA_s .



الشكل (3-3) المقطع المكافئ Transformed section

عزم عطالة المقطع المكافئ I_e حول المحور السليم يساوي:

$$I_e = \frac{b \cdot x^3}{3} + nA_s (d - x)^2 \quad (3-7)$$

وتكون الإجهادات الناتجة عن الانحناء في كل من الخرسانة والفولاذ تساوي:

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_e} \cdot x \quad (3-8)$$

$$\sigma_s = \frac{nM}{I_e} (d - x) \quad (3-9)$$

يمكن استنتاج هاتين العلاقتين كما يلي:

- من معادلة توازن العزوم حول المحور السليم (معادلة التوازن الثانية) كما يلي:

$$M = C \cdot \frac{2}{3} \cdot x + T(d - x)$$

$$M = \frac{b \cdot x}{2} \sigma'_c \cdot \frac{2}{3} \cdot x + A_s \cdot \sigma_s (d - x)$$

نعوض قيمة σ_s من العلاقة (3-3) فنجد:

$$M = \frac{bx^2}{3} \sigma'_c + nA_s \cdot \sigma'_s \frac{(d-x)^2}{x}$$

نضرب طرفي المعادلة بـ x

$$M \cdot x = \sigma'_c \left[\frac{bx^3}{3} + nA_s (d-x)^2 \right]$$

ومنه نحصل على العلاقة (3-8).

بنفس الطريقة يمكن الحصول على العلاقة (3-9) ولكن بتعويض قيمة σ'_c من العلاقة (3-3). إن الحالات التي نواجهها في الحياة العملية بالنسبة للمقاطع المستطيلة أحادية التسليح الخاضعة للانحناء هي إما حالات التحقق وإما حالات التصميم.

3-4-2- حالة التحقق:

تكون الأبعاد الهندسية للمقطع وتسليحه معلومة، وكذلك المقاومة المسموحة لمادتي الخرسانة والتسليح معروفة، ويطلب التحقق من الإجهادات الفعلية بأنها أقل من القيم المسموحة لكل من الخرسانة وال فولاذ، وذلك تحت تأثير عزم انحناء استثماري محدد. أو قد يكون المطلوب حساب العزم الاستثماري الذي يستطيع المقطع تحمله.

لإيجاد علاقات التحقق يمكن حل المعادلة 3-5 أعلاه وإيجاد x فيكون:

$$x = \frac{nA_s}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{nA_s}} \right) \quad (3-10)$$

ولكن: $A_s = \mu_s \cdot b \cdot d$

ومنه:

$$x = \left[n\mu_s \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n\mu_s}} \right) \right] d \quad (3-11)$$

نرمز بـ $\gamma_x = \frac{x}{d}$ فنجد:

$$\gamma_x = n\mu_s \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n\mu_s}} \right) \quad (3-12)$$

- من علاقات العزوم مرة حول مركز منطقة الضغط ومرة أخرى حول مركز التسليح المشدود نجد:

$$M = C.Z \quad (3-13)$$

نبدل بالقيم فنجد:

$$M = \frac{b.x}{2} \sigma'_c \left(d - \frac{x}{3}\right) = \frac{b\gamma_x d}{2} \sigma'_c d \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right)$$

ومنه:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\gamma_x}{2} \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) \sigma'_c . b . d^2 \\ &= \omega_b \sigma'_c b . d^2 \end{aligned} \quad (3-14)$$

وذلك بأخذ

$$\omega_b = \frac{\gamma_x}{2} \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) \quad (3-15)$$

وبالتالي يمكن حساب الاجهاد في الخرسانة المضغوطة بالعلاقة:

$$\sigma'_c = \frac{M}{\omega_b b . d^2} \quad (3-16)$$

- من علاقة العزوم الأخرى نجد:

$$M = T Z = A_s \sigma_s \left(d - \frac{x}{3}\right) \quad (3-17)$$

نبدل $A_s = \mu_s b . d$ ونضع $\gamma_x = \frac{x}{d}$ ونضرب طرفي المعادلة بـ n فنحصل على:

$$\begin{aligned} nM &= \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) n\mu_s \sigma_s b . d^2 \\ &= \omega_a \sigma_s b . d^2 \end{aligned} \quad (3-18)$$

حيث:

$$\omega_a = n\mu_s \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) = n\mu_s \gamma_z \quad (3-19)$$

$$\gamma_z = \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right)$$

ومن ثم يمكن حساب الاجهاد في الفولاذ المشدود بالعلاقة:

$$\sigma_s = \frac{nM}{\omega_a b d^2} \quad (3-20)$$

إذا يتم حساب الإجهادات الضاغطة في الخرسانة والإجهادات الشادة في التسليح والمقارنة مع القيم المسموحة. ويمكن كبديل لهذه الطريقة حساب الإجهادات من العلاقات (3-8 و 3-9)، وذلك بعد حساب عزم العطالة للمقطع المكافئ I_e من العلاقة (3-7).

3-4-3 - حالة التصميم:

تكون الحملات الخارجية معروفة (أي العزم المطبق معلوم)، ومعروف أيضاً المقاومة المسموحة لمادتي الخرسانة والتسليح، ويطلب اختيار أبعاد المقطع وتسليحه اللازمين لمقاومة عزم الانحناء المطبق، وبحيث لا تتجاوز الإجهادات الناتجة في الخرسانة والتسليح القيم المسموحة.

في الحياة العملية قد تكون أبعاد المقطع مفروضة لأسباب معمارية أو إنشائية وفي هذه الحالة تكون المسألة تصميماً جزئياً ويطلب حساب التسليح.

نحصل على المقطع المثالي عندما تكون الإجهادات في كل من الخرسانة والفلواز مساوية للقيم المسموحة. عملياً من النادر الوصول إلى الحالة المثالية وذلك بسبب تدوير قيم أبعاد المقطع الناتجة b و d وتغيير مساحة التسليح الناتجة عند اختيار العدد اللازم من القضبان. ومع ذلك قد ينطلق الحل من فرض قيم للإجهادات مساو للمسموح كما يلي:

من تشابه المثلثات في مخطط توزيع الإجهادات لدينا:

$$\frac{n\bar{\sigma}_c'}{\sigma_s} = \frac{x}{d-x}$$

وإذا رمزنا للطرف الأيسر من هذه العلاقة بـ γ_o ، أي:

$$\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}_c'}{\sigma_s} \quad (3-21)$$

$$\Rightarrow \gamma_o = \frac{x}{d-x} = \frac{\gamma_x \cdot d}{d - \gamma_x \cdot d} = \frac{\gamma_x}{1 - \gamma_x}$$

ومنه نجد:

$$\gamma_x = \frac{\gamma_o}{1 + \gamma_o} \quad (3-22)$$

يتم حساب الارتفاع الفعال d من علاقة العزوم (3-14):

$$d = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x(1-\frac{\gamma_x}{3})}} \sqrt{\frac{M}{b \cdot \bar{\sigma}'_c}}$$

أي:

$$d = \gamma_h \cdot \sqrt{\frac{M}{b \cdot \bar{\sigma}'_c}} \quad (3-23)$$

حيث:

$$\gamma_h = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x(1-\frac{\gamma_x}{3})}} = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x \cdot \gamma_z}} \quad (3-24)$$

قبل تحديد d يتم فرض قيمة لعرض المقطع b ، عادةً $b \approx \frac{1}{3}h$

- يتم حساب مساحة التسليح اللازمة وذلك بأخذ معادلة العزوم الأخرى:

$$M = T \cdot Z = A_s \bar{\sigma}_s d \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right)$$

ومنه:

$$A_s = \frac{M}{\gamma_z \cdot \bar{\sigma}_s \cdot d} \quad (3-25)$$

كما يمكن حساب A_s بطريقة أخرى، وذلك بإيجاد نسبة التسليح μ_s كما يلي:

نعوض قيمة M من العلاقة (3-14) في العلاقة (3-25):

$$A_s = \frac{\frac{\gamma_x}{2} \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) \bar{\sigma}'_c b \cdot d^2}{\gamma_z \bar{\sigma}_s d}$$

$$= \frac{\gamma_x}{2} \frac{\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} b \cdot d$$

نضرب طرفي المعادلة بـ n فيكون:

$$\frac{nA_s}{b \cdot d} = \frac{\gamma_x}{2} \frac{n \cdot \bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} \quad (3-26)$$

$$n \cdot \mu_s = \frac{\gamma_x \cdot \gamma_o}{2}$$

فمثلاً من أجل $f'_c=18MPa$ و $f_y=240MPa$ يمكن حساب نسبة التسليح في المقطع المثالي وذلك بالتعويض في العلاقة 3-26 أعلاه كما يلي:

$$f'_c=18MPa \implies \bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 8.1 MPa$$

$$f_y=240MPa \implies \bar{\sigma}_s = 0.55 f_y = 132 MPa$$

$$n=15$$

ومنه نجد:

$$\gamma_o = \frac{15 \times 8.1}{132} = 0.9205 \implies \gamma_x = 0.4793 \text{ \& } \mu_s = 0.0147$$

يمكن حساب نسب التسليح في المقاطع المثالية، وذلك بأخذ قيم مختلفة لـ f'_c و f_y ووضعها في الجدول (3-3).

من أجل المقارنة، تم في هذا الجدول حساب نسب التسليح مرة بأخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c$ ومرة أخرى بأخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.55 f'_c$ ومرة ثالثة بحسابها وفقاً للكود الأمريكي.

نلاحظ من الجدول (3-3) أن القيم الموافقة لـ $f_y=240$ تتجاوز قيم الـ ACI (وهذا لا يعتبر لصالح الأمان)، أيضاً عند أخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.55 f'_c$ نحصل على نسب تسليح عالية تتجاوز قيم الـ ACI لكل قيم f_y ، وقد تتجاوز القيم العظمى المسموحة وفق طريقة حالات الحدود.

في الواقع، وكما ذكرنا سابقاً، أن فرضية إن الإجهاد يتناسب مع التشوه صحيحة عندما تكون قيمة الإجهادات في الخرسانة المضغوطة تقريباً أقل من نصف المقاومة على الضغط f'_c بعد 28 يوم، لذلك تم اعتماد في هذا الكتاب بأن $\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c$ (وهذا يتوافق مع الكود السوري)، وبالتالي معظم المقاطع المصممة وفق طريقة إجهادات التشغيل تحتوي نسب تسليح أقل من النسب العظمى المسموح بها وفق طريقة حالات الحدود (مع أنني أنصح بتخفيض قيمة $\bar{\sigma}'_c$ لتصبح $\bar{\sigma}'_c = 0.4 f'_c$).

الجدول (3-3) يبين قيم نسب التسليح من أجل المقطع المثالي

(وفق الكودين السوري والأمريكي):

f'_c [MPa]	18	20	25
f_y			
240	0.0147 [0.0199] (0.0136)	0.0172 [0.0231] (0.0156)	0.0239 [0.0318] (0.0208)
360	0.0094* [0.0129*] (0.0101)	0.0092 [0.0126] (0.0117)	0.0131 [0.0177] (0.0156)
420	0.0071* [0.0098*] (0.0079)	0.0072 [0.0099] (0.009)	0.0103 [0.014] (0.0122)

القيم بدون أقواس محسوبة وفق الكود السوري بأخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c$ بينما القيم بين الأقواس [] موافقة لـ $\bar{\sigma}'_c = 0.55 f'_c$ ، والقيم بين الأقواس () هي القيم المحسوبة وفقاً للكود الأمريكي.
* تم تخفيض قيمة f_r بحسب اشتراطات الكود السوري (كما في الجدول 2-3).

3-4-4- الموقع المثالي للحمور السليم: Ideal location of neutral axis

الموقع المثالي للحمور السليم يتحقق عندما تكون الإجهادات في كل من الخرسانة والفولاذ مساوية للإجهادات المسموحة. إذا وجد بالحساب بأن موقع المحور السليم أقرب إلى الليف المضغوط من الموقع المثالي فإن فقط الإجهادات في التسليح قد تصل للقيمة المسموحة وليس الإجهادات في الخرسانة، ويمكن القول هنا إن الفولاذ هو الذي يحكم التصميم. بينما لو وجد إن موقع المحور السليم أبعد عن الليف المضغوط من الموقع المثالي فإن فقط الإجهادات في الخرسانة قد تصل للقيمة المسموحة ويقال إن الخرسانة هي التي تحكم التصميم.
أثناء التصميم من غير المسموح أن تصل الخرسانة للقيمة المسموحة قبل أن يصل الفولاذ، لذلك دائماً نفرض في البداية أن الإجهاد في الفولاذ وصل للقيمة المسموحة ونحسب الإجهاد في الخرسانة الموافق، فإذا وجد بأن الإجهاد في الخرسانة أكبر من القيمة المسموحة يتم إما زيادة ارتفاع المقطع أو استعمال تسليح في منطقة الضغط لتحمل جزء من قوى الضغط، ومن ثم إرجاع إجهاد الضغط في الخرسانة إلى الإجهاد المقبول.

ليس من الضروري الحصول على المقطع المثالي دوماً فقد تفرض الضرورة المعمارية استعمال ارتفاع أكبر من الارتفاع المثالي، في هذه الحالة يتم حساب فولاذ الشد بحيث يكون إجهاد الشد مساوياً للإجهاد المقبول، ويكون إجهاد الضغط في الخرسانة أقل من الإجهاد المقبول.

3-4-5- العزم الأعظمي للمقطع بتسليح أحادي:

العزم الأعظمي الذي يمكن للمقطع تحمله بتسليح أحادي هو الذي يحقق كون الإجهادات في كل من الخرسانة والفولاذ مساوية للإجهادات المقبولة، أي إنه العزم الذي يكون المقطع تحت تأثيره مثالياً. يمكن حساب هذا العزم بعدة أساليب منها: نحسب γ_o من العلاقة (3-21) ثم γ_x من (3-22) ثم ω_u و ω_b من (3-19) و (3-15) ثم نحسب العزم الأعظمي من إحدى العلاقاتين:

$$M_{max} = \omega_b \overline{\sigma}_c b.d^2$$

$$M_{max} = \frac{\omega_u}{n} \overline{\sigma}_s b.d^2 \quad (3-27)$$

- إذا كان العزم المطبق على المقطع يساوي M_{max} فالمقطع المفروض هو نفسه المقطع المثالي.

- إذا كان العزم المطبق على المقطع أصغر من M_{max} فالمقطع المفروض أكبر من المقطع المثالي.

- إذا كان العزم المطبق على المقطع أكبر من M_{max} فالمقطع المفروض أصغر من المقطع المثالي وإجهادات الضغط في الخرسانة أكبر من الحدود المسموحة، وهنا لا بد من زيادة أبعاد المقطع أو استعمال فولاذ في منطقة الضغط (الانتقال إلى التسليح الثنائي).

3-4-6 - مثال توضيحي:

أوجد العزم المقاوم لمقطع مستطيل أبعاده $250 \times 600 \text{mm}$ المبين بالشكل (4-3) باعتباره مسلحاً بـ $A_s = 3\phi 20$ (9.42cm^2) ، ثم أوجد العزم المقاوم باعتبار التسليح مرة $A_s = 12.67 \text{cm}^2$ ومرة ثانية $A_s = 20.0 \text{cm}^2$ علماً أن:

$$f'_c = 20 \text{MPa}; f_y = 360 \text{MPa}$$

الحل:

نوجد x من العلاقة (3-5):

$$\frac{1}{2} \times 250x^2 - 15 \times 942(550 - x) = 0$$

$$125x^2 - 14130(550 - x) = 0 \Rightarrow x = 199.15 \text{ mm}$$

من تشابه المثلثات لدينا (من العلاقة 3-3):

$$\frac{\sigma_s}{n\sigma_c'} = \frac{d-x}{x}$$

نفرض أن الإجهاد في الخرسانة مساوٍ للقيمة المسموحة أي:

$$\sigma_c' = 0.45f_c' = 9.0 \text{ MPa}$$

نعوض في العلاقة أعلاه ونوجد σ_s فنجد:

$$\sigma_s = 15 \times 9.0 \times \frac{550 - 199.15}{199.15} = 237.84 \text{ MPa}$$

$$> 0.55f_y = 198 \text{ MPa}$$

وهذا غير مقبول لذلك نأخذ $\sigma_s = 198 \text{ MPa}$ ونوجد σ_c' الموافقة فيكون:

$$\sigma_c' = \frac{198}{15} \times \frac{199.15}{550 - 199.15} = 7.493 \text{ MPa} < 0.45f_c' = 9 \text{ MPa} \text{ OK}$$

- نحسب العزم المقاوم كما يلي:

نوجد القوى الداخلية في كل من الخرسانة والفولاذ

$$C = \frac{1}{2} b x \sigma_c' = \frac{1}{2} \times 250 \times 199.15 \times 7.493 \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow C = 186.5 \text{ kN}$$

وأيضاً يكون لدينا:

$$T = A_s \sigma_s = 942 \times 198 \times 10^{-3}$$

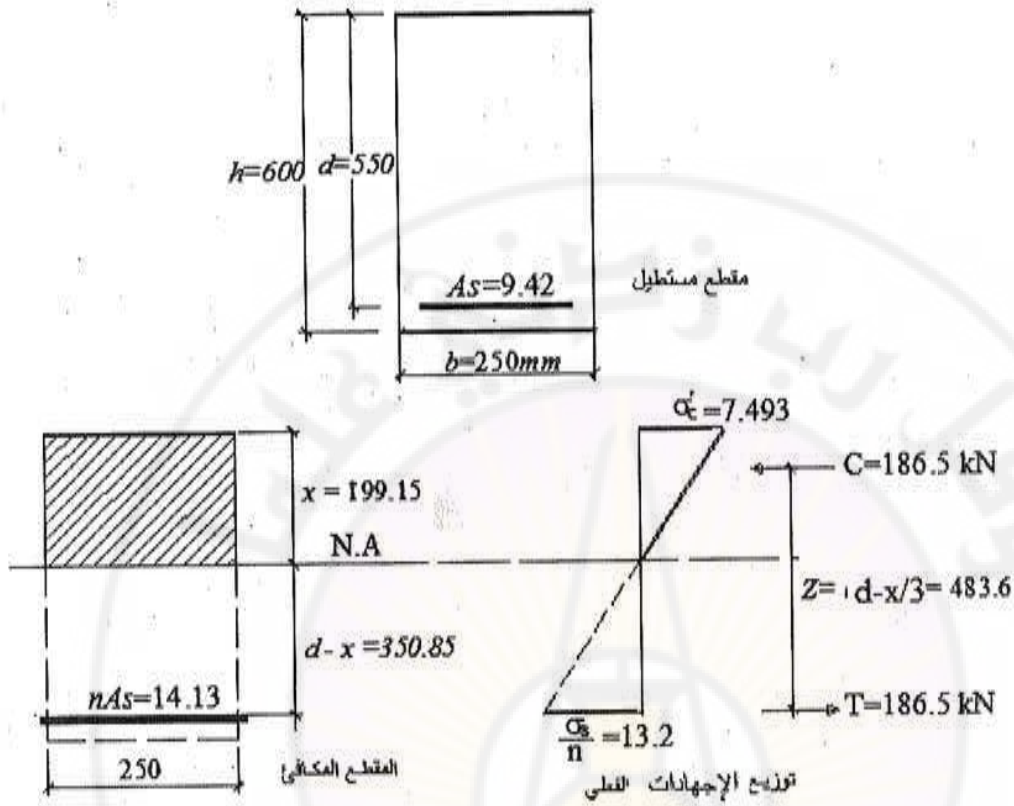
$$\Rightarrow T = 186.5 \text{ kN}$$

نلاحظ بأن القوتين متساويتان، وهذا يعتبر تدقيقاً جيداً لصحة قيمة x المحسوبة.

فيكون العزم المقاوم للمقطع هو:

$$M_r = 186.5 \times \left(d - \frac{x}{3}\right) = 186.5 \times \left(550 - \frac{199.15}{3}\right) \times 10^{-3}$$

$$M_r = 90.2 \text{ kN.m}$$



الشكل (3-4): مقطع مستطيل

- بطريقة أخرى يمكن إيجاد العزم المقاوم، وذلك بإيجاد عزم عطالة المقطع المكافئ من العلاقة (3-7) كما يلي:

$$I_e = \frac{250 \times 199.15^3}{3} + 15 \times 942(550 - 199.15)^2$$

$$I_e = 2397545300 \text{ mm}^4$$

ثم نوجد العزم المقاوم باستخدام إحدى العلاقتين التاليتين:

$$M_r = \frac{\sigma'_c \cdot I_e}{x} = \frac{7.493 \times 2397545300}{199.15} \times 10^{-6} = 90.2 \text{ kN.m}$$

أو:

$$M_r = \frac{\sigma_s \cdot I_e}{n(d-x)} = \frac{198 \times 2397545300}{15 \times (550 - 199.15)} \times 10^{-6} = 90.2 \text{ kN.m}$$

- الحالة الثانية $A_s = 12.67 \text{ cm}^2$

نحسب x :

$$\frac{1}{2} \times 250 x^2 - 15 \times 1267 (550 - x) = 0 \Rightarrow x = 222.97 \text{ mm}$$

بأخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 9.0 \text{ MPa}$ نجد σ_s :

$$\sigma_s = 15 \times 9.0 \times \frac{550 - 222.97}{222.97} = 198 \text{ MPa} = (\bar{\sigma}_s = 0.55 f_y)$$

فالمحور السليم يقع في الموقع المثالي ويكون العزم المقاوم للمقطع هو العزم الأعظمي الذي يتحمله المقطع بتسليح أحادي

$$M_r = M_{\max} = \frac{1}{2} b x \sigma'_c \left(d - \frac{x}{3}\right) = \frac{1}{2} \times 250 \times 222.97 \times 9.0 \left(550 - \frac{222.97}{3}\right) \times 10^{-6}$$

$$\Rightarrow M_r = 119.3 \text{ kN.m}$$

- الحالة الثالثة $A_s = 20.0 \text{ cm}^2$

نوجد x :

$$\frac{1}{2} \times 250 x^2 - 15 \times 2000 (550 - x) = 0 \Rightarrow x = 262.62 \text{ mm}$$

قيمة x أكبر من x في الحالة المثالية، ومن ثم فإن إجهاد الضغط في الخرسانة يصل للقيمة المسموحة بينما إجهاد الشد في الفولاذ يكون أقل من القيمة المسموحة، ومن ثم فإن الخرسانة هي التي تحكم التصميم (وهذا غير مسموح به في التصميم) كما يلي :

بأخذ $\bar{\sigma}'_c = 0.45 \times f'_c = 9.0 \text{ MPa}$ نجد σ_s فنجد :

$$\sigma_s = 15 \times 9.0 \times \frac{550 - 262.62}{262.62} = 147.73 \text{ MPa} < 0.55 f_y = 198 \text{ MPa}$$

ومن ثم يجب إضافة تسليح في منطقة الضغط بحيث يتم الوصول إلى القيمة المسموحة في الفولاذ المشدود قبل (أو في نفس الوقت) وصول الإجهاد في الخرسانة إلى القيمة المسموحة.

ملاحظة:

عادة أثناء حل المسائل يتم فرض الإجهاد في الفولاذ مساوياً للقيمة المسموحة، ويتم بعدها التحقق من الإجهادات الضاغطة في الخرسانة على أن تكون أصغر أو تساوي المسموحة.

3-4-7- استعمل الجداول:

لتبسيط العمليات الحسابية يمكن جدولة القيم الناتجة عن الدساتير السابقة ووضع القيم في الجدول (3-4)، يستعمل هذا الجدول لحالات التحقيق والتصميم للمقاطع الخرسانية المستطيلة أحادية التسليح.

ان استعمال هذا الجدول بسيط جداً، إذ يكفي أن نجد عاملاً واحداً من عوامل الجدول لمعرفة بقية العوامل. إلا أنه تجدر الإشارة إلى ضرورة الانتباه إلى كيفية اختيار العامل الأول الذي يتم الدخول إلى الجدول من خلاله، وسيتم شرح ذلك في الفقرة التالية.

3-4-7-1 حالات التحقيق:

أ- M, d, A_s معلومة، ويطلب التحقق من سلامة المقطع (حساب الإجهادات ومقارنتها مع المسموحة). في استعمال الجداول يتم الدخول إلى الجدول من خلال $n\mu_s$ ، ونجد من الجدول قيمتي ω_a, ω_b ، ونحسب σ'_c, σ_s من العلاقات (3-16) و (3-20).

ب- d, A_s معلومة ويطلب حساب العزم الأعظمي M الذي يمكن للمقطع تحمله. هنا نفرض أحد الإجهادين مساوياً للإجهاد المقبول في حين يكون الإجهاد الآخر أقل من المقبول (إن المقطع لا يكون مثالياً إلا في حالة خاصة). يتم الدخول إلى الجدول بواسطة قيمة $n\mu_s$ ، ونجد قيمتي ω_a, ω_b .

نفرض أولاً أن $\sigma_s = \overline{\sigma_s}$ ونجد قيمة العزم M_s الذي يمكن للمقطع تحمله في حالة وصول إجهاد الفولاذ إلى الحد المقبول وذلك من العلاقة (3-20).

نفرض ثانياً أن $\sigma'_c = \overline{\sigma'_c}$ ونجد قيمة العزم M_c الذي يمكن للمقطع تحمله في حالة وصول إجهاد في الخرسانة إلى الحد المقبول وذلك من العلاقة (3-16).

إن العزم الأعظمي الذي يمكن للمقطع تحمله هو الأقل من قيمتي M_s, M_c وفي الحالة الخاصة التي يكون فيها المقطع مثالياً تكون قيمتا M_s, M_c متساويتين.

الجدول (3-4): العوامل المساعدة عند حساب المقاطع الخرسانية المستطيلة أحادية التسليح

$n\mu_s$	γ_o	γ_h	ω_b	ω_a	γ_x	γ_z
0.010	0.152	3.98	0.065	0.0096	0.122	0.956
11	159	90	66	105	138	954
12	167	83	68	114	144	952
13	175	87	71	123	149	950
14	182	70	73	133	154	949
0.015	0.189	3.64	0.075	0.0140	0.159	0.947
16	195	58	78	151	164	945
17	203	55	80	161	169	944
18	209	51	82	170	173	942
19	216	47	83	179	177	941
0.020	0.221	3.42	0.83	0.0188	0.181	0.940
21	227	38	87	197	185	938
22	232	36	89	206	189	937
23	238	32	90	215	193	936
24	244	30	92	224	196	935
0.025	0.250	3.27	0.093	0.0233	0.200	0.933
26	255	24	95	242	204	932
27	260	22	97	252	208	931
28	266	19	98	260	211	930
29	272	17	99	269	214	929
0.030	0.277	3.15	0.101	0.0278	0.217	0.928
32	287	11	103	296	223	926
34	297	07	106	314	229	924
36	306	04	108	332	235	922
38	316	01	111	350	241	920
0.040	0.326	2.98	0.113	0.0377	0.246	0.918
42	336	95	115	385	251	916
44	345	92	117	403	256	915
46	355	90	119	420	261	913
48	362	87	121	437	266	911
0.050	0.370	2.85	0.123	0.0455	0.271	0.910
52	378	83	125	472	275	908
54	387	81	127	490	279	907
56	395	79	129	507	283	906
58	406	79	131	525	289	905
0.060	0.411	2.76	0.132	0.0543	0.291	0.904
62	414	74	133	560	295	902
64	426	72	134	576	299	900
66	435	71	136	593	303	899
68	443	69	138	661	307	898
0.070	0.451	2.68	0.140	0.0628	0.311	0.896
73	462	66	141	654	316	895
76	473	64	143	679	321	893
79	484	62	145	704	326	891

82	495	60	147	730	331	890
0.080	0.506	2.58	0.149	0.0755	0.336	0.888
88	518	57	151	780	341	886
91	529	56	153	806	346	885
94	538	55	155	830	350	883
97	547	54	156	855	354	882
0.100	0.558	2.52	0.158	0.0881	0.358	0.881
104	571	50	160	914	364	879
108	585	48	162	946	369	877
112	597	47	164	980	374	875
115	610	46	166	1013	379	874
0.120	0.624	2.45	0.168	0.1047	0.384	0.872
124	637	43	169	1080	389	870
128	650	42	171	1112	394	869
132	664	40	173	1143	399	867
136	676	39	175	1177	404	865
0.140	0.691	2.38	0.177	0.1210	0.409	0.864
146	710	37	179	1260	415	862
152	728	36	181	1308	421	860
158	744	34	183	1356	427	858
164	765	33	186	1405	433	856
0.170	0.781	2.32	0.188	0.1455	0.439	0.854
176	797	30	189	1500	444	852
182	814	29	191	1548	449	850
188	831	28	193	1594	454	849
194	849	27	195	1641	459	847
0.200	0.862	2.26	0.196	0.1690	0.463	0.845
210	890	25	199	1770	471	843
220	919	23	202	1850	479	841
230	946	22	204	1930	486	838
240	970	20	206	2010	493	836
0.250	1.000	2.19	0.208	0.2080	0.500	0.833
260	028	18	211	2160	507	831
270	0.56	17	213	2240	514	829
280	084	16	215	2320	520	827
290	108	15	216	2390	525	825
0.300	1.130	2.14	0.218	0.2470	0.530	0.823
330	173	12	221	2620	540	820
340	220	11	224	2780	550	817
360	271	09	228	2920	560	813
380	325	08	231	3080	570	810
0.400	1.380	2.07	0.234	0.3230	0.580	0.807

3-4-7-2- حالات التصميم:

أ - العزم المطبق M معلوم والمطلوب حساب d و A_s

للحصول على أصغر ارتفاع ممكن بتسليح أحادي نفرض $\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c$ و $\sigma_s = \bar{\sigma}_s$ ونصمم المقطع بحيث يكون مثالياً. ندخل الجدول بواسطة قيمة $\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s}$ ونجد قيم γ_1, γ_2 ثم يتم حساب d من العلاقة (3-23) ، ونحسب A_s من العلاقة (3-25).

ب - M و d معلومان والمطلوب حساب A_s

في هذه الحالة نفرض أحد الإجهادين مساوٍ للإجهاد المقبول، أما الإجهاد الآخر فلا يمكن أن يفرض أي إن المقطع لا يمكن أن يكون مثالياً إلا في حالة خاصة.

وللحصول على أقل كمية تسليح ممكنة نفرض $\sigma_s = \bar{\sigma}_s$ ، ندخل إلى الجدول بواسطة قيمة

$$\omega_o = \frac{nM}{\sigma_s b.d^2} \text{ ونجد } \omega_o \text{ و } \gamma_2$$

نحسب σ'_c من العلاقة (3-16) ونقارنها بالقيمة المسموح بها، فإذا كانت لا تتجاوز هذه القيمة، يتم تحديد مساحة التسليح اللازم من العلاقة (3-25)، وإلا يكون الارتفاع المفروض أصغر من الارتفاع الأدنى المطلوب للمقطع أحادي التسليح، أي إنه من الواجب استخدام تسليح ثنائي في المقطع.

ج - M معطاة ونسبة التسليح $\mu_s = \frac{A_s}{b.d}$ مفروضة، والمطلوب حساب d و A_s :

يتم الدخول إلى الجدول من خلال $n\mu_s$ ، ويمكن هنا افتراض قيمة أحد الإجهادين ليكون مساوياً للقيمة المسموح بها، وليكن $\sigma_s = \bar{\sigma}_s$ وتصميم المقطع على أنه غير مثالي، أي إن يصار إلى تحديد σ'_c بعد معرفة γ_o ، فإذا كان هذا الإجهاد لا يتجاوز القيمة المسموح بها في الخرسانة على الضغط، يمكن حساب d من العلاقة (3-23) وذلك باستعمال القيمة الفعلية المحسوبة لـ σ'_c أي إن المقطع ليس مثالياً، ونجد قيمة A_s من العلاقة (3-25).

أما إذا كانت $\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c$ فالمقطع مثالي ونسبة التسليح المفروضة تسمى بالنسبة المثالية.

أما إذا كانت $\sigma'_c > \bar{\sigma}'_c$ فنسبة التسليح المفروضة أعلى من النسبة المثالية، ومن ثم تكون غير مقبولة، ونعود ونصمم المقطع كما في الحالة (أ) أعلاه.

3-5-5- حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح

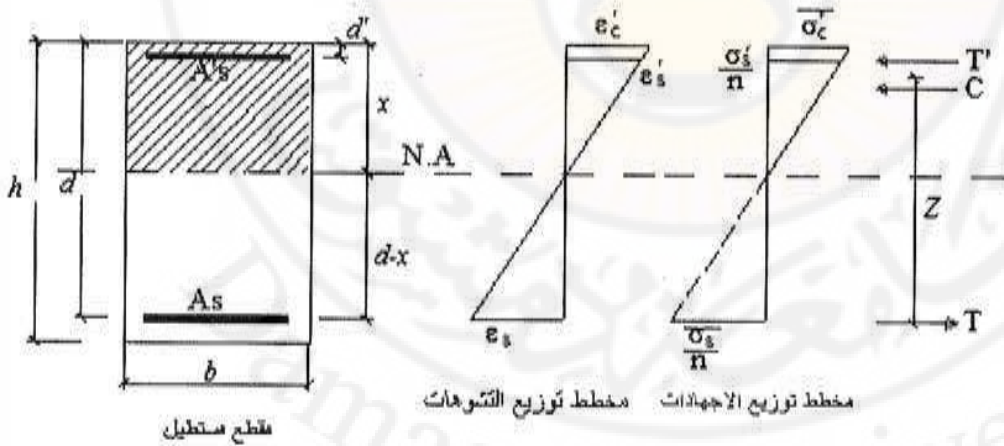
3-5-5-1- مقدمة:

رأينا سابقاً انه إذا كان المقطع المستطيل مفروضاً، وكان العزم المقاوم M_r لهذا المقطع أقل من العزم المطبق على المقطع، فإنه إذا اعتبرنا إجهاد الشد في الفولاذ مساوياً لـ $\bar{\sigma}_s$ فإن إجهاد الضغط في الخرسانة سيكون أكبر من الإجهاد المقبول $\bar{\sigma}_c$ ، ولمعالجة ذلك لا بد من وضع قضبان تسليح في منطقة الضغط تساهم في تحمل جزء من قوى الضغط المطبقة على المقطع، وبذلك لا تتجاوز الإجهادات في الخرسانة المضغوطة القيمة المسموحة.

إن استخدام التسليح الثنائي غير مرغوب فيه بشكل عام لانه غير اقتصادي، إلا أن أسباباً معمارية قد تفرض عدم زيادة أبعاد المقطع، ومن ثم نضطر لاستخدام هذا النوع من التسليح.

3-5-5-2- تصميم المقاطع ثنائية التسليح:

في أكثر الحالات تكون أبعاد المقطع معطاة ويطلب حساب مساحة تسليح الشد وتسليح الضغط. يبين الشكل (3-5) مقطعاً ثنائي التسليح، إجهاد الضغط الأعظمي في الخرسانة يساوي $\bar{\sigma}_c$ وإجهاد الشد الأعظمي في الفولاذ يساوي $\bar{\sigma}_s$.



مقطع مستطيل

مخطط توزيع الاجهادات مخطط توزيع التشوهات

الشكل (3-5) مقطع مستطيل ثنائي التسليح مع مخططات توزيع التشوهات والاجهادات

- إذا كانت الإجهادات $\sigma'_c = \bar{\sigma}'_c$ و $\sigma'_s = \bar{\sigma}'_s$ فإن المقطع يكون مثاليًا، ويحسب موقع المحور السليم والعزم المقاوم للمقطع الأحادي التسليح وفق العلاقات السابقة التالية:

$$\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}'_s}$$

$$\gamma_x = \frac{\gamma_o}{1 + \gamma_o}$$

$$x = \gamma_x \cdot d$$

ويحسب العزم المقاوم للمقطع بتسليح أحادي من العلاقة:

$$\begin{aligned} M_r &= \frac{\gamma_x}{2} \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) \bar{\sigma}'_c b \cdot d^2 \\ &= \omega_b \bar{\sigma}'_c b \cdot d^2 \end{aligned} \quad (3-28)$$

إذا كان العزم المطبق على المقطع M أكبر من M_r فإن المقطع بحاجة إلى فولاذ للضغط يتحمل الفرق بين العزمين، أي:

$$\Delta M = M - M_r$$

ومن ثم سيتم حساب الجوائز الثانية التسليح بتقسيم الجائز الواحد إلى جائزين واحد بتسليح شد فقط A_{s1} يتحمل M_r ، والثاني هو تسليح الشد المتبقي A_{s2} وتسليح الضغط A'_s (دون وجود الخرسانة) يتحمل ΔM كما في الشكل (3-3).

- من الجائز 2 وبأخذ العزم حول مركز التسليح المشدود نجد:

$$\begin{aligned} \Delta M &= T' \cdot (d - d') \\ &= \sigma'_s A'_s (d - d') \end{aligned} \quad (3-29)$$

ومنه نحسب مساحة التسليح المضغوط:

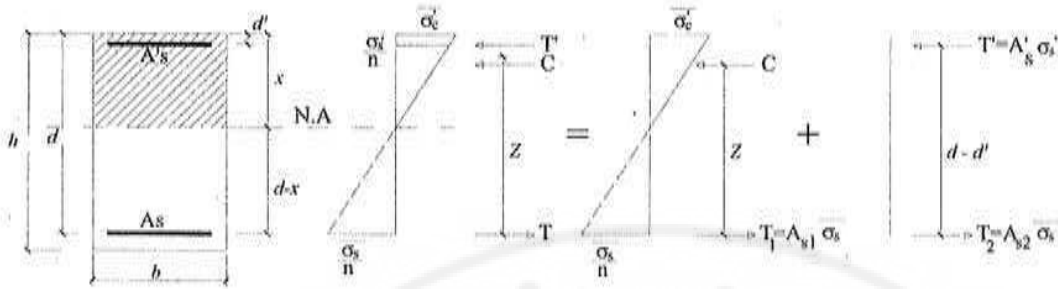
$$A'_s = \frac{\Delta M}{\sigma'_s (d - d')} \quad (3-30)$$

وتحدد σ'_s من تشابه المثلثات في مخطط إجهادات الضغط كالتالي:

$$\sigma'_s = \frac{(x - d')}{x} n \bar{\sigma}'_c \quad (3-31)$$

ثم نأخذ العزم حول مركز التسليح المضغوط فنجد:

$$\Delta M = A_{s2} \bar{\sigma}'_s (d - d') \quad (3-32)$$



الشكل (3-6) تقسيم الجائز الى جائزين من أجل التحليل

ومنه:

$$A_{s2} = \frac{\Delta M}{\sigma_s \cdot (d - d')} \quad (3-33)$$

- من الجائز 1 نحسب A_{s1} كما في المقاطع أحادية التسليح:

$$A_{s1} = \frac{M_r}{\gamma_z \cdot \sigma_s \cdot d} \quad (3-34)$$

- وتكون المساحة الكلية لفولاذ الشد هي:

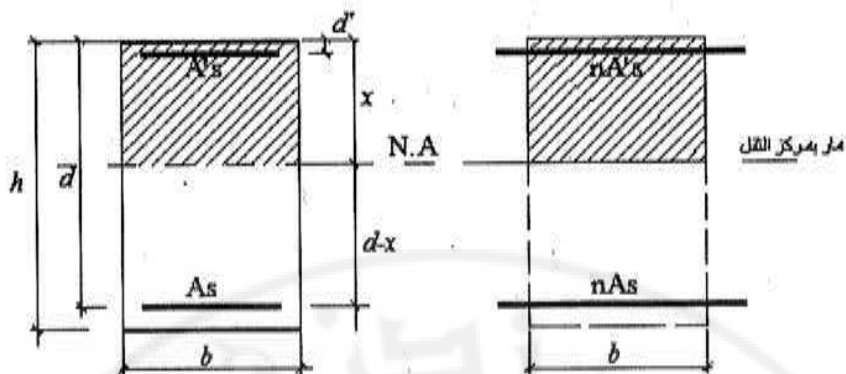
$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (3-35)$$

3-5-3- تحقيق المقاطع ثنائية التسليح:

يمكن التحقق من سلامة المقطع ثنائي التسليح عند تعرضه لعزم خارجي مطبق، وذلك بالتحقق من عدم تجاوز الإجهادات في كل من الخرسانة والتسليح للقيم المسموحة، يمكن أن يتم ذلك بالعودة الى فكرة المقطع المكافئ حيث تهمل الخرسانة المشدود ويستعاض عن تسليح الشد بسطح من الخرسانة مساحته nA_s وعن تسليح الضغط بسطح من الخرسانة مساحته nA'_s ، كما في الشكل (3-7).

يتم ايجاد ارتفاع منطقة الضغط x وذلك من شرط $S_e = 0$ أي ان العزم الستاتيكي للمقطع المكافئ بالنسبة للمحور السليم (المحور المار بمركز الثقل) يساوي الصفر أي:

$$\frac{bx^2}{2} + nA'_s(x - d') - nA_s(d - x) = 0 \quad (3-36)$$



الشكل (7-3) المقطع المكافئ للمقطع المستطيل المشقق وبتسليح ثنائي

ومنه نجد x بحل المعادلة من الدرجة الثانية.

ثم نجد عزم العطالة المكافئ بالنسبة للمحور السليم:

$$I_e = \frac{bx^3}{3} + nA'_s(x-d')^2 + nA_s(d-x)^2 \quad (3-37)$$

ومن ثم نجد قيمة الاجهادات في الخرسانة وكل من تسليح الشد والضغط بتطبيق العلاقات التالية:

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_e} x \quad (3-38)$$

$$\sigma_s = \frac{nM(d-x)}{I_e} \quad (3-39)$$

$$\sigma'_s = \frac{nM(x-d')}{I_e} \quad (3-40)$$

3-6- أمثلة توضيحية على المقاطع المستطيلة الأحادية والثنائية التسليح

فيما يلي عدد من الأمثلة الحسابية التي توضح كيفية استخدام العلاقات السابقة لحساب المقاطع العرضية الخاضعة للانحناء الصافي.

مثال (1): (تسليح أحادي - تحقيق وإيجاد العزم الأعظمي)

مقطع مستطيل أبعاده $250 \times 650 \text{ mm}$ وذو تسليح أحادي $5\phi 22 = 1900 \text{ mm}^2$ معروض لعزم انحناء $M = 90 \text{ kNm}$

المطلوب: 1- التحقق من سلامة هذا المقطع.

2- إيجاد العزم الأعظمي الذي يتحملة هذا المقطع.

علماً أن: $f'_c = 18 \text{ MPa}$; $f_y = 240 \text{ MPa}$; $a = 50 \text{ mm}$

الحل:

1- يمكن التحقق من سلامة المقطع وفق أحد أسلوبين:

أ. من العلاقات الأساسية:

- نوجد x من العلاقة:

$$\frac{bx^2}{2} - nA_s(d-x) = 0$$

بالتعويض نجد: (حيث $d = h - a = 600 \text{ mm}$)

$$\frac{1}{2} 250 \cdot x^2 - 15 \times 1900(600 - x) = 0$$

معادلة من الدرجة الثانية ب x بالحل نجد:

$$x^2 + 228x - 136800 = 0 \Rightarrow x \cong 273.0 \text{ mm}$$

بعد إيجاد x يمكن الحل بإحدى الطريقتين:

أ- نحصل على الإجهادات في الخرسانة والتسليح من العلاقات التاليتين:

$$\sigma_s = \frac{nM}{I_e}(d-x) \quad \sigma'_c = \frac{M}{I_e}x$$

نجد عزم عطالة المقطع المكافئ حول المحور السليم I_e من العلاقة:

$$I_e = \frac{bx^3}{3} + nA_s(d-x)^2$$

بالتعويض نجد:

$$I_e = \frac{250 \times 273^3}{3} + 15 \times 1900(600 - 273)^2$$

$$= 4743011250 \text{ mm}^4.$$

بالتعويض في علاقتي الإجهادات نجد:

$$\sigma'_c = \frac{90 \times 10^6}{4743011250} \times 273.0 = 5.18 \text{ N/mm}^2$$

$$< 0.45 f'_c = 0.45 \times 18 = 8.1 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

$$\sigma_s = \frac{15 \times 90 \times 10^6}{4743011250} \times (600 - 273) = 93.07 \text{ N/mm}^2$$

$$< 0.55 f_y = 0.55 \times 240 = 132 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

B- طريقة بديلة: بعد حساب x نجد $\gamma_x = \frac{x}{d} = \frac{273}{600} = 0.455$ ثم نحسب:

$$\omega_b = \frac{\gamma_x}{2} \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) = \frac{0.455}{2} \left(1 - \frac{0.455}{3}\right) = 0.193$$

$$\omega_a = n\mu_s \left(1 - \frac{\gamma_x}{3}\right) = 15 \times \frac{1900}{250 \times 600} \times \left(1 - \frac{0.455}{3}\right) = 0.161$$

ومنه نجد:

$$\sigma'_c = \frac{M}{\omega_b \cdot b \cdot d^2} = \frac{90 \times 10^6}{0.193 \times 250 \times 600^2} = 5.18 \text{ N/mm}^2 < 8.1 \quad \underline{OK}$$

$$\sigma_s = \frac{n \cdot M}{\omega_a \cdot b \cdot d^2} = \frac{15 \times 90 \times 10^6}{0.161 \times 250 \times 600^2} = 93.2 \text{ N/mm}^2 < 132 \quad \underline{OK}$$

ب- من الجداول:
يتم الدخول إلى الجدول من خلال القيمة:

$$n\mu_s = \frac{nA_s}{bd} = \frac{15 \times 1900}{250 \times 600} = 0.19 \Rightarrow \omega_b = 0.194, \quad \omega_a = 0.161$$

ثم نوجد الإجهادات كما هو أعلاه.

2- حساب العزم الأعظمي الذي يتحمله المقطع:

أ- من العلاقات الأساسية:

$$\text{لدينا: } x = 273.0 \text{ mm و } I_e = 4743011250 \text{ mm}^4$$

بأخذ الإجهادات في الخرسانة والفولاذ مساوية للقيم العظمى المسموحة:

$$M_c = \frac{\bar{\sigma}'_c I_e}{x} = \frac{8.1 \times 4743011250}{273} \times 10^{-6} = 140.73 \text{ kN.m}$$

$$M_s = \frac{\bar{\sigma}_s I_e}{n(d-x)} = \frac{132 \times 4743011250}{15(600-273)} \times 10^{-6} = 127.64 \text{ kN.m}$$

ويكون العزم الأعظمي الذي يمكن أن يتحمله المقطع هو القيمة الأصغر من القيمتين الناتجتين

$$M_{max} = 127.64 \text{ kN.m} \quad \text{أي:}$$

ب- من الجداول:

$$\omega_b = 0.194, \quad \omega_a = 0.161$$

لدينا العلاقتان:

$$M = \omega_b \bar{\sigma}'_c b.d^2$$

$$M = \frac{\omega_a}{n} \bar{\sigma}_s b.d^2$$

بالتعويض مع أخذ قيم الإجهادات مساوية للمسموحة نجد:

$$M_c = \omega_b \bar{\sigma}'_c b.d^2 = 0.194 \times 8.1 \times 250 \times 600^2 \times 10^{-6} = 141.43 \text{ kN.m}$$

$$M_s = \frac{\omega_a}{n} \bar{\sigma}_s b.d^2 = \frac{0.161}{15} \times 132 \times 250 \times 600^2 \times 10^{-6} = 127.5 \text{ kN.m}$$

نعتمد القيمة الأصغر

مثال (2): (تسليح أحادي - تصميم)

المطلوب تصميم مقطع مستطيل عرضه 25cm ليقاوم عزم انحناء قدره 100kN.m علماً
أن: $f'_c = 20\text{MPa}$; $f_y = 240\text{MPa}$; $a = 50\text{mm}$

الحل:

المطلوب هنا تحديد ارتفاع المقطع وتسليحه اللازمين. سيتم الحل أولاً من الدساتير ثم باستخدام
الجداول:

أ - من الدساتير:

جعل الإجهادات في الخرسانة والتسليح مساوية للإجهادات المسموحة نجد:

$$\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} = \frac{15 \times 0.45 \times 20}{0.55 \times 240} = 1.023$$

$$\gamma_x = \frac{\gamma_o}{1 + \gamma_o} = 0.5056$$

$$\gamma_z = 1 - \frac{\gamma_x}{3} = 0.831$$

$$\gamma_h = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x \gamma_z}} = 2.18$$

- نحسب الارتفاع الفعال:

$$d = \gamma_h \sqrt{\frac{M}{b \cdot \bar{\sigma}'_c}} = 2.18 \sqrt{\frac{100 \times 10^6}{250 \times 0.45 \times 20}} = 459.8 \text{ mm}$$

ويكون الارتفاع الفعال المختار هو $d = 50 \text{ cm}$ ، ومن ثم:

$$h = d + a = 50 + 5 = 55 \text{ cm}$$

- نحسب التسليح المشدود:

$$A_s = \frac{M}{\gamma_z \bar{\sigma}_s d} = \frac{100 \times 10^6}{0.831 \times 0.55 \times 240 \times 500} = 1823.3 \text{ mm}^2 \quad (18.23 \text{ cm}^2)$$

$$A_s = 4\phi 25 = 18.63 \text{ cm}^2 \quad \text{نختار:}$$

ب من الجداول:

ندخل الجدول من خلال القيمة $\gamma_o = 1.023$ ونجد γ_x و γ_z ثم نتابع الحل كما في الطريقة (أ) ونحصل على نتائج مماثلة.

مثال (3): (تسليح أحادي - تصميم جزئي)

المطلوب حساب التسليح اللازم لمقطع جائر أبعاده $300 \times 650 \text{ mm}$ يتعرض لعزم انحناء قدره $M = 0.12 \text{ MN.m}$ ، علماً أن:

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = 50 \text{ mm}$$

الحل:

يتم الحل بفرض الإجهاد في الفولاذ مساوياً للإجهاد المقبول أي $\bar{\sigma}_s = \sigma_s$ ونتحقق من قيمة إجهاد الضغط في الخرسانة. إن حل هذا المثال بواسطة الجداول هو حل مباشر، أما بواسطة الدساتير فالحل المباشر معقد وتنشأ عنه معادلة من الدرجة الثالثة لذلك يفضل في هذه الحالة اتباع حل بواسطة التقريب المتتالي بافتراض قيمة وسطية لـ γ_x ثم تصحيحها، مع العلم أن γ_x تتراوح بين 0.8 و 0.9.

أ - من الدساتير:

عن طريق التقريب المتتالي، نفرض $\gamma_x = 0.9$ ونحسب قيمة A_s الأولية:

$$A_s = \frac{M}{\gamma_x \cdot \bar{\sigma}_s \cdot d} = \frac{0.12}{0.9 \times 0.55 \times 240 \times 0.6} = 16.835 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (16.84 \text{ cm}^2)$$

ومنه يمكن حساب $n\mu_s$ و γ_x ثم القيمة الجديدة لـ γ_x كما يلي:

$$n\mu_s = \frac{nA_s}{b \cdot d} = \frac{15 \times 16.84}{30 \times 60} = 0.14$$

$$\gamma_x = n\mu_s \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n\mu_s}} \right) = 0.14 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{0.14}} \right) = 0.407$$

$$\gamma_z = \left(1 - \frac{\gamma_x}{3} \right) = 1 - \frac{0.407}{3} = 0.864$$

نعيد الآن حساب A_s الأدق:

$$A_s = \frac{M}{\gamma_z \cdot \bar{\sigma}_s \cdot d} = \frac{0.12}{0.864 \times 0.55 \times 240 \times 0.6} =$$

$$= 17.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (17.54 \text{ cm}^2)$$

ومنه يتم حساب $n\mu_s$ و γ_x ثم القيمة الجديدة لـ γ_z :

$$n\mu_s = \frac{nA_s}{b \cdot d} = \frac{15 \times 17.54}{30 \times 60} = 0.146$$

$$\gamma_x = 0.146 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{0.146}} \right) = 0.414$$

$$\gamma_z = 1 - \frac{0.414}{3} = 0.862$$

ومنه نجد مساحة التسليح A_s الدقيقة:

$$A_s = \frac{0.12}{0.862 \times 0.55 \times 240 \times 0.6} = 17.58 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (17.58 \text{ cm}^2)$$

نكتفي بهذا التقريب، ويمكن اختبار قضبان التسليح مثلاً $4\phi 24 \text{ mm} = 18.09 \text{ cm}^2$
- للتحقق من إجهاد الضغط في الخرسانة نحسب ω_b من العلاقة:

$$\omega_b = \frac{\gamma_x (1 - \frac{\gamma_x}{3})}{2} = \frac{0.414 (1 - \frac{0.414}{3})}{2} = 0.178$$

ومنه:

$$\sigma'_c = \frac{M}{\omega_b \cdot b \cdot d^2} = \frac{0.12}{0.178 \times 0.3 \times 0.6^2} = 6.24 \text{ MPa}$$

$$< \bar{\sigma}'_c = 0.45 \times 20 = 9.0 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

ب من الجداول:

نفرض الإجهاد في التسليح مساوياً للإجهاد المسموح به، ونحسب:

$$\omega_a = \frac{nM}{\bar{\sigma}_s \cdot b \cdot d^2} = \frac{15 \times 0.12}{0.55 \times 240 \times 0.3 \times 0.6^2} = 0.1263$$

ومن الجداول نجد:

$$\gamma_z = 0.8619, \quad \omega_b = 0.1791$$

نحسب مساحة التسليح من العلاقة:

$$A_s = \frac{M}{\gamma_s \cdot \bar{\sigma}_s \cdot d} = \frac{0.12}{0.8619 \times 0.55 \times 240 \times 0.6} = 17.58 \times 10^{-4} m^2 \quad (17.58 cm^2)$$

نتحقق من الإجهاد في الخرسانة من العلاقة التالية:

$$\sigma'_c = \frac{M}{\omega_b \cdot b \cdot d^2} = \frac{0.12}{0.1791 \times 0.3 \times 0.6^2} = 6.2 MPa$$

$$< \bar{\sigma}'_c = 0.45 \times 20 = 9.0 MPa \quad \underline{OK}$$

مثال (4): (تسليح أحادي - مقطع مثالي)

المطلوب إيجاد العزم المقاوم للمقطع $25 \times 55 cm$ ليكون مثالياً، ثم أوجد التسليح الموافق،

$$\text{حيث: } f'_c = 20 MPa; f_y = 240 MPa; a = 50 mm$$

الحل:

- في المقطع المثالي تكون الإجهادات في كل من الخرسانة وال فولاذ مساوية للإجهادات

المسموحة، نوجد x الموافقة للمقطع المثالي، نجد:

$$\frac{\bar{\sigma}_s}{n \bar{\sigma}'_c} = \frac{d-x}{x}$$

$$\Rightarrow \frac{0.55 \times 240}{15 \times 0.45 \times 20} = \frac{500 - x}{x}$$

$$x = 252.8 mm$$

ويكون العزم الذي يتحمله المقطع:

$$M = C \cdot Z = \frac{b \cdot x}{2} \cdot \bar{\sigma}'_c \left(d - \frac{x}{3} \right)$$

$$= \frac{250 \times 252.8}{2} \times 9 \times \left(500 - \frac{252.8}{3} \right) \times 10^{-6}$$

$$= 118.23 kN.m$$

- يتم حساب التسليح كما يلي:

من معادلة التوازن الأولى نجد:

$$C = T = \frac{250 \times 252.8}{2} \times 9 \times 10^{-3} = 284.4 \text{ kN}$$

$$T = A_s \bar{\sigma}_s \Rightarrow A_s = \frac{284.4 \times 10^3}{0.55 \times 240} = 2154.6 \text{ mm}^2$$

مثال (5): (تسليح ثنائي - تحقيق وايجاد العزم الأعظمي)

المطلوب التحقق من سلامة المقطع العرضي لجانز مقطعه $30 \times 55 \text{ cm}$ بحوي تسليح ضغط $3\phi 18 \text{ mm} = 7.63 \text{ cm}^2$ ، وتسليح شد $6\phi 24 \text{ mm} = 27.14 \text{ cm}^2$ ، ويتعرض لعزم مقداره $M = 140 \text{ kN.m}$ ، كما يطلب تحديد قيمة أكبر عزم يمكن أن يتحملة المقطع ،

$$\text{بافتراض: } f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = 50 \text{ mm}; d' = 40 \text{ mm}$$

الحل:

نحسب قيمة x من العلاقة الأساسية التالية:

$$\frac{bx^2}{2} + nA'_s(x - d') - nA_s(d - x) = 0$$

بالتعويض نجد:

$$300 \frac{x^2}{2} + 15 \times 763(x - 40) - 15 \times 2714(500 - x) = 0$$

وبحل المعادلة بالنسبة لـ x نجد: $x = 237.2 \text{ mm}$

نحسب قيمة I_e عزم عطالة المقطع المكافئ بالنسبة للمحور السليم من العلاقة:

$$I_e = \frac{bx^3}{3} + nA'_s(x - d')^2 + nA_s(d - x)^2$$

بالتعويض نجد:

$$I_e = \frac{300 \times 237.2^3}{3} + 15 \times 763(237.2 - 40)^2 + 15 \times 2714(500 - 237.2)^2$$

$$I_e = 4591238540 \text{ mm}^4$$

نتحقق من الإجهاد في الخرسانة:

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_e} x = \frac{140 \times 10^6 \text{ (N.mm)}}{4591238540} \times 237.2 = 7.233 \text{ MPa}$$

$$< 0.45 f'_c = 0.45 \times 20 = 9.0 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

نتحقق من الإجهاد في التسليح المشدود:

$$\sigma_s = \frac{nM(d-x)}{I_e} = \frac{15 \times 140 \times 10^6 (500 - 237.2)}{4591238540} = 120.2 \text{ MPa}$$

$$< 0.55 f_y = 0.55 \times 240 = 132 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

نتحقق من الإجهاد في التسليح المضغوط:

$$\sigma'_s = \frac{nM(x-d')}{I_e} = \frac{15 \times 140 \times 10^6 (237.2 - 40)}{4591238540} = 90.2 \text{ MPa}$$

$$< 0.55 f_y = 0.55 \times 240 = 132 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

- حساب العزم الأعظمي الذي يتحمله المقطع:

نفرض أولاً أن إجهاد الضغط في الخرسانة مساوٍ للإجهاد المقبول، وبحسب العزم على هذا الأساس من العلاقة:

$$M_c = \frac{\bar{\sigma}'_c I_e}{x} = \frac{0.45 \times 20 \times 4.59 \times 10^9}{237.2} \times 10^{-6} = 174.16 \text{ kN.m}$$

ثم نفرض أن إجهاد الشد في الفولاذ مساوٍ للإجهاد المقبول، وبحسب العزم على هذا الأساس من العلاقة:

$$M_s = \frac{\bar{\sigma}_s I_e}{n(d-x)} = \frac{0.55 \times 240 \times 4.59 \times 10^9}{15 \times (500 - 237.2)} \times 10^{-6} = 153.7 \text{ MPa}$$

وأخيراً نفرض أن إجهاد الضغط في الفولاذ المضغوط مساوٍ للإجهاد المقبول وبحسب العزم على هذا الأساس من العلاقة:

$$M'_s = \frac{\bar{\sigma}'_s I_e}{n(x-d')} = \frac{0.55 \times 240 \times 4.59 \times 10^9}{15 \times (237.2 - 40)} \times 10^{-6} = 204.83 \text{ MPa}$$

فيكون العزم الأعظمي الذي يمكن أن يتحمله المقطع هو الأصغر بين القيم الثلاث (بحيث تتحقق الإجهادات في الخرسانة والفولاذ) أي:

$$M_{max} = 153.7 \text{ kNm.}$$

مثال (6): (تسليح ثنائي - تصميم جزئي)

المطلوب تصميم مقطع جازز أبعاده $30 \times 60 \text{ cm}$ ، يخضع لعزم قيمته 160 kN.m ، علماً

$$\text{أن: } f'_c = 18 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = d' = 50 \text{ mm}$$

الحل:

نجعل إجهاد الشد بالفولاذ مساوياً للقيمة المسموحة، ومنه نجد:

$$\omega_a = \frac{nM}{\bar{\sigma}_s b d^2} = \frac{15 \times 0.16 \text{ (MN.m)}}{0.55 \times 240 \times 0.3 \times 0.55^2} = 0.2003$$

من الجداول نجد:

$$\gamma_z = 0.8362, \quad \omega_b = 0.2058$$

نحسب إجهاد الضغط في الخرسانة:

$$\sigma'_c = \frac{M}{\omega_b b d^2} = \frac{0.16 \text{ (MN.m)}}{0.2058 \times 0.3 \times 0.55^2} = 8.567 \text{ MPa}$$

$$> \bar{\sigma}'_c = 0.45 \times 18 = 8.1 \text{ MPa}$$

وبالتالي يحتاج المقطع تسليح ثنائي.

نحسب العزم المقاوم M_r الذي يتحمله المقطع بتسليح أحادي وذلك بجعل الإجهادات في الخرسانة والفولاذ مساوية للإجهادات المسموحة:

$$\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} = \frac{15 \times 0.45 \times 18}{0.55 \times 240} = 0.92$$

ومن الجداول نجد:

$$\omega_b = 0.202, \quad \gamma_z = 0.841, \quad \gamma_x = 0.479$$

فيكون العزم المقاوم هو:

$$M_r = \omega_b \cdot \bar{\sigma}'_c \cdot b \cdot d^2 = 0.202 \times 0.45 \times 18 \times 0.3 \times 0.55^2$$

$$M_r = 0.1485 \text{ MN.m} \quad (148.5 \text{ kN.m})$$

لو حسبنا M_r من العلاقة الأخرى لحصلنا على نفس النتيجة، وذلك لأن المقطع مثالي

نحسب التسليح المشدود A_{st} المقابل للعزم المقاوم كما يلي:

$$A_{st} = \frac{M_r}{\gamma_z \cdot \bar{\sigma}_s \cdot d} = \frac{148.5 \times 10^6}{0.841 \times 0.55 \times 240 \times 550} = 2432 \text{ mm}^2$$

ويمكن حساب x من:

$$x = \gamma_x \cdot d = 0.479 \times 550 = 263.45 \text{ mm}$$

إن العزم المتبقي هو:

$$\Delta M = M - M_r = 160 - 148.5 = 11.5 \text{ kN.m}$$

وهذا العزم المتبقي يتحمله تسليح ثانوي كما يلي:

1 - مساحة تسليح الشد:

$$A_{s2} = \frac{\Delta M}{\bar{\sigma}_s (d - d')} = \frac{11.5 \times 10^6}{0.55 \times 240 (550 - 50)} = 174.24 \text{ mm}^2$$

2 - مساحة تسليح الضغط بحسب من العلاقة:

$$A'_s = \frac{\Delta M}{\sigma'_s (d - d')}$$

حيث يتم حساب الإجهاد في التسليح المضغوط من العلاقة:

$$\sigma'_s = n \bar{\sigma}'_c \frac{x - d'}{x} = 15 \times 0.45 \times 18 \times \frac{263.45 - 50}{263.45} = 98.44 \text{ MPa}$$

ومن ثم:

$$A'_s = \frac{\Delta M}{\sigma'_s (d - d')} = \frac{11.5 \times 10^6}{98.44 \times (550 - 50)} = 233.6 \text{ mm}^2$$

إذا تسليح الشد الكلي يكون:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 2432 + 174.24 = 2606.24 \text{ mm}^2$$

مثال(7): (يحله الطالب)

من أجل مقطع مستطيل أبعاده $30 \times 75 \text{ cm}$ يطلب تحديد التسليح اللازم لمقاومة عزم انحناء

مقداره 0.3 MNm ، علماً أن: $a = d' = 50 \text{ mm}$; $f_y = 240 \text{ MPa}$; $f'_c = 18 \text{ MPa}$.

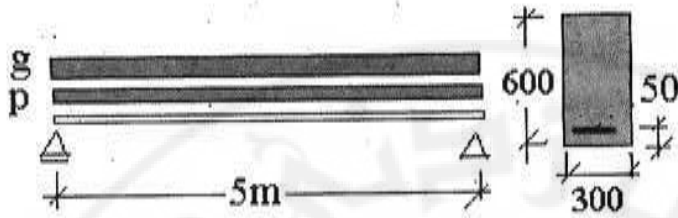
مثال(8): (يحله الطالب)

كمرّة بسيطة من الخرسانة المسلحة لها المقطع العرضي المسلح بتسليح أحادي كما في الشكل،

يطلب ما يلي:

(1) تحديد أكبر عزم انحناء يقاومه المقطع العرضي.

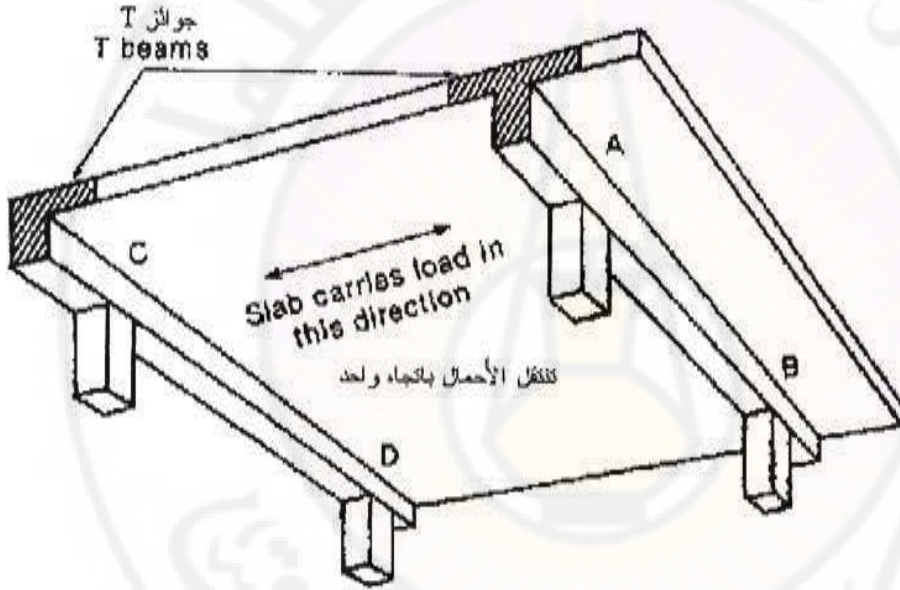
2) تحديد أكبر حمولة موزعة بانتظام يمكن تطبيقها على الكمرة، وحساب شدة الحمولة الميتة g وشدة الحمولة الحية p ، بفرض أن $g=2p$ ، المقطع أحادي التسليح فيه $A_s = 5\phi 20$ ، وكذلك $f_y = 300\text{MPa}$ ، $f'_c = 20\text{MPa}$



7-3- حساب الجوائز ذات المقاطع بشكل T

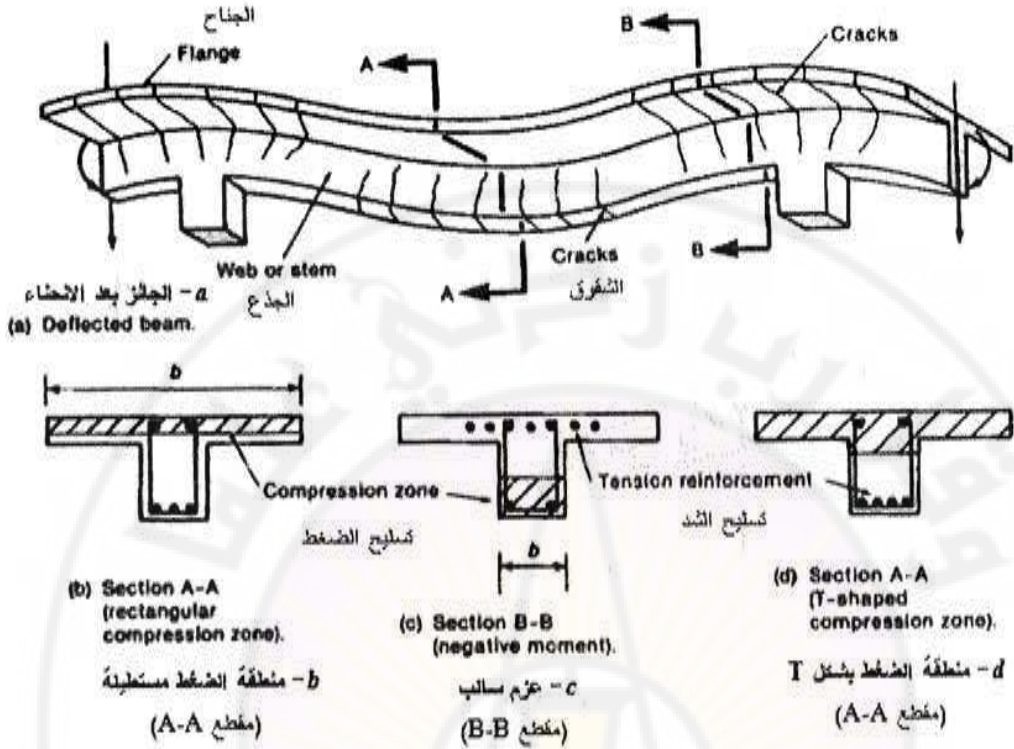
Introduction 1-7-3- مقدمة:

يبين الشكل (8-3) سقف مكون من بلاطة مستندة إلى جوائز وهي مستندة إلى أعمدة. عند تطبيق الحملات على بلاطة السقف تنتقل هذه الحملات إلى الجوائز الحاملة، وهذه الجوائز تنقل الأحمال إلى الأعمدة. أثناء التنفيذ، عادةً يتم صب أعمدة السقف أولاً ثم بعد تصلب الخرسانة يتم صب البلاطة مع الجوائز بشكل مستمر (مليثياً *monolithic*)، ونتيجة لذلك فإن البلاطة تعمل كجناح علوي للجوائز، هذه الجوائز تدعى الجوائز ذات المقاطع بشكل T.



الشكل (8-3) الجوائز T في بلاطة سقف تستند على جوائز

يتشوه الجوائز الوسطي نتيجة تطبيق الأحمال على البلاطة، ويكون شكل التشوه كما هو مبين بالشكل (9-3).

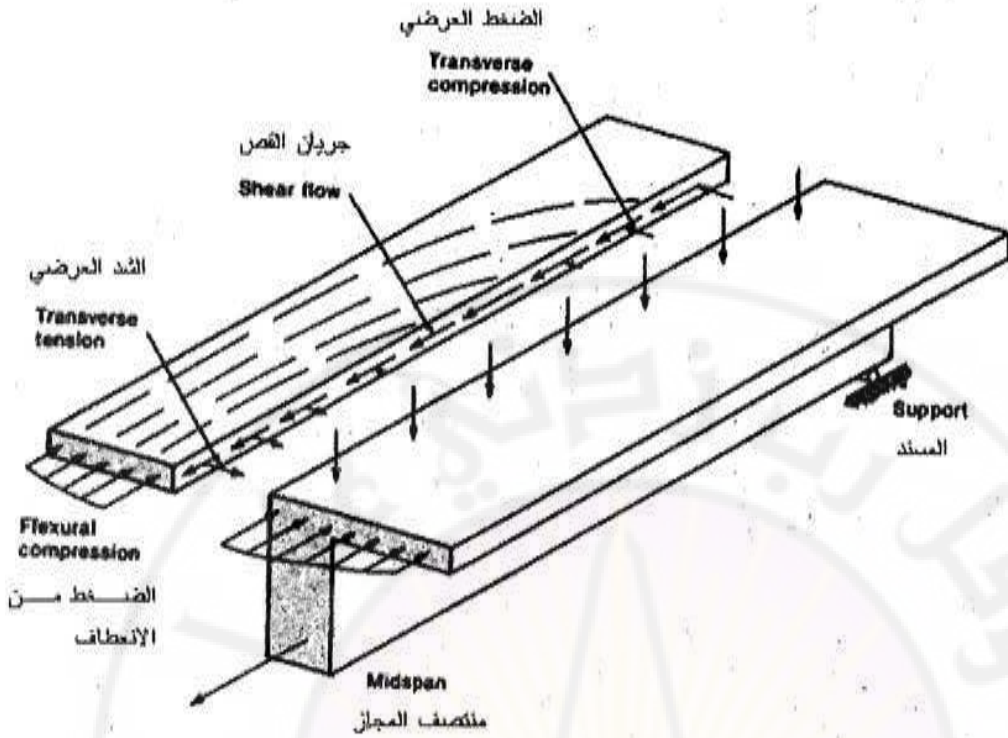


الشكل (9-3) مناطق العزم الموجب والسالب في الجوائز T

نتيجة الانحناء فإن المحور السليم عند منتصف المجاز قد يمر من الجناح العلوي للجوائز كما هو مبين في الشكل (9-3-b)، وبالتالي تكون منطقة الضغط مستطيلة وبحسب الجوائز كمقطع مستطيل عرضه هو عرض الجناح الفعال b_f ، أو يمر بالجسد كما في الشكل (9-3-d) وبحسب كمقطع T، أما عند المساند فإن منطقة الضغط تكون في أسفل الجوائز (الشكل 9-3-c) ويعمل الجوائز كمستطيل عرضه هو عرض الجسد b_w .

3-7-2- العرض الفعال لجناح الضغط:

يبين الشكل (3-10) القوى الناشئة في جناح الضغط لجوائز بسيط مقطعه T. عند المسند لا توجد إجهادات ضاغطة في الجناح بينما تطبق إجهادات الضغط على كامل الجناح في منتصف المجاز، ويلاحظ أن الإجهادات الضاغطة تكون أكبر ما يمكن عند منطقة التقاء الجناح مع الجسد.



الشكل (3-10) القوى في جناح الجانز T

يبين الشكل (3-11) توزيع إجهادات الضغط نتيجة الانحناء في بلاطة تشكل جناح الضغط لعدة جوائز متتالية عند منطقة العزم الموجب الأعظمي. يكون إجهاد الضغط أعظماً فوق الجسد ويتناقص بين الأجساد.

العرض الفعال b_f هو العرض المكافئ الذي يكون عليه الإجهاد منتظماً ومكافئاً للإجهاد الحقيقي المطبق على b_o . لقد وجد نتيجة الأبحاث بأن هذا العرض متعلق بنوع الأحمال المطبقة (موزعة أو مركزة)، نوع المساند، التباعد بين الجوائز، والقساوة النسبية بين البلاطة والجوائز.

يبين الشكل (3-12) العرض الفعال لجوائز T هي جزء من بلاطة سقف.

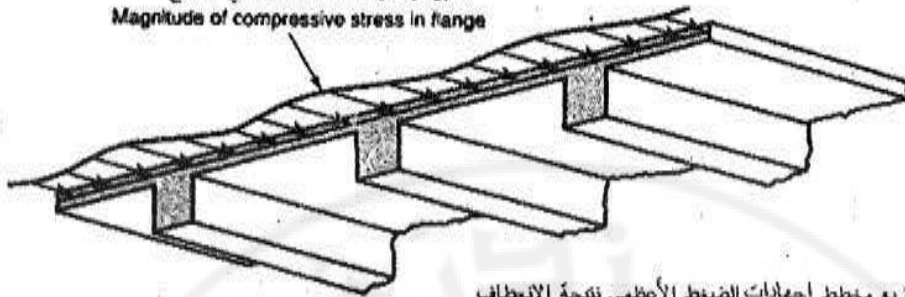
يحدد الكود السوري قيم العرض الفعال *Effective width* لجناح الضغط مساوياً للقيمة الدنيا

من الأبعاد التالية :

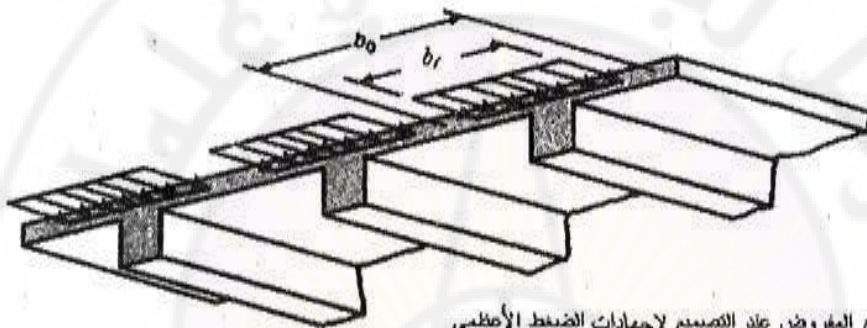
$$1 - \frac{L}{4} \text{ - في حالة الجوائز المعرضة لأحمال موزعة بصورة رئيسية}$$

$$- \frac{L}{5} \text{ - في حالة الجوائز المعرضة لأحمال مركزة بصورة رئيسية}$$

تغير قيمة إجهادات الضغط في الجناح
Magnitude of compressive stress in flange

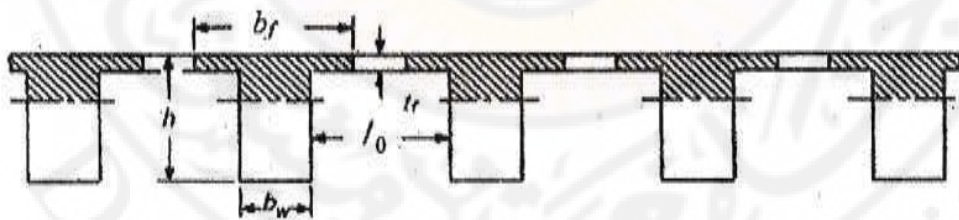


(a) Distribution of maximum flexural compressive stresses



(b) Flexural compressive stress distribution assumed in design

الشكل (3-11) العرض الفعال للجوائز T



الشكل (3-12) الجائز T كجزء من البلاطة.

حيث: L = المسافة بين نقطتي انعدام العزم، ويمكن أن تقاس من مخطط العزم، أو تؤخذ: 0.76 من المجاز في الفتحات الداخلية من الجوائز المستمرة ذات المجازات المتقاربة و 0.87 من المجاز في الفتحات الطرفية (المستمرة من طرف واحد)، وطول المجاز للجوائز البسيطة.

ب- عرض الجسد b_w مضافاً إليه 12 مرة سماكة البلاطة t_f ، أي: $b_f = b_w + 12t_f$ على الأكثر لحساب المقاومة.

عرض الجسد b_w مضافاً إليه 6 مرة سماكة البلاطة t_f ، أي: $b_f = b_w + 6t_f$ على الأكثر لحساب عزم العطالة.

ج- المسافة بين محوري جائزين متجاورين، أي: $b_w + l_o$

- إذا كانت سماكة الجناح (أي سماكة البلاطة) أصغر من $h/10$ يهمل تأثير الجناح ويعتبر المقطع مستطيل.

3-7-3- تحقيق المقاطع بشكل T :

يطلب هنا عادة التحقق من سلامة المقطع، أي ألا تتجاوز الإجهادات الضاغطة في الخرسانة والإجهادات الشادة في التسليح القيم المسموح بها، ويمكن الاستفادة هنا من مفهوم المقطع المكافئ المبين بالشكل (3-13)، حيث يتم تحديد عمق منطقة الضغط x من العلاقة:

$$\frac{b_w x^2}{2} + t_f (b_f - b_w) \left(x - \frac{t_f}{2}\right) - n A_s (d - x) = 0 \quad (3-41)$$

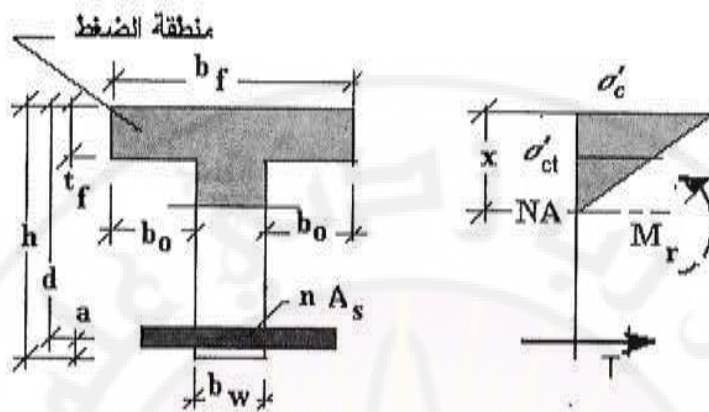
وعلى ضوء ذلك يمكن معرفة موقع المحور المحايد، فإذا كان يقع في الجسد يصار لحساب عزم العطالة للمقطع المكافئ من العلاقة:

$$I_e = \frac{b_f x^3}{3} - \frac{(b_f - b_w)(x - t_f)^3}{3} + n A_s (d - x)^2 \quad (3-42)$$

ويتم تحديد الإجهادات الناعمية الناتجة كما يلي:

$$\sigma'_e = \frac{M \cdot x}{I_e} \leq \bar{\sigma}'_e \quad (3-43)$$

$$\sigma_s = \frac{n M (d - x)}{I_e} \leq \bar{\sigma}_s \quad (3-44)$$



الشكل (3-13) تحقيق المقطع T

3-7-4- العزم المقاوم للمقاطع بشكل T

كما ذكرنا سابقاً فإن العزم المقاوم الأعظمي للمقطع ينتج عندما تصل الإجهادات في كل من الخرسانة وال فولاذ إلى القيم المسموحة.

لحساب العزم المقاوم للمقطع T يمكن تقسيم المقطع إلى مقطعين مستطيلين I و II كما في الشكل (3-14) يتميزان بما يلي:

1- المقطع I : العرض b_f ، الارتفاع الفعال d ، إجهاد الضغط الأعظمي في الخرسانة $\bar{\sigma}'_c$ ، إجهاد الشد الأعظمي في التسليح $\bar{\sigma}_s$.

2- المقطع II: العرض $(b_f - b_w)$ ، الارتفاع الفعال $(d - t_f)$ ، إجهاد الشد الأعظمي في

التسليح $\bar{\sigma}_s$ ، إجهاد الضغط الأعظمي في الخرسانة $\bar{\sigma}'_{ct} = \bar{\sigma}'_c \frac{x - t_f}{x}$.

- نحسب العزم المقاوم للمقطع الأول كما يلي:

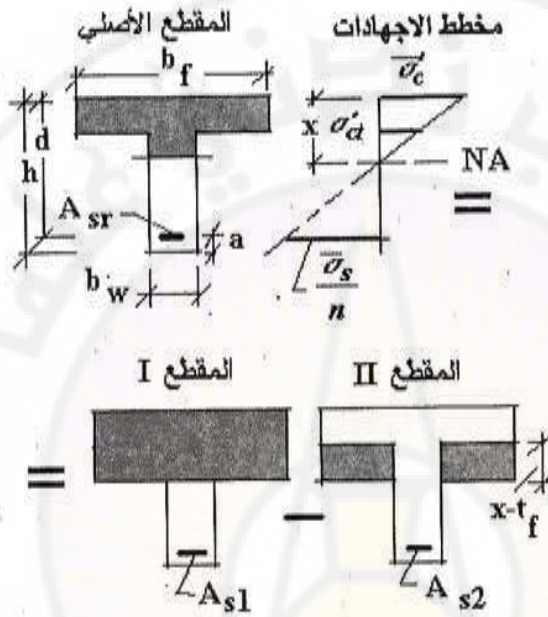
$$M_{r1} = \omega_b \bar{\sigma}'_c b_f d^2 \quad (3-45)$$

ونحسب مساحة التسليح اللازمة بالعلاقة:

$$A_{s1} = \frac{M_{r1}}{\gamma_z \bar{\sigma}_s d} \quad (3-46)$$

حيث تؤخذ العوامل ω_b, γ_z من الجدول (3-4)، وذلك بعد تحديد

$$\gamma_o = \frac{n \sigma'_c}{\bar{\sigma}_s}$$



الشكل (3-14) حساب العزم المقاوم للمقطع T احادي التسليح

- نحسب العزم المقاوم للمقطع الثاني كما يلي:

$$M_{r2} = \omega_b \sigma'_c (b_f - b_w) (d - t_f)^2 \quad (3-47)$$

وتحدد مساحة التسليح اللازم بالعلاقة:

$$A_{s2} = \frac{M_{r2}}{\gamma_z \bar{\sigma}_s (d - t_f)} \quad (3-48)$$

حيث تحدد العوامل ω_b, γ_z من الجدول (3-4)، وذلك بعد تحديد

$$\gamma_o = \frac{n \sigma'_c}{\bar{\sigma}_s}$$

إن العزم المقاوم للمقطع الأصلي يساوي إلى:

$$M_r = M_{r1} - M_{r2} \quad (3-49)$$

ومساحة تسليح الشد الكلية:

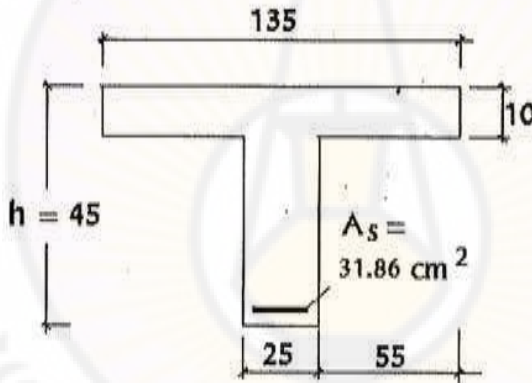
$$A_s = A_{s1} - A_{s2} \quad (3-50)$$

- إذا كان العزم المطبق على المقطع M أكبر من M_r فالمقطع غير مقبول، ولا بد من وضع تسليح في منطقة الضغط، أما إذا كان M أصغر أو تساوي M_r فالمقطع مقبول.
حالة وجود تسليح ضغط في المقاطع T هي حالة نادرة جداً في الجوائز العادية لكبر عرض بلاطة الضغط وكفاية ذلك في مقاومة الإجهادات الضاغطة في الخرسانة.

3-8- أمثلة على المقاطع بشكل T

مثال (1):

يطلب التحقق من سلامة المقطع المبين في الشكل تحت تأثير عزم انحناء قدره $135kN.m$ ،
علماً أن $f'_c = 20MPa$; $f_y = 240MPa$; $A_s = 31.86cm^2$



الحل:

يتم الحل هنا باستخدام العلاقات الأساسية من أجل المقطع المكافئ

- حساب x :

$$\frac{b_w x^2}{2} + t_f (b_f - b_w) (x - 0.5 t_f) - n A_s (d - x) = 0$$
$$\Rightarrow \frac{25x^2}{2} + 10(135 - 25)(x - 0.5 \times 10) - 15 \times 31.86(40 - x) = 0$$

وينتج معادلة من الدرجة الثانية من الشكل:

$$x^2 + 126.23x - 1969.28 = 0$$

ويحل هذه المعادلة ينتج أن $x = 14\text{cm}$ ، وهذا يعني أن المحور المحايد مار في الجذع.
- حساب عزم العطالة للمقطع المكافئ من العلاقة:

$$I_e = \frac{b_f x^3}{3} - \frac{(b_f - b_w)(x - t_f)^3}{3} + nA_s(d - x)^2$$

$$I_e = \frac{135 \times 14^3}{3} - \frac{110 \times 4^3}{3} + 15 \times 31.86(40 - 14)^2 = 44.4 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

- إجهاد الضغط في الخرسانة:

$$\sigma'_c = \frac{M \cdot x}{I_e} = \frac{135 \times 10^6 \times 140}{44.4 \times 10^8} = 4.3 \text{ MPa}$$

نحدد إجهاد الضغط المسموح به من الجدول (1-3) كما يلي:

$$\frac{b_o}{t_f} = \frac{55}{10} = 5.5 \Rightarrow \overline{\sigma}'_c = 0.325 f'_c = 6.5 \text{ MPa}$$

$$\overline{\sigma}'_c > \sigma'_c \quad \underline{OK}$$

- إجهاد الشد في التسليح:

$$\sigma_s = \frac{nM(d - x)}{I_e} = \frac{15 \times 135 \times 10^6 (40 - 14)}{44.4 \times 10^8} = 119 \text{ MPa}$$

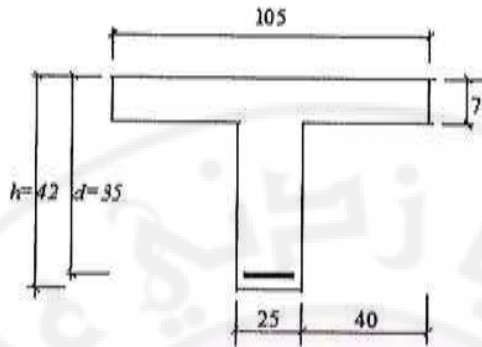
$$< \overline{\sigma}_s = 0.55 \times 240 = 132 \text{ MPa} \quad \underline{OK}$$

والمقطع مقبول

مثال (2):

من أجل المقطع المبين في الشكل يطلب إيجاد العزم المقاوم، وكذلك مساحة التسليح اللازمة لمقاومة هذا العزم،

$$\text{علماً: } f'_c = 22.5 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}$$



الحل:

- نحسب الإجهادات المسموح بها للخرسانة من الجدول (1-3):

$$\frac{b_o}{b_f} = \frac{40}{7} = 5.714 \Rightarrow \bar{\sigma}'_c = 0.3143 \times 22.5 = 7.07 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma}_s = 0.55 \times 240 = 132 \text{ MPa}$$

نعتبر المقطع مؤلفاً من مقطعين مستطيلين لهما المميزات التالية:

المقطع I:

العرض $b_f = 105 \text{ cm}$ ، الارتفاع الفعال $d = 35 \text{ cm}$

المقطع II:

العرض $b_f - b_w = 80 \text{ cm}$ ، الارتفاع الفعال $d - t_f = 35 - 7 = 28 \text{ cm}$

- نحسب العزم المقاوم للمقطع I:

$$\gamma_{ol} = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} = \frac{15 \times 7.07}{132} = 0.8034$$

$$\Rightarrow \omega_{bl} = 0.1897 \quad ; \quad \gamma_{x1} = 0.4458 \quad ; \quad \gamma_{z1} = 0.8513$$

$$M_{r1} = 0.1897 \times 7.07 \times 1.05 \times 0.35^2 = 0.173 \text{ MN.m}$$

-مساحة التسليح المشدود في المقطع I:

$$A_{s1} = \frac{0.173}{0.8513 \times 132 \times 0.35} \times 10^4 = 44.0 \text{ cm}^2$$

- العزم المقاوم للمقطع II:

$$x = \gamma_{x1} \cdot d = 0.4458 \times 35 = 15.6 \text{ cm}$$

$$\sigma'_{cl} = \frac{\sigma'_c}{x} \frac{x - t_f}{x} = 7.07 \times \frac{15.6 - 7}{15.6} = 3.9 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{o2} = \frac{15 \times 3.9}{132} = 0.443 \quad \Rightarrow \quad \omega_{b2} = 0.138 \quad ; \quad \gamma_{s2} = 0.898$$

$$M_{r2} = 0.138 \times 3.9 \times 0.80 \times 0.28^2 = 0.034 \text{ MN.m}$$

- مساحة التسليح المشدود في المقطع II:

$$A_{s2} = \frac{0.034}{0.898 \times 132 \times 0.28} \times 10^4 = 10.3 \text{ cm}^2$$

- العزم المقاوم للمقطع الأصلي:

$$M_r = M_{r1} - M_{r2} = 0.173 - 0.034 = 0.139 \text{ MNm}$$

- مساحة التسليح المشدود اللازم لمقاومة العزم المقاوم:

$$A_s = A_{s1} - A_{s2} = 44 - 10.3 = 33.7 \text{ cm}^2$$

وهو المطلوب.

الفصل الرابع

تصميم المقاطع المعرضة للانحناء

بطريقة حالة الحد الأقصى

Design of Sections in Bending

by Ultimate Limit State

(إعداد: د. م. سليمان ناصيف)

- 1-4- مقدمة
- 2-4- الموثوقية والأمان للعناصر الخرسانية
- 3-4- تراكيب الأحمال المصغدة
- 4-4- الفرضيات الأساسية للانحناء
- 4-5- تحليل الجوائز الخرسانية المسلحة
- 4-6- تحليل الجوائز ذات المقاطع المستطيلة الأحادية التسليح
- 4-7- المقاطع المحكومة بالانهيار على الشد والضغط
- 4-8- نسبة التسليح العظمى μ_{smax}
- 4-9- عوامل تخفيض المقاومة
- 4-10- مساحة التسليح الدنيا
- 4-11- العوامل المؤثرة على العزم المقاوم للجوائز الأحادية التسليح
- 4-12- تصميم الجوائز الخرسانية ذات المقاطع المستطيلة والأحادية التسليح
- 4-13- حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح

4-14- تحليل الجوائز ذات المقاطع غير المستطيلة (المقاطع T و L)

4-15- أمثلة تطبيقية



4-1- مقدمة Introduction

يتم التصميم بطريقة حالات الحدود وفق حالة الحد الأقصى *Ultimate limit state*. وكما ذكرنا سابقاً تعتمد طريقة حالة الحد الأقصى في تصميم المقاطع الخرسانية المسلحة على الأحمال المتوقعة في مرحلة الانهيار (الشكل 2-5-5) وذلك بعد تصعيد أحمال الاستمرار، وباعتبار أن مخطط توزيع إجهادات الضغط في الخرسانة هو منحنى، مع إهمال الخرسانة المشدودة.

حالة الحد هي حالة إذا تجاوزها المنشأ أو جزء منه يخرج عن طور الاستمرار. لقد لوحظ بأن المنشأ قبل وصوله إلى مرحلة الانكسار قد يتعرض لتشوهات كبيرة في مرحلة الاستمرار تؤدي لخروجه عن العمل، مثل حدوث سهوم كبيرة في جانز تحته واجهات زجاجية قد تؤدي لانكسار هذه الواجهات. أيضاً حدوث تشققات كبيرة تؤدي لتعرض الفولاذ للأكسدة، ومن ثم التآكل، بالإضافة إلى أن المنشأ قد تحدث فيه اهتزازات كبيرة ومعينة.

كل هذه الظروف جعلت هذه الطريقة تدرس حالات حدود أخرى غير حالة الحد الأقصى، تسمى حالات حدود الاستمرار *Serviceability limit states* وهي:

حالة حد السهوم *Deflection limit state*

وفق حالة الحد هذه يتم حساب السهوم في عناصر المنشأ ومقارنتها مع السهوم المسموحة في الكود. يتم التأكد من السهوم تحت تأثير حمولات الاستمرار غير المصعدة.

حالة حد الشقوق *Cracking limit state*

وفق حالة الحد هذه يتم حساب الشقوق في عناصر المنشأ ومقارنتها مع القيم المسموحة في الكود وذلك تحت تأثير حمولات الاستمرار غير المصعدة. عرض الشقوق عادةً يتراوح بين $0.1mm$ و $0.3mm$ ، في المنشآت المائية يجب ألا تزيد التشققات على $0.1mm$ أو أقل كما في خزانات المياه.

حالة حد عدم الإتران *Unstable limit state*

وفق حالة الحد هذه يتم التأكد من عدم اهتزاز المنشأ وبحيث لا تحدث ظاهرة الطنين *Resonance*.

عملياً حالة الحد الأقصى هي الحالة الأهم في التصميم حيث قامت الكودات العالمية بوضع شروط محددة لتصميم المقاطع، يؤدي الالتزام بهذه الشروط إلى عدم الحاجة للتحقق من حالات حدود الاستمرار.

تم اعتماد هذه الطريقة في الكود الأمريكي *ACI* منذ العام 1956، وقد جرى بعد ذلك تغيير اسم "الحد الأقصى *ultimate*" إلى "المقاومة التصميمية *strength design*"، كون هذه المقاومة المعتمدة في التصميم هي المحددة وفق الكود وقد لا تكون بالضرورة هي القيمة القصوى للمقطع عند انهياره، وبالتالي أصبحت الطريقة تعرف الآن في الكود الأمريكي بطريقة المقاومة التصميمية *Strength design method*. مع ذلك سيتم في هذا الكتاب اعتماد التسمية المعتمدة في الكود السوري لهذه الطريقة وهي طريقة حالة الحد الأقصى.

4-2- الموثوقية والأمان للعناصر الخرسانية

Reliability and Structural Safety of Concrete Components

يجب أن تصمم المنشآت والعناصر الإنشائية لتقاوم أحمالاً احتياطية إضافية فوق ما هو متوقع تطبيقه عليها في حالات الاستخدام العادية. تأخذ هذه المقاومة الإضافية بالاعتبار عدداً من العوامل يمكن وضعها في مجموعتين:

أ- عوامل متعلقة بزيادة الحمولات، وقد تنشأ نتيجة تغير اشغالات المنشأ وبالتالي زيادة أحمال الاستثمار عن الأحمال التصميمية، أو نتيجة سوء تقدير (أو تقدير أقل من الفعلي *underestimation*) لهذه الأحمال نتيجة أخذ تبسيطات إضافية لطرائق الحساب، أو من تأثيرات الطوارئ، المستخدمة في التنفيذ و تسلسل عمليات التنفيذ.

ب- عوامل متعلقة بانخفاض المقاومة (المحسوبة بطرائق حسابية مقبولة)، وينتج عن عدة عوامل منها التغيرات في مقاومات المواد، اختلاف أبعاد العناصر، قلة المراقبة أثناء التنفيذ، قلة مهارة اليد العاملة وغيره.

حتى وقت قريب كانت عوامل الأمان في التصميم تؤخذ بناءً على التجربة العملية والخبرة الممتدة على فترة من الزمن، ثم يتم تصحيح هذه العوامل بتجميع خبرة إضافية ومعرفة أكبر عن الانهيارات وخصائص الخرسانة. في عام 1956 اقترح *Baker* طريقة مبسطة لتحديد عوامل أمان التصميم تعتمد على الاحتمالات، حيث يتوجب على المهندس المصمم تحديد قيمة هوامش الأمان في التصميم. بهذه الطريقة يتم إسناد موازين مختلفة للعوامل المؤثرة في التصميم. يبين الجدول (4-1) قيماً مختلفة للعوامل المؤثرة على الانهيار الموزون *W_i* *weighted failure* ومن هذه العوامل: اليد العاملة، شروط التحميل، نتائج الانهيار وقدرة المقاومة وغيرها. يتم حساب عامل الأمان ضد الانهيار بالعلاقة:

$$SF = 1.0 + \frac{\sum W_i}{10} \quad (4-1)$$

حيث إن القيمة العظمى لمجموع القيم الموزونة المؤثرة في التصميم = 10، كما في الجدول (4-1)، وبالتالي من أجل تجميع أسوأ للشروط المؤثرة على أداء المنشأ يكون عامل الأمان $SF=2.0$. هذه الطريقة تعتمد على تجميع بيانات سابقة عن الأداءات للمنشأ وعلى نظرية الاحتمالات من أجل إعطاء القيم الأقرب إلى الدقة لكل عامل يؤثر في التصميم.

الجدول (4-1): عامل الأمان الموزون بحسب Baker

W_{tmax}	W_{tmin}	تأثير الانهيار الموزون <i>Weighted failure effect</i>
4.0	1.0	1. نتائج الانهيار: (من 1.0 الى 4.0) - جدي: على الأشخاص أو الاقتصاد - أقل جدية:
2.0	0.5	2. اليد العاملة: (من 0.5 الى 2.0) - صلب في المكان: - مسبق الصنع:
2.0	1.0	3. شروط التحميل: (من 1.0 الى 2.0) قيمة عالية للمجازات البسيطة واحتمالية زيادة الحمولة. قيمة منخفضة من أجل تراكيب الأحمال مثل الأحمال الحية مع الرياح.
0.5		4. أهمية العنصر في المنشأ (الجوائز تأخذ قيمة أقل من الأعمدة)
1.0		5. تحذير من الانهيار
0.5		6. انخفاض المقاومة
المجموع: $\sum W_{tmax} = 10$		$SF = 1.0 + \frac{\sum W_i}{10}$

هناك طريقة أخرى تتعامل مع عدد عوامل احتمالية أقل حيث تأخذ بشكل أساسي الأحمال والمقاومات *loads and resistances* بحيث يتم تصميم العناصر الإنشائية عند مستويات للمقاومة تكون أكبر من الحمولات المصعدة *factored loads*، فتكتب العلاقة:

$$\phi_i R_n \geq \gamma_i W_i \quad (4-2)$$

حيث: R_n المقاومة الاسمية للعنصر البيتولي

W_i الأحمال المطبقة على العنصر

ϕ_i عوامل تخفيض المقاومة

γ_i عوامل تصعيد الحمولات

i تمثل النماذج المختلفة لأحمال: مينة، حية، رياح، زلازل، أو تأثيرات متعلقة بالزمن.

يبين الشكل (4-1-4) مخطط توزيع التواترات *frequency distributions* للحمولة الفعلية

W والمقاومة R مع القيم المتوسطة (*mean*) \bar{R} و \bar{W} .

يبين الشكل (4-1-4) النقطة C لتقاطع المخططين، عند هذه النقطة يكون $R - W = 0$

يمكن الملاحظة من هذا الشكل وجود الأمان والوثوقية للمنشأ عندما يقع تأثير الحمولة W عند

منطقة يسار التقاطع C على المنحني W وعلى يمين التقاطع C على منحنى المقاومة R . كما

انه من المتوقع حدوث الانهيار إذا وقع تأثير الحمولة أو المقاومة ضمن المساحة المهشرة

بالشكل (4-1-4). لناخذ β مؤشر الأمان *safety index* فيكون:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{W}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_W^2}} \quad (4-3)$$

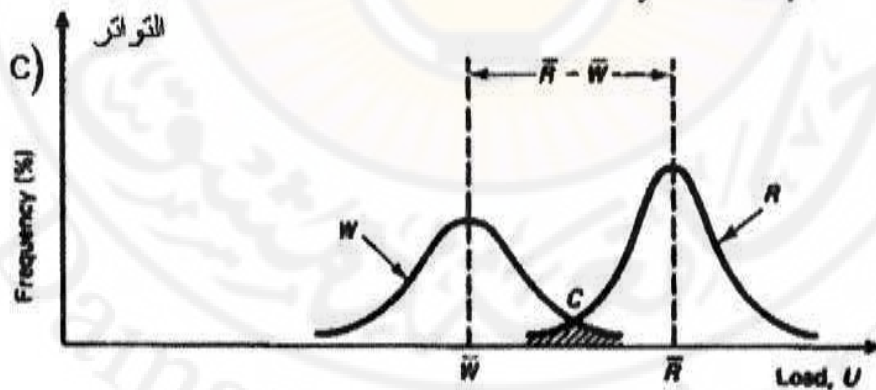
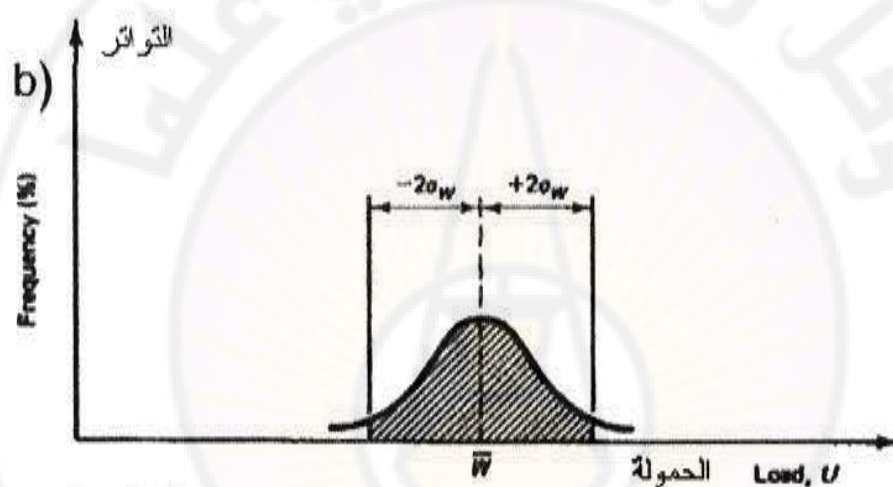
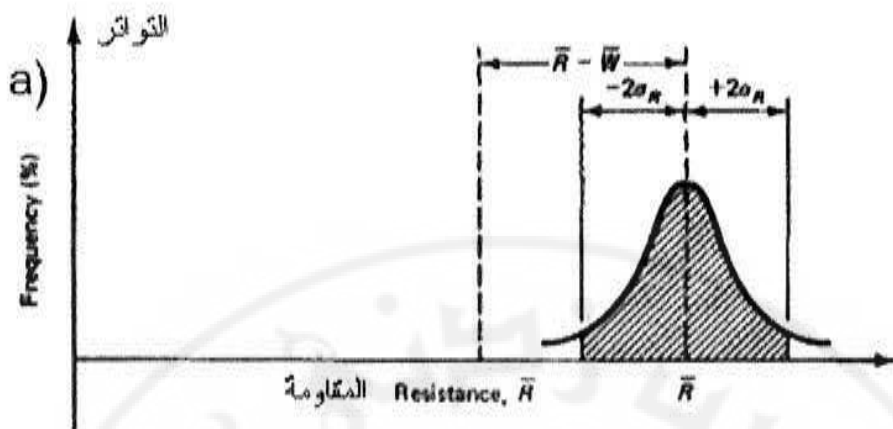
حيث:

σ_W و σ_R هما الانحرافات المعيارية للمقاومة والحمولة على التوالي.

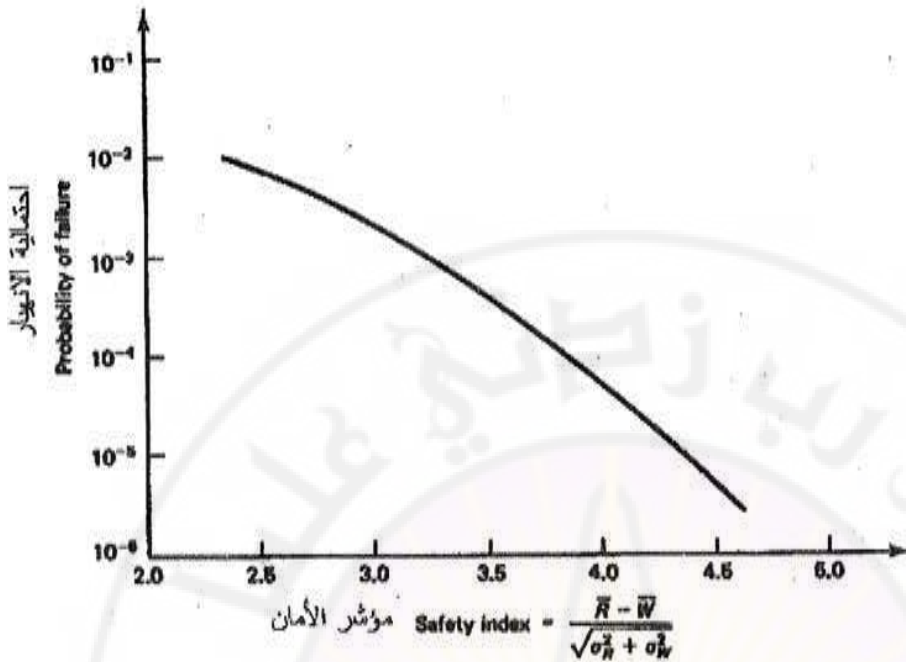
يبين الشكل (4-2) منحنى تغير مؤشر الأمان مع احتمالية الانهيار لجملة انشائية افتراضية.

يمكن الملاحظة بان احتمالية الانهيار تتناقص عندما يتزايد الفرق بين \bar{R} و \bar{W} أو تتناقص قيم

الانحراف المعياري وهذا يؤدي إلى تقليل المساحة المهشرة تحت نقطة التقاطع C بالشكل (4-1).



الشكل (1-4) التوزيع المتواتر للأحمال مع المقاومة
Frequency distribution of loads versus resistance



الشكل (2-4) منحنى تغير مؤشر الأمان مع احتمالية الانهيار لجملة إنشائية افتراضية
Probably of failure versus safety index β

يتم تحديد مقدار الزيادة في الفرق $\bar{R} - \bar{W}$ أو مقدار التناقص في الانحرافات المعيارية بناءً على اعتبارات اقتصادية، إذ أنه من غير المجدي تصميم منشأ باحتمالية انهيار صفر، حيث إنه قد يتعرض هذا المنشأ نفسه لمخاطر أخرى كالزلازل أو الحريق أو غيره، ومن ثم يتم اختيار عوامل الأمان بإهمال مستويات التحميل (أو الزيادة في الإجهاد) التي يكون احتمال حدوثها صغير جداً. ومن الممكن اعتبار أن القيم المناسبة لـ β تتراوح بين 1.75 و 3.2 للمنشآت البيتونية، ويمكن اعتبار قيم أقل من أجل أحمال الرياح والزلازل.

لقد وضع الكود الأمريكي *ACI 318* طريقة تجريبية مبسطة ولكن أقل دقة من أجل حساب عامل الأمان وفق العلاقة:

$$SF = \frac{\gamma_1 D + \gamma_2 L}{D + L} \times \frac{1}{\phi} \quad (4-4)$$

حيث ϕ عامل تخفيض المقاومة و γ_1 و γ_2 عوامل تصعيد الحمولات الميتة D والحية L .

وبما أن الحمولة الميتة تشمل الوزن الدائم للمنشأ بينما الحمولة الحية فتشمل الأحمال غير الدائمة كالأشخاص والفرش وغيره، لذلك يكون من الأسهل تقدير الحمولة الميتة، لذلك يعطي الكود قيمة لعامل تصعيد الحمولة الميتة أصغر منها للحمولة الحية.

إذا يُعدّ الأمان محققاً بطريقة حالة الحد الأقصى بتحقيق معادلة الأمان الأساسية:

$$\phi \cdot R_{II} \geq U \quad (4-5)$$

حيث:

R_{II} - مقاومة المقطع بحسب اعتماداً على أبعاد المقطع ومقاومات مواده

ϕ - عامل تخفيض المقاومة يأخذ بالاعتبار احتمال تغير أبعاد المقطع ومقاومات المواد

عن المحسوب. يرمز له الكود السوري بـ Ω ويؤخذ في الانعطاف مساوياً لـ 0.90

وتتغير هذه القيمة في الضغط والقص وغيره.

U - تراكيب الأحمال الخارجية المصعدة المطبقة على المقطع.

3-4 - تراكيب الأحمال المصعدة Factored Loads Combinations

1-3-4 - وفق الكود السوري:

يتم تحديد الأفعال القصوى المأخوذة في التصميم من التراكيب التالية:

$$U = 1.5 D + 1.8 L \quad (4-6-1)$$

$$U = 0.8 (1.5 D + 1.8 L + 1.8 W) \quad (4-6-2)$$

$$U = 0.8 [1.5 D + 1.8 L + 1.8 (1.1 S)] \quad (4-6-3)$$

حيث:

D, W, L, S هي الأحمال الميتة، الحية، الرياح، والزلازل على التوالي.

- في حال تعرض المنشأ لضغط التربة E يتم إضافة $1.8E$ إلى التراكيب أعلاه، أما في حال

تعرض المنشأ لضغط سائل F فيتم إضافة $1.5F$ بدلاً من $1.8E$ إلى التراكيب أعلاه.

- في حال تعرض المنشأ لأحمال T ناتجة عن الزمن (فرق هبوط، زحف، انكماش، تغيرات

حرارية، وغيره) نأخذ التركيب:

$$U = 0.8 (1.5 D + 1.8 L + 1.5 T) \quad (4-6-4)$$

- عندما تؤدي الأحمال الشاقولية إلى زيادة استقرار المنشأ أو الزيادة في مقاومة العنصر، كالحالة عند تراكب الانعطاف مع الضغط المحوري أو القص مع الضغط المحوري، يتم عندها تخفيض الأحمال الشاقولية وفق التراكيب:

$$U = 0.9 D + 1.4 W \quad (4-6-5)$$

$$U = 0.9 D + 1.8 E \quad (4-6-6)$$

$$U = 0.9 D + 1.4 W + 1.4 E \quad (4-6-7)$$

$$U = 0.9 D + 1.4(1.1S) \quad (4-6-8)$$

$$U = 0.9 D + 1.4(1.1S) + 1.4 E \quad (4-6-9)$$

- في حال تعرض المنشأ لضغط سائل F تبدل في العلاقات أعلاه كل E بـ (5/6F).

4-3-2- وفق الكود الأمريكي ACI (من العام 1971 وحتى 1999):

التراكيب التالية هي التي كانت معتمدة في التصميم وفق الكود الأمريكي حتى العام 1999 ثم جرى تعديلها لاحقاً وفق ما سيتم ذكره لاحقاً، وهي الآن مذكورة على هامش الكود.

1 - عندما يكون التصميم باعتبار الأحمال الميتة D والحية L فقط:

$$U = 1.4 D + 1.7 L \quad (4-7-1)$$

2 - عندما يؤخذ تأثير الرياح W :

$$U = 0.75(1.4 D + 1.7 L + 1.7 W) \quad (4-7-2)$$

حيث سمح زيادة بالإجهادات بمقدار 75% كون الرياح تطبق بقيمتها القصوى خلال فترة زمنية قصيرة

$$U = 0.9 D + 1.3 W \quad (4-7-3)$$

3 - عندما يؤخذ تأثير الزلازل (المحسوبة عند مرحلة الاستثمار) E :

$$U = 0.75 [1.4 D + 1.7 L + 1.7(1.1E)] \quad (4-7-4)$$

$$U = 0.9 D + 1.3(1.1)E \quad (4-7-5)$$

كما توجد تراكيب أخرى موجودة في الكود تأخذ بالاعتبار ظروف أخرى للتحميل مثل وجود

ضغط تربة H أو سوائل F أو (تغيرات حرارية، الزحف، التقلص) T.

$$U = 1.4 D + 1.7 L + 1.7 H \quad (4-7-6)$$

$$U = 0.9 D + 1.7 H \quad (4-7-7)$$

$$U = 1.4 D + 1.7 L + 1.4 F \quad (4-7-8)$$

$$U = 0.9 D + 1.4 F \quad (4-7-9)$$

$$U = 0.75(1.4 D + 1.4 T + 1.7 L) \quad (4-7-10)$$

$$U = 1.4(D + T) \quad (4-7-11)$$

4-3-3-4- وفق الكود الأمريكي ACI (منذ العام 2002 وحتى الآن):

التركيب التالية هي المعتمدة في التصميم وفق الكود الأمريكي الحالي:

$$U = 1.4(D + F) \quad (4-8-1)$$

$$U = 1.2(D + F + T) + 1.6(L + H) + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \quad (4-8-2)$$

عندما يؤخذ تأثير الرياح W :

$$U = 1.2D + (1.0L \text{ or } 0.8W) + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \quad (4-8-3)$$

$$U = 1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \quad (4-8-4)$$

عندما يؤخذ تأثير الزلازل (المحسوبة عند مرحلة الانتهاء) E :

$$U = 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \quad (4-8-5)$$

كما توجد تراكيب أخرى لتحقيق الانقلاب:

$$U = 0.9D + 1.6W + 1.6H \quad (4-8-6)$$

$$U = 0.9D + 1.0E + 1.6H \quad (4-8-7)$$

حيث:

D- الحمولة الميتة، L- الحمولة الحية، L_r - الحمولة الحية على السطح، S- حمولة الثلج،
R- حمولة الأمطار، F- الحمولة الناتجة عن وزن وضغط السوائل، H- الحمولة الناتجة عن
وزن وضغط التربة، T- التأثير التجميعي للحرارة والزحف والتقلص وفرق الهبوط.

ملاحظات:

- في جميع الحالات يتم تصميم العنصر على التركيب الأسوأ من التراكيب المذكورة
- لا يجمع أثر الزلازل مع الرياح بل يؤخذ الأثر الأسوأ بينهما.
- يسمح الكود الأمريكي ACI منذ العام 2002 بتخفيض الحمولة الحية L بضربها بالعامل 0.5 بدلاً من 1.0 في التراكيب الثلاثة (4-8-3) وحتى (4-8-5) فيما عدا في الكراجات أو أماكن التجمعات العامة والأماكن التي تتجاوز فيها قيمة الحمولة الحية 4.8 kN/m^2 .

4-4- الفرضيات الأساسية للانحناء

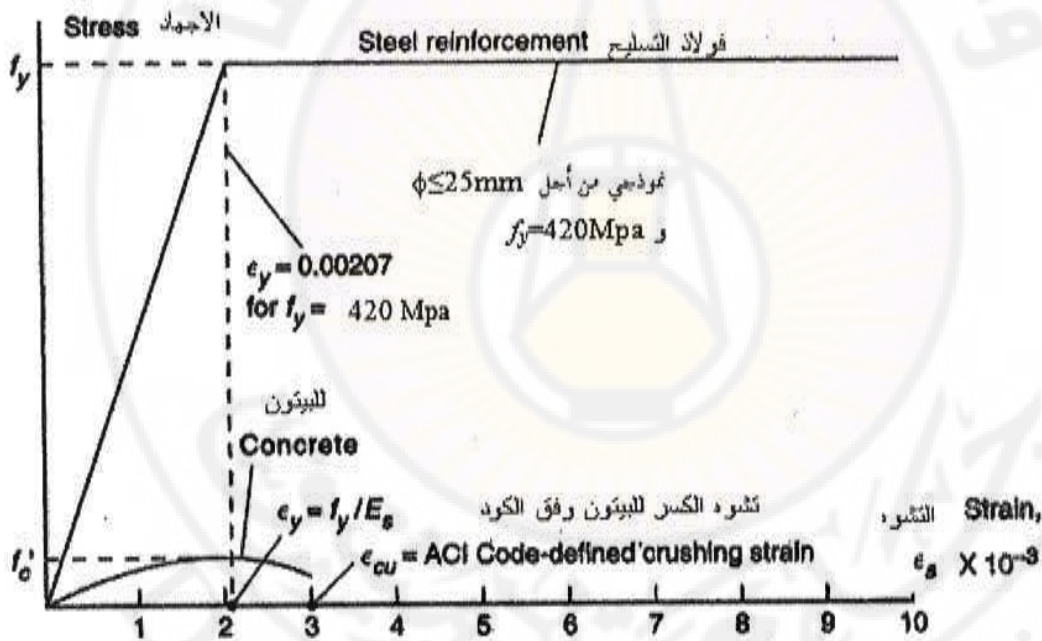
تم وضع ثلاث فرضيات أساسية لتسهيل الحسابات، وهي:

1. المقاطع المستوية قبل الانحناء تبقى مستوية بعده حتى انهيار الجائز، أي إن شكل التشوه في الخرسانة خطي ويزداد كلما ابتعدنا عن المحور السليم (الشكل 2-5-5). هذه الفرضية صحيحة

من أجل الجوائز المتجانسة *homogeneous* والعاملة في مجال المرونة *elastic*، ولكن وجد بالاختبارات بأن هذه الفرضية تعتبر مقبولة للجوائز الخرسانية المسلحة وحتى مرحلة الانهيار.

2. التشوه في الفولاذ مساوٍ للتشوه في الخرسانة عند نفس المستوي، هذا يتطلب وجود تماسك قوي بين الخرسانة والفولاذ وعدم وجود أي انزلاق لقضبان التسليح من الخرسانة المحيطة. عند أماكن الشقوق في الخرسانة تعتبر هذه الفرضية غير صحيحة ولكن إذا قيس التشوه الوسطي عند عدة شقوق يمكن اعتبار بأن الخرسانة والفولاذ يعملان معاً بشكل جيد وبالتالي القبول بهذه الفرضية.

3. يمكن حساب الإجهادات في الخرسانة والتسليح بدلالة التشوهات، وذلك بالاعتماد على منحنى الإجهاد - التشوه لكل من الخرسانة والفولاذ المبين في الشكل (3-4). لقد تم الحصول على مخطط توزيع الإجهادات المبين في الشكل (2-5) اعتماداً على قيم التشوهات في كل من الخرسانة والفولاذ المقاسة أثناء الاختبار وبعتماد المنحنى النظري للإجهاد مع التشوه.



الشكل (3-4) منحنيات الإجهاد - التشوه لكل من الخرسانة وفولاذ التسليح، وتعريفات ϵ_{cu} و ϵ_y

Stress-strain curves for concrete and steel reinforcement

فرضيات إضافية من أجل التصميم:

من أجل تسهيل أشكال علاقات التصميم المستنتجة تم إضافة الفرضيات التالية مع فقدان بسيط ومقبول للدقة:

4. إهمال مقاومة الخرسانة على الشد. مقاومة الخرسانة على الشد تساوي بالتقريب 10% من مقاومته على الضغط، وبالتالي تكون قوة الشد في الخرسانة صغيرة بالمقارنة مع قوة الشد في الفولاذ، وتكون مساهمة الخرسانة المشدود في مقاومة الانحناء للجائز صغيرة ويمكن إهمالها. تجدر الإشارة إلى أنه لا يتم إهمال مقاومة الخرسانة على الشد عند حساب القص والسهم والتماسك.

5. يفرض بأن الخرسانة تنهار عندما يصل تشوه الضغط إلى قيمة محددة (0.003).

6. تقريب شكل توزيع الإجهادات الضاغطة في الخرسانة إلى شكل مستطيل (بحسب العالم Witney) كما في الشكل (4-4)، في هذا المخطط:

يتم توزيع الإجهاد في الخرسانة ($0.85f'_c$) بشكل منتظم على منطقة ضغط مكافئة محددة بحواف المقطع العرضي وبخط مستقيم مواز للمحور السليم ويبعد مسافة $y = \beta_1 x$ من الليف المضغوط الأقصى، وبحيث تكون مساحة المستطيل المكافئ مساوية تقريباً لمساحة المنحني المضغوط، ومن ثم تكون قيمة C هي واحدة للحالتين.

- يتم قياس المسافة x بشكل عمودي على المحور السليم، وقد تبين بالتجربة أن:

(وفق الكود الأمريكي ACI-318-2005)

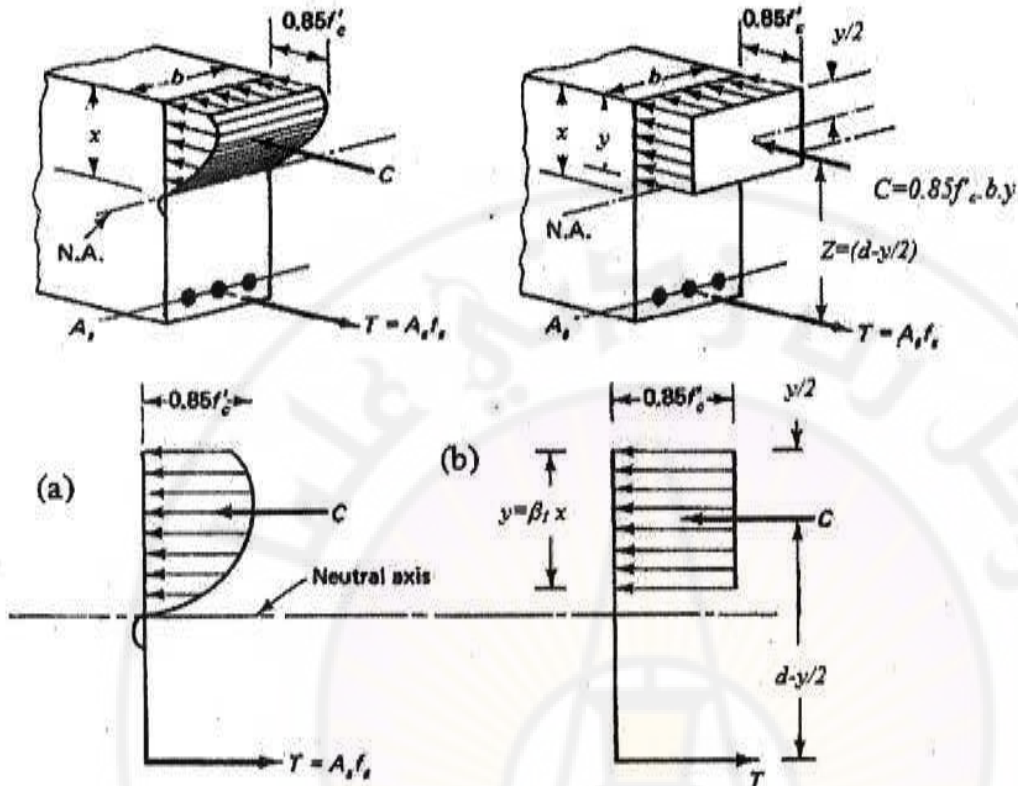
• من أجل: $f'_c \leq 30MPa$ يتم أخذ $\beta_1 = 0.85$

ثم يتم تخفيض قيمة β_1 بمقدار 0.05 مع كل زيادة بمقدار 7.0 MPa بقيمة f'_c بحيث لا تقل β_1 عن 0.65 وبالتالي يكون:

• من أجل $f'_c \geq 58MPa$ يتم أخذ $\beta_1 = 0.65$

• من أجل $30 \leq f'_c \leq 58MPa$ يتم أخذ $\beta_1 = 0.85 - 0.007(f'_c - 30)$

ينص الكود السوري على ما يلي: عندما تزيد المقاومة المميزة f'_c عن 28MPa فيلزم أخذ قيمة ارتفاع منطقة الضغط مساوياً إلى $y = 0.80 x$ وفي هذه الحالة ستتغير جميع العلاقات المتعلقة بـ y .



الشكل (4-4) توزيع الإجهادات والتشوهات على ارتفاع المقطع:
 a- مخطط الإجهاد الفعلي، b- مخطط الإجهاد المكافئ المفروض

يمكن للتبسيط استعمال العلاقات السابقة ذاتها، مع أخذ مقاومة مميزة مكافئة تساوي 0.93 من المقاومة المميزة المعتمدة في التصميم.
 سوف نصادف أثناء دراستنا لعناصر الخرسانة المسلحة نوعين من المسائل:

1. التحليل: Analysis

في هذا النوع من المسائل يكون معطى لدينا أبعاد مقطع العنصر ومساحة التسليح بالإضافة لمقاومات الخرسانة والتسليح، ويكون المطلوب حساب قدرة تحمل المقطع أي حساب العزم الذي يمكن أن يتحمله المقطع.

2. التصميم: *Design*

في هذا النوع من المسائل يكون معروف لدينا العزم المطبق M_u ، ويكون المطلوب اختيار المقطع والتسليح ومقاومات الخرسانة والتسليح المناسبة والقادرة على تحمل العزم. مسائل التحليل تكون عادةً أسهل كون جميع المتغيرات تكون معروفة والمطلوب فقط حساب قدرة تحمل المقطع، أما مسائل التصميم فهي أكثر تعقيداً لوجود عدد من المتغيرات التي يجب حسابها، لذلك سنبدأ بمسائل التحليل ومن ثم سننتقل إلى التصميم.



4-5- تحليل الجوائز الخرسانية المسلحة

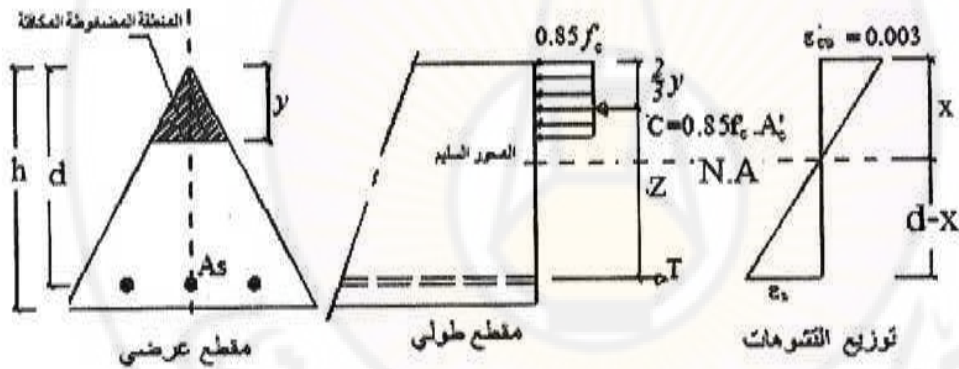
Analysis of Reinforced Concrete Beams

4-5-1- مقدمة:

- عند تحليل الجوائز الخرسانية المسلحة أو تصميمها يجب تحقيق متطلبين أساسيين هما:
1. التوافق بين الإجهادات والتشوهات *Stress and strain compatibility*: الإجهاد في أي نقطة من العنصر يجب أن يتناسب مع التشوه عند نفس النقطة.
 2. التوازن *Equilibrium*: تأثير الأحمال الخارجية المطبقة يجب أن يساوي تأثير القوى الداخلية.

4-5-2- حساب قدرة تحمل جائر ذو مقطع عرضي عام:

يبين الشكل (4-5) مقطعاً عرضياً ذا شكل مثلثي، يتم حساب قدرة تحمل المقطع اعتماداً على شرطي التوافق والتوازن كما يلي:



الشكل (4-5) توزيع الإجهادات والتشوهات على المقطع العرضي ذي الشكل المثلثي

من شرط التوازن، ويفرض أن الإجهاد في التسليح المشدود f_s يساوي إجهاد السيالان f_r نجد: (محصلة قوة الضغط في الخرسانة تساوي قوة الشد في الفولاذ)

$$C = T \Rightarrow 0.85 f'_c A'_c = A_s f_y \quad (4-9)$$

حيث A'_c مساحة المنطقة المضغوطة المكافئة

وبأخذ مجموع العزوم مرة حول محصلة قوة الضغط في الخرسانة ومرة حول مركز التسليح المشدود نجد:

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y Z \\ M_n &= 0.85 f'_c A'_c Z \end{aligned} \quad (4-10-1)$$

وبتحقيق معادلة الأمان الأساسية (المعادلة 4-5) نجد:

$$\begin{aligned} M_u &= \Omega A_s f_y Z \\ M_u &= \Omega 0.85 f'_c A'_c Z \end{aligned} \quad (4-10-2)$$

حيث:

M_n - العزم المقاوم الاسمي للمقطع *nominal flexural strength*

M_u - العزم الخارجي الحدي (المصعد) المطبق على المقطع

$$Z = d - \frac{2y}{3} \quad -Z \text{ هو ذراع المزدوجة}$$

للتحقق من فرضية وصول التسليح المشدود للسيلان، يتم الاعتماد على مخطط التشوهات. يشترط الكود استخدام نسب تسليح منخفضة نسبياً في الجوائز، وذلك لضمان وصول التسليح المشدود للسيلان.

يمكن استخدام طريقة التحليل أعلاه من أجل حساب العزم المقاوم لأي شكل مقطع عرضي للجائز، ولكن بما أن المقاطع العرضية للجوائز تكون عادة مستطيلة لذلك سيتم التركيز على دراسة المقاطع المستطيلة. الذي يحكم المعادلات أعلاه هو شكل انهيار المقطع.

4-5-3- الأَشكال المحتملة لانهيّارات المقاطع:

اعتماداً على خصائص الجائز فإن الانهيار على الانحناء يمكن أن يحدث في إحدى الحالات الثلاث التالية:

(1) انهيار على الشد *Tension failure*: يصل الفولاذ إلى حد السيلان قبل انهيار الخرسانة المضغوطة (قبل أن تصل الخرسانة المضغوطة للتشوه الحدي 0.003)، ويكون تسليح هذا الجائز أقل من التسليح التوازني. يكون انهيار هذا الجائز من النوع المطاوع *Ductile failure*,

أي يسبق مرحلة الانهيار ظهور علائم وتشوهات ملحوظة (زيادة كبيرة في الشقوق والسحوم) تنذر بالخطر مسبقاً. يسمى هذا الجائز بجائز مسلح بتسليح قليل *Under-reinforced beam*

(2) انهيار على الضغط *Compression failure*: تنهار الخرسانة المضغوطة قبل وصول الفولاذ إلى السيلان ويكون هذا الانهيار هشاً *Brittle failure* ومفاجئاً، ويفضل الابتعاد عن هذا النوع من الانهيار. تسليح هذا الجائز يكون أكبر من التسليح التوازني، ويسمى هذا الجائز بجائز مسلح بتسليح أكبر من اللازم *Over-reinforced beam*.

(3) انهيار توازني *Balanced failure*: تنهار الخرسانة المضغوطة (تصل الخرسانة المضغوطة للتشوه الحدي 0.003) في نفس اللحظة التي يصل فيها الفولاذ إلى حد السيلان، ويكون تسليح هذا الجائز يساوي التسليح التوازني *Balanced reinforcement*. للابتعاد عن الانهيار المفاجئ والهش تنص معظم الكودات العالمية على تسليح الجائز بنسب تسليح أقل من التوازنية أي $\mu_s < \mu_{sb}$ (هي نسبة التسليح الموافقة للحالة التوازنية) ويكون الإجهاد في الفولاذ مساوياً لإجهاد السيلان $f_s = f_y$.
الحالة التوازنية:

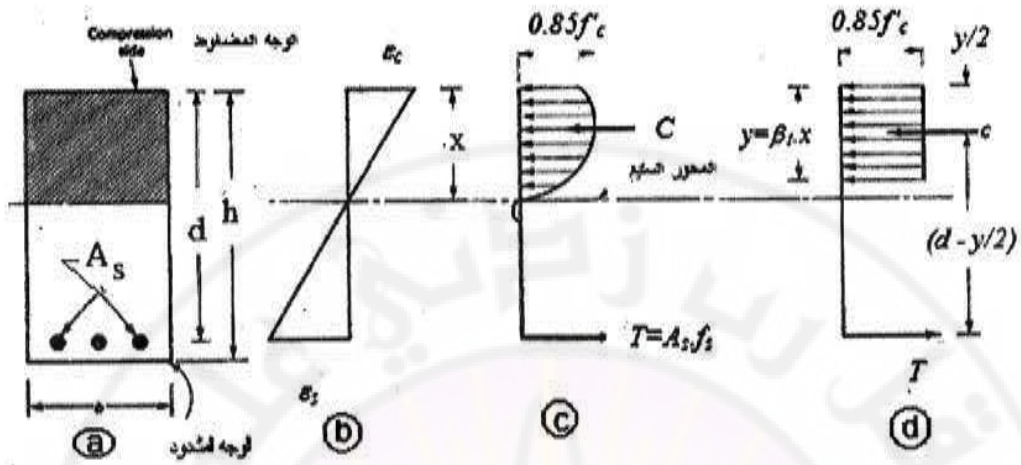
هي الحالة التي يتشوه فيها الليف الأقصى للبيتون المضغوط بمقدار 0.003 في نفس اللحظة التي يصل فيها التشوه في فولاذ التسليح إلى قيمة تشوه السيلان أي: $\epsilon_s = \epsilon_y = f_y / E_s$.

4-6- تحليل الجوانز ذات المقاطع المستطيلة الأحادية التسليح

4-6-1- حساب قدرة تحمل جائز ذي مقطع مستطيل:

ليكن لدينا مقطع مستطيل مبين في الشكل (4-6)، الأبعاد والتسليح معلومان والمطلوب حساب قدرة تحمل المقطع (العزم المقاوم للمقطع) ΩM_n . سيتم اعتماد نفس الطريقة في الحساب المعتمدة في حالة المقطع العام المدروس أعلاه، مع افتراض أن الإجهاد في التسليح المشدود قد وصل للسيلان.
من شرط التوازن الأول نجد:

$$C = T$$



الشكل (4-6) توزيع الإجهادات والتشوهات على المقطع العرضي المستطيل

$$\Rightarrow 0.85f'_c by = A_s f_y \quad (4-11)$$

ومنه نحسب الارتفاع المكافئ لمنطقة الضغط y

$$y = \frac{A_s f_y}{b 0.85f'_c} \quad (4-12)$$

بالتقسيم على d نجد:

$$\frac{y}{d} = \frac{A_s f_y}{bd 0.85f'_c} \quad (4-13)$$

يمكن إيجاد العزم المقاوم الاسمي للمقطع M_n بأخذ مجموع العزوم حول مركز التسليح المشدود

أو حول نقطة تطبيق محصلة قوة الضغط (المعادلات 4-10-1) كما يلي:

$$M_n = C Z$$

$$M_n = T Z$$

فيكون العزم المقاوم للمقطع ΩM_n ، نعوض عن C و T بقيمها من العلاقة 4-11 فنجد:

$$\Omega M_n = \Omega \left[0.85 f'_c b y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \quad (4-14)$$

$$\Omega M_n = \Omega \left[A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \quad (4-15)$$

بتعويض $A_s = \mu_s b d$ في العلاقة (4-12) نحصل على

$$y = \frac{\mu_s f_y}{f'_c} \left(\frac{d}{0.85} \right) \quad (4-16a)$$

حيث يشار إلى النسبة $\omega = \frac{\mu_s f_y}{f'_c}$ بنسبة التسليح الميكانيكية وعادة تستخدم كمقياس لسلوك

الجائز لاحتوائها على المتغيرات الثلاثة الأساسية المؤثرة في هذا السلوك، وبالتالي يكون:

$$y = \frac{\omega d}{0.85} \quad (4-16b)$$

بتعويض المعادلة (4-16b) في (4-14) نجد:

$$\begin{aligned} \Omega M_n &= \Omega \left[0.85 f'_c b \frac{\omega d}{0.85} \left(d - \frac{\omega d}{2 \times 0.85} \right) \right] \\ &= \Omega \left[f'_c b d^2 \omega (1 - 0.59\omega) \right] \end{aligned} \quad (4-17)$$

أو:

$$M_n = \Omega \left[1 - 0.59 \frac{A_s f_y}{b d f'_c} \right] A_s f_y d \quad (4-18)$$

ومن العلاقة (4-14) نجد:

$$M_n = \Omega \left[0.85 f'_c b y d \left(1 - \frac{y}{2d} \right) \right] \quad (4-19)$$

أو:

$$M_n = \Omega \left[\frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{2d} \right) \right] 0.85 f'_c b d^2 \quad (4-19)$$

4-6-2- تحديد فيما إذا $f_s = f_y$:

عند اشتقاق المعادلات السابقة (بدءاً من المعادلة 4-11) تم افتراض أن فولاذ الشد قد وصل للسيلان أي $f_s = f_y$ ، ولكن من الضروري عند حساب الجوائز التحقق من صحة هذه الفرضية. لتأخذ الجائز المبين بالشكل (4-7)، ولنفرض أنه ينهار بالحالة التوازنية، بدراسة تشابه المثلثات في مخطط توزيع التشوهات نجد:

$$\frac{x_b}{d} = \frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{cu} + \varepsilon_y} \quad (4-20)$$

في الحالة التوازنية تكون $\varepsilon'_{cu} = 0.003$ ، وبأخذ $E_s = 210000 \text{ MPa}$ نعوض فنجد:

$$\frac{x_b}{d} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{210000}}$$

ومنه:

$$\frac{x_b}{d} = \frac{630}{630 + f_y} \quad (4-21)$$

إذا كان عمق المحور السليم للجائز x أصغر من x_b فإن قيمة التشوه في الفولاذ ستتجاوز ε_y والعكس صحيح، وبالتالي عند الانهيار إذا كان $x \leq x_b$ ، فإن $f_s = f_y$. نعرف ان $y_b = \beta_1 \cdot x_b$ فيكون لدينا:

$$\frac{y_b}{d} = \beta_1 \left(\frac{630}{630 + f_y} \right) \quad (4-22)$$

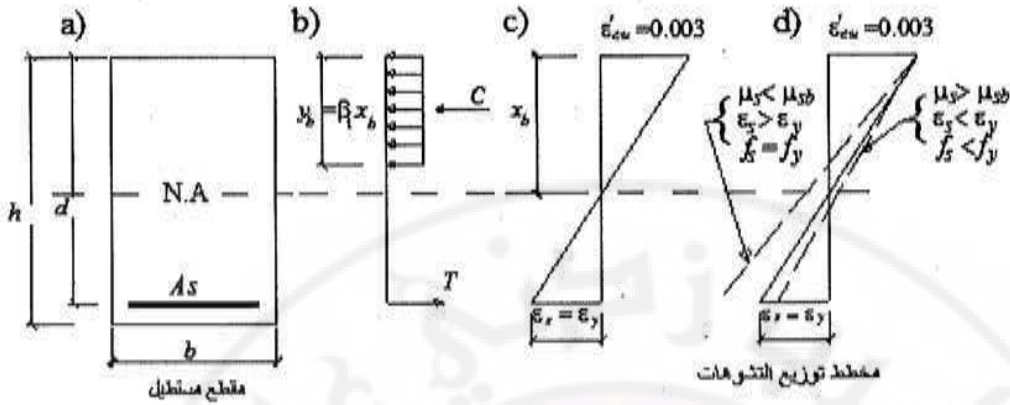
ومن أجل $f'_c \leq 30 \text{ MPa}$ فإن $\beta_1 = 0.85$

نلاحظ بان $\frac{y_b}{d}$ يتعلق فقط بحد السيلاّن للفولاذ المستخدم.

أثناء التصميم للتحقق فيما إذا كان $f_s = f_y$ نتحقق فيما إذا $\frac{y}{d} \leq \frac{y_b}{d}$ ، يبين الجدول (4-2) قيم

$\frac{y_b}{d}$ من أجل $f'_c \leq 30 \text{ MPa}$ ومقاومات مختلفة للفولاذ.

- من علاقة التوازن الأولى نجد:



الشكل (4-7) توزيع الإجهادات والتشوهات على المقطع العرضي المستطيل

الجدول (4-2) يبين قيم مختلفة للنسبة y/d بحسب قيمة f_y

f_y (MPa)	$\frac{y_b}{d}$	$0.75 \frac{y_b}{d}$	$0.50 \frac{y_b}{d}$	$0.35 \frac{y_b}{d}$
240	0.6155	0.462	0.308	0.215
360	0.541	0.406	0.2705	0.1894
420	0.51	0.3825	0.191	0.067

ملاحظة: للجوائز يفضل أن تكون النسبة y/d تتراوح بين 0.35 و 0.5 من y/d

$$y_b = \frac{A_{sb} f_y}{b \cdot 0.85 f'_c} \quad (4-23)$$

بمساواة المعادلتين 4-22 و 4-23 نجد:

$$\frac{A_{sb} f_y}{b \cdot 0.85 f'_c} = \beta_1 \left(\frac{630}{630 + f_y} \right) d$$

$$\Rightarrow A_{sb} = \frac{535.5 \beta_1 f'_c}{630 + f_y} b \cdot d$$

ومن أجل $\beta_1 = 0.85$ ، تكون مساحة التسليح التوازنية للمقطع المستطيل تساوي:

$$A_{sb} = \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} bd \quad (4-24)$$

ونسبة التسليح التوازني:

$$\mu_{sb} = \frac{535.5 \beta_1 f'_c}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} = \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \quad (4-25)$$

حيث تم أخذ $\beta_1 = 0.85$ ، وتؤخذ f'_c و f_y بالـ MPa

يمكن أن تستخدم المعادلة 4-25 لتحديد فيما إذا كان الجائز سينهار على الشد أو الضغط كما يلي:

- إذا كانت μ_s أصغر من μ_{sb} فإن قوة الشد T تكون أقل من التوازنية، وبالتالي تكون قوة الضغط C أقل، وهذا يتطلب مساحة أقل لمنطقة الضغط، وكنيجة لذلك يرتفع المحور السليم للأعلى كما هو مبين في الشكل (4-7-d)، في هذه الحالة تكون ϵ_s أكبر من ϵ_y ويكون التسليح قد وصل للسيلان عند الانهيار، انهيار هذا الجائز من النوع المطاوع *ductile failure*.

- إذا كانت μ_s أكبر من μ_{sb} فإن ϵ_s تكون أصغر من ϵ_y ويزداد عمق المحور السليم، ينهار هذا الجائز بطريقة هشة *brittle failure* ودون إنذار مسبق.

للابتعاد عن الانهيار الهش والمفاجئ حدّد الكود الأمريكي (الإصدارات قبل العام 2002) نسبة التسليح العظمى بـ $\mu_{smax} \leq 0.75 \mu_{sb}$ وهذا يكافئ تقريباً قيمة تشوه فولاذ عند الانهيار: $\epsilon_s = (1.8 \text{ to } 2.0) \epsilon_y$.

ولكن أثناء التنفيذ قد تتغير مقاومات الخرسانة والفولاذ عن القيم التصميمية (قد تقل مقاومة الخرسانة وتزداد مقاومة الفولاذ)، وقد تتغير أبعاد الجائز (وخاصة الارتفاع الفعال) عن القيم التصميمية، وهذا يؤدي إلى تحول انهيار الجائز ذي نسبة التسليح $\mu_s = 0.75 \mu_{sb}$ إلى انهيار على الضغط. إضافة لذلك فإنه يصعب توضيح التسليح وصب الخرسانة في الجوائز ذات نسب التسليح أكبر من $0.5 \mu_{sb}$ ، كما تظهر هذه الجوائز قيم عالية للسهوم والشقوق. لجميع هذه الأسباب يكون من المناسب تحديد نسبة التسليح العظمى في الجوائز بـ

$$\mu_{smax} \leq 0.5 \mu_{sb} \text{ السوري } \mu_s = 0.35 \mu_{sb} \text{ to } 0.5 \mu_{sb} \text{ .. وقد أخذ الكود السوري } \mu_{smax} \leq 0.5 \mu_{sb}$$

يبين الجدول (3-4) نسب التسليح μ_{sb} ، $0.75\mu_{sb}$ و $0.5\mu_{sb}$ و $0.35\mu_{sb}$ من أجل قيم مختلفة لمقاومات الخرسانة والفولاذ.

الجدول (3-4) يبين قيم نسب التسليح للمقاطع المستطيلة بحسب قيمة f_c و f_y

	$f_y = 240 \text{ MPa}$			$f_y = 360 \text{ MPa}$			$f_y = 420 \text{ MPa}$		
$f_c =$	20	25	30	20	25	30	20	25	30
μ_{sb}	0.044	0.055	0.065	0.026	0.032	0.038	0.021	0.026	0.031
$0.75\mu_{sb}$	0.033	0.04	0.049	0.02	0.024	0.029	0.016	0.02	0.023
$0.5\mu_{sb}$	0.022	0.028	0.033	0.013	0.016	0.019	0.011	0.013	0.012
$0.35\mu_{sb}$	0.015	0.02	0.023	0.009	0.011	0.013	0.007	0.009	0.004

ملاحظة: للجوائز يفضل أن تكون النسبة μ_s تتراوح بين 0.35 و 0.5 من μ_{sb} .

في المقاطع المستطيلة، قد يكون من الأسهل التحقق فيما إذا كانت $\mu_s \leq 0.75\mu_{sb}$ وذلك بحساب نسبة عمق المحور السليم x/d أو نسبة العمق المكافئ لمنطقة الضغط y/d ومقارنتها مع القيم الناتجة من العلاقات (4-21) أو (4-22) على التوالي. من أجل نسبة تسليح عظمى $0.75\mu_{sb}$ أو $0.5\mu_{sb}$ فإن القيم المحسوبة لـ y/d يجب أن تكون $0.75(y_b/d)$ أو $0.5(y_b/d)$ على التوالي.

4-6-3- حالة فولاذ التسليح لم يصل للسيلان $f_s < f_y$:

- من معادلات التوازن نجد:

$$\begin{aligned}
 C &= T \\
 \Rightarrow 0.85 f'_c b y &= A_s f_s \\
 &= \mu_s b d E_s \varepsilon_s
 \end{aligned} \tag{4-26}$$

من شرط توافق التشوهات (الشكل 6-4) نجد:

$$\varepsilon_s = \varepsilon'_{cu} \left(\frac{d-x}{x} \right) \tag{4-27}$$

بحل المعادلتين معاً نجد:

$$0.85 f'_c y^2 = 0.85 \mu_s E_s \varepsilon'_{cu} d^2 - \mu_s E_s \varepsilon'_{cu} y d$$

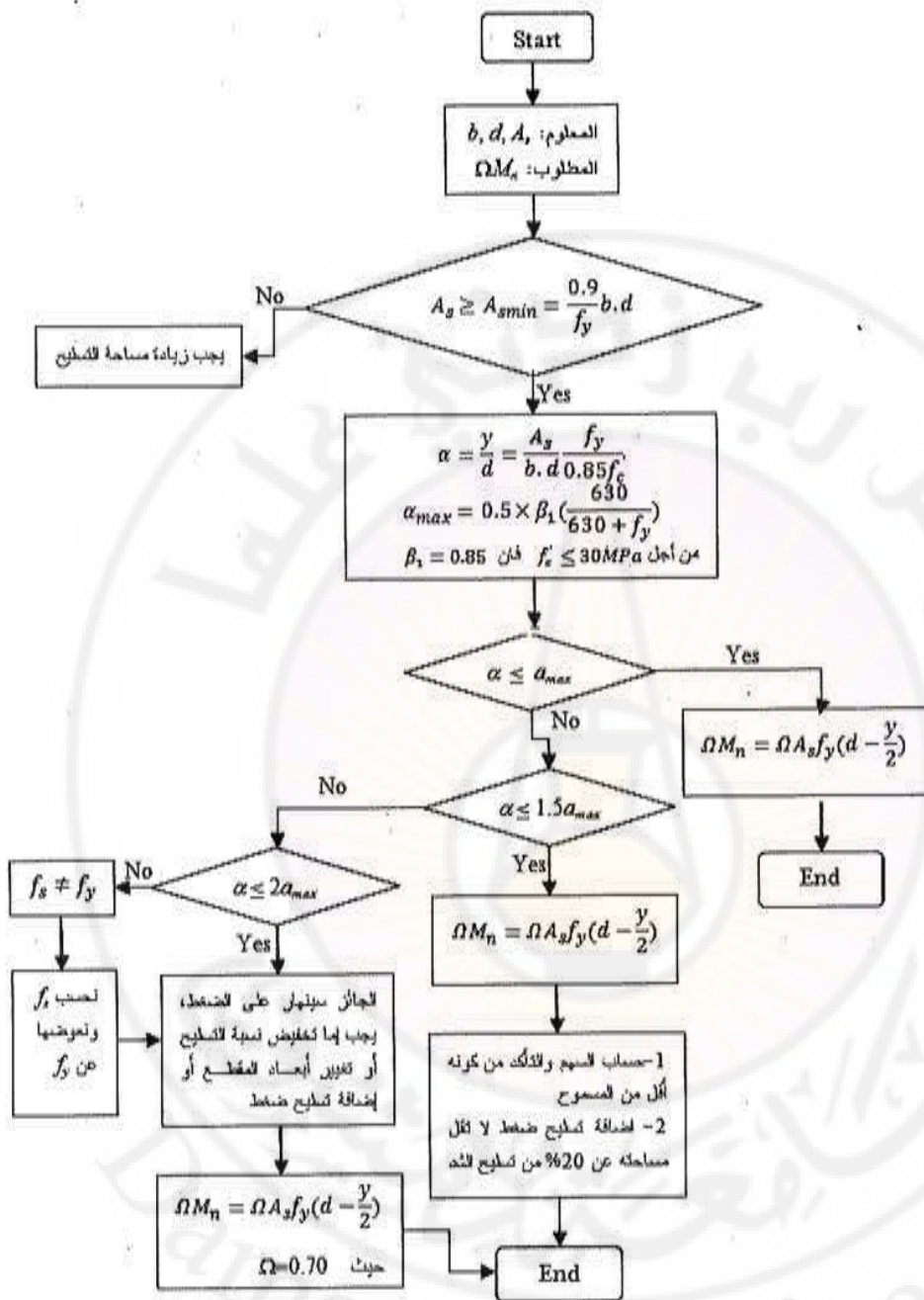
$$\left(\frac{0.85 f'_c}{\mu_s E_s \varepsilon'_{cu}} \right) y^2 + dy - 0.85 d^2 = 0 \quad (4-28)$$

ومنه نحسب y ومن ثم ΩM_{II} من المعادلة (4-14).

لا يسمح الكود السوري بجوائز نسبة تسليحها أكبر من النسبة التوازنية، ولكن في حال وجود جوائز منفذة بنسبة تسليح أكبر من التوازنية يتم عندها حساب العزم المقاوم بأخذ $\Omega=0.70$ بدلاً من 0.9 وذلك للابتعاد قدر الإمكان عن الانهيار الهش للجوائز.

4-6-4- مخطط تدفقي Flowchart لتحليل الجوائز المستطيلة أحادية التسليح:

يبين الشكل (4-8) مخطط تدفقي لتحليل الجوائز (إيجاد العزم المقاوم M_{II}) ذات المقاطع المستطيلة أحادية التسليح المعرضة للانحناء البسيط.



الشكل (4-8) مخطط تدفقي Flowchart لتحليل الجوائز المستطيلة الأحادية التسليح المعرضة للانحناء

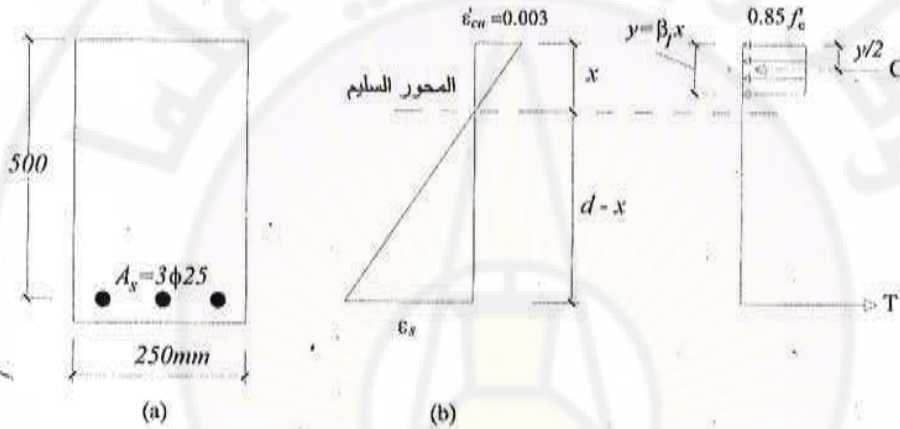
تطبيق (1):

أحسب العزم المقاوم لجائز مقطعه مستطيل أبعاده $h=550mm$ ، $b=250mm$ وتسليحه $3\phi 25$ (كما في الشكل 4-9)، مع اعتبار تغير في مقاومات كل من الخرسانة وال فولاذ كما يلي:

جائز 1: $f'_c=40 MPa$ & $f_y=400 MPa$

جائز 2: $f'_c=21 MPa$ & $f_y=400 MPa$

جائز 3: $f'_c=21 MPa$ & $f_y=240 MPa$



الشكل (4-9) جائز بتسليح أحادي

الحل:

الجائز 1:

1. نحسب y :

نفرض أن $f_s = f_y$ (أي أن $\mu_s \leq \mu_{sb}$)، سيتم التحقق من هذه الفرضية لاحقاً

من المعادلة (4-12) يتم حساب الارتفاع المكافئ لمنطقة الضغط y :

$$y = \frac{A_s f_y}{b 0.85 f'_c} = \frac{1473 \times 400}{250 \times 0.85 \times 40} = 69.32 \text{ mm}$$

2. نتحقق فيما إذا كان $f_s = f_y$ و $\mu_s \leq 0.5 \mu_{sb}$:

سيتم التحقق بحساب $\frac{y}{d}$ والتأكد من أنها أصغر من $\frac{y_b}{d}$ المعطاة بالمعادلة (4-22)

$$\frac{y}{d} = \frac{69.32}{500} = 0.139$$

من أجل $f'_c = 40 \text{ MPa}$ فإن: $\beta_1 = 0.85 - 0.007(40 - 30) = 0.78$

$$\frac{y_b}{d} = \beta_1 \left(\frac{630}{630 + f_y} \right) = 0.78 \left(\frac{630}{630 + 400} \right) = 0.48$$

نجد بأن:

$$\frac{y}{d} < \frac{y_b}{d} \rightarrow \mu_s < \mu_{sb} \Rightarrow f_s = f_y \text{ (الفرضية أعلاه صحيحة)}$$

للتحقق فيما إذا كان $\mu_s \leq 0.5\mu_{sb}$ نتحقق فيما إذا كان $\frac{y}{d} \leq 0.5\frac{y_b}{d}$

$$0.5\frac{y_b}{d} = 0.24 > \frac{y}{d} = 0.139 \Rightarrow \mu_s < 0.5\mu_{sb}$$

أي إن نسبة التسليح أقل من النسبة العظمى المسموحة بتسليح أحادي.

ملاحظة: يمكن إجراء هذا التحقق بطريقة أخرى:

يتم التأكد من أن $\mu_s = A_s/bd = 0.0118$ أصغر من $0.5\mu_{sb}$ حيث يتم حساب μ_{sb} من المعادلة 4-25

$$0.5\mu_{sb} = 0.5 \times \frac{535.5\beta_1 f'_c}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} = 0.5 \times \frac{535.5 \times 0.78}{630 + 400} \frac{40}{400} = 0.0203 > \mu_s \text{ OK}$$

- يمكن حساب التشوه في الفولاذ في اللحظة التي يصل فيها التشوه في أبعاد ليف مضغوط إلى قيمة الانهيار 0.003 كما يلي:

$$x = \frac{y}{\beta_1} = \frac{69.32}{0.78} = 88.87 \text{ mm}$$

من تشابه المثلثات في مخطط التشوه نجد:

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} (0.003) = \frac{500-88.87}{88.87} \times 0.003 = 0.0139$$

نحسب تشوه الفولاذ عند السيلان:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{2.1 \times 10^5} = 0.0019$$

إذاً عندما يتم الوصول إلى العزم المقاوم الاسمي تكون ε_s مساوية لـ 7.3 مرة ε_y وهذا يعني سهماً تدريجياً كبيراً قد حصل قبل وصول الخرسانة للانتهيار.

3. نحسب العزم المقاوم ΩM_n : (من العلاقة 4-15)

$$\begin{aligned} \Omega M_n &= \Omega \left[A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \\ &= 0.9 \times 1473 \times 400 \times \left(500 - \frac{69.32}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 246.76 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

جائز 2: $f_c = 21 \text{ MPa}$ & $f_y = 400 \text{ MPa}$

نعيد نفس الخطوات أعلاه فنجد:

$$y = \frac{1473 \times 400}{250 \times 0.85 \times 21} = 132.03 \text{ mm}$$

$$\frac{y}{d} = \frac{132.03}{500} = 0.264$$

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 400} \right) = 0.52$$

$$\frac{y}{d} < \frac{y_b}{d} \rightarrow \mu_s < \mu_{sb} \Rightarrow f_s = f_y \quad (\text{الفرضية صحيحة})$$

$$0.50 \frac{y_b}{d} = 0.26 \cong \frac{y}{d} \Rightarrow \mu_s \approx 0.5 \mu_{sb}$$

ويكون العزم المقاوم للمقطع:

$$\begin{aligned} \Omega M_n &= 0.9 \times 1473 \times 400 \times \left(500 - \frac{132.03}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 230.13 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

نلاحظ أن انقاص مقاومة الخرسانة تقريباً للنصف أدى إلى إنقاص العزم المقاوم للجائز بما لا يزيد على 7% .

جائز 3: $f'_c=21 \text{ MPa}$ & $f_y=240 \text{ MPa}$

نعيد نفس الخطوات السابقة فنجد:

$$y = \frac{1473 \times 240}{250 \times 0.85 \times 21} = 79.22 \text{ mm}$$

$$\frac{y}{d} = \frac{79.22}{500} = 0.158$$

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 240} \right) = 0.616$$

$$\frac{y}{d} < \frac{y_b}{d} \rightarrow \mu_s < \mu_{sb} \Rightarrow f_s = f_y \quad (\text{الفرضية صحيحة})$$

$$0.50 \frac{y_b}{d} = 0.308 > \frac{y}{d} = 0.158 \Rightarrow \mu_s < 0.5 \mu_{sb}$$

ويكون العزم المقاوم:

$$\Omega M_n = 0.9 \times 1473 \times 240 \times \left(500 - \frac{79.22}{2} \right) \times 10^{-6}$$

$$= 146.5 \text{ kN.m}$$

بالمقارنة مع الجائز 2، نلاحظ أن انقاص f_y بنسبة 60% أدى إلى انقاص العزم المقاوم للجائز بنفس النسبة تقريباً.

تطبيق (2)

أحسب العزم المقاوم لجائز أبعاد مقطعه العرضي $b=250 \text{ mm}$ ، $d=500 \text{ mm}$ ومساحة التسليح $A_s=6\phi 25$. نأخذ $f'_c=21 \text{ MPa}$ و $f_y=400 \text{ MPa}$

الحل:

نفرض في البداية أن $f_s = f_y$ ويتم التحقق من هذه الفرضية لاحقاً.
من المعادلة (4-12) يتم حساب الارتفاع المكافئ لمنطقة الضغط y

$$y = \frac{A_s f_y}{b 0.85 f'_c}$$

$$= \frac{2945 \times 400}{250 \times 0.85 \times 21} = 264.0 \text{ mm}$$

نتحقق فيما إذا كان $f_s = f_y$ و $\mu_s \leq 0.5 \mu_{sb}$:

من أجل ذلك، نحسب $\frac{y}{d}$ ونقارنها مع $\frac{y_b}{d}$ المعطاة بالمعادلة (4-22):

$$\frac{y}{d} = \frac{264}{500} = 0.528$$

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 400} \right) = 0.52$$

$$\frac{y}{d} > \frac{y_b}{d} \rightarrow \mu_s > \mu_{sb} \Rightarrow f_s < f_y$$

وبالتالي الفرضية أعلاه خاطئة، وهذا الجائز سينهار على الضغط في الخرسانة، وبالتالي قيمة y المحسوبة أعلاه غير صحيحة، ويجب حسابها مرة أخرى.

نحسب y من العلاقة 4-28 بوضع نسبة التسليح كما يلي $\mu_s = A_s/bd = 0.0236$

$$\left(\frac{0.85 \times 21}{0.0236 \times 2.1 \times 10^5 \times 0.003} \right) y^2 + 500y - 0.85 \times 500^2 = 0$$

$$1.2y^2 + 500y - 212500 = 0$$

ومنه:

$$y = \frac{-500 \pm \sqrt{500^2 - (4 \times 1.2 \times -212500)}}{2 \times 1.2} = 261.23 \text{ mm}$$

هذه القيمة لـ y أصغر من القيمة المحسوبة سابقاً، لأن الإجهاد الفعلي في التسليح هو أقل من f_y .

- يمكن حساب التشوه في الفولاذ في اللحظة التي يصل فيها التشوه في أبعاد ليف مضغوط إلى قيمة الانهيار 0.003 كما يلي:

من أجل $f'_c = 21 \text{ MPa}$ فإن $\beta_1 = 0.85$:

$$x = \frac{y}{\beta_1} = \frac{261.23}{0.85} = 307.3 \text{ mm} \quad \text{ومنه:}$$

من تشابه المثلثات في مخطط التشوه نجد:

$$\epsilon_s = \frac{d-x}{x} (0.003) = \frac{500-307.3}{307.3} \times 0.003 = 0.00188$$

وبالتالي:

$$\epsilon_s < \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{2.1 \times 10^5} = 0.0019$$

والفولاذ لم يصل للسيلان.

نحسب ΩM_n من العلاقة (4-14) بعد أخذ $\Omega = 0.70$:

$$\begin{aligned} \Omega M_n &= \Omega \left[0.85 f'_c b y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \\ &= 0.70 \times \left[0.85 \times 21 \times 250 \times 261.23 \times \left(500 - \frac{261.23}{2} \right) \right] \times 10^{-6} \\ &= 301.425 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

7-4 - المقاطع المحكومة بالانهيار على الشد والضغط

Tension- and Compression- Controlled Sections

تم إدخال هذه الطريقة على الكود الأمريكي ACI-318 منذ العام 1999، وتعتبر كطريقة بديلة لتحديد فيما إذا $f_s = f_y$. صنف هذا الكود المقاطع الخرسانية المسلحة إما مقاطع محكومة بالانهيار على الشد *tension-controlled*، أو مقاطع محكومة بالانهيار على الضغط *compression-controlled* وذلك بحسب قيمة التشوه الصافي ϵ_t *net tensile strain* في التسليح الأقرب إلى الوجه المشدود في اللحظة التي يصل فيها التشوه في أبعاد ليف مضغوط إلى تشوه الكسر $\epsilon_{cr} = 0.003$.

لنأخذ مقطع الجائز المبين بالشكل (4-10) تسليح الشد موضوع على طبقتين، d العمق الفعال حتى مركز ثقل التسليح المشدود. عندما ينهار الجائز بالحالة التوازنية (أي تبدأ الخرسانة

بالانهيار في نفس اللحظة التي يبدأ فيها الفولاذ بالسيلان) يكون مخطط توزيع التشوهات كما في الشكل (4-10-4) ويحسب عمق المحور السليم x_b من العلاقة (4-21).
 في بداية التصميم يكون من غير المعروف بشكل دقيق موقع مركز التسليح المشدود (إلى أن يتم اختبار القضبان ومعرفة عدد طبقات التسليح)، لذلك يكون من الأسهل تحديد مخطط التشوهات بناءً على الارتفاع d_t المقاس حتى طبقة التسليح الأبعد عن الوجه المضغوط، ويكون ϵ_t تشوه الشد في هذه الطبقة الشكل (4-10-4) c و d ، ويحدد الكود ما يلي:

1- يكون المقطع محكوم بالانهيار على الضغط *compression-controlled failure* إذا كان $\epsilon_t \leq \epsilon_r$ كما في الشكل (4-10-4) c ، أي إنه من أجل فولاذ $f_y=420MPa$ و $E_s=210000MPa$ يكون $\epsilon_r=420/210000=0.002$ $\epsilon_t \leq \epsilon_r$

في هذه الحالة نرسم لعمق المحور السليم x_{ccl} ويكون لدينا علاقة مشابهة للعلاقة (4-21):

$$\frac{x_{ccl}}{d_t} = \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y}$$

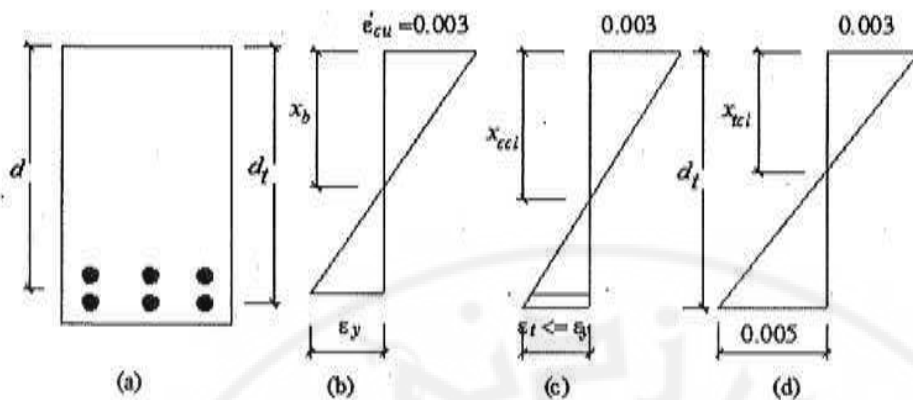
$$\frac{x_{ccl}}{d_t} = \frac{630}{630 + f_y} \quad (4-29)$$

$$\frac{x_{ccl}}{d_t} = 0.6 \quad \text{فإن } f_y=420MPa \text{ من أجل}$$

2- يكون المقطع محكوم بالانهيار على الشد *tension-controlled failure* إذا كان تشوه الشد في طبقة الفولاذ الأبعد عن الوجه المضغوط $\epsilon_t \geq 0.005$ كما في الشكل (4-10-4) d ، في هذه الحالة نرسم لعمق المحور السليم x_{icl} ويكون لدينا العلاقة:

$$\frac{x_{icl}}{d_t} = \frac{0.003}{0.003 + 0.005} = 0.375 \quad (4-30)$$

3- في الحالة عندما تكون ϵ_t بين ϵ_r و 0.005 يكون الانهيار في المنطقة الانتقالية *transition region* (انظر الشكل 4-11) كما سيتم شرحه لاحقاً.



الشكل (10-4) حدود التشوهات: (a) مقطع مستطيل; (b) مقطع توازني; (c) مقطع محكوم بالانهيار على الضغط; (d) مقطع محكوم بالانهيار على الشد

8-4 - نسبة التسليح العظمى μ_{smax}

Maximum Reinforcement Ratio

من أجل ضمان نمط انهيار مطاوع للجائز، ينص الكود الأمريكي (منذ العام 2002) على أنه في العناصر المعرضة للانحناء [دون أو مع قوة محورية قيمتها أقل من $0.1A_g f'_c$ (حيث A_g المساحة الكلية للمقطع العرضي)، عادةً تكون الجوائز والأعمدة الموجوة في الطوابق العليا من الأبنية ضمن هذا التصنيف] يجب أن تكون $\epsilon_{t,min} \geq 0.004$.

من أجل فولاذ $f_y = 420 \text{ MPa}$ فإن الشرط أعلاه يوافق مرتين قيمة تشوه السيلان ϵ_y ، وبالتالي يضمن بشكل كاف دخول الفولاذ مرحلة السيلان في اللحظة التي يصل فيها اللبف الأبعد من الخرسانة المضغوطة إلى تشوه الكسر.

كما هو في حالة نسبة التسليح التوازنية، توجد نسبة تسليح وحيدة باستخدامها يصل التشوه في الفولاذ المشدود إلى القيمة الدنيا $\epsilon_{t,min}$ في نفس اللحظة التي يصل فيها اللبف المضغوط الأبعد إلى قيمة تشوه الكسر $\epsilon_{cu} = 0.003$. يمكن الوصول إلى هذه النسبة بنفس طريقة الحسابات السابقة كما يلي:

- من معادلة التوازن الأولى، نعيد كتابة العلاقة 4-13 بالشكل التالي:

$$\alpha = \mu_s \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

ومن أجل الحالة التوازنية يكون لدينا

$$\alpha_b = \mu_{sb} \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

ومنه يكون:

$$\frac{\alpha}{\alpha_b} = \frac{\mu_s}{\mu_{sb}} \Rightarrow \mu_s = \frac{\alpha}{\alpha_b} \mu_{sb} \quad (4-31a)$$

- من مخطط التشوهات (العلاقة 4-20) لدينا:

$$\frac{x_b}{d} = \frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_y}$$

- عندما تكون $\varepsilon_s = \varepsilon_l$ تكون $d = d_l$ ويكون لدينا:

$$\frac{x}{d_l} = \frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_l}$$

ومنه يكون:

$$\frac{\alpha}{\alpha_b} = \frac{0.003 + \varepsilon_y}{0.003 + \varepsilon_l}$$

نعوض في العلاقة 4-31a فنجد:

$$\mu_s = \frac{0.003 + \varepsilon_y}{0.003 + \varepsilon_l} \mu_{sb} \quad (4-31b)$$

من أجل تشوه فولاذ صافي $\varepsilon_l = 0.004$ وفولاذ $f_y = 420 \text{ MPa}$ أي $\varepsilon_y = 0.002$ نجد:

$$\mu_{s \max} = \frac{0.003 + 0.002}{0.007} \mu_{sb} = 0.714 \mu_{sb} \quad (4-32)$$

تمثل هذه القيمة نسبة التسليح العظمى $\mu_{s \max}$ التي تضمن قيمة تشوه فولاذ صافي 0.004. وبالتالي نلاحظ ان الكود الأمريكي منذ العام 2002 قد خفض نسبة التسليح العظمى من $0.75 \mu_{sb}$ إلى نحو $0.71 \mu_{sb}$ من أجل $f_y = 420 \text{ MPa}$ ، وتنقص هذه القيمة إلى $0.59 \mu_{sb}$ من أجل $f_y = 240 \text{ MPa}$ ، وأصبحت نسبة التسليح العظمى متعلقة بدرجة فولاذ التسليح. يبين الجدول التالي قيم نسب التسليح العظمى وفق الكود ACI-2008 الموافق لـ $\varepsilon_l = 0.004$.

μ_{smax}	$f_y(MPa)$
$0.59\mu_{sb}$	240
$0.673\mu_{sb}$	360
$0.714\mu_{sb}$	420

مع العلم أنه عند استخدام نسبة تسليح $0.75\mu_{sb}$ فهذا يعطي تشوه شد صافياً في الفولاذ بحدود 0.0037، ومن ثم فإن القيمة المقترحة 0.004 هي أكثر تحفظاً بقليل.

مع ملاحظة أنه أثناء الحساب، عندما تكون قيمة التشوه الصافي في الفولاذ أقل من 0.005 فإنه يتوجب تخفيض قيمة عامل تخفيض المقاومة عن القيمة 0.90 كما سنبينه في الفقرة اللاحقة.

ينص الكود السوري على ما يلي:

$$A_{smax} \leq 0.50 A_{sb} \quad \text{1- يجب ألا تتجاوز مساحة التسليح العظمى نصف التوازنية:}$$

هذا يكافئ تشوه فولاذ صافي ϵ_t يساوي:

$$\bullet \text{ من أجل فولاذ } f_y = 240 MPa :$$

$$\frac{0.003 + \frac{240}{210000}}{0.003 + \epsilon_t} = 0.5 \Rightarrow \epsilon_t = 0.0053$$

وبالتالي يكون لدينا من مخطط التشوهات:

$$\frac{x}{d_t} = \frac{0.003}{0.003 + 0.0053} = 0.362$$

يبين الجدول التالي قيم تشوه الفولاذ الصافي ϵ_t والنسبة x/d_t من أجل قيم مختلفة لـ f_y والموافق

$$\mu_{smax} = 0.5\mu_{sb} \quad \text{لـ}$$

x/d_t	ϵ_t	$f_y(MPa)$
0.362	0.0053	240
0.318	0.00643	360
0.30	0.007	420

وبالتالي يكون الكود السوري هنا أكثر تحفظاً من الكود الأمريكي.

2- يمكن في بعض الحالات زيادة المساحة العظمى إلى ثلاثة أرباع التوازنية:

$A_{smax} = 0.75 A_{sb}$ بشرط حساب السهم وعدم إجراء إعادة توزيع للعزوم ووضع كمية تسليح ضغط دنيا لا تقل عن 20% من تسليح الشد.

9-4- عوامل تخفيض المقاومة *Strength Reduction Factors*

4-9-1- تمهيد:

يعرّف العزم المقاوم للمقطع المحسوب سابقاً وفقاً لمعادلات التوازن وخصائص الخرسانة وال فولاذ بأنه العزم المقاوم الاسمي للمقطع M_n . يتم تخفيض هذه المقاومة الاسمية بعامل تخفيض ϕ (يرمز له بـ Ω في الكود السوري) يأخذ بالاعتبار:

أ- التغيير في خصائص المواد وعدم الدقة في التنفيذ كالاختلاف في الأبعاد وتوضع قضبان التسليح، ب- عدم الدقة في معادلات التصميم المستخدمة، ج- يعكس درجة المطاوعة والموثوقية المطلوبة من العنصر المدروس، د- يعكس أهمية العنصر في المنشأ. تعرّف هذه المقاومة المخفضة بأنها المقاومة التصميمية للعنصر $M_n \phi$.

يجب أن تكون المقاومة التصميمية لأي جانز مساوية على الأقل أو أكبر بقليل من العزم الخارجي المصعد M_u وذلك من أجل أخطر حالة تركيب للأحمال U.

تتغير قيمة ϕ مع تغير سلوك وأنواع العناصر، فتأخذ أصغر قيمها في الأعمدة وذلك لأهمية العمود في استقرار المنشأ ولمنع حدوث انهيار مفاجئ للمنشأ، بينما تكون بأكبر قيمها في الجوائز وذلك لأن الجائز يصمم ليظهر تشوهات كبيرة قبل الانهيار.

4-9-2- وفق الكود الأمريكي ACI-318 :

بما أن المقاطع المحكومة بالانهيار على الشد *tension controlled* تظهر نمط انهيار مطاوع مع سهوم وشقوق انحناء واضحة، لذلك يتم أخذ عامل تخفيض المقاومة $\phi = 0.90$. على العكس من ذلك فإن المقاطع المحكومة بالانهيار على الضغط *compression controlled* تنهار بشكل مفاجئ ويتحذيرات صغيرة أو من غير، لذلك من أجل بالحسبان هذا الضعف في المطاوعة يأخذ الكود قيمة أصغر لعامل تخفيض المقاومة، وتحدد بحسب نوع التسليح العرضي في العنصر كما يلي:

أ - وفق الكود الأمريكي منذ العام 2002: في حالة الأساور العادية تؤخذ $\phi = 0.65$ بينما في حالة الأساور الحلزونية (حيث يتم تحزيم العنصر بشكل أفضل) فإن $\phi = 0.70$.

من أجل المقاطع الواقعة في المجال الانتقالي *transition* بين الانهيار على الضغط والانهيار على الشد فإنه يتم حساب ϕ بعلاقة خطية كما في الشكل (4-11)، وتكون المعادلات الخطية بدلالة تشوهات الشد الصافي للفولاذ عيار 420MPa كما يلي:

- للمقاطع بأساور عادية

$$\Phi = 0.65 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{250}{3} \right) \leq 0.90 \quad (4-33-1)$$

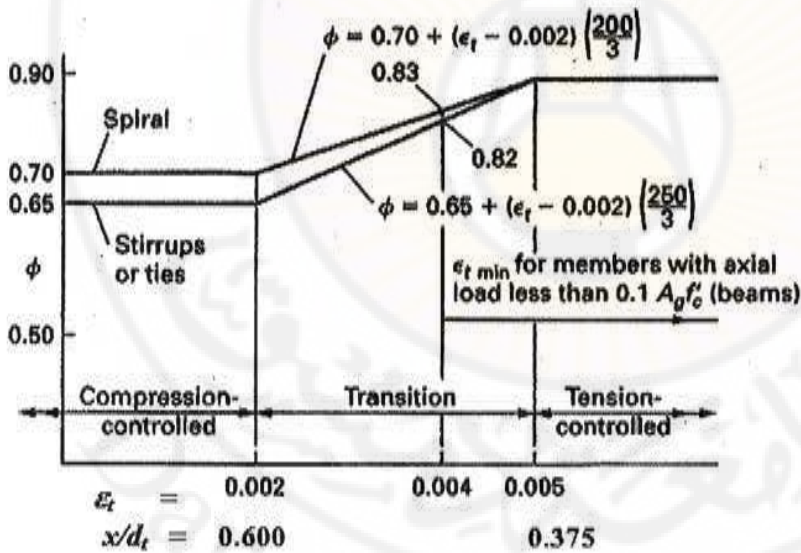
- للمقاطع بأساور حلزونية

$$\Phi = 0.70 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{200}{3} \right) \leq 0.90 \quad (4-33-2)$$

يمكن أيضاً كتابة المعادلات بدلالة النسبة x/d_t

- للمقاطع بأساور عادية

$$\Phi = 0.65 + 0.25 \left[\frac{1}{x/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0.90 \quad (4-33-3)$$



الشكل (4-11) تغير Φ مع تشوه الشد الصافي ϵ_t و x/d_t للفولاذ عيار 420MPa (الكود ACI منذ 2002)

- للمقاطع بأساور حلزونية

$$\Phi = 0.70 + 0.25 \left[\frac{1}{x/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0.90 \quad (4-33-4)$$

عملياً، معظم المقاطع تقع ضمن مجال الانهيار على الشد ($\epsilon_t \geq 0.005$)، وبالتالي تأخذ القيمة $\phi = 0.90$ ، ولكن يسمح الكود الأمريكي للجوائز بأن تقع ضمن المنطقة الانتقالية بتشوه شد صافياً أدنى قيمته 0.004 في هذه الحالة تكون قيمة ϕ أصغر من 0.90 وقيمتها الدنيا 0.82 (انظر الشكل 4-11)، وهذا يكافئ $\mu_{sb} = 0.714$ (من أجل فولاذ $f_y = 420 \text{ MPa}$) و $\mu_{sb} = 0.60$ (من أجل فولاذ $f_y = 240 \text{ MPa}$).

مع العلم أن $\epsilon_t = 0.005$ توافق $\mu_{sb} = 0.625$ (من أجل فولاذ $f_y = 420 \text{ MPa}$) و $\mu_{sb} = 0.518$ (من أجل فولاذ $f_y = 240 \text{ MPa}$).

ب- وفق الكود الأمريكي قبل العام 2002: من أجل المقاطع المحكومة بالانهيار على الشد تكون $\phi = 0.90$ ، بينما من أجل المقاطع المحكومة بالانهيار على الضغط فإن $\phi = 0.75$ من أجل التسليح الحلزوني و $\phi = 0.70$ من أجل الأساور العادية. ويتم حساب ϕ بترابط خطي عندما تقع المقاطع في المنطقة الانتقالية بين الانهيار على الشد والانهيار على الضغط. وتكون المعادلات بدلالة ϵ_t للفولاذ عيار 420MPa كما يلي:

- للمقاطع بأساور عادية

$$\Phi = 0.70 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{200}{3} \right) \leq 0.90 \quad (4-34-1)$$

- للمقاطع بأساور حلزونية

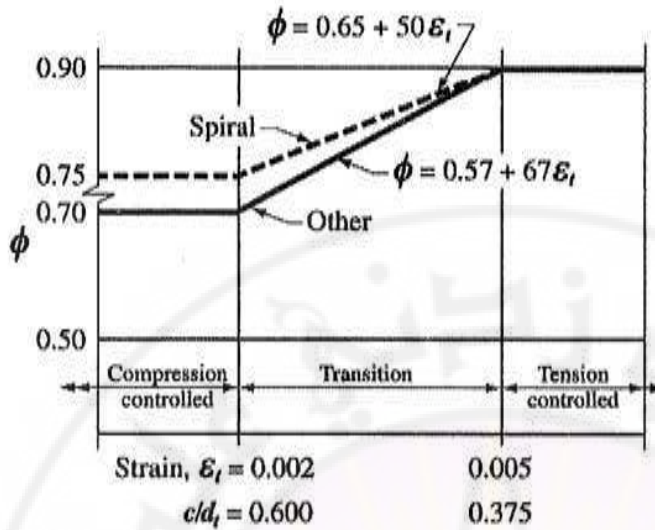
$$\Phi = 0.75 + (\epsilon_t - 0.002) \frac{150}{3} \leq 0.90 \quad (4-34-2)$$

من أجل تشوه فولاذ صاف $\epsilon_t = 0.004$ فإن $\Phi = 0.833$ للأساور العادية.

يمكن أيضاً كتابة المعادلات بدلالة النسبة x/d_t :

- للمقاطع بأساور عادية

$$\Phi = 0.70 + 0.20 \left[\frac{1}{x/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0.90 \quad (4-34-3)$$



الشكل (4-12) تغير ϕ مع تشوه الشد الصافي ϵ_t و x/d_t للفولاذ عيار 420MPa (الكود ACI قبل 2002)

- للمقاطع بأساور حلزونية

$$\phi = 0.75 + 0.15 \left[\frac{1}{x/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0.90 \quad (4-34-4)$$

4-9-3- وفق الكود السوري:

يحدد الكود السوري معامل خفض المقاومة ويرمز له بـ Ω كما يلي:

$\Omega=0.9$ للمقاطع المعرضة للانحناء البسيط أو لقوى شد محورية أو لا محورية.

$\Omega=0.7$ للمقاطع المعرضة للضغط المحوري.

أما بالنسبة للمقاطع المعرضة لقوى ضغط لا محورية فإن:

$$0.90 \geq \Omega = 0.9 - 0.5 \left(\frac{N_u}{N_c} - 0.1 \right) \geq 0.70 \quad (4-35)$$

حيث: N_u - قوة الضغط المطبقة على المقطع العرضي

N_c - مقاومة المقطع البييتوني وحده $(0.85 f'_c A'_c)$

10-4 - مساحة التسليح الدنيا Minimum Reinforcement :

عندما تكون قيمة العزم الحدي M_{II} المطبق على العنصر الجائزي صغيرة فإن كمية التسليح اللازمة تكون صغيرة أيضاً وينشوء الجائز أثناء الاستمرار بدون حدوث تشققات فيه. لقد تم تحليل الجائز في الفقرات السابقة وإيجاد العزم المقاوم الاسمي للمقطع M_{II} باعتبار المقطع الخرساني المسلح متشققاً في منطقة الشد. من المعلوم أن العزم المقاوم الاسمي المحسوب M_{II} لمقطع متشقق بحوي كمية من التسليح يكون أقل من العزم المقاوم لنفس المقطع الخرساني غير المتشقق وبدون وجود تسليح (يدعى عزم التشقق M_{cr} , cracking moment).

بما أنه أثناء التصميم يرغب بأن يكون نمط الانهيار مطاوعاً، لذلك من غير المسموح بتصميم مقطع بدون تسليح شد كون انهيار الخرسانة هشاً. وتحدد كمية التسليح الدنيا المسموحة بأنها الكمية التي تعطي مقاومة مقطع متشقق مساوية لمقاومة نفس المقطع بدون تسليح، وبالتالي تصبح العلاقة المرغوبة هي:

(4-36) [مقاومة الجائز الخرساني المسلح] ≤ [مقاومة نفس الجائز بدون تسليح M_{cr}]
يعرّف العزم المقاوم للجائز بدون تسليح بأنه عزم التشقق M_{cr} ويتم الوصول إليه عندما يصل الليف المشدود الأبعد إلى معامل الانقطاع f_r ، يعطى بالكود الأمريكي بالعلاقة:

$$f_r = 0.625 \sqrt{f'_c} \quad (4-37)$$

نعتبر أن المقطع غير المسلح هو مقطع متجانس مرن، يعطى العزم M_{cr} بالعلاقة:

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{y_1} \quad (4-38)$$

حيث: I_g = عزم العطالة لكامل المقطع:

$$I_g = C \frac{b_w h^3}{12}$$

y_1 = المسافة من المحور السليم إلى أقصى ليف مشدود = $h/2$

C = عامل يأخذ بالحسبان الأجنحة في المقاطع $C = 1.0 : T$ للمقطع المستطيل

b_w = عرض المقطع، وعرض الجسد في المقطع T

h = الارتفاع الكلي للمقطع

بالتعويض في العلاقة (4-38) نجد:

$$M_{cr} = 0.625 \sqrt{f'_c} \frac{C b_w h^3 / 12}{h/2} = \frac{0.625 \sqrt{f'_c} C b_w h^2}{6} \quad (4-39)$$

للمقاطع من الخرسانة المسلحة نعيد كتابة العلاقة (4-15)

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right)$$

نعوض العلاقتين (4-15) و (4-39) في العلاقة (4-36) فنجد:

$$\phi A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \geq M_{cr} = \frac{0.625 \sqrt{f'_c} C b_w h^2}{6} \quad (4-40)$$

بفرض $y/2 = 0.05d$ وبأخذ $\phi = 0.9$ للانحناء ينتج:

$$A_{s,min} = \left[\frac{0.625 \sqrt{f'_c}}{f_y} \right] \left[\frac{h}{d} \right]^2 \left[\frac{C}{5.13} \right] b_w d \quad (4-41)$$

المقاطع المستطيلة: للجوائز ذات المقاطع المستطيلة والبلاطات والأساسات، $C=1.0$ وتتغير h/d من حوالي 1.05 إلى 1.2، فتصبح العلاقة أعلاه:

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{7.45 f_y} b_w d \quad \text{to} \quad A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{5.7 f_y} b_w d \quad (4-42)$$

المقاطع T (الأجنحة بحالة ضغط): في هذه الحالة ومن أجل تغير شائع للنسب سماكة الجناح للعمق الكلي، وعرض الجناح لعرض الجذع، تتغير C من 1.3 إلى 1.6. لناخذ $C=1.5$ ، تتغير h/d أيضاً من نحو 1.05 إلى 1.2، فتصبح العلاقة:

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{5 f_y} b_w d \quad \text{to} \quad A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{3.8 f_y} b_w d \quad (4-43)$$

المقاطع T (الأجنحة بحالة شد): في هذه الحالة ومن أجل تغير شائع للنسب سماكة الجناح للعمق الكلي، وعرض الجناح لعرض الجذع، تتغير C من 3.0 إلى 4.0. لناخذ $C=3.5$ ، تتغير h/d أيضاً من نحو 1.05 إلى 1.2، فتصبح العلاقة:

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{2.13 f_y} b_w d \quad \text{to} \quad A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{1.63 f_y} b_w d \quad (4-44)$$

يعطي الكود ACI-2005 مساحة التسليح الدنيا للعناصر المعرضة للانحناء (مقطع مستطيل أو T) عندما يكون هناك حاجة لتسليح شد في المقطع بالعلاقة:

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 f_y} b_w d \geq \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad (4-45)$$

عندما تكون قيمة التسليح المحسوبة أصغر بكثير من القيمة الدنيا، يسمح الكود بأخذ مساحة تسليح مساوية على الأقل 1.33 المساحة المحسوبة. مع العلم ان الطرف اليساري من العلاقة يحكم التصميم فقط عندما تكون $f'_c > 31 \text{ MPa}$ و ينص الكود ACI-2005 على ان مساحة التسليح الدنيا للعناصر المقررة ستاتيكيًا (أظفار) مقطوعها T والجناح بحالة شد، تعطى بالعلاقة:

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} (2b_w)d \quad \text{or} \quad \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} b_f d \quad (4-46)$$

نأخذ القيمة الأصغر

وعندما تكون قيمة التسليح المحسوبة أصغر بكثير من القيمة الدنيا، يسمح الكود بأخذ مساحة تسليح مساوية على الأقل 1.33 المساحة المحسوبة. ينص الكود السوري على ما يلي:

لا تقل مساحة تسليح الشد الرئيسي $A_{s,min}$ في كل مقطع من الجائز عن $\frac{0.9}{f_y}$ مضروبة بمساحة المقطع الفعال، وعندما تكون قيمة التسليح المحسوبة أصغر بكثير من القيمة الدنيا، يسمح الكود بأخذ مساحة تسليح مساوية على الأقل 1.33 المساحة المحسوبة.

4-11- تطبيق (3):

جائز من الخرسانة المسلحة مقطعه مستطيل $b=25.0\text{cm}$ و $d=43.0\text{cm}$ ، مسلح بتسليح شد أحادي A_s . حدّد سلوك الانهيار لهذا الجائز وهل هو يحقق متطلبات الكود، ثم احسب العزم المقاوم ϕM_n . تعطى $f'_c = 25 \text{ MPa}$ & $f_y = 420 \text{ MPa}$

وسندرس الحالات التالية:

$$A_s = 13.57 \text{ cm}^2 \quad (\text{c} , A_s = 18.47 \text{ cm}^2 \quad (\text{b} , A_s = 28.86 \text{ cm}^2 \quad (\text{a}$$

الحل:

الحالة (a):

1- نحسب نسبة التسليح الفعلية ونقارنها مع النسبة الدنيا:

$$\mu_s = \frac{A_s}{b.d} = \frac{28.86}{25 \times 43} = 0.027$$

$$\mu_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} = \frac{\sqrt{25}}{4 \times 420} = 0.003 \geq \frac{1.4}{f_y} = \frac{1.4}{420} = 0.0033$$

$$\mu_s = 0.027 > \mu_{s,min} = 0.0033 \quad OK$$

وهي تحقق نسبة التسليح الدنيا المعطاة في الكود السوري

2- نحسب نسبة عمق المحور السليم x الى عمق طبقة التسليح الأبعد d_t ونقارن مع ما هو محدد بالكود:

$$y = \frac{A_s f_y}{b 0.85 f'_c} = \frac{2886 \times 420}{250 \times 0.85 \times 25} = 228.2 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = 0.85 ; \Rightarrow x = 268.43 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d_t} = \frac{268.43}{430} = 0.62 > 0.6$$

فالمقطع محكوم بالانهيار على الضغط والفولاذ لم يصل للسيلان وتشوهه أقل من

$$\varepsilon_y = \frac{420}{210000} = 0.002$$

هذا الجائز غير مطروح ولا يحقق متطلبات الكود للجوائز المنحنية، وبالتالي يجب إما زيادة ارتفاع المقطع أو تصغير كمية التسليح المستخدمة.

- يمكن تحديد نمط الانهيار بطريقة أخرى حيث يتم حساب نسبة التسليح العظمى ومقارنتها مع الفعلية كما يلي (من العلاقة 4-32 التابعة للكود الأمريكي):

$$\mu_{s,max} = \frac{0.003 + \frac{420}{210000}}{0.007} \mu_{sb} = 0.714 \mu_{sb}$$

نعوض μ_{sb} من العلاقة (4-25) ونقارن مع نسبة التسليح الفعلية:

$$\mu_{s,max} = 0.714 \frac{455}{630 + f_y} \times \frac{f'_c}{f_y} = 0.714 \times 0.0258$$

$$= 0.0184 < \mu_s = 0.027$$

$$\mu_{s,max} = 0.5 \times 0.0258 = 0.013 < \mu_s = 0.027 \quad \text{أو من الكود السوري :}$$

فالمقطع محكوم بالانهيار على الضغط والفولاذ لم يصل للسيلان.

3- في حال وجود هذا الجائز منفذاً ويراد حساب العزم المقاوم له:

وبالتالي $f_s < f_y$ ، وبالتالي y المحسوبة أعلاه غير صحيحة، نعيد حسابها من المعادلة (4-28).

$$\left(\frac{0.85 f'_c}{\mu_s E_s \varepsilon'_{cu}} \right) y^2 + d y - 0.85 d^2 = 0$$

$$\left(\frac{0.85 \times 25}{0.027 \times 210000 \times 0.003} \right) y^2 + 430 y - 0.85 \times 430^2 = 0$$

ومنه $y = 221.8 \text{ mm}$ وتكون $x = 260.64$ و $\frac{x}{d_f} = 0.61 > 0.6$ ، ونحدد ϕ من المخطط

في الشكل (4-11) أو (4-12):

$\phi = 0.70$ وفق الكود الأمريكي قبل العام 2002 (وأيضاً وفق الكود السوري) وتخفض الى

$\phi = 0.65$ في الكود الأمريكي بعد العام 2002.

ويكون العزم المقاوم للمقطع:

$$\begin{aligned} \Phi M_n &= \Phi A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \\ &= \Phi \times 2886 \times 420 \left(430 - \frac{221.8}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= \Phi \times 386.8 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

الحالة (b):

$$\mu_s = \frac{A_s}{b.d} = \frac{18.47}{25 \times 43} = 0.017 > \mu_{s,min} = 0.0033 \text{ OK}$$

$$y = \frac{1847 \times 420}{250 \times 0.85 \times 25} = 146.02 \text{ mm} \Rightarrow x = 171.8 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d_f} = \frac{171.8}{430} = 0.40 < 0.6$$

فالجائز في المنطقة الانتقالية والفولاذ المشدود وصل للسيلان.

لنحدد موقع الجائز ضمن المنطقة الانتقالية، نحسب التشوه الصافي في الفولاذ ε_t :

$$\varepsilon_t = 0.003 \left(\frac{d-x}{x} \right) = 0.003 \left(\frac{430-171.8}{171.8} \right) = 0.0045$$

وفق الكود السوري بما ان $\epsilon_t < 0.007$ فهي لا تحقق متطلبات الكود من حيث مساحة التسليح العظمى في الجوائز. أما وفق الكود الأمريكي فبما أن $\epsilon_t \geq 0.004$ فهي تحقق متطلبات الكود من حيث مساحة التسليح العظمى، ولكن بما أن $\epsilon_t < 0.005$ لذلك يجب استخدام قيمة مخفضة لـ ϕ عند حساب العزم المقاوم للجوائز. نحسب ϕ من العلاقة (4-33) أو (4-34) كما يلي:

- وفق الكود الأمريكي منذ العام 2002:

$$\begin{aligned}\phi &= 0.65 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{250}{3} \right) \leq 0.90 \\ &= 0.65 + (0.0045 - 0.002) \left(\frac{250}{3} \right) = 0.86\end{aligned}$$

- وفق الكود الأمريكي قبل العام 2002:

$$\begin{aligned}\phi &= 0.70 + (\epsilon_t - 0.002) \left(\frac{200}{3} \right) \leq 0.90 \\ &= 0.70 + (0.0045 - 0.002) \left(\frac{200}{3} \right) = 0.87\end{aligned}$$

كما يمكن حساب ϕ بدلالة x/d_t (نترك للطالب الحساب).

ملاحظة: من غير الاقتصادي استخدام قيمة لـ ϕ على الانعطاف أصغر من 0.90، لذلك يعتبر هذا المقطع غير اقتصادي. لتحسين التصميم يتم إما انقاص A_s أو زيادة ارتفاع المقطع. ويكون العزم المقاوم للمقطع:

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times 1847 \times 420 \left(430 - \frac{146.02}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= \phi \times 276.93 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

الحالة (c):

$$\mu_s = \frac{A_s}{b.d} = \frac{13.57}{25 \times 43} = 0.0126 > \mu_{s,min} = 0.0033 \text{ OK}$$

$$y = \frac{1357 \times 420}{250 \times 0.85 \times 25} = 107.3 \text{ mm} \Rightarrow x = 126.2 \text{ mm}$$

$$\frac{x}{d_t} = \frac{126.2}{430} = 0.29 < 0.30$$

فالمقطع محكوم بالانهيار على الشد والفولاذ المشدود وصل للسيلان، سلوك هذا الجانز مطاوع و $\phi=0.90$.

$$\varepsilon_t = 0.003 \left(\frac{d-x}{x} \right) = 0.003 \left(\frac{430-126.2}{126.2} \right) = 0.0072 > 0.007$$

ويكون العزم المقاوم للمقطع:

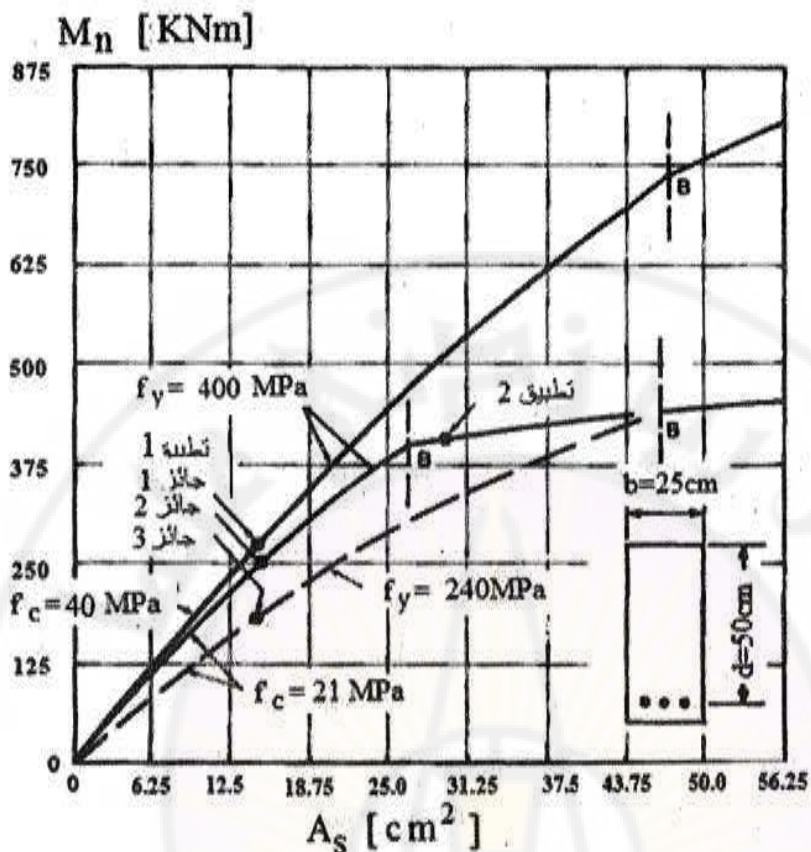
$$\begin{aligned} \Phi M_n &= 0.9 \times 1357 \times 420 \left(430 - \frac{107.3}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 193.05 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

4-12- العوامل المؤثرة على العزم المقاوم للجوائز الأحادية التسليح

يبين الشكل (4-13) مقارنة لقيم العزم المقاوم لمقطع مستطيل بمقاومات للبتون مختلفة ومقاومات وكميات تسليح متغيرة. تم رسم الخطين المستمرين من أجل $f_y=400 \text{ MPa}$ و $f'_c=40 \text{ MPa}$ للخط الأعلى و $f'_c=21 \text{ MPa}$ للخط الأدنى، أما الخط المنقط السفلي فهو من أجل $f_y=240 \text{ MPa}$ و $f'_c=21 \text{ MPa}$. يتكون كل منح من جزأين، الجزء الأول أكثر ميلاً يقع يسار النقطة B وتكون نسبة التسليح μ_s أصغر من μ_{sb} وبالتالي يكون الانهيار على الشد، والجزء الثاني أقل ميلاً يقع يمين النقطة B ويكون الانهيار على الضغط و μ_s أكبر من μ_{sb} . الخلاف الأساسي بين الخطين المستمرين هو قيمة عزم الانحناء الذي عنده يتم الانتقال من الانهيار على الشد إلى الانهيار على الضغط، وهذا يتناسب مع مقاومة الخرسانة. من الشكل نلاحظ أنه من أجل A_s أقل من قيمة معينة فإن الخطين المستمرين يكونان قريبين بعضهما من بعض، أي إن اختلاف 100% بمقاومات الخرسانة يكون له تأثير خفيف في قدرة تحمل المقطع على الانحناء، وهذا يظهر بالعلاقة:

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot d \left(1 - \frac{A_s \cdot f_y}{1.7 f'_c \cdot b \cdot d} \right) \quad (4-47)$$

المتغيرات الرئيسية في هذه المعادلة هي A_s ، f_y و d ، والعزم المقاوم يتناسب إلى حد ما بشكل خطي مع هذه المتغيرات الثلاثة، وكما هو مبين بالشكل يزداد العزم المقاوم للمقطع تقريباً بشكل خطي إلى أن تصبح $\mu_s = \mu_{sb}$ ، من جهة ثانية يكون لمقاومات الخرسانة تأثير أقل في العزم المقاوم من أجل نسب تسليح أقل من μ_{sb} ، حيث يؤثر هذا التغيير فقط على ذراع المزدوجة (كما تم استنتاجه في المثال المحلول).



الشكل (4-13) العوامل المؤثرة في العزم المقاوم للجوائز
Effect of variables on strength of beams

لدراسة تأثير قيمة إجهاد السيلان للفلواز في العزم المقاوم للمقطع نقارن المنحني المنقط مع المنحني المستمر السفلي حيث قيمة مقاومة الخرسانة متساوية، فإن الزيادة في العزم المقاوم تتراوح تقريباً بين 40% و 60% من أجل نسب تسليح أقل من μ_{sb} .

بالخلاصة يمكن القول أنه من أجل نسب تسليح حتى 0.015 فإن العزم المقاوم للمقطع يتناسب تقريباً بشكل خطي مع كل من f_y ، A_s و d . بينما تتناسب قيمة العزم المقاوم مع f'_c عندما يتغير الانهيار من انهيار على الشد إلى انهيار على الضغط.

4-13- تصميم الجوائز الخرسانية ذات المقاطع المستطيلة والأحادية التسليح

قبل أن يتم استنتاج العلاقات المستخدمة في تصميم المقاطع المستطيلة أحادية التسليح، سندرس بداية العوامل التي تؤثر في التصميم.

4-13-1- توضع التسليح:

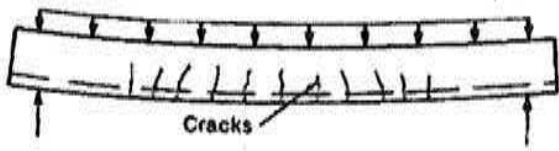
نتيجة للانحناء تتعرض الجوائز لإجهادات شادة، وبما أن الخرسانة تتشقق نتيجة للشد لذلك يتم وضع قضبان تسليح لمقاومة هذه الإجهادات الشادة.

يبين الشكل (4-14) أشكال التشوه وانتشار الشقوق ومخططات العزوم وتوضع التسليح لحالتي الجائز البسيط والظفر والمعرضين لحمولات موزعة بانتظام. في حالة الجائز البسيط بما إن العزم الأعظمي يكون في المنتصف لذلك مساحة التسليح المطلوبة في المنتصف تكون أكبر منها عند النهايات، وبالتالي يتم إيقاف جزء من التسليح قبل النهايات للجائز. أما في حالة الظفر فإن العزم الأعظمي يكون عند الوثاقفة وينعدم عند الطرف الحر. لذلك يمكن إيقاف جزء من التسليح قبل وصوله للطرف الحر مع أخذ أطوال التثبيت اللازمة في الحسبان.

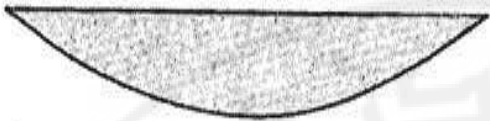
عادةً تكون الجوائز مستمرة فوق أكثر من مسند، يبين الشكل (4-15) شكل التشوه وانتشار الشقوق وعزوم الانحناء كما يبين أماكن توضع حديد التسليح عند الوجوه المعرضة للشد وهي أسفل الجائز في منتصف الفتحات وأعلى الجائز عند المساند.

يبين الشكل نوعين من توزيع التسليح الأول بدون تكسيح للقضبان (الشكل 4-15-c) وهو يعتبر الأكثر شيوعاً في الوقت الحاضر، يمكن إيقاف جزء من قضبان التسليح عند الأماكن التي ليس هناك حاجة لها لمقاومة عزم الانحناء، كما يتم وضع أساور عرضية لمقاومة القوى القاصة ولتشكيل قفص يمكن حمله أثناء التنفيذ.

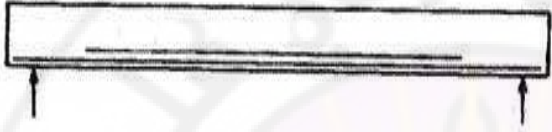
أما النوع الثاني فهو باستخدام التكسيح (الشكل 4-15-d)، حيث يتم رفع جزء من القضبان السفلية للأعلى في الأماكن التي لا يوجد حاجة لوجودها لتضاف إلى التسليح العلوي ولتساهم في تحمل القوى القاصة.



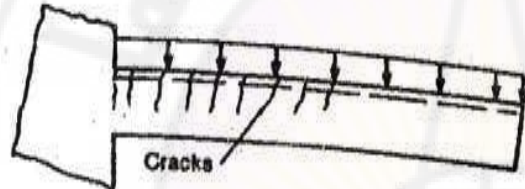
الجانز بعد التشوه



حزم الإنعطاف



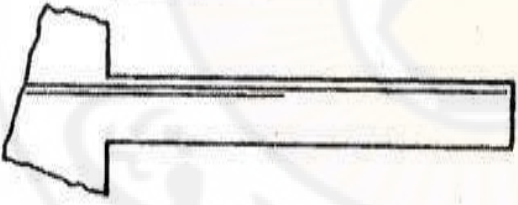
توضع التسليح



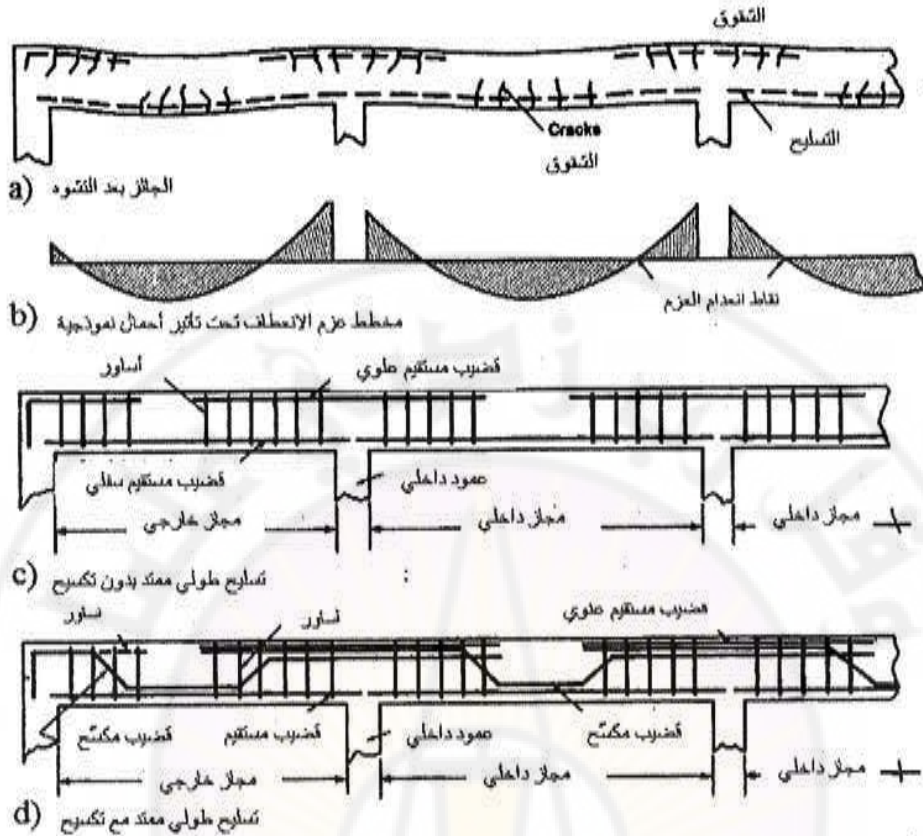
الجانز بعد التشوه



توضع التسليح



الشكل (4-14) تشوه وتشقق جانز بسيط وظفر مع التسليح المناسب



الشكل (4-15) تشوه وتشقق جائز مستمر مع التسليح المناسب

- يحدد الكود السوري في الفقرة (11-6) كيفية توقيف أطراف القضبان:
- قضبان التسليح التي ليس هناك حاجة لها لمقاومة عزم الانعطاف في مقطع ما، يجب أن تستمر مسافة إضافية (قبل قطعها أو رفعها) تساوي إما d وإما 12ϕ أيهما أكبر .
 - يجب أن يستمر $1/3$ التسليح السفلي على الأقل، في الجوائز المستمرة، و 0.50 في الجوائز البسيطة، إلى ما لا يقل عن 150mm داخل المسند، مع أخذ أطوال التثبيت اللازمة في الحسبان أيضاً.
 - يجب أن يستمر $1/3$ التسليح السالب على الأقل، إلى ما بعد نقطة انعدام العزم بمسافة 12ϕ أو $1/16$ من البعد بين المسندين المتجاورين أو d أيهم أكبر .
 - يجب ألا يوقف جزء من قضبان التسليح الطولي في مقطع ما في منطقة الشد إلا إذا كان إجهاد القص في هذا المقطع لا يتجاوز $2/3$ إجهاد القص الأقصى الذي يمكن أن يقاومه هذا

المقطع أو إذا كانت مساحة التسليح المستمر بعد نقطة الإيقاف لا تقل عن ضعف المساحة المطلوبة نظرياً في المقطع المطابق للنقطة المذكورة.

4-13-2- ترتيبات التسليح:

- لا يقل قطر قضبان تسليح الشد الرئيسي في الجوائز عن 12mm كما تربط هذه القضبان بأساور تحسب استناداً لإجهادات القص والفتل.
- لا تزيد المسافة بين محوري كل قضيبين طوليين متجاورين على 300mm.
- توضع قضبان تعليق طولية في منطقة الضغط في الجوائز ويهمل أثرها في حساب المقاومة.
- يجب ألا يقل عدد هذه القضبان عن عدد فروع الأساور المستخدمة أو قضبان، ولا نقل مساحتها الكلية عن 0.15 مساحة تسليح الشد الرئيسي وتستخدم لذلك قضبان لا تقل أقطارها عن نصف قطر التسليح الرئيسي الأكبر أو عن 8mm أيهما أكبر.
- في حال زيادة ارتفاع العنصر عن 600mm أو زيادة مساحة مقطعه عن 0.20m² يجب إضافة قضبان طولية على الوجهين الخارجيين للعنصر تسمى قضبان تقلص. لا يقل قطر هذه القضبان عن نصف قطر قضبان التسليح الطولي الأكبر أو عن 10mm أيهما أكبر. لا يزيد تباعد قضبان التقلص على 300mm ولا تقل نسبة مساحة تسليح التقلص عن 0.001 من المساحة الفعالة للمقطع.

4-13-3- العلاقة بين ارتفاع الجائز والسهم:

يتم حساب السهم في الجائز المعرض لقوى موزعة بانتظام بعلاقة من الشكل:

$$\Delta_{\max} = \frac{C_1 w l^4}{EI} \quad (4-48)$$

بإصلاح هذه العلاقة وإعادة صياغتها يمكن الوصول إلى الشكل:

$$\frac{\Delta}{l} = C \frac{l}{d} \quad (4-49)$$

وبالتالي من أجل أي نسبة مقبولة للسهم على طول المجاز (Δ/l) ، يمكن إيجاد نسب لطول المجاز على الارتفاع الفعال للجائز l/d والتي إذا تم تجاوزها ينشأ في الجائز سهم أكبر من

الجدول (4-4) العمق الأدنى للجوائز التي لا يتجاوز مجازها 15 متراً ولا تقل f_c عن 20MPa.

نوع استناد الجائز	غير مستمر من الجانبين	مستمر من جانب واحد	مستمر من الجانبين	قطر
h	L/14	L/15	L/16	L/6
h	L/16	L/18.5	L/21	L/8

* من أجل قيم L مختلفة عن 420MPa يتم ضرب القيم بـ $(0.40 + f_y/700)$

المسموح. بناء على ذلك يحدد الكود السوري السماكة الدنيا للجوائز الذي إذا تم تجاوزها يجب عندها حساب السهم والتحقق بأنه أقل من المسموح (الجدول 4-4).

4-13-4- طبقة التغطية للفولاذ والتباعد بين القضبان:

من الضروري تأمين طبقة تغطية من الخرسانة توضع بين سطح الجائز وقضبان التسليح وذلك لأربعة أسباب:

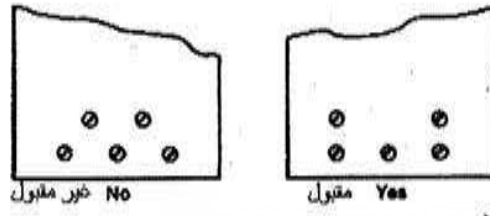
1- تأمين تماسك جيد بين الفولاذ والخرسانة وبالتالي ضمان العمل المشترك لهما، بزيادة طبقة التغطية تزداد فعالية التماسك. يمكن تأمين هذا التماسك بوضع طبقة بسماكة تساوي على الأقل قطر القضيب المستخدم.

2- لحماية الفولاذ من التآكل والصدأ.

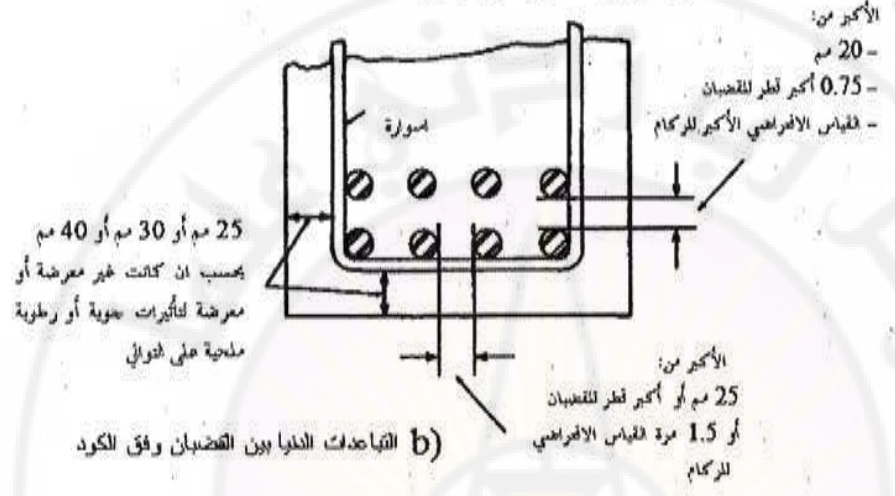
3- لحماية الفولاذ من ارتفاع درجة حرارته فوق الدرجة الحرجة أثناء الحريق (بشكل عام فإن 25mm تؤمن حماية من الحريق لحوالي ساعة واحدة).

4- أحياناً يتم تأمين طبقة تغطية إضافية عند أعلى البلاطات المستخدمة كمواقف للسيارات، وذلك بسبب انضغاط الخرسانة نتيجة حركة المرور وبالتالي نقصان السماكة.

يحدد الكود السوري السمك الأدنى للغطاء البيتوني للعناصر الداخلية التي لا تتعرض مباشرة لتأثيرات جوية، أو الخارجية المحمية من هذه التأثيرات بالاكساء، بالقيمة 25mm للجوائز والأعمدة. أما بالنسبة للمنشآت الخارجية المعرضة لتأثيرات جوية فيجب ألا يقل هذا الغطاء عن 30mm للجوائز والأعمدة على أن تزداد إلى 40mm إذا كان الجو الخارجي يحوي رطوبة ملحبة.



a) توزيع القضبان على طبقتين



الشكل (4-16) ترتيب القضبان في الجوائز والمسافات بين القضبان

أما ترتيبات القضبان في الجوائز فتكون بحيث يراعى أن تكون المسافات بين قضبان التسليح - داخل المقطع - كافية لتسمح بمرور الخرسانة ورجه بشكل جيد كما تضمن نقل القوى من الخرسانة للفولاذ أو العكس. يبين الشكل (4-16) طريقة ترتيب القضبان في الجوائز والمسافات بين هذه القضبان كما هي محددة في الكود السوري.

4-13-5- العمق الفعال d :

يحدد العمق الفعال بأنه المسافة بين مركز قضبان التسليح المشدود وحافة المقطع الأكثر انضغاطاً (أبعد ليف مضغوط).

4-13-6 - المجاز الفعال للجوائز :

هو المجاز الذي يدخل في علاقات الحساب ويؤخذ كما يلي (من الكود السوري):

إذا كان مسند الجائز مصبوباً بشكل مستمر مع الجائز، وكان هذا المسند هو عبارة عن عمود أو جدار أو جائز ساقط لا يقل ارتفاعه عن مثلي ارتفاع العنصر المحمول، يؤخذ المجاز الفعال مساوياً القيمة الأدنى من القيم الثلاث التالية:

- (1) المسافة بين محوري المسندين
- (2) المسافة الحرة بين المسندين (مسافة الضوء) مضافاً إليها العمق الفعال d
- (3) المسافة الحرة بين المسندين مضروبة بالمعامل 1.05.

أما إذا كان ارتفاع المسند أقل من مثلي ارتفاع العنصر المحمول (الجائز) أو كان المسند غير مصبوب بشكل مستمر مع الجائز المحمول، يؤخذ المجاز الفعال مساوياً المسافة بين محوري المسندين، ويمكن أن يؤخذ تأثير عرض المسند في تعديل قيمة العزم السالب عن محور المسند كما سيتم شرحه لاحقاً. أما بالنسبة للحالات الأخرى فيمكن العودة للكود السوري.

4-13-7- أخذ عرض المسند بالحسبان عند حساب العزم السالبة:

عندما تكون العزوم في الجوائز المستمرة محسوبة على أساس الأبعاد بين محاور المساند يمكن تعديل قيمة العزم السالب عند المسند باعتبار رد فعل هذا المسند موزعاً على عرضه بصورة منتظمة مما يسبب عزماً معاكساً للعزم السالب فوق المسند بحيث يصبح تغير العزم على عرض المسند بشكل قطع مكافئ (الكود السوري صفحة 98). بحسب تأثير عرض المسند على قوى القص وردود الأفعال باستعمال قيمة العزم الحسابي الأصلي M_s أي العزم الناتج عن الحساب عند محور المسند، وذلك بعد إجراء إعادة توزيع العزوم إن لزم.

4-13-8- العلاقات المستخدمة في تصميم المقاطع أحادية التسليح:

كما ذكرنا سابقاً يقصد بالتصميم اختيار أبعاد المقطع العرضي وحساب مساحة التسليح الموافقة، أي يكون معلوماً لدينا العزم المطبق M_u ، ويكون المطلوب حساب d و b و A_s .
نعيد كتابة العلاقة (4-19):

$$M_u = \epsilon_2 \left[\frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{2d} \right) \right] 0.85 f'_c b d^2$$

نرمز بـ α لـ y/d و A_o لـ $\frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{2d} \right)$ ، أي:

$$A_o = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\Rightarrow \alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_o}$$

نعوض في العلاقة أعلاه فنجد:

$$M_u = \Omega 0.85 f'_c b d^2 A_o \quad (4-50)$$

ومنه يكون:

$$A_o = \frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b d^2} \quad (4-51)$$

كما يمكن إيجاد العلاقة التي تعطي الارتفاع الفعال للمقطع d من العلاقة:

$$d = \sqrt{\frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b A_o}}$$

نرمز بـ r_o لـ $\sqrt{\frac{I}{A_o}}$ ومنه تكون العلاقة التي تعطي d :

$$d = r_o \sqrt{\frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b}} \quad (4-52)$$

لحساب مساحة التسليح نعيد كتابة علاقة العزم الثانية (4-15) كما يلي:

$$M_u = \Omega \left[A_s f_y d \left(1 - \frac{y}{2d}\right) \right]$$

نرمز بـ γ_o لـ $\left(1 - \frac{y}{2d}\right)$ فيكون:

$$\gamma_o = 1 - \frac{\alpha}{2}$$

$$A_s = \frac{M_u}{\Omega \gamma_o d f_y} \quad (4-53)$$

نعيد كتابة العلاقة (4-13) كما يلي:

$$\frac{y}{d} = \frac{A_s f_y}{b d 0.85 f'_c}$$

ومنه:

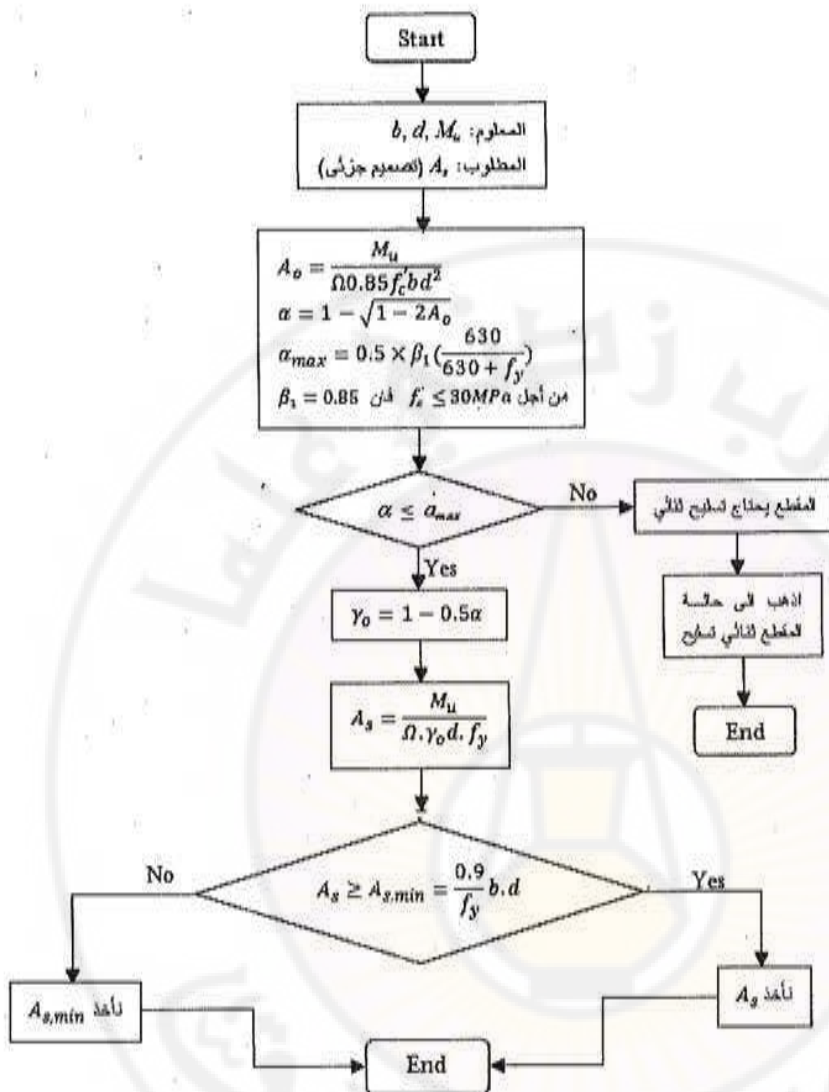
$$\alpha = \mu_s \frac{f_y}{0.85 f'_c} \quad (4-54)$$

$$\Rightarrow \mu_s = \alpha \frac{0.85 f'_c}{f_y} \quad \& \quad A_s = \mu_s b d$$

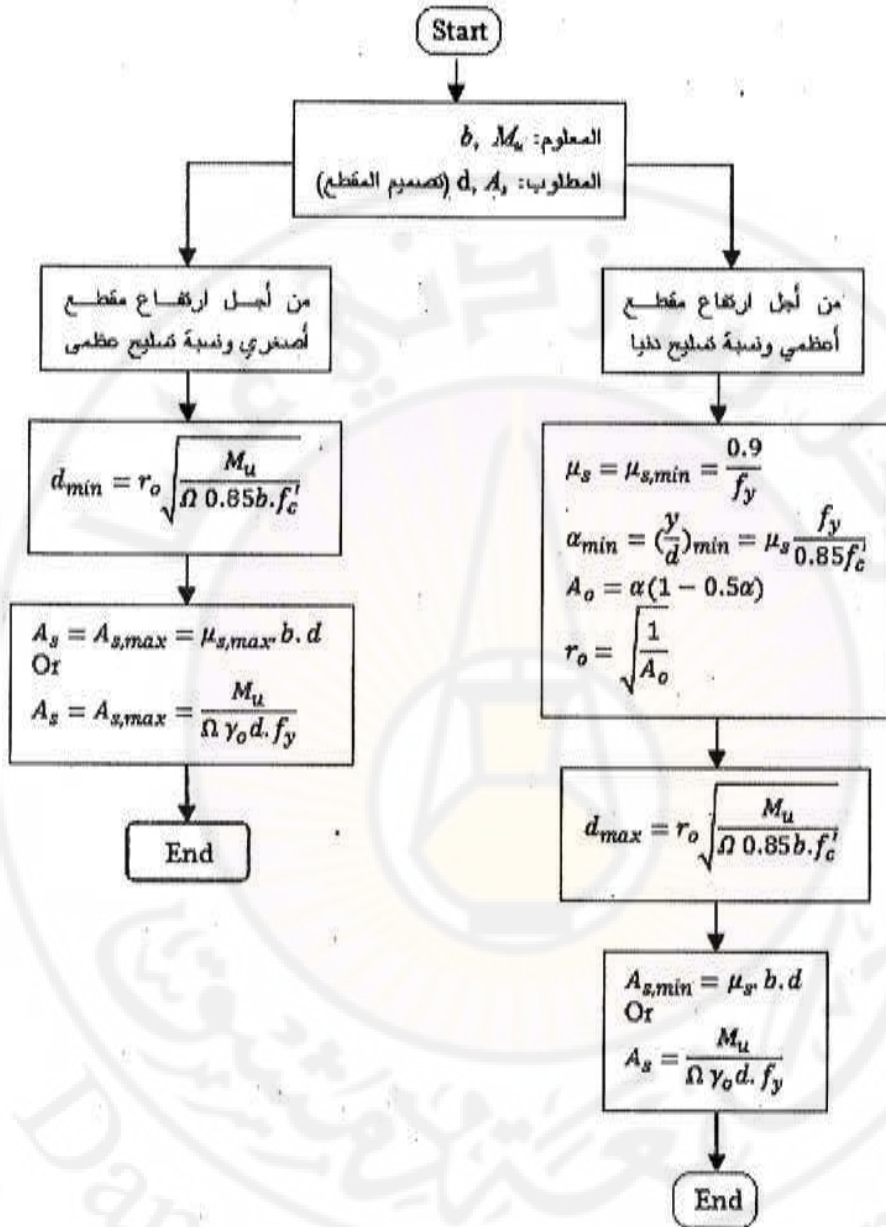
بعد إيجاد العوامل α ، A_o ، r_o و γ_o التي تم وضعها في جدول (الجدول صفحة 211 من الكود السوري). للتصميم باستخدام هذا الجدول يمكن إيجاد قيم إحدى العوامل ثم الدخول للجدول وإيجاد بقية العوامل الموافقة. لن يتم عرض هذا الجدول هنا كون أصبح من النادر استخدام الجداول في التصميم لوجود البرامج الحاسوبية المتعددة التي تقوم بإجراء التصميم المناسب.

4-13-9- مخطط تدفقي *Flowchart* لتصميم الجوائز المستطيلة أحادية التسليح:

يبين الشكلين (4-17) و (4-18) مخطط تدفقي لتصميم الجوائز ذات المقاطع المستطيلة أحادية التسليح المعرضة للانحناء البسيط.



الشكل (4-17) مخطط تدفقي Flowchart لتصميم جزئي للجوائز المستطيلة الأحادية التسليح المعرضة للانحناء



الشكل (4-18) مخطط تدفقي Flowchart لتصميم الجوائز المستطيلة الأحادية التسليح المعرضة للانحناء

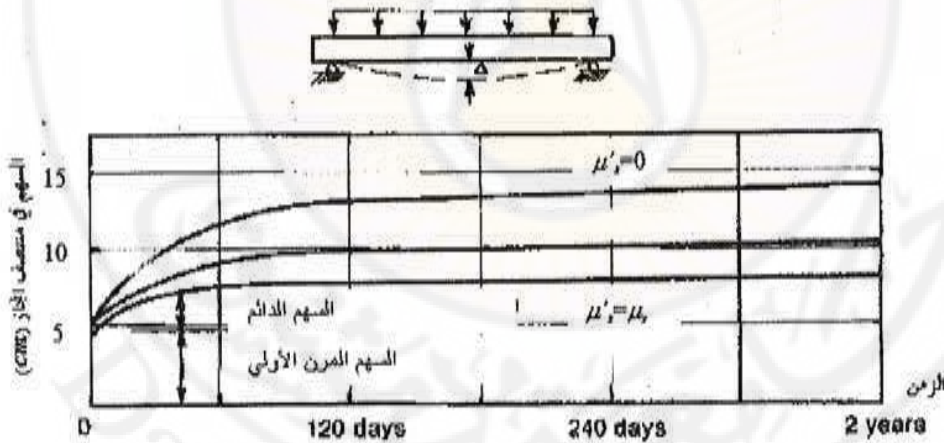
4-14 - حساب المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح

قد يصادف المهندس المصمم بعض الحالات التي تستدعي استخدام تسليح ثنائي في منطقة الشد والضغط، وذلك للأسباب التالية:

أ - تخفيف من السهم الناتج عن الحملات طويلة الأمد

يبين الشكل (4-19) مخططات السهم مع الزمن لثلاثة جوائز مع وبدون تسليح ضغط. تم تحميل الجوائز بالحمولة الاستثمارية لعدة ساعات، ثم تم الإبقاء على هذه الحمولة لمدة سنتين. عند بداية التحميل (الزمن = 0) كان السهم للجوائز الثلاثة متقارباً جداً ويساوي تقريباً من 4' إلى 5 سم. بعد مرور الوقت ازداد السهم للجوائز الثلاثة وأصبحت قيمته %195 من السهم الأولي للجوائز بدون تسليح ضغط ($\mu_s = 0$)، بينما قيمته تساوي %99 من السهم الأولي للجوائز مع تسليح ضغط يساوي تسليح الشد ($\mu_s' = \mu_s$)

ب - يزيد من طاقة تحمل المقطع بشرط زيادة تسليح الشد وإضافة تسليح ضغط مقابل لذلك.
ت - زيادة المطاوعة للجوائز، يبعد المقطع عن الانهيار المفاجئ ويجعل انهيار المقطع على الشد، وهذا هام جداً في المناطق المعرضة للزلازل.



الشكل (4-19) تأثير تسليح الضغط على السهم الطويل الأمد

Effect of compression reinforcement on sustained load deflections

4-14-1- دراسة تأثير تسليح الضغط على المقاومة والسلوك:

لندرس تأثير إضافة تسليح الضغط في سلوك الجانز ومقاومته:

يبين الشكل (4-20) القوى الداخلية في جانزين، أحدهما بتسليح شد A_s وبدون تسليح ضغط، والثاني بتسليح شد مساو A_s وتسليح ضغط A'_s . في كلا الجانزين $C = T = A_s f_y$ ، حيث $T = A_s f_y$. في الجانز بدون تسليح ضغط فإن قوة الضغط تقاوم بشكل كامل بالبيتون، بينما في الجانز الآخر فإنها تقاوم بالخرسانة والتسليح أي $C = C_c + C_s$ ، وبما أن جزءاً من الضغط تتم مقاومته بالتسليح فإن C_c تكون أصغر من C وبالتالي عمق منطقة الضغط γ سيكون أصغر من γ_1 ، أي ارتفع مخطط التشوهات للأعلى، وأدى إلى تشوه في الفولاذ المشدود أكبر، وذلك عند وصول التشوه في الخرسانة إلى تشوه الانكسار 0.003، ومن ثم ابتعد المقطع عن الانهيار على الضغط.

بأخذ مجموع العزوم حول مركز منطقة الضغط يكون:

للجانز بدون تسليح ضغط:

$$M_n = A_s f_y (\gamma_{o1} d) \quad (4-55)$$

للجانز مع تسليح ضغط:

$$M_n = A_s f_y (\gamma_{o2} d) \quad (4-56)$$

الفرق الوحيد بين المعادلتين هو $\gamma_{o2} > \gamma_{o1}$ ، وبالتالي من أجل تسليح شد معين يؤدي إضافة

تسليح ضغط إلى زيادة صغيرة في مقاومة المقطع (بفرض تسليح الشد وصل للسلان).

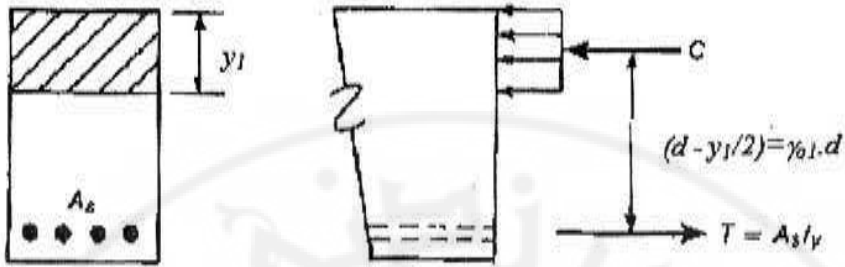
يبين الشكل (4-21) أنه من أجل نسب التسليح العادية ($\mu_s \leq 0.015$) فإن الزيادة في العزم

تكون أقل من 5%. يزداد تأثير التسليح المضغوط كلما كانت d أصغر، وعندما تزداد d فإن

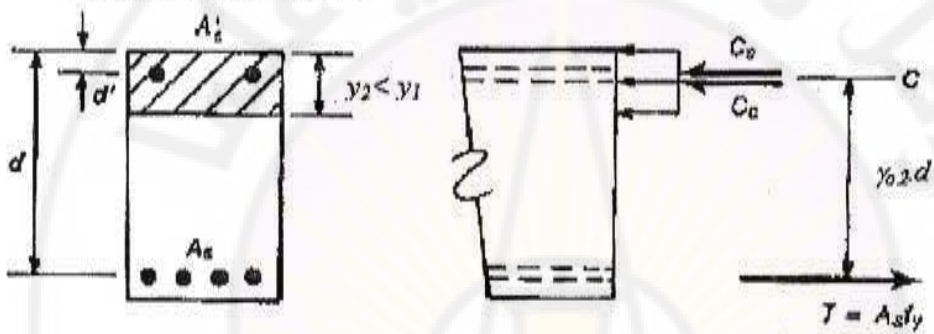
التشوه النسبي ϵ'_c في التسليح المضغوط يتناقص وقد يقل عن إجهاد السلان. يبين الشكل تأثير

الزيادة لـ d'/d من 0.10 إلى 0.20.

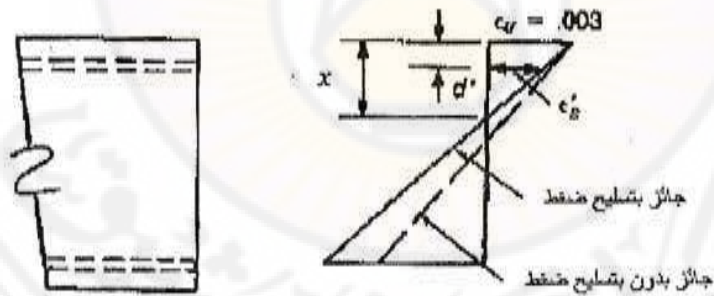
a- جانز بتسليح شد فقط



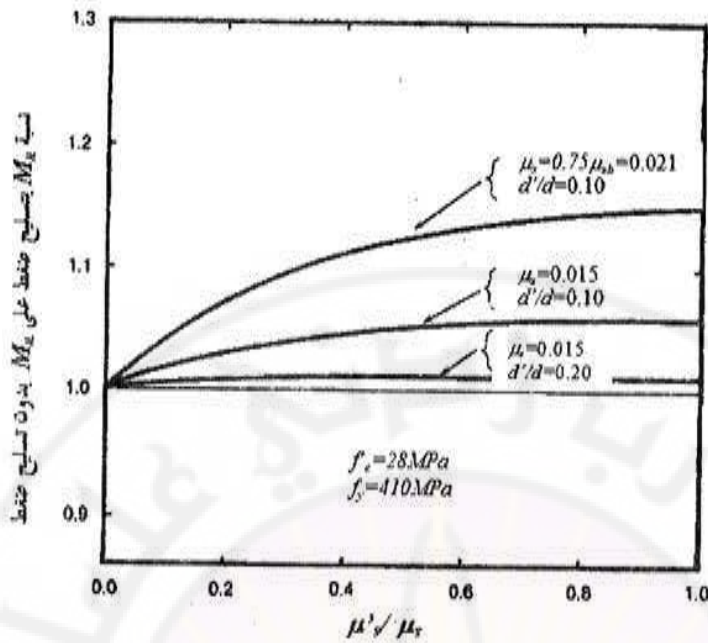
b- جانز بتسليح شد وتسليح ضغط



c- تأثير تسليح الضغط على مخطط التشوهات في جانزين مسلحين بنفس تسليح الشد



الشكل (4-20) تأثير تسليح الضغط على العزم المقاوم



الشكل (4-21) الزيادة في العزم المقاوم نتيجة وجود تسليح الضغط

4-14-2- العلاقات الأساسية:

سيتم حساب الجوائز الثنائية التسليح بتقسيم الجوائز الواحد إلى جائزين أحدهما بتسليح شد فقط والثاني بتسليح ثنائي متناظر (كما في الشكل 4-22) وبحيث يكون:

$$M_u = M_{u1} + M_{u2} \quad (4-57)$$

- تسليح الضغط وصل للسيلان: $f'_s = f_y$

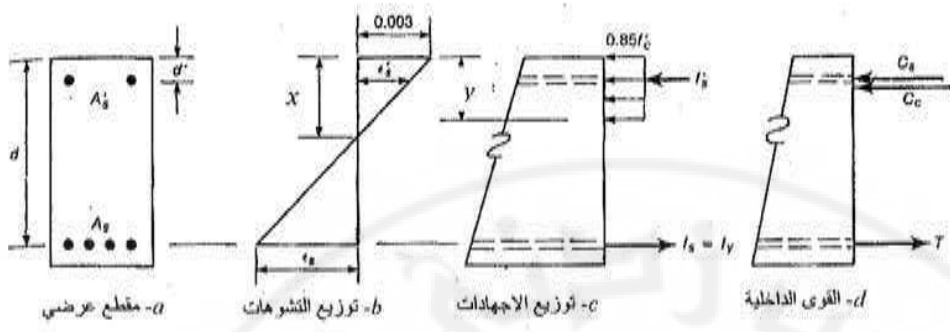
$$M_u = \Omega \left[0.85 f'_c b y \left(d - \frac{y}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \right] \quad (4-58)$$

من معادلة التوازن الأولى

$$T = C_c + C_s$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b y + A'_s f_y \quad (4-59)$$

$$\Rightarrow \frac{y}{d} = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{b d 0.85 f'_c} \quad (4-60)$$

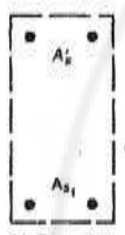


a- مقطع عرضي

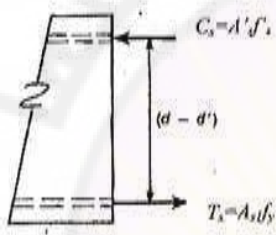
b- توزيع التشوهات

c- توزيع الاجهادات

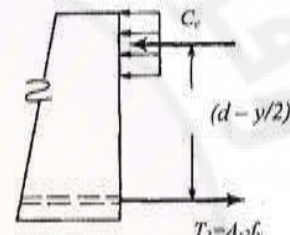
d- القوى الداخلية



(e) Beam 1.



(f) Beam 2.



الشكل (4-22) التشوهات، الاجهادات، والقوى في جانز بتسليح ضغط

$$\frac{y}{d} = \left(\mu_s - \mu_s' \right) \frac{f_y}{0.85 f_c'} \quad (4-61)$$

شروط ضمان وصول التسليح المشدود إلى حد السيلان هو:

$$(\mu_s - \mu_s') \leq \mu_{sb}$$

يمكن الحصول على شرط وصول الحديد المضغوط للسيلان من مخطط التشوهات:

$$\frac{\epsilon_s'}{\epsilon_{cu}'} = \frac{x - d'}{x}$$

نعوض: $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ Mpa}$ ، $\epsilon_{cu}' = 0.003$ و $x = y/\beta_1$ فنجد:

$$\left(\frac{d'}{y}\right)_{\lim} = \frac{1}{\beta_1} - \frac{f_y}{630\beta_1}$$

من أجل $f'_c \leq 30MPa$ فإن $\beta_1 = 0.85$ ، نعوض فنجد:

$$\left(\frac{d'}{y}\right)_{\lim} = 1.18 - \frac{f_y}{535.5} \quad (4-62)$$

$$\text{if } \left(\frac{d'}{y}\right) \leq \left(\frac{d'}{y}\right)_{\lim} \Rightarrow f'_s = f_y$$

ينص الكود السوري على ما يلي:

- عند استعمال مساحة تسليح ضغط A'_s ومساحة تسليح شد قصوى لقطاع أحادي التسليح A_{smax} مضافاً إليها مساحة تسليح شدّ تقابل مساحة الضغط وتساوي A'_s تزداد قيمة العزم الأقصى $M_{ur,max}$ المسموح به لقطاع أحادي التسليح بالقيمة:

$$\Delta M_{ur,max} = \Omega \left[\gamma \cdot A'_s \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \right] \cdot f_y \cdot d \quad (4-63)$$

حيث تؤخذ γ من العلاقة التالية:

$$y_{\max} \geq \frac{535 \cdot d'}{630 - f_y} \Rightarrow \gamma = 1 \quad (4-64)$$

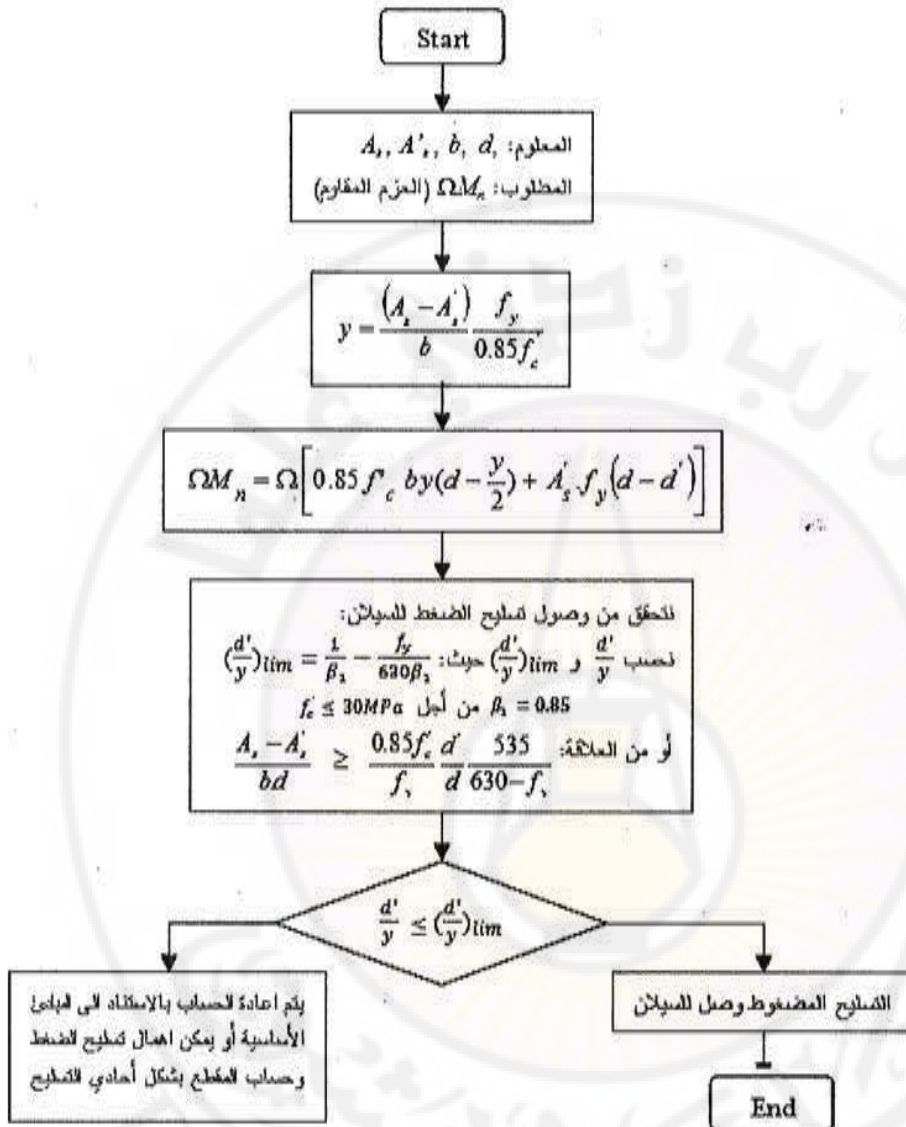
$$y_{\max} \leq \frac{535 \cdot d'}{630 - f_y} \Rightarrow \gamma = \frac{630 \cdot (y_{\max} - 0.85d')}{f_y \cdot y_{\max}}$$

- في حال استعمال تسليح ضغط بغية زيادة طاقة تحمل المقطع، فإن مساحة تسليح الضغط القصوى المستعملة، يجب ألا تزيد على مساحة الشدّ، وعلى أن تحقق الشرط التالي:

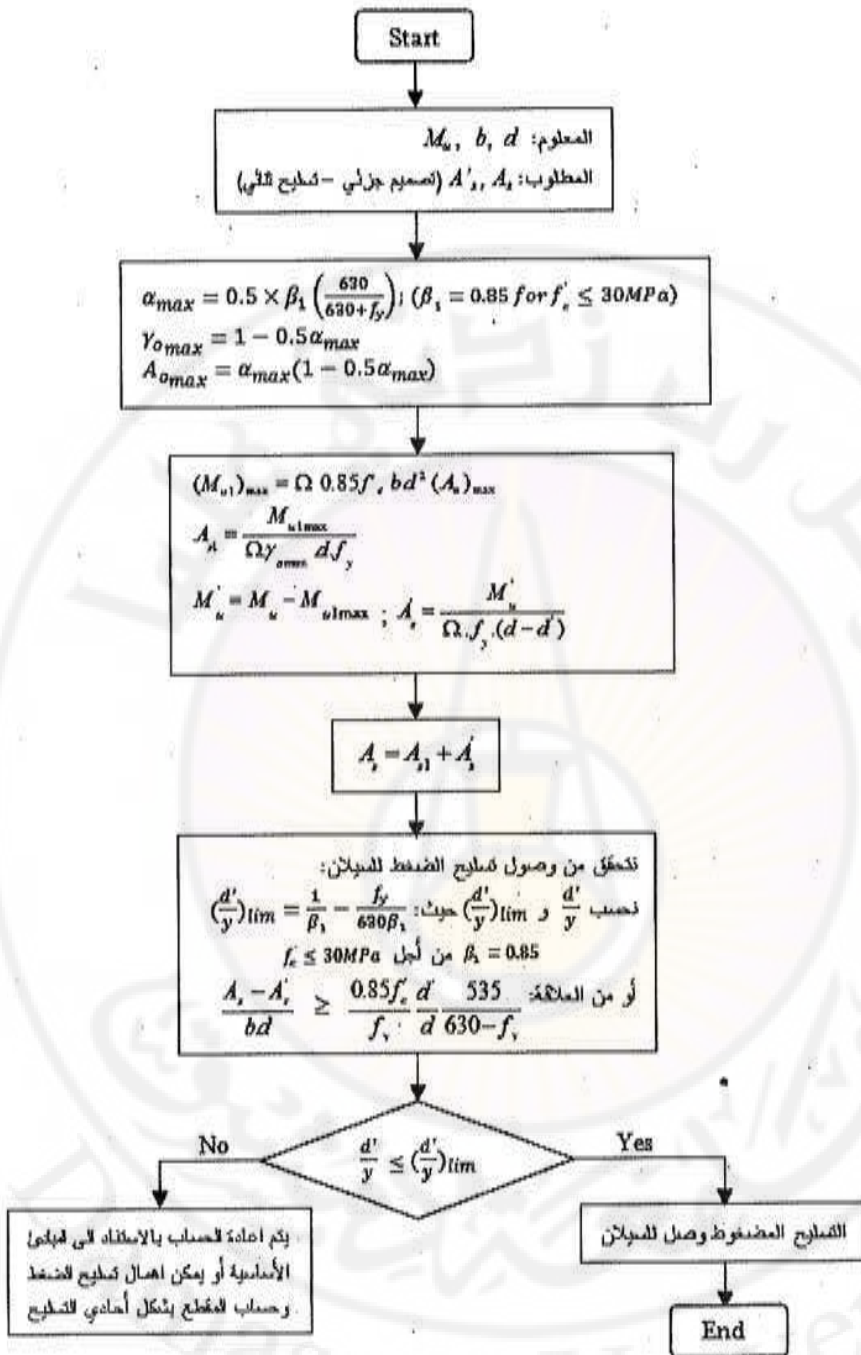
$$A_{s,max} \leq 0.75 A_{sb} \quad A'_s \leq A_s$$

4-14-3- مخطط تدفقي Flowchart لتحليل وتصميم الجوائز المستطيلة ثنائية التسليح

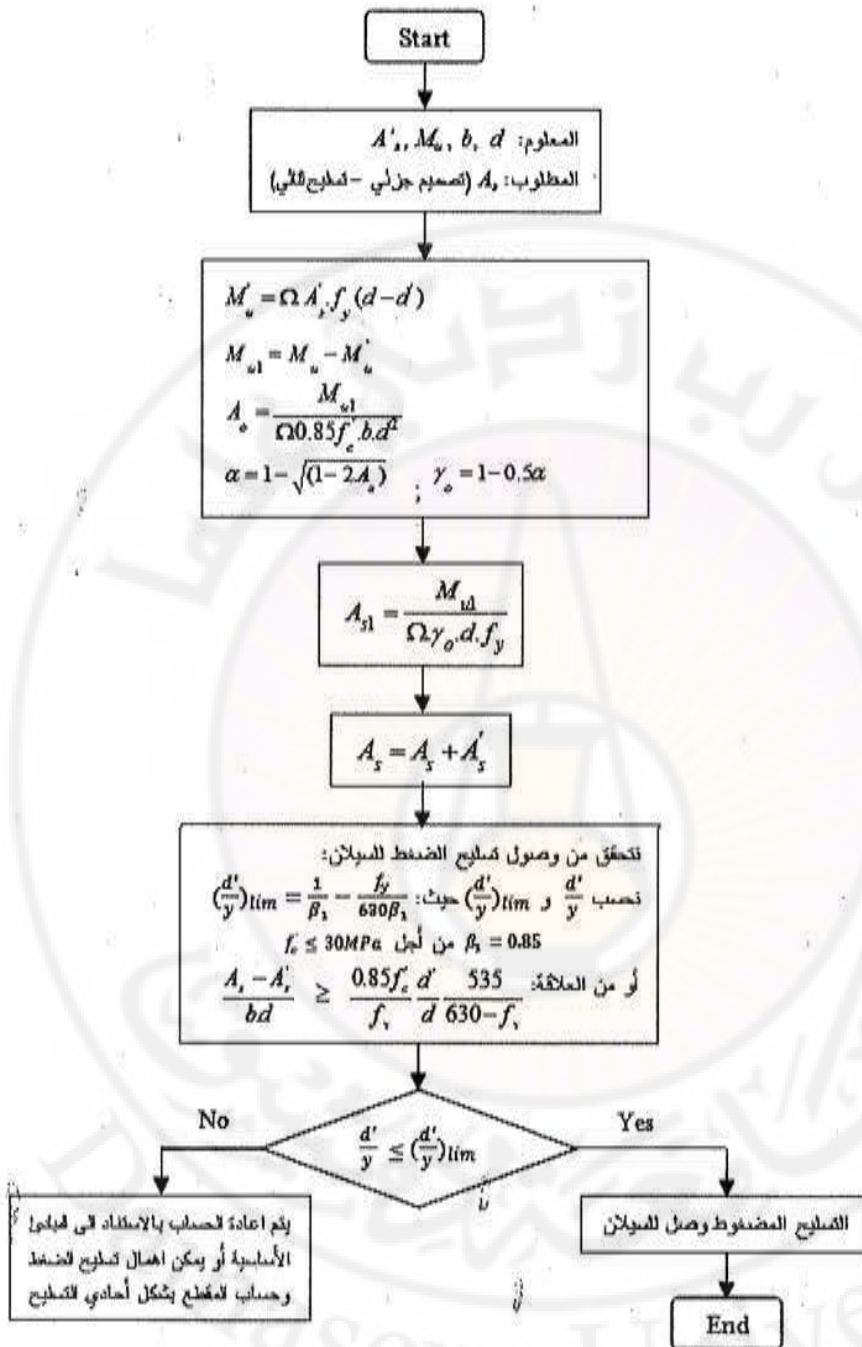
تبين الأشكال (4-23) وحتى (4-25) مخطط تدفقي لتحليل وتصميم الجوائز ذات المقاطع المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة للانحناء البسيط.



الشكل (4-23) مخطط تدفقي Flowchart لتحليل الجوائز المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة للانحناء



الشكل (4-2) مخطط تدفقي Flowchart لتصميم الجوائز المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة للانحناء.



الشكل (4-25) مخطط تدفقي Flowchart لتصميم الجوائز المستطيلة ثنائية التسليح المعرضة للانحناء.

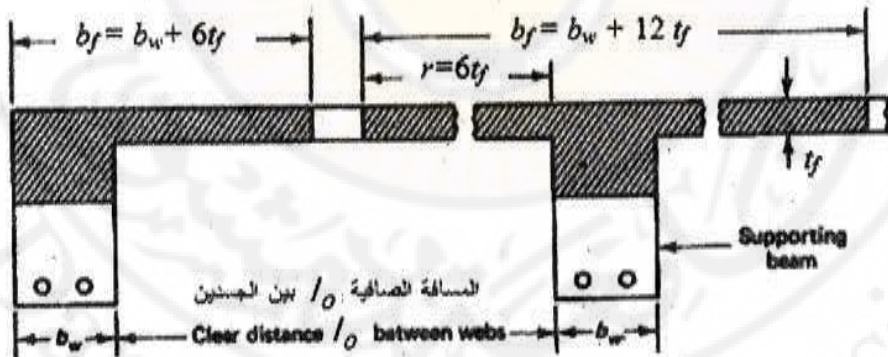
15-4 - تحليل الجوائز ذات المقاطع غير المستطيلة (المقاطع T و L)
 Analysis of NonRectangular Sections (T and L sections)

15-4-1 - مقدمة:

تعد المقاطع T و L من المقاطع المجنحة *flanged sections* الأكثر شيوعاً، ولأنه يتم صب البلاطة بشكل مستمر (*monolithically*) مع الجوائز (كما هو في الشكل 4-26)، فإن جزء من البلاطة يشارك في العمل مع الجائز، ومن ثم يضاف قساوة ومقاومة إضافيتين لمقطع الجائز المستطيل. بناء على تجارب واسعة وخبرة هندسية طويلة فإنه يمكن اعتبار أن جزءاً من البلاطة يعمل كجزء مستمر مع الجائز، ويسمى جناح الجائز. يعطى العرض الفعال للجناح b_f في الكود السوري كما تم ذكره في الفصل السابق:

$$b_f = \min \text{ of } \begin{cases} b_w + 2t_f \\ b_w + l_o \\ \frac{L}{4} \text{ or } \frac{L}{5} \end{cases} \quad (4-65)$$

حيث L فتحة الجائز البسيط، أو المسافة بين نقطتي انعدام العزم في الجوائز المستمرة (0.87) من المجاز في الفتحات الطرفية و 0.76 من المجاز في الفتحات الداخلية) تؤخذ L/4 عندما تكون الأحمال موزعة بانتظام، بينما تؤخذ L/5 في حالة الأحمال المركزة.



الشكل (4-26) الجوائز T و L كجزء من البلاطة (المقطع العرضي في منتصف الجائز)

أما في حالة الجوائز بمقطع L فقد أهمل الكود السوري مساهمة الجناح واعتبرها كمقطع مستطيل. أما الكود الأمريكي فقد أعطى عرض الجناح الفعال b_f للمقاطع L بأنه الأصغر من:

$$b_f = \min \left\{ \begin{array}{l} b_w + 6t_f \\ b_w + \frac{l_o}{2} \\ \frac{L}{12} \end{array} \right. \quad (4-66)$$

عادة يتم اعتبار المقطع بأنه T عند منتصف مجاز الجائز حيث يساهم الجناح بزيادة العزم المقاوم، أما عند المسند فيكون الجناح بحالة شد، ومن ثم يهمل عمله. إذا يتم وضع تسليح شد A_s في منتصف المجاز للجائز بينما عند المسند فيكون تسليح الشد فوق المسند كما في الشكل (4-27).

من أجل تحليل وتصميم الجوائز المجرحة تستعمل المبادئ الأساسية نفسها التي استعملت في حالة الجوائز ذات المقاطع المستطيلة، ولكن الخلاف الرئيسي بينهما هو عند حساب محصلة قوة الضغط C_c حيث يمكن أن نميز بين حالتين، وذلك بحسب موقع المحور السليم. عادة في المقاطع T تكون سماكة وعرض الجناح معطاة من أبعاد بلاطة السقف، كما يتم فرض أبعاد المقطع الباقية، وبالتالي تتحول مسائل التصميم إلى تصميم جزئي أي حساب التسليح اللازم لمقاومة العزم المطبق.

4-15-2- حساب العزم المقاوم M_n :

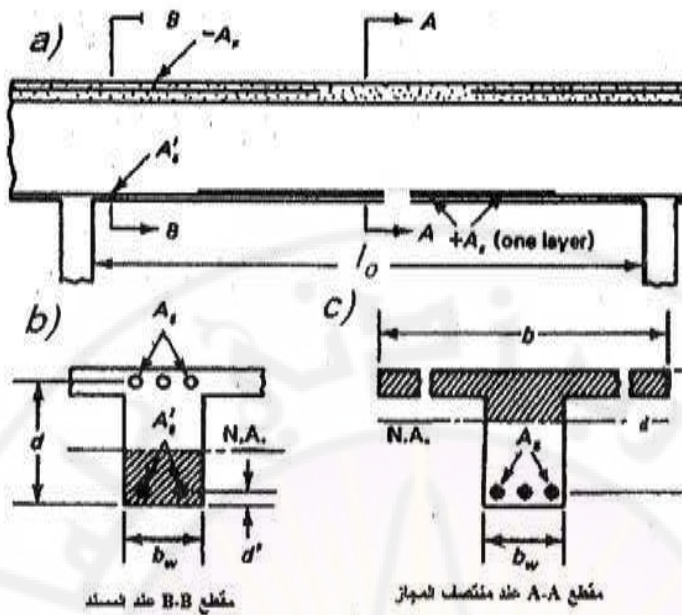
عند حساب العزم المقاوم الاسمي M_n للمقطع T نميز بين حالتين:

الحالة 1: عمق المحور السليم x أصغر من سماكة الجناح t_f (الشكل 4-28)

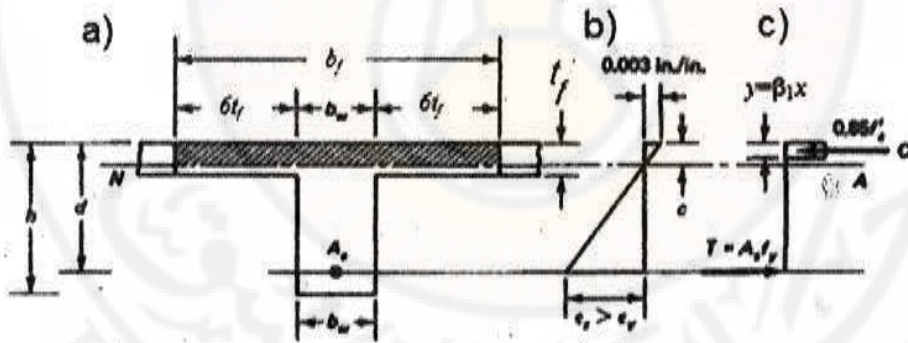
في هذه الحالة تكون منطقة الضغط بشكل مستطيل أي إن المحور السليم يقع ضمن الجناح، ويتم حساب الجائز T وكأنه مستطيل بعرض b_f .

من توازن القوى $C=T$ في الشكل (4-28) نجد:

$$A_s f_y = 0.85 f_c' b_f y$$



الشكل (4-27) مقطع طولى ومقاطع عرضية لجانز مستمر مصبوب ميليثياً



الشكل (4-28) مقطع T، المحور السليم يقع ضمن الجناح:
 (a) مقطع عرض، (b) التشوهات، (c) الإجهادات

ونحسب العزم المقاوم الاسمي بنفس العلاقة المستخدمة في حالة المستطيل أي:

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right)$$

الحالة 2: عمق المحور السليم x أكبر من سماكة الجناح t_f (الشكل 4-29)

في هذه الحالة يكون $x > t_f$ وقد يكون العمق المكافئ لمنطقة الضغط ρ أصغر من t_f أو أكبر منها. عندما تكون ρ أصغر من t_f فنبقى نحسب المقطع وكأنه مستطيل وتطبق هنا نفس الحالة 1 السابقة.

عندما تكون كل من x و ρ أكبر من t_f فيعتبر المقطع T ويتم تحليله بتقسيمه إلى قسمين كما في الشكل (4-29)، ويكون العزم المقاوم للجائز T هو مجموع العزم المقاوم لكل جائز:

$$M_n = M_{nf} + M_{mw} \quad (4-67)$$

∴ بأخذ العزم حول مركز الفولاذ المشدود نجد:

$$M_u = \Omega M_n = \Omega \left[0.85 f'_c (b_f - b_w) \rho_f \left(d - \frac{t_f}{2} \right) + 0.85 f'_c b_w \rho_w \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \quad (4-68)$$

- بأخذ العزم حول مركز محصلة الضغط:

▪ الجائز الأول:

$$\Omega M_{nf} = \Omega \left[A_{sf} f_y \left(d - \frac{t_f}{2} \right) \right] \quad (4-69)$$

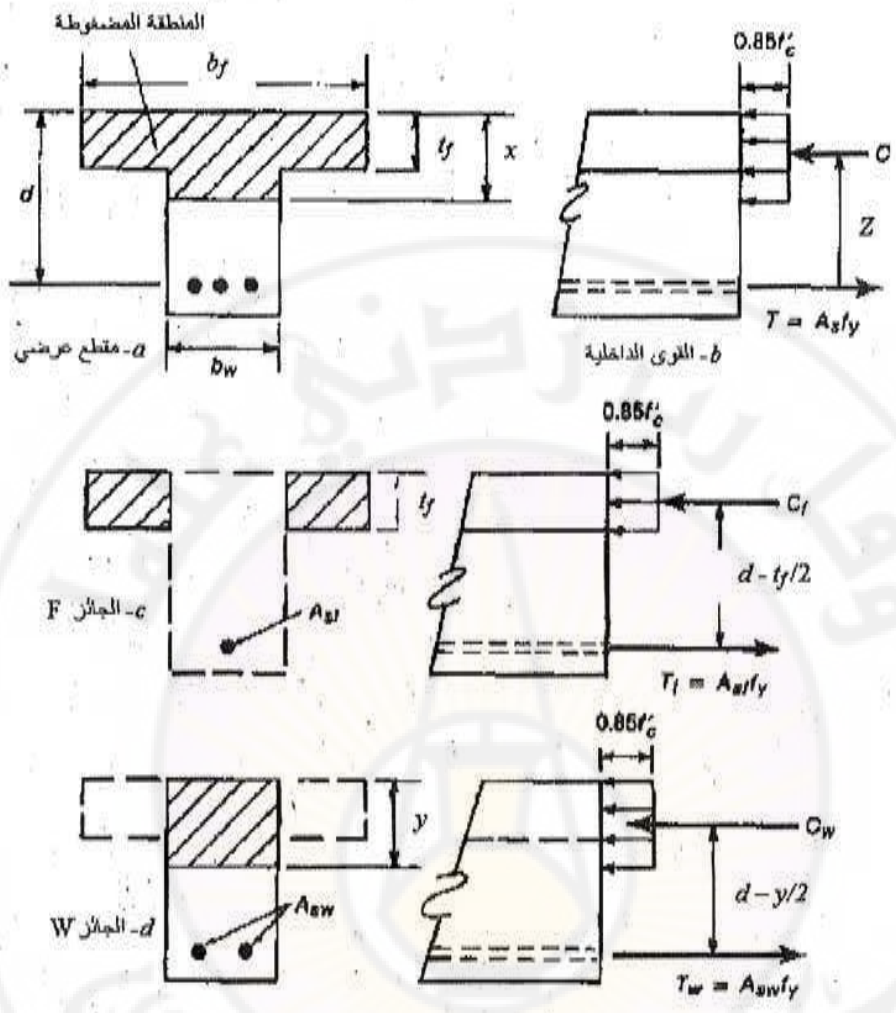
▪ الجائز الثاني:

$$\Omega M_{mw} = \Omega \left[A_{sw} f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \quad (4-70)$$

فيكون العزم الكلي:

$$M_n = \Omega M_n = \Omega \left[A_{sf} f_y \left(d - \frac{t_f}{2} \right) + A_{sw} f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right] \quad (4-71)$$

- من معادلة التوازن الأولى:



الشكل (4-29) تقسيم الجانز T لتحليله

■ للجانز الأول:

$$A_{sf}f_y = 0.85f'_c(b_f - b_w)t_f \quad (4-72)$$

ومنه نجد:

$$A_{sf} = \frac{0.85f'_c(b_f - b_w)t_f}{f_y} \quad (4-73)$$

ولدينا:

$$A_{sw} = A_s - A_{sf} \quad (4-74)$$

■ للجائز الثاني:

$$A_{sw} f_y = 0.85 f'_c b_w y \quad (4-75)$$

$$\Rightarrow y = \frac{A_{sw} f_y}{0.85 f'_c b_w} \quad (4-76)$$

4-15-3- تحديد فيما اذا $f'_s = f'_c$:

في العلاقة السابقة تم فرض $f'_s = f'_c$ وهذا يتحقق في حالة الانهيار على الشد أو الانهيار التوازني أي $\mu_s \leq \mu_{sT}$. يجب التحقق من هذه الفرضية كما يلي:

- إذا كان المحور السليم ضمن الجناح فيتم التحقق كما في المقاطع المستطيلة بحساب y/d ومقارنتها مع μ_{sT} .
- إذا كان المحور السليم ضمن الجسد، وبالتالي يعمل المقطع T عندها يتم التحقق بإحدى الطريقتين:

1- نحسب مساحة التسليح التوازنية ونتحقق من أن $A_s \leq A_{sb}$

$$A_{sb} = \frac{C_b}{f_y} \quad (4-77)$$

حيث:

$$C_b = C_f + C_{sw}$$

تحسب y_b من العلاقة (4-23) وهي علاقة عامة لا تتعلق بشكل المقطع

2- يمكن حساب نسبة التسليح التوازنية المعدلة للمقاطع T ونرمز لها بـ μ_{sbT} حيث:

$$\mu_{sbT} = \frac{b_w}{b_f} (\overline{\mu_{sb}} + \mu_{sf}) \quad (4-78)$$

$$\mu_{sf} = \frac{A_{sf}}{b_w d} \quad \& \quad \overline{\mu_{sb}} = \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} \quad (4-79)$$

ملاحظة: من أجل $f'_c > 30$ يتم استبدال القيمة 455 بـ $535.5 \beta_1$ حيث:

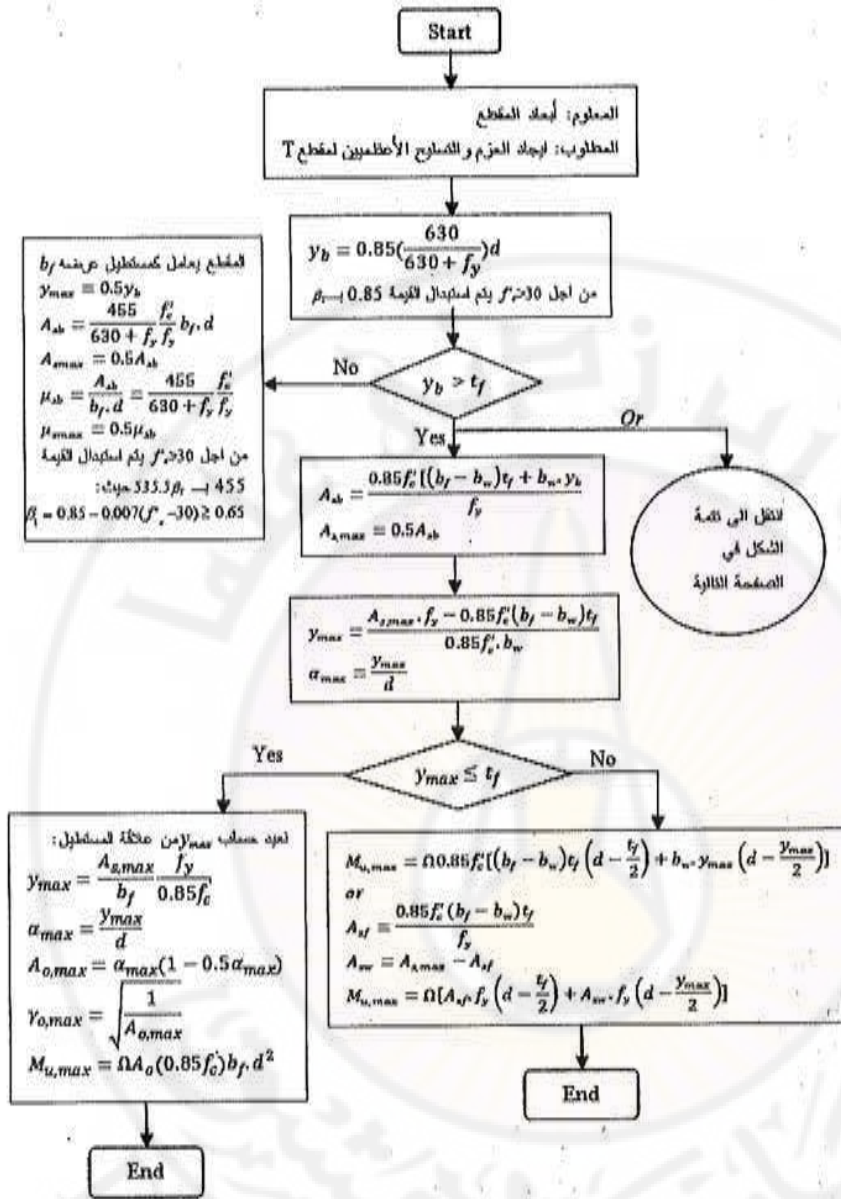
$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f'_e - 30) \geq 0.65$$

في الجوائز T عندما يكون الجناح بحالة ضغط فإن المقطع يكون في الغالب محكوم بالانهيار على الشد.

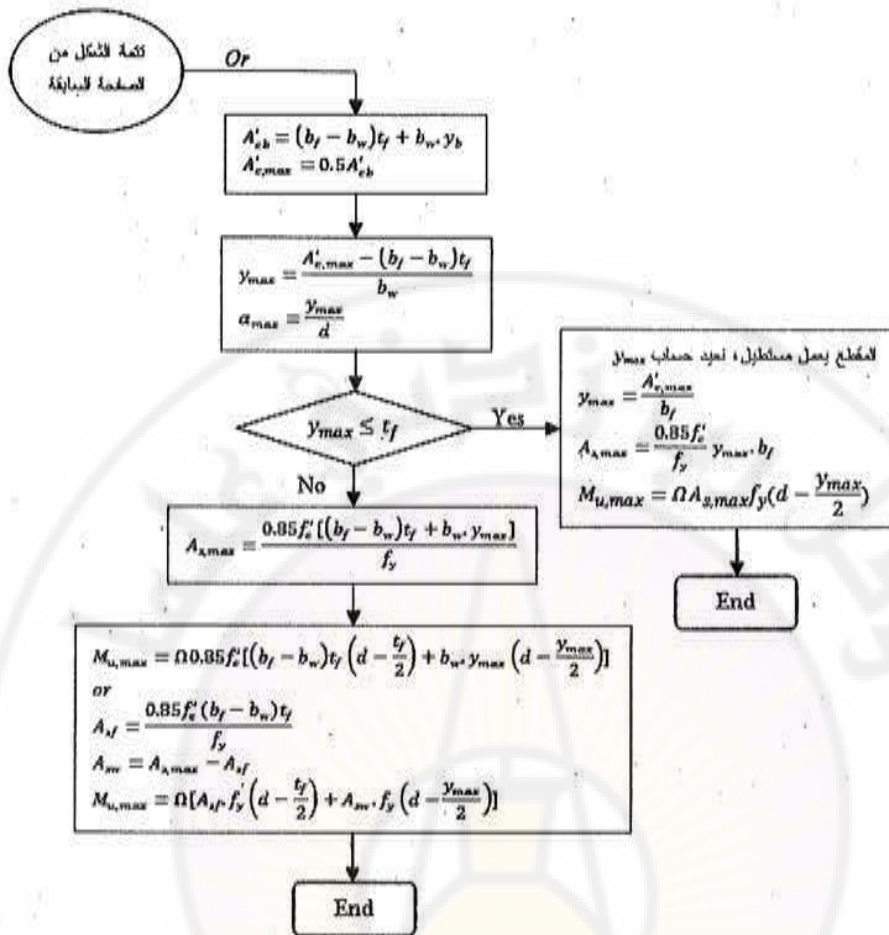
4-15-4 - مخطط تدفقي *Flowchart* لتحليل وتصميم الجوائز ذات المقاطع T:

تبين الأشكال (4-30) وحتى (4-33) مخطط تدفقي لتحليل وتصميم الجوائز ذات المقاطع T المعرضة للانحناء البسيط.

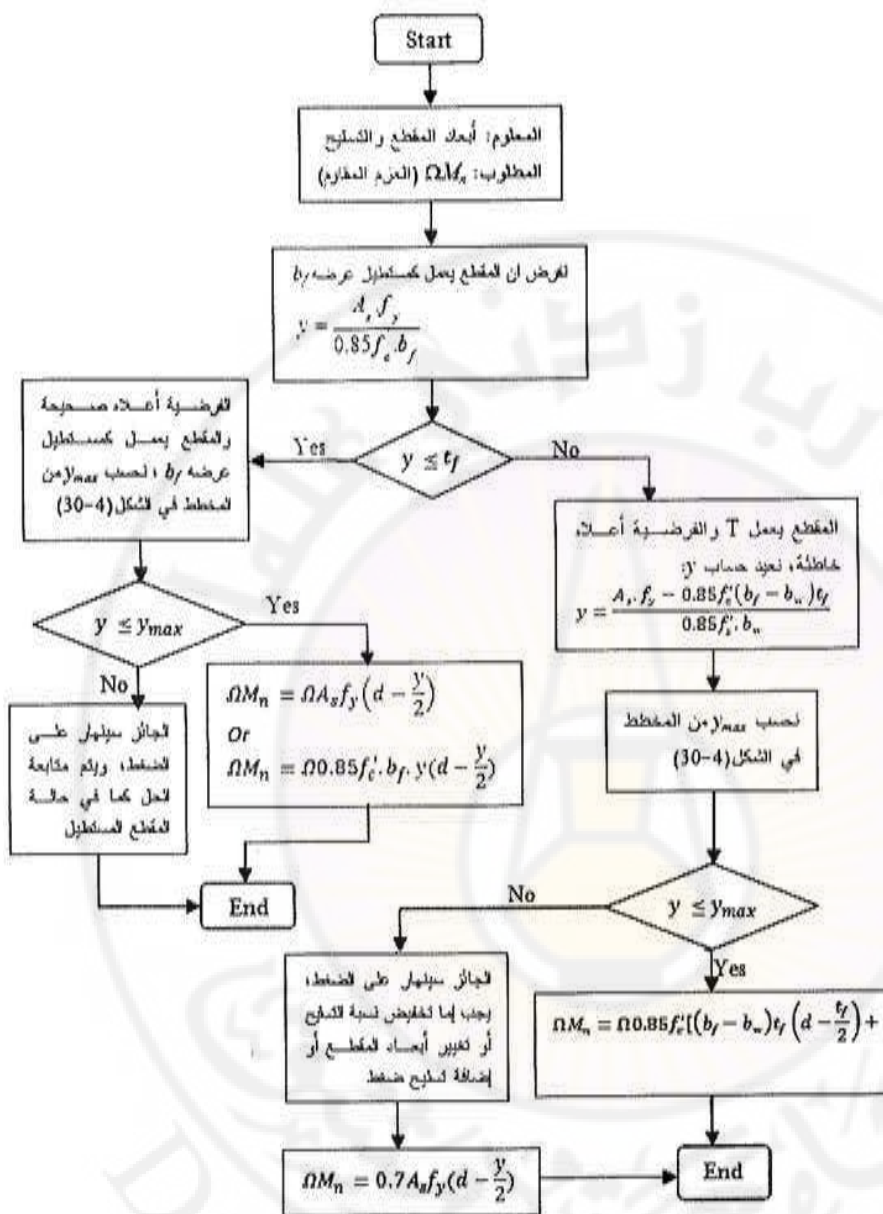




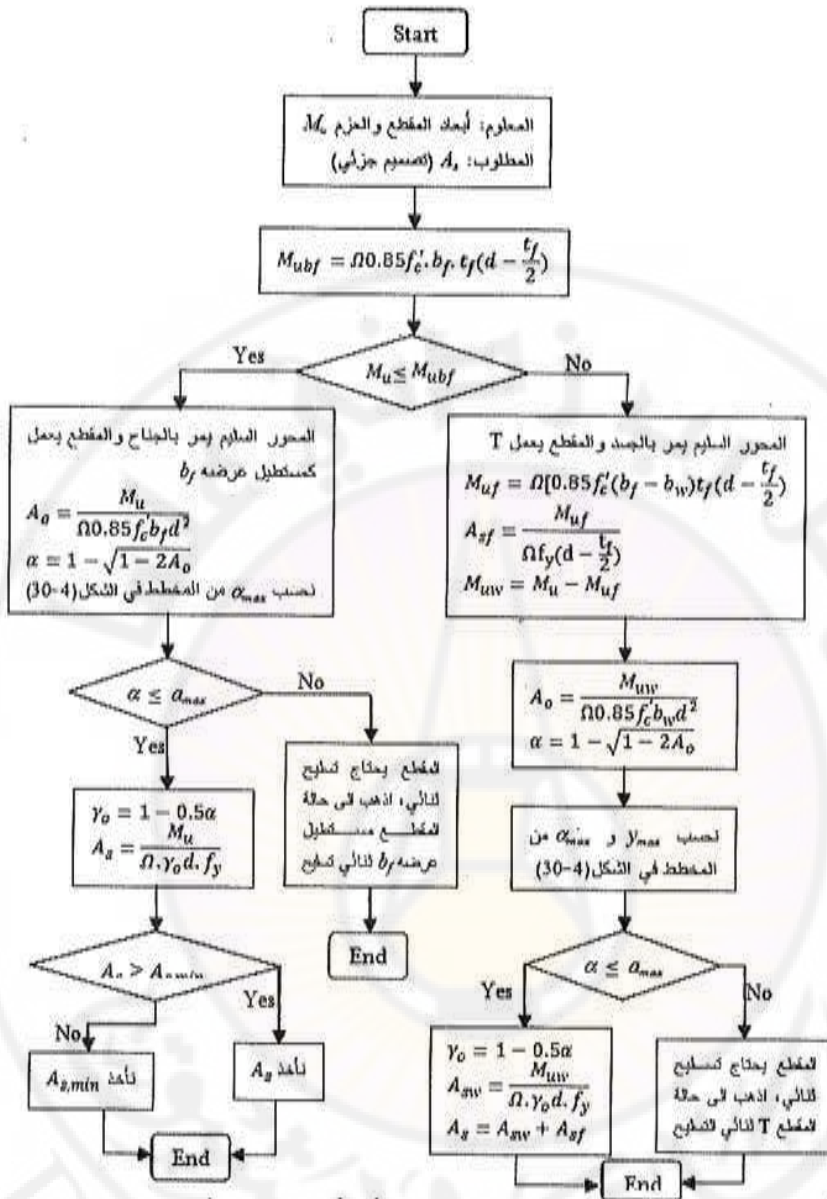
الشكل (4-30) مخطط تدفقي Flowchart لحساب العزم والتسليح الأعظمي والتسليح الأعظمي للمقطع T (بتدريج)



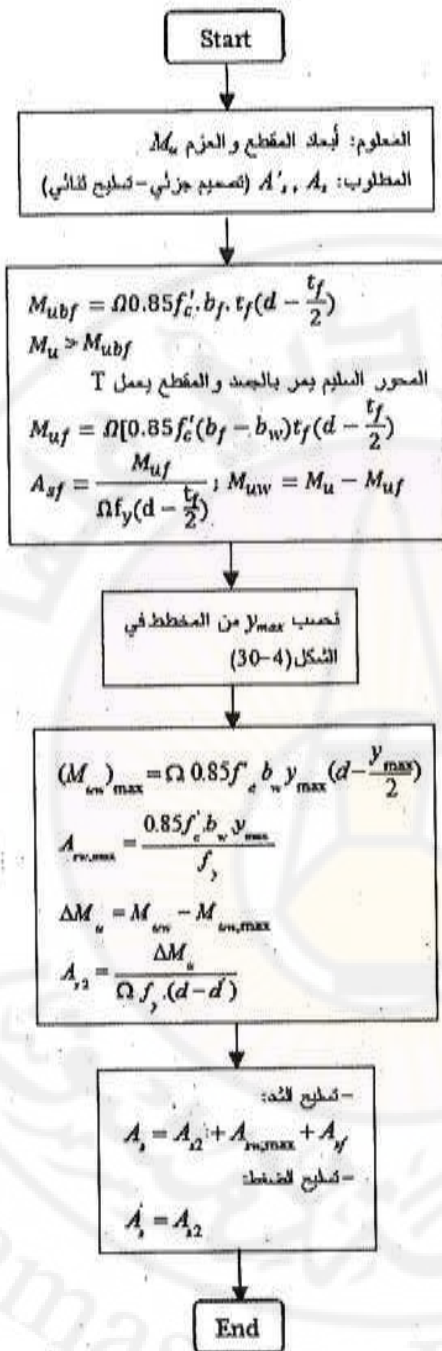
الشكل (30-4) مخطط تدفقي Flowchart لحساب العزم الأعظمي والتسليح الأعظمي للمقطع T (تتمة)



الشكل (31-4) مخطط تدفقي Flowchart لتحليل الجوائز الأحادية التسليح ذات المقاطع T



الشكل (4-32) مخطط تدفقي Flowchart لتصميم الجوائز الأحادية التسليح ذات المقاطع T



الشكل (33-4) مخطط تدفقي Flowchart لحساب التسليح الثانوي في الجوائز ذات المقاطع T

4-16- أمثلة توضيحية:

فيما يلي عدد من الأمثلة المحلولة التي توضح كيفية استخدام العلاقات السابقة لحساب المقاطع العرضية الخاضعة للانحناء البسيط.

مثال (1): (تسليح أحادي - إيجاد العزم المقاوم)

مقطع مستطيل أبعاده 250x500mm وذو تسليح أحادي 4φ16

المطلوب: حساب العزم المقاوم للمقطع ΩM_u ، علماً أن:

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = 50 \text{ mm}$$

الحل:

1. نحسب y :

نفرض أن $f_s = f_y$ (أي أن $\mu_s \leq \mu_{sb}$)، سيتم التحقق من هذه الفرضية لاحقاً
يتم حساب الارتفاع المكافئ لمنطقة الضغط y :

$$y = \frac{A_s f_y}{b 0.85 f'_c} = \frac{804.2 \times 240}{250 \times 0.85 \times 20} = 45.4 \text{ mm}$$

2. نتحقق من أن $f_s = f_y$ و $\mu_s \leq 0.5 \mu_{sb}$:

نحسب $\frac{y}{d}$ ونقارنها مع $\frac{y_b}{d}$:

$$\frac{y}{d} = \frac{45.4}{450} = 0.1009$$

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + f_y} \right)$$

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 240} \right) = 0.616$$

نجد إن:

$$\frac{y}{d} < \frac{y_b}{d} \rightarrow \mu_s < \mu_{sb} \Rightarrow f_s = f_y \quad (\text{الفرضية أعلاه صحيحة})$$

$$\frac{y}{d} \leq 0.50 \frac{y_b}{d} \quad \text{للتحقق فيما إذا كان} \quad \mu_s \leq 0.5 \mu_{sb} \quad \text{نتحقق فيما إذا كان}$$

$$0.50 \frac{y_b}{d} = 0.308 > \frac{y}{d} = 0.1009 \Rightarrow \mu_s < 0.5 \mu_{sb}$$

أي إن نسبة التسليح أقل من النسبة العظمى المسموحة بتسليح أحادي.

- يمكن إجراء هذا التحقق بطريقة أخرى:

بحسب التشوه في الفولاذ في اللحظة التي يصل فيها التشوه في أبعاد ليف مضغوط إلى قيمة الانهيار 0.003 كما يلي:

$$x = \frac{y}{\beta_1} = \frac{45.4}{0.85} = 53.4 \text{ mm}$$

بفرض أن التسليح موضوع بطبقة واحدة لذلك $d = d_i$

من تشابه المثلثات في مخطط التشوه نجد:

$$\epsilon_s = \frac{d-x}{x} (0.003) = \frac{450-53.4}{53.4} \times 0.003 = 0.022 \gg \gg 0.0053$$

فالمقطع محكوم بالانهيار على الشد ونسبة التسليح المستخدمة أقل من المسموحة.

بحسب تشوه الفولاذ عند السيلان:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{240}{2.1 \times 10^5} = 0.0011$$

إذاً عندما يتم الوصول إلى العزم المقاوم الاسمي تكون ϵ_s مساوية لـ 20 مرة ϵ_y ،

وهذا يعني سهماً تدريجياً كبيراً قد حصل قبل وصول الخرسانة للانهيار.

- كما يمكن التأكد من وصول التسليح للسيلان ومن نسبة التسليح العظمى، وذلك بحساب x/d_i

ومقارنتها مع القيم الحديدية (المعطاة بالشكلين 4-11 أو 4-12 بالنسبة للكود الأمريكي وما

يناسبها بالنسبة للكود السوري) كما يلي:

$$\frac{x}{d_i} = \frac{53.4}{450} = 0.12 \ll \ll 0.362$$

فالمقطع محكوم بالانهيار على الشد، وبالتالي الفولاذ وصل للسيلان ومساحة التسليح أقل من

النسبة العظمى، ولحساب العزم المقاوم للمقطع نأخذ عامل تخفيض المقاومة $\Omega = 0.90$.

3. نحسب العزم المقاوم ΩM_u :

طريقة 1:

$$\Omega M_n = \Omega \left[A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right]$$

$$= 0.9 \times 804.2 \times 240 \times \left(450 - \frac{45.4}{2} \right) \times 10^{-6} = 74.23 \text{ kN.m}$$

طريقة 2:

$$A_o = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \quad \alpha = \frac{y}{d} = 0.1009$$

$$A_o = 0.1009 \left(1 - 0.5 \times 0.1009 \right) = 0.0958$$

$$\gamma_o = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.95$$

$$\Omega M_n = \Omega 0.85 f'_c b d^2 A_o$$

$$= 0.90 \times 0.85 \times 20 \times 250 \times 450^2 \times 0.0958 \times 10^{-6}$$

$$\Omega M_n = 74.2 \text{ kN.m}$$

أو:

$$\Omega M_n = \Omega \gamma_o d A_s f_y = 0.90 \times 0.95 \times 450 \times 804.2 \times 240 \times 10^{-6}$$

$$= 74.26 \text{ kN.m}$$

مثال (2): (تسليح أحادي - إيجاد العزم الأعظمي)

مقطع مستطيل أبعاده $300 \times 600 \text{ mm}$

المطلوب: حساب مساحة التسليح التوازنية ومساحة التسليح الأعظمية والعزم الأعظمي الذي يتحمله المقطع بتسليح أحادي

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = 50 \text{ mm}$$

علماً أن:

الحل:

- نحسب y_b :

$$\frac{y_b}{d} = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 240} \right) = 0.616$$

$$\Rightarrow y_b = 0.616 \times 550 = 338.8 \text{ mm}$$

- من معادلة التوازن الأولى نجد A_{sb} :

$$A_{sb} = y_b \cdot b \frac{0.85 f'_c}{f_y} = 338.8 \times 300 \times \frac{0.85 \times 20}{240} = 7199 \text{ mm}^2$$

- نحسب $A_{s \max}$:

$$A_{s \max} = 0.50 \times A_{sb} = 3599.7 \text{ mm}^2$$

- نحسب $M_{u \max}$:

$$\begin{aligned} M_{u \max} &= \Omega A_{s \max} f_y \left(d - \frac{y_{\max}}{2} \right) \\ &= 0.90 \times 3599.7 \times 240 \times \left(550 - \frac{0.50 \times 338.8}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 361.8 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

طريقة ثانية للحل: نعرض خطوات الحل مع النتائج ونترك للطالب كتابة العلاقات والتفاصيل:

$$\mu_{sb} = 0.0436$$

$$\mu_{s \max} = 0.0218$$

$$A_{s \max} = 3595.5 \text{ mm}^2$$

$$y_{\max} = 169.2 \text{ mm}$$

$$M_{u \max} = 361.4 \text{ KN.m}$$

مثال (3): (تسليح أحادي - إيجاد التسليح اللازم)

مقطع مستطيل أبعاده $300 \times 600 \text{ mm}$ يتعرض لعزم حدي مقداره $M_u = 200 \text{ kN.m}$
المطلوب حساب مساحة التسليح اللازمة للمقطع

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa}; a = 50 \text{ mm} \quad \text{علماً أن:}$$

الحل:

- نحسب A_o ثم α ونقارنها مع α_{\max} كما يلي:

$$A_o = \frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b d^2} = \frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.85 \times 20 \times 300 \times 550^2} = 0.144$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_o} = 0.156$$

$$\alpha_{\max} = 0.5 \times \frac{y_b}{d} = 0.5 \times 0.616 = 0.308 > \alpha$$



المقطع لا يحتاج إلى تسليح ثانوي

$$\gamma_o = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.922$$

$$A_s = \frac{M_u}{\Omega \gamma_o d f_y} = \frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.922 \times 550 \times 240} = 1826.0 \text{ mm}^2$$

نتحقق من أن A_s أكبر من $A_{s \min}$:

$$A_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} b d = \frac{0.9}{240} \times 300 \times 550 = 618.75 \text{ mm}^2 < A_s \quad \underline{OK}$$

مثال (4): (تسليح أحادي - تصميم المقطع)

مقطع مستطيل عرضه $b=250\text{mm}$ يتعرض لعزم حدي مقداره $M_u = 200\text{kNm}$
المطلوب حساب ارتفاع المقطع ومساحة التسليح اللازمة.

$$f'_c = 20\text{MPa}; f_y = 240\text{MPa}; a = 50\text{mm} \quad \text{علماً أن:}$$

الحل:

- من أجل ارتفاع مقطع أصغري، نفرض وجود نسبة تسليح عظمى أي:

$$\mu_s = \mu_{s \max} = 0.5 \frac{455}{630 + f_y} \frac{f'_c}{f_y} = 0.0218$$

$$\frac{y_{\max}}{d} = 0.5 \times 0.85 \left(\frac{630}{630 + f_y} \right) = 0.308$$

$$A_o = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) = 0.2599$$

$$\gamma_o = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.85$$

$$r_o = \sqrt{\frac{1}{A_o}} = 1.962$$

$$d = r_o \sqrt{\frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b}} = 1.962 \times \sqrt{\frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.85 \times 20 \times 250}} = 448.6 \text{ mm}$$

نأخذ $d=450\text{mm}$ ومنه تكون مساحة التسليح هي:

$$A_s = \frac{M_u}{\Omega \gamma_o d f_y} = \frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.85 \times 450 \times 240} = 2421 \text{ mm}^2$$

ملاحظة: يشترط الكود أخذ ارتفاع أدنى للجائز إذا لم يراد تحقيق السهم كما هو في الجدول (4)-
(4). إذا كانت d المحسوبة في المسألة أصغر من d المعطاة من شرط السهم يجب عندها إما
زيادة الارتفاع أو تحقيق السهم.

- من أجل ارتفاع مقطع أعظمي: نفرض وجود نسبة تسليح دنيا أي:

$$\mu_s = \mu_{s \min} = \frac{0.9}{f_y} = 3.75 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = \left(\frac{y}{d}\right)_{\min} = \mu_{s \min} \frac{f_y}{0.85 f'_c} = 0.053$$

$$A_o = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) = 0.0515$$

$$r_o = \sqrt{\frac{1}{A_o}} = 4.405$$

$$\gamma_o = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.9735$$

$$d = 4.405 \times \sqrt{\frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.85 \times 20 \times 250}} = 1007.2 \text{ mm}$$

$$A_s = \frac{M_u}{\Omega \gamma_o d f_y} = \frac{200 \times 10^6}{0.90 \times 0.9735 \times 1000 \times 240} = 951.13 \text{ mm}^2$$

مثال (5): (تسليح ثنائي - إيجاد العزم المقاوم)

مقطع مستطيل أبعاده $250 \times 600 \text{ mm}$ مسلح بتسليح شد مقداره $8\phi 25$ وتسليح ضغط

$4\phi 18$ المطلوب حساب العزم الحدّي الذي يتحمّله المقطع

علمًا أن: $f'_c = 20 \text{ MPa}$; $f_y = 240 \text{ MPa}$; $a = 60 \text{ mm}$; $a' = 40 \text{ mm}$

الحل:

- نفرض تسليح الضغط واصل للسيلان: $f'_s = f_y$

من معادلة التوازن الأولى نحسب y :

$$y = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{b \cdot 0.85 f'_c}$$

$$y = \frac{(3927 - 1017.9) \cdot 240}{250 \cdot 0.85 \times 20} = 164.16 \text{ mm}$$

ونحسب العزم المقاوم للمقطع:

$$\Omega M_u = \Omega \left[0.85 f'_c b y \left(d - \frac{y}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \right]$$

$$\Omega M_u = 0.9 \times \left[0.85 \times 20 \times 250 \times 164.16 \left(540 - \frac{164.16}{2} \right) + 1017.9 \times 240 (540 - 40) \right] \times 10^{-6}$$

$$\Rightarrow \Omega M_u = 397.5 \text{ KN.m}$$

- نتحقق من وصول حديد الضغط للسيلان:

نحسب d'/y ونقارنها مع القيمة $(d'/y)_{lim}$

$$\frac{d'}{y} = \frac{40}{164.16} = 0.244$$

$$\left(\frac{d'}{y} \right)_{lim} = 1.18 - \frac{f_y}{535} = 0.73$$

$$\Rightarrow \left(\frac{d'}{y} \right) < \left(\frac{d'}{y} \right)_{lim}$$

التسليح المضغوط واصل للسيلان والفرضية أعلاه صحيحة.

مثال (6): (تسليح ثنائي - إيجاد التسليح اللازم)

مقطع مستطيل أبعاده $300 \times 750 \text{ mm}$ يتعرض لعزم حدي مقداره $M_u = 600 \text{ kN.m}$ المطلوب حساب التسليح اللازم للمقطع

علمًا أن: $f'_c = 20 \text{ MPa}$; $f_y = 420 \text{ MPa}$; $a = a' = 50 \text{ mm}$

الحل:

- نحسب A_o ثم α ونقارنها مع α_{max} كما يلي:

$$M_u = \Omega 0.85 f'_c b d^2 A_o$$

$$\Rightarrow A_o = \frac{M_u}{\Omega 0.85 f'_c b d^2} = \frac{600 \times 10^6}{0.9 \times 0.85 \times 20 \times 300 \times 700^2} = 0.2667$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2A_o} = 0.317$$

$$\alpha_{max} = 0.5 \times \frac{y_b}{d} = 0.5 \times 0.51 = 0.255 < \alpha$$



المقطع يحتاج إلى تسليح ثنائي

- نحسب A_o و γ_o كما يلي:

$$(A_o)_{max} = \alpha_{max} (1 - 0.5\alpha_{max}) = 0.2225$$

$$(\gamma_o)_{max} = 1 - 0.5\alpha_{max} = 0.889$$

- ويكون العزم الأعظمي الذي يتحملة المقطع بتسليح أحادي:

$$(M_{u1})_{max} = \Omega 0.85 f'_c b d^2 (A_o)_{max}$$

$$(M_{u1})_{max} = 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 300 \times 700^2 \times 0.2225 \times 10^{-6}$$

$$\Rightarrow (M_{u1})_{max} = 500.4 \text{ KN.m}$$

والتسليح الموافق:

$$A_{s1} = \frac{M_{u1max}}{\Omega \gamma_{o,max} d f_y} = \frac{500.4 \times 10^6}{0.90 \times 0.889 \times 700 \times 420} = 2127.4 \text{ mm}^2$$

- نحدد العزم المتبقي:

$$M'_u = M_u - M_{u1max} = 99.6 \text{ KN.m}$$

والتسليح الموافق:

$$A'_s = \frac{M'_u}{\Omega_s \cdot f_y \cdot (d - d')} = \frac{99.6 \times 10^6}{0.90 \times 420(700 - 50)} = 405.4 \text{ mm}^2$$

- فتكون مساحة تسليح الشد الكلية:

$$A_s = A_{s1} + A'_s = 2533 \text{ mm}^2$$

- نتحقق من ان تسليح الضغط واصل للسيلان كما يلي:

من علاقة الكود:

$$\frac{A_s - A'_s}{b \cdot d} \geq \frac{0.85 f'_c d'}{f_y d} \frac{535}{630 - f_y}$$

$$\frac{2533 - 405.4}{300 \times 700} \geq \frac{0.85 \times 20 \cdot 50}{420 \cdot 700} \frac{535}{630 - 420}$$

$$0.01 \geq 0.0074 \quad \underline{OK}$$

أو من العلاقة:

$$\left(\frac{d'}{y}\right) = \frac{50}{0.255 \times 700} = 0.28 \leq \left(\frac{d'}{y}\right)_{\text{lim}} = 1.18 - \frac{f_y}{535} = 0.395 \quad \underline{OK}$$

مثال (7): (مقطع T - إيجاد العزم المقاوم)

مقطع T مبين بالشكل (4-34) المطلوب إيجاد العزم المقاوم للمقطع ΩM_n للحالتين التاليتين:

$$A_s = 3\Phi 28 (18.47 \text{ cm}^2) \quad \text{أ -}$$

$$A_s = 3\Phi 30 (21.21 \text{ cm}^2) \quad \text{ب -}$$

$$\text{نأخذ: } f'_c = 20 \text{ MPa}; \quad f_y = 420 \text{ MPa}$$

الحل:

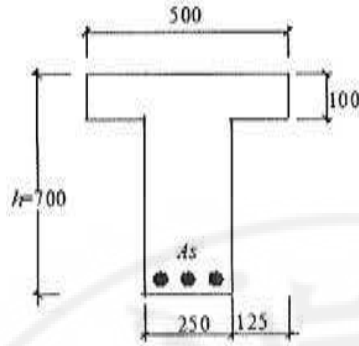
$$\text{أ - } A_s = 3\Phi 28 (18.47 \text{ cm}^2)$$

1- نحدد موقع المحور السليم:

- نحسب العمق الفعال d :

$$d = 70 - 2.5 (\text{تغطية}) - 0.8 (\text{أسورة}) - 1.4$$

$$d = 65.3 \text{ cm} \approx 65.0 \text{ cm}$$



الشكل (34-4) مقطع T للمثال (7)

- نفرض في البداية أن العمق المكافئ لمنطقة الضغط y أصغر من t_f ، وبالتالي المقطع يعمل كمستطيل عرضه b_f .
من معادلة التوازن الأولى:

$$y = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f'_c \cdot b_f} = \frac{1847 \times 420}{0.85 \times 20 \times 500} = 91.3 \text{ mm} < t_f = 100$$

فالفرضية صحيحة، ونتابع الحسابات كما في حالة المقاطع المستطيلة (على الرغم من أن

$$x = \frac{y}{0.85} = 107.4 \text{ mm} > t_f$$

2- نتحقق من أن التسليح وصل للسيلان وكمية التسليح المستعملة أقل من العظمى

$$\text{نحسب } \frac{y}{d} \text{ ونقارنها مع } 0.5 \frac{y_b}{d}$$

$$\frac{y}{d} = \frac{91.3}{650} = 0.14$$

$$0.5 \frac{y_b}{d} = 0.5 \times 0.85 \left(\frac{630}{630 + 420} \right) = 0.255$$

$$\text{نجد أن: } \frac{y}{d} < 0.5 \frac{y_b}{d} \text{ وبالتالي } \mu_s < 0.5 \mu_{sb}$$

أي إن $f_s = f_y$ ونسبة التسليح أقل من النسبة العظمى المسموحة بتسليح أحادي

3- نحسب العزم المقاوم ΩM_n :

$$\Omega M_n = \Omega \left[A_s f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right]$$

$$= 0.9 \times 1847 \times 420 \times \left(650 - \frac{91.3}{2} \right) \times 10^{-6} = 421.94 \text{ kNm}$$

$$A_s = 3\Phi 30 \text{ (21.21 cm}^2\text{)} \quad \text{ب-}$$

1- نحدد موقع المحور السليم:

بفرض y أصغر من t_f ، ومن ثم المقطع يعمل كمستطيل عرضه b_f

$$y = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f'_c \cdot b_f} = \frac{2121 \times 420}{0.85 \times 20 \times 500} = 104.8 \text{ mm} > t_f = 100$$

فالفرضية خاطئة والمحور السليم يقع في الجسد والمنطقة المضغوطة بشكل T

نعيد حساب y باعتبار المقطع T

- نحسب التسليح الموافق لبروزات الجناح:

$$A_{sf} = \frac{0.85 f'_c t_f (b_f - b_w)}{f_y} = \frac{0.85 \times 20 \times 100 \times (500 - 250)}{420} = 1011.9 \text{ mm}^2$$

نحسب التسليح الموافق للجسد:

$$A_{sw} = A_s - A_{sf} = 1109.1 \text{ mm}^2$$

- فتكون y :

$$y = \frac{A_{sw} \cdot f_y}{0.85 f'_c \cdot b_w} = \frac{1109.1 \times 420}{0.85 \times 20 \times 250} = 109.6 \text{ mm} > t_f$$

2- نقارن مع الوضعية التوازنية كما نتحقق من ان $A_s < A_{s,max}$ أو $y < y_{max}$

$$y_b = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 420} \right) \times 650 = 331.5 \text{ mm} > t_f$$

في الحالة التوازنية يعمل المقطع بشكل T ومن ثم نحسب A_{sb} من علاقة المقطع T:

$$A_{sb} = \frac{0.85 f'_c t_f (b_f - b_w) + 0.85 f'_c b_w y_b}{f_y}$$

$$= \frac{0.85 \times 20 \times 100 \times (500 - 250) + 0.85 \times 20 \times 250 \times 331.5}{420}$$

$$= 4366.4 \text{ mm}^2 > A_s \Rightarrow f_s = f_y$$

$$A_{s,max} = 0.5 A_{sb} = 2183.2 \text{ mm}^2 > A_s \text{ OK}$$

إذا أردنا حساب y_{max} : نفرض أنها أكبر من t_f ، ومن ثم نستخدم علاقة المقطع T :

$$y_{max} = \frac{A_{s,max} f_y}{0.85 f'_c b_w} - \frac{(b_f - b_w) t_f}{b_w}$$

$$= \frac{2183.2 \times 420}{0.85 \times 20 \times 250} - \frac{(500 - 250) \times 100}{250} = 115.75 > t_f \text{ OK}$$

نجد أن $y_{max} > y$

ملاحظة: لو حصلنا على قيمة لـ y_{max} أصغر من t_f يجب عندها إعادة حساب y_{max} من علاقة المستطيل.

- يمكن أن نجري هذا التحقق بطريقة أخرى:

نحسب مساحة المنطقة المضغوطة في الحالة التوازنية ثم في الحالة العظمى:

$$A'_{cb} = (b_f - b_w) t_f + b_w y_b$$

$$= (500 - 250) \times 100 + 250 \times 331.5 = 107875 \text{ mm}^2$$

$$A'_{c,max} = 0.5 A'_{cb} = 53937.5 \text{ mm}^2$$

ومنه يكون:

$$y_{max} = \frac{A'_{c,max} - (b_f - b_w) t_f}{b_w}$$

$$= \frac{53937.5 - (500 - 250) \times 100}{250} = 115.75 \text{ mm} > t_f$$

نلاحظ أن $y < y_{max}$ ، ومن ثم $A_s < A_{s,max}$ ، يتم حساب $A_{s,max}$ من علاقة المقطع T

(كون $y_{max} > t_f$) كما يلي:

$$A_{s,max} = \frac{0.85 f'_c t_f (b_f - b_w) + 0.85 f'_c b_w y_{max}}{f_y} =$$

$$= \frac{0.85 \times 20 \times 100 \times (500 - 250) + 0.85 \times 20 \times 250 \times 115.75}{420}$$

$$= 2183.2 \text{ mm}^2 > A_s \quad \text{OK}$$

3- نحسب العزم المقاوم ΩM_n :

$$\Omega M_n = \Omega \left[A_{sf} f_y \left(d - \frac{t_f}{2} \right) + A_{sw} f_y \left(d - \frac{y}{2} \right) \right]$$

بالتعويض:

$$\Omega M_n = 0.9 \left[1011.9 \times 420 \left(650 - \frac{100}{2} \right) + 1109.1 \times 420 \left(650 - \frac{109.6}{2} \right) \right] \times 10^{-6}$$

$$\Rightarrow \Omega M_n = 479.03 \text{ kN.m}$$

ملاحظة: في الحالتين أ و ب أعلاه، يجب التحقق من أن A_s أكبر من A_{smin} ($A_{smin} = 0.9 b_w d / f_y \approx 3.5 \text{ cm}^2$)

مثال (8): (مقطع T - إيجاد التسليح)

مقطع T مبين بالشكل (4-35) يتعرض لعزم ناتج عن أحمال استثمارية: ميتة $M_{DL} = 240 \text{ kN.m}$ وحية $M_{LL} = 200 \text{ kN.m}$. المطلوب حساب التسليح اللازم للمقطع

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 420 \text{ MPa} \quad \text{علماً أن:}$$

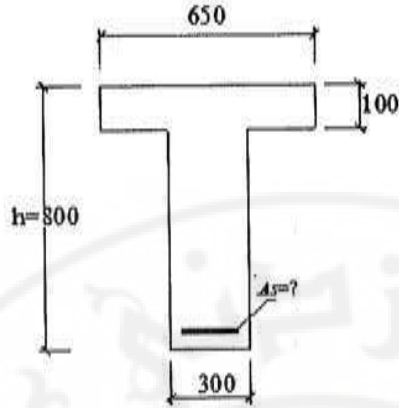
الحل:

1- نحسب العزم المصعد المطبق على المقطع:

$$M_u = 1.5 M_{DL} + 1.8 M_{LL} = 720 \text{ kN.m}$$

2- نتأكد من أن المقطع لا يحتاج تسليح ثنائي حيث نحسب M_{umax} بتسليح أحادي ونقارن مع

العزم المطبق: (نفرض $d = h - 7 = 73.0 \text{ cm}$)



الشكل (35-4) مقطع T للمثال (8)

$$y_b = 0.85 \left(\frac{630}{630 + 420} \right) \times 730 = 372.3 \text{ mm}$$

نحسب مساحة المنطقة المضغوطة المكافئة لـ y_b :

$$A'_{cb} = (b_f - b_w)t_f + b_w \cdot y_b$$

$$= (650 - 300) \times 100 + 300 \times 372.3 = 146690 \text{ mm}^2$$

$$A'_{c \max} = 0.5 A'_{cb} = 73345 \text{ mm}^2$$

$$y_{\max} = \frac{A'_{c \max} - (b_f - b_w)t_f}{b_w}$$

$$= \frac{73345 - (650 - 300) \times 100}{300} = 127.8 \text{ mm}$$

$$M_{u \max} = 0.9 \left[\begin{aligned} &0.85 \times 20 (650 - 300) 100 \times \left(730 - \frac{100}{2} \right) + \\ &+ 0.85 \times 20 \times 300 \times 127.8 \times \left(730 - \frac{127.8}{2} \right) \end{aligned} \right] \times 10^{-6}$$

$$M_{u \max} = 754.88 \text{ kN.m} > M_u = 720$$

فالمقطع لا يحتاج تسليح ثانوي

3- نحدد فيما إذا r أكبر أو أصغر من t_f ، نحسب العزم الذي يتحمله الجناح:

$$M_{uf} = \Omega \times 0.85 f'_c b_f t_f \left(d - \frac{t_f}{2} \right)$$

$$= 0.9 \times 0.85 \times 20 \times 650 \times 100 \times \left(730 - \frac{100}{2} \right) \times 10^{-6}$$

$$= 676.26 \text{ kN.m} < M_u = 720$$

فالمحور السليم يمر بالجسد ←

4- نحسب التسليح A_s كما يلي:

نحسب العزم الذي تتحمله بروزات الأجنحة بدون الجسد

$$M_{uf} = \Omega \times 0.85 f'_c (b_f - b_w) t_f \left(d - \frac{t_f}{2} \right)$$

$$= 0.9 \times 0.85 \times 20 (650 - 300) 100 \times \left(730 - \frac{100}{2} \right) \times 10^{-6}$$

$$= 364.14 \text{ kN.m}$$

$$A_{sf} = \frac{M_{uf}}{\Omega f_y \left(d - \frac{t_f}{2} \right)} = \frac{364.14 \times 10^6}{0.9 \times 420 \left(730 - \frac{100}{2} \right)} = 1416.67 \text{ mm}^2$$

- نحدّد العزم المتبقي الواجب تحميله لمقطع مستطيل عرضه b_w

$$M_{uw} = M_u - M_{uf} = 720 - 364.14 = 355.86 \text{ kN.m}$$

$$A_o = \frac{M_{uw}}{\Omega \times 0.85 f'_c b_w d^2} = \frac{355.86 \times 10^6}{0.9 \times 0.85 \times 20 \times 300 \times 730^2} = 0.1455$$

$$\Rightarrow \alpha = 0.158, \quad \gamma_o = 0.921$$

$$A_{sw} = \frac{M_{uw}}{\Omega f_y \gamma_o d} = \frac{355.86 \times 10^6}{0.9 \times 420 \times 0.921 \times 730} = 1400.25 \text{ mm}^2$$

ومنه نحسب تسليح الشد الكلي:

$$A_s = A_{sw} + A_{sf} = 1416.67 + 1400.25 = 2817 \text{ mm}^2 (28.2 \text{ cm}^2)$$

نختار قضبان التسليح:

$$\text{Use } 6 \Phi 25 = 29.4 \text{ cm}^2$$

توضع القضبان على طبقتين ثم يتم التأكد من قيمة α المأخوذة في الحساب كما يلي:

$$a = 25 \text{ (تغطية)} + 8 \text{ (أسورة)} + 25 \text{ (قطر القضيب)} + \\ + 10 \text{ (نصف التباعد الشاقولي بين الطبقتين)} = 68 \text{ mm} \approx 70 \text{ mm}.$$

وهي مطابقة للقيمة المأخوذة في الحساب (تم أخذ $d=730\text{mm}$).



الفصل الخامس

المقاطع الخاضعة للضغط المركزي

(الأعمدة القصيرة)

Sections under Axial Compression (Short Columns)

(إعداد: أ. د. م. غسان محمود)

1-5- تمهيد.

2-5- الأعمدة.

1-2-5- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي.

1-1-2-5- الحساب وفق طريقة الإجهادات المسموح بها.

2-1-2-5- الحساب وفق طريقة حد المقاومة القصوى.

3-1-2-5- اشتراطات الأبعاد والتسليح.

3-5- أمثلة حسابية توضيحية.



5-1- تمهيد Preface:

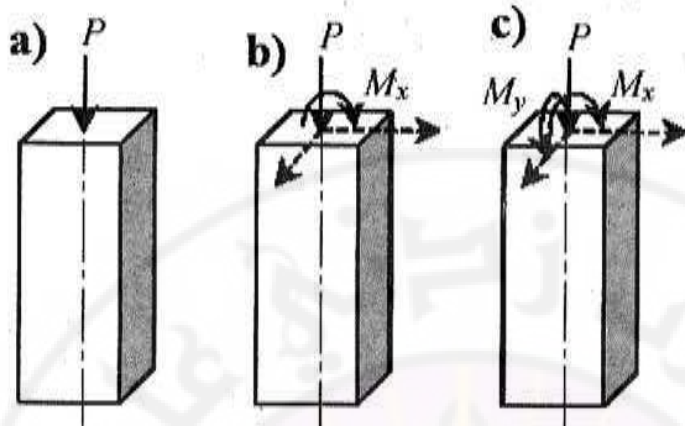
توجد المقاطع الخاضعة للضغط كلياً أو جزئياً في الكثير من العناصر الإنشائية الخرسانية المسلحة، ويدور الحديث هنا في هذا الفصل حول المقاطع التي تكون الإجهادات فيها كلياً أو جزئياً إجهادات ضاغطة ناجمة عن تأثير أحمال ضاغطة تؤثر باتجاه المحور الطولي (أو مركبات هذه الأحمال). ومن أهم العناصر الإنشائية الخاضعة لأحمال ضاغطة مباشرة أو غير مباشرة الأعمدة، الجدران الحاملة، بعض مكونات الجوائز الشبكية وغير ذلك. تكون الأعمدة وغيرها من العناصر الأخرى خاضعة لأحمال ضاغطة يمكن عدّها مركزية أو لامركزية، وقد تكون معرضة لظاهرة التحنيب الجانبي *Lateral Buckling*، أي ما يسمى أحياناً السهم الجانبي *Sideway Deflection*، حيث تحسب كأنها عناصر قصيرة أو عناصر طويلة، وهذا، إضافة لتسليط بعض الضوء على الجدران الخرسانية المسلحة الحاملة (أحمال النقالة *Gravity Loads*)، ما سيتم التركيز عليه في الفقرات القادمة.

5-2- الأعمدة Columns:

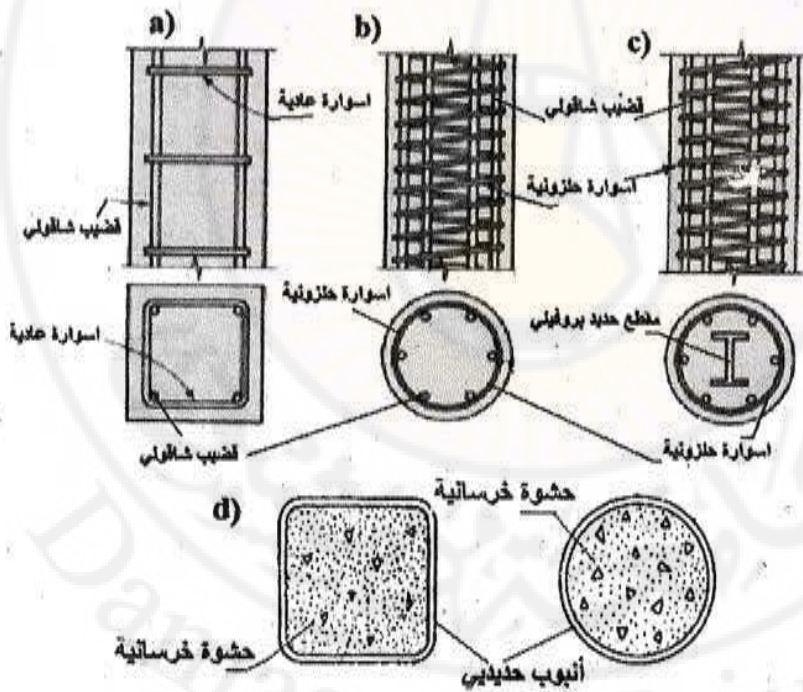
الأعمدة عناصر شاقولية يزيد ارتفاعها باتجاه القوة الضاغطة بمقدار لا يقل عن خمسة أمثال البعد الأصغر لمقطعها العرضي)، وتوضع بشكل أساسي لأحمال ضاغطة بالاتجاه الطولي، ويكون تسليحها العامل باتجاه هذه الأحمال، على أن يتم تطويقها بتسليح عرضي مناسب، ويمكن تصنيفها وفقاً للمعايير التالية:

- لامركزية القوى الضاغطة، الشكل (5-1).
- أعمدة خاضعة للضغط المركزي.
- أعمدة خاضعة للضغط اللامركزي البسيط (اللامركزية بالنسبة لأحد المحاور المركزية).
- أعمدة خاضعة للضغط اللامركزي الثنائي (اللامركزية بالنسبة لكلا المحورين المركزيين)
- طريقة التسليح، الشكل (5-2-1):
- أعمدة غير مطوقة *Unconfined Columns* مسلحة بقضبان منفردة عاملة بالاتجاه الشاقولي مع تسليح عرضي عادي.
- أعمدة غير مطوقة ذات تسليح بروفيلي عامل في الوسط وقضبان عادية منفردة على المحيط مع تسليح عرضي عادي.
- أعمدة ذات قضبان منفردة طولية ومطوقة بقضبان تسليح مستمرة (حلزونية).

- أعمدة على شكل أنابيب معدنية مملوءة بالخرسانة أو خرسانية مغلقة بتسليح على شكل مقاطع حديد صناعي (بروفيلي) أو صفائح معدني وغير ذلك (في حالات خاصة).



الشكل (1-5) تصنيف الأعمدة وفقاً لبعيد نقطة تأثير القوة الضاغطة عن مركز ثقل المقطع العرضي
 (a) ضغط مركزي، (b) ضغط لا مركزي بسيط، (c) ضغط لامركزي ثنائي.



الشكل (1-2-5) تصنيف الأعمدة وفقاً للتسليح المستخدم.

• نسبة النحافة *Slenderness Ratio*:

- أعمدة قصيرة *Short Columns* (تخضع مقاطعها العرضية نظرياً للضغط فقط).
- أعمدة طويلة *Long Columns* (تخضع مقاطعها العرضية للضغط واشد معاً).

• المقطع العرضي:

- مقطع منتظم بسيط مصمت على شكل مربع، أو مستطيل، أو دائرة أو مضلع منتظم.
- مقاطع أخرى متناظرة مصممة أو مفرغة.

• مقاومة القوى الجانبية، الشكل (5-2-ب):

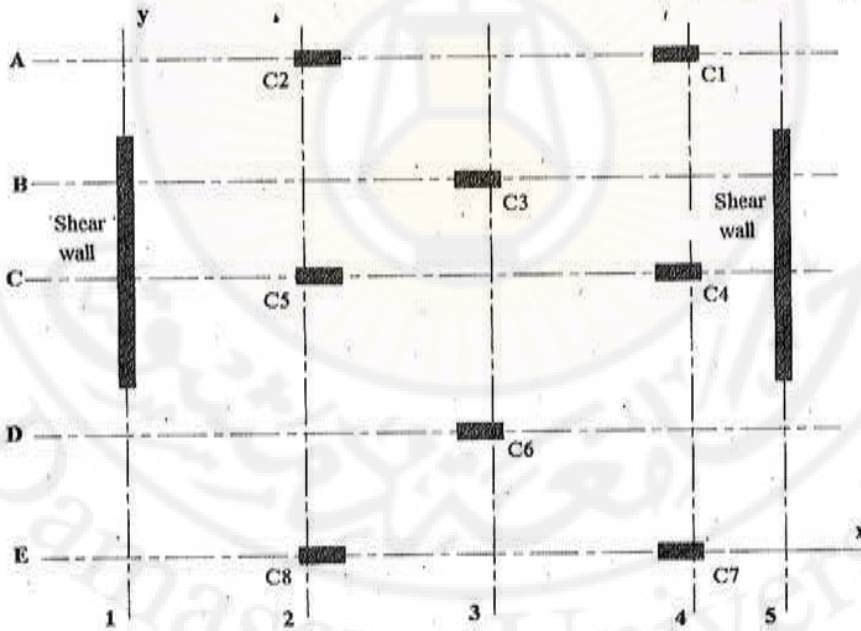
- أعمدة مسندة جانبياً بالاتجاه y .
- أعمدة غير مسندة جانبياً بالاتجاه x .

• الوظيفة *Function*:

- أعمدة إنشائية (حاملة).
- أعمدة تزيينية هدفها جمالي وليس إنشائي.

• الموقع *Location*:

- وسطي أو طرفي أو ركني.



الشكل (5-2-ب) أعمدة مسندة وغير مسندة جانبياً (الاتجاه x)، (مخطط التاكيس).

تقوم الأعمدة الموزعة بشكل سليم في المسقط الأفقي - كعناصر إنشائية أساسية حاملة - بنقل الأحمال من السقوف والأرضيات مع وزنها الذاتي وغير ذلك إلى الأساسات، ولا بد أن يتم اختيار مواقعها وميزاتها لتحقيق شروط المقاومة والاستثمار الأفضل للمنشأ. من أجل ذلك، فيما يلي بعض التوصيات عند اختيار الموقع:

- (1) البدء بالطابق المنكرر.
- (2) اختيار الموقع عند تقاطع الحوائط *Walls* قدر الإمكان.
- (3) يجب الأخذ بالحسبان عدم الإساءة للفراغات المطلوبة في الطوابق كافة، إي إن لا يقع العمود ضمن هذه الفراغات..
- (4) ضرورة المحافظة على اتجاهات الأعمدة في كافة الطوابق.
- (5) عند استناد عمود مستطيل على عمود دائري، يجب أن يقع مقطع العمود المستطيل داخل مقطع العمود الدائري، ويفضل بشكل عام أن يكون شكل المقطع موحداً وألا يزيد مقطع العمود العلوي على مقطع العمود السفلي، ويفضل تطابق مركزي الثقل.

5-2-1- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي

Short Columns Subjected to Centric Compression

تعد الأعمدة قصيرة عندما:

- المقاطع المربعة ($a \times a$) أو المستطيلة ($a \times b$):

$$\frac{L_o}{a} \leq 12; \quad (5-1)$$

$$\frac{L_o}{b} \leq 12.$$

- المقاطع الدائرية أو متعدد الأضلاع المنتظم (D - قطر المقطع الدائري أو الدائرة الماسة للأضلاع):

$$\frac{L_o}{D} \leq 10; \quad (5-2)$$

- المقاطع السابقة والمقاطع الأخرى الأكثر تعقيداً، يجب أن تتحقق المتراحة التالية:

$$\lambda = \frac{L_o}{i_{x,y}} \leq 40; \quad (5-3)$$

حيث:

L_0 - الطول الفعال للعمود على التحنيب (الحسابي)، ويساوي المسافة بين نقطتي انعدام العزوم أو ما يسمى نقطتي الانقلاب *Contra-flexure Points*، ويحدد بحسب كون الأعمدة مسندة جانبياً أو غير مسندة، وبحسب ارتباط العمود في طرفيه وغير ذلك كما سيبين لاحقاً، الأشكال (5-3-أ)، (5-3-ب) و (5-3-ج).

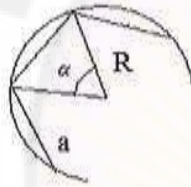
a و b - عرض وطول المقطع العرضي المستطيل (للمربع البعد نفسه).
 D - قطر المقطع الدائري.

λ - نسبة النحافة *Slenderness Ratio*.

$i_{x;y}$ - نصف قطر عطالة *Radius of Inertia* المقطع بالاتجاه x أو y ، وبحسب بالعلاقة:

$$i_{x;y} = \sqrt{\frac{I_{x;y}}{A}}; \quad (5-4)$$

حيث: A - المساحة الكلية للمقطع المدروس (في حالة المضلع المنتظم، أي المقطع الذي تمر من رؤوسه دائرة، تحدد المساحة بالعلاقة:



$$A = n R^2 \frac{\sin \alpha}{2} = \frac{n a^2 \operatorname{ctg}(0.5\alpha)}{4}$$

حيث:

α - الزاوية المركزية المحصورة بين نهايتي الضلع، n - عدد الأضلاع،

R - نصف قطر الدائرة المارة برؤوس المضلع، a - طول الضلع.

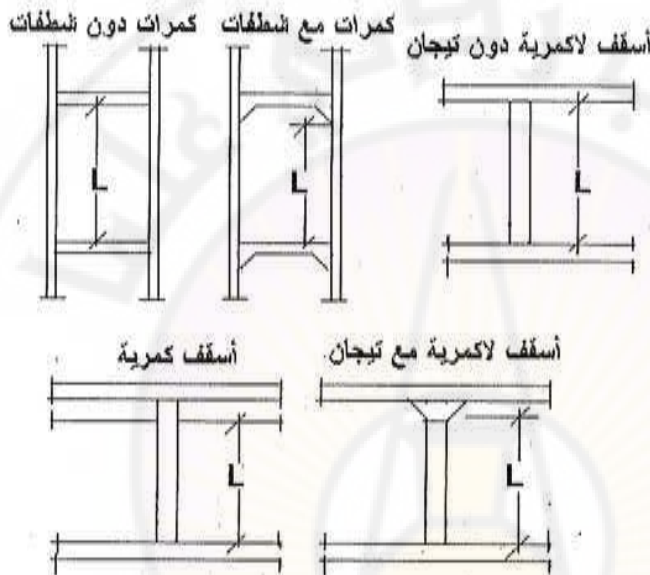
$i = 0.25D$ للمقطع الدائري،

$i_x \approx 0.3a$ بالاتجاه القصير و $i_y \approx 0.3b$ بالاتجاه الطويل، وذلك للمقطع المستطيل.

$I_{x;y}$ - عزم عطالة المقطع حول المحاور المركزية بالاتجاه المدروس.

عندما لا يحقق العمود العلاقات السابقة يعدّ طويلاً، أي يجب حسابه مع الأخذ بالحسبان أثر التحنيب الجانبي وفق تعليمات الكود، إذ يؤخذ أثر التحنيب هنا مساوياً في تأثيره لعزم انحناء إضافي M_e ناتج عن الحمل الناظمي الأقصى N_{II} (أو N وفق طريقة الإجهادات المسموح بها) المطبق بلا مركزية معينة e_e نتيجة تشوه العمود المضغوط في المقطع الحرج وفق تعليمات الكود [1]، وبذلك يتحول حساب حالة حد الاتزان الناتج على التحنيب، إلى حساب المقاومة

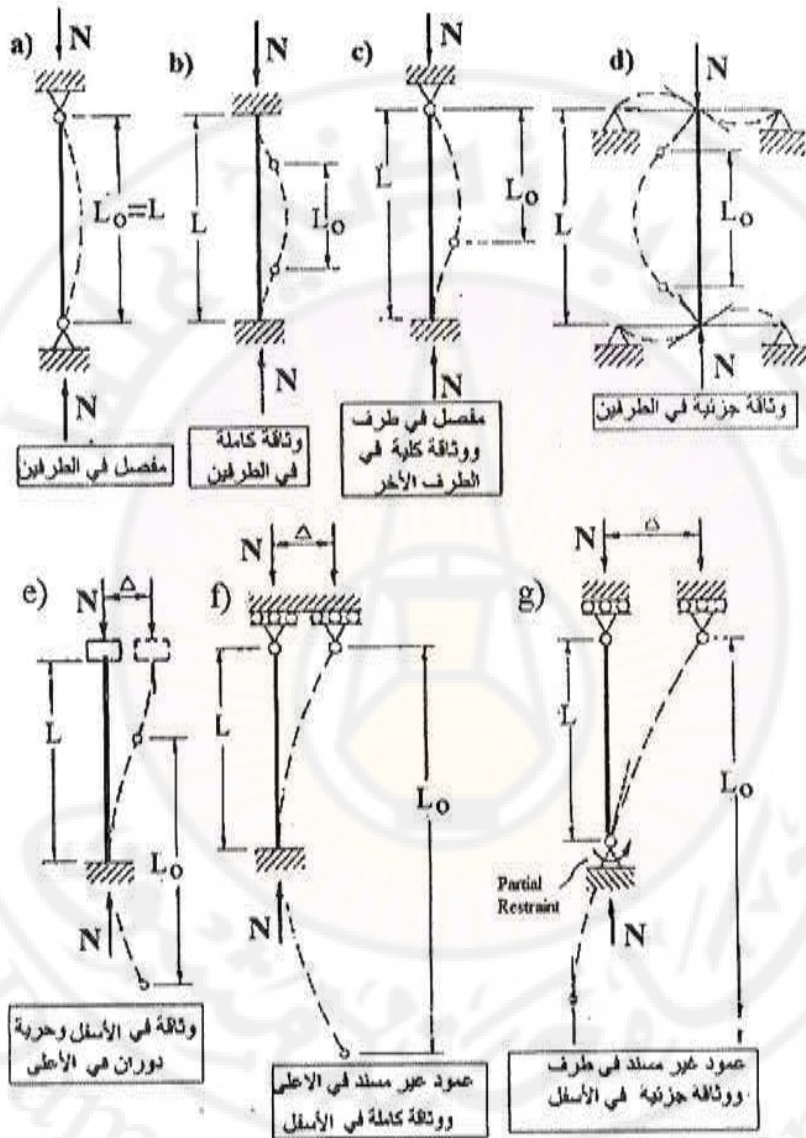
القوى للعزوم الناتجة بعد إضافة العزم المذكور M_c . وفي كل الأحوال يجب ألا تزيد قيمة λ في كل اتجاه على 100، إلا في الحالتين التاليتين:
 - عندما يجري تحليل حسابي للمنشأ بالطرائق الدقيقة مع أخذ الأفعال من الدرجة الثانية بالحسبان (تأثير المنحني $P-\Delta$)، أي تأثير الانحراف على القوى الداخلية الناشئة.
 - في العناصر ذات الطبيعة المعمارية التزيينية أو العناصر المتقاربة. وفي كل الحالات السابقة يجب أن يكون $\lambda_{max} \leq 150$.



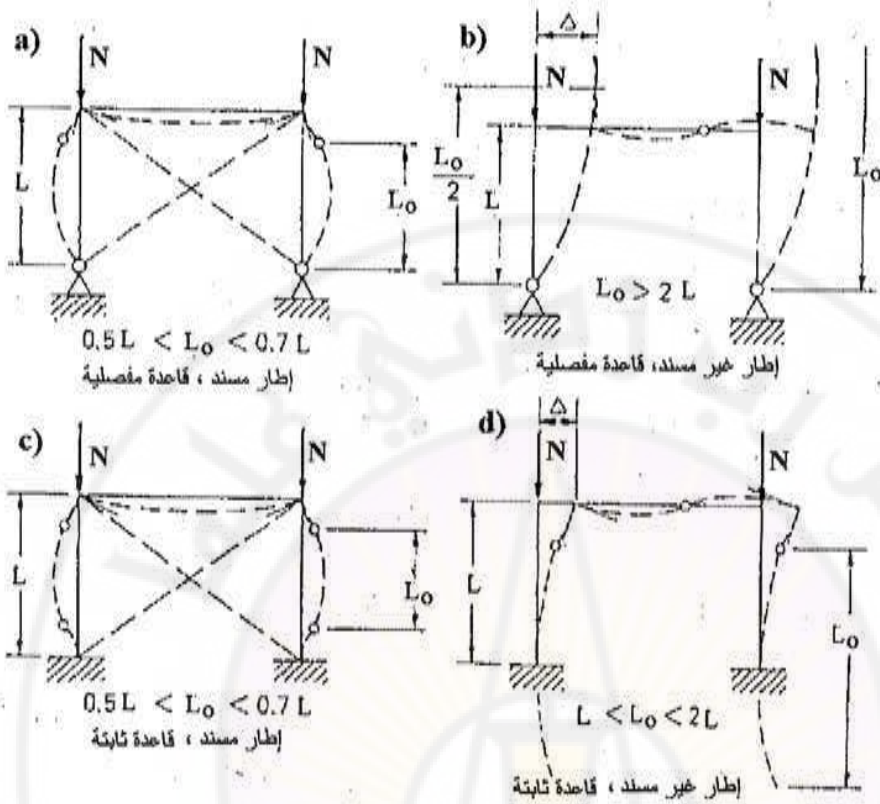
الشكل (5-3-1) الطول الحقيقي (الهندسي) L لعدد من أنواع الأعمدة حسب الجملة الإنشائية.

بالنسبة لتحديد الارتفاع الفعال للعمود L_0 ، وهو الطول الحسابي الذي يجب استخدامه (المسافة بين نقاط تغير الانحناء، أي نقاط انعدام العزم)، فيتم وفقاً لكون العمود مسند جانبياً أو غير مسند جانبياً في الاتجاه المدروس، حيث يكون العمود عنصراً من عناصر الهياكل المسندة جانبياً، عندما تكون هذه الهياكل *Skeletons* مقواة بعناصر لمقاومة الانزياح الجانبي *Lateral Displacements*، مثل جدران القص *Shear Walls* أو روابط شبكية تساوي قساوتها *Stiffness* ما لا يقل عن 6 أمثال مجموع قساوت الأعمدة في كل طابق وفي الاتجاه المدروس، وبالنسبة للأعمدة الطويلة فيمكن عدها مسندة جانبياً *Laterally Braced* إذا كانت الجملة الإنشائية للمنشأ (أو الطوابق الذي يشكل العمود المدروس عنصراً منه) مزودة بعناصر صلدة

أخرى كجدران القص أو ما يماثلها قادرة على امتصاص ما لا يقل عن 80% من الأحمال الأفقية المطبقة أو 5% من مجموع الأحمال الشاقولية على جميع الأعمدة كحمل أفقي مركز في مستوي كل طابق أيهما أكبر، ولا تضاف لأحمال الجدران.



الشكل (5-3 ب) الطول الحسابي على التحنيب في عدد من أنواع الأعمدة المسندة وغير المسندة جانبياً.



الشكل (5-3-ج) الطول الحسابي على التحنيب في أعمدة الإطارات المسندة وغير المسندة جانبياً.

6 يمكن في الأحوال العادية عدّ هذا الشرط محققاً إذا كانت قساوة هذه العناصر تزيد على أمثال مجموع قساوات الأعمدة في كل طابق، ويمكن في حالة المباني الهيكلية العادية الطابقية التي لا يزيد عدد طوابقها على 6 طوابق عدّ أعمدتها المضغوطة مسندة، حتى ولو لم تتضمن جملتها الإنشائية عناصر تقوية جانبية واضحة مثل جدران القص أو ما يماثلها، شريطة تحقيق ما يلي:

- أن تكون المقاطع المسلحة في جميع الأعمدة المعتمدة ذات قدرة كافية لمقاومة حالات التحميل الأخرى التي تتضمن بالإضافة إلى الأحمال الميتة والحية أحمال الرياح *Wind* الزلازل *Earthquake*، دفع التربة *Earth Pressure* وغير ذلك.
- ألا يزيد معامل نحافة كل عمود على 60.

- ألا تتضمن الجملة الإنشائية للمنشأ عدم تناظر بارز، سواء بالنسبة للأحمال أو الشكل الهندسي وغير ذلك.

- ألا يؤخذ الطول الحسابي الفعال للعمود أقل من الطول الحقيقي الصافي بين العناصر المرتبطة به.

تكون الهياكل غير مسندة جانبياً عندما لا تتم تقويتها بعناصر لمقاومة الانزياحات الجانبية، وهي تعتمد في مقاومتها لهذه الانزياحات على قساوت أعمدتها فقط.

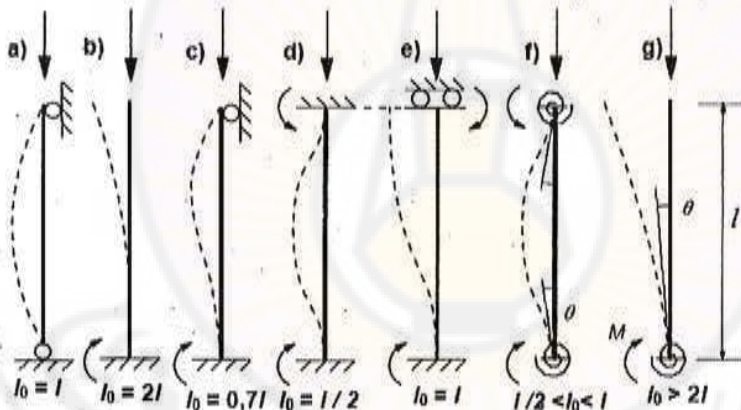
يؤخذ الارتفاع الفعال L_0 في الأعمدة المسندة جانبياً وفقاً للعلاقة (5-5):

$$L_0 = \beta L; \quad (5-5)$$

حيث:

L - الطول الهندسي الحر (الحقيقي) للعمود وفقاً للعناصر المرتبطة به.

β - معامل تجريبي (عادة $\beta \leq 1$ للأعمدة المرتبطة في طرفيها)، ويتعلق بطبيعة ارتباط العمود في نهايتيه مع العناصر الإنشائية الأخرى، وهو يساوي في عدد من الأعمدة الأكثر استخداماً، الشكل (5-3-د):



الشكل (5-3-د) الطول الحسابي على التحبيب في بعض الأعمدة المسندة جانبياً الأكثر استخداماً.

1.0- إذا كان العمود متمفصلاً (*Hinged (Pinned)* في نهايتيه (أعمدة مسبقة الصنع مثلاً)، أو موثوقاً في الأسفل بوثاقة جزئية صلدة ومنزلقاً في الأعلى، و بشكل عام يطبق ذلك في الأبنية العادية.

2.0- إذا كان العمود موثوقاً بوثاقة صلدة في الأسفل وحرراً في النهاية الأخرى.

0.5- إذا كان العمود موثوقاً في نهايتيه وثيقة تامة (مصبوب ميليثيا *Monolithic* مثلاً).

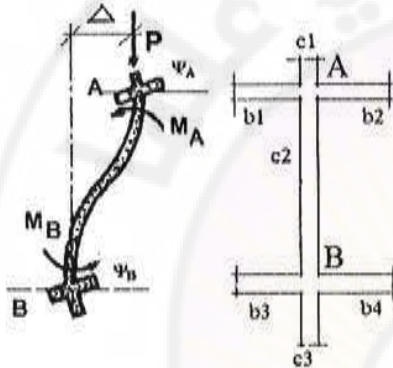
0.7- إذا كان العمود متمفصلاً في إحدى نهايتيه وموثوقاً في النهاية الأخرى وثاقفة تامة، أو مثبتاً جزئياً في كلتا نهايتيه، وعلى أن يؤخذ $\beta = 1$ في الأبنية العادية.

0.8- إذا كان العمود متمفصلاً في إحدى نهايتيه وموثوقاً في النهاية الأخرى وثاقفة جزئية، أو مثبتاً جزئياً في كلتا نهايتيه.

ملاحظة:

يمكن اعتماد التحليل الإنشائي من الدرجة الثانية بدلاً من حساب L_0 لأخذ تأثير القوى الداخلية والعزوم الإضافية نتيجة الانزياحات الجانبية والأحمال الشاقولية المتزايدة، أي الأخذ بالحسبان تأثير منحني القوة - الانزياح الجانبي (المخطط $P-\Delta$).

في أعمدة الهياكل غير المسندة جانبياً، يؤخذ الطول الحسابي L_0 وفقاً للعلاقة (5-6):



$$\Psi = \frac{\text{مجموع قساوت الأعمدة في العقدة}}{\text{مجموع قساوت الجوائز في العقدة}} = \frac{S_c}{S_b} = \frac{\sum \left(\frac{EI}{L} \right) c_i}{\sum \left(\frac{EI}{L} \right) b_i}$$

الشكل (5-4-1) مفهوم معامل قساوة العقدة الطرفية Ψ لحساب الطول الفعال للعمود في الأعمدة غير المسندة جانبياً.

$$L_0 = \alpha L; \quad (5-6)$$

حيث:

α - معامل تجريبي ($\alpha > 1$) يحدد من الأشكال (5-4-أ، ب، ج).

Ψ_A - مجموع قساوتات $Stiffness$ الأعمدة مقسومة على مجموع قساوتات العناصر الخاضعة للانحناء (الكمرات) في العقدة الإطارية A (الطرف العلوي للعمود المدروس).

Ψ_B - مجموع قساوتات الأعمدة مقسومة على مجموع قساوتات العناصر الخاضعة للانحناء (الكمرات) في العقدة الإطارية B (الطرف السفلي للعمود المدروس).

يمكن اعتماد القيم التالية لمعامل القساوة في العقدة المدروسة Ψ ، وفقاً للكود الأمريكي:

- في حالة الوثاقفة الصلدة : نظرياً: $\Psi = 0$ (عملياً $\Psi = 1$)

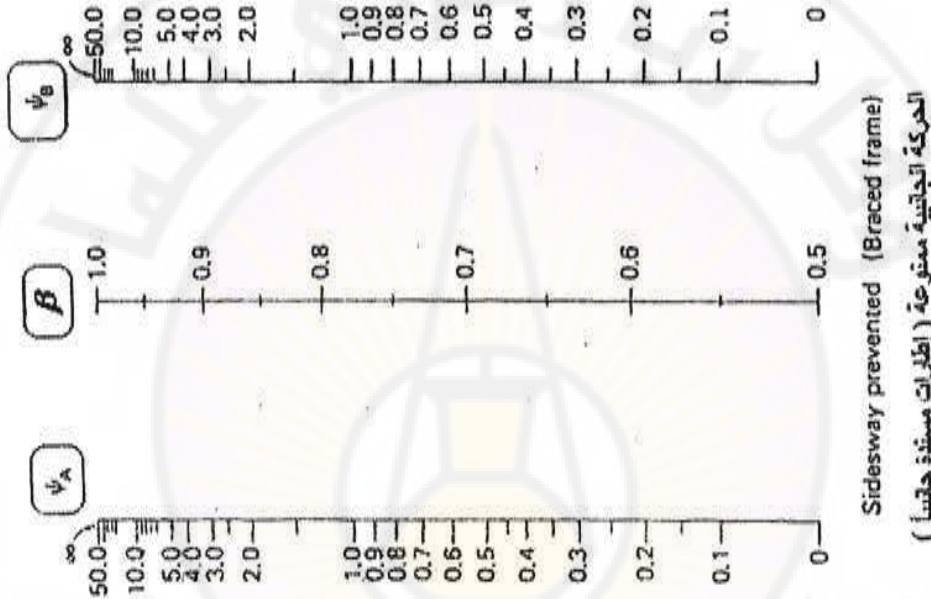
- في حال استناد نهاية العمود على الأساس: $\Psi = 10$

- في حالة المفصل: $\Psi \rightarrow \infty$

ملاحظات على الشكل (5-4-1):

لقد تم إعداد هذا الشكل بافتراض ما يلي:

- في العقدة المدروسة، تصل كل الأعمدة إلى الحملات الحرة بان واحد.
- يتكون هيكل المنشأ من إطارات مستطيلة ومتناظرة.
- يتوزع عزم التقييد (عزم الانحناء في الوثافة) نتيجة تأثير الجوائز في أي عقدة بين الأعمدة وفقاً لنسب القساوة الناتجة.
- تعدّ نهايات الجوائز ذات تقييد مرن (وثافة مرنة) بسبب تأثير الأعمدة، وبحيث يحصل دوران النهايات (نتيجة تحنيب الأعمدة) في مستو واحد وبقيمة متساوية واتجاه متعاكس.
- لا تتحمل الجوائز أي حملات محورية.



الشكل (5-4-ب) تحديد قيم المعامل β لحساب العنول الفعال للعمود في الأعمدة المسندة جانبياً.

يتم أخذ تأثير التشققات في القساوة بالحسبان كما يلي:

- تحدد الصلابة العزمية $E'I$ وفقاً للعلاقات التالية:

$$EI = \frac{0.2E_c I_g + E_s I_s}{1 + \beta} \quad \text{أو} \quad EI = \frac{0.4E_c I_g}{1 + \beta}$$

من أجل الأعمدة: القيمة الأكبر من:

- من أجل الجوائز: القيمة $0.5E_c I_g$ (بافتراض أن عزم العطالة للمقطع المثقوب I_{cp}

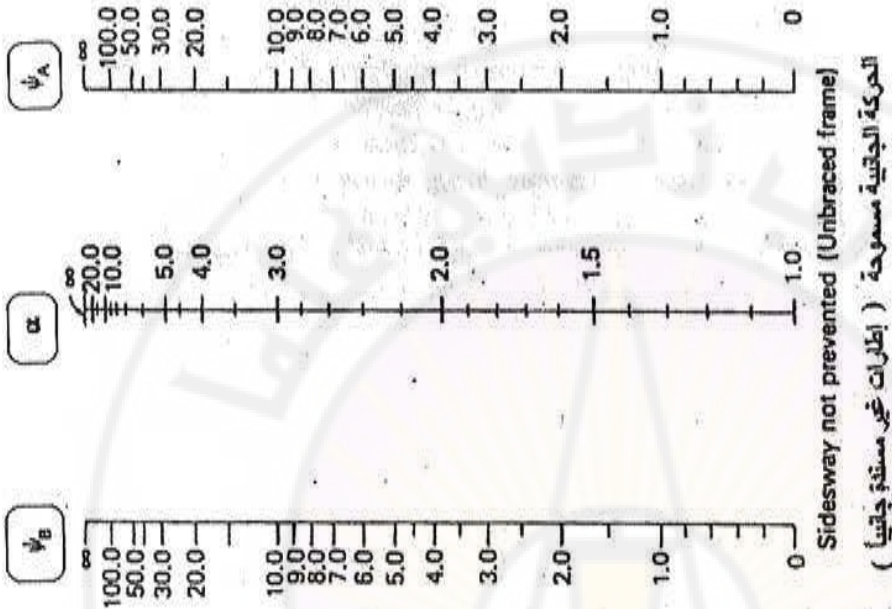
يساوي نصف عزم العطالة للمقطع دون تشققات I_g)، حيث:

E_c - معامل مرونة الخرسانة اللحظي.

I_g - عزم العطالة للمقطع غير المشقق حول المحور المركزي (بإهمال التسليح)

I_s - عزم عطالة التسليح حول المحور المركزي

β - معامل الزحف في الخرسانة، أي نسبة الحمولة الحديدية المطبقة على العمود إلى الحمولة الحديدية الكلية.



الشكل (5-4-ج) تحديد قيم المعامل α لحساب الطول الفعال للعمود في الأعمدة غير المسندة جانبياً.

5-1-2-1- الحساب وفق طريقة الإجهادات المسموح بها:

(A) الفرضيات الأساسية *Basic Assumptions*:

تستند هذه الفرضيات إلى المبادئ الأساسية للحساب وفق طريقة حالة حد الإجهادات المسموح بها، أي:

أ- التشوهات في التسليح والخرسانة المحيطة به متساوية.

ب- تتناسب الإجهادات مع التشوهات المرافقة وفق علاقة خطية (قانون هوك).

ج- تتوزع إجهادات الضغط توزيعاً منتظماً على كامل ارتفاع المقطع.

د- بقاء المقاطع المستوية مستوية بعد التشوه (فرضية برنولي).

هـ- قيم العوامل E_s, E_c, n ثابتة.

و- قبول إجهادات مسموح بها في الخرسانة وفي فولاذ التسليح.

(B) التسليح بقضبان طولية وأساور عرضية عادية *Tied Reinforced Columns*

يستخدم هذا الشكل من التسليح عادة في الأعمدة ذات المقاطع المربعة أو المستطيلة والأكثر تعقيداً، ويمكن استخدامه أحياناً في الأعمدة ذات المقطع الدائري أو متعدد الأضلاع المنتظم، إذ تكون الأساور منفصلة ومتوضعة على تباعد معين وعمودية على التسليح الطولي العامل، ولها شكل المقطع العرضي للعمود. و من أهم وظائف التسليح الطولي العامل (الشاقولي)، وهو تسليح محسوب، ما يلي:

- تأمين قدرة تحمل العمود لمقاومة الأحمال الضاغطة.
- امتصاص عزوم الانحناء الطارئة وتشوهات الانكماش *Shrinkage* في الخرسانة، وهذا ما يبرر توزيع التسليح الطولي على محيط المقطع العرضي.
- التخفيف من التحنيب الجانبي *Lateral Buckling* للعمود ككل.
- امتصاص الإجهادات الناجمة عن ظاهرة الزحف (السيلان *Creep*) في الخرسانة تحت التأثير طويل الأمد للأحمال المطبقة.
- تحسين الأداء الإنشائي للعمود عند تعرضه للحرائق وغير ذلك.
- ومن أهم وظائف التسليح العرضي العادي (الأساور) في الأعمدة، وهو تسليح غير محسوب يوضع إنشائياً وفق اشتراطات خاصة بها، ما يلي:
- مقاومة تشوهات الخرسانة بالاتجاه العرضي *Transverse Deformations*، وهذا يحدث في جوار الأسوار العادية بشكل أساسي.
- تثبيت القضبان الطولية في مواقعها الشاقولية ومنع تحنيبها إلى الخارج، وفي حال حصول التحنيب، سيكون ذلك بين الأساور العادية.
- امتصاص إجهادات الشد الفالقة *Splitting Stresses* نتيجة تأثير الأحمال الضاغطة وغير ذلك (حيث يمكن أن تتشكل تشققات طولية في هذه الحالة).
- يحدد الحمل المسموح به في المقطع المعرض للضغط البسيط ذي الأساور العرضية العادية) بالنسبة للأعضاء المضغوطة القصيرة) N_r (التسليح والأبعاد مفروضة) بالعلاقات التالية، الشكل (5-5):

$$N_r = \frac{\bar{\sigma}_c' A_c' + \bar{\sigma}_s' A_s'}{k_e} = \frac{A_c' (\bar{\sigma}_c' + \mu_s' \bar{\sigma}_s')}{k_e} \quad (5-7a)$$

أو العلاقة (وفق الكود العربي السوري [1]):

$$N_r = \frac{0.3f'_c \left(A'_c + 1.17 \frac{f_y}{f'_c} A'_s \right)}{k_e}; \quad (5-7b)$$

حيث: $\bar{\sigma}'_c = 0.3f'_c$ - الإجهاد المسموح به في الخرسانة على الضغط البسيط.

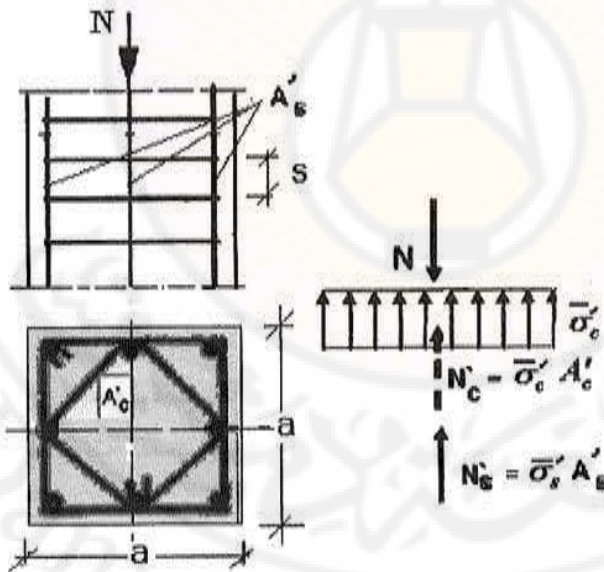
$\bar{\sigma}'_s$ - الإجهاد المسموح به في التسليح على الضغط.

A'_c - مساحة المقطع العرضي للعمود.

A'_s - مساحة المقطع الكلي لقضبان التسليح العاملة.

$\mu'_s = \frac{A'_s}{A'_c}$ - نسبة التسليح الطولي في المقطع العرضي للعمود.

k_e - معامل يأخذ بالحسبان أثر العزوم الناتجة عن تأثير الأحمال الشاقولية وليس الأفقية، وذلك في الأبنية الهيكلية الطابقية ذات البحور (المجازات) المألوفة، بهدف حسابها وفقاً لقواعد الضغط المركزي وليس وفقاً للضغط اللامركزي، الأمر الذي يعود لتقدير المصمم الإنشائي. ويحدد هذا المعامل من الجدول (5-1) وفقاً لنوع العمود وموقعه ضمن الطابق والبناء.



الشكل (5-5) حساب الأعمدة القصيرة المضغوطة مركزياً بتسليح طولي وعرضي عادي

الجدول (1-5) تحديد المعامل k_e .

ركني	طرفي	وسطي	موقع العمود
			الطابق
2.0 ; (1.6)	1.6 ; (1.5)	1.3 ; (1.3)	الأخير
1.7 ; (1.4)	1.4 ; (1.3)	1.1 ; (1.1)	تحت الأخير
1.3 ; (1.2)	1.15 ; (1.1)	1.0 ; (1.0)	باقي الطوابق

ملاحظات على الجدول (1-5):

- 1- لا يدخل أثر المعامل k_e في حساب الأساسات أو الجدران التي تركز عليها الأعمدة في حال وجودها.
- 2- تستخدم الأرقام المبينة داخل الأقواس الصغيرة في الجدول (1-5) في حال كون الأعمدة الطرفية أو الركبية حاملة لبلاطات ظفرية مصممة، أو مصممة مع كمرات، أو مفرغة.
- 3- في الحالات الأخرى التي يتعرض فيها العمود لعزوم انحناء من الأحمال المطبقة، يجب أخذ هذه العزوم بالحسبان بلا مركزية دنيا (بما فيها اللامركزية الطارئة) لا تقل عن 0.1 العمق الكلي للقطاع وحساب الأعمدة كعناصر خاضعة للضغط اللامركزي.

ملاحظة:

عندما يراد تصميم المقطع العرضي لمقاومة حمولة ضاغطة مركزياً (أي تحديد التسليح اللازم مع أبعاد مفروضة للمقطع أو أحد الأبعاد المعلومة وغير ذلك)، يمكن استخدام العلاقات الأساسية أعلاه $(5-7a, b)$ ، مع السعي ما أمكن لتأمين الناحية الاقتصادية وذلك باستخدام نسب تسليح اقتصادية تسمح باستغلال المقاومة الجيدة للخرسانة في الضغط، وعدم الإفراط في استهلاك التسليح عندما تسمح الشروط المعمارية بذلك، طالما أن زيادة التسليح تسبب انخفاضاً في صلابة العمود إضافة لكون التسليح أكثر كلفة من الخرسانة، وعندما تكون أبعاد المقطع العرضي وتسليحه غير معروفة (تصميم كامل)، يمكن عندئذ فرض نسبة اقتصادية لتسليح الضغط العامل

$$\mu'_s = \frac{A'_s}{A_c} \quad (\text{تقع بين النسبة الدنيا والنسبة العظمى كما سيرد لاحقاً})، \text{ وفرض أن } N_p = N$$

ومن ثم حساب المساحة النظرية المطلوبة للمقطع، على أن يجري بعد ذلك اختيار قضبان التسليح الطولي وتوزيعها، وكذلك اختيار أساور التسليح العرضي بالتوافق مع الاشتراطات البعدية الناظمة (سترد لاحقاً).

(C) التسليح بقضبان طولية وتسوير حلزوني *Spirally Reinforced Columns*:

يستخدم التسوير (التطويق) الحلزوني في الأعمدة ذات المقاطع الدائرية أو على شكل مضلع منتظم، وذلك لمنع تحنيط التسليح على طول العمود، وكذلك لزيادة طاقة تحمل العمود بالنسبة لحالة استخدام تسوير عرضي عادي، إذ إن استخدام الأساور الحلزونية (أسورة مستمرة مسقطها الأفقي دائرة) يعني التسوير وفق الاتجاهات الثلاثة، الأمر الذي يعني إدخال عمل المركبة

الشاقولية للتسليح الحلزوني في مقاومة الأحمال الضاغطة، وهذا دعم إضافي للتسليح الشاقولي العامل أصلاً، إضافة لكون التطويق الحلزوني ذا أثر أكبر في مقاومة التشوهات العرضية للخرسانة المضغوطة ويوفر حصراً أكبر لها بفضل الإجهادات الضاغطة المعاكسة (الإجهادات المطوقة *Confining Stresses* التي تعاكس الإجهادات الفالقة)، رافعاً بذلك قدرة تحملها على الضغط. ويكلام آخر، وبعد الوصول إلى السيلان في التسليح تستمر المقاطع المسورة حلزونياً بالتشوه قبل الانهيار بعد سقوط الغطاء الخرساني، بينما تنهار المقاطع المسورة عادياً فجأة. هنا يتم استخدام الفرضيات الأساسية السابقة، يتم تحديد الحمولة القصوى التي يقاومها مقطع العمود الخاضع للضغط المركزي N_r (التسليح والأبعاد مفروضة) بالعلاقة التالية، الشكل (5-6):

$$N_r = \frac{0.3 f'_c \left[A'_k + 1.17 \frac{f_y}{f'_c} A'_s + 3 \frac{f_{yp}}{f'_c} A'_{sp} \right]}{k_e}, \quad (5-8)$$

حيث:

A'_c - مساحة المقطع العرضي الكلي للعمود.

$A'_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$ - مساحة مقطع النواة الداخلية، وهي الجزء المحصور بالتسليح الحلزوني.

f_{yp} - حد الخضوع للإسورة الحلزونية (يمكن أن يختلف عن حد الخضوع لقضبان التسليح الطولي).

A'_{sp} - مساحة المقطع المكافئ للتسليح الحلزوني التي يمكن عدها تسليحاً طولياً عاملاً، وتحدد من العلاقة التالية:

$$A'_{sp} = \frac{\pi d_k a_{sp}}{s}, \quad (5-9)$$

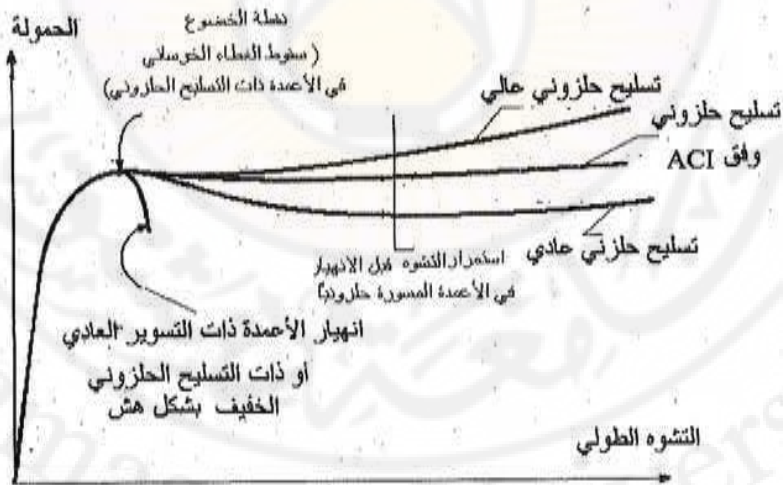
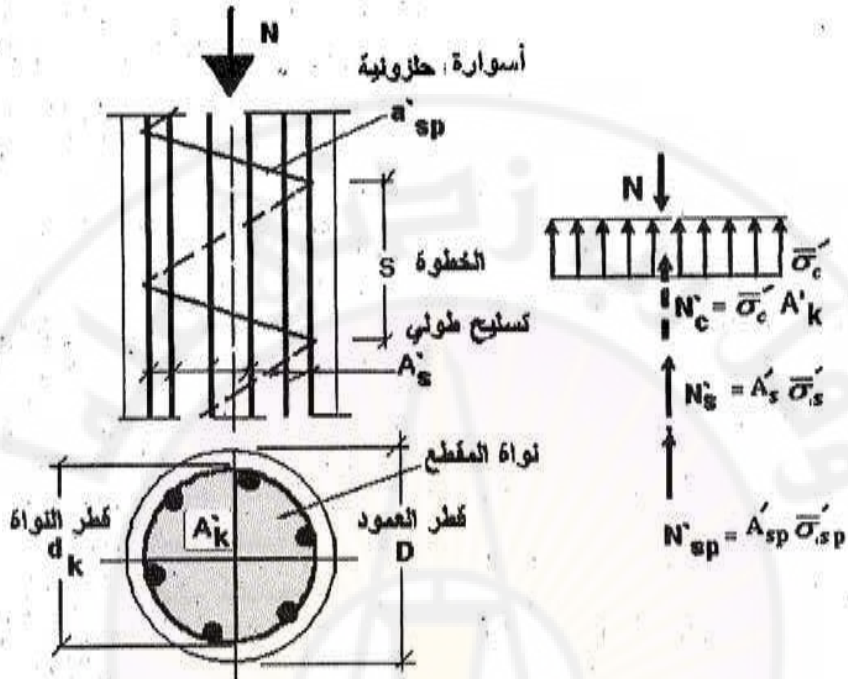
حيث: d_k - قطر النواة،

a_{sp} - مقطع الأسورة الحلزونية.

s - خطوة الإسورة الحلزونية، وأما بقية الرموز فقد ورد شرحها مسبقاً.

ملاحظة: في حالات التصميم الكامل (أبعاد المقطع العرضي للعمود، التسليح الطولي والحلزوني مقادير غير معروفة) يفضل فرض نسب اقتصادية للتسليح، هنا يتم اللجوء لتصغير نسبة التسليح الحلزوني قدر الإمكان لصالح التسليح الطولي، ومن ثم تحديد مساحة مقطع النواة الداخلية بالعلاقة:

$$A'_k = \frac{N k_e}{0.3 f'_c \left(1 + 1.17 \mu'_{sk} \frac{f_y}{f'_c} + 3 \mu'_{sp} \frac{f_{yp}}{f'_c} \right)} \quad (5-10)$$



الشكل (5-6) حساب الأعمدة القصيرة المضغوطة مركزياً بتسليح طولی وعرضی حلزوني.

حيث:

$$\mu'_{sk} = \frac{A'_s}{A'_k} - \text{نسبة التسليح الطولي في نواة المقطع.}$$

$$\mu'_{sp} = \frac{A'_{sp}}{A'_k} - \text{النسبة المكافئة للتسليح الحلزوني في نواة المقطع. وأما بقية الرموز فقد ورد$$

شرحها مسبقاً.

5-2-1-2-2- الحساب وفق طريقة حد المقاومة القصوى:

(A) الفرضيات الأساسية *Basic Assumptions*:

تستند هذه الفرضيات إلى المبادئ الأساسية للحساب وفق طريقة حالة حد المقاومة

القصوى، أي:

أ- تحدد الحمولة الضاغطة الحسابية N_{II} وفق العلاقة:

$$N_{II} = 1.5G + 1.8P; \quad (5-11)$$

حيث: G - الحمولة الميتة المطبقة (الدائمة) *Dead Load (DL)*.

P - الحمولة الحية المطبقة *Live Load (LL)*، وتؤخذ من الكود وفقاً لطبيعة المنشأ

الذي يوجد فيه العمود.

ب- تؤخذ الإجهادات والتشوهات بشكل منتظم، حيث تبلغ قيمة التشوه الأعظمي في الخرسانة

نتيجة الضغط $\epsilon'_{cu} = 0.003$ وهذا يترافق مع قيمة عظمى لإجهادات الضغط قدرها $0.85 f'_c$.

ج- تعدّ قيمة الإجهاد الأقصى في التسليح مساوية حد الخضوع f_y .

(B) التسليح بقضبان طولية وأساور عرضية عادية

Reinforcing with Longitudinal Bars and Usual Stirrups:

يستخدم هذا التسليح عادة في الأعمدة ذات المقاطع المربعة أو المستطيلة والأكثر تعقيداً،

ويمكن استخدامه أحياناً في الأعمدة ذات المقطع الدائري أو متعدد الأضلاع المنتظم، إذ تكون

الأساور منفصلة ومتوضعة على تباعد معين وعمودية على التسليح الطولي العامل.

بالنسبة لوظائف التسليح الطولي (العامل أو الشاقولي)، والتسليح العرضي العادي (الأساور) فقد

وردت سابقاً.

يتم تحديد الحمولة القصوى التي يقاومها مقطع العمود الخاضع للضغط المركزي N_{ur} (التسليح والأبعاد مفروضة) بالعلاقة التالية، الشكل (5-7):

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.8 \times [0.85 f'_c A'_c + A'_s f_y]}{k_e}; \quad (5-12)$$

حيث:

Ω - معامل تخفيض المقاومة وبساوي 0.7 (هذا المعامل من أجل أخذ مستوى المطاوعة في عملية الانهيار وغير ذلك، ويؤخذ بقيمة متدنية من أجل الانهيار على الضغط في الخرسانة ، كما هو الحال في الأعمدة القصيرة).

A'_c - مساحة المقطع العرضي للعمود.

A'_s - مساحة المقطع الكلي لقضبان التسليح العاملة.

0.8 - معامل تخفيض يأخذ بالحسبان وجود لامركزية طارئة نتيجة التنفيذ وتشوهات العناصر والأخطاء في الاستناد وغير ذلك عند تطبيق الأحمال الضاغطة، وبقيمة لا تزيد على 25mm أو 0.08 من بعد المقطع بالاتجاه المدروس.

k_e - معامل يأخذ بالحسبان أثر العزوم الناتجة عن تأثير الأحمال الشاقولية وليس الأفقية، وذلك في الأبنية الهيكلية الطابقية ذات البحور (المجازات) المألوفة، بهدف حسابها وفقاً لقواعد الضغط المركزي، وليس وفقاً للضغط اللامركزي، الأمر الذي يعود لتقدير المصمم الإنشائي. ويحدد هذا المعامل من الجدول (5-1) وفقاً لنوع العمود وموقعه ضمن الطابق والبناء كما ورد سابقاً.

ملاحظة:

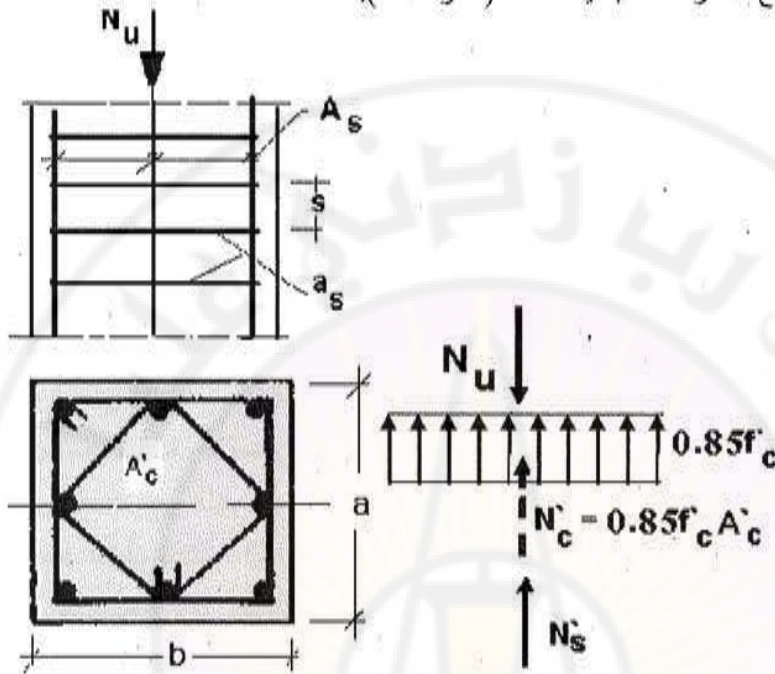
عندما يراد تصميم المقطع العرضي لمقاومة حمولة ضاغطة مركزياً (أي تحديد التسليح اللازم مع أبعاد مفروضة للمقطع أو أحد الأبعاد المعلومة وغير ذلك)، يمكن استخدام العلاقة الأساسية أعلاه (6-12)، مع السعي ما أمكن لتأمين الناحية الاقتصادية، وذلك باستخدام نسب تسليح اقتصادية تسمح باستغلال المقاومة الجيدة للخرسانة في الضغط، وعدم الإفراط في استهلاك التسليح عندما تسمح الشروط المعمارية بذلك، طالما أن زيادة التسليح تسبب انخفاضاً في صلابة العمود إضافة لكون التسليح أكثر كلفة من الخرسانة، وعندما تكون أبعاد المقطع العرضي وتسليحه غير معروفة (تصميم كامل)، يمكن عندئذ فرض نسبة

اقتصادية لتسليح الضغط العامل $\mu'_s = \frac{A'_s}{A'_c}$ (تقع بين النسبة الدنيا والنسبة العظمى كما سيرد لاحقاً)،

وفرض أن $N_{ur} = N_u$ ، ومن ثم حساب المساحة النظرية للمقطع بالعلاقة:

$$A'_c = \frac{N_u k e}{\Omega \times 0.8 \times (0.85 f'_c + \mu'_s f_y)} \quad (5-13)$$

على أن يجري بعد ذلك اختبار قضبان التسليح الطولي وتوزيعها، وكذلك اختبار أساور التسليح العرضي بالتوافق مع الاشتراطات البعدية النازمة (سترد لاحقاً).



الشكل (5-7) حساب الأعمدة القصيرة المضغوطة مركزياً بتسليح طولي وعرضي عادي.

(C) التسليح بقضبان طولية وتسوير حلزوني

: Reinforcing with Longitudinal Bars and Spiral Confinement

كما ورد سابقاً، يستخدم التسوير (التطويق) الحلزوني في الأعمدة ذات المقاطع الدائرية أو على شكل مضلع منتظم، وذلك لمنع تحنيط التسليح على طول العمود، وكذلك لزيادة طاقة تحمل العمود بالنسبة لحالة استخدام تسوير عرضي عادي، إذ إن استخدام الأساور الحلزونية (أسورة مستمرة مسقطها الأفقي دائرة) يعني التسوير وفق الاتجاهات الثلاثة، الأمر الذي يعني إدخال عمل المركبة الشاقولية للتسليح الحلزوني في مقاومة الأحمال الضاغطة، وهذا دعم إضافي للتسليح الشاقولي العامل أصلاً، إضافة لكون التطويق الحلزوني ذا أثر أكبر في مقاومة التشوهات العرضية للخرسانة المضغوطة ويوفر حصراً أكبر لها بفضل الإجهادات الضاغطة

المعاكسة (الإجهادات المطوقة *Confining Stresses* التي تعاكس الإجهادات الفالقة)، رافعاً بذلك قدرة تحملها على الضغط. ويكلام آخر، وبعد الوصول إلى السيلائن في التسليح تستمر المقاطع المسورة حلزونياً بالتشوّه قبل الانهيار بعد سقوط الغطاء الخرساني، بينما تنهار المقاطع المسورة عادياً فجأة. هنا يتم استخدام الفرضيات الأساسية السابقة لهذه الطريقة، ويتم تحديد الحمولة القصوى التي يقاومها مقطع العمود الخاضع للضغط المركزي N_{ur} (التسليح والأبعاد مفروضة) بالعلاقة التالية، الشكل (5-8):

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.85 \times [0.85 f'_c A'_k + A'_s f_y + 2.5 A'_{sp} f_{yp}]}{k_e}; \quad (5-14)$$

حيث:

0.85 - معامل تخفيض يأخذ بالحسبان وجود لامركزية طارئة نتيجة التنفيذ وتشوهات العناصر والأخطاء في الاستناد وغير ذلك عند تطبيق الأحمال الضاغطة ، وقيمة لا تزيد علي 25mm أو 0.08 من بعد المقطع بالاتجاه المدروس.

$$A'_k = \frac{\pi d_k^2}{4} - \text{مساحة مقطع النواة الداخلية، وهي الجزء المحصور بالتسليح الحلزوني.}$$

A'_c - مساحة المقطع العرضي الكلي للعمود.

f_{yp} - حد الخضوع للإسورة الحلزونية (يمكن أن يختلف عن حد الخضوع لقضبان التسليح الطولي).

A'_{sp} - مساحة المقطع المكافئ للتسليح الحلزوني التي يمكن عدها تسليحاً طويلاً عاملاً، ونحدد من العلاقة التالية:

$$A'_{sp} = \frac{\pi d_k a_{sp}}{s}; \quad (5-15)$$

حيث: d_k - قطر النواة، a_{sp} - مقطع الإسورة الحلزونية، s - خطوة الإسورة الحلزونية. وأما بقية الرموز فقد ورد شرحها مسبقاً.

ملاحظة:

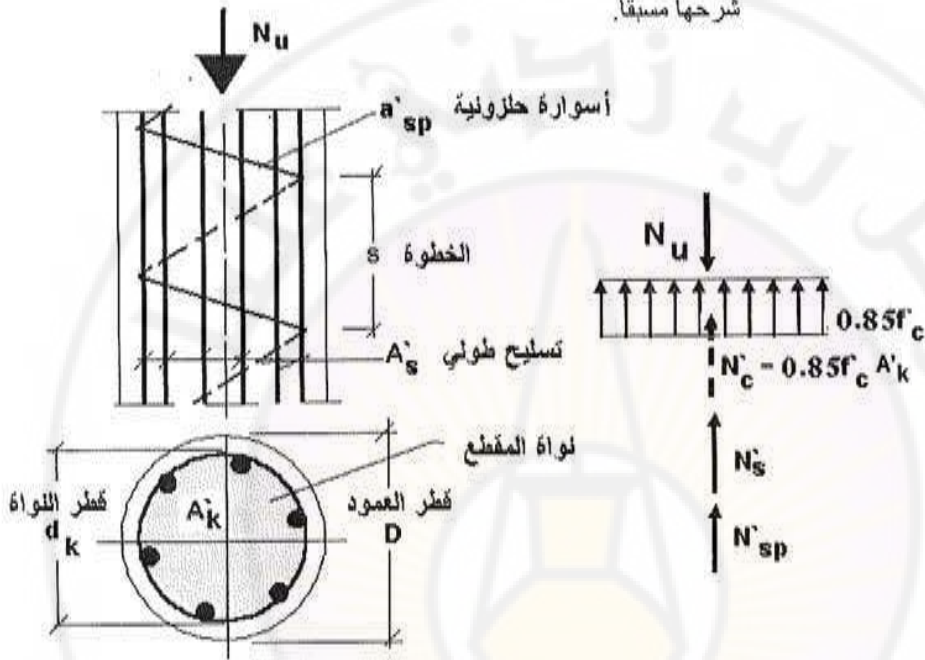
في حالات التصميم الكامل (أبعاد المقطع العرضي للعمود، التسليح الطولي والحلزوني مقادير غير معروفة) يفضل فرض نسب اقتصادية للتسليح، هنا يتم اللجوء لتصغير نسبة التسليح الحلزوني قدر الإمكان لصالح التسليح الطولي، ومن ثم تحديد مساحة مقطع النواة الداخلية بالعلاقة:

$$A'_k = \frac{N_u k_e}{\Omega \times 0.85 \times (0.85 f'_c + \mu'_k f_y + 2.5 \mu'_{sp} f_{yp})} \quad (5-16)$$

حيث: $\mu'_{sk} = \frac{A'_s}{A'_k}$ - نسبة التسليح الطولي في نواة المقطع،

$\mu'_{sp} = \frac{A'_{sp}}{A'_k}$ - النسبة المكافئة للتسليح الحلزوني في نواة المقطع. وأما بقية الرموز فقد ورد

شرحها مسبقاً.



الشكل (8-5) حساب الأعمدة القصيرة المضغوطة مركزياً بتسليح طولي وعرضي حلزوني.

3-1-2-5- اشتراطات الأبعاد والتسليح

:Dimensions and Reinforcement Conditions

فيما يلي أهم الاشتراطات التي يجب تحقيقها بالنسبة لأبعاد الأعمدة وبالنسبة لمواصفات التسليح المختار وتوزيعه.

• الاشتراطات البعدية :Dimensional Conditions

يجب الأخذ بالحسبان عوامل المتانة ومقاومة الحريق والوسط المحيط وغير ذلك عند تصميم أبعاد المقاطع العرضية في الضغط واختيارها. ويجب أن يتحقق ما يلي:

- لا يقل أصغر بعد لكل عمود مستطيل المقطع عن $250mm$ ، ولا تقل مساحته عن $0.09m^2$.

- لا يقل قطر كل عمود دائري عن $350mm$.

- يستثنى مما سبق أعلاه الأعمدة غير الحاملة والأعمدة ذات الطبيعة المعمارية التزيينية (كاسرات الشمس الشاقولية)، على ألا يزيد الحمل الحدي المطبق عليها على نصف قدرة تحملها القصوى في الضغط، وبعد أخذ أثر التحنيط بالحسبان إن وجد.

• اشتراطات التسليح الطولي:

- تساوي مساحات التسليح العظمى للأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي أينما كان موقعها 2.5% من مساحة المقطع العرضي (مع إمكانية زيادتها إلى الضعف في أعمدة المنشآت الواقعة في المنطقتين الزلزاليتين 1 و 2 في الخارطة الزلزالية وفقاً للكود [1].

- تساوي مساحات التسليح الدنيا للأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي أينما كان موقعها 1% من مساحة المقطع العرضي النظري A'_{cr} .

- يجب ألا تقل مساحة التسليح الدنيا المستخدمة في الأعمدة المذكورة أعلاه عن 0.6% من مساحة المقطع العرضي الفعلي المستخدم A'_c بغض النظر عن موقع العمود.

- يمكن زيادة قدرة تحمل العمود عند الضرورة باستخدام التطويق المعدني أو باستعمال مقاطع الحديد البروفيلي القاسي.

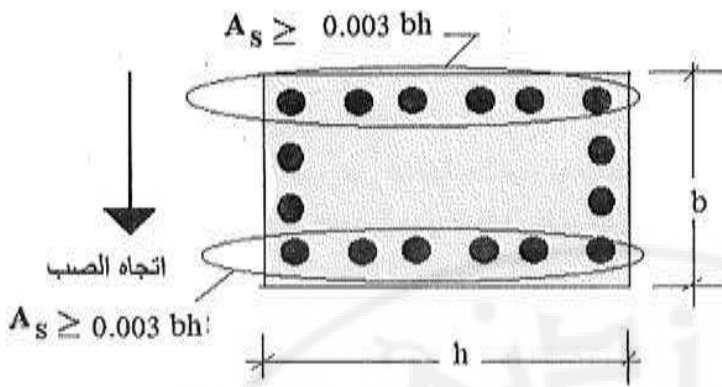
- لا يقل قطر قضبان التسليح الدائرية عن $12mm$.

- لا يقل عدد قضبان التسليح الطولي في الأعمدة المضلعة عن قضيب واحد في كل زاوية، وفي الأعمدة ذات المقطع الدائري لا يقل هذا العدد عن 6 قضبان.

- لا يزيد التباعد بين قضبان التسليح الطولي المتجاورة عن $300mm$ أو أصغر بعد للمقطع العرضي أيهما أصغر. ولا تقل هذه المسافة عن $50mm$ عندما يكون الصب باتجاه القضبان الطولية، وفي حال كون الصب عمودي على اتجاه هذه القضبان، تراعى المسافات المنوه عنها بالنسبة للجوائز.

- يجب ألا تقل مساحة التسليح الموجودة في كل من طرفي القطاع بالاتجاه المعرض للتحنيط عن 0.3% من المساحة الكلية للقطاع، وذلك في الأعمدة المربعة والمستطيلة التي تحقق نسبة نحافتها المتراجحة $\lambda \geq 40$ ، الشكل (5-9).

- في جميع الأحوال يجب ألا تزيد مساحة التسليح الطولي في منطقة اتصال عمودين متتاليين على $0.06 A'_c$.



الشكل (5-9) مساحة التسليح الدنيا في مقاطع الأعمدة المربعة والمستطيلة عندما $\lambda \geq 40$.
(الأساور غير مبيبة في الشكل)

• اشتراطات التسليح العرضي:

(أ) الأعمدة غير المطوقة بأساور حلزونية (أساور عادية):

- يتم وضع أساور التسليح العرضي العادي في الأعمدة مستطيلة أو مربعة المقطع بحيث يربط كل قضيب طولي بفرعي إسوارة لا تزيد الزاوية بينهما على 135 درجة، إلا إذا كان التباعد بين قضبان التسليح الطولي أقل من 150mm ، إذ يمكن في هذه الحالة الاكتفاء بتحقيق هذا الشرط على قضبان الزوايا ومن ثم القضبان الوسطية بالتناوب، الشكل (5-10).
- في الأعمدة دائرية المقطع العرضي يتم استخدام أساور حلقيّة على شكل دائرة مغلقة مع تأمين طول التماسك اللازم.

- لا يقل القطر المستخدم في الأساور عن $\frac{1}{3}$ أكبر قطر لقضبان التسليح الطولي المربوط بها أو 6mm أيهما أكبر، ولا يزيد على 12mm ، ويمكن زيادة الحد الأدنى إلى 8mm إذا زادت مساحة مقطع العمود على 0.25m^2 .

- لا يقل تباعد الأساور عن 10cm ، ولا يزيد على 15 مرة أصغر قطر قضيب تسليح مربوط بالإسوارة، ولا يزيد على أصغر بعد للعمود ولا على 300mm .

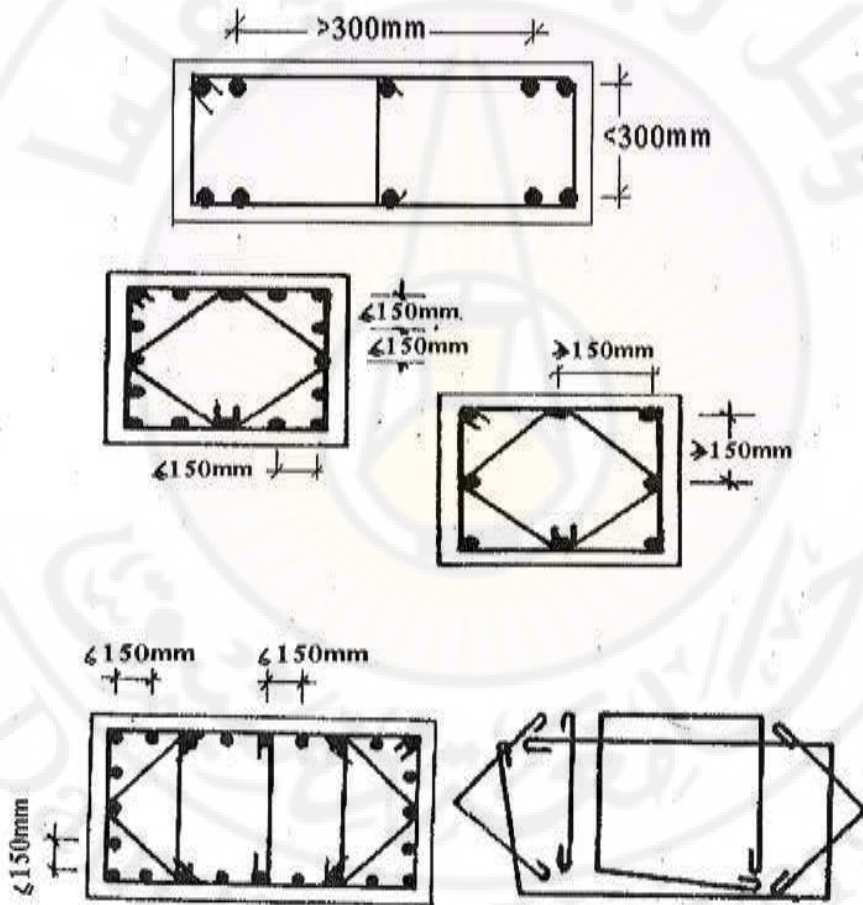
- يتم تكثيف الأساور في مناطق وصل قضبان التسليح في العقد الإطارية بحيث يتضاعف عدد الأساور في هذه مناطق التراكب على مسافة لا تقل عن 50 مرة قطر أكبر القضبان المترابطة، وتراعى هنا طريقة تنفيذ القضبان في حال تساوي مقاطع الأعمدة أو عدم تساويها فوق وتحت

العقدة الإطارية، مع عدم تنفيذ وصلات الأساور على خط شاقولي واحد، وتكثف الأساور في حالة عمود منفرّد، وفي حالة الأعمدة المخفية لجدران القص أيضاً، ويمكن العودة إلى الكود [1] من أجل التفاصيل.

- في المناطق الزلزالية 3 و 4، يجب ألا تقل مساحة التسليح العرضي المستخدم (الأساور والشناكل) في جميع أشكال مقاطع الأعمدة، كما هو الحال في الكمرات، عن:

$$A_{st\ min} = n a_{st} = \frac{0.35 b s \text{ (or } d s \text{)}}{f_y}$$

و n - عدد فروع الأساور المستخدمة في مستوي واحد.



الشكل (5-10-1) تركيب أساور التسليح العرضي العادي في مقاطع الأعمدة المربعة والمستطيلة.

(ب) الأعمدة المطوقة بأساور حلزونية:

- لا يقل قطر الأسوار الحلزونية في الأعمدة التي يتم إدخال أثر هذا التطويق العرضي في حساب قدرة تحملها للقوى الضاغطة عن $8mm$.

- لا تزيد خطوة الأسوار الحلزونية المستخدمة *Spiral Step* على $8cm$ أو $\frac{d_k}{5}$ أيهما أقل، ولا تقل عن $4cm$.

- يجب الاحتفاظ بالخطوة ثابتة، على أن تتم وصلات الحلزون عن طريق تراكب قدره 1.5 لفة على الأقل.

لا نقل المساحة المكافئة لتسليح التسوير الحلزوني عن:

$$A'_{spmin} = 0.45 \left(\frac{A'_c}{A'_k} - 1 \right) \times \frac{f'_c A'_k}{f_{yp}}; \quad (5-17)$$

حيث ورد شرح الرموز مسبقاً.

- لا تزيد المساحة المكافئة لتسليح التسوير الحلزوني على العلاقة التالية:

$$A'_{spmax} = 0.34 A'_k \left[\left(\frac{1.412 A'_c}{A'_k} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yp}} + \frac{0.184 A'_s f_y}{A'_k f_{yp}} \right]; \quad (5-18)$$

تمثل العلاقة (5-18) شرط عدم سقوط الغطاء الخرساني للتسليح، وهي مستنتجة من الشرط

التالي:

يجب ألا تزيد القوة الضاغطة القصوى التي يتحملها المقطع باستخدام تسليح حلزوني على 1.5 مرة القوة القصوى التي يتحملها المقطع نفسه باستخدام التسليح الطولي نفسه، ولكن باستخدام تسليح عرضي عادي.

- إذا تبين نتيجة الحساب ضرورة استخدام تسليح عرضي حلزوني تزيد مساحته على القيمة العظمى A'_{spmax} ، وجب تعديل التصميم بزيادة التسليح الطولي، أو أبعاد المقطع الخرساني أو كليهما معاً بحيث يتحقق الشرط $A'_{sp} \leq A'_{spmax}$ أو تطويق المقطع معدنياً أو استخدام مقاطع معدنية بروفيلية داخل مقطع العمود وغير ذلك من الإجراءات. ويجب ألا تزيد نسبة التسليح العرضي الحلزوني على نسبة التسليح الطولي في كل الأحوال.



الشكل (5-10-ب) هيكل تسليح
عمود مستطيل.

5-3- أمثلة حسابية توضيحية Illustrative Calculated Examples

(أ) أمثلة محلولة:

مثال (1):

باستخدام طريقة الإجهادات المسموح بها ، يطلب التحقق من سلامة عمود طرفي طوله الفعال على التثبيت $3.25m$ وواقع في طابق متكرر لمبنى هيكل عادي متعدد الطوابق تحت تأثير حمولة ناظرية مركزية كلية قدرها $1000kN$ (دون أخذ عزوم الانحناء بالحساب)، علماً أن مقطع العمود العرضي مستطيل مساحته $30 \times 60cm^2$ وهو مسلح بقضبان طولية $8\phi 18$ وتسليح عرضي عادي، ويفرض أن $f'_c = 18MPa$; $f_y = 240MPa$.

ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة حد المقاومة القصوى للمقارنة.

الحل:

- التأكد من كون العمود قصير (المقطع العرضي مستطيل): يعدّ العمود قصيراً لأن:

$$\frac{l_o}{a} = \frac{325}{30} < 12; \quad \frac{l_o}{b} = \frac{325}{60} < 12$$

- الحمولة الناظرية المسموح بها (بتسليح عرضي عادي):

$$N_r = \frac{0.3 f'_c \left[A'_c + 1.17 A'_s \frac{f_y}{f'_c} \right]}{k_e} = \frac{0.3 \times 18 \times \left[0.18 + 1.17 \times 20.9 \times 10^{-4} \times \frac{240}{18} \right]}{1.15} > 1.0 \text{ MN}$$

هذا يعني أن سلامة العمود محققة (كان بالإمكان التأكد من أن الإجهادات في الخرسانة وفي التسليح لا تتجاوز الإجهادات المسموح بها - بترك التأكد من ذلك للطالب).

مثال (2):

باستخدام طريقة حد المقاومة القصوى ، يطلب التحقق من سلامة عمود وسطي قصير واقع في طابق متكرر لمبنى هيكلي متعدد الطوابق وفق قواعد الضغط المركزي (دون أخذ عزوم الانحناء بالحساب) نتيجة تأثير حمولة ميتة قدرها 1000 kN وحمولة حية قدرها 300 kN ، علماً أن مقطع العمود العرضي مستطيل مساحته $30 \times 60 \text{ cm}^2$ وهو مسلح بقضبان طولية $12\phi 20$ وتسليح عرضي عادي، ويفرض أن $f'_c = 20 \text{ MPa}$ و $f_y = 240 \text{ MPa}$.
ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة الإجهادات المسموح بها للمقارنة.

الحل:

- الحمولة الحسابية المطبقة:

$$N_u = 1.5G + 1.8P = 1.5 \times 1 + 1.8 \times 0.3 = 2.04 \text{ MN}$$

- الحمولة القصوى التي يقاومها العمود (بتسليح عرضي عادي):

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.8 \times \left[0.85 f'_c A'_c + A'_s f_y \right]}{k_e} = \frac{0.7 \times 0.8 \times \left[0.85 \times 20 \times 0.18 + 37.7 \times 10^{-4} \times 240 \right]}{1} = 2.22 \text{ MN}$$

وبملاحظة أن $N_u < N_{ur}$ ينتج أن سلامة العمود مضمونة.

مثال (3):

يطلب تحديد التسليح المطلوب واختيار مواصفاته وفق طريقة حد المقاومة القصوى لعمود وسطي قصير واقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكلي متعدد الطوابق وفق قواعد الضغط المركزي (دون أخذ عزوم الانحناء بالحسبان)، علماً أن مقطعه العرضي مربع طول ضلعه 300mm ويتعرض لضغط ناجم عن حمل ميت قدره 50kN وحمل حي قدره 200kN ، ويفرض أن $f'_c = 20\text{MPa}$; $f_y = 240\text{MPa}$.

ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة الإجهادات المسموح بها للمقارنة.

الحل:

- الحمولة الحسابية المطبقة:

$$N_u = 1.5G + 1.8P = 1.5 \times 0.35 + 1.8 \times 0.2 = 0.885\text{MN}$$

بفرض أن $N_u = N_{ur}$ ، وباستخدام نسبة التسليح الطولي $\mu'_s = \frac{A'_s}{A'_c}$ ينتج:

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.8 A'_c [0.85 f'_c + \mu'_s f_y]}{k_e}$$

إي إن:

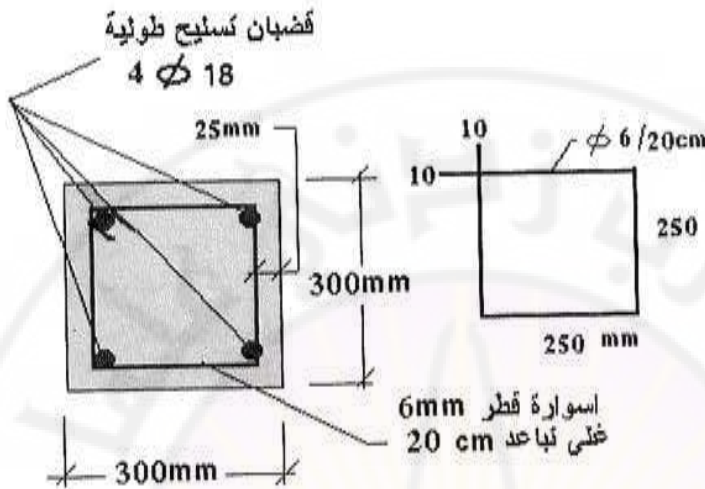
$$0.885 = \frac{0.7 \times 0.8 \times 0.09 \times [0.85 \times 20 + \mu'_s \times 240]}{1} \Rightarrow \mu'_s = 0.00233$$

وهذا يعطي مساحة تسليح أقل من $0.006 A'_c$ ، حيث A'_c مساحة المقطع الفعلي المستخدم للعمود، ويفرض أن: $\mu'_s = \mu'_s \text{ min} = 0.01$ ، تحسب المساحة النظرية للمقطع المطلوب A'_{cr} ، أي:

$$0.885 = \frac{0.7 \times 0.8 A'_{cr} [0.85 \times 20 + 0.01 \times 240]}{1} \Rightarrow A'_{cr} = 0.0815\text{m}^2$$

ولأن مساحة التسليح الدنيا التي يمكن استخدامها لهذا المقطع، يجب ألا تقل عن 0.01 من مساحة المقطع النظري A'_{cr} ، يكون $A'_s = 0.01 A'_{cr} = 8.15 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ، ولا عن 0.006 من المقطع الفعلي للعمود، أي $A'_s = 0.006 A'_c = 0.006 \times 0.09 = 5.4 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ، يجب استخدام المساحة الأكبر، أي $A'_s = 8.15 \times 10^{-4}\text{m}^2 = 8.15\text{cm}^2$. يسمح ذلك باستخدام أربعة قضبان قطر 18mm ، ويجري توزيع قضبان التسليح الطولي في المقطع العرضي وتسويرها بأساور عادية تحقق الاشتراطات المعمول بها كما في الشكل (2-11)،

حيث لا يقل قطر الإسوارة عن 6mm ولا عن ثلث أكبر قطر مربوط بها أيهما أكبر ولا يزيد على 12mm، كما لا يقل تباعد الأساور عن 10mm، ولا يزيد على 15 مرة أصغر قطر قضيب تسليح مربوط بالإسوارة، ولا يزيد على أصغر بعد للعمود ولا على 300mm.



الشكل (11-5) المقطع العرضي للعمود المدروس في المثال المحلول (3) مع تسليحه.

ملاحظة: في حالة التصميم الكامل، يمكن فرض أحد المعطيات الضرورية كنسبة التسليح أو أبعاد المقطع ومتابعة الحل، بحيث يكون عدد المجاهيل يتوافق مع عدد علاقات التوازن التصميمية اللازمة.

مثال (4): (يطلب إعادة الحل وفق طريقة حد المقاومة القصوى للمقارنة)

باستخدام طريقة الإجهادات المسموح بها، يطلب تحديد التسليح المطلوب واختيار مواصفاته لعسود قصير وفق قواعد الضغط المركزي (دون أخذ عزوم الانحناء بالحسبان)، علماً أنه يتعرض لتأثير أحمال ضاغطة: حمل ميت قدره 1.5MN وحمل حي قدره 1.0MN، ويفرض أن التسليح العرضي المستخدم على شكل أساور عادية، وأن $f_c' = 18MPa$; $f_y = 240MPa$.

الحل:

من الواضح هنا عدم وجود قيود معمارية على أبعاد المقطع وشكله، أي إن التصميم هنا كامل، كما أنه لا ضرورة لاستخدام المعامل k_c . ولأن عدد المجاهيل هنا اثنان: التسليح الطولي وأبعاد المقطع الخرساني، بينما يوجد علاقة تصميم واحدة، لا بد من فرض قيمة أحد المجاهولين)

في هذا المثال يتم فرض نسبة التسليح الطولي ، ثم تحدد مساحة المقطع الخرساني ومتابعة (الحل).

- يفرض أن: $\mu'_s = 1\%$.

$$N = G + P = 2.5 MN$$

- الحمولة المطبقة:

- الحمولة المسموح به (باستخدام التسليح العرضي العادي):

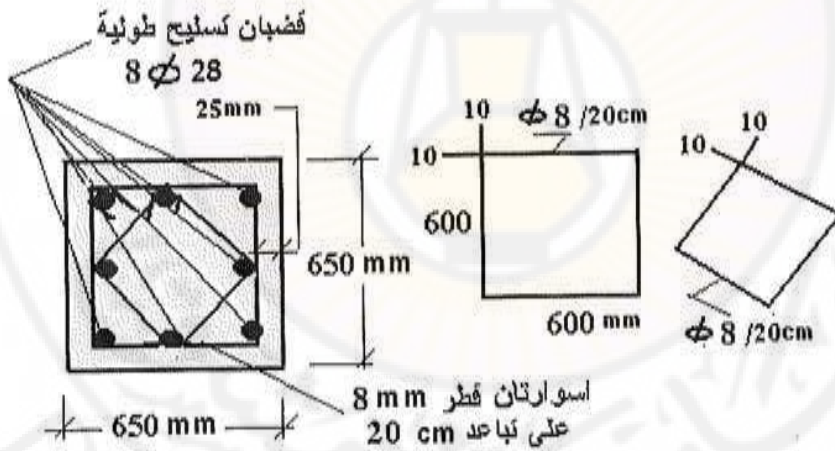
$$N_r = 0.3 f'_c A'_{cr} \left[1 + 1.17 \mu'_s \frac{f_y}{f'_c} \right] = 0.3 \times 18 \times A'_{cr} \times$$

$$\times \left[1 + 1.17 \times 0.01 \times \frac{240}{18} \right] \Rightarrow A'_{cr} = 0.40049 m^2 = 4004.9 cm^2.$$

حيث: A'_{cr} - مساحة المقطع النظري (الحسابي).

- المقطع المختار للعمود وتسليحه:

يبين الشكل (5-12) المقطع العرضي للعمود مع مواصفات التسليح المختارة (على الطالب أن يتأكد من تحقيق المقطع ومواصفات التسليح الطولي والعرضي المختارة للاشتراطات المعمول بها).



الشكل (5-12) المقطع العرضي للعمود المدروس في المثال المحلول (4) مع تسليحه.

مثال (5):

باستخدام طريقة حد المقاومة القصوى، يطلب تحديد التسليح المطلوب واختيار مواصفاته وفق قواعد الضغط المركزي (دون أخذ عزوم الانحناء بالحسبان) لعمود وسطي قصير واقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكلي متعدد الطوابق، علماً أنه يتعرض لتأثير أحمال ضاغطة: حمل ميت قدره $1.5MN$ وحمل حي قدره $500kN$ ، ويفرض أن التسليح العرضي المستخدم على شكل إسورة حلزونية وأن $f'_c = 20MPa$; $f_y = f_{yp} = 240MPa$.

الحل:

من الواضح هنا عدم وجود قيود معمارية على أبعاد المقطع وشكله، أي إن التصميم هنا كامل. ولأن عدد المجاهيل هنا ثلاثة: التسليح الطولي، التسليح الحلزوني وأبعاد المقطع الخرساني، بينما يوجد علاقة تصميم واحدة، لا بد من فرض مجهولين (في هذا المثال يتم فرض نسب التسليح الطولي والحلزوني، ثم إيجاد مساحة المقطع الخرساني ومتابعة الحل). عند افتراض نسب التسليح المستخدمة، يفضل اللجوء إلى نسب اقتصادية، مع ضرورة الاتجاه نحو زيادة نسبة التسليح الطولي، وهو التسليح الأكثر فعالية في مقاومة الأحمال الضاغطة النظامية مقارنة مع التسليح الحلزوني الذي لا يأخذ الاتجاه نفسه بالنسبة للإجهادات الضاغطة، وتقتصر فعاليته على المركبة الشاقولية.

- يفرض أن: $\mu'_{sp} = 1\%$; $\mu'_s = 2\%$

- الحمولة الحسابية المطبقة: $N_{II} = 1.5G + 1.8P = 3.15MN$

- الحمولة الحديدية القصوى (باستخدام التسليح الحلزوني):

$$N_{III} = \frac{\Omega \times 0.85 A'_k [0.85 f'_c + \mu'_s f_y + 2.5 \mu'_{sp} f_{yp}]}{k_e}$$

أي إن:

$$3.15 = \frac{0.7 \times 0.85 A'_k [0.85 \times 20 + 0.02 \times 240 + 2.5 \times 0.01 \times 240]}{1} \Rightarrow$$

$A'_{kR} = 0.1904m^2$ ، وهذا هو المقطع النظري لنواة المقطع، ولأن المقطع دائري الشكل، يكون

القطر النظري للنواة مساوياً: $d_{kR} = \sqrt{\frac{4A'_k}{\pi}} = 0.493m$. وكتقطر فعلي للنواة يؤخذ

$d_k = 0.5m$ ، والقطر الفعلي للمقطع $D = 0.55m$ ، أي إن:

$$A'_c = 0.238m^2 \text{ و } A'_k = 0.196m^2$$

$$A'_s = \mu'_s A'_k = 38 \text{ cm}^2$$

- مساحة مقطع التسليح الطولي:

$$A'_{sp} = \mu'_{sp} A'_k = 19 \text{ cm}^2$$

- مساحة المقطع المكافئ للتسليح الحلزوني:

- اختيار مواصفات التسليح الطولي والحلزوني:

بافتراض خطوة الأسورة الحلزونية $s = 5 \text{ cm}$ ، ينتج:

$$a_{sp} = \frac{A'_{sp} s}{\pi d_k} = \frac{19 \times 5}{3.14 \times 50} = 0.6 \text{ cm}^2$$

يمكن هنا اختيار قطر الإسورة الحلزونية مساوياً 10 mm ، أي $a_{sp} = 0.78 \text{ cm}^2$ ، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة الخطوة التي يفضل إبقاؤها كما هي لجانب الأمان. وكتسليح

طولي يمكن استخدام $10\phi 22$ بمساحة قدرها 41.31 cm^2 ، ويجب توزيع هذه القضبان توزيعاً منتظماً على محيط النواة.

- التحقق من صحة الاختيار، الشكل (5-13):

(أ) الخطوة المختارة $s = 5 \text{ cm}$ أقل من 8 cm وأقل من $10 \text{ cm} = \frac{d_k}{5}$ وأكبر من 4 cm ، والاختيار مقبول.

(ب) التحقق من النسبة الدنيا والعظمى للتسليح الطولي والحلزوني:

بالنسبة للتسليح الطولي فهي بين النسبة الدنيا والعظمى حسب الفرض. وبالنسبة للتسليح الحلزوني من الواضح أن:

$$A'_{sp} = \frac{\pi a_{sp} d_k}{s} = \frac{3.14 \times 0.78 \times 50}{5} = 24.5 \text{ cm}^2$$

$$A'_{sp \min} = 0.45 \left(\frac{A'_c}{A'_k} - 1 \right) \times \frac{f'_c A'_k}{f_{yp}} = 0.45 \times \left(\frac{0.238}{0.196} - 1 \right) \times \frac{20 \times 0.196}{240} = 15.4 \times 10^{-4} = 15.4 \text{ cm}^2;$$

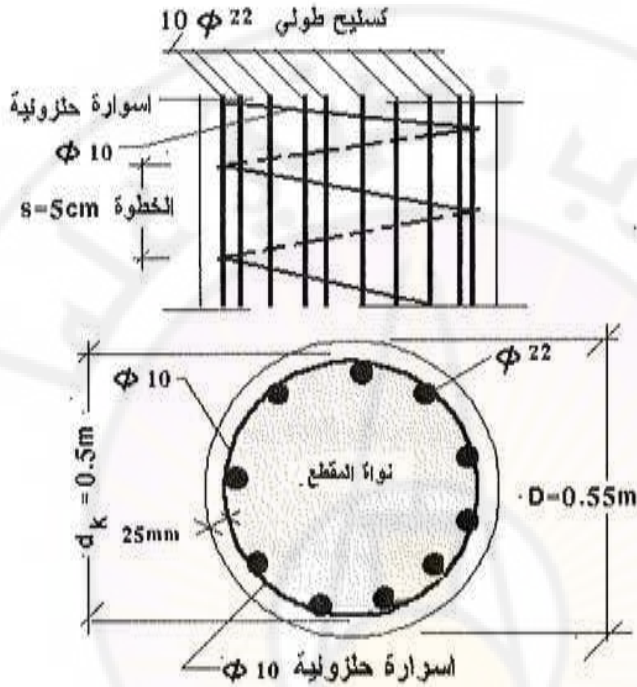
أي إن الاختيار مناسب. وبالنسبة لشرط عدم انهيار الغطاء الخرساني للتسليح نتيجة زيادة الإجهادات الفالقة، أي عدم تجاوز نسبة التسليح الحلزوني المستخدم القيمة العظمى، فيمكن التأكد من ذلك بحساب نسبة التسليح العظمى وفقاً للعلاقة:

$$A'_{sp \max} = 0.34 A'_k \left[\left(\frac{1.412 A'_c}{A'_k} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yp}} + \frac{0.184 A'_s f_y}{A'_k f_{yp}} \right]$$

مباشرة، وهي العلاقة المحققة للشرط: $N_{ur}^{SP} \leq 1.5 N_{ur}^S$ وهذا الشرط محقق لأن:

$$N_{ur}^{SP} = 3.5 MN \leq 1.5 N_{ur}^S = 1.5 \times 2.82 = 4.23 MN$$

ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة الإجهادات المسموح بها للمقارنة.



الشكل (5-13) العمود المدروس في المثال المحلول (5).

مثال (6):

باستخدام طريقة الإجهادات المسموح بها، بطلب تحديد التسليح المطلوب لعمود وسطي قصير دائري المقطع بقطر قدره 40cm ، تحت تأثير الضغط المركزي العسافي نتيجة تطبيق حمولة ناظرية كلية قدرها 1.25MN ، بفرض أن التسليح العرضي المستخدم على شكل اسوار حلزونية

$$\text{مستمرة، وأن } f'_c = 18\text{MPa}; f_y = f_{yp} = 240\text{MPa}$$

ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة حد المقاومة القصوى للمقارنة.

الحل:

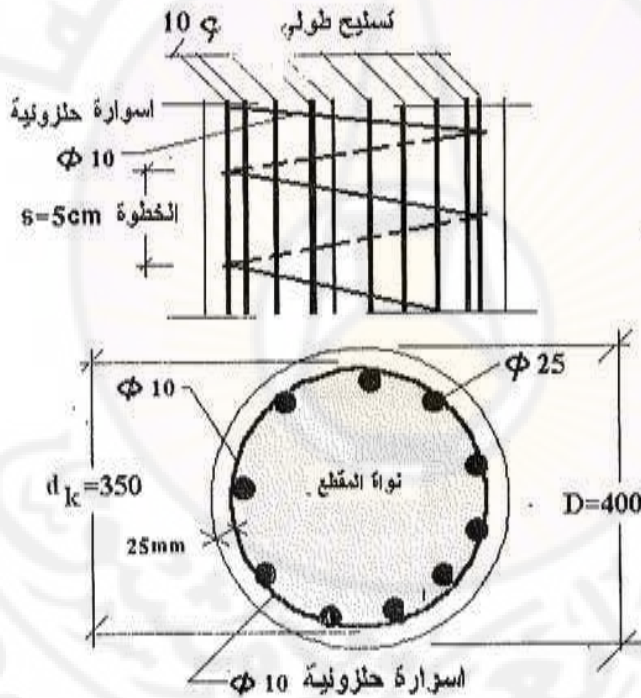
- المساحة الدائرية لقضبان التسليح الطولي:

بفرض أن نسبة التسليح الطولي $\mu_s = 0.04$ ، ينتج:

$$A'_s = \mu_s A'_k = 0.04 \times \frac{\pi \times 0.35^2}{4} \approx 0.00384 \text{ m}^2 = 38.4 \text{ cm}^2.$$

ويمكن اختيار قضبان التسليح الطولي لتكون $A'_s = 10\phi 25 = 49.09 \text{ cm}^2$
- نسبة التسليح الحلزوني:

$$\begin{aligned} N_r &= 0.3 f'_c A'_k \left[1 + 1.17 \mu_s \frac{f_y}{f'_c} + 3 \mu_{sp} \frac{f_{yp}}{f'_c} \right] = \\ &= 0.3 \times 18 \times \frac{\pi \times 0.35^2}{4} \left[1 + 1.17 \times 0.04 \times \frac{240}{18} + 3 \mu_{sp} \frac{240}{18} \right] \Rightarrow \\ \Rightarrow A'_{sp} &= 14.68 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 14.68 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$



الشكل (5-14) العمود المدروس في المثال المحلول (6).

$$a_{sp} = \frac{A'_{sp} s}{\pi d_k} = 0.67 \text{ cm}^2 \text{ ، ينتج أن: } s = 50 \text{ mm}$$

يمكن اختيار اسواره بقطر $\phi 10$ كتسليح حلزوني يتم وضعها بخطوة تساوي $s=50mm$.
(يطلب من الطالب التحقق من صحة اختيار مواصفات التسليح الطولي والعرضي)، وبيين الشكل (5-14) المقطع العرضي مع التسليح المختار.

مثال (7):

عمود وسطي من الخرسانة المسلحة مسند جانبياً له المقطع العرضي وفق الأبعاد المبينة في الشكل (5-15)، وهو واقع في طابق متكرر لمبنى هيكل متعدد الطوابق، فإذا علمت أن العمود متمفصل في الأعلى ومثبت في الأسفل بوثاقه جزئية، وأن طوله الأصلي $7.0m$ ، وبخضع للضغط نتيجة تطبيق حمل ميت قدره $2000kN$ وحمل حي قدره $400kN$ ، وبتابع طريقة حد المقاومة القصوى ووفقاً لقواعد الضغط المركزي، يطلب ما يلي:

(أ) تحديد مقطع التسليح الطولي اللازم مع بيان مواصفات التسليح العرضي والطولي المختار موضعاً ذلك بالرسم.

(ب) بفرض أنه يراد إحداث فتحة داخل المقطع بتطبيق محورهما على محور المقطع على شكل مربع، وبفرض أن نسبة التسليح الطولي المستخدم تساوي 3% ، يطلب تحديد طول ضلع الفتحة، علماً أن $f'_c = 20MPa; f_y = 240MPa$.

ملاحظة: يطلب إعادة الحل وفق طريقة الإجهادات المسموح بها للمقارنة.

الحل:

• التحقق من كون العمود ممنوع من التحنيب (كون العمود قصير):

$$I_x = I_y = \frac{25 \times (75)^3}{12} + \frac{75 \times (25)^3}{12} - \frac{25 \times (25)^3}{12} \approx 944010cm^4$$

$$L_0 = 0.85L = 0.85 \times 700 = 595cm$$

$$A'_c = 5 \times (25)^2 = 3125cm^2$$

ولأن الطول الفعال للعمود:

ومساحة مقطع العمود:

يساوي نصف قطر عطالة المقطع:

$$i_x = i_y = \sqrt{\frac{I_{x,y}}{A'_c}} = \sqrt{\frac{944010}{3125}} = 17.4cm$$

أي إن نسبة النحافة $30 < 34.2 = \frac{595}{17.4} = \lambda = \frac{L_0}{i_{x,y}}$ ، وهذا يعني أن العمود قصير .

• الطلب (أ):

لحساب مساحة المقطع الكلي للتسليح الطولي يمكن استخدام العلاقة:

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.8 A'_c [0.85 f'_c + \mu'_s f_y]}{k_e}$$

$$3.72 = \frac{0.7 \times 0.8 \times 0.3125 \times [0.85 \times 20 + \mu'_s \times 240]}{1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mu'_s = 0.018$$

حيث:

$$N_{ur} = N_u = 1.5G + 1.8P = 3.72 \text{ MN}$$

ولأن نسبة التسليح الناتجة مقبولة، يكون:

$$A'_s = \mu'_s A'_c = 0.018 \times 0.3125 = 56.3 \times 10^{-4} = 56.3 \text{ cm}^2$$

وكتسليح طولي يمكن اختيار $20\phi 20$ يتم توزيعها على محيط المقطع العرضي للعمود المفروض، على أن تربط بأساور تسليح عادية قطر $\phi 8$ على تباعد 20 cm ، الأمر الذي يحقق الاشتراطات المعتمدة بالنسبة للتسليح الطولي والعرضي العادي، الشكل (5-15).

• الطلب (ب):

- مساحة المقطع العرضي بوجود الفتحة المربعة:

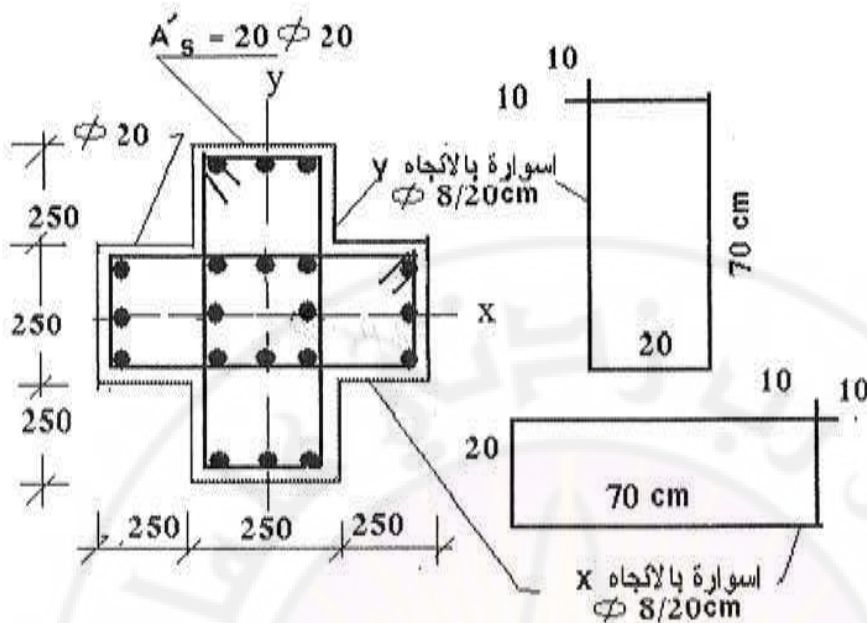
$$A'_c = 0.3125 - a^2$$

وينطبق العلاقة الأساسية لحساب القوة الحدية القصوى التي يقاومها المقطع بوجود الفتحة المربعة، يكون:

$$N_{ur} = \frac{\Omega \times 0.8 A'_c [0.85 f'_c + \mu'_s f_y]}{k_e}$$

$$3.72 = \frac{0.7 \times 0.8 \times (0.3125 - a^2) \times [0.85 \times 20 + 0.03 \times 240]}{1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = 0.195 \text{ m} = 19.5 \text{ cm}.$$



الشكل (5-15) العمود المدروس في المثال المحلول (7).

مثال (8):

إطار مستو مستطيل ومتناظر من الخرسانة المسلحة، الشكل (5-16)، يتعرض لأحمال لحظية فقط، والمطلوب تحديد نوع العمود AB وذلك في الحالتين:
 - الإطار مسند جانبيًا.
 - الإطار غير مسند جانبيًا.

المعطيات: $f_y = 350 \text{ MPa}$, $E_{co} = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$, $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$
 الأعمدة مربعة المقطع $30 \times 30 \text{ cm}$ في الطابقين العلويين و $40 \times 40 \text{ cm}$ في الطابق السفلي،
 الجوائز مستطيلة المقطع $30 \times 50 \text{ cm}$.

الحل:

- تحديد EI للعمود AB:

$$I_g = \frac{30 \times (30)^3}{12} = 67500 \text{ cm}^4$$

$$I_s = 2 \times 3 \times 7.065 \times 10^2 = 4239 \text{ cm}^4$$

$$EI = 0.2E_c I_g + E_s I_s = 11.74 \text{ MNm}^2$$

$$EI = 0.4E_c I_g = 5.67 \text{ MNm}^2$$

$$EI = 11.74 \text{ MNm}^2$$

وتؤخذ القيمة الأكبر، أي:

- تحديد EI للجوائز:

$$EI = 0.5E_c I_g = 0.5 \times 2.1 \times 10^4 \times \frac{0.3 \times (0.5)^3}{12} = 32.81 \text{ MNm}^2$$

- تحديد معامل القساوة في طرفي العمود AB:

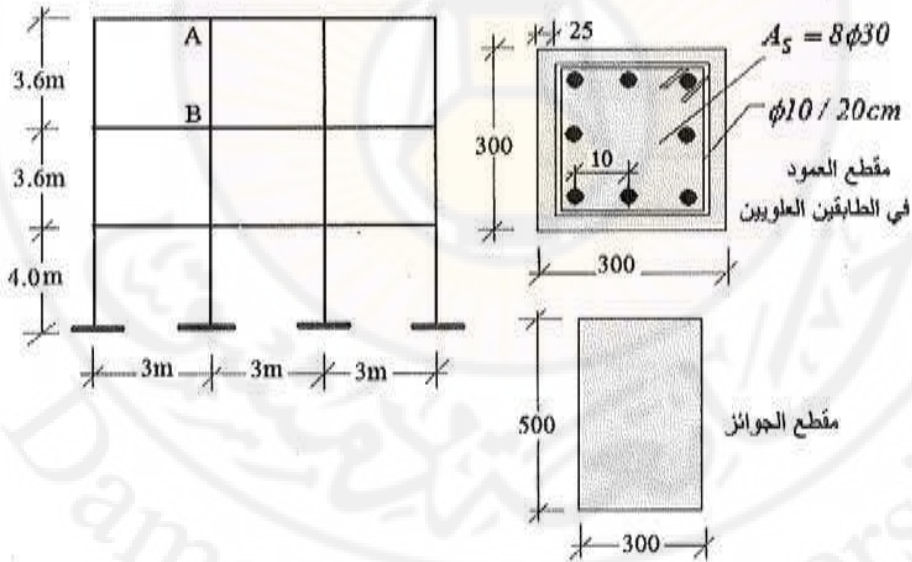
يتم تحديد نوع العمود من حيث النحافة بالعودة إلى الشكل (4-5)، وينتج أن:

1 - في حال كون العمود مسنود جانبياً:

$$\alpha \approx 0.62 \Rightarrow \frac{l_o}{30} = \frac{0.62 \times 360}{30} < 12$$

2 - في حال كون العمود غير مسنود جانبياً:

$$\alpha \approx 1.15 \Rightarrow \frac{l_o}{30} = \frac{1.15 \times 360}{30} > 12$$



الشكل (5-16) مقطع العمود المدروس في المثال المحلول (8).

ب) أمثلة غير محلولة (تفرض المعطيات الناقصة عند الضرورة):

ملاحظة:

في كل الأمثلة التي تعالج الضغط المركزي، يتم الحل بإتباع طريقتي حد المقاومة القصوى وطريقة الإجهادات المسموح بها للمقارنة.

مثال (1): عمود طرفي من الخرسانة المسلحة مسنود جانبياً طوله الفعلي $4m$ ، وهو مثبت في طرفيه تثبيتاً كاملاً، ويقع في طابق متكرر لمبنى هيكل عادي وفي منطقة غير زلزالية، وبفرض أن مقطع العمود مستطيل طوله $50cm$ وعرضه $30cm$ ، ويخضع لأحمال ضاغطة نتيجة تأثير حمولة استثمارية كلية قدرها $1.2MN$ ، يطلب (بإهمال الوزن الذاتي ووفقاً لقواعد الضغط المركزي) تحديد التسليح الطولي والعرضي موضحاً ذلك بالرسم، علماً أن:

$$f'_c = 20MPa; f_y = 240MPa; G = 2P$$

مثال (2): عمود ركني قصير من الخرسانة المسلحة مسنود جانبياً ويقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكل عادي وفي منطقة زلزالية، وبفرض أن العمود خاضع للضغط نتيجة تأثير حمولة ميتة استثمارية قدرها $800kN$ وحية استثمارية قدرها $400kN$ ، يطلب تصميم مقطع العمود على شكل مربع وعلى شكل دائرة، موضحاً ذلك بالرسم (بإهمال الوزن الذاتي ووفقاً لقواعد الضغط المركزي)، علماً أن:

$$f'_c = 20MPa; f_y = 300MPa; f_{yp} = 240MPa$$

مثال (3): عمود وسطي من الخرسانة المسلحة واقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكل عادي وفي منطقة زلزالية ونسبة نحافته $\lambda > 50$ ، وبفرض أن العمود خاضع للضغط نتيجة تأثير حمولة ميتة استثمارية قدرها $500kN$ وحية قدرها $300kN$ ، يطلب ما يلي (بإهمال الوزن الذاتي ووفقاً لقواعد الضغط المركزي):

1) اختيار أصغر مساحة ممكنة فعلياً للمقطع مع تحديد التسليح الناتج ومواصفاته.

2) اختيار أكبر مساحة ممكنة فعلياً للمقطع، علماً أن:

$$f'_c = 20MPa; f_y = 300MPa$$

مثال (4): عمود ركني قصير من الخرسانة المسلحة يقع في الطابق الأخير لمبنى هيكل عادي وفي منطقة زلزالية، وبفرض أن مقطع العمود دائري الشكل ويخضع لأحمال ضاغطة استثمارية قدرها: ميتة $1000kN$ وحية $500kN$ ، يطلب ما يلي (بإهمال الوزن الذاتي ووفقاً لقواعد الضغط المركزي):

- (1) اختيار أصغر قطر فعلي للمقطع باستخدام تسليح طولي وعرضي عادي.
 (2) بفرض أن قطر العمود يساوي 400mm، يطلب تحديد التسليح الطولي والعرضي اللازم موضعاً ذلك بالرسم، علماً أن:

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 300 \text{ MPa}; f_{yp} = 240 \text{ MPa}$$

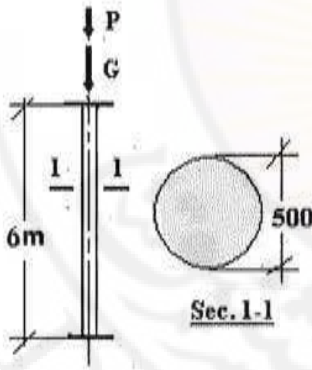
مثال (5): عمود ركني قصير من الخرسانة المسلحة يقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكل عادي وفي منطقة غير زلزالية، ويفرض أن العمود خاضع لتأثير حمولة ناظرية استثمارية كلية قدرها 1.5MN، حيث $G=2P$ ، يطلب تصميم مقطع العمود باستخدام التسليح الطولي والعرضي الحزوني وفقاً لقواعد الضغط المركزي موضعاً ذلك بالرسم، علماً أن:

$$f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 300 \text{ MPa}; f_{yp} = 240 \text{ MPa}$$

مثال (6): عمود ركني قصير من الخرسانة المسلحة ويقع في الطابق تحت الأخير لمبنى هيكل معرض للزلازل، ويفرض أن مقطع العمود كما هو موضح في الشكل (5-17)، ويخضع لضغط ناظمي نتيجة تأثير حمولة ميتة تساوي ضعف الحمولة الحية، يطلب ما يلي:

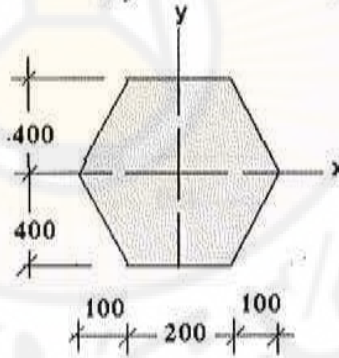
- (1) بفرض أن التسليح الطولي 10T22، ما الحمولة الميتة والحمولة الحية بالقيم الاستثمارية، بحيث تبقى سلامة المقطع مضمونة؟

- (2) تحديد التسليح الطولي اللازم لمقاومة حمولة كلية غير مصعدة قدرها 100kN موضعاً ذلك بالرسم، علماً أن: $f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 300 \text{ MPa}$



الشكل (5-18) مقطع العمود المدروس

في المثال غير المحلول (7).



الشكل (5-17) مقطع العمود المدروس

في المثال غير المحلول (6).

مثال (7): عمود وسطي من الخرسانة المسلحة مسند جانبياً، موثوق في طرفيه بوثاقفة صلدة، ويخضع لضغط ناظمي نتيجة تطبيق قوتين استثنائيتين $G = 800kN$ و $P = 600kN$ ، الشكل (5-18)، والمطلوب:

أ- التحقق من عدم تحنيب العمود.

ب- تحديد التسليح اللازم مع التوضيح بالرسم (بهمل الوزن الذاتي وتأثير الزلازل).

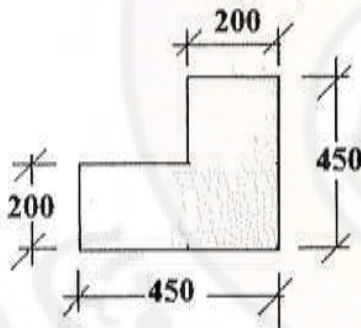
$$k_e = 1.0; f'_c = 20MPa; f_y = 250MPa$$

مثال (8): عمود ركني من الخرسانة المسلحة موجود في الطابق المتكرر لمبنى هيكل عادي له المقطع العرضي المبين في الشكل (5-19)، والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي) تحديد أكبر حمولة مركزية استثنائية يمكن تطبيقها على العمود في كل من الحالات التالية:

أ- العمود قصير ومسلح بتسليح طولي $12\phi 22$ وتسليح عرضي $2 \times 5\phi 8 / m$.

ب- العمود قصير ومسلح بتسليح طولي $12\phi 12$ وتسليح عرضي $2 \times 5\phi 8 / m$.

ج- بفرض اختيار المقطع على شكل مستطيل له نفس مساحة المقطع العرضي السابق، وكان طول العمود على التحنيب مساوياً $350cm$ ، المطلوب تحديد أبعاد العمود وأكبر حمولة استثنائية يمكن تحملها، علماً أن: $f'_c = 20MPa; f_y = 250MPa; \mu'_{max} = 0.003$.



الشكل (5-19) مقطع العمود المدروس في المثال غير المحلول (8).

مثال (9): عمود ركني قصير من الخرسانة المسلحة مقطعه العرضي موضح على الشكل (5-20)، ويفرض أن العمود خاضع للضغط المركزي الصافي نتيجة تأثير حمولة مبيتة قدرها $1200kN$ وحمولة قدرها $800kN$ ، يطلب تصميم مقطع العمود على شكل مربع وعلى شكل

سداسي أضلاع منتظم، موضحاً ذلك بالرسم، علماً أن: $f'_c = 20MPa; f_y = 300MPa$

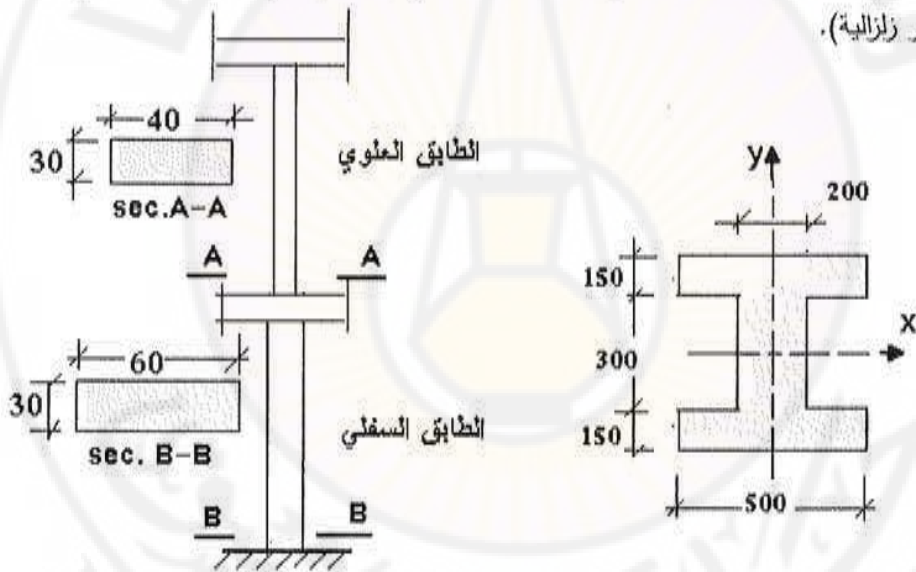
مثال (10): يبين الشكل (5-21) عموداً وسطياً من الخرسانة المسلحة واقعاً في بناء من طابقين، وبافتراض أن الحمولة المنقولة إلى العمود في الطابق العلوي مؤلفة من حمل ميت قدره

300kN وحمل حي قدره 200kN ، وفي الطابق السفلي من حمل ميت قدره 600kN وحمل حي قدره 400kN (لم يؤخذ الوزن الذاتي للعمود بالحسبان في الطابقين)، يطلب ما يلي:
 (1) تحديد أكبر طول حقيقي للعمود بحيث يبقى ممنوعاً من التحنيب الجانبي (العمود مسند جانبياً).

(2) حساب التسليح الطولي اللازم للعمود في المقطعين A-A و B-B وفقاً لقواعد الضغط المركزي، بفرض أنه ممنوع من التحنيب الجانبي (يفرض ارتفاع العمود).

(3) رسم المقاطع العرضية والطولية للعمود موضعاً عليها الأبعاد والتسليح المختار أصولاً)
 ضمناً منطقة الاتصال بين الطابقين)، علماً أن: $f'_c = 20 MPa$; $f_y = 300 MPa$.

مثال (II): المطلوب حساب أكبر حمولة ناظرية يمكن تطبيقها على عمود قصير مقطعه العرضي دائرة قطرها 35cm ومسلح بتسليح طولي $6\phi 12$ وأساور عادية وفقاً لقواعد الضغط المركزي، علماً أن $k_e = 1$; $f_y = 400 MPa$; $f'_c = 20 MPa$ (العمود موجود في منطقة غير زلزالية).



الشكل (5-21) مقطع العمود المدروس
 في المثال غير المحلول (10)

الشكل (5-20) مقطع العمود المدروس
 في المثال غير المحلول (9).



الفصل السادس

المقاطع الخاضعة للضغط اللامركزي

Sections under Eccentric Compression

(إعداد: أ. د. م. غسان محمود)

1-6- تمهيد.

2-6- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي.

1-2-6- العلاقات الحسابية.

1-1-2-6- حالات التحقق.

2-1-2-6- حالات التصميم.

3-6- الأعمدة الطويلة.

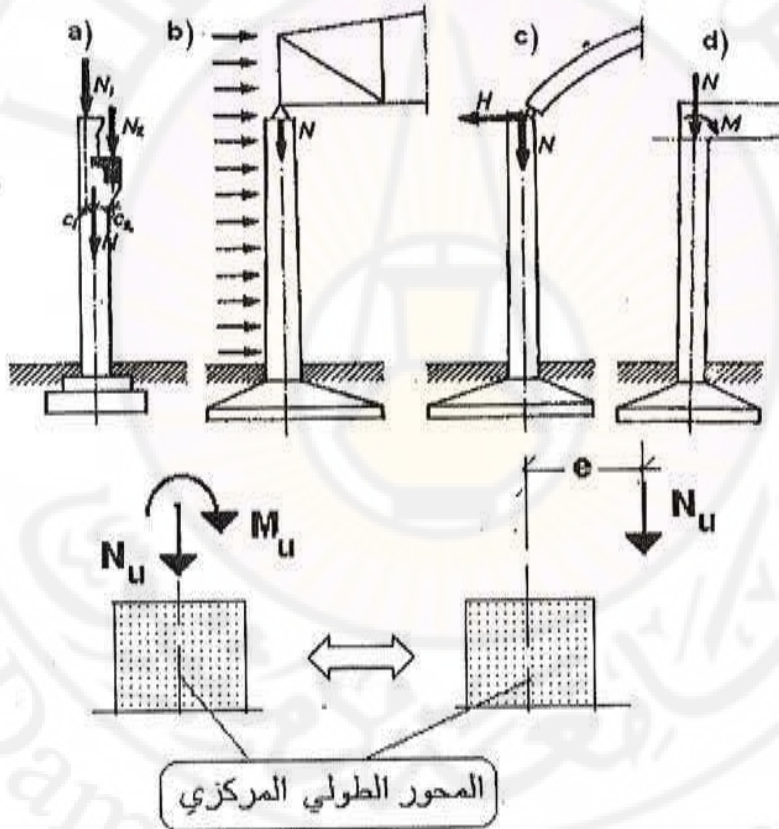
4-6- الجدران الخرسانية المسلحة الحاملة.

5-6- أمثلة حسابية توضيحية.



ما الضغط اللامركزي؟

تكون المقاطع العرضية للأعمدة وما بحكمها خاضعة للضغط اللامركزي أو ما يسمى أحياناً الانحناء المركب) نتيجة تأثير حمولة ضاغطة مطبقة بلامركزية معينة بالنسبة لمركز ثقل المقطع تزيد على قيمة اللامركزية الطارئة)، وهذا يكافئ تأثير قوى ضاغطة مطبقة في مركز الثقل مترافقة مع عزوم انحناء تزيد قيمها على العزوم الناتجة جراء وجود اللامركزيات الطارئة، وتسمى هذه الحالة أحياناً الانحناء المركب *Combined Bending*. ويمثل الضغط اللامركزي بشكل عام حالة إجهادية بين الضغط المركزي والانحناء البسيط، ويكون أقرب للضغط المركزي في حال اللامركزيات الصغيرة، وأقرب إلى الانحناء البسيط في حال اللامركزيات الكبيرة.



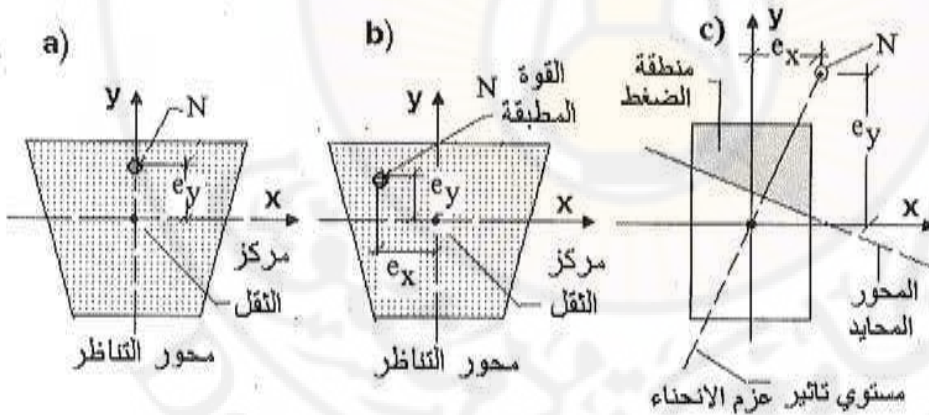
الشكل (1-6) نماذج من حالات الضغط اللامركزي.

تصادف المقاطع الخاضعة للضغط اللامركزي في الكثير من العناصر الإنشائية مثل: أعمدة الإطارات، الأقواس، الأعمدة المزودة بأظفار قصيرة أو أكتاف *Corbels*، قواعد الأساسات، أو تاد الأساسات، جدران الخزانات المضلعة وغير ذلك، الشكل (6-1). ويجب في كل الأحوال التمييز بين العناصر القصيرة الخاضعة للضغط المركزي (راجع الفصل الثاني من الباب الحالي)، والعناصر القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي، والعناصر الطويلة التي تخضع بطبيعة الحال للضغط اللامركزي سواء كانت الحمال المطبقة محورية أم غير محورية، الأمر الذي سيدور الحديث عنه في هذا الفصل.

2-6- الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي

:Short Columns Subjected to Eccentric Compression

لقد تم استعراض الأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط المركزي في الفصل الخامس من الباب الحالي، حيث تمت الإجابة عن السؤال: متى يكون العمود قصيراً ومتى يكون طويلاً؟ وبالنسبة للأعمدة القصيرة الخاضعة للضغط اللامركزي، لا بد من التمييز هنا بين حالتها اللامركزية البسيطة واللامركزية المركبة، الشكل (6-2) وكذلك الشكل (5-1) في الفصل الثاني من الباب الحالي:



الشكل (2-6) نماذج اللامركزية البسيطة (الأحادية) واللامركزية المركبة (الثنائية):

(أ) اللامركزية بسيطة $e_x = 0; e_y \neq 0$ أو $e_x \neq 0; e_y = 0$

(ب) اللامركزية مركبة $e_x \neq 0; e_y \neq 0$ (ضغط مركزي مع انحناء ثنائي المحاور).

اللامركزية البسيطة *Simple Eccentricity* :

تحصل عندما تطبق القوة الضاغطة لا مركزياً في أحد مستويات التناظر، أو عندما يقع عزم الانحناء المرافق للقوة المطبقة مركزياً في أحد مستويات التناظر. تتشكل في هذه الحالة منطقة شد ومنطقة ضغط على كامل المقطع العرضي.

اللامركزية المركبة *Combined Eccentricity* :

تحصل عندما لا تطبق القوة الضاغطة في أي من مستويات التناظر، أو أن تكون القوة الضاغطة مركزياً مترافقة مع عزوم انحناء حول المحورين الرئيسيين. تتشكل في هذه الحالة منطقة شد ومنطقة ضغط بشكل مائل، ولا بد من التنويه هنا أيضاً إلى أنه سيجري التركيز هنا فقط على دراسة حالة اللامركزيات البسيطة في المقاطع المستطيلة أو المربعة .

6-2-1- العلاقات الحسابية الأساسية:

سيتم هنا إتباع طريقة حد المقاومة القصوى لاستنتاج العلاقات الحسابية، حيث يمكن استخدام هذه العلاقات في حالتها التحقيقية والتصميم، ومن أجل مقطع خرساني مسلح مفروض يكون المقطع العرضي هنا مكوناً من منطقتين: منطقة ضغط ومنطقة شد، يفصل بينهما المحور المحايد، وتتعلق نسبة مساحة هاتين المنطقتين في المقطع العرضي بقيمة اللامركزية المطبقة للقوة الضاغطة الناظرية كما سيبين لاحقاً. بالنسبة لتوزيع التسليح في المقطع العرضي فقد يكون موزعاً على المحيط، وقد يكون موزعاً فقط في طرفين متقابلين للمقطع وفقاً لجهة العزم الناتج، وهذا سيكون موضع النقاش هنا.

6-2-1-1- حالات التحقيق *Investigation Cases* :

يكون المقطع معروف الأبعاد والتسليح، ويطلب التحقق من سلامة المقطع، أو قيمة العزم الأعظمي أو القوة المطبقة أو قيمة اللامركزية وغير ذلك.

1) الحالة العامة (اللامركزية بسيطة):

يقصد بالحالة العامة هنا، أن يكون المقطع العرضي مقطوعاً بأشكال مختلفة مصممة أو مفرغة (مقاطع مربعة، مستطيلة، دائرية، حلقيّة، أو من الشكل I, T وغير ذلك من المقاطع الأكثر تعقيداً وفق المتطلبات المعمارية أو التزيينية)، وبالنسبة للتسليح فقد يكون موزعاً بشكل منتظم على المحيط أو مركزاً في الأطراف (تسليح طرفي متناظر أو غير متناظر).

وفقاً لقيمة اللامركزية المطبقة، فقد يكون المقطع واقعاً في الحالات التالية:

- حالة اللامركزية التوازنية، وهي الحالة الفاصلة بين اللامركزية الصغيرة واللامركزية الكبيرة وفيها تصل الإجهادات في كل من الخرسانة المضغوطة وفي التسليح المشدود إلى القيم المميزة معاً.

- حالة اللامركزيات الصغيرة، وهي الحالة الأقرب إلى الضغط المركزي.

- حالة اللامركزيات الكبيرة، وهي الحالة الأقرب إلى الانحناء الصافي.

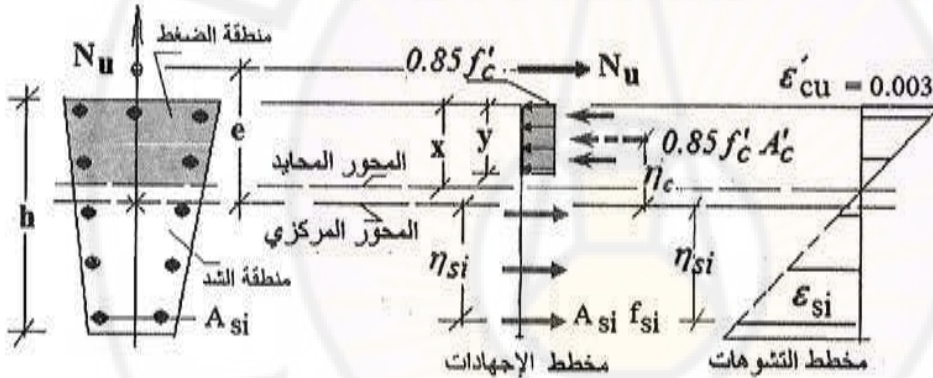
من أجل حالة مقطع متناظر وتوزيع التسليح على المحيط، الشكل (3-6):

تكتب علاقات توازن القوى الطولية وعزوم الانحناء لتحديد قيم قوة الضغط وعزم الانحناء في

الحالة الحديدية N_{ur} و M_{ur} كما يلي:

$$N_{ur} = \Omega \left[0.85 f'_c A'_c + \sum A_{si} f_{si} \right] ; \quad (6-1)$$

$$M_{ur} = N_{ur} e = \Omega \left[0.85 f'_c A'_c \eta_c + \sum A_{si} f_{si} \eta_{si} \right] ; \quad (6-2)$$



الشكل (3-6) حالة مقطع عام متناظر خاضع للضغط اللامركزي مسلح بتسليح موزع على المحيط.

حيث:

e - لامركزية القوة المطبقة بالنسبة للمحور المار من مركز ثقل المقطع.

x - عمق المحور المحايد بالنسبة للليف الطرفي المضغوط.

$y = 0.85x$ - عمق منطقة الضغط في المقطع.

A'_c - مساحة منطقة الضغط الافتراضية.

A_{si} - مساحة قضبان التسليح في الصف i .

ϵ_{si} - التشوه النسبي في تسليح الصف i .

$f_{si} = \epsilon_{si} E_s$ - الإجهاد في تسليح الصف i وهو محصور في المجال $[-f_y, +f_y]$ ، ويؤخذ موجباً إذا كان إجهاد ضغط وسالباً إذا كان إجهاد شد.

η_{si} - بعد مركز ثقل صف التسليح i عن المحور المركزي للمقطع العرضي، ويؤخذ موجباً إذا كان من نفس طرف القوة بالنسبة لهذا المحور، وسالباً إذا كان من الطرف المعاكس.

η_c - بعد مركز ثقل محصلة إجهادات الضغط الافتراضية عن المحور المركزي للمقطع العرضي، وهو موجب دائماً.

وكثيراً ما تصادف هذه الحالة في المقاطع الدائرية أو الحلقية أو على شكل مضلعات منتظمة بعدد أضلاع أكبر من 5 وغير ذلك. ولأن الحساب هنا أكثر تعقيداً يدوياً، ولأن أكثر المقاطع المستخدمة هي من الشكل المستطيل عادة، سيتم التركيز على المقاطع المستطيلة ذات التسليح الطرفي.

(2) حالة المقطع المستطيل بتسليح طرفي (لا مركزية بسيطة):

فيما يلي علاقات التوازن المعتمدة التي تستخدم في يمكن استخدامها في حالات التحقيق الأساسية (المقطع معروف الأبعاد والتسليح)، لاسيما:

- تحديد أكبر عزم والقوة المرافقة.

- تحديد القوة المسببة للانكسار مع العزم المرافق لها.

- التحقق من مقاومة المقطع لعزم مفروض مع قوة مرافقة له.

- التحقق من مقاومة المقطع لقوة مطبقة بلا مركزية معينة وغير ذلك.

أو في حالات التصميم (تحديد التسليح لمقاومة قوة ضاغطة بلا مركزية معينة، أو قوة ضاغطة مركزية مترافقة مع عزم انحناء).

تعطى علاقات التوازن هنا كما يلي، الشكل (4-6):

$$N_{uw} = \Omega [0.85 f'_c b y + A'_s f'_s + A_s f_s]; \quad (6-3)$$

$$M_{uw} = N_{uw} e = \Omega \left[0.85 f'_c b y (0.5h - 0.5y) + A'_s f'_s (0.5h - d') - A_s f_s (0.5h - a) \right]; \quad (6-4)$$

حيث:

b - عرض المقطع المستطيل.

h - الارتفاع الكلي للقطاع المستطيل.

A'_s - مساحة التسليح الأقرب إلى القوة N_{uw} .

$$0.9 \geq \Omega = 0.9 - 0.5 \left(\frac{N_u}{N_c} - 0.1 \right) \geq 0.7; \quad (6-5)$$

حيث:

N_u - الحمولة الضاغطة الناظمية بالقيمة الحسابية.

$N_c = 0.85 f'_c A_c$ - مقاومة المقطع الخرساني كله على الضغط.

تحدد قيم الإجهادات f'_s و f_s بالعلاقتين التاليتين:

$$-f_y \leq f'_s = 630 \left(\frac{y - 0.85d'}{y} \right) \leq +f_y; \quad (6-6)$$

$$-f_y \leq f_s = 630 \left(\frac{y - 0.85d}{y} \right) \leq +f_y; \quad (6-7)$$

على أن تؤخذ f'_s و f_s بإشارة موجبة إذا كانت إجهادات ضغط، وإشارة سالبة إذا كانت

إجهادات شد، وبالنسبة للأذرع الموضحة على الشكل المذكور فإن:

$e_g = 0.5h - a$ - المسافة بين مركز ثقل التسليح الأبعد والمحور المركزي للمقطع.

$e'_g = 0.5h - d'$ - المسافة بين مركز ثقل التسليح الأقرب والمحور المركزي للمقطع.

$e_c = 0.5h - 0.5y$ - المسافة بين مركز ثقل منطقة الضغط الافتراضية للخرسانة والمحور المركزي للمقطع.

$e_{N_s} = e + 0.5h - a$ - المسافة بين مركز ثقل التسليح الأبعد والقوة الضاغطة.

$e'_{N_s} = e - 0.5h + d'$ - المسافة بين مركز ثقل التسليح الأقرب والقوة الضاغطة.

$e_{N_c} = e - 0.5h + 0.5y$ - المسافة بين مركز ثقل منطقة الضغط والقوة الضاغطة.

ولا بد من التمييز هنا بين حالتين تفصل بينهما الحالة التوازنية:

الحالة التوازنية Balance State:

توافق هذه الحالة الوضعية التي تصل فيها الإجهادات في التسليح المشدود وفي الخرسانة

المضغوطة إلى القيم المميزة بأن واحد، وهذا يعني وجود قيمة محددة للامركزية

اللامركزية التوازنية (e_b) وقيمة محددة لارتفاع منطقة الضغط الافتراضية y_b من أجل كل نوع

من أنواع الفولاذ المستخدم، حيث إن $y_b = \frac{535.5d}{630 + f_y}$ ، كما هو الحال من أجل الانحناء

الصافي، وكذلك قيم محددة للعزم والقوة المرافقة له N_{urb}, M_{urb} .

حالة اللامركزيات الصغيرة *Small Eccentricities*:

تكون اللامركزية صغيرة عندما $e < e_b$ ، ويكون المقطع كلياً أو بجزئه الأكبر خاضعاً للضغط، أي يتم الوصول إلى الحالة الحدية بانكسار الخرسانة أو سيلان التسليح في منطقة الضغط، ويكون الإجهاد في التسليح الأبعد عن القوة N_{II} إما إجهاد ضغط أو إجهاد شد تقل قيمته عن حد الخضوع f_y في التسليح. أما الإجهاد في التسليح الأقرب من القوة N_{II} فتصل قيمته إلى حد الخضوع في الضغط f'_y ، وهذه الحالة أقرب إلى حالة الضغط المركزي. هنا يكون $y > y_b$ وكذلك $N_{II} > N_{urb}$.

حالة اللامركزيات الكبيرة *Big Eccentricities*:

تكون اللامركزية كبيرة عندما $e > e_b$ ، وتتحقق الحالة الحدية بعد وصول إجهاد الشد في التسليح الأبعد عن القوة N_{II} إلى حد الخضوع (في حالة استخدام تسليح مشدود لا تزيد نسبته على القيمة العظمى)، وتكون الإجهادات في التسليح الأقرب إجهادات ضغط أقل حد الخضوع بشكل عام، وهذه الحالة أقرب إلى الانحناء البسيط. هنا يكون $y \leq y_b$ وكذلك $N_{II} \leq N_{urb}$.

• مخطط الترابط الحدي الداخلي *Internal Ultimate Interaction Curve*:

يمكن أن تستخدم العلاقات العامة أعلاه في حالتها التحقيق والتصميم، ومن أجل مقطع خرساني مسلح مفروض يمكن تمثيل العلاقات السابقة بمخطط الترابط الداخلي المبين في الشكل (6-5-أ) الذي يحدد إمكانية تأمين قدرة تحمل المقطع وفقاً لتغير قيم القوة الضاغطة الناعمة مع عزم الانحناء المرافق لها (يستخدم هذا المخطط في حالات التحقيق فقط، حيث يتميز كل مقطع من أجل بأبعاد وتسليح طرفي معروف بمخطط ترابط داخلي خاص به).

ملاحظات على مخطط الترابط الحدي الداخلي:

يكون المقطع محققاً على الضغط اللامركزي عندما تكون النقطة الممثلة بالثنائية $(x, y) = \left(\frac{M_{II}}{\Omega}, \frac{N_{II}}{\Omega} \right)$ واقعة على المنحني مباشرة أو داخله، ويكون غير مستوف لشروط الأمان عند وقوعها خارج المخطط، وتتضمن المراجع الهندسية والأبحاث الأخرى المنشورة أشكالاً متعددة لمخططات الترابط تعالج حالات الشد أيضاً. يمكن تمييز النقاط الأساسية التالية على مخطط الترابط الحدي، وهي:

أ- يمثل ترتيب النقطة A على محور الترتيب $y-y$ المقاومة النظرية لقطاع معرض لضغط

$$x = \frac{M_{uA}}{\Omega} = 0 \text{ ، أي دون عزم انحناء مرافق } y = \frac{N_{uA}}{\Omega}$$

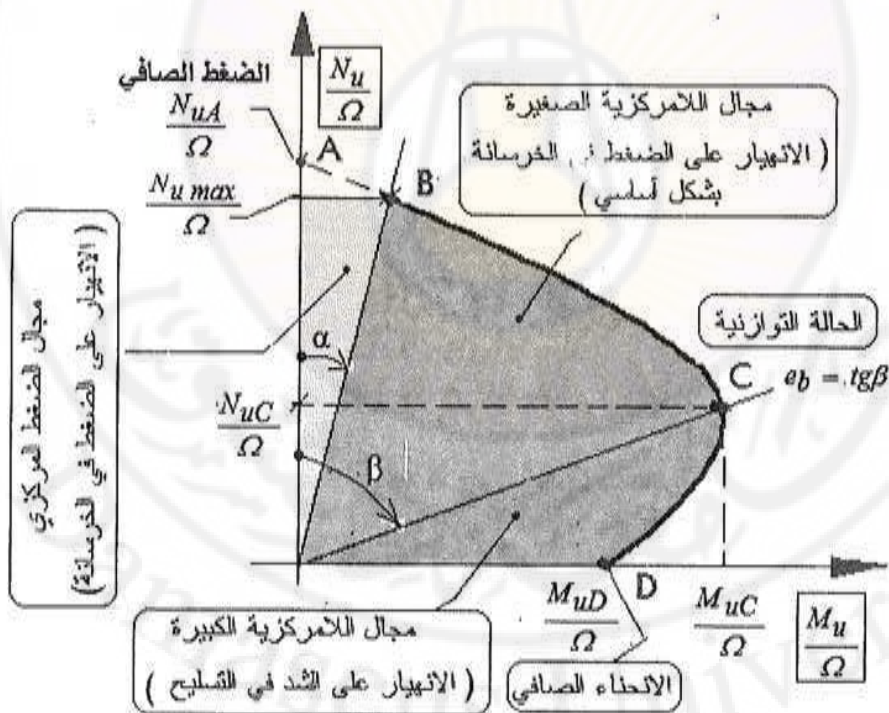
ب- يمثل ترتيب النقطة B على المحور $y-y$ مقاومة الضغط المركزي القصوى المسموح بها، أي عند توافقه مع وجود عزم انحناء ناتج عن وجود مركزية لا تزيد على قيمة اللامركزية الطارئة، حيث:

$$-y_B = \frac{N_{u \max}}{\Omega} = \frac{0.8 N_{uA}}{\Omega} ; x_B = \frac{M_{uA}}{\Omega}$$

$$\text{وكذلك } -y_B = \frac{N_{u \max}}{\Omega} = \frac{0.85 N_{uA}}{\Omega} ; x_B = \frac{M_{uA}}{\Omega} \text{ في حالة استخدام تسليح عرضي}$$

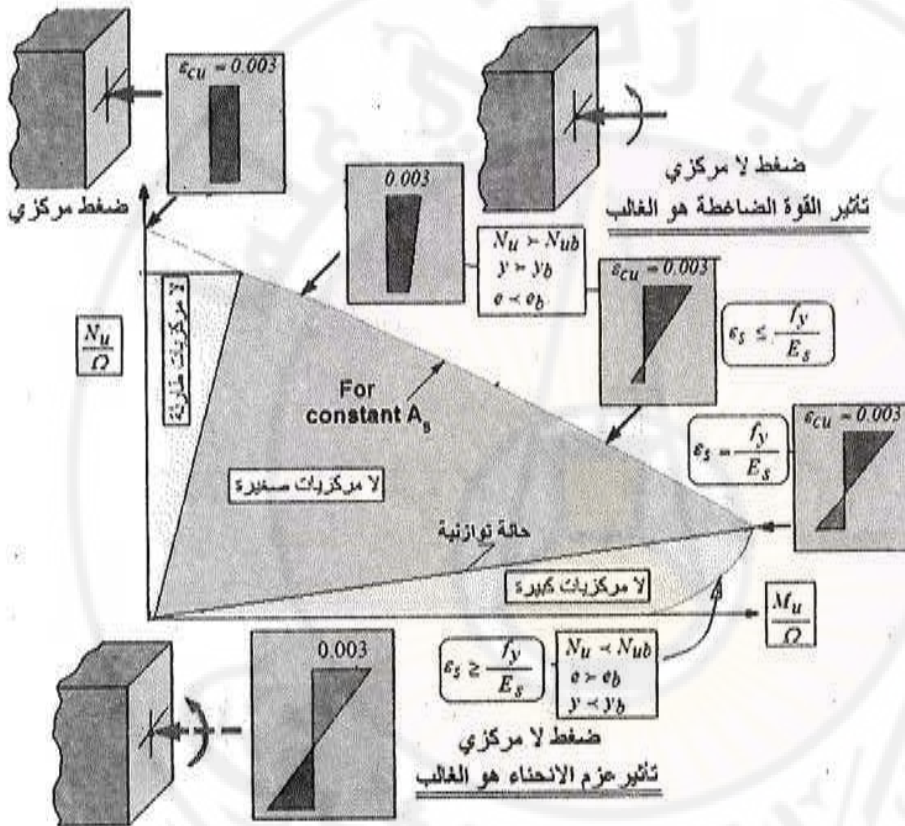
حلزوني، $\frac{M_{uA}}{\Omega}$ - قيمة العزم الناتج عن اللامركزية الطارئة. ج- يمثل ميل الخط OB بالنسبة

للمحور $y-y$ ، أي اللامركزية الدنيا التي يتم تصميم كل مقطع ضمناً على تحملها، حتى لو كانت اللامركزية الفعلية أقل منها، أي $e_a = e_{\min} = \text{tg} \alpha$



الشكل (6-5-1) مخطط الترابط الداخلي.

د- تمثل النقطة C الحالة التوازنية للمقطع، ويكون ترتيبها على المحور $y-y$ القيمة الحدية للقوة الضاغطة في الوضعية التوازنية $\frac{N_{ub}}{\Omega}$ ، وفاصلتها على المحور $x-x$ القيمة الحدية للعزم $\frac{M_{ub}}{\Omega}$ في الحالة التوازنية، ويمثل ميل الخط OC بالنسبة للمحور $y-y$ قيمة اللامركزية التوازنية، أي $e_b = tg\beta$



الشكل (6-5-ب) مخطط التشوهات في المناطق المميزة لمخطط الترابط الحدي.

هـ- تمثل فاصلة النقطة D على المحور ox ، أي $(x_D = \frac{M_{uD}}{\Omega}; y_D = 0)$ قيمة العزم الحدي الأقصى الصافي الذي يمكن للمقطع أن يتحملة دون وجود قوة ضاغطة ناظمية مرافقة (حالة انحناء بسيط)، ويتم تحديد قيمة هذا العزم وفق قواعد الانحناء البسيط.

و- يكون المقطع محققاً لشروط الأمان في حالة حد المقاومة القصوى إذا كانت النقطة الممثلة بالتثائية $(\frac{M_{II}}{\Omega}, \frac{N_{II}}{\Omega})$ واقعة على محيط المخطط أو بداخله، ويكون غير محقق لشروط الأمان إذا وقعت خارجه. يبين الشكل (6-5-ب) أيضاً مخطط الترابط الداخلي الحدي مع مخططات التشوهات في المقطع العرضي للمناطق المميزة الرئيسية منه.

• عزم الانحناء الحدي الأعظمي $M_{ur max}$:

يمكن تحديد قيمة العزم الأعظمي المترافق مع قوة ضاغطة ناظرية باشتقاق معادلة العزوم حول مركز ثقل المقطع مثلاً بالنسبة للمنحول y ، ثم مساواة المشتق للصفر ، الأمر الذي يسمح بحساب y_{max} المرافقة للعزم الأعظمي المنشود الذي يحدد بالتبديل في معادلة العزوم من جديد ، أي إن :

$$\frac{\partial M_{ur}}{\partial y} = 0.85 f'_c b (0.5h - y_{max}) = 0; \quad (6-8)$$

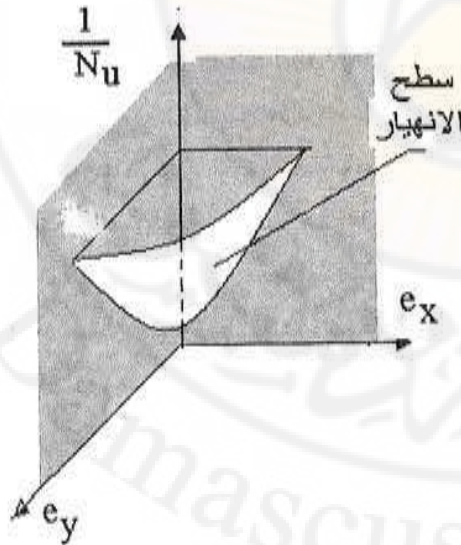
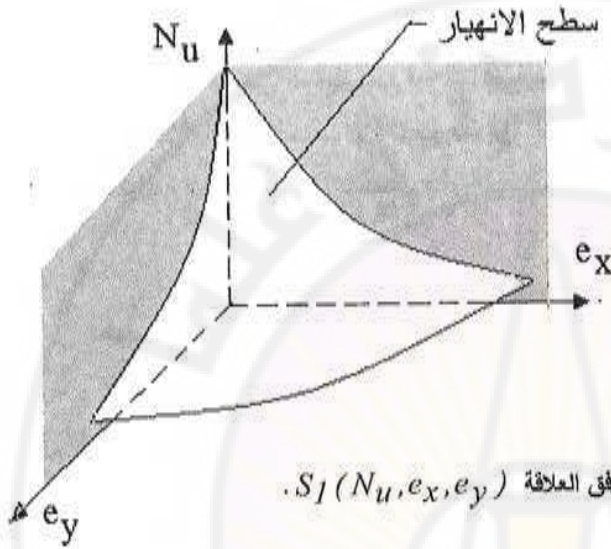
وهذا يعني أن $y_{max} = 0.5h$ ، وطالما أن العزم الحدي المطبق يجب ألا يتجاوز قيمة العزم التوازني M_{ub} ، يؤخذ العزم الأعظمي مساوياً للقيمة الأصغر بين العزم التوازني المحسوب على أساس $y = y_b$ والعزم المحسوب على أساس $y_{max} = 0.5h$.

• حالة المقطع المستطيل (اللامركزية مركبة $e_x \neq 0, e_y \neq 0$) :

يتعرض المقطع في هذه الحالة لتأثير عزوم الانحناء حول المحورين المركزيين، إضافة للقوة الضاغطة المركزية *Biaxial Bending and Compression* وتكون منطقة الضغط غير مستطيلة، الشكل (6-2-ب)، ويتم إجراء الحساب هنا لتأمين شروط التحقيق عادة، حيث يكون المقطع وتسليحه معروفاً، وكذلك القوة المطبقة وموقعها.

تعتمد الطرائق المستخدمة للحساب هنا على المبادئ الأساسية للتوازن، مع الافتراضات اللازمة لتأمين المقاومة نفسها لحالة الضغط اللامركزي البسيط بالنسبة لكلا المحورين المركزيين x و y . وتعتمد معظم الطرائق على قاعدة المحاولة والخطأ والتصحيح وصولاً إلى الحل السليم والذي يعطي أفضل وضع للمحور المحايد المائل الناتج في حالة الضغط اللامركزي الثنائي (المركب). ومعروف أن قدرة تحمل المقطع هنا تابع لثلاثة عوامل أساسية (من أجل مقطع ما معلوم الأبعاد والتسليح) وهي: القوة الضاغطة الناظرية N_{II} وعزم الانحناء حول المحور الفواصل M_{IIx} وعزم الانحناء حول المحور الترتيب M_{IIy} ، وهذا يعني التبعية للقوة الضاغطة N_{II} واللامركزيات البسيطة المرافقة e_x و e_y .

إن رسم مخططات العلاقات المتبادلة بين المتحولات أعلاه ينتج أشكال متعددة لما يسمى سطوح الانهيار *Failure Surfaces*، وهذا ما توضحه الأشكال (5-6- ج ، د ، هـ).
 ويعيداً عن التفاصيل المتعلقة باستنتاج العلاقات الرياضية المطلوبة، فيما يلي طريقتان مستندتان أصلاً إلى الأفكار السابقة التي طورها بريسلر وبريم وغيرهما.



▪ طريقة مقلوب الحمولة *Reciprocal Load Method* ، الشكل (6-5-د).

وهذه الطريقة معتمدة في عدد من الكودات العالمية كالكود الأمريكي والكود السوري. ووفقاً للكود العربي السوري، ومن أجل المقاطع المستطيلة، يمكن اتباع المبدأ التالي: لا يجوز أن تزيد القوة الحدية الناظمية المطبقة على القطاع N_{ut} على القيمة المحددة وفق العلاقة:

$$\frac{1}{N_{ut}} = \frac{1}{N_{urx}} + \frac{1}{N_{ury}} - \frac{1}{N_{uro}} ; \quad (6-9)$$

حيث:

N_{urx} - القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للقطاع للعرضي تحملها في حالة اللامركزية البسيطة، ويفرض أن $e_x \neq 0$; $e_y = 0$.

N_{ury} - القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للقطاع للعرضي تحملها في حالة اللامركزية البسيطة، ويفرض أن $e_x = 0$; $e_y \neq 0$.

N_{uro} - القوة الناظمية الحدية القصوى التي يمكن للقطاع للعرضي تحملها في حالة الضغط المركزي، أي عندما $e_x = 0$; $e_y = 0$.

في حال عدم تحقق العلاقة أعلاه، يجب زيادة التسليح، وإجراء التحقق من جديد.

▪ طريقة حد الحمولة *Load Contour Method*

وهي متبعة في المراجع البريطانية والأوربية. حيث، من أجل المقاطع المستطيلة، يمكن التحقق من كفاية التسليح المختار لمقاومة العزمين حول المحورين المركزيين (الأبعاد معروفة أيضاً) كما يلي:

✓ عندما تحقق نسبة الحافات $\lambda_x \leq 2$ or $\lambda_y \leq 2$: لا حاجة للتحقق

✓ عندما تحقق نسبة اللامركزيات المطبقة بالنسبة للمحورين المركزيين العلاقة:

$$\frac{e_y}{e_x} \text{ or } \frac{e_x}{e_y} \leq 0.2$$

تكون أبعاد المقطع محققة.

✓ يجب التأكد من تحقيق التسليح الشرط التالي:

$$\left[\frac{M_{ux}}{M_{urx}} \right]^a + \left[\frac{M_{uy}}{M_{ury}} \right]^a \leq 1.0$$

حيث: $a = 2$ - للمقاطع الدائرية وشبه الناقصة، و تؤخذ من الجدول المبين أدناه للمقاطع المستطيلة، M_{urx} - العزم المقاوم حول المحور xx ،
 M_{ury} - العزم المقاوم حول المحور yy .

$\left[\frac{N_u}{N_{ur}} \right]$	a
≤ 1.0	1.0
0.7	1.5
1.0	2.0
$N_{ur} = \Omega(A_c f'_c + A_s f_y)$	

للإطلاع فقط:

فيما يلي طريقة الكود المصري وجمعية المهندسين البريطانيين لحساب المقاطع المعرضة للضغط المركزي وبوجود عزوم انحناء مزدوجة (ضغط لا مركزي ثنائي المجاور)، مع الحفاظ على الرموز المستخدمة كما جاءت في الكود المصري.
 عندما تتجاوز قيمة اللامركزية الأصلية المطبقة قيمة اللامركزية الطارئة يمكن إتباع ما يلي:

✓ في حالة المقاطع المستطيلة متساوية التسليح في جميع الأطراف، الشكل (*)، يمكن أخذ عزم انحناء تصميمي مكافئ حول محور واحد بالطريقة التقريبية التالية:

أ - عندما $\left(\frac{M_x}{a'} \leq \frac{M_y}{b'} \right)$ يؤخذ العزم التصميمي M'_y حول المحور yy وفق العلاقة:

$$M'_y = M_y + \beta \left(\frac{b'}{a'} \right) M_x; \quad (a)$$

ب - عندما $\left(\frac{M_x}{a'} > \frac{M_y}{b'} \right)$ يؤخذ العزم التصميمي M'_x حول المحور xx وفق العلاقة:

$$M'_x = M_x + \beta \left(\frac{a'}{b'} \right) M_y; \quad (b)$$

حيث:

a' و b' - ارتفاع المقطع الفعال للعزمين M_y و M_x على الترتيب.

β - معامل قيمته وفق الجدول (*) أو الشكل (**).

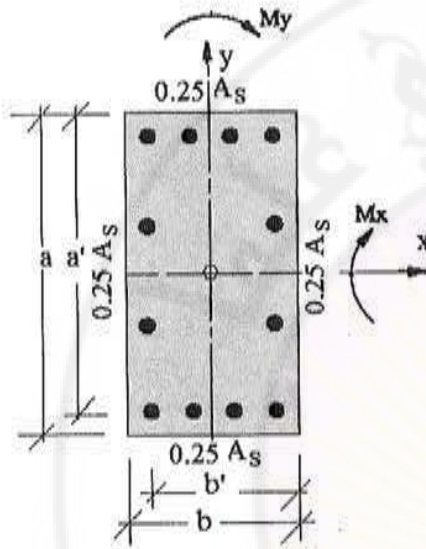
ج - يتم وضع أربع أسياخ في زوايا العمود، وتوزع الأسياخ المتبقية على مسافات متساوية في الأطراف المتقابلة.

✓ في حالة المقاطع المستطيلة ذات التسليح المتساوي في كل طرفين متقابلين على حدة، الشكل (***)، وبشرط أن تكون القيمة $R_b = \frac{P_u}{ab f_{cu}} \leq 0.5$ ، يمكن تصميم العمود بطريقة مبسطة لمقاومة القوة الضاغطة P_u وكل من عزمي الانحناء التاليين كل على حدة:

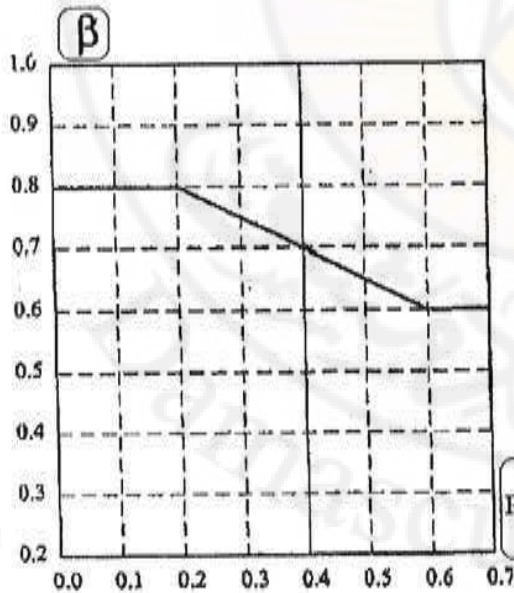
$$M'_x = \alpha_b M_x; \quad (c)$$

$$M'_y = \alpha_b M_y; \quad (d)$$

حيث تؤخذ قيمة α_b من الجدول (**).

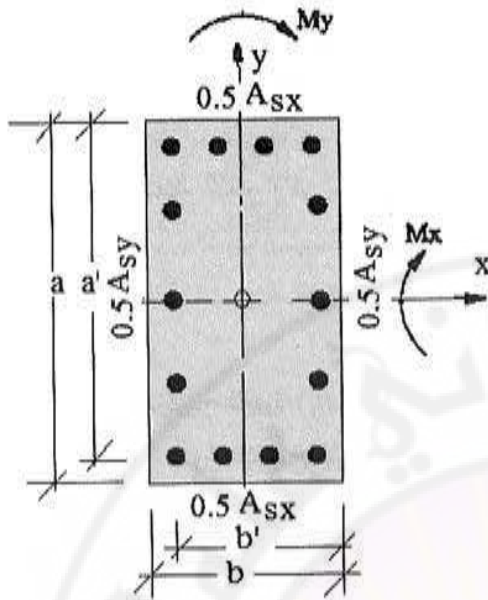


الشكل (*) الرموز المستخدمة في مقطع مستطيل معرض لضغط مركزي وعزم انحناء مزدوج.



الشكل (***) قيم المعامل β

$$R_b = \frac{P_u}{b a f_{cu}}$$



الشكل (***) الرموز المستخدمة في مقطع مستطيل
معرض لضغط مركزي وعزم الحناء مزدوج.

$$(R_b = \frac{P_u}{ab f_{cu}} \leq 0.5)$$

الجدول (*) قيم المعامل β .

$R_b = \frac{P_u}{a \times b \times f_{cu}}$	≤ 0.2	0.3	0.4	0.5	≤ 0.6
β	0.8	0.75	0.70	0.65	0.60

الجدول (**) قيم المعامل α_b .

$\frac{M_x / M_y}{a' / b'}$	∞	3	2	1	0.5	0.33	0
$R_b = \frac{P_u}{ab f_{cu}}$							
$R_b \leq 0.1$	1	1.20	1.25	1.30	1.25	1.20	1
$R_b = 0.2$	1	1.35	1.50	1.75	1.50	1.35	1
$R_b = 0.3$	1	1.25	1.35	1.40	1.35	1.25	1
$R_b = 0.4$	1	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1
$R_b = 0.5$	1	0.65	0.70	0.75	0.70	0.65	1

6-2-1-2-2- حالات التصميم Design Cases:

في حالات التصميم / اللامركزية أحادية /، يتم استخدام التسليح بشكل متناظر عادة (لخصوصية الحساب على الأحمال الزلزالية)، أي $y_{max} = 0.5h$ ، ويوضع في طرفي القطاع باتجاه عزم الانحناء الناتج (في حال عدم تساوي التسليح في الطرفين الأبعد والأقرب إلى القوة الضاغطة، تكون النسبة بينهما معروفة، أي $A_s = \beta A'_s$ ، وهذا يسهل عملية الحساب، وتستخدم العلاقات الحسابية بالشكل المناسب، ومن أجل المقطع العرضي المستطيل، يمكن إتباع ما يلي باختصار:

• حالة اللامركزية الكبيرة ($e > e_b$)

في هذه الحالة يكون التسليح الأبعد عادة واصلًا إلى السيلان (القوة الضاغطة عادة مطبقة خارج التسليحين الطرفين المتقابلين)، هنا يمكن فرض أن $f_s = f'_s = f_y$ وينتج: علاقة توازن القوى:

$$\frac{N_u}{\Omega} = 0.85 f'_c b y + A'_s f_y - A_s f_y$$

علاقة توازن العزوم حول مركز ثقل التسليح الأبعد (تسليح الشد):

$$\frac{M_u}{\Omega} = \frac{N_u e_{Ns}}{\Omega} = 0.85 f'_c b y (d - 0.5y) + A'_s f_y (d - d')$$

حيث $e_{Ns} = e + 0.5h - a$. وبحل هاتين المعادلتين ينتج y و $A'_s = A_s$ ، مع ضرورة

التحقق من وصول تسليح الضغط (الأقرب) إلى السيلان من خلال العلاقة:

$$\epsilon'_s = 0.003 \times \frac{y - 0.85d'}{y} \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

باستخدام العلاقات العامة.

• حالة اللامركزية الصغيرة ($e < e_b$):

في هذه الحالة يكون التسليح الأبعد غير واصل إلى السيلان عادة (القوة الضاغطة عادة مطبقة بين التسليحين الطرفين المتقابلين)، بينما يصل التسليح الأقرب إلى السيلان. هنا يمكن استخدام العلاقات التاليتين:

$$\frac{N_u}{\Omega} = 0.85 f'_c b y + A'_s f_y - A_s f_s \quad \text{علاقة توازن القوى:}$$

علاقة توازن العزوم حول مركز ثقل التسليح الأبعد (تسليح الشد):

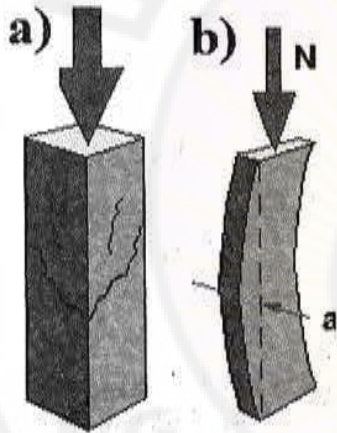
$$\frac{M_u}{\Omega} = \frac{N_u e_{Ns}}{\Omega} = 0.85 f'_c b y (d - 0.5y) + A'_s f_y (d - d')$$

حيث: $f_s = 0.003 E_s \times \frac{y - 0.85d}{y}$ ، وكذلك $e_{Ns} = e + 0.5h - a$ وبنتيجة الحل يحدد التسليح المطلوب.

3 - 6 - الأعمدة الطويلة (للاطلاع) Slender Columns :

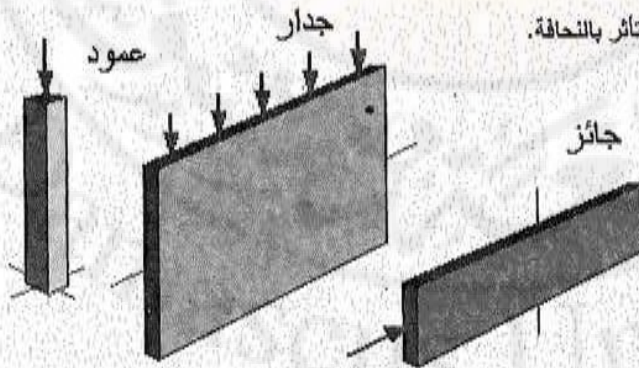
ما الأعمدة الطويلة ؟ تعد الأعمدة طويلة بشكل عام عندما تزيد نسبة نحافتها $\frac{L_0}{i_{x,y}}$ على 40.

وينتج عن ذلك تحنيط جانبي، الشكل (7-6-1)، بسبب تشكل عزوم انحناء إضافية تضاف إلى العزوم المطبقة أصلاً قبل التحنيط، أي إنه تنشأ لا مركزية إضافية e_c تضاف إلى اللامركزية الأصلية $e_o \geq e_a$ وبحيث تصبح اللامركزية الكلية $e = e_o + e_c$ ، كما أشير له سابقاً، ولا بد من التمييز بين الأعمدة المسندة جانبياً والأعمدة غير المسندة عند تحديد طول التحنيط L_0 ، الأمر الذي تم التحدث عنه مسبقاً.



الشكل (6-6-1) : تأثير النحافة في الأعمدة:

(a) عمود قصير (لامركزية ثنائية).
(b) عمود طويل.



الشكل (7-6-6) عناصر تتأثر بالنحافة.

• الحالة العامة ($\lambda \leq 100$):

يمكن أن يؤخذ أثر التحنيب بالحساب من خلال حساب العمود أو العنصر المضغوط في حالة حد المقاومة القصوى، حيث $\lambda \leq 100$ ، تحت تأثير قوة ناظمية حدية N_{ui} مترافقة مع عزم انحناء M_{ui} قيمته تحسب بالعلاقة:

$$M_{ui} = N_{ui}(e_o + e_c); \quad (6-10)$$

حيث: $e_o = \frac{M_{ui}}{N_{ui}} \geq e_a$ - اللامركزية الأصلية المطبقة والناجمة عن الأحمال والتأثيرات

الخارجية قبل حدوث التحنيب، أي قبل وصول القوة الضاغطة إلى قوة إيلر Euler Force التي تحسب بالعلاقة (6-11)، وفقاً للكود الأمريكي، وضمنها اللامركزية الطارئة e_a مأخوذة

بالقيمة الأكبر من $(\frac{h}{20}; \frac{L_o}{250})$ ، حيث h - ارتفاع المقطع الكلي باتجاه التحنيب،

L_o - الطول الحسابي للعمود على التحنيب، على الأتقل اللامركزية الكلية الناتجة $e = e_o + e_c$ عن $0.08h$ حتى في حال انعدام e_c .

$$N_e = \frac{\pi^2 E_c I_e}{(L_o)^2}; \quad (6-11)$$

حيث:

I_e - عزم عطالة المقطع المكافئ حول المحور المركزي.

E_c - معامل مرونة الخرسانة المماسي في النقطة الممثلة لقوة إيلر Euler Force على مخطط القوة - الإزاحة الجانبية.

تؤخذ قيمة العزم الحدي الأصلي M_{ui} المطبق في المقطع الحرج للعمود (ترافقه القوة الناظمية الحدية N_{ui}) تحت تأثير حالة التحميل المدروسة مساوية:

- العزم الأعظمي على الإطلاق على كل مقطع من مقاطع العنصر المضغوط غير المسند جانبياً، أو المسند جانبياً والخاضع لأحمال عرضية ما بين طرفي العنصر المضغوط، نتيجة لتحليل إنشائي من الدرجة الأولى.
- في الحالات الأخرى:

عند التعرض لعزوم طرفية، الشكل (6-6-ج)، يؤخذ العزم M_{ui} وفقاً للعلاقة (6-12):

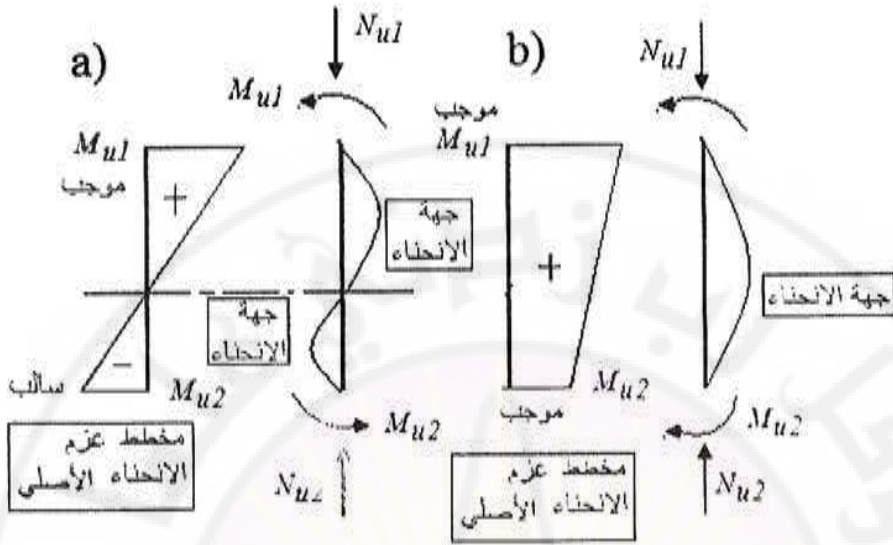
$$M_{ui} = 0.6M_{u1} + 0.4M_{u2} \geq 0.4M_{u2}; \quad (6-12)$$

حيث:

M_{u1} - العزم الكبر بالقيمة المطلقة، والمطبق على أحد طرفي العمود، ويؤخذ إشارة موجبة دائماً.

M_{u2} - العزم الأصغر بالقيمة المطلقة، والمطبق على الطرف الآخر للعمود، ويؤخذ بإشارة موجبة إذا كان العمود منحنياً باتجاه واحد، وبإشارة سالبة إذا كان منحنياً باتجاهين.

ملاحظة: في الأعمدة المسنودة فقط، يجب الأتقل قيمة العزم M_{ui} وفق العلاقة (6-12) عن قيمة العزم الأكبر بالقيمة المطلقة والمطبق في إحدى نهايتي العمود.



الشكل (6-6 ج): عمود يتعرض لعزمي انحناء في طرفيه.
 (a) انحناء بجهتين (الانحناء ثاني)، (b) انحناء بجهة واحدة (انحناء أحادي).

تحتسب قيمة اللامركزية الإضافية e_c كما يلي:

$$e_c = \frac{\beta \lambda^2 (e_o + h)}{30000} \leq \frac{\beta \lambda^2 h}{15000} \quad (6-13)$$

حيث:

$$\beta = 1.65 - 0.65 \alpha \quad \text{في حالة الجو الجاف}$$

$$\beta = 1.30 - 0.33 \alpha \quad \text{في حالة الجو الرطب.}$$

$\alpha = \frac{M_{us}}{M_{ui}}$ - معامل يمثل نسبة العزوم الحية M_{us} نتيجة الأحمال الأتية وتشمل الرياح والهزات الأرضية والمركبات والآلات المتحركة (وضمنها الأثر الديناميكي)، والأحمال على أسطح الأبنية ذات الاستعمال القليل أو النادر، إلى العزم الحسابي الكلي M_{ui} .

ملاحظة:

من أجل $\alpha \leq 1$ تؤخذ β بالقيمة المطلقة وبما لا يزيد على 1، وفي الحالات التي تكون فيها قيم $\alpha > 0$ ، يجب أن يتم التحقق من قدرة تحمل العمود أو العضو المضغوط بشكل عام لحالة تحميل لا تشمل الأحمال الأتية وبافتراض $\alpha = 0$.

❖ حالات خاصة:

- إذا تبين من التحليل الإنشائي العادي من الدرجة الأولى عدم تعرض العناصر المضغوطة لعزوم انحناء، وعندما يسمح للعضو المضغوط بحسابه على الضغط المركزي (مع إهمال عزوم الانحناء المطبقة بسبب صغرهما، أو من خلال إدخال معامل التكافؤ k_e المنوه عنه سابقاً، يمكن إدخال أثر التحنيب بإحدى الطريقتين التاليتين:

(1) حساب العضو المضغوط وفق قواعد الضغط اللامركزي (تأثير $N_{ui}; M_{ui}$ معاً) مع افتراض $M_{ui} = 0$ (عزوم طرفية نتيجة الأحمال العرضية) و $\alpha = 0$.

(2) إذا تحقق الشرطان التاليان:

أ- المقطع العرضي مستطيل أو مربع

ب- لا تقل مساحة التسليح في كل طرف من أطراف المقطع بالاتجاه المقاوم للتحنيب عن الطرفي 0.003 من مساحة المقطع الكلية، وأن تكون نحافة العمود $\lambda \leq 80$.
يمكن عندئذ أخذ أثر التحنيب بحساب العمود وفق قواعد الضغط المركزي بتخفيض قدرة تحمل العمود القصوى الناتجة وذلك بالتقسيم على معامل التحنيب k_b وفق الجدول (6-1). وفي حال عدم تحقق الشرطين أعلاه، يتم الحساب وفق الحالة (أ).

- في حال وجود التحنيب فقط باتجاه أحد المحاور الرئيسية، يحقق الاتجاه الآخر بعده غير خاضع للتحنيب، مع افتراض λ و h لكل اتجاه بشكل مستقل.
- في حال اللامركزيات المركبة (وجود عزمي انحناء في كلا الاتجاهين الرئيسيين)، يجري حساب كل من e_o و e_c لكل اتجاه بشكل مستقل، مع افتراض λ و h لكل اتجاه على حدة، ثم يحقق العمود على الضغط اللامركزي لكل اتجاه تحت تأثير القوة الناظمية القصوى المطبقة، وعزمي الانحناء الناتجين في كل من الاتجاهين الرئيسيين، الشكل (6-7)، حيث:

$$M_{ux} = N_u(e_{ox} + e_{ox})$$

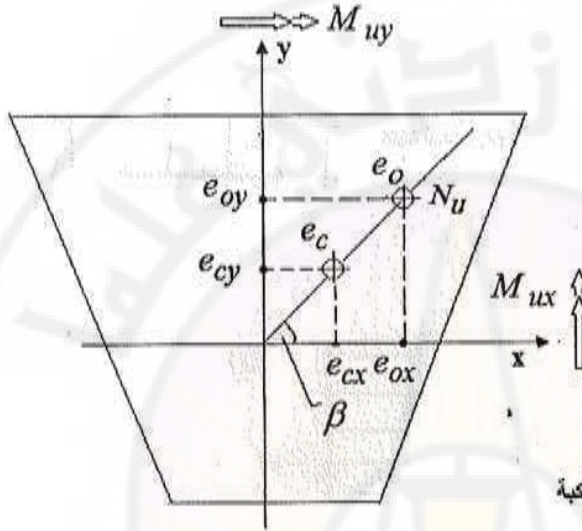
$$M_{uy} = N_u(e_{oy} + e_{oy})$$

$$\text{tg} \beta = \frac{e_{oy}}{e_{ox}}; e_{oy} = \frac{M_{ux}}{N_u} \geq e_{ay}; e_{ox} = \frac{M_{uy}}{N_u} \geq e_{ax} \quad (6-14)$$

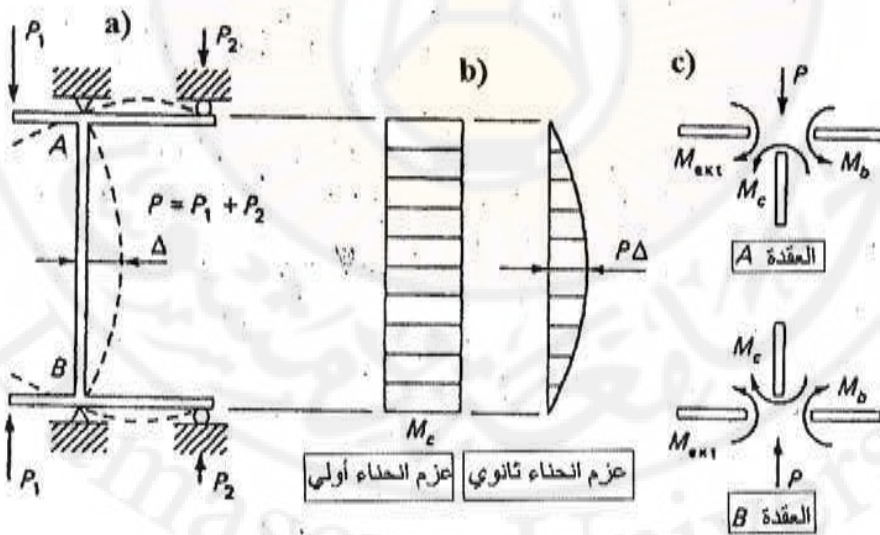
$$e_{ax} = e_a \sin \beta; e_{ay} = e_a \cos \beta.$$

- يراعى في حساب الأعمدة غير المسندة جانبياً، الخاضعة لتأثير الأحمال الأفقية أخذ أثر التحنيب في تحقيق العناصر الأخرى المرتبطة بها كالجوائز والأساسات وغيرها.
- يؤخذ أثر التقييد من قبل الجوائز في الإطارات المسندة جانبياً في الحساب، إذ يبين الشكل (6-8) مثلاً جانبياً من إطار مسند جانبياً، حيث يقاوم العزم الخارجي المطبق في العقدة A (عزم الظفر M_{ext}) قبل التحنيب من قبل الجوائز والعمود، أي: $M_{ext} = M_c + M_b$ ، وبعد التحنيب يصبح العزم الأقصى المطبق على العمود $M_{cmax} = M_c + P\Delta$ ، أي إن: $M_{cmax} = M_{ext} - M_b + P\Delta$ وهذا يعني أنه بعد تحنيب العمود يزداد دوران

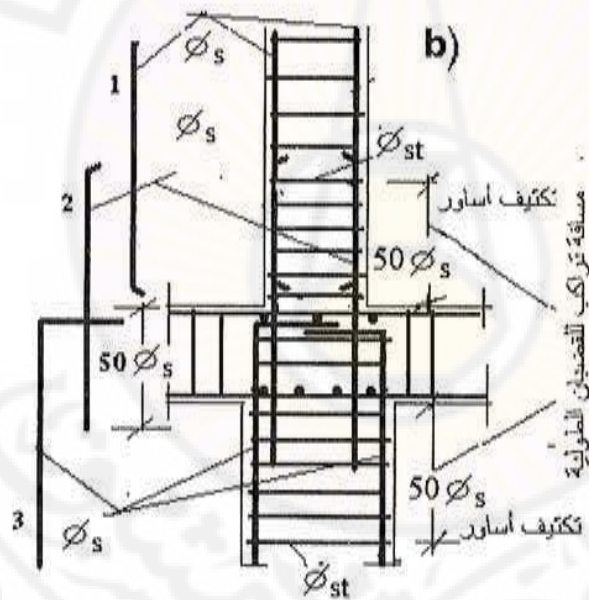
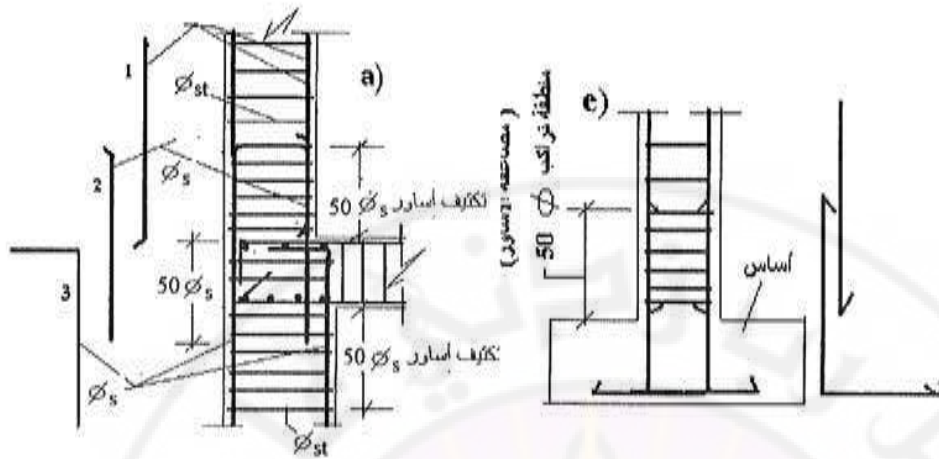
العقدة A، الأمر الذي يعني انتقال قسم متزايد من العزم إلى الجانز (يتم تحديد قيم العزم الحدية باستخدام الأحمال الحسابية المصعدة).
 يبين الشكل (6-9) أمثلة على كيفية تنفيذ تراكب قضبان التسليح الطولي لعمودين متتاليين، أو عمود مع أساس بطريقة ثني القضبان، وتبين الأشكال (6-10) و(6-11) و(6-12) و(6-13) نماذج على تسليح العقد الإطارية، بينما يوضح الشكل (6-14) مثلاً على الأعمدة قبل وبعد إزالة الكوفراج.



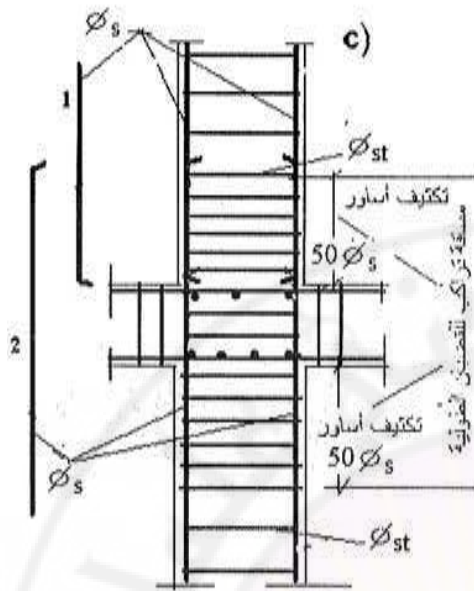
الشكل (6-7) حالة اللامركزية المركبة



الشكل (6-8) أثر التقييد الناجم عن الجوائز في الإطارات المسندة جانبياً.



الشكل (6-9) طرائق وصل القضبان الطولية في منطقة ارتباط عمودين):
 (a) و (b) - أبعاد مقاطع الأعمدة غير متساوية.
 (c) تراكب القضبان الطولية عند اتصال عمود مع أساس.



الشكل (10-6)

تابع طرائق وصل القضبان الطولية في منطقة

ارتباط عمودين:

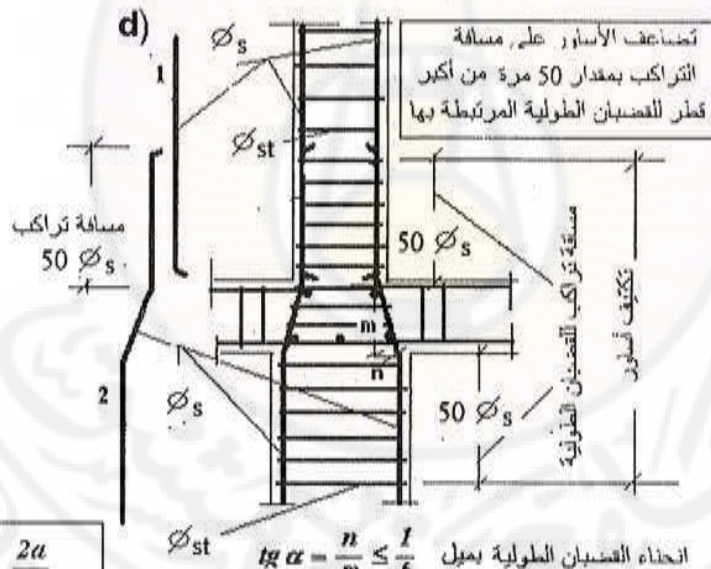
(c) أبعاد مقاطع الأعمدة نفسها،

(d) وصل القضبان الطولية عن طريق ثني

قضبان العمود السفلي (يستخدم تراكب واحد

عندما يكون عدد القضبان أصغر من ثمانية،

وتراكبان عندما يكون العدد بين 8 و 16 وهكذا).

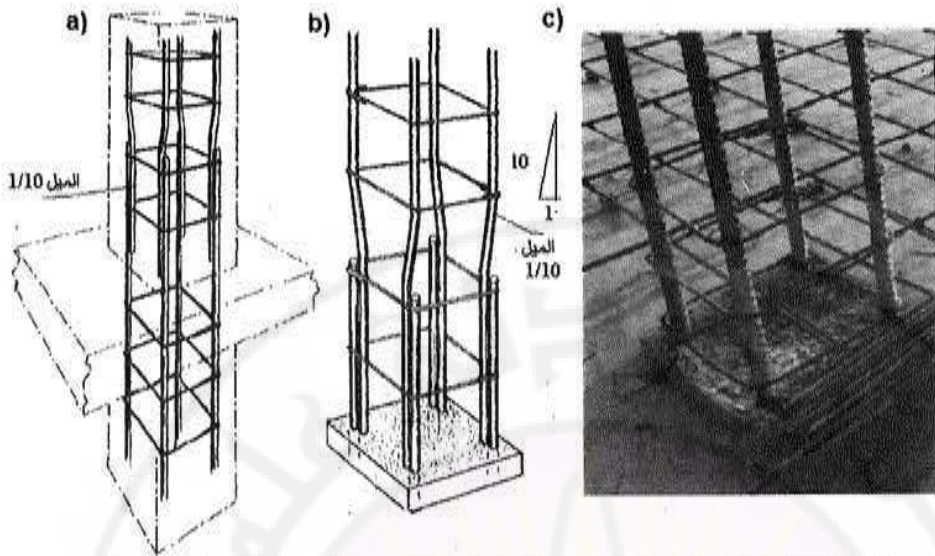


$\frac{2a}{3}$
$10 \varnothing_s$
$25 \varnothing_{st}$
25 mm

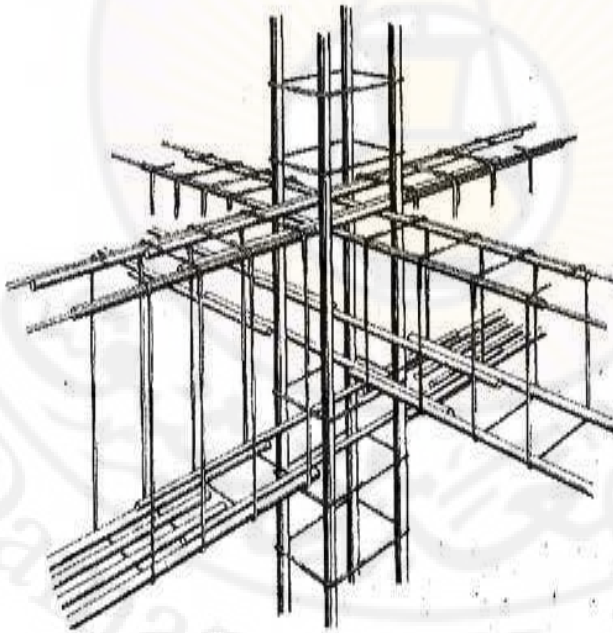
انحناء القضبان الطولية بعزل

لا يزيد تباعد الأساور في مناطق تكتيف الأساور على القيمة الأصغر من

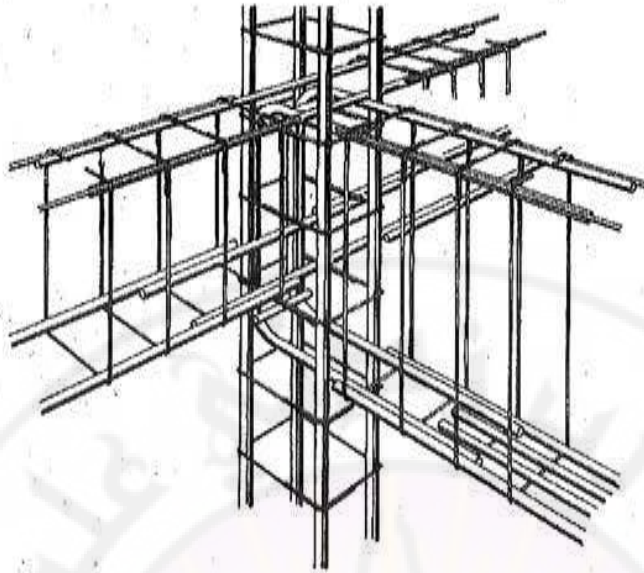
a - البعد الأصغر للعمود



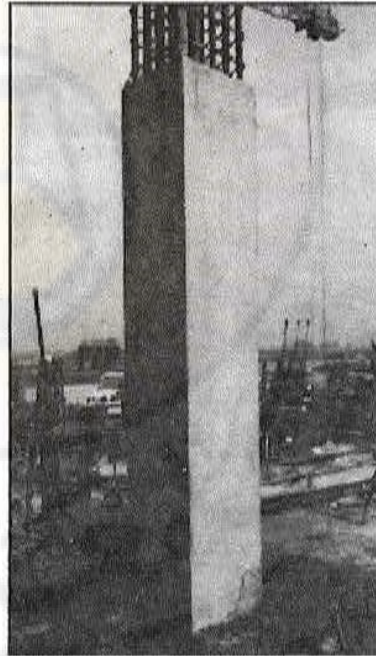
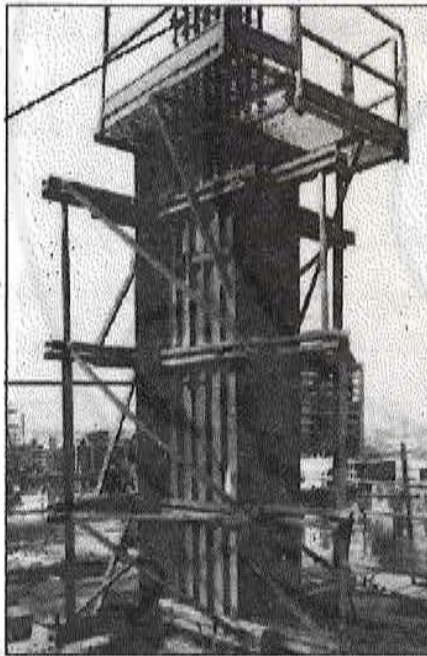
الشكل (11-6) تنفيذ تراكب قضبان التسليح باستخدام الميل المناسب لقضبان التسليح في العمود الأعلى. (a) عند التقاء عمودين متتاليين، (b) عند التقاء عمود مع أساس، (c) تسليح العمود ضمن الحصيصة.



الشكل (12-6) أحد نماذج توزيع قضبان التسليح في العقد الإطارية الداخلية.



الشكل (6-13) أحد نماذج توزيع قضبان التسليح في العقد الإطارية الطرفية.



الشكل (6-14) مثال على صب العمود بعد كفرجته وبعد إزالة الكوفراج.

الجدول (1-6) قيم معامل التحنيط k_b

$\lambda = L_0 / i$	40	42	44	46	48	50	55	60	65	70	75	80
المقطع مستطيل L_0 / b	11.5	12.1	12.7	13.3	13.9	14.4	15.9	17.3	18.8	20.2	21.7	23.1
المقطع دائري L_0 / D	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.7	15.0	16.2	17.5	18.7	20.0
k_b	1.00	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13	1.02	1.35	1.60	1.93	2.40	3.00

ملاحظة:

في حال كون العمود خاضعاً للضغط المركزي، أي عندما لا تزيد اللامركزية الأصلية e_0 على قيمة اللامركزية الطارئة e_d ، يؤخذ أثر التحنيط باعتماد $e_0 = e_d$.

4-6- الجدران الخرسانية المسلحة الحاملة R.C. Bearing Walls:

(أ) تعريف:

يعدّ الجدار المسلح المحمل بأحمال شاقولية في مستويه جداراً حاملاً، إذا كان طول مسقط مقطعه الأفقي (أي ارتفاع مقطعه العرضي) أكبر من 6 مرات سمكه. وتطبق على الجدران المسلحة الحاملة طريقة حساب الأعمدة، وكذلك شكل التسليح من حيث تفريد التسليحين الأفقي والشاقولي. وتكون الأحمال الشاقولية هي الأحمال الأساسية في الجدران الحاملة، علماً أنه من الممكن تعرضها لأحمال أفقية، ولذلك يكون تأثير الأحمال الشاقولية أكثر وضوحاً في الأبنية قليلة الارتفاع.

(ب) سمك الجدار $Wall\ Thickness$:

لا يقل سمك الجدار المسلح الحامل في المباني عن 150mm في كل الأحوال، وإضافة لذلك يراعى ما يلي:

- يمكن الاكتفاء بالسمك 150mm على كامل الارتفاع إذا كان البناء مؤلفاً من طابقين.

- إذا كان البناء مولفاً من عدة طوابق، يكون السمك الأدنى للجدار المسلح الحامل مساوياً 150mm لأعلى 5 أمتار من الارتفاع، على أن يزداد 50mm لكل 20m من الارتفاعات التالية للخمسة أمتار السابقة أو جزء منها باتجاه الأسفل، ويمكن الاستغناء عن هذا الشرط في جدران النواة الصندوقية *Box Core*.

ج) الطول الفعال للتحنيب *Effective Buckling Length* :

يحدد الطول الفعال للتحنيب في الجدران الحاملة كما يلي:

- في الأبنية التي يزيد ارتفاعها على 50m يتم اعتماد التحليل الإنشائي.
 - في الأبنية ذات الارتفاع الأقل من 50m يتم إتباع ما يلي:
- بالنسبة للجدران المقواة *Braced Walls* ضد الانزياح الجانبي يعتمد القيمة الصغرى من:
- 1- المسافة الشاقولية بين طابقتين متتاليتين.
 - 2- المسافة الأفقية بين عنصرين شاقوليين ساندين للجدار الحامل.

- بالنسبة للجدران غير المقواة ضد الانزياح الجانبي، يتم ضرب المسافة المذكورة أعلاه بين طابقتين بالمعامل α المذكور في العلاقة (5-6)، الفصل الخامس، كما هو الحال في الأعمدة. في حالة وجود أحمال مركزة فوق الجدار الحامل، تؤخذ هذه الأحمال موزعة بانتظام ضمن خطين منحرفين عن خط الارتكاز الراسي بميل مقداره 1 أفقي إلى 1 رأسي، شريطة ألا يزيد العرض المعتمد من الجدار كعرض فعال لمقاومة كل حمل مركز على المسافة بين الخطوط المنصرفة للمسافات بين الأحمال المركزة المتجاورة، ولا بد من الأخذ بالحسبان تحقيق مساحة الاستناد على الضغط الموضعي بأخذ المقاومة المميزة الموضعية للخرسانة مساوية

$$f'_{cL} = f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad \text{حيث } A_1 - \text{مساحة الجزء المعرض للحمل الضاغط، } A_2 < 3A_1 -$$

مساحة مقطع العنصر. وبشروط أن تكون A_1 مركزية مع A_2 ، وإلا تخفض قيمة الزيادة بحيث لا تزيد على 1.2 ، وتطبق هذه الزيادة على جميع حالات التحميل الموضعي المشابهة.

د) تسليح الجدران الحاملة:

- لا تقل مساحة التسليح الدنيا في الجدران المسلحة الحاملة في كل من الاتجاهين الأفقي والشاقولي (مجموع التسليح في الوجهين) عن 0.25% من مساحة المقطع العرضي A'_c للتسليح العادي وعن 0.2% من A'_c للتسليح عالي المقاومة ولتسليح الشبكات، وذلك في حال عدم تجاوز قيمة القوة القصوى الحسابية التي يتعرض لها الجدار نصف المقاومة القصوى المحسوبة

N_{III} المحسوبة كما في العلاقة (5-12)، الفصل الخامس، أو عندما تصل القوة الاستثمارية المطبقة (غير المصعدة) إلى N_{III} مقسومة على 1.6×2 .

- يمكن زيادة مساحة التسليح الدنيا الشاقولية فقط خطياً إلى 0.6% من A'_C عند وصول القوة القصوى الحسابية التي يتعرض لها الجدار N_{III} المحسوبة وفقاً للعلاقة (5-12)، أو عندما تصل القوة الاستثمارية المطبقة إلى القوة السابقة مقسومة على 1.7.

- لا تزيد مساحة التسليح الشاقولي على 2.5% من A'_C ، وذلك عند حساب الجدار كعمود حامل، وأخذ مساهمة التسليح الشاقولي في مقاومة الأحمال وفقاً للعلاقة (5-12).

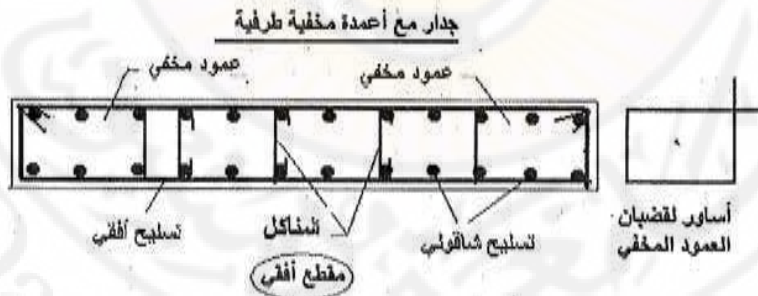
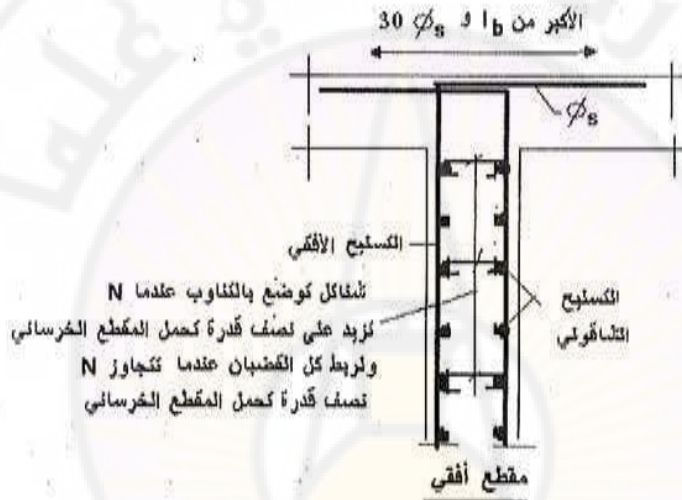
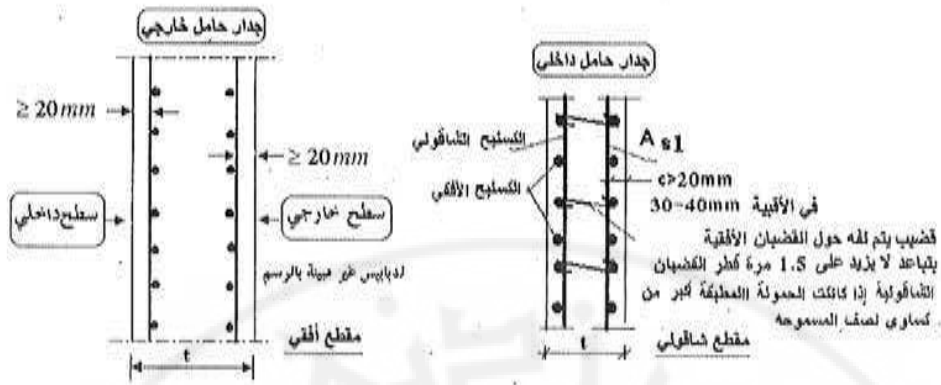
بالنسبة لترتيبات التسليح في الجدران المسلحة الحاملة، يجب إتباع ما يلي:

- يرتب تسليح الجدران الحاملة الخارجية التي لا يقل سمكها عن 20mm (عدا جدران الأقبية *Basement Walls*) على شبكتين متوضعتين قرب وجهي الجدار. توضع الشبكة الأولى على مسافة لا تقل عن 20mm من السطح الخارجي (لا تقل كمية هذه الشبكة عن نصف كمية التسليح الكلية، ولا تزيد على ثلثي كمية التسليح الكلية). ويوضع التسليح الأفقي من خارج التسليح الشاقولي، ويربط التسليح الأفقي بشناكل وفق ما هو مبين في الشكل (6-15).

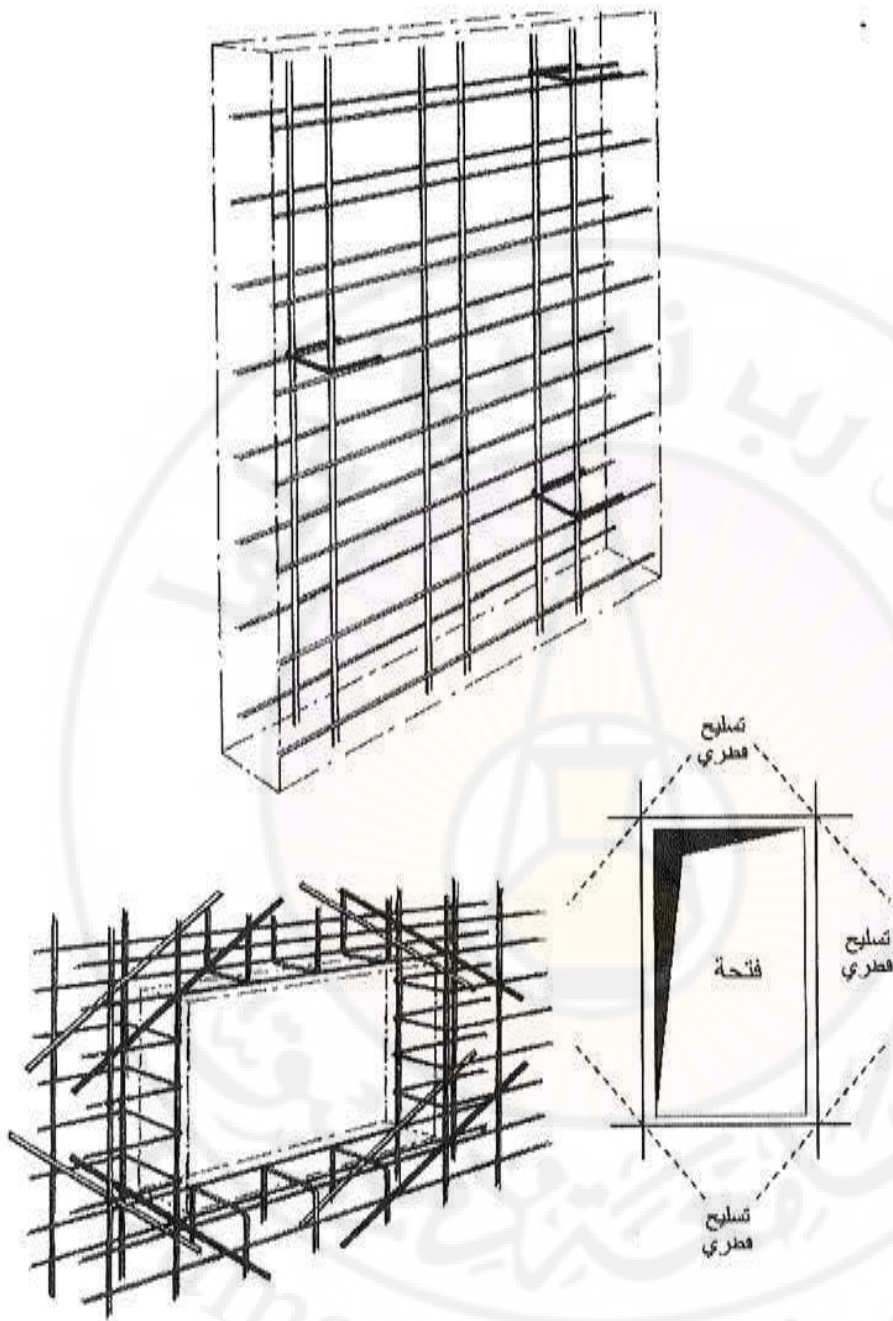
- يرتب تسليح الجدران الحاملة الداخلية التي لا يقل سمكها عن 20mm على شبكتين موجودتين قرب وجهي الجدار. توضع كل شبكة على مسافة لا تقل عن 20mm من السطح الخارجي، ولا تقل كمية كل شبكة عن نصف كمية التسليح الكلية.

- لا يقل القطر الأدنى لقضبان التسليح المستخدمة عن 10mm للتسليح الشاقولي، وعن 6mm للتسليح الأفقي (لا يقل عن 8mm في المناطق المعرضة للرطوبة).

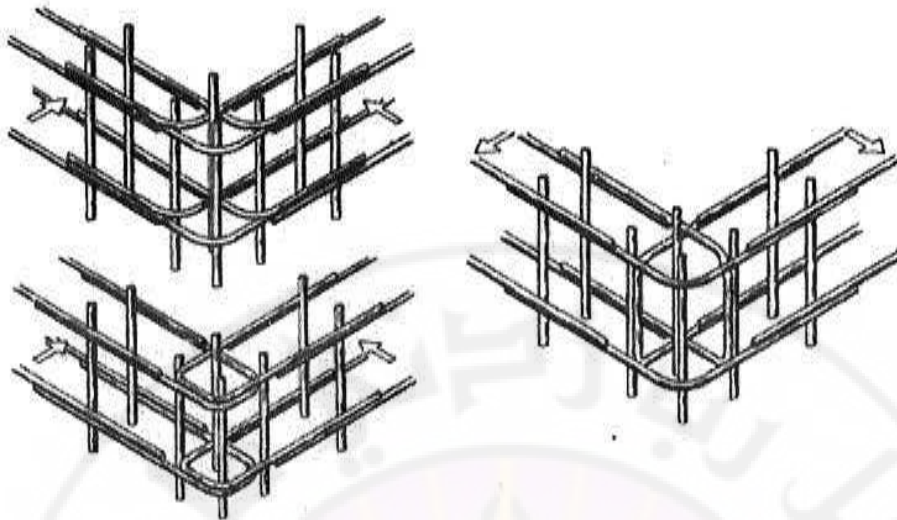
- عند استخدام شبكات ملحومة يمكن استخدام أقطار أصغر مما تقدم، على أن تستخدم شناكل أفقية فقط لربط الشبكتين ومنع تحنيب القضبان الشاقولية كما في حالة الأعمدة، ويوضع التسليح الأفقي للجدران من الخارج والتسليح الشاقولي من الداخل كما في حالة الأعمدة. ويجب استخدام الشناكل الأفقية الرابطة للشبكتين ومنع تحنيب القضبان الشاقولية إذا كانت الإجهادات المطبقة على الجدار لا تزيد على نصف الإجهاد المسموح به في حالة الحساب بطريقة حد المقاومة القصوى). وخلاف ذلك تستخدم الشناكل *Crossties* فقط لربط الشبكتين من أجل الحفاظ على مواقعها أثناء الصب، ويمكن في حالة الجدران الساندة *Retaining Walls* لطابق واحد وضع التسليح الشاقولي من الخارج.



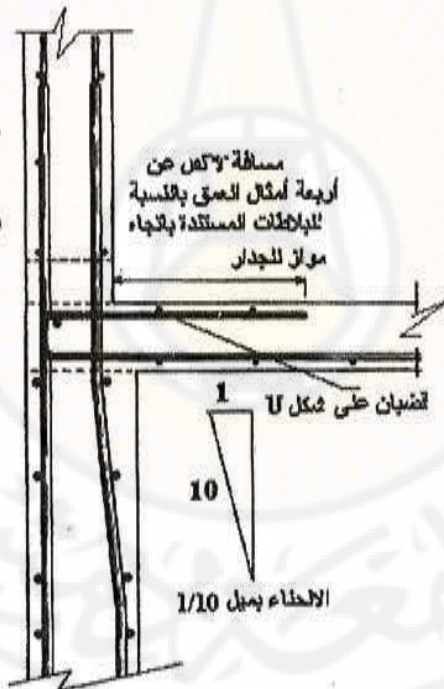
الشكل (6-15) توزيع التسليح في مقاطع الجدران الحاملة



الشكل (6-16) تسليح الجدران والفتحات الكبيرة فيها.



الشكل (6-17) تسليح الجدران الطرفية المتلاقية.



الشكل (6-18) مثال حول توزيع تسليح عقدة طرفية لجدارين علوي وسفلي مختلفي السماكة مع بلاطة. (الشناكل غير مرسومة)

- لا يزيد تباعد قضبان التسليح الشاقولي على ضعف سمك الجدار، ولا على $250mm$ ، ولا يزيد تباعد القضبان الأفقية على $250mm$ أو 15 مرة أصغر قضيب تسليح شاقولي، إذا تمت الاستفادة من هذا التسليح في مقاومة القطاع للحمال الضاغطة، ومن الواجب ربط الجدران الخرسانية المسلحة مع الأسقف أو الأعمدة أو الدعامات أو الجدران المتقاطعة بوساطة تسليح لا تقل كميته عن قضيب واحد بقطر $10mm$ كل $300mm$ لكل شبكة تسليح. ويعدّ تسليح البلاطة العلوي الموثوق في الجدار جزءاً من هذا التسليح.

يبين الشكلان (6-16) و (6-17) بعض تفاصيل تسليح الجدران الحاملة والفتحات فيها، وكذلك وضع قضبان التسليح في مناطق التقاء الجدران الطرفية القابلة للتقارب أو التباعد، ويبين الشكل (6-18) تسليح عقدة التقاء جدارين مختلفي السماكة مع بلاطة.

بالنسبة للفتحات الموجودة في الجدران الحاملة (وجدران القص أيضاً)، كالفتحات المخصصة للأبواب والنوافذ وما شابهها، يوضع على محيط هذه الفتحات التسليح الناتج من الحساب والمساوي في كل اتجاه لنصف التسليح المقطوع بالفتحة، شرط ألا يقل عن قضيبين بقطر $12mm$ أو أكبر، ويمتد هذا التسليح مسافة لا تقل عن 50 مرة القطر من زاوية الفتحة، ويجب أيضاً وضع تسليح مائل إضافي عند الزوايا، وبحيث لا يقل عن قضيبين بقطر $12mm$ القطر المستخدم أيهما أكبر عند كل زاوية، ويمكن الاستغناء عن التسليح المائل عند الزوايا بزيادة قيمة التسليح في كل اتجاه على جوانب الفتحة بمقدار 50% في كل اتجاه. وبالنسبة للجدران الحاملة ذات الفتحات الشاقولية المستمرة أو المتعددة، فيجب أن تربط أقسامه على جانبي الفتحات (اللمعات *Lintels*) بعضها مع بعض بمنسوب كل طابق بعنصر أفقي خرساني مسلح. يمكن اعتبار هذه اللمعات الشاقولية أعمدة، مع التقيد بالأبعاد والأقطار ونسب التسليح الدنيا الواردة بالنسبة للأعمدة.

6-4- أمثلة حسابية توضيحية *Illustrative Calculated Examples*

(أ) أمثلة محلولة:

مثال (1):

يبين الشكل (6-19) عموداً من الخرسانة المسلحة متمصلاً في طرفيه، ويخضع لأحمال استثمارية: مينة G وحية P والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي والقص، وباستخدام طريقة حد المقاومة القصوى، وبفرض أنه ممنوع من التحنيب بالاتجاه $(y-y)$):

(1) رسم منحنى الترابط الداخلي لمقطع العمود وفق الأبعاد وقيم التسليح المعطاة، وذلك باستخدام رسم مقياس مناسب، مبيناً على المنحنى القيمة العظمى لعزم الانحناء وقيمة هذا العزم في الحالة التوازنية،

(2) بفرض أن العمود مسند جانبياً باتجاه المحور $x-x$ ، يطلب تحديد أكبر قيمة للحمولتين P و G يمكن تطبيقها على العمود.

(3) بفرض أن العمود غير مسند جانبياً بالاتجاه $x-x$ ، يطلب تحديد أكبر قيمة للحمولتين P و G يمكن تطبيقها على العمود بفرض أن: $\alpha = \frac{L_0}{L} = 2.5$; $\beta = 1.3$; $\Omega = 0.75$

$$\text{وكذلك } f'_c = 20 \text{ MPa}; f_y = 240 \text{ MPa} \text{ ..}$$

الحل:

• الطلب (1):

لرسم مخطط الترابط الداخلي للمقطع المفروض، لا بد من استخدام علاقات التوازن وملحقاتها، وهي العلاقات التي تضمن تحديد $f'_s, f'_s, \frac{N_u}{\Omega}, \frac{M_u}{\Omega}$ من أجل قيم y أي إنه يوجد خمسة مجاهيل مقابل أربع علاقات /توجد نقاط أساسية يمكن فيها حساب قيمة y ، ومن أجل النقاط الأخرى يجب فرض y ومتابعة تحديد المتحولات الأخرى، وهذا ما هو موضح في الجدول (6)- (2).

يمثل ترتيب النقطة (1) المقاومة النظرية لمقطع معرض لضغط ناظمي صافي (محوري) دون ترافقه مع أي عزم انحناء. وتمثل النقطة (5) الوضعية التوازنية، ويعبر ميل الخط الواصل بين النقطتين (0) و (5) بالنسبة لمحور الترتيب اللامركزية التوازنية $eb = tg\beta$ ، وباستخدام إحداثيات النقطة التوازنية (5) ينتج أن $eb = 0.233m$. وتمثل فاصلة النقطة (6) على محور الفواصل أقصى عزم حدي يقاومه المقطع عندما يترافق مع قوة محورية مبيّنة على محور الترتيب، وقد تم تحديد ذلك بعد $y = 0.5h = 300mm$ ، اعتماداً على اشتقاق معادلة العزم بالنسبة للمتحول y ومساواة هذا المشتق للصفر (للأمان تؤخذ القيمة الأصغر بين العزم التوازني والعزم المحسوب على أساس $y = 0.5h$). يمكن استناداً إلى معطيات الجدول السابق رسم منحنى الترابط المطلوب، وهو موضح على الشكل (6-20).

• الطلب (2):

من الواضح أن العمود قصير، حيث إن $\frac{L_o}{b} = \frac{400}{60} < 12$ ، أي لا توجد لا مركزية إضافية ناتجة عن التحنّب، وقد تبين من الطلب الأول أن:

$$\left(\frac{M_u}{\Omega}\right)_{max} = 0.542 \text{ MNm}$$

$$\frac{N_u}{\Omega} = 2.04 \text{ MN}$$

وكذلك:

$$\text{ولأن } \phi = 0.9 \text{ وفقاً للعلاقة: } 0.9 \geq \phi = 0.9 - 0.5 \left(\frac{N_u}{N_c} - 0.1 \right) \geq 0.7$$

حيث: $N_c = 0.85 f'_c A_c$ ، ينتج:

$$M_{u \max} = 0.9 \times 0.542 = 0.49 \text{ MNm};$$

$$N_u = 0.9 \times 2.04 = 1.84 \text{ MN}$$

بمساواة العزم الحسابي المطبق نتيجة تأثير الحمولة الحية P مع العزم الأعظمي المقاوم للمقطع،

أي: $M_{u \max} = \frac{1.8PL}{4}$ ، ينتج أن $P = 0.242 \text{ MN}$ ، ولأن القوة الناظمية هنا ممثلة

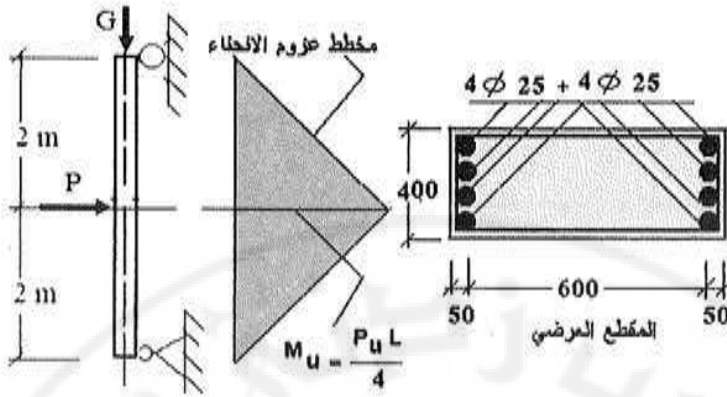
بالحمولة الميتة G بعد التصعيد، ينتج أن $G = \frac{N_u}{1.5} = 1.23 \text{ MN}$

ملاحظة: تم حساب العزم الحدي الأقصى بأخذ القيمة الأصغر من افتراض $y = 0.5h$ و

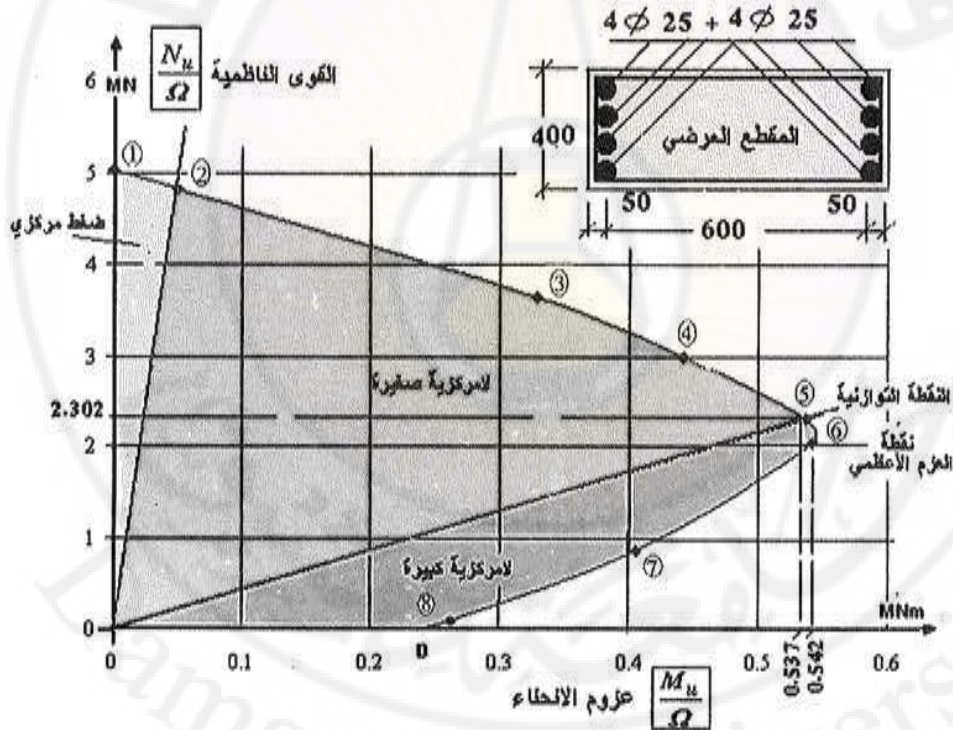
$$y = y_b$$

الجدول (2-6) تحديد عدد من النقاط $\left(\frac{M_u}{\Omega}, \frac{N_u}{\Omega}\right)$ لرسم منحنى الترابط المطلوب في المثال المحلول (1).

النقاط	x	y	f'_s	f_s	$\frac{M_u}{\Omega}$	$\frac{N_u}{\Omega}$
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MNm]	[MN]
1	∞	600	240	240	0	5.023
2	705.9	600	240	139.12	0.05	4.824
3	550	467.5	240	0	0.328	3.65
4	470.6	400	240	-106.31	0.442	2.983
5	398.3	338.53	240	-240	0.537	2.302
6	352.94	300	240	-240	0.542	2.04
7	117.82	100	240	-240	0.406	0.86
8	58.82	50	94.5	-240	0.252	0.055



الشكل (6-19) حساب القيم العظمى للأحمال المطبقة على العمود لمدروس في المثال المحلول (1).



الشكل (6-20) مخطط الترابط المطلوب لمقطع العمود المدروس في المثال المحلول (1).

• الطلب (3):

من الواضح أن العمود سيتعرض للتحنيب بالاتجاه $x-x$ ، ولذلك يعد طويلاً. ولا بد في البداية من

$$\lambda = \frac{L_0}{i_x} \approx \frac{2.5 \times 400}{0.3 \times 60} \approx 55$$

تحديد قيمة نسبة النحافة، أي:

سيتعرض العمود بعد التحنيب لوجود لامركزية إضافية e_c يلجم عنها عزم إضافي يضاف إلى العزم الأصلي الخارجي المطبق، لذلك:
- اللامركزية الأصلية قبيل التحنيب:

$$e_o = \frac{M_{ur \max}}{N_u} = \frac{0.542}{2.04} \approx 0.268m = 26.8cm$$

- اللامركزية الإضافية بعد التحنيب:

$$e_c = \frac{\beta \lambda^2 (e_o + h)}{30000} \leq \frac{\beta \lambda^2 h}{15000} \Rightarrow$$

$$e_c = \frac{1.3 \times 55^2 (0.268 + 0.6)}{30000} \leq \frac{1.3 \times 55^2 \times 0.6}{15000}$$

هذا يعني أن $e_c = 0.114m$ ، وبملاحظة أن:

$$M_{u \max} = 0.9 \times 0.542 = 0.49 MNm;$$

$$N_u = 0.9 \times 2.04 = 1.84 MN$$

من الطلب الثاني، ينتج:

$$M_{u \max} = \frac{1.8PL}{4} + N_u e_c \Leftrightarrow$$

$$0.49 = \frac{1.8P \times 4}{4} + 1.84 \times 0.114 \Rightarrow P = 0.156 MN.$$

وكذلك $G = \frac{N_u}{1.5} = 1.23 MN$ ، أي إن القوة الأفقية المسببة للعزم يجب تخفيضها.

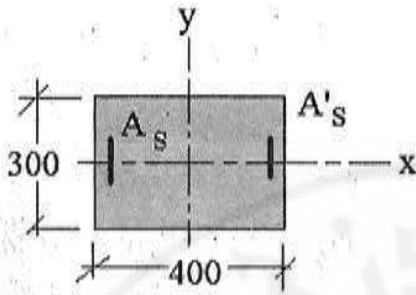
مثال (2):

عمود قصير من الخرسانة المسلحة مقطعه العرضي كما في الشكل (6-21)، وهو يخضع

لتأثير عزم انحناء حدي قدره $\frac{M_u}{\Omega} = 0.18 MNm$ بالاتجاه $x-x$ مترافق مع قوة ضاغطة

مركزياً قيمتها الحدية $\frac{N_u}{\Omega} = 0.20 MN$ والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي للعمود) إيجاد التسليح

الطرفي اللازم، بفرض أنه متناظر، وكذلك $a = d' = 5\text{cm}$
 $f'_c = 20\text{MPa}; f_y = 240\text{MPa}$



الشكل (6-21) مقطع العمود المدروس في المثال المحلول (2).

الحل:

- بيان نوع اللامركزية: من الواضح أن اللامركزية المطبقة كبيرة، إذ إن:

$$e = \frac{0.18}{0.2} = 0.9\text{m} > 0.5h = 0.2\text{m}$$

يمكن التأكد من ذلك بمقارنة e, y, N_u مع ما يقابلها في الحالة التوازنية e_b, y_b, N_{ub} هنا

مثلاً، ولأن $\frac{N_{ub}}{\Omega} = 1.22\text{MN} > \frac{N_u}{\Omega} = 0.2\text{MN}$ ، حيث:

$$y_b = \frac{535.5d}{630 + f_y} = 21.54\text{cm}$$

وبافتراض وصول التسليح الأبعد والأقرب في الحالة التوازنية إلى السيلان (الخصوع)، أي:

$$f_s = -f_y = -240\text{MPa} \text{ و } f'_s = +f_y = +240\text{MPa};$$

إذ يجب أن يكون:

$$-f_y \leq f'_s = 630 \times \frac{(y_b - 0.85d')}{y_b} \leq +f_y$$

$$-f_y \leq f_s = 630 \times \frac{(y_b - 0.85d)}{y_b} \leq +f_y$$

- حساب ارتفاع منطقة الضغط الافتراضية الفعلية:

من معادلة توازن القوى:

$$\frac{N_u}{\Omega} = \frac{N_{ur}}{\Omega} = 0.85b f'_c y + A'_s f_y - A_s f_y \Rightarrow$$

$$y = \frac{N_u}{\Omega 0.85b f'_c} = \frac{0.2}{0.9 \times 0.85 \times 0.3 \times 20} = 0.044\text{m} = 4.4\text{cm}$$

$$0.7 \leq \Omega = 0.9 - 0.5 \left(\frac{N_u}{N_c} - 0.1 \right) \leq 0.9 \Rightarrow \Omega = 0.9 \quad \text{حيث:}$$

$$N_u = \Omega \times 20 \text{ MN}; \quad N_c = \Omega \times 0.85 f'_c b h = \Omega \times 204 \text{ MN} \quad \text{لأن:}$$

- تحديد التسليح:

تستخدم هنا معادلة توازن العزوم حول مركز ثقل التسليح الأبعد (المشدود):

$$M_{ur} = M_u = N_u e_{Ns} = \Omega [0.85 f'_c b y (d - 0.5y) + A'_s f_y (d - d')]$$

حيث $e_{Ns} = e + 0.5h - a = 1.07 \text{ m}$ ، ومنه $A'_s = A_s = 19.6 \text{ cm}^2$ ، ولذلك يمكن

استخدام $4\phi 25$ في كل طرف.

مثال (3):

في الإطار غير المسند جانبيًا، الشكل (6-22)، وباعتماد قيمة الصلابة على العزم EI ،

يطلب ما يلي (يهمل الوزن الذاتي للعمود):

(1) تحديد نوع العمود AB من حيث النحافة.

(2) بفرض أن العمود AB يتعرض في نهايته لعزوم انحناء حدية باتجاه واحد قدرها

$M_{uA} = 200 \text{ kNm}$ و $M_{uB} = 400 \text{ kNm}$ ، مترافقة مع قوة ضاغطة مركزية حدية قدرها

150 kN ، ما قيمة العزم الحسابي المطبق على العمود؟ وهل يعدّ العمود محققاً؟ علماً أن:

$$a = d' = 5 \text{ cm}; \quad \beta = 1.3; \quad f'_c = 20 \text{ MPa}; \quad f_y = 2400 \text{ MPa}; \quad A_s = A'_s = 4\phi 20$$

الحل:

(1) لأن الإطار غير مسند جانبيًا، يجب تحديد نسبة قساوات الأعمدة إلى الجوائز في عقد

الارتباط A و B .

$$\Psi_A = \frac{s_c = \sum \left(\frac{EI}{L} \right)_{icA} = 2 \times \frac{EI}{L}}{s_b = \sum \left(\frac{EI}{L} \right)_{ibA} = \frac{EI}{L}} = 2$$

$$\Psi_B = \frac{s_c = \sum \left(\frac{EI}{L} \right)_{icB} = 5 \times \frac{EI}{L}}{s_b = \sum \left(\frac{EI}{L} \right)_{ibB} = 2 \times \frac{EI}{L}} = 2.5$$

وبالعودة إلى الشكل (5-4) في الفصل الخامس، ينتج أن $\alpha = 1.65$ ، ويكون الطول الفعال

على التحنيب للعمود المطلوب:

$$L_0 = \alpha L = 1.65 \times 5.0 = 8.25m$$

وتحدد نسبة النحافة بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{L_0}{i_x} = \frac{825}{0.3 \times 60} = 45.8 > 40$$

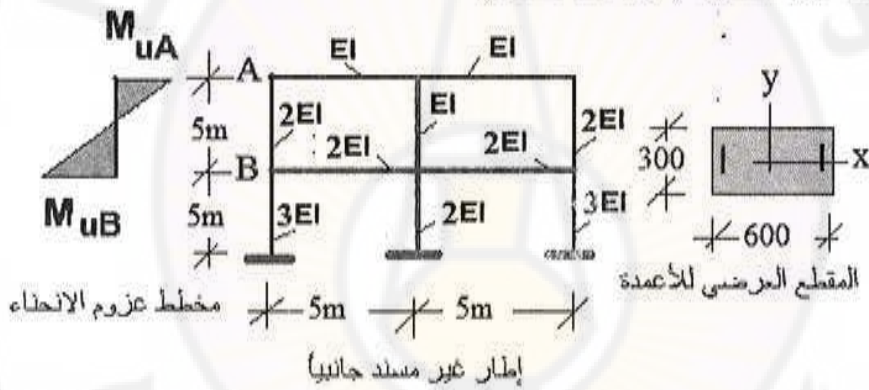
أي إن العمود طويل.

(2) يتعرض العمود إلى انحناء ثنائي (باتجاهين متعاكسين)، ولذلك يكون العزم الحسابي مساوياً:

$$M_{u1} = 0.6 M_{uB} - 0.4 M_{uA} \geq 0.4 M_{uA} \Rightarrow$$

$$M_{u1} = 160kNm$$

من أجل التأكد من سلامة العمود، يمكن هنا استخدام قواعد الضغط المركزي، أي باستعمال معامل التحنيب k_b ، لأن $(\lambda < 80)$ ، وكذلك نسبة التسليح في كل طرف أكبر من 0.003 ، ومن الممكن أيضاً استخدام قواعد الضغط اللامركزي مع الأخذ بالحسبان اللامركزية الإضافية المتولدة نتيجة التحنيب (يترك ذلك للطالب).



الشكل (6-22) مقطع العمود المدروس في المثال المحلول، (3).

مثال (4):

المطلوب التحقق من سلامة مقطع العمود المربع القصير الموضح في الشكل (6-23) وفق

الأبعاد والتسليح المفروض، حيث يتعرض لتأثير حمولة حديدية ناظرية مركزية قدرها

$N_u = 300kN$ مترافقة مع عزوم انحناء حديدية حول المحورين المركزيين x و y قدرهما

$M_{ux} = M_{uy} = 150kNm$ ، علماً أن التسليح الطولي في كل طرف $3\phi 28$ وكذلك:

$$f'_c = 25 MPa; f_y = 300 MPa; a = d' = 40mm$$

الحل: بالعودة إلى الطريقة المتبعة في الكود السوري (طريقة مقلوب الخمولة)، يمكن إتباع ما يلي لتحديد القيم العظمى التي يقاومها المقطع نتيجة دراسته تحت تأثير الانحناء الأحادي *Uniaxial Bending* والقوة الناطمية المركزية المرافقة:

- استخدام علاقات التوازن المعروفة، ولاسيما العلاقات (6-3) وحتى (6-7)، أو استخدام علاقة توازن القوى وتوازن العزوم حول نقطة تطبيق القوة الخارجية والتحقق من الإجهادات الناتجة في التسليح وغير ذلك.

- يمكن تحديد قيمة القوة العظمى المقابلة للامركزية المفروضة $e = \gamma g \beta$ اعتماداً على مخطط الترابط المرسوم بدقة كافية ومقياس رسم مناسب. وذلك برسم خط من المبدأ يميل بزاوية β على محور الترتيب في المخطط المذكور.

- يمكن الاعتماد العلاقة بين اللامركزية المطبقة $e = \gamma g \beta$ والقوة الحدية المرافقة، أي تحديد الثنائية (e, N_{II}) باستخدام مخطط الترابط الناتج للمقطع المدروس في حالة الضغط اللامركزي البسيط.

باستخدام علاقات التوازن، يمكن هنا تحديد القوة الحدية وعزم الانحناء المرافق بدراسة المقطع وفق قواعد اللامركزيات البسيطة، ولأن المقطع المفروض متناظر من حيث الأبعاد والتسليح، وكذلك العزوم حول المحورين الإحداثيين، ستتم دراسة المقطع بخضوعه للعزم M_{ux} حول المحور xx والقوة الناطمية N_{II} ، حيث التسليح الطرفي متناظر وقدره $A_s = A'_s = 3\phi 28$. اللامركزية المطبقة بالنسبة لمركز النقل:

$$e = e_y = \frac{M_{ux}}{N_{II}} = \frac{150}{300} = 0.5m = 50cm$$

وهذا يعني وقوع نقطة تطبيق القوة الضاغطة خارج المقطع (وواضح أن اللامركزية كبيرة. لا مركزية القوة المطبقة بالنسبة لمركز ثقل التسليح الأبعد:

$$e_s = e + 0.5h - a = 0.66m = 66cm$$

لا مركزية القوة المطبقة بالنسبة لمركز ثقل التسليح الأقرب:

$$e'_s = e - 0.5h + d' = 0.34m = 34cm$$

لا مركزية القوة المطبقة بالنسبة لمركز ثقل محصلة إجهادات الضغط في الخرسانة:

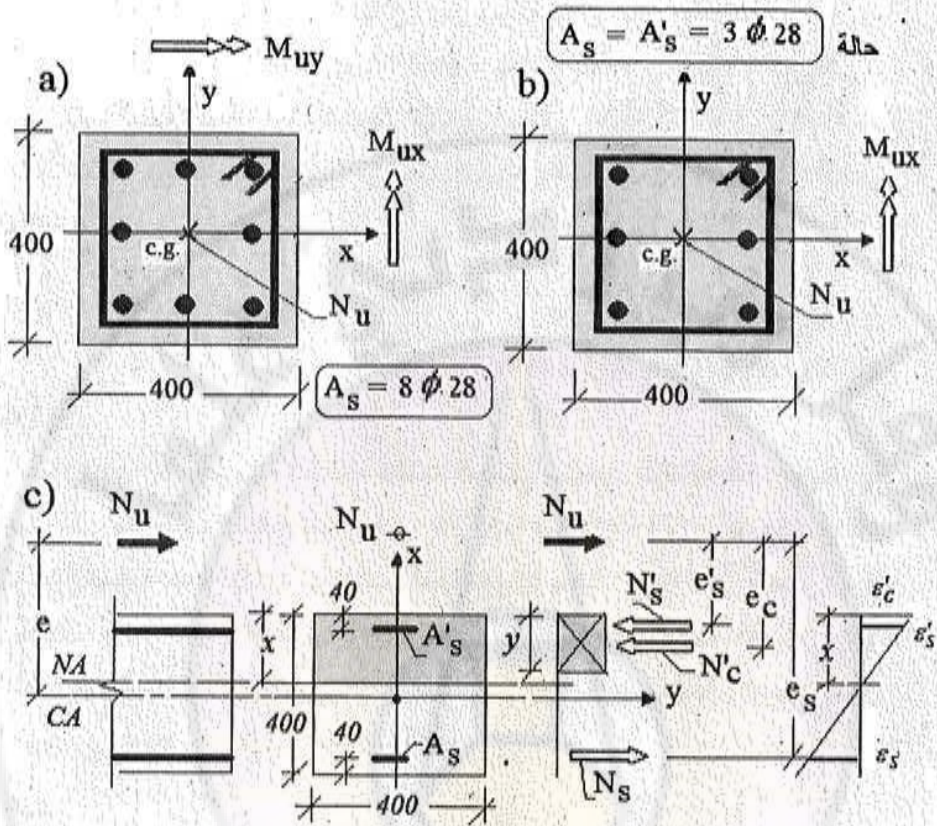
$$e_c = e - 0.5h + 0.5y = 30 + 0.5y$$

علاقة توازن العزوم حول نقطة تطبيق القوة N_{II} :

$$N_s e_s - N'_s e'_s - N'_c e_c = 0$$

$$y^2 + 60y - 417 = 0 \Rightarrow y = 6.3 \text{ cm}$$

بالتبديل والإصلاح ينتج:



الشكل (23-6) المقطع العرضي للعمود المدروس في المثال المحلول (4).

(a) اللامركزية مركبة، (b) اللامركزية بسيطة ($e_y = 0$)

(c) مخطط الإجهادات والتشوهات (اللامركزية بسيطة).

وقبل تحديد القيمة الأكبر للقوة المطبقة، يجب التأكد من وصول التسليح الأبعد والأقرب إلى السيلان كما يلي:

$$\epsilon_s = 0.003 \times \frac{0.85d - y}{y} = \frac{0.85 \times 400 - 6.3}{6.3} = 0.0132 > \frac{f_y}{E_s}$$

أي إن التسليح الأبعد يصل إلى السيلان.

$$\varepsilon'_s = 0.003 \times \frac{y - 0.85d'}{y} = \frac{6.3 - 0.85 \times 4}{6.3} = 0.0087 > \frac{f_y}{E_s}$$

أي إن التسليح الأقرب يصل إلى السيلان. ومن معادلة توازن القوى الأفقية:

$$N_{urx} = \Omega(N'_c + N'_s - N_s = 0 \Rightarrow N_{urx} \approx 482 \text{ kN}$$

$N_{uro} \approx 2732 \text{ kN}$ تساوي القوة الحديدية الموافقة لحالة الضغط المركزي الصافي
ويلاحظ التناظر في المقطع المدروس من حيث التسليح والأبعاد والعزوم ينتج أن، بناء على
العلاقة (6-9).

$$\frac{1}{N_{ur}} = \frac{1}{482} + \frac{1}{482} - \frac{1}{2732} \Rightarrow$$

$$N_{ur} = 261 \text{ kN} > N_u = 150 \text{ kN} \dots \text{Ok.}$$

مثال (5):

عمود قصير من الخرسانة المسلحة مقطعه العرضي مستطيل طوله 50 cm وعرضه 30 cm
ومسلح في كل طرف بتسليح طولي قدره $5T20$ ، الشكل (6-24)، وهو يخضع لتأثير قوة
ضاغطة حسابية حديدية $N_u = 35t$ تبعد نقطة تطبيقها بمقدار 38 cm عن المحور المركزي xx
و 20 cm عن المحور المركزي yy ، وقد تبين أن قيمة القوة الحديدية القصوى وفق قواعد
اللامركزية البسيطة $N_{urx} \approx 75t$ ، والمطلوب التحقق من سلامة العمود بفرض أن:

$$\Omega = 0.9 ; f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2 ; f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

الحل:

من أجل التحقق من سلامة العمود المدروس، تستخدم هنا أيضاً طريقة مقلوب الحمولة، ومن
أجل ذلك، حيث إن القيمة الحديدية القصوى، عندما تكون اللامركزية باتجاه المحور yy تساوي
الصفر، أي $N_{urx} \approx 75t$ ، ويجب دراسة الوضعية الأخرى عندما تساوي قيمة اللامركزية
القصوى باتجاه المحور xx الصفر، أي تحديد $N_{ury} = ?$ ، وكذلك حساب القيمة القصوى للقوة
في حالة الضغط المركزي الصافي، أي: $N_{uro} = ?$.

دراسة حالة اللامركزية البسيطة، الشكل (6-24-a):

بفرض أن الإجهادات في التسليح الأقرب والأبعد تساوي إجهاد الخضوع f_y ، على أن يتم
التحقق من ذلك لاحقاً:

$$N_s = N'_s = 12.71 \times 2800 = 35588 \text{ kg.}$$

$$N'_c = 0.85 \times 210 \times 50 \times y = 5925y \text{ kg.}$$

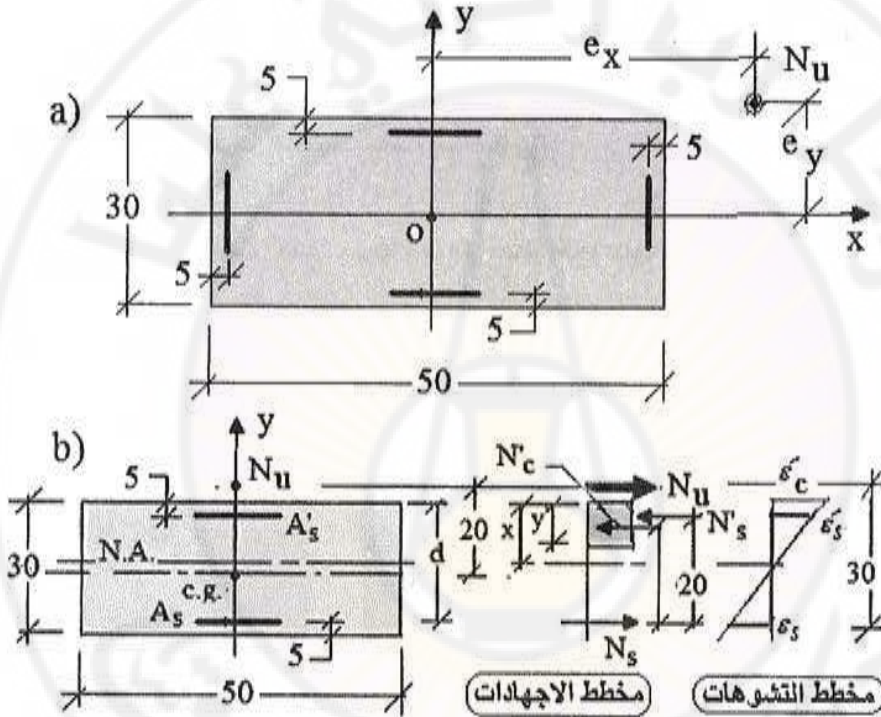
من علاقة توازن القوى:

$$N_{ury} = \Omega (N'_c - N_s + N'_s) .$$

$$\frac{N_{ury}}{\Omega} = 0.85 \times 210 \times 50 \times y = 5925y \text{ kg.} \quad \text{ينتج:}$$

ومن علاقة توازن العزوم حول مركز ثقل تسليح الشد (الأبعاد) والتبديل، تنتج معادلة من الدرجة الثانية بمجهول واحد هو الارتفاع الافتراضي لمنطقة الضغط y :

$$y^2 + 10y - 159 = 0 \Rightarrow y \approx 7.7 \text{ cm}$$



الشكل (6-24) مقطع العمود المدروس ومخطط الإجهادات والتشوهات وفق اللامركزية البسيطة المدروسة، المثال المحلول (5).

وينتج أن:

$$\frac{N_{ury}}{\Omega} = 68276 \text{ kg} \Rightarrow N_{ury} = 0.9 \times 68276 = 61448.4 \text{ kg.}$$

ومن أجل التحقق من وصول التسليح الأقرب والأبعد إلى السيلان، يلاحظ أن:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_c \times \frac{x-d'}{x} = \varepsilon'_c \times \frac{y-0.85d'}{y} > \frac{f_y}{E_s}$$

$$y < y_b$$

وكذلك :

أي إن كلا التسليحين يصلان إلى السيلاان (يمكن للطالب أن يتحقق من ذلك)
القوة القصوى في حالة الضغط المركزي (اللامركزية تساوي الصفر):

$$N_{uro} = \Omega (0.85 f'_c A'_c + A'_s f_y) = 412041 \text{ kg}$$

بتطبيق علاقة مقلوب القوى:

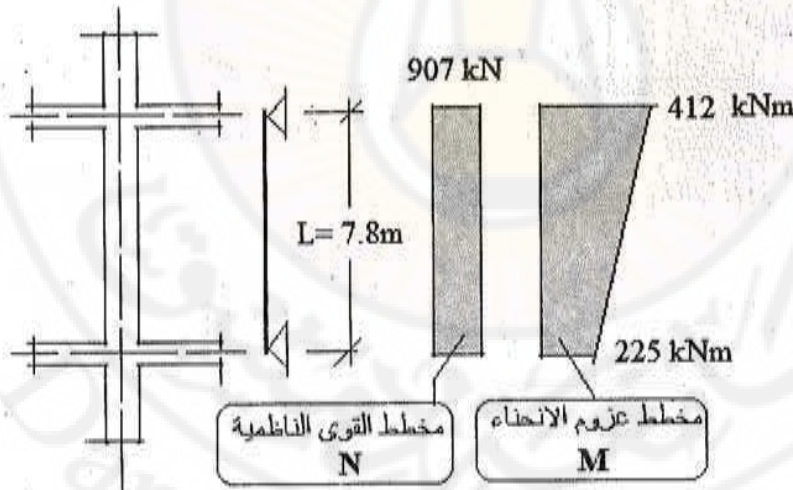
$$\frac{1}{N_{ut}} = \frac{1}{75000} + \frac{1}{61448} - \frac{1}{412041} \Rightarrow$$

$$N_{ut} = 3676t > N_u = 35t \dots Ok.$$

(ب) أمثلة غير محلولة (تفرض المعطيات الناقصة عند الضرورة):

مثال (1):

عمود في هيكل حامل لبناء عادي متعدد الطوابق تتوفر فيه عناصر تقوية مقاومة للانزياح الجانبي (مسند جانبياً)، مقطعه العرضي مستطيل أبعاده 50cm و 40cm، ومسلح بتسليح طولي طرفي $A_s = A'_s = 18 \text{ cm}^2$ ، والمطلوب (وفقاً لقواعد الضغط المركزي):



الشكل (6-25) مقطع العمود المدروس في المثال غير المحلول (1).

1) حساب أكبر عزم انحناء حدي يتحمله المقطع مع القوة النازلية الحدية المرافقة لهذا العزم، بفرض أن $\epsilon = 0.8$ لهذه الحالة.

2) بفرض أن المقطع المحدد في الطلب السابق هو مقطع لعمود آخر يتعرض لعزوم انحناء وقوى ناظرية بالقيم الاستثمارية نتيجة الأحمال الحية، الشكل (6-25)، يطلب التحقق من سلامة هذا العمود، علماً أن $e_c = \beta \lambda^2 h / 15000$ ، وكذلك:

$$a = d' = 5\text{cm}; f'_c = 20\text{MPa}; f_y = 240\text{MPa} \cdot \beta = 1.0$$

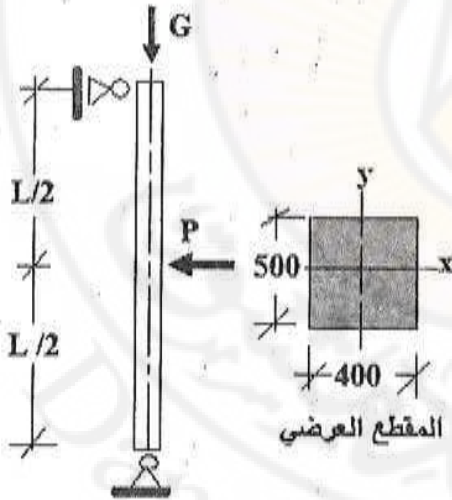
مثال (2):

يبين الشكل (6-26) عموداً من الخرسانة المسلحة مسنوداً جانبياً وخاضعاً للزلازل مع مقطعه العرضي، طوله L ويخضع لأحمال استثمارية: لميئة G وحية P ، والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي):

1) بفرض أن $L=4\text{m}$ و $P=0$ ما قيمة G_{\max} ؟

2) بفرض أن $L=6\text{m}$ ، $P \neq 0$ ، وأن التسليح متناظر ومركز في طرفي المقطع المعرض للتحنيب وقدره $A_s = A'_s = 4\phi 20$ ، يطلب تحديد P_{\max} و G المرافقة علماً أن:

$$a = d' = 50\text{mm}, f'_c = 22\text{MPa}, f_y = 300\text{MPa}, \beta = 1.3$$



الشكل (6-26) العمود المدروس في المثال غير المحلول (2).

مثال (3):

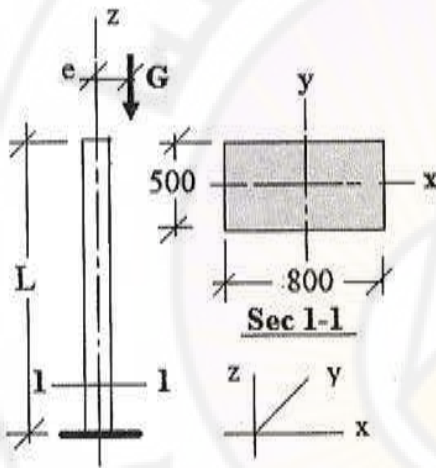
عمود مسند جانبياً من الخرسانة المسلحة وموثوق في نهايته السفلى بوثاقه صلدة وحر من الأعلى وغير معرض لأحمال زلزالية، ومقطعه العرضي مستطيل كما في الشكل (6-27). يتعرض العمود لتأثير حمولة مركزة استثنائية مية G ، ويفرض أن العمود ممنوع من التحنيب باتجاه المحور $y-y$ ، يطلب (بإهمال الوزن الذاتي):

أ - تحديد أكبر قيمة للحمولة G بفرض أن $L = 3m; e = 0; k_e = 1; \mu'_{max} = 5\%$.

ب - بفرض أن التسليح الطرفي باتجاه التحنيب $8\phi 25$ ، $A_s = A'_s$ ، ما القيمة المسموح بها

e_{max} ، علماً إن: $\beta = 1.3; \Omega = 0.75; a = d' = 50mm$

وأيضاً: $f_y = 420MPa; f'_c = 20MPa$



الشكل (6-27) العمود المدروس

في المثال غير المحلول (3)

مثال (4):

للعمود الخرساني المسلح المبين في الشكل (6-28) والمحمل بالحمولة الحية الاستثنائية المركزة

P ، يطلب ما يلي (بإتباع طريقة حد المقاومة القصوى):

(1) حساب أكبر قيمة للحمولة P عندما $e=0$ (يهمل الوزن الذاتي).

(2) حساب أكبر e عندما $P=820kN$ ، حيث إن:

$a = d' = 30mm, f'_c = 22MPa, f_y = 300MPa,$

$\beta = 1.3; e_c = 10cm; k_b = 1.95; \mu_s = \mu'_s = 1.3\%$

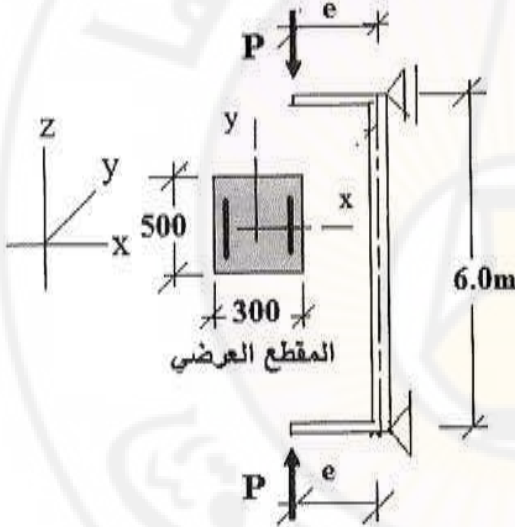
مثال (5):

عمود من الخرسانة المسلحة محمل بالقوتين الناظميتين الحيتين $P_1; P_2$ (قيم استثمارية وتؤثران معاً أو بشكل منفرد)، الشكل (6-29)، والمطلوب :

(1) حساب أكبر قيمة للحمولتين $P_1; P_2$ لكل حالات التحميل الممكنة وذلك ضمن الشروط التالية: يهمل الوزن الذاتي، يهمل القص في الحساب، ويؤخذ أثر التحنيب من خلال المعامل $k_b = 0.7$ عند الحساب ووفق قواعد الضغط المركزي، وبلامركزية إضافية مقدارها $e_c = 50\text{cm}$ وفق قواعد الضغط اللامركزي.

(2) يطلب رسم التسليح الكامل للعمود بشكل متقن وبمقياس رسم مناسب.

يفرض ما يلي: $f_y = 400\text{MPa}$ ، $f'_c = 25\text{MPa}$ ، $a = d' = 50\text{mm}$ ، تسليح الشد في المقطع I-I هو $A_s = 27\text{cm}^2$ وتسليح الشد في المقطع II-II هو $A_s = 36.9\text{cm}^2$.



الشكل (6-28) العمود المدروس في المثال غير المحلول (4).

مثال (6):

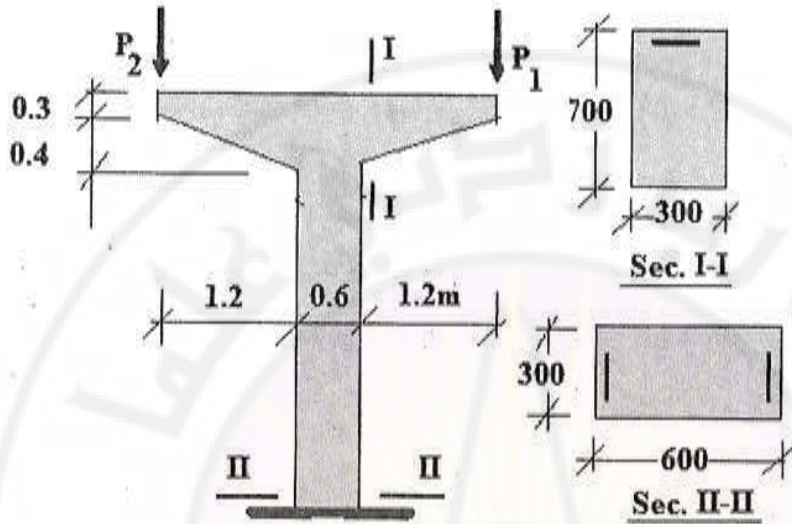
عمود من الخرسانة المسلحة موجود ضمن هيكل حامل مسند جانبياً، ممنوع من التحنيب بالاتجاه $y-y$ ، متمفصل في طرفيه، ومرتبطة بطرفين مقطعهما آمن وبصلابة كافية، ويخضع كل منهما في طرفه الحر لحمولة حدية قدرها $P_u = 200\text{kN}$ ، الشكل (6-30)، والمطلوب، بإهمال الوزن الذاتي وإهمال الحساب على القص:

(1) تحديد قيمة عزم الانحناء الحسابي الحدي المطبق على العمود واللامركزية الأصلية المرافقة e_o عندما $L = 4.0\text{m}$ ، هل يعدّ العمود محققاً في هذه الحالة؟

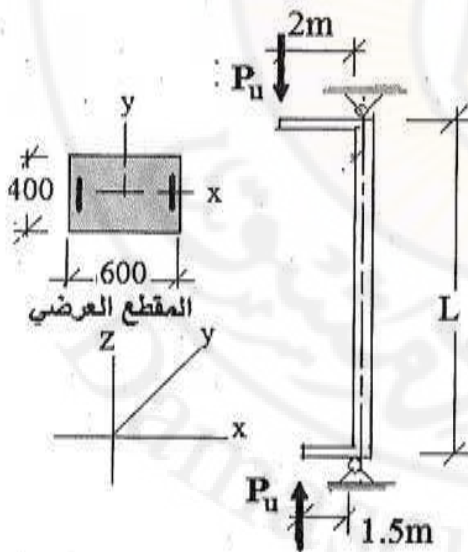
(2) التحقق من سلامة العمود بفرض أن $L=8.0m$ ، وما أكبر قيمة ممكنة للحمولة P في هذه الحالة؟ حيث أن:

$$a = d' = 50mm, f'c = 20MPa, f_y = 240MPa,$$

$$\Omega = 0.9; \beta = 1.3; A_s = A'_s = 4\phi 25$$



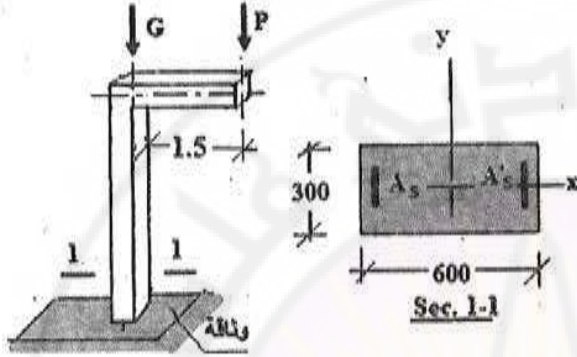
الشكل (6-29) العمود المدروس في المثال غير المحلول (5).



الشكل (6-30) العمود المدروس في المثال غير المحلول (6).

مثال (7):

عمود قصير مع ظفر من الخرسانة المسلحة مقطعه العرضي والأحمال الاستثمارية المطبقة (مية G وحية P)، كما في الشكل (31-6)، والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي، ويفرض أن $(A_S = A'_S = 4\phi 25, f'_c = 22MPa ; f_y = 250MPa$ هل يعدّ مقطع العمود آمناً عندما $P=300KN$ كحمولة حية و $G=800kN$ كحمولة مية؟

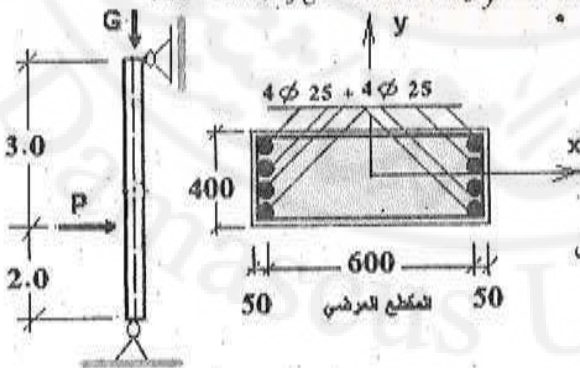


الشكل (31-6) العمود المدروس في المثال (7) غير المحلول.

مثال (8)

يبين الشكل (32-6) عموداً وسطياً من الخرسانة المسلحة واقعاً في طابق متكرر لمبنى هيكلي عادي، وهو متمفصل في طرفيه، وممنوع من التحنيب بالاتجاه $y-y$ ، ويخضع لأحمال استثمارية: مية G وحية P ، المطلوب (بإهمال الوزن الذاتي والقص)، وإتباع طريقة حد المقاومة القصوى:

- عرف اللامركزية التوازنية؟ وما مؤشرات اللامركزية الكبيرة واللامركزية الصغيرة اعتماداً على قيمة اللامركزية التوازنية والعمق الافتراضي لمنطقة الضغط y ؟
- يفرض أن العمود مسند جانبياً باتجاه المحور $x-x$ ، ما أكبر قيمة للحمولة P والحمولة المرافقة G ؟ يفرض أن: $\Omega = 0.8; f'_c = 20MPa; f_y = 240MPa$.



الشكل (32-6) مقطع العمود المدروس في المثال (8).

مثال (9):

عمود قصير من الخرسانة المسلحة مقطعه العرضي مستطيل طوله 95cm وعرضه 30cm وهو يخضع لتأثير عزم انحناء حدي قدره $M_{II} = 0.4\text{ MNm}$ مترافق مع قوة ضاغطة مركزياً قيمتها الحدية $N_{II} = 0.16\text{ MN}$ ، والمطلوب (بإهمال الوزن الذاتي للعمود):

(أ) إيجاد التسليح الطرفي اللازم، بفرض أن $A_s = 0.75 A'_s$.

(ب) إيجاد التسليح الطرفي اللازم، بفرض أن $A_s = A'_s$.

يفرض أن: $a = d' = 5\text{cm}$; $f'_c = 18\text{MPa}$; $f_y = 240\text{MPa}$.

مثال (10):

مقطع مستطيل طول أبعاده 30cm , 50cm ، وهو مسلح بتسليح طرفي متناظر وقدره $A'_s = A_s = 12.9\text{cm}^2$ ، ويطبق على هذا المقطع قوة ضاغطة تبعد عن مركز ثقله بمقدار 38cm ، والمطلوب تحديد مقدار القوة الضاغطة الممكنة بالقيمة الاستثنائية، حيث $f'_c = 21\text{MPa}$ وكذلك $f_y = 280\text{MPa}$.

الفصل السابع

الحساب وفق حالة حد التشقق

Calculation Due to Limit State of Cracking

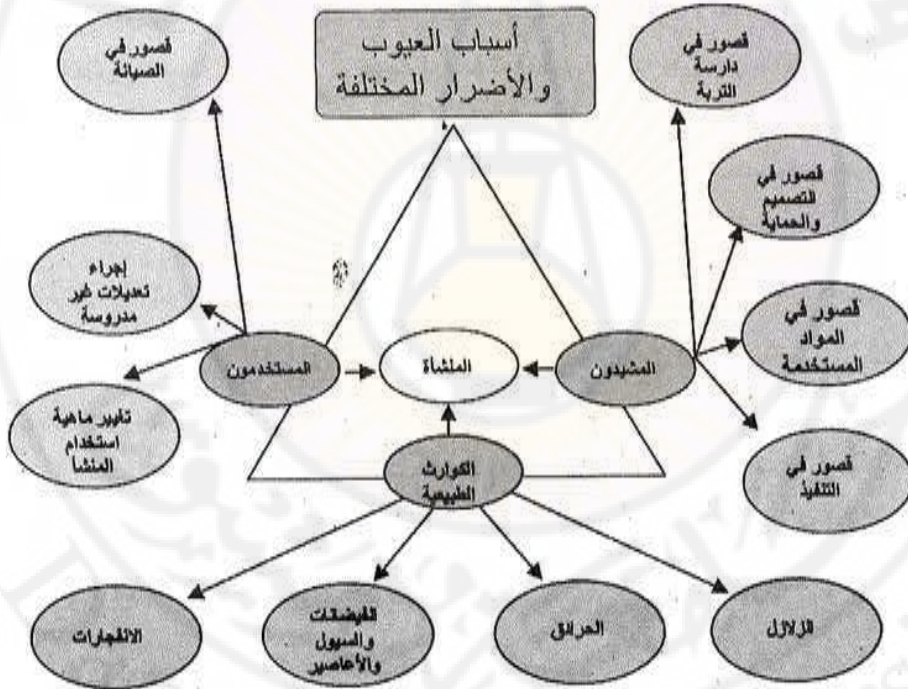
(إعداد: أ. د. م. غسان محمود)

- 1-7- تمهيد.
- 2-7- حساب العناصر التي يسمح فيها بتشكيل التشققات.
 - 1-2-7- المقاطع الخاضعة للشد المركزي.
 - 2-2-7- المقاطع الخاضعة للشد اللامركزي.
- 3-7- العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات.
- 4-7- الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الشد.
- 5-7- التحكم بسعة التشققات.
- 6-7- أمثلة حسابية توضيحية.



7-1- تمهيد Preface:

تظهر في المنشآت الخرسانية المسلحة القائمة عيوب وأضرار متنوعة تتدرج من التشققات البسيطة إلى التشققات والتصدعات الخطيرة التي تستدعي اتخاذ إجراءات محددة لاستمرار الأداء الوظيفي للمناطق بهذه المنشآت، وتتعدد أسباب هذه العيوب والأضرار خلال المراحل الزمنية لعمر المنشأ، وباختصار شديد، يمكن توضيح هذه الأسباب من خلال الشكل (7-1-1)، ومن أهم مظاهر العيوب والأضرار تشكل التشققات (الشروخ) بأنواعها وأشكالها المختلفة، وهي التي تمثل انقطاعاً في الاستمرار البنيوي للخرسانة بسبب انخفاضاً في قدرة التحمل من جهة، ومن جهة أخرى ممراً سهلاً لعبور المواد الضارة إلى التسليح، ومرتباً للطفيليات والأوساخ وغير ذلك، الأمر الذي يستدعي دراستها ومعالجتها في الوقت المناسب، لما لها من أخطار على السلامة الإنشائية والاستثمارية، وهذا ما سيتم الحديث عنه في هذا الفصل من خلال دراسة حالة حد التشقق وفق متطلبات الكود العربي السوري بشكل أساسي.



الشكل (7-1-1) التصنيف العام للتشققات في العناصر الخرسانية المسلحة.

• ما حالة حد التشقق *What's the Limit Crack State* ؟

بشكل عام، يجب التمييز بين العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات والعناصر التي يسمح فيها بتشكيل تشققات ذات سعة عظيمة محددة. وبالنسبة لحالة حد التشقق، فهي إحدى حالات حدود الاستثمار الحديدية، كما ورد في الفصل الأول، وبما يتفق مع الكود العربي السوري [1] ، حيث يتم التحكم بسعة التشققات *Crack Width* كي لا تتجاوز الحدود المسموح بها وذلك في العناصر التي يسمح فيها بتشكيل التشققات حسابياً، لأن وجود التشققات يشكل عائقاً أمام الاستثمار الطبيعي لما تسببه من مضاعفات سلبية سواء من ناحية عدم استمرارية البنية، ومن ثم تخفيض المقاومة، أو من ناحية تخفيض الصلابة وتسريع الآثار السلبية للشرط البيئية المحيطة وغير ذلك.

وكما هو معلوم، تتشكل التشققات في المقاطع الخرسانية المسلحة عند وصول الإجهادات الشادة في الخرسانة σ_{ct} إلى حد المقاومة على الشد f_{ct} ، وذلك تحت تأثير الحالة الإجهادية الناجمة عن وقوع هذه المقاطع في حالة شد مركزي أو حالة انحناء مركب (عزوم انحناء مترافقة مع قوى ضاغطة أو شادة)، أو عند وقوعها تحت تأثير الانحناء الصافي أو الإجهادات الشادة القطرية الناجمة عن القص أو نتيجة إجهادات القص الناجمة عن عزوم القتل وغير ذلك من لأحمال المباشرة وغير المباشرة. وعادة يتم إهمال عمل الخرسانة على الشد في الحسابات التصميمية، بسبب إمكانية تشققها لانخفاض مقاومة الخرسانة على الشد بنسبة كبيرة مقارنة مع مقاومة الخرسانة في حالة الضغط (تساوي مقاومة الخرسانة على الشد *Tensile Strength* نحو $\frac{1}{5} \rightarrow \frac{1}{15}$ من المقاومة في الضغط لنفس العينات *Compressive Strength*)، ويستثنى من ذلك العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات كخزانات السوائل والعناصر مسبقة الإجهاد وغير ذلك.

تمثل التشققات في الخرسانة، إلى جانب كونها مؤشراً لوجود العيوب و الأضرار، مؤشراً هاماً لأسباب تشكلها وتفسر الحالة الإجهادية التي تعانيها العناصر الإنشائية. و تبعاً لأماكن توضع التشققات ونوع الجمل الإنشائية وأهميتها الاقتصادية ، يمكن إعطاء إجابات مختلفة عن الأسئلة التالية:

- أ- ما درجة الخطورة على المنشآت ؟
- ب- هل من الضروري القيام بإجراءات الصيانة والترميم والتجديد أو التقوية ؟
- ج- ما نوعية الإجراءات الواجب اتخاذها وما التقوية اللازمة ؟

• أسباب الاهتمام بمراقبة التشققات ومعالجتها

Crack Control and Treatment Reasons

تتعدد هذه الأسباب، ويذكر منها ما يلي:

- أ. انخفاض قدرة التحمل بخاصة في حالة التشققات الكبيرة.
- ب. المظهر *Appearance*: يثير منظر التشققات الخوف.
- ج. العزل المائي والغازي *Water and gas Impermeability*: توفر التشققات ممراً سهلاً لعبور السوائل والغازات الضارة إلى التسليح وحدث التآكل فيه، حيث تكون قضبان التسليح الواقعة ضمن عناصر متشققة أكثر عرضة للصدأ، و من ثم، التآكل مقارنة مع العناصر غير المتشققة، و يكون تأثير سعة التشققات أكبر في بداية عملية التآكل.
- د. تعدد التشققات، كما ذكر أعلاه، مرتعاً خصباً للطفيليات و الحشرات المسببة للأمراض ومكاناً لتجمع الأوساخ و الغبار وغير ذلك، و هذا أمر غير مرغوب فيه خاصة في الأماكن العامة كالمسارح ودور السكن. وتمثل التشققات الكبيرة، في الصوامع مثلاً، مستقراً لنمو حشرة السونة مثلاً.
- و. تعمل التشققات على تخفيض العازلية الصوتية، بخاصة عند وجودها في القواطع الداخلية.
- ز. أسباب أخرى لا سيما انخفاض الصلابة والمساهمة بحدوث انحرافات وتشوهات معينة وغير ذلك.

• الأسباب العامة لحدوث التشققات في المنشآت الخرسانية:

تتعلق هذه الأسباب بمراحل إنجاز البناء المختلفة، وهي بشكل عام أسباب ناجمة عن تأثير الأحمال المباشرة، الأحمال غير المباشرة (التغيرات الحجمية لأسباب فيزيائية أو كيميائية)، أو لأسباب مرتبطة بالتغيرات الحركية، وبشكل عام يمكن تصنيفها كما يلي:

1) مرحلة التصميم *Design Stage*، مثلاً:

- الاختيار الخاطي للجمل الإنشائية والمعمارية.

- أخطاء بالافتراضات التصميمية لمواد الإنشاء.

- أخطاء في الحسابات التصميمية.

- عدم التزام اشتراطات الكود أو المواصفات المعمول بها.

2) مرحلة التنفيذ *Construction Stage*، مثلاً:

- عدم الأخذ بالحسبان الأحمال المباشرة المبكرة طويلة الأمد.

- الأحمال الناجمة عن الأفعال غير المباشرة ، مثل: انكماش الخرسانة، الحرارة، التجمد والذوبان *Freezing and Thaw*، الكفجة *Forming* وصب الخرسانة وغير ذلك.

(3) مرحلة الاستثمار *Service stage*:

- الأحمال الزائدة *Overloading*.

- عدم الصيانة الدورية والإهمال.

- الأفعال البيئية *Environmental Actions*:

+ الكيماويات: الكربنة، الكلوريدات، الكبريتات مما يسبب تآكل الخرسانة والتسليح وغير ذلك.
+ التغيرات الحرارية.

- حركة التربة وسوء التأسيس.

- سوء الصرف الصحي الداخلي والخارجي.

- الاهتزازات *Vibration*.

(4) عوامل طارئة (زلازل، انفجارات، انهيارات أرضية وغير ذلك).

• التصنيف العام للتشققات وأسباب تشكلها

:*General Classification of Cracks and Causes*

يوضح المخطط المبين في الشكل (7-1-ب)، أحد أشكال التصنيفات الممكنة للتشققات في الحالة العامة (قبل التصلب وبع التصلب). ويمكن تقسيم هذه التشققات إلى نوعين أساسيين هما: التشققات الإنشائية والتشققات غير الإنشائية.

(1) التشققات الإنشائية *Structural Cracks*

تحصل نتيجة تطبيق الأحمال المباشرة *Direct Loads* نتيجة لحصول:

- أخطاء في الدراسة الإنشائية.

- التشققات الناجمة عن الخطأ في مسح الموقع وأعمال التأسيس.

- الأخطاء في مرحلة التنفيذ.

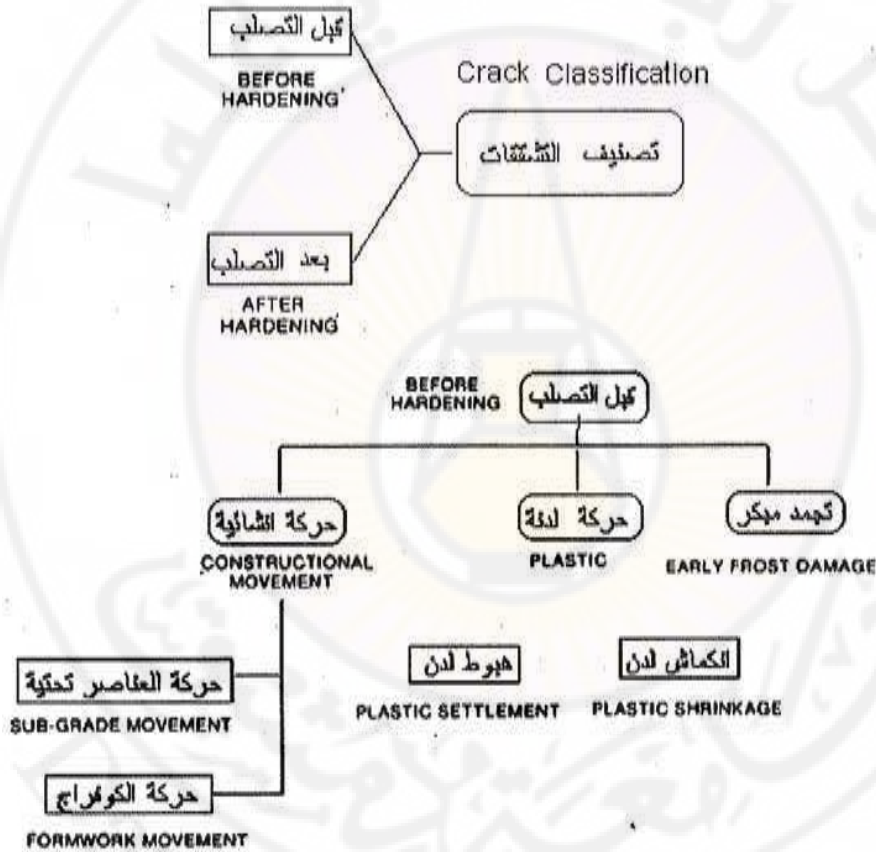
- الأخطاء الناتجة عن سوء الاستثمار.

- زيادة الأحمال بشكل طارئ على القيم التصميمية وهي تشمل، الشكل (7-2):

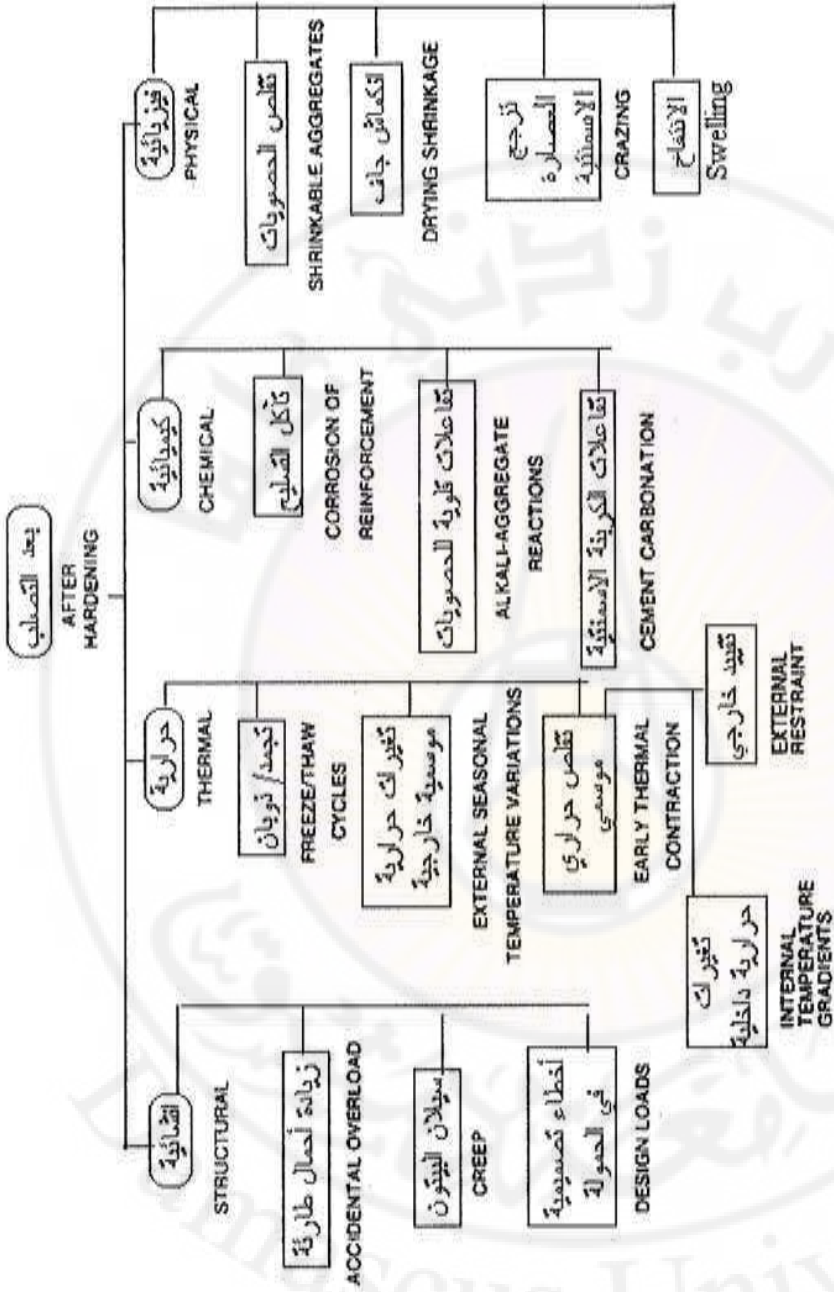
• التشققات الناتجة عن الانحناء الصافي.

• التشققات الناتجة عن الشد الصافي.

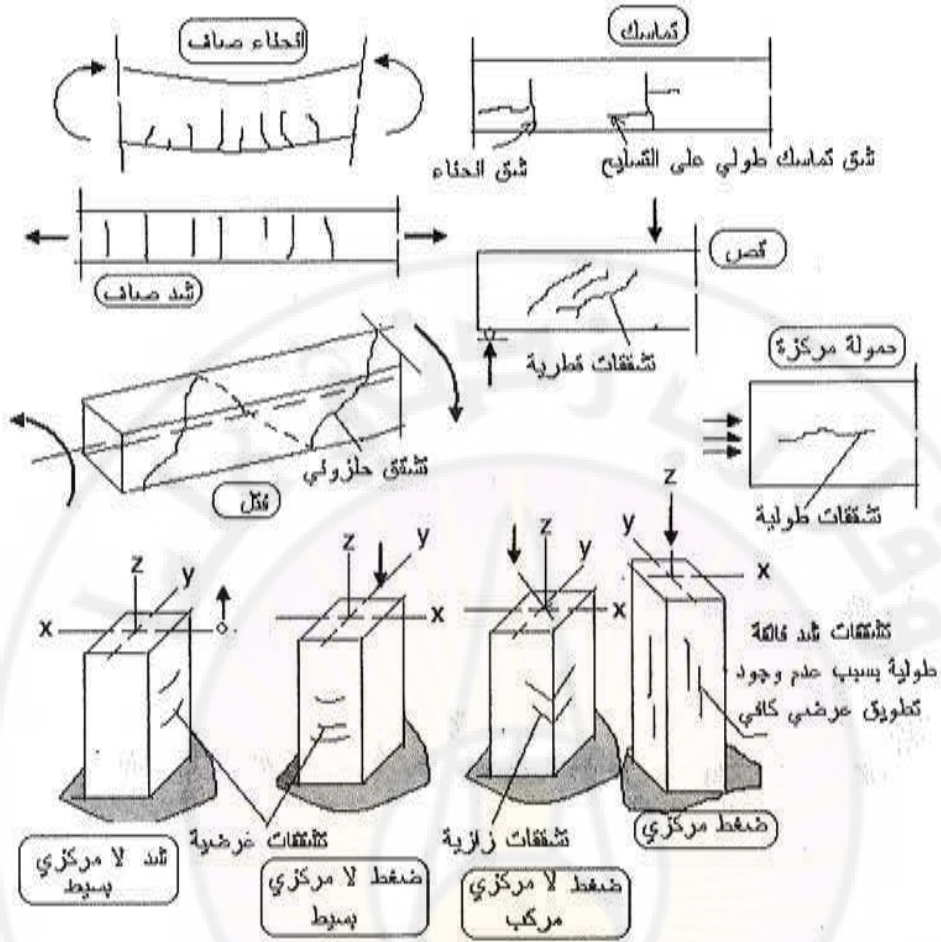
- التشققات الناتجة عن الأحمال غير المركزة (ضغط لا مركزي أو شد لا مركزي).
- التشققات الناتجة عن القص.
- التشققات الناتجة عن الفتل.
- التشققات الناتجة عن الضغط في الأعمدة والجدران الحاملة.
- التشققات الناتجة عن فقدان التماسك.
- التشققات التي تسببها القوى المركزة / الإجهادات الموضعية / ، مثلاً في مواقع تثبيت نهايات قضبان التسليح مسبقاً الإجهاد.



الشكل (7-1-ب) التصنيف العام للتشققات في العناصر الخرسانية المسلحة.



تابع الشكل (7-1-ج) التصنيف العام للتشققات في العناصر الخرسانية المسلحة.



الشكل (7-2) بعض أشكال التشققات الإنشائية المألوفة .

2) التشققات غير الإنشائية *Non-Structural Cracks*

تنشأ لأسباب مرتبطة بأفعال غير مباشرة *Indirect Actions*، الشكل (7-3):

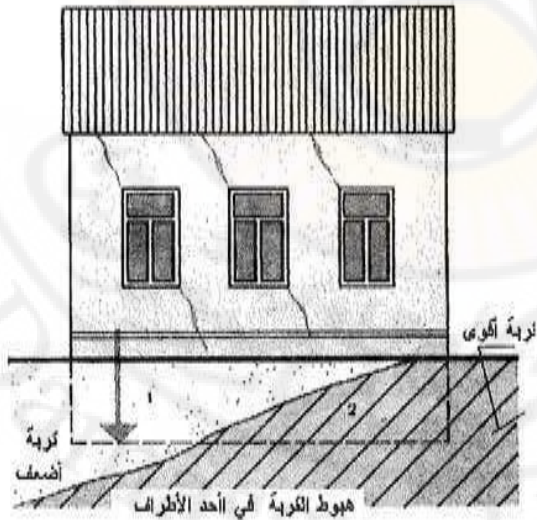
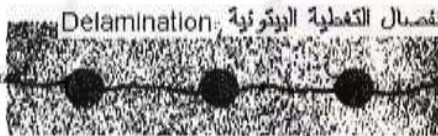
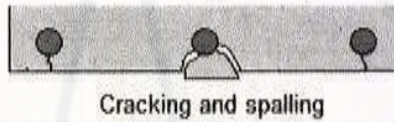
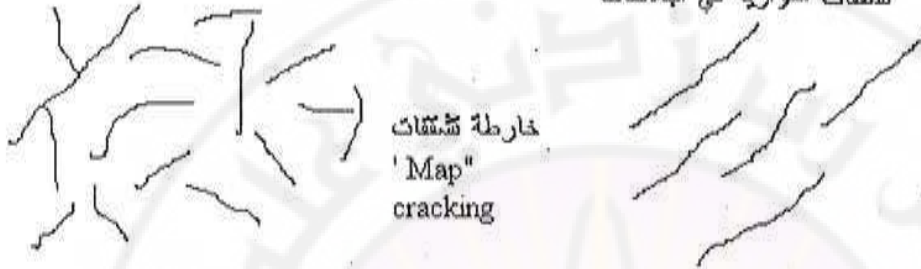
- 1) التغيرات الحجمية في الخرسانة قبل التصلب وبعد التصلب ومنها:
 - تشققات الانكماش اللدن، تشققات الانكماش الجاف، تشققات الانكماش الجاف، تشققات الحرارة الداخلية، التشققات الناجمة عن التباين الحراري، تشققات ناجمة عن الحركة أثناء التنفيذ، التشققات الناتجة عن التزايد الطارئ في الأحمال الحرارية الحادة المؤثرة لفترات قصيرة (الحرائق)، التشققات الناتجة عن الصقيع، التشققات الناجمة عن دورات التجمد والذوبان، (2

التشققات الناتجة عن التآكل في التسليح بسبب نخر الخرسانة ومخلفات عملية التآكل في التسليح / التشققات بسبب الصدا / وغير ذلك.

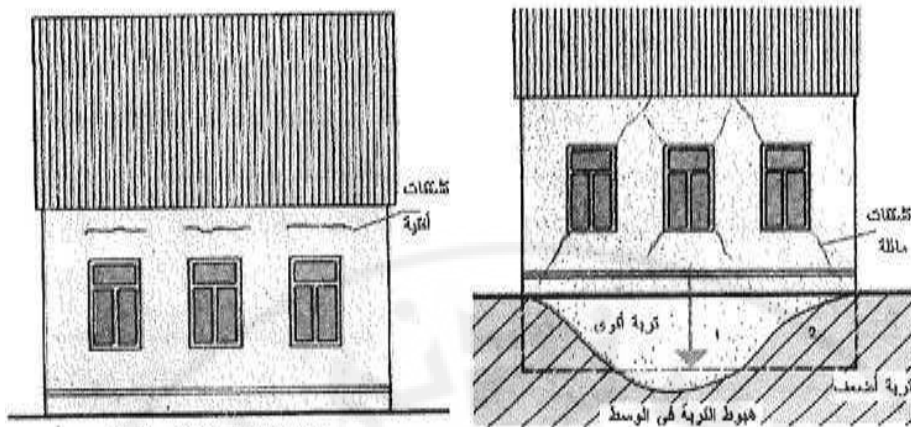
(3) تشققات الهبوط في الخرسانة حديثة الصب (الهبوط اللدن *Plastic Settlement*).

(4) التشققات الناتجة عن هبوط تربة التأسيس، والهبوط التفاضلي للأساسات بسبب فرق الأحمال، أو عند وجود كتل متجاورة مختلفة الارتفاعات وغير ذلك.

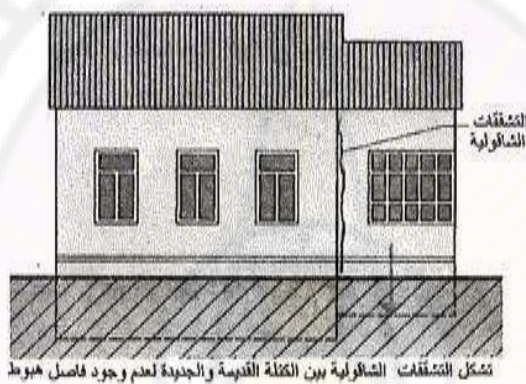
تشققات متوازية في البلاطات



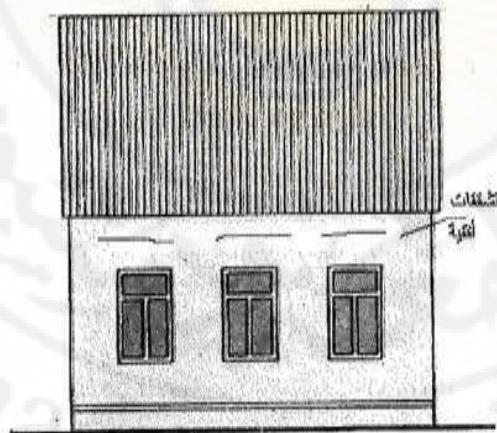
الشكل (3-7) بعض أشكال التشققات غير الإنشائية المألوفة.



تشكل التشققات الأفقية في الجدران
بسبب السهوم في بلاطة السقف



تشكل التشققات الشالولية بين الكتلة القديمة والجديدة لعدم وجود فاصل هبوط



تشكل التشققات الأفقية في الجدران بسبب السهوم في بلاطة السقف
تابع الشكل (3-7) بعض أشكال التشققات غير الإنشائية المألوفة.

تصنف المنشآت الخرسانية المسلحة وفقاً لحد التشقق المسموح في أغلب الكودات العالمية، ومن ضمنها الكود العربي السوري إلى ثلاثة أنواع [1]:

أ) النوع الأول: يشمل المنشآت المعرضة لعوامل ضارة شديدة التأثير في الخرسانة والفولاذ، إذ تحسب مقاطع هذه المنشآت في المرحلة الإجهادية الأولى (مرحلة الأداء المرن للمقطع *Elastic Behavior*) والتي تتميز بعدم اتساع التشققات لأكثر من $0.1mm$.

ب) النوع الثاني: يشمل المنشآت الموجودة في العراء كالجسور وعناصر المنشآت المختلطة وغيرها من العناصر التي تتأثر بعوامل الرطوبة والأبخرة المتصاعدة من عمليات الإنتاج في المصانع وما شابهها، ويجب ألا تزيد سعة التشققات *Crack Width* على $0.2mm$.

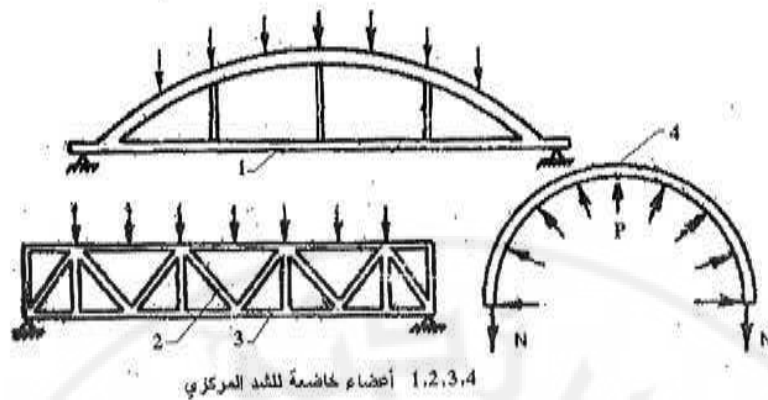
ج) النوع الثالث: يشمل الوحدات المحمية (المعزولة) من المنشآت العادية التي لا تتأثر فيها قدرة تحمل الخرسانة والفولاذ بوجود التشققات، ويجب ألا يزيد الحد الأعظم لسعة التشققات على $0.3mm$.

7-2-2- حساب العناصر التي يسمح فيها بتشكيل التشققات

يجري الحساب هنا وفق حالة حد التشقق المسموح به، حيث يتم تحميل كامل القوى الشادة للتسليح المشدود والخرسانة المضغوطة إن وجدت، ويهمل أداء الخرسانة المشدودة بشكل كامل.

7-2-1- المقاطع الخاضعة للشد المركزي *Centric Tension*:

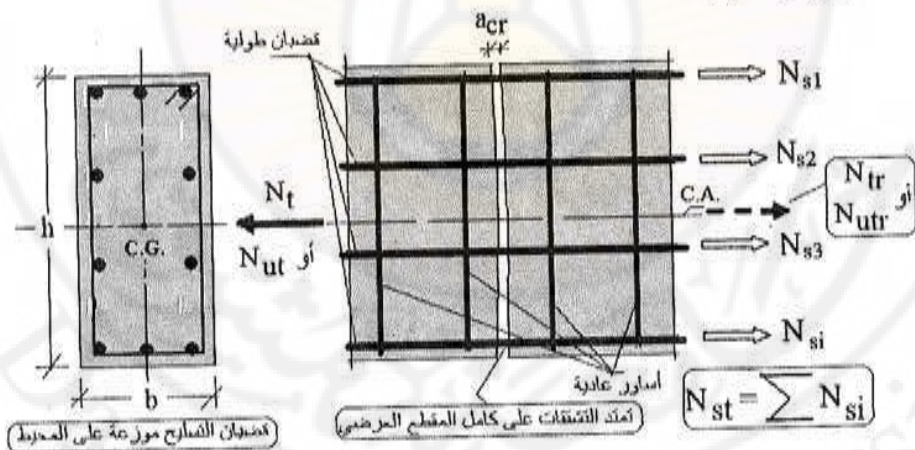
هنا يكون تطبيق القوة الشادة مركزياً، والخرسانة كلها واقعة في حالة شد. بعد الشد مركزياً عندما يتم تطبيق القوة الشادة بلا مركزية لا تزيد على اللامركزية الطارئة، ويكون المقطع في حالة شد لا مركزي عندما تزيد لامركزية القوة الشادة على قيمة اللامركزية الطارئة أو نتيجة تأثير قوة شادة محورية مترافقة مع عزم انحناء أكبر من العزم الناتج عن تأثير اللامركزية الطارئة، ويحدث الشد المركزي في الكثير من العناصر الإنشائية الخرسانية المسلحة كالشدادات *Ties* المستخدمة في الأقواس لامتصاص ردود الأفعال الأفقية الكبيرة، الأوتار السفلية وبعض العناصر العرضية المائلة في الجوائز الشبكية، جدران خزانات السوائل والصوامع ذات المقطع الأفقي الحلقي وغير ذلك، الشكل (7-4).



1,2,3,4 أعضاء خاضعة للشد المركزي

الشكل (4-7) منشآت تتضمن أعضاء خاضعة للشد المركزي.

يصادف الشد اللامركزي في العديد من العناصر الإنشائية كالأوتار السفلية للجوائز الشبكية التي لا تتضمن أعضاء عرضية مائلة *Inclined Cross Braces*، جدران الخزانات ذات المقاطع العرضية المستطيلة أو المربعة، جدران الصوامع والمسابع وما يماثلها من المنشآت ذات المقطع العرضي المضلع. فيما يلي أهم النقاط التي تلزم لإتمام الحسابات الستاتيكية المتعلقة بحساب المقاطع المعرضة للشد المركزي وتصميمها.



الشكل (5-7) حساب المقاطع الخاضعة للشد المركزي (عندما يسمح بتشقق التشققات).

• طريقة الإجهادات المسموح بها *Allowable Stress Method*

يجب ألا تتجاوز القوة الشادة المطبقة على المقطع القوة المسموح بها والتي يقاومها المقطع المفروض (معلوم الأبعاد والتسليح)، أي أن:

$$N_f \leq N_{fr} = A_s \bar{\sigma}_s; \quad (7-1)$$

وتحدد مساحة التسليح الكلية في مثل هذه العناصر، الشكل (7-5) ليقاوم الحمولة الشادة المطبقة بشكل كامل، دون مساهمة الخرسانة في ذلك، إذ للخرسانة أثر تغليف وحماية قضبان التسليح وتأمين الصلابة الكافية للمقطع. هنا يجب أن تتحقق العلاقة:

$$A_s = \frac{N_f}{\bar{\sigma}_s} = \frac{N_f}{0.55 f_y}; \quad (7-2)$$

حيث:

$N_{fr}; N_f$ - الحمولة الشادة المطبقة والحمولة الشادة المسموح بها التي يقاومها المقطع المفروض على الترتيب.

$\bar{\sigma}_s$ - الإجهاد المسموح به على الشد في التسليح الشد.

f_y - حد الخضوع في التسليح على الشد.

وبعد تحديد مساحة التسليح الضرورية، يصار لاختيار المقطع الخرساني المغلف للعنصر المشدود على شكل مربع، مستطيل، دائرة أو غير ذلك.

• طريقة حد المقاومة القصوى *Ultimate Strength Limit Method*

يجب ألا تتجاوز القوة الشادة الحديدية المطبقة على المقطع القوة الحديدية الحسابية التي يقاومها المقطع المفروض (معلوم الأبعاد والتسليح)، أي إن:

$$N_{ut} \leq N_{utr} = \Omega A_s f_y; \quad (7-3)$$

حيث:

$N_{utr}; N_{ut}$ - الحمولة الشادة الحسابية المطبقة والحمولة الحسابية التي يقاومها المقطع المفروض على الترتيب.

A_s - مساحة المقطع الكلي لقضبان التسليح على الشد.

f_y - حد الخضوع في التسليح على الشد.

Ω - معامل تخفيض المقاومة ويؤخذ هنا مساوياً 0.9.

تحدد المساحة الكلية لقضبان التسليح المستخدمة بالعلاقة:

$$A_s = \frac{N_{ut}}{\Omega f_y}; \quad (7-4)$$

ويعد تحديد مساحة التسليح الضرورية، بصار لاختيار المقطع الخرساني المغلف للعنصر المشدود على شكل مربع، مستطيل، دائرة أو غير ذلك..

7-2-2-2- المقاطع الخاضعة للشد اللامركزي *Eccentric Tension*:

تدرس هنا طريقة حد المقاومة القصوى فقط، ويجب التمييز هنا بين حالتي اللامركزيات الصغيرة (عندما تقع القوة الشادة بين التسليحين عادة، حيث يكون التسليحان الطرفيان على الأغلب في حالة شد، ويكون المقطع هنا أقرب للشد المركزي)، وبين اللامركزيات الكبيرة (عندما تقع القوة الشادة خارج التسليحين عادة، حيث يكون التسليح الأقرب إلى القوة مشدوداً والأبعد مضغوطاً في أكثر الحالات، وهذه الحالة أقرب للانحناء البسيط، إذ يتعرض المقطع لإجهادات شد وإجهادات ضغط أيضاً).

(A حالة اللامركزيات الكبيرة:

من أجل الحسابات الستاتيكية، تطبق هنا الفرضيات الأساسية ذاتها الواردة من أجل حالة حد المقاومة القصوى، و يجب التمييز هنا أيضاً بين حالات التحقيق وحالات التصميم.

- حالات التحقيق: تكتب علاقات التوازن الحدي، نسبة إلى مركز ثقل المقطع الخرساني/ من أجل المقاطع المستطيلة، وفقاً للشكل (7-6 - أ، ب)، كما يلي:

$$+ N_{ur} = \Omega [A_s f_s - 0.85 f'_c b y - A'_s f'_s]; \quad (7-5)$$

$$+ M_{ur} = N_{ur} e = \Omega \left[0.85 f'_c b y (e_1 - 0.5y) + A'_s f'_s (e_1 - d') + A_s f_s (e_2 - a) \right]; \quad (7-6)$$

$$f'_s = 630 \left(\frac{y - 0.85d'}{y} \right) \leq f_y; \quad (7-7a)$$

$$f_s = 630 \left(\frac{0.85d - y}{y} \right) \leq f_y; \quad (7-7b)$$

حيث تكون f_s بإشارة موجبة إذا كانت شادة.

- حالات التصميم: يمكن هنا دراسة المقطع كما لو كان يخضع لعزم انحناء بسيط (صافي) تحدد قيمته بالعلاقة:

$$M_{us} = N_u (e - e_2 + a); \quad (7-9)$$

وبافتراض أن $f_s = f_y$ ، وحيث إن:

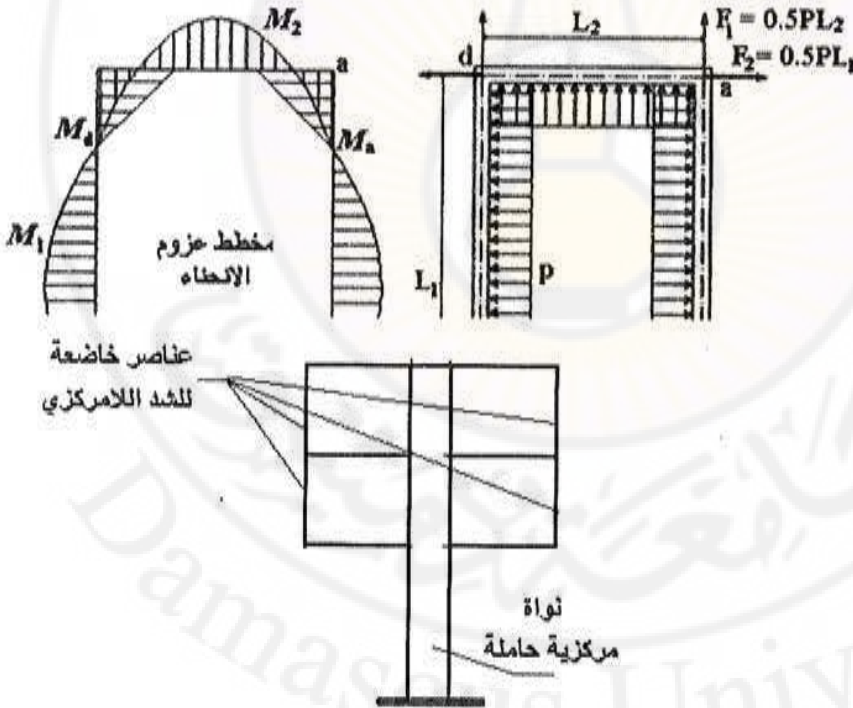
M_{us} - عزم القوة الناظرية الشادة الحديدية N_u بالنسبة إلى مركز ثقل تسليح الشد في المقطع. ويجب أن تضاف إلى مساحة تسليح الشد الناتجة عن العزم M_{us} وهي A_{s1} مساحة التسليح

الإضافية نتيجة تأثير القوة الشادة N_u وفق العلاقة: $A_{s2} = \frac{N_u}{\Omega f_y}$ ، حيث $\Omega = 0.9$.

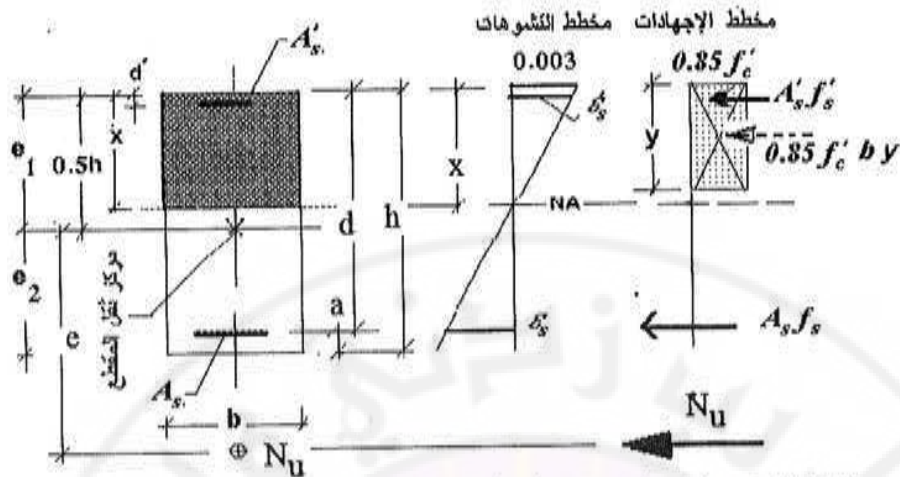
(B) حالة اللامركزيات الصغيرة:

تصادف هذه الوضعية عندما تقع القوة الشادة داخل المقطع العرض بين مركزي ثقل التسليحين الطرفيين الأبعد والأقرب اللذين يكونان على الأغلب في حالة شد، ويكون المقطع الخرساني متشققاً بأكمله. هنا تحسب مساحة التسليحين A_{s1} ، A_{s2} مباشرة بأخذ العزم على التوالي مرة حول مركز ثقل A_{s1} ومرة حول مركز ثقل A_{s2} ، وحيث إن $\Omega = 0.9$.

جدران خزان مستطيل خاضعة لشد لا مركزي



الشكل (7-6-1) عناصر خاضعة للشد اللامركزي.



الشكل (7-6 ب) الإجهادات والتشوهات في المقاطع المستطيلة الخاضعة للشد المركزي.

3-7- العناصر التي لا يسمح فيها بتشكيل التشققات:

يجري الحساب هنا وفق حالة حد تشكل التشققات (وفق طريقة الإجهادات المسموح بها)، أي ألا تتجاوز فيه الإجهادات الشادة في الخرسانة القيم المسموح بها (أي تأمين الكتامة) ، وكذلك بأن لا تتجاوز الإجهادات الشادة في التسليح أيضاً الإجهادات المسموح بها إن تأمين الكتامة *Tightness* في خزانات السوائل وغيرها من المنشآت الهيدروليكية المنفذة من الخرسانة المسلحة مسألة حيوية كما ذكر أعلاه، ومع صعوبة تجنب حصول التشققات بالمطلق كما هو معروف.

• في العناصر الخاضعة للشد المركزي:

مع إهمال أثر انكماش الخرسانة، نحسب مساحة التسليح في الشد بالعلاقة:

$$A_s = \frac{N_t}{\bar{\sigma}_s} = \frac{N_t}{0.55 f_y} ; \quad (7-10)$$

وتحدد مساحة المقطع الخرساني الكلي (محسوبة على أساس المقطع المكافئ) بالعلاقة:

$$N_t = \bar{\sigma}_{ct} (A_c + nA_s) \Rightarrow A_c = \frac{N_t}{\bar{\sigma}_{ct}} - nA_s ; \quad (7-11)$$

وعند أخذ أثر الانكماش بالحسبان، يجري الحساب كما يلي:

تحدد أولاً مساحة التسليح اللازمة وفقاً للعلاقة (7-10)، ثم تحسب مساحة المقطع الخرساني بالعلاقة التالية، وذلك بإضافة القوة الشدة نتيجة انكماش الخرسانة (راجع الفصل العاشر):

$$N_t + N_{tsh} = \bar{\sigma}_{ct} (A_c + nA_s) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_c = \frac{N_t + A_s E_s \varepsilon_{sh}}{\bar{\sigma}_{ct}} - nA_s \quad ; \quad (7-12)$$

حيث:

N_t - القوة الشادة الاستثمارية المطبقة، N_{tsh} - القوة الشدة نتيجة انكماش الخرسانة.

$n = \frac{E_s}{E_c}$ - النسبة المعيارية (بين معاملي مرونة التسليح والخرسانة) وتؤخذ هنا مساوية .10

$\bar{\sigma}_{ct}$ - الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الشد، وتؤخذ مخفضة بنسبة 25% عند إهمال أثر الانكماش في الحساب.

ε_{sh} - قيمة التشوهات النسبية الكلية في الخرسانة نتيجة ظاهرة الانكماش.

من الضروري التأكد من عدم تجاوز الإجهادات الشادة في الخرسانة القيم المسموح بها.

• العناصر الخاضعة للانحناء الصافي:

يمكن تأمين الكتامة بتحديد سمك العنصر المحقق لهذا الشرط ، والذي يلي بآن واحد الارتفاع الفعال للمقطع لمقاومة عزوم الانحناء التصميمية المطلوبة وفق طريقة الإجهادات المسموح بها.

من أجل المقاطع الخاضعة لعزوم انحناء ، يجب التمييز بين حالتين أساسيتين:

- الحالة الأولى: الوجه المعرض للشد غير ملامس للسائل ، .

- الحالة الثانية: الوجه المعرض للشد على تماس مباشر مع السائل (كما في خزانات السوائل مثلاً).

يدرس المقطع في الحالة الأولى كما هو الحال في المنشآت العادية المنفذة من الخرسانة المسلحة، أي التحقق فقط من مقاومة المقطع المفروض لعزوم الانحناء، أو حساب أبعاد المقطع والتسليح اللازم له في حالات التصميم. ويصبح من الضروري، في الحالة الثانية، التحقق من شرط تحقيق الكتامة أيضاً . هنا يمكن إتباع ما يلي:

لتكن الشريحة الشاقولية بعرض $1m$ من جدار خزان مائي متمفصل في الأعلى وموثوق في القاعدة ، الشكل (7-7- a).

بعد المقطع متجانساً وعملاً في المرحلة الإجهادية المرنة، والمحور المحايد *Neutral Axis (N.A)* واقعاً في منتصف السماكة h_t ، أي إن $y = 0.5h_t$

$$\sigma_{ct} = \frac{M y}{I} = \frac{M h_t}{2I} ; \quad (7-13)$$

ولأن عزم العطالة $I = \frac{b h_t^3}{12}$ حول المحور المركزي للمقطع العرضي المدروس، ينتج:

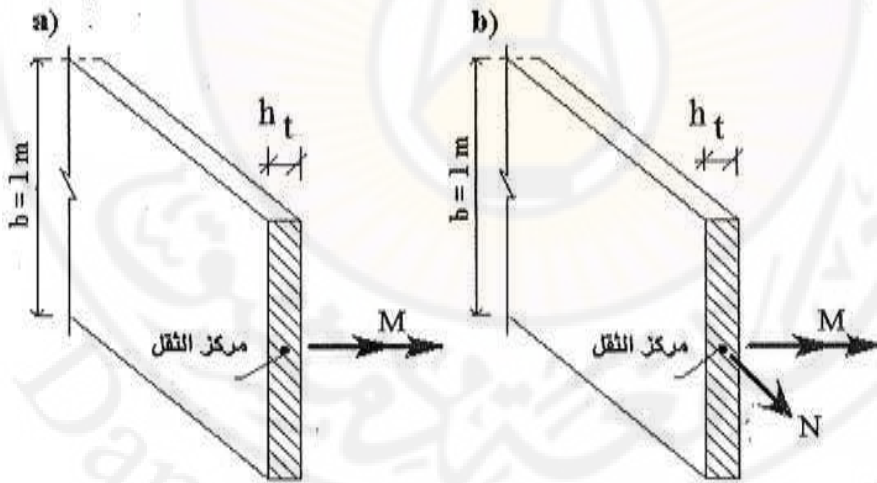
$$\sigma_{ct} = \frac{6 M}{b h_t^2} \leq \bar{\sigma}_{ct} ; \quad (7-14)$$

ويفرض أن $\sigma_{ct} = \bar{\sigma}_{ct}$ تكون السماكة المحققة لشرط الكتامة h_t مساوية:

$$h_t = \sqrt{\frac{6 M}{b \bar{\sigma}_{ct}}} ; \quad (7-15)$$

حيث: I - عزم عطالة المقطع *Section Moment of Inertia* ، ويحسب من أجل عرض الشريحة $b = 1m$.

هنا، تتم مقارنة السماكة h_t المحسوبة وفقاً للعلاقة (7-15) مع السماكة المحسوبة وفقاً لشرط المقاومة وتعتمد القيمة الأكبر بينهما كسماكة أدنى للجدار، ويحدد التسليح اللازم كما هو معروف باستخدام طريقة الإجهادات المسموح بها ، على أن تتحقق الاشتراطات المتعلقة بالتسليح والأبعاد المعمارية ، وفي كل الأحوال يجب ألا تتجاوز سعة التشققات القيم العظمى المسموح بها .



الشكل (7-7) حساب سماكة الجدار وفقاً لشرط الكتامة:

(a) المقطع يخضع للانحناء البسيط.

(b) المقطع يخضع للانحناء المركب (عزوم انحناء مع قوى شادة أو ضاغطة).

• في المقاطع الخاضعة للانحناء المركب (شد لا مركزي أو ضغط لا مركزي) :

تخضع المقاطع في هذه الحالة لعزوم انحناء مترافقة مع قوى طولية شادة أو ضاغطة. هنا يمكن الاكتفاء بتحقيق شرط المقاومة فقط عندما يكون الشد في الجهة غير الملامسة للسائل، ويجب أن تحسب السماكة من تحقيق شرطي المقاومة والكتامة معاً عندما يكون الشد في الجهة الملامسة للسائل. تحسب السماكة المحققة لشرط الكتامة h_f من العلاقة التالية:

$$\sigma_{ct} = \sigma_{ct}^M \pm \sigma_{ct}^N = \frac{6M}{bh_f^2} \pm \frac{N}{bh_f} \leq \bar{\sigma}_{ct} ; \quad (7-16)$$

على أن تستخدم الإشارة (+) عندما تكون القوة N شادة ، والإشارة (-) عندما تكون ضاغطة. وتقرن السماكة المحسوبة بالعلاقة (7-16) مع السماكة المحسوبة من تحقيق شرط المقاومة وفقاً لعلاقات الشد اللامركزي أو الضغط اللامركزي كما تقتضيه الحالة المدروسة، وتختار السماكة الأكبر بينهما، ويختار التسليح ليحقق الاشتراطات المعمول بها .

7-4- الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الشد:

تعد مسألة تقدير قيم الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الشد $\bar{\sigma}_{ct}$ معضلة بحد ذاتها، إذ إن الخطأ في ذلك قد يؤدي إلى ظهور التشققات بشكل أبكر مما هو متوقع تصميمياً، وعند حساب التسليح اللازم تهمل مشاركة الخرسانة كلياً، ويحدد التسليح ليقاوم الأحمال المطبقة كلها، ويبقى دور الخرسانة العامل على الشد مقتصرأ على حماية التسليح من التآكل *Corrosion*، وتأمين الصلابية الضرورية (في العناصر التي يسمح فيها بتشكيل التشققات واتساعها إلى حدود متفق عليها)، ويجب عدم السماح بتشكيل التشققات في خزانات السوائل أو على الأقل التحكم بسعتها ما أمكن، وبحيث تبقى هذه السعة ضمن الحدود الحدية المسموح بها بهدف تأمين الكتامة المطلوبة ضد تسرب السوائل والمحاليل الأخرى من خلالها والوصول إلى التسليح، وهذا يمكن ضمانه إلى حد كبير بمنع وصول الإجهادات الشادة الناظمية في الخرسانة إلى القيم المسموح بها، وفي هذا الصدد:

أ - يجب ألا تزيد الإجهادات الشادة المسموح بها في الخرسانة نتيجة تطبيق أحمال الاستثمار $\bar{\sigma}_{ct}$ في العناصر الخاضعة للشد المركزي، أو الشد اللامركزي، عندما تكون اللامركزية صغيرة (القوة الشادة واقعة بين التسليحين العلوي والسفلي) على $0.4\sqrt{f'_c}$. ب . يجب ألا تزيد الإجهادات $\bar{\sigma}_{ct}$ في العناصر الخاضعة للانحناء البسيط، أو الشد اللامركزي،

عندما تكون اللامركزية كبيرة (القوة الشادة واقعة خارج التسليحين العلوي والسفلي) على $0.57\sqrt{f'_c}$.

ج . يجب أن يتم تخفيض قيمة σ_{cr} بمقدار 25% عندما لا يتم أخذ تأثير انكماش الخرسانة بالحسبان، وتبقى هذه القيمة دون تخفيض عند إدخال هذا الأثر في الحسابات اللازمة، كي لا يكون عاملاً إضافياً في زيادة الإجهادات الشادة المتولدة. وبالنسبة للخزانات، يمكن إهمال أثر الانكماش في الحالات التي تكون فيها هذه الخزانات مليئة بالسوائل، أو عندما تكون مطمورة، إذ يصبح هذا الأثر شبه معدوم، وقد يحدث بدلاً منه انتفاخ الخرسانة *Concrete Swelling* الذي يقلل من الإجهادات الشادة فيه. ويجب أخذ أثر الانكماش بالحسبان عندما تكون الخزانات مكشوفة (غير مطمورة) ومفرغة من السائل، بخاصة إذا كانت من النوع البرجي (العالي).

ينطبق ذلك على التغيرات الحرارية، إذ يؤخذ أثرها بالحسبان في الحالات السابقة المذكورة أعلاه، وقد يهمل في حالات أخرى. ويؤثر السيلان *Creep* بخاصة في العناصر الخرسانية المسلحة الخاضعة للضغط طويل الأمد أو الدائم، ولأن الإجهادات المتولدة نتيجة السيلان لا تكون كبيرة عادة، يتم أخذ أثرها بالحسبان في حالات خاصة مثل الأعمدة النحيفة *Slender Columns* أو قليلة النحافة وما شابهها، والتي تقوم بحمل الخزانات البرجية *Tower Tanks*، إذ إن السيلان يسبب انخفاضاً في قيمة معامل المرونة *Modulus of Elasticity*.

5-7- التحكم بسعة التشققات *Crack Width Control*:

إذا لم يكن ممكناً منع تشكل التشققات تحت تأثير أحمال الاستمرار، فمن الممكن الحد من اتساعها لتبقى أدنى من القيم العظمى المسموح بها. ومن الوسائط التي تضمن التحكم بسعة التشققات ما يلي:

أ) الوسائل التكنولوجية *Technological Means*: يتم ذلك عن طريق التحكم بتركيب الخلطة الخرسانية وتنفيذ الصب بشكل ملائم، (التركيب الحبي، تقليل محتوى الماء، تنفيذ الفواصل التكنولوجية بشكل صحيح مثلاً)، ورعاية الخرسانة في الساعات والأيام الأولى خاصة بعد الصب، وذلك للحد بشكل أساسي من سعة التشققات غير الإنشائية، الجدول (1-7)، وبالنسبة للتشققات الإنشائية فالأمر يتعلق بطرائق الحساب المباشر وصحة المعطيات وتطبيق المواصفات وضمان عدم تجاوز الأحمال التصميمية وغير ذلك.

(ب) التصميم المعماري المناسب.

(ج) الحساب المباشر.

فيما يلي كيفية الحد من اتساع التشققات بطريقة الحساب المباشر وفق الكود، [1]، ويمكن استعراض المعلومات المتعلقة بالوسائل الأخرى في المراجع ذات العلاقة، ولا سيما [5,11,12]. من أجل تخفيض سعة التشققات *Crack Width*، كي تبقى ضمن الحدود المقبولة (عندما تكون السماكة غير محسوبة من شرط الكتامة)، يتم اللجوء إلى استخدام قضبان تسليح صغيرة عادة لا تزيد على قيم محددة، وبحيث توضع بشكل يتوافق مع المسارات الإجهادية *Stress Trajectories* الفعلية الناتجة. في هذا الصدد، ينصح باستخدام قضبان تسليح مشدودة لا يزيد قطرها على القيمة الأكبر من العلاقتين التاليتين:

$$\phi_{max} \leq \Psi_s \left(\frac{800}{f_y} \right)^2 ; \quad (7-17a)$$

$$\phi_{max} \leq \Psi_s \left[\frac{75000 \mu_t}{f_y (1 + 10 \mu_t)} \right]. \quad (7-17b)$$

حيث :

ϕ_{max} - القطر الأعظمي لقضبان التسليح العاملة على الشد، [mm].

f_y - إجهاد الخضوع في التسليح، [MPa].

μ_t - نسبة المقطع الكلي لتسليح الشد المستخدم إلى المقطع الخرساني المستخدم المحيط به والذي ينطبق محوره على محور التسليح في منطقة الشد.

Ψ_s - معامل تجريبي تتعلق قيمته بسعة التشقق المسموح بها *Allowable Crack Width* ويؤخذ من الجدول (2-7).

عندما يزيد قطر قضبان التسليح على ما تعطيه العلاقتان (7-17)، عندئذ يمكن الحد من اتساع التشققات بتخفيض قيم الإجهادات المسموح بها في التسليح المشدود، وذلك بإدخال قيمة أخفض للإجهاد المسموح به، ومن ثم حساب سعة التشققات باستخدام العلاقتين التاليتين:

(1) إذا كانت الأحمال السنتاتيكية المطبقة غير مترافقة مع أحمال ديناميكية:

$$W_{max} = \left(0.15c + \frac{0.016\phi}{\mu_t} \right) \left(10\sigma_s - \frac{10}{\mu_t} \right) \times 10^{-5} \leq W_{all}. \quad (7-18a)$$

(2) عند وجود أحمال ديناميكية:

$$W_{max} = \left(0.15c + \frac{0.016\phi}{\mu_l} \right) \times \sigma_s \times 10^{-4} \leq W_{all} \quad (7-18b)$$

حيث:

ϕ - أكبر قطر قضيب تسليح مشدود مستخدم، [mm].

c - سماكة التغطية الخرسانية للتسليح المشدود، [mm] ، وتؤخذ مساوية المسافة من أقصى ليف طرفي مشدود وحتى سطح أقرب تسليح.

σ_s - أقصى إجهاد شد في التسليح مسموح به تحت تأثير أحمال الاستثمار في المقطع المنتشق (الإجهاد الجديد المسموح به)، على أن يضرب بالمعامل 1.6 عند استخدام قضبان تسليح لمساء مستديرة، وأن يحسب مقطع التسليح الجديد على أساسه مقدراً بالـ [MPa]، أي أن يكون: $\bar{\sigma}_s = \sigma_s$ في حالة استخدام طريقة الاجهادات المسموح بها و $\sigma_s = f_y$ في حالة استخدام طريقة حد المقاومة القصوى.

μ_l - كما سبق أعلاه.

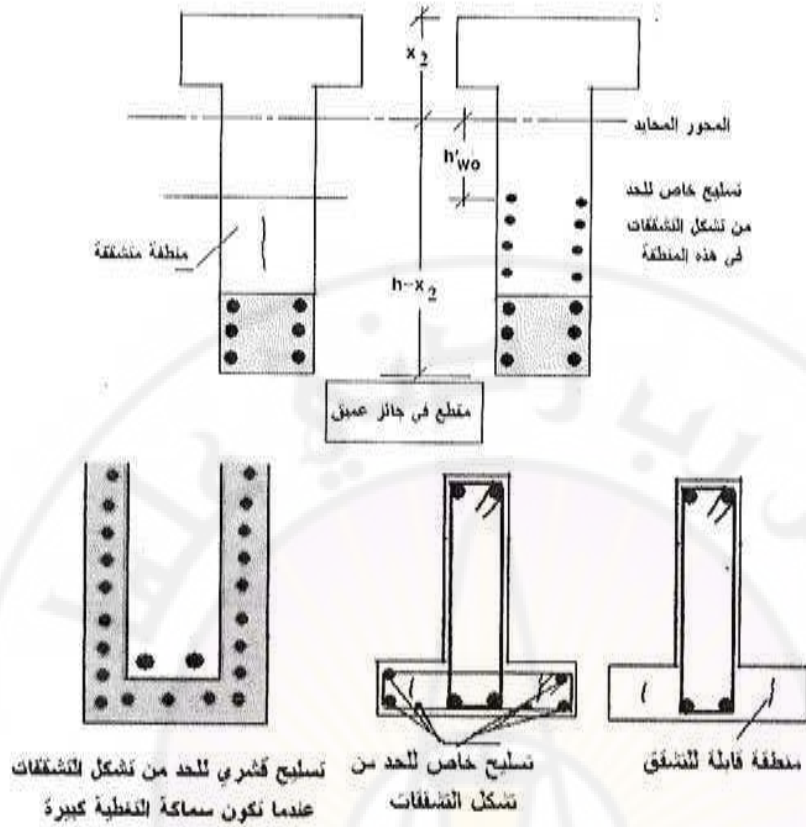
الجدول (7-1) الحد من سعة التشققات غير الإنشائية.

نوع التشققات	الإجراء
تشققات الانكماش اللدن Plastic shrinkage cracks	تخفيض كمية الماء ما أمكن من سطح البتون الطازج بالمعالجة المناسبة
تشققات الانكماش الجاف Dry shrinkage cracks	- استخدام بتون بمحتوى ماء منخفض مع زيادة محتوى الحصى - استخدام الجملة المعمارية المناسبة لتجنب تركيز الاجهادات - استخدام مواصل الانكماش بشكل مناسب وغير ذلك
تشققات الهبوط اللدن Plastic settlement cracks	تعديل ميزان الخلطة الببتونية من حيث الكدرج الحبي وتوعية الحصى ، تخفيض نسبة الماء إلى الإسمنت، الهز المناسب، الخبرة البشرية - يخص ذلك بشكل أساسي العناصر الطويلة وغير ذلك.

التشققات الحرارية المبكرة Early thermal cracks	الحد من ارتفاع الحرارة
	- استخدام عيار سمك منخفض
	- استخدام سمك مولد لحرارة منخفضة
	- استخدام حصويات مبردة في الطقس الحار
	- تبريد المواد في العناصر ذات المقاطع البيتونية الكبيرة
	- تقليل المنطقة إذا كان ذلك ممكناً
	الحد من التغيرات الحرارية Thermal gradients
	- المحافظة على شمولية الكونجرج
	- استخدام العزل السطحي للبيتون، وخاصة البلاطات
	الحد من التقلبات الحرارية Thermal movement:
	- استخدام حصويات ذات معامل تمدد حراري منخفض كالحجر الكلسي
	- كفيوض التقييد الخارجي External restraint
	- الصب المتكالي للعناصر الإنشائية قدر الامكان
	الحد من ظاهرة الكشم الذاتي للطبقة السطحية " ظاهرة Crazeing "
	- تجنب الخلطات الرطبة الغنية بالإسمنت
	- تجنب الهز المفرط للطبقة السطحية
	- تجنب استخدام الكونجرج منخفض الامتصاصية
	الاستمرار في المعالجة لتجنب دورات التجمد والذوبان

الجدول (7-2) قيم المعامل Ψ_s .

تسليح أملس السطح	تسليح خشن السطح (ذو أنواعات)	قيم W_{all} [mm]	وضع المنشأة
1.0	1.8	0.1	معرضة لعوامل ضارة شديدة التأثير في الخرسانة والتسليح، والمنشآت التي تتطلب الكثافة (خزانات السوائل، عناصر مسبقة الإجهاد وغيرها).
2.0	3.6	0.2	معرضة لعوامل خارجية وتتأثر بالرطوبة (جسور ومنشآت معدنية وغيرها).
3.0	5.4	0.3	إنشاءات عادية لا يؤثر التشقق على الخرسانة والتسليح.



الشكل (7-8) استخدام التسليح الخاص للحد من سعة التشققات.

يشار هنا إلى وجود توجيهات أخرى متعددة في المراجع والكودات العالمية تهدف إلى التحكم بسعة التشققات، فقد أعطى كود اللجنة الأوربية *CEB/ FIP Model Code* ، عدداً من الطرائق منها:

(آ) يتم تحديد سعة التشققات في العناصر الخاضعة للشد أو الانحناء تحت تأثير الأحمال المباشرة بثلاث طرائق هي وفقاً لتسلسل مصداقيتها:

1. تحديد القطر الأعظمي لفضبان التسليح.
 تخصص هذه الطريقة العناصر التي تزيد فيها نسبة التسليح على 0.5%، وهي أقل الطرائق دقة وتتعرض للكثير من النقد والتحفظ طالما أن خطر تآكل التسليح يتزايد مع تناقص الأقطار المستخدمة ، ومن ثم مع تناقص التباعد فيما بينها.

2. تحديد المسافة بين قضبان التسليح.
3. الحساب المباشر لسعة التشققات وذلك وفقاً لعوامل متعددة.
- ب) استخدام تسليح خاص إضافي من أجل التحكم بسعة التشققات في مناطق محددة من المقطع، الشكل (7-8). وينصح هنا باستخدام تسليح قشري في طبقات الحماية الخرسانية للتسليح عندما تزيد على 50mm.

7-6- أمثلة حسابية توضيحية Illustrative Calculated Examples

مثال (1): شداد من الخرسانة المسلحة يخضع لقوة شادة مركزية مؤلفة من حمولة مينة قدرها 0.2MN وحمولة حية قدرها 0.1MN، والمطلوب:

- 1- تحديد مقطع وتسليح الشداد عندما يسمح بتشكيل التشققات.
- 2- تحديد مقطع وتسليح الشداد عندما لا يسمح بتشكيل التشققات، مع إهمال أثر الانكماش في الخرسانة (الشروط ضارة للتسليح والخرسانة).
- 3- تحديد مقطع وتسليح الشداد عندما لا يسمح بتشكيل التشققات، دون إهمال أثر الانكماش في الخرسانة (الشروط ضارة للتسليح والخرسانة).

4- من أجل الشداد المصمم في الطلب (2)، يطلب التحقق من عدم تجاوز سعة التشققات الناتجة 0.1mm، علماً أن:

$$\varepsilon_{sh} = 0.25 \text{ mm/m}'; f_y = 240 \text{ MPa};$$

$$f'_c = 18 \text{ MPa} = 240 \text{ MPa}; E_s = 210000 \text{ MPa}$$

الحل:

الطلب (1): بإتباع طريقة الإجهادات المسموح بها (يسمح بتشكيل التشققات) يكون:

$$N_t = G + P = 0.3 \text{ MN.}$$

- القوة الشادة الاستثمارية المطبقة:

- مساحة تسليح الشد:

$$A_s = \frac{N_t}{\bar{\sigma}_s} = \frac{0.3}{0.55 \times 240} = 2.273 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 22.73 \text{ cm}^2.$$

- اختيار المقطع الخرساني والتسليح: المقطع الخرساني هنا للتغليف والحماية وتأمين الصلابة المطلوبة، ولذلك يمكن استخدام مقطع خرساني دون حساب على شكل مربع مثلاً طول ضلعه 30cm، وتسليح طولي أملس قدره 4φ28 مطوق بأساور عرضية عادية قطر 8mm، على تباعد s=20cm الشكل (7-9- a).

الطلب (2): بإتباع طريقة الإجهادات المسموح بها (لا يسمح بتشكيل التشققات، ويهمل انكماش الخرسانة):

$$N_t = G + P = 0.3MN \quad \text{- القوة الشادة الاستثمارية المطبقة:}$$

$$A_s = \frac{0.3}{0.55 \times 240} = 2.273 \times 10^{-3} m^2 = 22.73 cm^2 \quad \text{- مساحة تسليح الشد:}$$

- اختيار المقطع الخرساني والتسليح:

$$A_c = \frac{N_t}{\bar{\sigma}_{ct}} - nA_s = \frac{0.3}{0.75 \times 0.4 \sqrt{18}} - 10 \times 2.273 \times 10^{-3} \approx 0.2 m^2$$

يمكن استخدام مقطع خرساني مربع الشكل طول ضلعه $45cm$ ، وتسليح طولي أملس قدره $8\phi 20$ مطوق بأساور عرضية عادية قطر $8mm$ ، على تباعد $s=20cm$ الشكل (7-9-b).

الطلب (3): بإتباع طريقة الإجهادات المسموح بها (لا يسمح بتشكيل التشققات، ومع أخذ أثر الانكماش في الخرسانة)، ينتج:

$$A_s = \frac{0.3}{0.55 \times 240} = 2.273 \times 10^{-3} m^2 = 22.73 cm^2 \quad \text{- مساحة تسليح الشد:}$$

$$A_c = \frac{N_t + A_s E_s \varepsilon_{sh}}{\bar{\sigma}_{ct}} - nA_s = \quad \text{- المقطع الخرساني:}$$

$$= \frac{0.3 + 2.273 \times 10^{-3} \times 0.25 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^{-5}}{0.4 \sqrt{18}}$$

$$- 10 \times 2.273 \times 10^{-3} = 0.2244 m^2 = 2244 cm^2.$$

يمكن استخدام مقطع خرساني مربع الشكل طول ضلعه $50cm$ ، وتسليح طولي أملس قدره $8\phi 20$ مطوق بأساور عرضية عادية قطر $8mm$ ، على تباعد $s=20cm$ الشكل (7-9-c).

الطلب (4): يجب ألا يتجاوز القطر المستخدم لقضبان التسليح الطولية الملساء المستخدمة

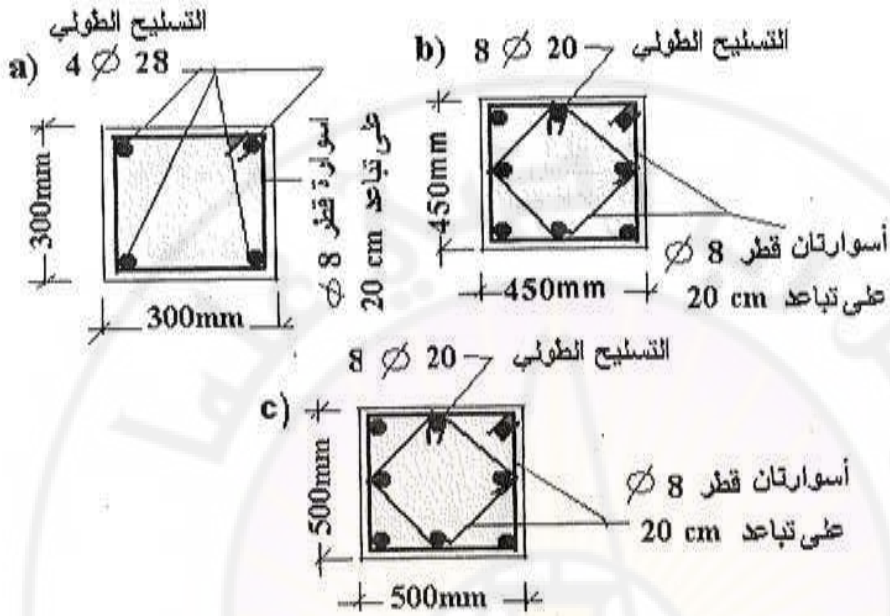
$$\phi_{max} = 1 \times \left(\frac{800}{240} \right)^2 = 11.11 mm ;$$

$$\phi_{max} = 1 \times \left[\frac{75000 \times 0.0124}{240 \times (1 + 10 \times 0.0124)} \right] = 3.44 mm .$$

الأكبر من:

حيث إن:

$$A_s = 25.14 \text{ cm}^2 ; A_{ct} = 2025 \text{ cm}^2 \Rightarrow \mu_t = \frac{25.14}{45 \times 45} = 0.0124$$



الشكل (7-9) مقاطع الشداد المدروس في المثال (1) وتسليحه الأصلي المحسوب والمعدل.

ويلاحظ أن القطر المستخدم يزيد على القيمة الأكبر أعلاه، ولذلك يجب حساب أكبر قيمة للإجهاد تحت تأثير أحمال الاستمرار σ_s ، وعده الإجهاد المسموح به، أي:

$$W_{max} = \left(0.15c + \frac{0.016\phi}{\mu_t} \right) \left(10 \times 1.6 \sigma_s - \frac{10}{\mu_t} \right) \times 10^{-5} \Leftrightarrow$$

$$0.1 = \left(0.15 \times 25 + \frac{0.016 \times 20}{0.0124} \right) \left(10 \times 1.6 \times \sigma_s - \frac{10}{0.0124} \right) \times 10^{-5} \Rightarrow$$

و تكون مساحة التسليح المشدود الجديدة مساوية: $\bar{\sigma}_s = \sigma_s \approx 71.54 \text{ MPa}$

$$A_s = \frac{N_t}{\bar{\sigma}_s} = \frac{0.3}{71.54} = 41.93 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 41.93 \text{ cm}^2.$$

وهذا يعني أن مساحة التسليح قد زادت بشكل واضح.

مثال (2): كمرة بسيطة مقطعها العرضي مستطيل عرضه 300mm وطول بحرهما الفعال 8m ، ومعرضة لعوامل خارجية وتأثر بالرطوبة، وهي تخضع لتأثير حمولة ميتة موزعة بانتظام مقدارها 30kN/m وحمولة حية موزعة بانتظام مقدارها 20kN/m ، والمطلوب حساب ارتفاع المقطع العرضي في الكمرة وتسليحه اللازم مع اتخاذ الاحتياطات الكفيلة بمنع تجاوز سعة التشققات للقيمة 0.2mm ، علماً أن $f_y = 240\text{MPa}$; $f'_c = 20\text{MPa}$.

الحل : تستخدم في الحل هنا طريقة الإجهادات المسموح بها.

(a) تحديد الارتفاع والتسليح :

$$w = g + p = 50\text{ kN/m}$$

الحمولة الكلية المطبقة:

القيمة العظمى لعزم الانحناء المطبق:

$$M = \frac{wl^2}{8} = \frac{50 \times (8)^2}{8} = 400\text{ kNm}.$$

الإجهادات المسموح بها في فولاذ التسليح:

$$\bar{\sigma}_s = 0.55 f_y = 0.55 \times 240 = 132\text{ MPa}$$

الإجهادات المسموح بها في الخرسانة على الضغط:

$$\bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c = 0.45 \times 20 = 9\text{ MPa}.$$

الارتفاع النظري الفعال للمقطع:

$$d = \gamma_h \sqrt{\frac{M}{b \bar{\sigma}'_c}} = 2.17 \times \sqrt{\frac{0.4}{0.3 \times 9}} = 0.835\text{ m}.$$

الارتفاع الكلي المختار (بأخذ الارتفاع الفعال $d = 850\text{ mm}$) : $h = 900\text{ mm}$

$$A_s = \frac{M}{\gamma_z d \bar{\sigma}_s} = \frac{0.4}{0.83 \times 0.85 \times 132} =$$

التسليح الحسابي على الشد:

$$= 42.95 \times 10^{-4}\text{ m}^2 = 42.95\text{ cm}^2$$

$$A_s = 10\phi 25 = 44.18\text{ cm}^2$$

التسليح المختار على الشد:

إذ يتم تحديد العوامل المساعدة في الحساب كما يلي:

$$\gamma_o = \frac{n \bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} = \frac{15 \times 9}{132} = 1.02 ; \gamma_x = \frac{\gamma_o}{1 + \gamma_o} = 0.51 ;$$

$$\gamma_z = 1 - \frac{\gamma_x}{3} = 0.83 ; \gamma_h = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x \gamma_z}} = 2.17.$$

(b) التحقق من عدم تجاوز سعة التشققات للقيمة العظمى المفروضة

توزع قضبان التسليح المشدودة على طبقتين كما في الشكل (7-10) ، وينتج أن:

$$\mu_t = \frac{A_s}{A_{ct}} = \frac{44.18}{390} = 0.11$$

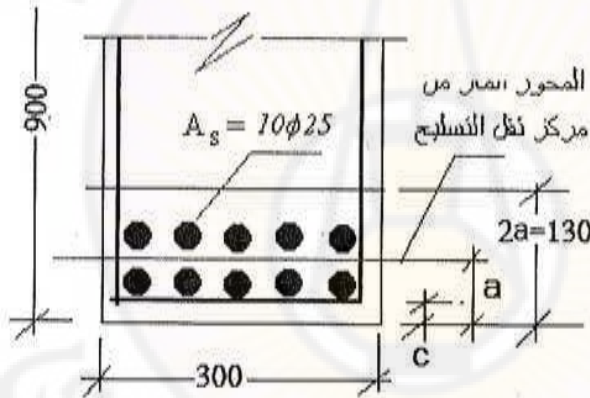
وبفرض أن قضبان التسليح المستخدمة ملساء السطح ومستديرة يكون $\Psi_s = 2$ ، ويجب ألا يزيد أكبر قطر مستخدم على القيمة الأكبر نتيجة الحساب بالعلاقتين (7-17) ، أي:

$$\phi_{max} \leq \Psi_s \left(\frac{800}{f_y} \right)^2 = 22.22 \text{ mm} ;$$

$$\phi_{max} \leq \Psi_s \left[\frac{75000 \mu_t}{f_y (1 + 10 \mu_t)} \right] = 32.72 \text{ mm} .$$

وبملاحظة أن القطر المستخدمة أقل من 32.72 mm تكون سعة التشققات الناتجة أقل من

0.2 mm



الشكل (7-10) توزيع قضبان التسليح المشدودة في المقطع العرضي للكمرة.

مثال (3) : يطلب التحقق من عدم تجاوز سعة التشققات للقيمة 0.1 mm في شداد من

الخرسانة المسلحة واقع في شروط شديدة الضرر على التسليح والخرسانة، وخاضع لقوة شادة

محورية مقدارها 0.48 MN ومسلح على الشد بتسليح مقداره $8\phi 20$ ، علماً أن المقطع

العرضي للشداد مربع طول ضلعه 500 mm وسماكة التغطية الخرسانية للتسليح 25 mm ، وأن

قضبان التسليح المستخدمة مستديرة وملتساء السطح وكذلك

$$f'_c = 20 \text{ MPa} ; f_y = 240 \text{ MPa}$$

الحل: إن المعامل $\Psi_s = 1$ ، وكذلك $\mu_t = \frac{25.14}{2500} = 0.01$ ، وأي $\phi_{max} = 8.512mm$ ،

إن القطر المستخدم لقضبان التسليح المشدودة أكبر من القيمة العظمى، الأمر الذي لا يضمن عدم تجاوز سعة التشققات المسموح بها للقيمة المطلوبة $0.1mm$ ، وهذا يعني ضرورة تخفيض الإجهادات المسموح بها في التسليح، ولأن الأحمال المطبقة غير مترافقة مع أحمال ديناميكية

$$W_{max} = \left(0.15c + \frac{0.016\phi}{\mu_t} \right) \left(10 \times 1.6 \sigma_s - \frac{10}{\mu_t} \right) \times 10^{-5} \quad \text{يكون:}$$

وبالتبديل بقيم المعطيات المفروضة ينتج أن $\bar{\sigma}_s = \sigma_s = 80 MPa$ ، وبعد هذا الإجهاد أكبر قيمة تحت أحمال الاستثمار (الإجهاد المسموح به)، تكون المساحة الجديدة للتسليح المشدود:

$$A_s = \frac{N}{\bar{\sigma}_s} = \frac{0.48}{80} = 0.006m^2 = 60cm^2.$$

وهذا أكبر من مساحة المقطع الكلي لقضبان التسليح المفروضة، ويجري اختيار عدد القضبان المناسبة باستخدام القطر السابق نفسه.

مثال(4): يطلب تصميم مقطع جدار خزان مائي من الخرسانة المسلحة يخضع لقوة شادة مركزية مقدارها $280kN/m$ ، والتحقق من الإجهادات الشادة الناتجة في الخرسانة، علماً أن المقطع غير متشقق وكذلك:

$$\bar{\sigma}_{ct} = 1.6 MPa ; \bar{\sigma}_s = 120 MPa ; n = 10 ;$$

$$E_s = 2.1 \times 10^5 MPa ; \varepsilon_{sh} = 0.2mm/m .$$

الحل: بأخذ شريحة من الجدار بعرض $b=1m$ وسماكة h_t هي سماكة الجدار، تكون مساحة المقطع العرضي للشريحة $A_c = h_t^2$ ، وبتحميل كامل القوة الشادة للتسليح فقط، يكون:

$$A_s = \frac{N}{\bar{\sigma}_s} = \frac{0.28}{120} = 23.3 \times 10^{-4} m^2 = 23.3cm^2 .$$

وبأخذ تأثير انكماش الخرسانة بالحسبان (لا تخفض الإجهادات المسموحة في الخرسانة على

$$\bar{\sigma}_{ct} = \frac{N + A_s \varepsilon_{sh} E_s}{A_c + nA_s} \quad \text{الشدة) ينتج:}$$

$$1.6 = \frac{0.28 + 23.3 \times 10^{-4} \times 0.2 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^5}{h_t + 10 \times 23.3 \times 10^{-4}} \quad \text{أي إن:}$$

وهذا يعني أن السماكة النظرية للجدار وفقاً لشرط الكتامة تساوي : $h_t = 0.213m$ ، وعملياً يمكن عدّها مساوية $250mm$.

وبالنسبة للتحقق من الإجهادات الناتجة فإن:

$$\sigma_{ct} = \frac{0.28 + 23.3 \times 10^{-4} \times 0.210^{-3} \times 2.1 \times 10^5}{0.25 + 10 \times 23.3 \times 10^{-4}} =$$

$$= 1.38 MPa \leq \bar{\sigma}_{ct} \quad ok.$$

مثال (5) : مقطع جدار خزان مائي من الخرسانة المسلحة يخضع لعزم انحناء مقداره $40kNm$ في شريحة عرضها $1m$ والمطلوب حساب سماكة الجدار وتسليحه اللازم بفرض أن الشد واقع في الجهة الملاصقة للماء .

$$\bar{\sigma}_{ct} = 1.8 MPa ; \bar{\sigma}_s = 120 MPa ;$$

$$f'_c = 18 MPa ; \bar{\sigma}'_c = 0.45 f'_c .$$

وأن:

الحل:

الإجهاد المسموح به في الخرسانة على الضغط:
- من شرط المقاومة (بعد المقطع متوازناً):

$$\gamma_o = \frac{n \bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_s} = \frac{15 \times 9}{132} = 1.0 ; \gamma_x = \frac{\gamma_o}{1 + \gamma_o} = 0.5 ;$$

$$\gamma_z = 1 - \frac{\gamma_x}{3} = 0.833 ; \gamma_h = \sqrt{\frac{2}{\gamma_x \gamma_z}} = 2.19 .$$

$$d = \gamma_h \sqrt{\frac{M}{b \bar{\sigma}'_c}} = 2.19 \times \sqrt{\frac{0.04}{1 \times 8}} = 0.155 m$$

والارتفاع الفعال:

وبفرض أن المسافة بين مركز ثقل تسليح الشد والليف الطرفي المشدود $a=50mm$ ، تكون سماكة الجدار من شرط المقاومة $h_t = 0.205m$.

- من شرط الكتامة (المقطع خاضع لعزوم انحناء فقط):

$$h_t = \sqrt{\frac{6M}{b \bar{\sigma}'_c}} = \sqrt{\frac{6 \times 0.04}{1 \times 1.8}} = 0.365m$$

ومن الواضح أن السماكة المحسوبة من شرط الكتامة هي الأكبر، ولذلك نؤخذ سماكة الجدار عملياً مساوية $400mm$.

$$A_s = \frac{M}{\gamma_z d \bar{\sigma}_s} = \frac{0.04}{0.833 \times 0.35 \times 120} = 11.433 \times 10^{-4} m^2 = 11.433 cm^2.$$

- مساحة مقطع التسليح اللازم:

وبفرض أن قطر قضبان التسليح المستخدمة $\phi = 14mm$ يكون:

$$A_s = 8\phi^2 = 12.31 cm^2$$

لكل شريحة بعرض $1m$ من الجدار وهو المطلوب.

مثال (6): جدار خزان مائي من الخرسانة المسلحة خاضع لعزم انحناء مقداره $50kNm$ يترافق مع قوة شادة محورية مقدارها $60kNm$ في شريحة منه بعرض $1m$ ، والمطلوب (بإهمال أثر الانكماش في الخرسانة) حساب سماكة الجدار وتسليحه بفرض أن الوجه الملاصق للماء هو الوجه الخاضع للشد، وأن:

$$\bar{\sigma}_{ct} = 2.1 MPa; \bar{\sigma}_s = 20 MPa; \bar{\sigma}'_c = 6 MPa.$$

الحل:

تحدد سماكة الجدار من شرطي المقاومة والكتامة:

$$0.75 \bar{\sigma}_{ct} = \frac{6M}{bh_t^2} + \frac{N}{bh_t} \quad \text{- شرط الكتامة:}$$

$$0.75 \times 2.1 = \frac{6 \times 0.05}{1 \times h_t^2} + \frac{0.06}{1 \times h_t} \Rightarrow h_t \approx 0.45m = 45cm \quad \text{أي إن:}$$

- شرط المقاومة: إن لامركزية القوة الشادة تساوي $e = \frac{M}{N} = 0.83m$ وهي أكبر من نصف

المسافة بين التسليحين في طرفي المقطع العرضي للشريحة، الشكل (7-11)، أي أن: $e > 0.5z = 0.2m$ ، وذلك بفرض أن الارتفاع الفعال $d = 0.425m$. يساوي العزم الصافي بالنسبة لمركز نقل تسليح الشد A_s (بإتباع طريقة الإجهادات المسموح بها):

$$M_s = M - 0.5Nz = 0.05 - 0.5 \times 0.06 \times 0.4 = 0.038 MNm .$$

ويعد المقطع متوازناً يكون (باستخدام الجداول مثلاً):

$$\gamma_o = \frac{n\bar{\sigma}'_c}{\bar{\sigma}_c} = 0.75 \Rightarrow \gamma_x = 0.86; \gamma_z = 0.71; \gamma_h = 2.32$$

$$d = \gamma_h \sqrt{\frac{M_s}{b\bar{\sigma}'_c}} = 0.185m = 18.5cm . \quad \text{أي إن:}$$

هذا يعني أن السماكة المحسوبة من شرط الكتامة هي الأكبر، ولذلك تؤخذ سماكة الجدار مساوية 45cm . ولأن التسليح اللازم على الشد مؤلف من تسليح لمقاومة العزم M_s وتسليح لمقاومة القوة N ينتج أن:

$$A_{s1} = \frac{M}{\gamma_s \bar{\sigma}_s d} = 8.66\text{cm}^2$$

- التسليح الخاص بعزم الانحناء:

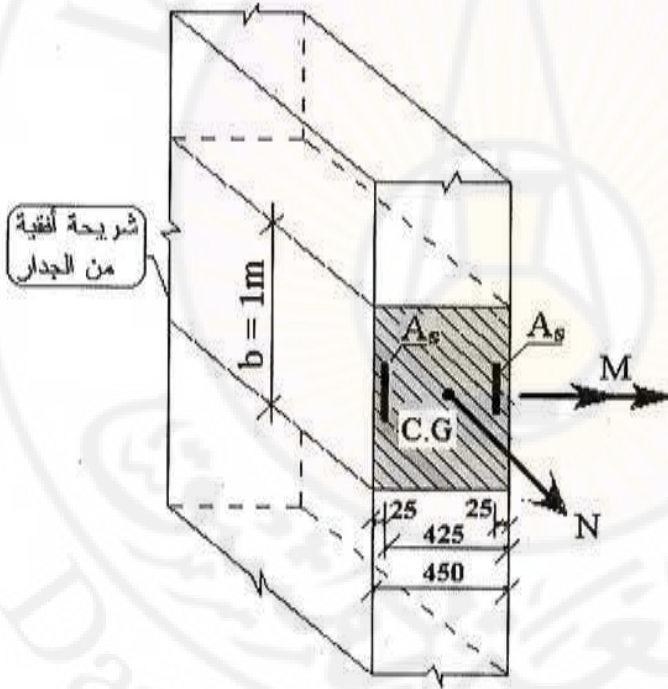
$$A_{s2} = \frac{N}{\bar{\sigma}_s} = 5\text{cm}^2$$

- التسليح اللازم لمقاومة القوة الشادة:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 13.66\text{cm}^2$$

- التسليح الكلي على الشد مساوياً:

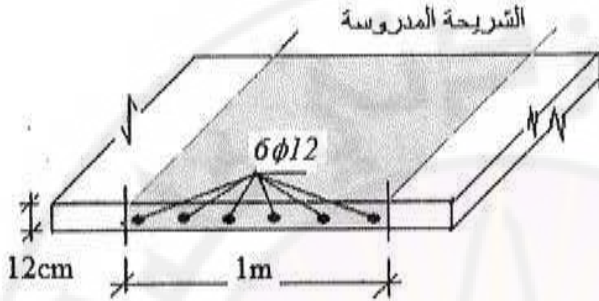
ويمكن هنا اختيار تسليح شد قدره $9\phi 14/m$ ، وفي الطرف المضغوط يمكن اختيار $6\phi 8/m$ وهو تسليح إنشائي لأن السماكة المختارة أكبر من السماكة المحسوبة بعد المقطع في حالة توازنية وهو المطلوب.



الشكل (11-7) مقطع الشريحة الجدارية المدروسة.

مثال (7): (بحله الطالب)

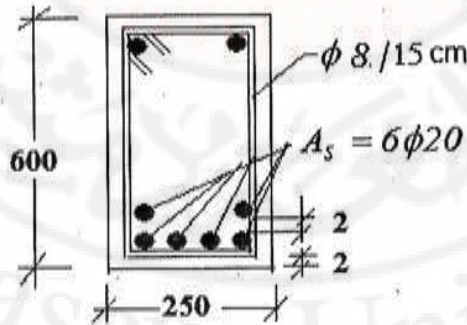
المطلوب التحقق من متطلبات حد التسقق في شريحة من بلاطة خرسانية مسلحة، الشكل (7-12)، واقعة تحت تأثير عوامل خارجية رطبة، علماً أن سمكها 12cm وعرضها 100cm ، ومساحة على الشد فقط بتسليح قدره $6\phi 12$ ، وكذلك $f_y = 240\text{MPa}$; $W_{max} = 0.2\text{mm}$



الشكل (7-12) شريحة البلاطة في المثال (7).

مثال (8): (بحله الطالب)

المطلوب التحقق من متطلبات حد التسقق في جانز من الخرسانة المسلحة خاضع للانحناء المقطعه العرضي مستطيل أحادي التسليح، الشكل (7-13)، حيث $A_s = 6\phi 20$ على طبقتين، عرضه 25cm وارتفاعه 60cm ، وسمك التغطية 2cm ، ويعاني من تأثير عوامل ضارة وغير معرض للاهتزازات، بفرض $W_{max} = 0.1\text{mm}$ و $W_{max} = 0.2\text{mm}$ ، وفي حال عدم صلاحية القطر المستخدم، يطلب الحساب عند التزام القطر المستخدم، وعند تغيير هذا القطر، علماً أن: $f_y = 240\text{MPa}$ (التسليح خشن السطح ويهمل أثر انكماش الخرسانة).



الشكل (7-13) المقطع المدروس في المثال (8).

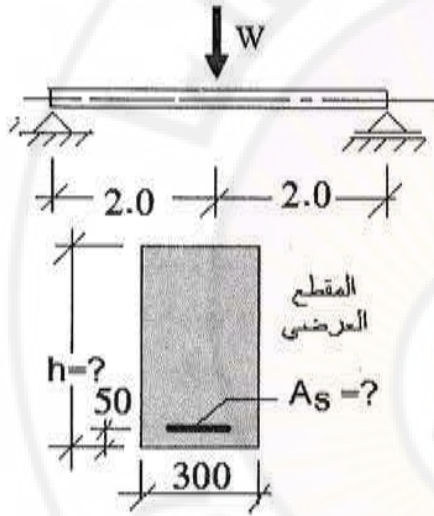
مثال (9): (يحله الطالب)

كمره خرسانية مسلحة بسيطة الاستناد أحادية التسليح مقطوعها العرضي مستطيل ومحملة بحمولة مركزة كلية (بما في ذلك الوزن الذاتي) قدرها $W = 25kN/m$ ، الشكل (7-14) ، والمطلوب:

(1) تحديد ارتفاع الكمره h وتسليحها على الشد A_s ، مع اختيار القطر المناسب، وبحيث تتحقق متطلبات حالة حد التشقق المسموح به، وبفرض أن السعة العظمى للتشققات $W_{max} = 0.2mm$.

(2) ما أقل ارتفاع للكمرة يحقق شرط الكثامة؟

المعطيات: سماكة التغطية الخرسانية للتسليح في الجوانب $c = 15mm$ ، $f'_c = 20MPa$ ، $f_y = 240MPa$ ، ويهمل أثر انكماش الخرسانة.



الشكل (7-14) الكمره المدروسة في المثال (9)

مثال (10): (يحله الطالب)

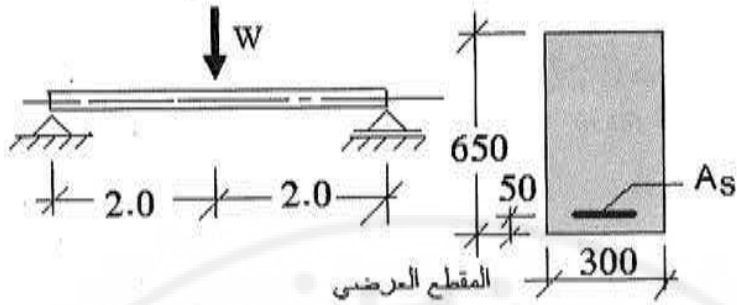
كمره خرسانية مسلحة بسيطة الاستناد أحادية التسليح مقطوعها العرضي مستطيل ومحملة بحمولة مركزة كلية W (بما في ذلك الوزن الذاتي) ، الشكل (7-15) ، والمطلوب:

(1) تحديد القيمة العظمى للحمولة W (بما في ذلك الوزن الذاتي للكمرة).

(2) هل تحقق الأبعاد المفروضة والتسليح متطلبات حالة حد التشقق المسموح به؟

المعطيات المفروضة: السعة العظمى للتشققات $W_{max} = 0.2mm$ وكذلك:

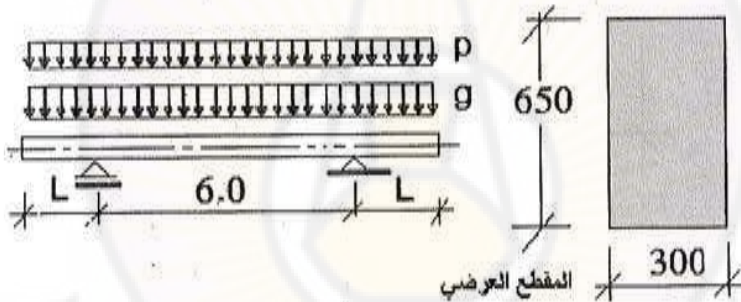
$f'_c = 18MPa$ ، $f_y = 240MPa$ ، $A_s = 5\phi 22$ ، حيث قضبان التسليح ملساء السطح، ويهمل أثر انكماش الخرسانة.



الشكل (15-7) الكمرة المدروسة في المثال (10).

مثال (11): (يحله الطالب)

كمرة خرسانية مسلحة مع امتدادين ظفريين ومسلحة على الشد فقط، ولها المقطع العرضي المبين في الشكل (7-16)، وتخضع لأحمال موزعة بانتظام وفق حالة التحميل الموضحة، والمطلوب (بإتباع طريقة حد الإجهادات المسموح بها):



الشكل (16-7) الكمرة المدروسة في المثال (11).

1) تحديد l_{max} من أجل الحالة التوازنية ، حيث: $p = 20kN/m$; $a = 5cm$ ، $g = 30kN/m$ (بما في ذلك الوزن الذاتي).

2) هل تتحقق متطلبات حالة حد التشقق المسموح به في منطقة العزم الموجب، بفرض أن التسليح المشدود خشن السطح وقدره $A_s = 5T20$ ، ويهمل اثر الانكماش في الخرسانة؟ حيث إن:

$$c = 2cm , \Psi_s = 3.6 , W_{all} = 0.2mm , f'_c = 20MPa ; f_y = 250MPa$$

مثال (12): (بحله الطالب)

شداد مقطعه العرضي مستطيل تسليحه وأبعاده كما في الشكل (7-17) ويخضع لتأثير حمولة حديدية شادة كلية قدرها $N_{tu} = 3MN$ تؤثر على مسافة قدرها $e = 60cm$ من مركز ثقل المقطع، والمطلوب (بإتباع طريقة حد المقاومة القصوى):

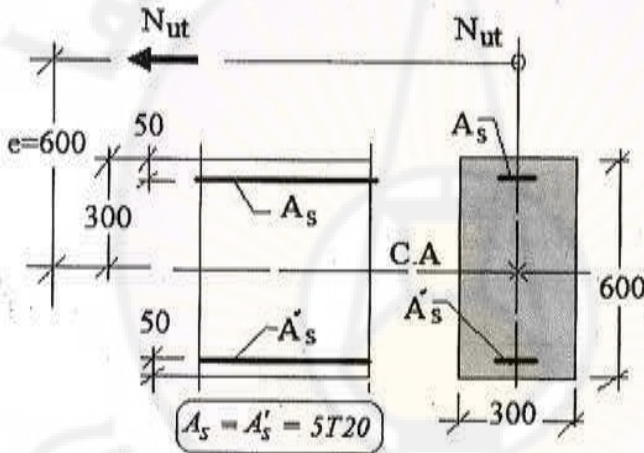
(أ) التحقق من سلامة المقطع العرضي.

(ب) التحقق من متطلبات حد حالة التشقق المسموح به بفرض أن $W_{max} = 0.2mm$.

(ت) من أجل المقطع السابق وبفرض أن $e = 10cm$ ما التسليح اللازم لتأمين متطلبات

المقاومة وحد التشقق من أجل $N_{tu} = 2MN$ و $W_{max} = 0.2mm$ ؟

المعطيات الإضافية: $f_c' = 22MPa$; $f_y = 250MPa$ ، التسليح العامل أملس السطح.



الشكل (7-17) الكمره المدروسة في المثال (12).

الفصل الثامن

الحساب وفق حالة حد التشكل (السهوم)

Calculation due to Limit State of Deflections

(إعداد: أ. د. م. غسان محمود)

1-8- تمهيد.

2-8- السهوم في المقاطع المرنة المتجانسة.

3-8- السهوم المسموح بها.

4-8- السهوم في المقاطع الخرسانية المسلحة.

5-8- أمثلة حسابية توضيحية.



كان تصميم العناصر الخرسانية المسلحة الخاضعة للانحناء في الماضي منفذاً بشكل أساسي لتكون ذات صلابة كبيرة بشكل عام، وذلك من خلال اختيار مقاطع عرضية كبيرة مع مجازات قصيرة، وقد كان ذلك مسوغاً بالنظر لعدم توفر الطرائق الحسابية الدقيقة والتقانة اللازمة، وكذلك لضعف الميزات الميكانيكية لمواد الإنشاء المستخدمة وقلة المعلومات والخبرة وغير ذلك. ومع تطور التكنولوجيا وازدياد الخبرة العلمية والعملية، وتوفر التقانة الحاسوبية الأكثر تطوراً في عمليات التحليل الإنشائي، وتحسن ميزات المواد المستخدمة والمتطلبات الحضارية المتسارعة، كان لا بد من السعي الدائم لإنتاج عناصر معمارية أكثر مرونة في الاستخدام. فقد أتاح ازدياد مقاومة التسليح والخرسانة المجال لاستخدام مقاطع عرضية أصغر وبتسليح أقل ومجازات أكبر للعناصر الإنشائية، الأمر الذي ينشأ عنه كما هو معروف إمكانية تجاوز حالات الاستثمار الحديدية، أي حصول سهوم كبيرة وتشققات غير مسموح بها وغير ذلك، كما أن ثلثية الحاجات الصناعية والسكنية بوجود خرسانة ذات جودة وأداء أعلى أفسح المجال إلى فك قوالب الصب بوقت أبكر، الأمر الذي ينجم عنه أخطاء كبيرة في تقدير الإجهادات الفعلية تحت أحمال الاستثمار، وبوجود الأحمال الإنشائية المبكرة المترافقة مع عملية التنفيذ الإنشائي يصبح الأمر أكثر إرباكاً عند تقدير التأثير طويل الأمد لهذه الأحمال وتأثير ذلك في قيم السهوم النهائية وسعة التشققات وغير ذلك. وبالنظر لكون كلفة بلاطات السقوف في الأبنية الهيكلية تشكل نحو 80 إلى 90% من كلفة الهيكل ككل، كان لا بد من تخفيض سمكها قدر الإمكان، ولكونها ذات تسليح منخفض على الشد بشكل عام، مقارنة مع العناصر الإنشائية الأخرى، يصبح من الضروري التدقيق في السهوم الناتجة وتحديد بطرائق حسابية أكثر دقة لما لذلك من علاقة بصلابة العناصر وأداء الخرسانة والتسليح (وجود أو عدم وجود تشققات) وغير ذلك من العوامل الأخرى.

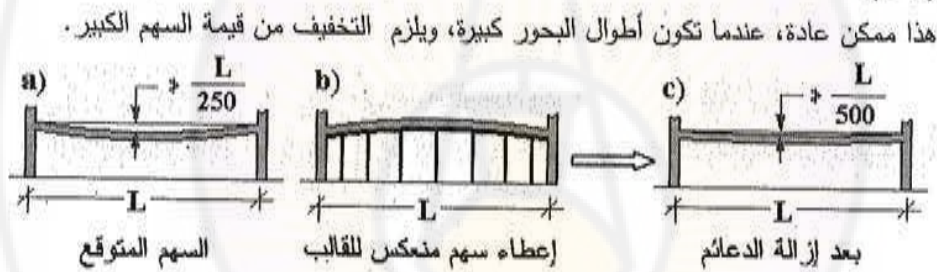
من هذا المنطلق، كان لا بد من التركيز على الحساب وفق حالات الاستثمار الحديدية ومنها حالة السهوم *Deflections* (تنشأ الحالة الحديدية للاستثمار عندما يصبح العنصر الإنشائي بعدها غير قادر على تلبية متطلبات الأداء السليم تحت تأثير الأحمال الاستثمارية المطبقة التي تعدّ مسألة مرتبطة بشكل أساسي بصلابة العنصر الإنشائي)، إلى جانب عوامل متعددة سيتم التطرق إليها في سياق البحث. والحساب وفق حالات الاستثمار الحديدية يتزامن مع تحقيق متطلبات المقاومة لحالات حدود الانهيار، وهي الحالات التي لها علاقة بقدرة التحمل بشكل

أساسي، وبمعنى آخر فليس من الضروري أن تكون العناصر القوية عناصر صلبة، وهذا ما تم التركيز عليه من قبل أبحاث واختبارات كثيرة أفضت إلى تحسين مطرد في طرائق الحساب التي اعتمدت في الكودات الوطنية والعالمية، مع الإشارة إلى وجود طرائق كثيرة مختلفة في هذه الكودات لا تعتمد على الحساب المباشر للسهم، وإنما على خطوات أكثر بساطة وافترضات تفي بالغرض في كثير من الأحيان، ومع الإشارة أيضاً إلى تباين ملحوظ في هذه الطرائق سواء أكانت مبسطة أم دقيقة تعتمد على التحليل الإنشائي المعمق لكثرة العوامل المؤثرة على قيم السهم النهائية الناتجة في العناصر الإنشائية.

تمثل حالة حد التشكل (السهم) إحدى حالات حدود الاستثمار الحديدية، إذ لا يكفي أن تحقق المقاطع الخرسانية المسلحة متطلبات حالات حدود الانهيار الحديدية، وإنما يجب أن تحقق أيضاً متطلبات حدود الاستثمار الحديدية، وهذا يعني ألا تتجاوز قيم الانتقالات الناتجة عن تطبيق الأحمال المختلفة (السهم *Deflections* أو زوايا الدوران *Angles of Rotation*) القيم المسموح بها، وفقاً لجمال العناصر الإنشائية المدروسة وقيم الحمولات المطبقة وأشكالها المختلفة، بما في ذلك أماكن توضعها ومدة تطبيقها وغير ذلك. وعادة، تكون المقاطع المصممة وفق حالة حد الإجهادات المسموح بها مقاطع ذات صلابة كافية تقلل من قيم الانتقالات المتشكلة، لكن الحساب وفق حالة حد المقاومة القصوى يعطي مقاطع ذات أبعاد أقل، وهذا يعني مقاطع ذات صلابة أقل تسبب تجاوز الانتقالات الناتجة للقيم المسموح بها في أكثر الأحيان. وبشكل عام، لا بد من التأكد من قيم الانتقالات الناتجة ومقارنتها مع القيم المسموح بها، واتخاذ الإجراءات الضرورية لبقاء السهم وزوايا الدوران وغيرها من الانتقالات أقل من القيم الحديدية المسموح بها. وفي هذا الصدد، سيتم التركيز في الفصل الحالي على حساب السهم في العناصر الخاضعة لعزوم انحناء بشكل عام وتقريبي، دون الخوض في تفاصيل الحسابات الدقيقة المتعلقة بالتحليل الإنشائي المتعمق. ويجدر بالذكر هنا أن ما يتحكم بقيم السهم المسموح بها كامن في متطلبات الاستمرار في استثمار المنشأ، والفاوت المسموح به للسهم *Deflection Tolerance* في عناصره الإنشائية المكونة له، وكذلك التأثير المتبادل بين هذه العناصر، وليس من الضروري تحديد قيم السهم في العناصر الإنشائية كلها، وإنما الاكتفاء بالعناصر الرئيسة الحاملة القابلة للتأثر بالقيم الكبيرة للسهم الناتجة عن الأحمال اللحظية *Live Loads* أو الطويلة الأمد *Dead Loads*.

What's Deflection؟ ما السهم؟ (1)

إنه مقدار الانتقال الحاصل باتجاه تأثير الحمولة المطبقة أو عزم الانحناء المطبق، أي مسافة التقوس الحاصل، ويجب التمييز بين السهم الشاقولي تحت تأثير أحمال الثقالة *Gravity Loads* (أو ما ينجم عنها من عزوم انحناء) كما هو الحال في العناصر الخاضعة للانحناء كالكمرات والبلاطات وغيرها، والسهم الجانبي (الإزاحة الأفقية) نتيجة تأثير الأحمال الجانبية، ويمثل الانتقال الأفقي *Drift Sideway* ما يحصل في أعلى العناصر المدروسة كجدران القص *Shear Walls* مثلاً، أو ما يحصل نتيجة التحنّب الجانبي *Lateral Buckling* في الأعمدة والجدران عند خضوعها لأحمال ضاغطة وغيرها. يمكن تخفيض السهوم الناتجة تحت تأثير حمولة معينة، دون تغيير الحمولة ذاتها أو تغيير خواص المواد الإنشائية وغير ذلك من خلال تطبيق ما يسمى السهم المنعكس *camber* وبما لا يزيد على $\frac{L}{250}$ بالنسبة للمساند، حيث L طول البحر المدروس، وهذا ما يوضحه الشكل (1-8).



الشكل (1-8) تخفيض السهم الصلي بإدخال السهم المنعكس:

يعطى الكوفراج تحدياً إلى الأعلى بمقدار السهم المنعكس لامتصاص السهم الناجم عن وزن الكوفراج ووزن الخرسانة وهي في الحالة الطرية، وكذلك الأحمال المبكرة نتيجة أوزان كوفراج الطابق الأعلى والسهم الناجم عن العناصر الخرسانية المسلحة عند وضعها في الخدمة نتيجة الوزن الذاتي وانكماش الخرسانة، وكذلك حركة العمال ووسائل النقل ومواد البناء والتسليح (الأحمال المرتبطة بتنفيذ العمل) وغير ذلك.

ب) الأسباب العامة للحد من السهوم:

يمكن تصنيف الأسباب في الحالة العامة كما يلي:

1. أسباب تتعلق بإداء العناصر منفردة أو مجتمعة *Performance requirements*، وما يتمخض عنها من مشاكل، علماً أن ذلك لا ينطبق بالضبط على كل العناصر، وهذا ما يوضحه الجدول (1-8) بشكل عام من أجل المباني العامة والسكنية. وبالنسبة للأسباب الأخرى، فليست موضوع الاهتمام هنا في هذا البحث.

الجدول (1-8) أسباب ضرورة الحد من السهوم في الحالة العامة.

الأسباب	المشاكل الناجمة
انحناء العناصر إلى الأسفل بشكل غير مسموح به <i>Vertical sag</i>	خلق انطباع بوجود خطر رغم عدم وجود تصدعات وتشققات مرئية مخيفة، وإحداث حالة عدم استقرار في الجملة الإنشائية.
تضرر العناصر غير الإنشائية	- تشقق وتصدع القواطع الصلبة. - تضرر الجدران المحمولة. - تضرر الطينة والإكساءات. - تضرر الزجاج وإطارات الأبواب والنوافذ. - تضرر السقوف المستعارة. - تضرر بلاط السطوح والأرضيات وغير ذلك.
تضرر التجهيزات الفنية	الخلل في أداء التجهيزات نتيجة تأثر الأبعاد بما يخالف المواصفات الفنية (كالمساعد مثلاً).
تجميع المياه فوق السطوح والأرضيات	تتزايد المياه المجمعة مع زيادة السهوم، وبذلك تزداد الأحمال، ومن ثم السهوم طويلة الأمد وهذا له أثر سلبي في الديمومة عندما تكون المياه ملوثة كما في الكراجات ومرائب السيارات.
تضرر الأعمدة الحاملة وعقد ارتباط الأعمدة مع الجوائز	تحدث تشوهات أفقية في الأعمدة الطرفية خاصة، ويحدث دوران في العقد بخلق حالات إجهادية أخرى غير مأخوذة بالحسبان.
تغير الأحمال على المساند	بسبب تشوه الجدران (القواطع) نتيجة السهوم، تزداد الأحمال على المساند الخارجية للجدران، وتنخفض على المساند الداخلية خلافاً للتصميم.

2. أسباب تتعلق بمتطلبات الزبائن *Client requirements*، وهذا يشمل:

- قابلية الاستخدام *Adaptability of structures*، حيث المطلوب مجازات كبيرة وفضاءات أوسع، إضافة لتنوع الاستخدام وإعادة الاستخدام وغير ذلك، الأمر الذي يزيد من السهوم، ومن ثم تأثر القواطع ذات الانهيار الهش عادة *Brittle behavior* سلبياً بالسهوم الناتجة.

- سرعة التنفيذ *Speed of construction*، حيث يكون المطلوب سرعة الاستلام لأغراض اقتصادية واستهلاكية وغيرها، ويتم فك القوالب قبل الأوان مما يسبب سهوماً أكبر من القيم التصميمية.

- المرونة الإنشائية *Structural flexibility* اللازمة لإحداث الفتحات والتغييرات اللاحقة في الجمل الإنشائية وغير ذلك.

- الحاجة لمعرفة قيم السهوم المتوقعة، أي التنبؤ بالقيم الفعلية للسهوم *Realistic predictions*، وقد يكون لذلك علاقة بوضع القواطع والتجهيزات وغير ذلك.

3. أسباب تتعلق بمتطلبات أصحاب العقود *Contractor requirements* بهدف الإقلال من الكلفة الاقتصادية، حيث يصبح المصمم مضطراً لاستخدام جمل أخرى أقل كلفة تعطي سهوماً أكبر، كما هو الحال عند استخدام البلاطات المستندة إلى الأعمدة مباشرة بدلاً من البلاطات المستندة على الأعمدة عن طريق الجوائز.

4. أسباب تتعلق بمتطلبات المصمم *Designer requirements* الذي يرغب باستخدام طرائق تحليلية لحساب السهوم بدلاً من الاعتماد على الطرائق التحقيقية *Detection Methods* أو ما يسمى أحياناً الطرائق الاختبارية (غير الحسابية) فقط.

(ج) متى يجب التحقق من قيم السهوم حسابياً؟

من هذه الحالات مثلاً ما يلي:

- عندما لا تحقق أبعاد المقاطع العرضية القيم المسموح بها للسهوم الناتجة (السهم الفعلي أكبر من السهم المسموح به)، أو لا يمكن تحقيق متطلبات الطرائق المبسطة الأخرى غير الحسابية (

مثلاً القيم المسموح بها لنسبة طول المجاز الفعال إلى العمق $\frac{L}{h}$ أقل من القيم الفعلية المطلوبة).

- عندما يكون المطلوب تحديد السهوم تحت تأثير الحمولة طويلة الأمد (تأثير السيلان).

- عندما يكون المطلوب تصميم عناصر إنشائية أكثر اقتصادية (عناصر أصغر من حيث الأبعاد).

- عندما يكون تأثير السهوم أساسياً بالنسبة لأداء الجدران والقواطع وغير ذلك من العناصر غير الإنشائية.

- عندما يتأثر السهم الناتج بشكل أساسي بأحمال غير الأحمال التصميمية وهي أحمال الإنشاء المبكرة (*Early-age Construction loads*) ، حيث توجد منشآت متعددة ذات خصوصية معينة (كالأبنية التجارية والجسور مثلاً) تتطلب تحديد السهوم حسابياً خلال مراحل التحميل المختلفة وليس تحت تأثير أحمال الاستثمار المطبقة فقط. ففي الأبنية التجارية مثلاً، يفضل أن تكون العناصر الخاضعة للانحناء كالبلاطات والجوائز ذات فتحات أكبر، وأن تكون العناصر الخاضعة للانحناء أقل بهدف تحقيق استغلال أفضل للمساحات الطابقية وتخفيض الارتفاع الكلي للمبنى، وهذا يعني أن السهوم الناتجة ستكون أكبر، الأمر الذي يتطلب سماكات أكبر لهذه العناصر، وهذا سيخل طبعاً بشروط الاستثمار الطبيعية لمثل هذه المنشآت، وإضافة لذلك تكون السهوم الناتجة تحت أحمال الاستثمار التصميمية في العناصر الخرسانية المسلحة محكومة بأداء عام غير مرن، أي إن تحديد السهوم في هذه العناصر يجب أن يتم وفقاً لتاريخ أو عمر التحميل وليس تحت تأثير أحمال الاستثمار الكاملة فقط (يكون التسليح مرناً الأداء، بينما الخرسانة ليس كذلك) . وتزداد التعقيدات هنا لكون الأداء الفعلي للخرسانة مجهولاً في مراحل التصميم، حيث لا تتطابق خواصه الأساسية بالضرورة مع المعطيات التصميمية. من هذا المنطلق تتجه الاشتراطات الكودية للإقلال من نسبة طول المجاز/ العمق للتعويض عن ذلك، ومن ثم إعطاء سهوماً متوقعة أكبر من السهوم الفعلية، الأمر الذي يتعارض مع الاتجاه المفضل في الأبنية التجارية والمستودعات والجسور وغيرها.

- لقد درجت العادة في كثير من الأحيان أن يتم تصميم العناصر الإنشائية وفق حالات حدود الانهيار الحدية أولاً (التحقيق على حد المقاومة القصوى) لأهداف اقتصادية بشكل خاص ومسايرة الأداء الفعلي، وهذا ما ينتج عنه مقاطع أقل أبعاداً هندسية ، الأمر الذي لا يحقق بالضرورة متطلبات الاستثمار بسبب تجاوز السعة المسموح بها للتشققات وتجاوز القيم المسموح بها للسهوم بسبب النحافة. هنا لا بد من تحديد السهوم حسابياً وفق الطرائق المناسبة.

د) العوامل المؤثرة في قيم السهوم *Factors influencing deflections*:

تتنوع العوامل المؤثرة على قيم السهوم النهائية المتشكلة خلال فترة الاستثمار، ويتداخل الكثير فيما بينها، الجدول (8-2)، وهي بشكل عام تنشأ في بمراحل مختلفة:

الجدول (8-2) أهم العوامل المؤثرة على قيم السهم.

<ul style="list-style-type: none"> - معامل المرونة الذي يتغير مع الزمن، اثر ذلك على تحديد الصلابة العزمية EI. - درجة جودة الخرسانة. - المقاومة على الشد. - خواص الحصىوات. 	<p>الخرسانة المستخدمة</p>
<ul style="list-style-type: none"> - تسليح الشد. - تسليح الضغط. 	<p>التسليح المستخدم</p>
<ul style="list-style-type: none"> - الرطوبة النسبية. - الحرارة المحيطة. 	<p>العوامل البيئية</p>
<ul style="list-style-type: none"> - حالة الأداء: قبل التشقق أو بعد التشقق وتأثير ذلك في تحديد الصلابة العزمية EI. - الشكل الهندسي المنتظم أو غيره. - التناظر. - وجود الفتحات، شكلها وأبعادها ومواقعها. - الاستمرارية وطريقة الاستناد. - ظاهرة التصلب في الشد (تأثير الخرسانة غير المتشقة بين التشققات). - تأثير العناصر الثانوية كالقواطع وجدران البلوك و التجهيزات على زيادة الصلابة. 	<p>الحالة الإنشائية</p>
<ul style="list-style-type: none"> - تأثير أحمال الإنشاء المبكرة. - الأحمال الطارئة. - نسبة الحمولة الميتة والحية. - مدة التحميل. - شكل التحميل 	<p>الأحمال المطبقة</p>
<ul style="list-style-type: none"> - وجود الأعمدة والجوائز والجدران والقواطع وغيرها. - تأثير المقياس. - تأثير التسليح. - الارتباط مع العناصر الأخرى. 	<p>التقييد الطرفي والداخلي <i>Internal and External Restraint</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> - ظاهرة التصلب في الشد <i>Tension Stiffening</i> (تأثير الخرسانة غير المتشقة بين التشققات). - تأثير العناصر الثانوية كالقواطع وجدران البلوك والإكاملات والتجهيزات على زيادة الصلابة، وتأثير انكماش الخرسانة وطريقة الصب والتجهيزات وغير ذلك. 	<p>التصلب الإضافي <i>Additional Hardening</i></p>

- مرحلة التصميم *Design Phase* :

يتعلق ذلك بشكل أساسي بطرائق الحساب المتبعة ذاتها، باعتماد المواصفات المطلوبة لمواد الإنشاء (نوعية الخرسانة المستخدمة: مواصفات المكونات الأساسية والإضافية للخرسانة، المقاومة الفعلية على الشد والضغط، معامل المرونة)، نسب التسليح المشدود والمضغوط وشكله وتوزيعه بالاتجاهين الطولي والعرضي، ومعامل مرونته، ومواصفات التسليح العرضي، شكل الحمولات (ستاتيكية أو متكررة)، تقدير فترة تأثير الحمولة (مؤقتة أو دائمة)، والنسبة بينهما، الشروط الطرفية، تأثير التشوهات الزمنية والانكماش والشروط البيئية، طبيعة التشققات واتساعها، الأخذ بالحسبان مساهمة العناصر الأخرى في صلابة العناصر المدروسة، وظاهرة التصلب في الشد نتيجة مساهمة الخرسانة بين التشققات وغير ذلك.

- مرحلة الإنشاء *Construction Phase*

هذا يرتبط بشكل أساسي بتأثير ما يسمى بأحمال الإنشاء الإضافية المبكرة الدائمة *Early-age Dead Construction Overloads*، هبوطات الكوفراج والأخطاء المتعلقة به، طريقة صب الخرسانة ورسبها، الفك المبكر للكوفراج قبل اكتساب الصلابة اللازمة للخرسانة، درجة الحرارة والعوامل المحيطية، التقييد *Restraint* الناجم عن إجهادات الانكماش في الخرسانة وانخفاض درجة الحرارة وأثر ذلك في انخفاض مقاومة الخرسانة الفعلية على الشد وغير ذلك من الأسباب المنوه عنها في (أ) عند الحديث عن السهم المنعكس.

- مرحلة الاستثمار *Service Phase*

هذا مرتبط بزيادة الحمولة الاستثمارية أو تغير شكلها نتيجة التغير في طبيعة الاستثمار، هبوط التربة وهبوط المساند بشكل تفاضلي مما يسبب تغيراً في شروط الاستناد والتحميل، الظروف البيئية المسببة للتغير في خواص المواد كوجود التشققات وتأثير ذلك على الصلابة العزمية (أي تأثير ظاهرة التصلب في الشد *Tension Stiffening* نتيجة تأثير الخرسانة غير المتشققة بين التشققات)، وجود فتحات، تآكل التسليح وعملية الكرينة الاسمنتية وتأثير الأوساط البيئية الضارة والشروط الحرارية وغير ذلك.

يضاف إلى ذلك:

- مساهمة العناصر الأخرى الثانوية في امتصاص الحمولة المطبقة مثل جدران البلوك والقواطع والتجهيزات الخدمية، وتخفيف الحمولة أحياناً عن العنصر المدروس نتيجة الحركة،

وكذلك أثر ازدياد الصلابة الإضافية بسبب وجود هذه العناصر، ومن ثم التخفيف من السهوم النهائية.

- عوامل أخرى تتعلق بوجود أحمال طارئة وغيرها من العوامل التي لم تؤخذ بالحسبان.

8-2- السهوم في المقاطع المرنة المتجانسة

: Deflections of Elastic Homogeneous Sections

يمكن تحديد السهوم نتيجة أحمال الثقالة *Gravity Loads* بطرائق معقدة تعتمد على النمذجة وفق العناصر المحدودة (*Finite Element Method (FEM)*، بطرائق دقيقة على تحديد التقوس في المقاطع المدروسة وإجراء التكامل على طول العنصر المدروس واعتماد الشروط الطرفية (*Boundary Conditions (BC)* المناسبة، أو بطرائق مبسطة تبنى على تحديد التقوس في المقطع الأكثر إجهاداً، ثم حساب السهم على أساسه، والطريقة الأكثر استخداماً هي تحقيق النسبة بين الطول الفعال للفتحة المدروسة إلى عمق العنصر المدروس الكلي (وفقاً للكود العربي السوري)، وتستخدم هذه الطريقة بنسبة تزيد على 70%، بالرغم من وجود حالات كثيرة ينبغي فيها تحديد السهم حسابياً للتوجه نحو عناصر أكثر مرونة من الناحية المعمارية، كما هو الحال في الأبنية التجارية والخدمية، حيث المطلوب مساحات استثمار أكبر بارتفاع طابقي أقل.

تعتمد الطرائق الدقيقة *Rigorous Methods* في تحديد قيمة السهم في المقاطع المرنة المكونة من مواد متجانسة وفق النظريات المعروفة في مقاومة المواد وحساب الإنشاءات، على أساس قاعدة التقوس الوسطي للخط المرن *Average Curvature of Elastic Line* اعتماداً على العلاقة (بفرض أن الصلابة العزمية *EI* ثابتة مثلاً):

$$\frac{1}{r} = \frac{\epsilon'_c + \epsilon_s}{d} = \frac{f'_c}{xE_c} = \frac{f_s}{E_s(d-x)} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{M_x}{EI}; \quad (8-1)$$

ويتم الحساب بحل المعادلة التفاضلية للخط الوسطي المرن أو بإجراء التكامل التالي:

$$y = \int_L \bar{M}_x \left(\frac{1}{r} \right)_x dx = \frac{1}{EI} \int_L \bar{M}_x M_x dx; \quad (8-2)$$

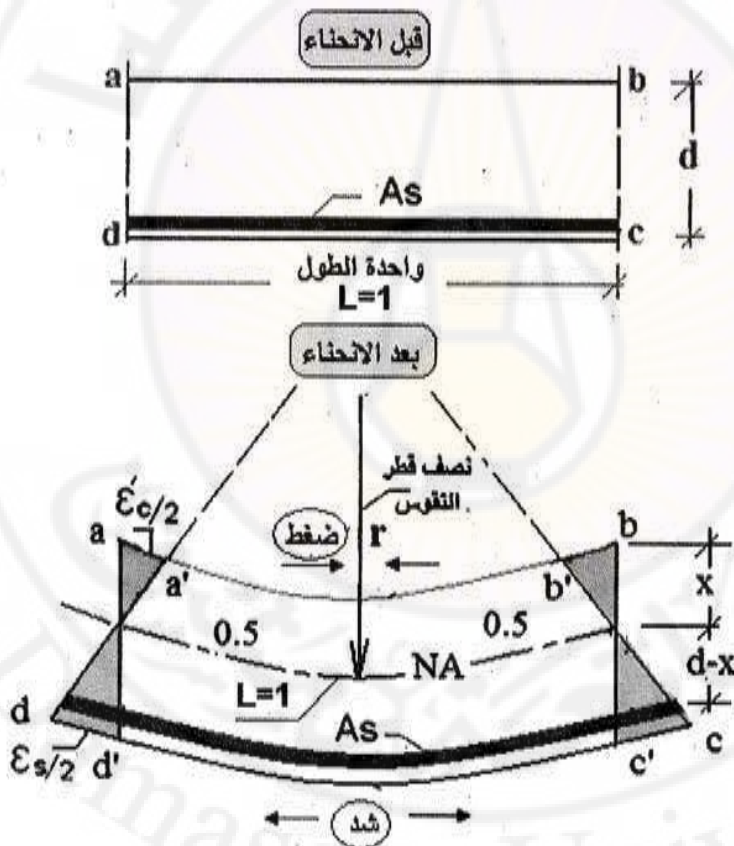
حيث: r - نصف قطر التقوس الوسطي.

EI - جداء عزم العطالة مع معامل المرونة (الصلابة العزمية للمقطع).

\bar{M}_x - عزم القوة الأحادية المطبقة في المقطع المدروس.

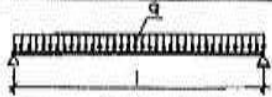


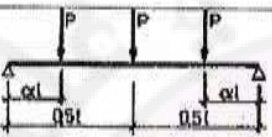
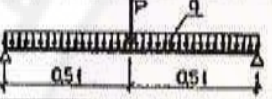
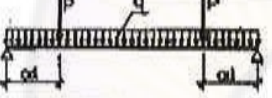
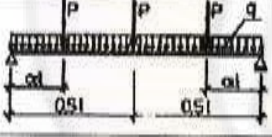
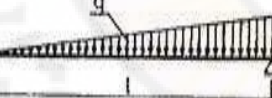

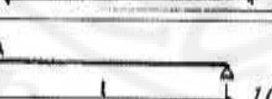
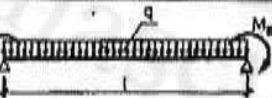
$$\left(\frac{I}{r}\right)_x = \frac{M_x}{EI} \quad \text{الشكل (2-8)}.$$

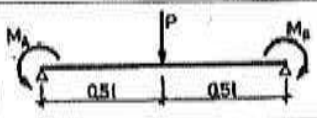
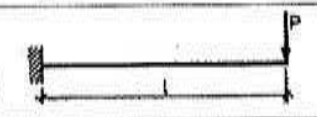
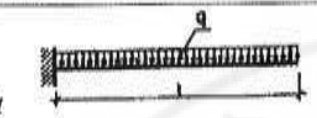
يلاحظ هنا أن التقوس غير ثابت، فهو يتغير من مقطع لآخر وفقاً للحالة الإجهادية المدروسة ومسار عملية التشقق، نسب التسليح، شكل المقطع العرضي، أي وفقاً لتغير الصلابة الناتجة على العزم وغير ذلك. وتعتمد الطرائق المبسطة على حساب التقوس في المقطع الخاضع لأكبر عزم انحناء موجب، وافترض أن شكل مخطط التقوس مشابه لشكل مخطط عزوم الانحناء، ثم الضرب بعوامل معينة يتم تحديدها وفقاً لشكل الحمولة المطبقة والمقطع العرضي وغير ذلك.



الشكل (2-8) تحديد التقوس تحت تأثير الانحناء (تقوس الانحناء).

الجدول (3-8) قيم الثابت β *

الجملة الإنشائية	الثابت β
1 	$\frac{5}{48}$
2 	$\frac{1}{12}$
3 	$\frac{1}{8} - \frac{\alpha^2}{6}$
4 	$\frac{1 + 2\alpha(3 - 4\alpha^2)}{12(1 + 4\alpha)}$
5 	$\frac{8 + 5k^{**}}{48(2 + k)}$
6 	$\frac{16\alpha(3 - 4\alpha^2) + 5k^{**}}{48(8\alpha + k)}$
7 	$\frac{8 + 16\alpha(3 - 4\alpha^2) + 5k^{**}}{18(2 + 8\alpha + k)}$
8 	$\frac{1}{10.92}$
9 	$\frac{1}{9.84}$
10 	$\frac{1}{15.59}$
11 	$\frac{5}{48} \left(1 - \frac{M_A + M_B}{10M} \right)^{***}$

12		$\frac{l}{12} \left(1 - \frac{M_A + M_B}{4M} \right)^{***}$
13		$\frac{l}{3}$
14		$\frac{l}{4}$

ملاحظات حول الجدول (3-8):

(*) في الجوائز المستمرة: $\beta = \frac{l}{12}$ ، في البحور الوسطية $\beta = \frac{l}{16}$

(**) $k = \frac{ql}{p}$ ، (***) M - العزم الأعظمي في البحر.

يمكن تحديد قيمة السهم الأعظمي المرن في عنصر متجانس ما خاضع لعزم انحناء

أعظمي M_{max} وفق العلاقة العامة المبسطة التالية:

$$y = \frac{\beta M_{max} l^2}{EI}; \quad (8-3)$$

حيث: l - طول البحر الفعال في العنصر المدروس. β - ثابت يتعلق بطبيعة ارتكاز العنصر المدروس على مسانده (معامل الارتكاز *Supporting Coefficient*)، ويؤخذ من جداول خاصة، ولاسيما الجدول (3-8) أو يحدد بالمقارنة بين العلاقة (8-3) والسهم اللحظي المرن وفق إحدى الطرائق المرنة المعروفة). EI - الصلابة العزمية عند حساب السهم اللحظي في الحالة المرنة (E - معامل المرونة اللحظي للمادة و I - عزم العطالة حول المحور المركزي المتعامد مع اتجاه عزم الانحناء المطبق)، ويمكن استخدام الصلابة العزمية الفعالة (استخدام عزم العطالة الفعال I_e) في المراحل المختلفة للأداء، كما سيبين لاحقاً.

يمكن، في الكمرات المستمرة ذات المقطع الثابت على طول البحر المدروس، الحصول على قيم مقبولة للسهم في منتصف البحر باستخدام العلاقة:

$$y = \frac{5}{48} \left[M_s^+ - \frac{(M_l^- + M_r^-)}{10} \right] \frac{L^2}{EI}; \quad (8-4)$$

حيث:

M_s^+ - العزم الموجب في منتصف البحر (المجاز) المدروس.

M_1^-, M_2^- - العزمان السالبان في المسندين اليميني واليساري للبحر المدروس بالقيمة المطلقة.

تنتج العلاقة (8-4) بالاعتماد على العلاقة (8-3) واستخدام إحدى الطرائق المرنة الموضحة في المثال التوضيحي (أ)، وهي طريقة الجائز المرافق *Conjugate Beam Method*.

مثال توضيحي (أ):

يطلب إيجاد العلاقة اللازمة لحساب السهم المرن في وسط إحدى فتحات جائز مستمر طوله l ويخضع لحمولة موزعة بانتظام w وعزمي انحناء غير متساويين في نهايته M_b, M_a ، الشكل (8-3-أ).

الحل:

هنا يتم تحميل الفتحة المدروسة بحمولات تمثل قيمة العزم الناتج عن الأحمال الأصلية مقسوماً على الصلابة العزمية EI ، وحساب السهم اللحظية المرنة لكل منها في وسط الفتحة كما يلي، بالاستفادة من الجدول (8-4):

- السهم نتيجة الحمولة العزمية الموزعة بانتظام M_o ، حيث $M_o = \frac{wl^2}{8}$ ، الحالة (c):

$$\Delta_1 = \frac{M_o L}{3EI} \times \frac{L}{2} - \frac{M_o L}{3EI} \times \frac{3}{8} \times \frac{L}{2} = \frac{5M_o L^2}{48EI}$$

- السهم نتيجة الحمولة المثلثية M_a ، الحالة (d):

$$\Delta_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{-M_a}{EI} \right) \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{L}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{-M_a}{2EI} \right) \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{-M_a L^2}{16EI}$$

- السهم نتيجة الحمولة المثلثية M_b ، الحالة (e):

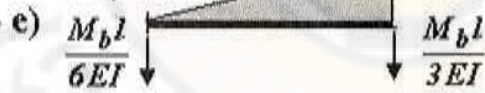
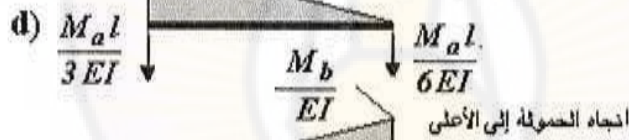
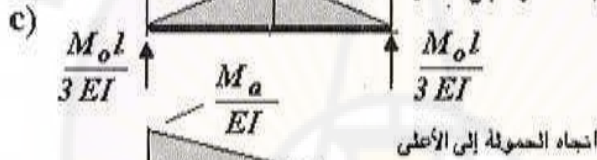
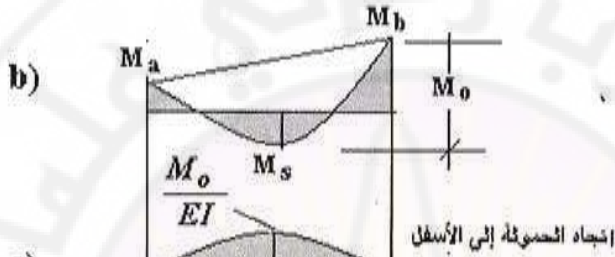
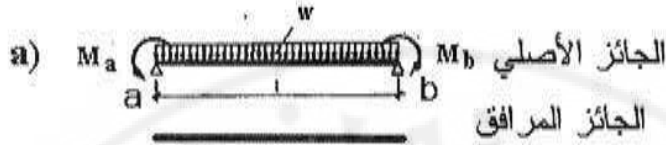
$$\Delta_3 = \frac{-M_b L^2}{16EI}$$

- السهم الكلي في منتصف الفتحة المدروسة $\Delta = y_{max}$:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{5M_o L^2}{48EI} \right) - \left(\frac{M_a L^2}{16EI} \right) - \left(\frac{M_b L^2}{16EI} \right) =$$

$$= \frac{L^2}{48EI} [5M_o - 3(M_a + M_b)] =$$

$$= \frac{5L^2}{48EI} \left(M_s - \frac{M_a + M_b}{10} \right)$$



حمولة العزم الوهمية على الجائز المرافق

الشكل (8-3-1) استخدام طريقة الجائز المرافق لحساب السهم اللحظي المرن.

(a) الجملة الإنشائية، (b) مخطط عزوم الانحناء، (c) التحميل لكرمة بسيطة بشكل موزع بانتظام باتجاه الأسفل، (d) التحميل نتيجة العزم على الطرف اليساري، (e) التحميل نتيجة العزم على الطرف اليميني،

حيث:

$$-M_s = M_o - 0.5(M_a + M_b)$$

تمثل العلاقة أعلاه المطلوبة، وفي حال تساوي العزوم في الأطراف، أو انعدامها، أو انعدام أحد منها وغير ذلك تصبح العلاقة أبسط، ومن أجل كمرة موثوقة في طرفيها وثيقة صلدة،

ومحملة بحمولة موزعة بانتظام، يكون السهم اللحظي المرن في وسط الكمره مساوياً $\frac{wL^4}{384EI}$ ،

$$\text{أي } \beta = \frac{l}{48} \text{ ومن أجل كمره بسيطة الاستناد } \frac{5wL^4}{384EI} \text{، أي } \beta = \frac{5}{48}.$$

مثال توضيحي (ب):

ليكن الجانز الظفري الخاضع لحمولة موزعة بانتظام q وحمولة مركزة بنهاية الظفر P ، الشكل (8-3-ب) والمطلوب حساب السهم الأعظمي المرن (المقطع غير متشقق)، وكذلك تحديد المعامل β .

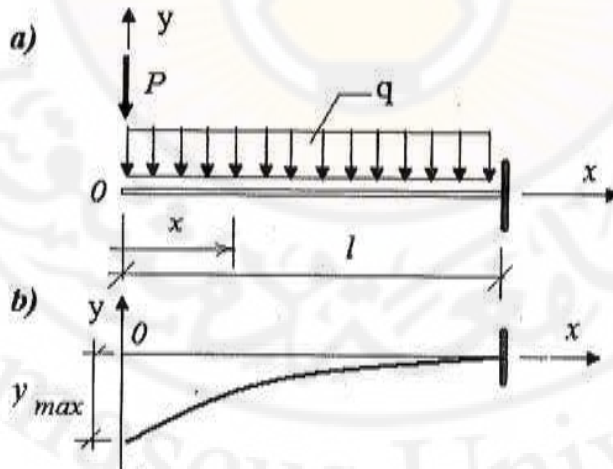
الحل:

بفرض الصلابة العزمية EI ، وإتباع طريقة حل المعادلة التفاضلية للخط المرن ينتج:

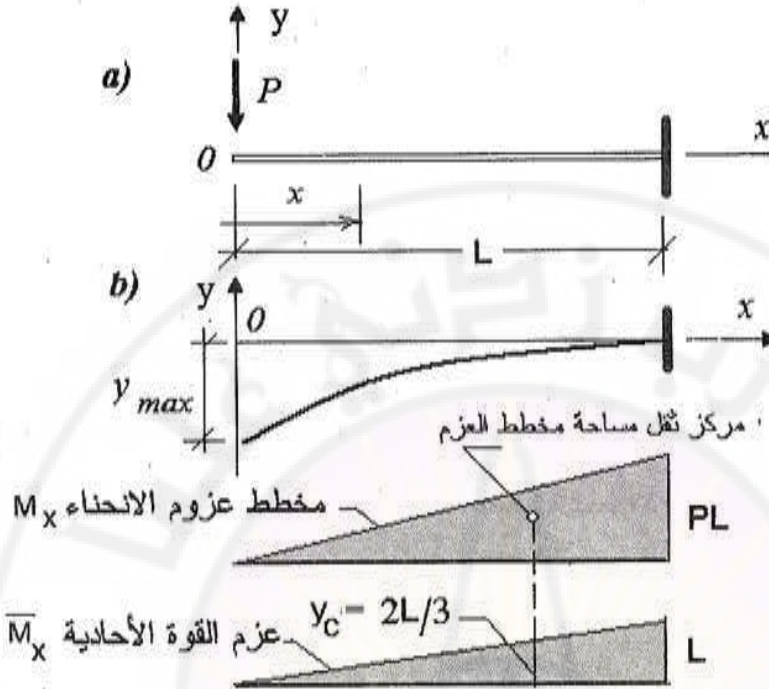
$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -Px - \frac{qx^2}{2} \quad (a)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{Px^2}{2} - \frac{qx^3}{6} + C \quad (b)$$

$$EI y = -\frac{Px^3}{6} - \frac{qx^4}{24} + Cx + D \quad (c)$$



الشكل (8-3-ب) استخدام طريقة حل المعادلة التفاضلية للخط الوسطي المرن لحساب السهم اللحظي المرن. (a) الجملة الإنشائية، (b) السهم الناتجة



الشكل (8-3-ج) تحديد السهم المرن الأعظمي استخدام طريقة حل التكامل لعلاقة التقوس الوسطي للخط المرن.

وباستخدام الشروط الطرفية المناسبة، حيث إن:

$$(y)_{x=l} = 0 \quad (d)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=l} = 0 \quad (e)$$

يمكن تحديد قيم الثابتين D, C ، أي:

$$C = \frac{Pl^2}{2} + \frac{ql^3}{6}$$

$$D = -\frac{Pl^3}{3} - \frac{ql^4}{8}$$

ويكون السهم y_x في المقطع على مسافة x من المبدأ مساوياً:

$$EI y_x = -\frac{Px^3}{6} - \frac{qx^4}{24} + \frac{Pl^2}{2}x + \frac{ql^3}{6} - \frac{Pl^3}{3} - \frac{ql^4}{8}$$

وقيمة السهم الأعظمي ($x=0$):

$$y_{max} = -\frac{Pl^3}{3EI} - \frac{ql^4}{8EI}$$

ولأن $M_{max} = -Pl$ نتيجة تطبيق الحمولة P ، وكذلك $M_{max} = -\frac{ql^2}{2}$ نتيجة تطبيق

الحمولة الموزعة q ، تكون قيمة المعامل β على التوالي $\beta = \frac{1}{3}$ و $\beta = \frac{1}{4}$ وهو المطلوب.

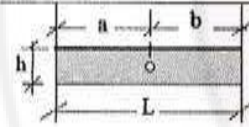
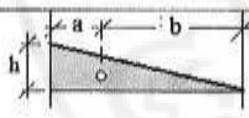
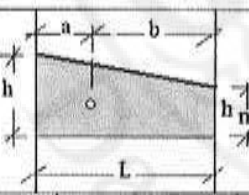
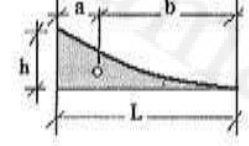
يمكن إيجاد الثابت β أيضاً بحل التكامل المبين بالعلاقة (8-1) بطريقة ضرب المخططات،

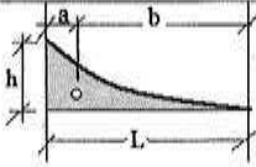
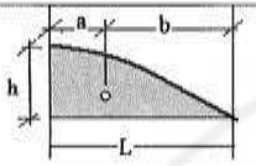
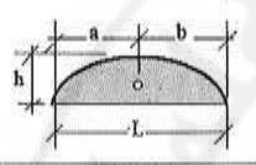
الشكل (8-3-ج)، وبالإستفادة من الجدول (4-8)، كما يلي:

$$y_{max} = \frac{1}{2} \times \frac{pL}{EI} \times L \times \frac{2L}{3} = \frac{PL^3}{3EI}$$

وبالمقارنة مع العلاقة المبسطة لحساب السهم المرن (8-3)، ينتج أن $\beta = \frac{1}{3}$.

الجدول (4-8) خواص هندسية لعدد من الأشكال الهندسية.

الشكل	المساحة F	إحداثيات مركز الثقل		ملاحظات
		a	b	
	Lh	$L/2$	$L/2$	-
	$Lh/2$	$L/3$	$2L/3$	-
	$\frac{L(h+h_m)}{2}$	$\frac{L(2h_m+h)}{3(h_m+h)}$	$\frac{L(2h+h_m)}{3(h_m+h)}$	-
	$Lh/3$	$L/4$	$3L/4$	قطع مكافئ تربيعي $y = cx^2$

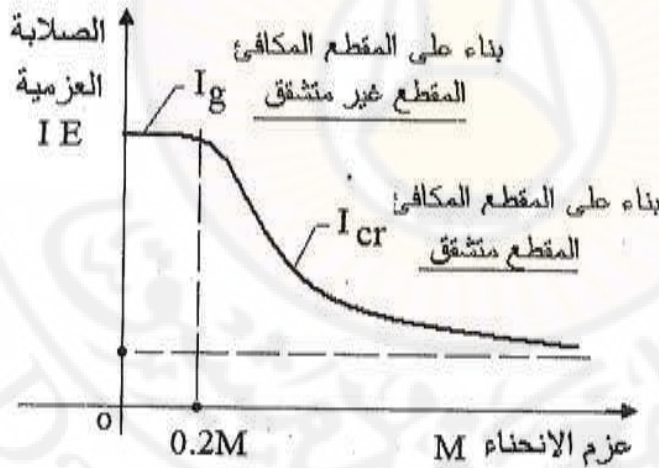
	$Lh/4$	$L/5$	$4L/5$	قطع مكافئ تربيعي $y = cx^3$
	$2Lh/3$	$3L/8$	$5L/8$	قطع مكافئ تربيعي $y = cx^2$
	$2Lh/3$	$L/2$	$L/2$	قطع مكافئ تربيعي $y = cx^2$

8-3- السهوم في المقاطع الخرسانية المسلحة Deflections in RC Sections:

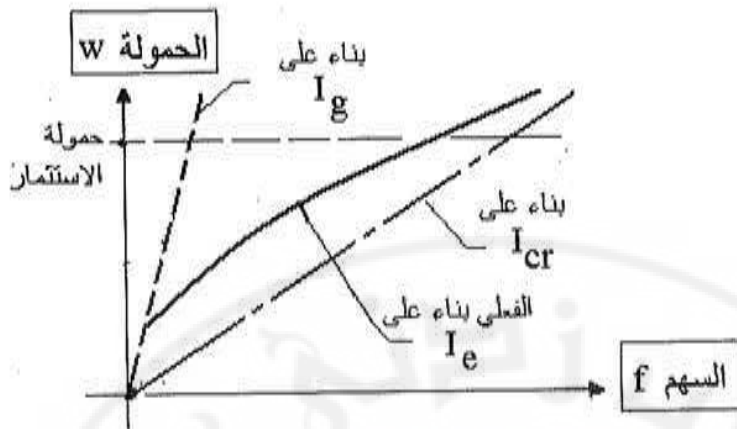
- يتم تحديد السهوم نتيجة لتطبيق الأحمال الاستثنائية، أي دون تصعيد. ومن الضروري ملاحظة أن قيم السهوم في العناصر الخرسانية المسلحة تتأثر بعدد كبير من العوامل أهمها:
- مقاومة الخرسانة على الشد (تحديد عزم الانحناء المسبب للتشقق)، وهل تترافق العزوم الناتجة مع وجود قوى شادة، قوى قص أو قتل وغير ذلك.
 - معامل مرونة الخرسانة.
 - تأثير السيلان الناتج عن التطبيق طويل الأمد للحمولة.
 - مستوى التحميل بالنسبة للحمولة التصميمية.
 - تأثير الانكماش في الخرسانة.
 - هل المقاطع متشققة أم لا، وفي حالة التشقق، ما تأثير التشققات وسعتها والمسافة فيما بينها على الصلابة العزمية (تأثير الخرسانة غير المتشققة بين التشققات على زيادة الصلابة العزمية بالنسبة للمقطع المتشقق بإهمال الخرسانة كلياً *Tension Stiffening Effect*، وهذا التأثير يزداد مع انخفاض نسب التسليح كما في البلاطات، ويكون معدل انخفاضه سريعاً مع نمو عملية التشقق، ويصل إلى مستواه الثابت تحت تأثير الحملولة طويلة الأمد خلال فترة قد تسبق تنفيذ القواطع *Partitions والإكاملات Finishes*).

- تأثير القواطع والإكاملات وغيرها على الصلابة (القواطع ذات صلابة كبيرة بالاتجاه الشاقولي وستنكسر عند قيمة محددة للسهم، كونها لا تستطيع الانحناء مع الجائز إلى الأسفل).
- التأثيرات الحرارية.
- عمر الخرسانة عند تطبيق الحمولة.
- طبيعة الحمولة ستاتيكية أم ديناميكية.
- تأثير الاهتزازات الطارئة والحركات التفاضلية للأساسات.
- الشروط الطرفية (شروط الاستناد والتقييد الحاصل).
- هبوط المساند وغير ذلك.

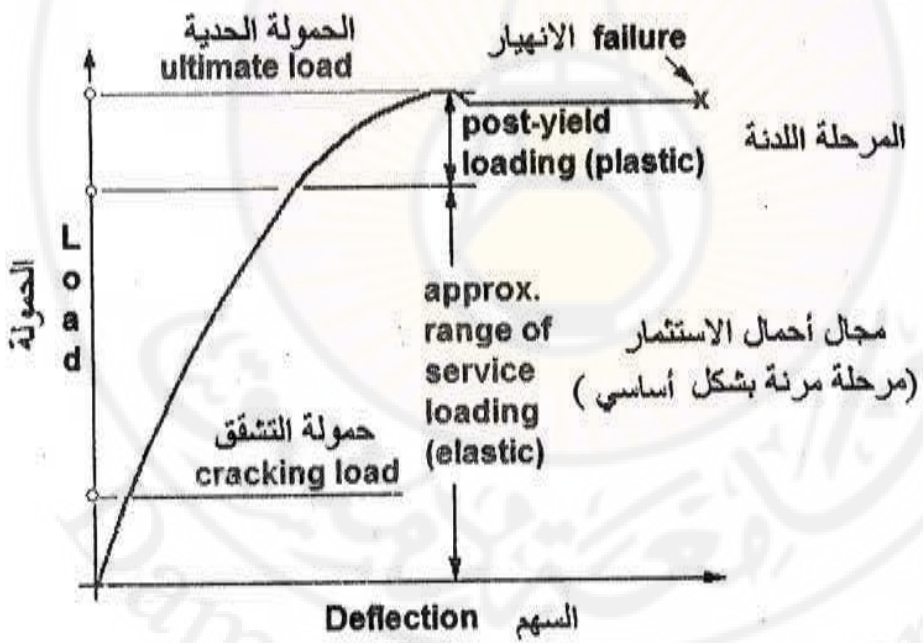
يمثل الشكل (4-8) التغير العام للصلابة العزمية مع تغير عزم الانحناء، ويوضح الشكل (1-5-8) علاقة السهم مع عزم الانحناء تحت تأثير أحمال الاستثمار العادية لجائز مسلح ما، وعلاقة الحمولة- السهم بشكل عام وفق الشكل (8-5-ب) ووفقاً لعزم العطالة. ويبين الشكلان (8-5-ج) و(8-5-د) علاقة العزم- السهم وفق الكود الأمريكي والبريطاني على الترتيب، وبالطبع توجد أشكال من مخططات هذه العلاقة في المراجع والأبحاث المنشورة.



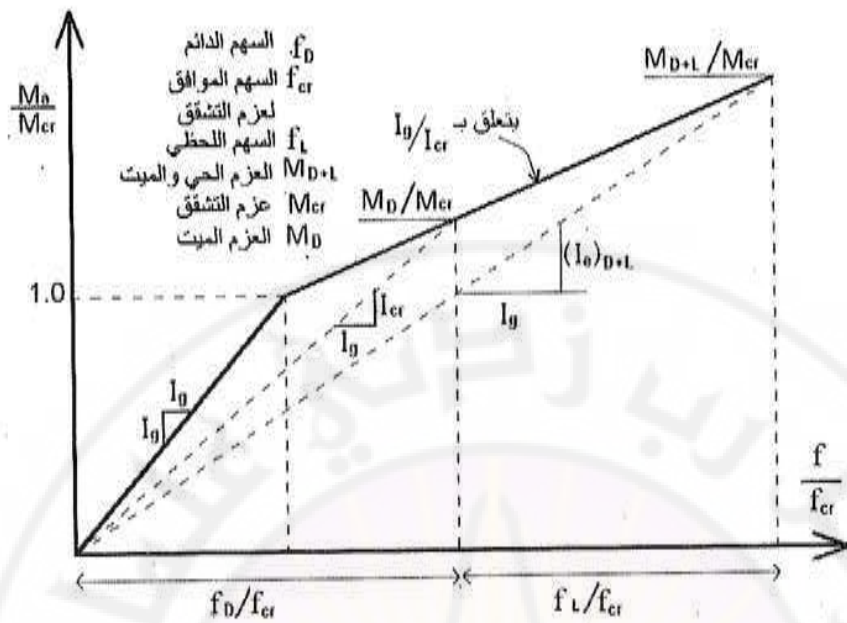
الشكل (4-8) علاقة الصلابة العزمية مع عزم الانحناء.



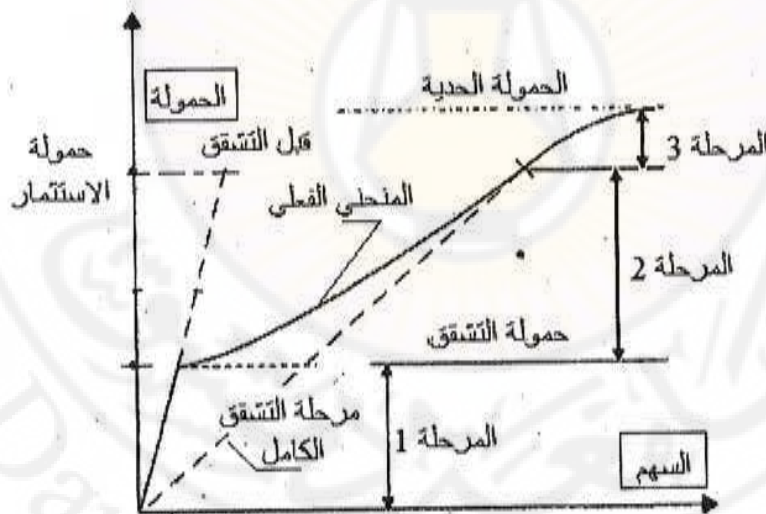
الشكل (8-5-1) الشكل العام لعلاقة السهم مع عزم الانحناء في جانز خرساني مسلح بناء على قيمة عزم العطالة المأخوذ بالحسبان.



الشكل (8-5-ب) علاقة الحمولة - السهم في جانز خرساني مسلح بشكل عام.



الشكل (8-5-ج) علاقة الحمولة-السهم في جانز خرساني مسلح وفق الكود الأمريكي ACI 318.



الشكل (8-5-د) علاقة الحمولة-السهم في جانز خرساني مسلح وفق الكود البريطاني BS 8110.

ما مكونات السهم الكلي؟ Total Deflection Components

يبين الشكل (8-5-ب) علاقة السهم الناتج تبعاً لعزم الانحناء في جوائز خرساني مسلح حتى الانهيار، حيث يمكن تمييز عدة مراحل:

- 1 -مرحلة ما قبل الحمولة المسببة للتشقق في الخرسانة (أداء مرن).
- 2 -المرحلة ما بين حمولة التشقق وحمولة الاستئثار.
- 3 -المرحلة لللدنة.
- 4 -مرحلة الانهيار.

يكون الأداء في المرحلتين (1) و(2) مرناً بشكل أساسي ، وفي المرحلة (4)، يكون الانهيار إما هشاً (دون إنذار مسبق) نتيجة تفتت الخرسانة بالضغط، أو لدناً (مع تحذير مسبق) نتيجة الإجهادات الشادة في التسليح.

يتألف السهم الكلي y_{tot} (المطلق) الناتج فقط عن الحمولة المطبقة / دون تأثير انكماش

الخرسانة والحرارة وغيرها من العوامل الأخرى، حيث وردت في الفصل التاسع / من:

1. السهم الأنفي الذي تسببه الأحمال الميتة المطبقة على العنصر المدروس y_{id} بما في ذلك السهم الناتج عن الوزن الذاتي y_{io} .

2. السهم الأنفي الذي تسببه الأحمال الحية المطبقة على العنصر المدروس y_{ip} .

3. السهم الناتج عن التطبيق طويل الأمد للأحمال المطبقة على العنصر المدروس (سهم السيلان y_{cr}). وهنا لا بد من تمييز ما يسمى السهم المطلق *Absolute Deflection* الذي ينتج من مجموع السهوم الحاصلة، وسهم المقارنة *Comparative Deflection* الذي ينتج بطرح السهم الناتج عن الوزن الذاتي من السهم المطلق، إذ يتم عادة تطبيق الأحمال على العناصر الإنشائية بعد الصب، أي بعد حصول السهم الناتج عن الوزن الذاتي. وتتم مقارنة السهم الناتج (سهم المقارنة) مع القيم المسموح بها المبينة في الجدول (8-6). ويمكن توضيح ذلك من خلال الشكل (8-6).

يحدد سهم المقارنة بالعلاقة:

$$y_{max} = (y_{ig} - y_{io}) + y_{ip} + y_{cr} ; \quad (8-5)$$

حيث يحدد السهم الناتج عن الحمولة الحية y_{ip} بطرح السهم الأنفي الناتج عن الحمولة

الدائمة y_{ig} من السهم الأنفي الناتج عن مجموع الحمولة الدائمة والحية معاً $y_{i(p+g)}$:

$$y_{ip} = y_{i(p+g)} - y_{ig} ; \quad (8-6)$$

ويحدد السهم الدائم الإضافي نتيجة السيلان y_{cr} كنتاج ضرب y_{ig} بالمعامل α أي:

$$y_{cr} = \alpha y_{ig} = \frac{\xi}{1 + \frac{50A'_s}{bd}} \times y_{ig} ; \quad (8-7)$$

حيث: $\alpha = \frac{\xi}{1 + \frac{50A'_s}{bd}}$ - معامل لا تقل قيمته عن 0.8.

A'_s - مساحة المقطع الكلي لقضبان تسليح الضغط في المقطع العرضي، عند منتصف البحر للكمرات البسيطة أو المستمرة، وعند المساند للكمرات الظرفية.

d, b - عرض المقطع المستطيل وارتفاعه الفعال على الترتيب (يؤخذ عرض الجذع b_w في المقاطع المنحطة).

ξ - معامل تجريبي يتعلق بمدة التحميل للأحمال الدائمة التي انقضت وقت حساب السهم، وذلك عندما يكون عمر الخرسانة لحظة بداية تطبيق الحمولة لا يقل عن ثلاثة أشهر والشروط عادية، ويؤخذ كما يلي:

2 للتحميل مدة ثلاث سنوات أو أكثر.

1.4 للتحميل مدة سنة واحدة.

1.2 للتحميل نصف سنة.

1.0 للتحميل مدة لا تزيد على شهر واحد.

في الأحوال غير العادية (جو حار أو جاف جداً)، أو عند تحميل الخرسانة عند عمر

لا يزيد على 3 أشهر من الصب، يجب حساب السهم الناتج وضممه سهم السيلان نتيجة

التطبيق طويل الأمد للحمولة الميتة بعد تحديد التشوهات الفعلية، وحساب معامل السيلان الذي

يمثل النسبة بين تشوهات السيلان النسبية والتشوهات النسبية المرنة $\phi = \epsilon_{cr} / \epsilon_e$ بالقيمة

الدقيقة، واعتماد معامل المرونة الزمني $E_c = \frac{E_{co}}{1 + \phi}$ بدلاً من E_{co} . وعندما يتم تحميل

الخرسانة بعد ثلاث سنوات من صبها، يكون السهم الناتج عن تأثير الأحمال الدائمة المطبقة في

ذلك الوقت (والأحمال الحية طبعاً) محسوباً على أساس معامل المرونة اللحظي E_{co} .

ملاحظة:

يجب الأخذ بالحسبان تأثير الأحمال الميتة المبكرة وحركة الكوفراج وغيره.

ووفقاً لما سبق، تأخذ العلاقة (8-5) لحساب السهم الأعظمي (الشروط عادية) الشكل التالي:

$$y_{max} = y_i(g+p) + \alpha y_{ig} - y_{io} ; \quad (8-8)$$

من أجل حساب السهم الأعظمي في المقاطع الخرسانية المسلحة (مقاطع غير متجانسة)، يمكن الاستفادة من العلاقة (8-3) بعد تحويل المقطع الخرساني المسلح إلى مقطع مكافئ له باستبدال مساحة التسليح بمساحة مكافئة من الخرسانة تساوي n مرة مساحة التسليح. ويستخدم معامل المرونة الأولي E_{co} (لتحديد السهم اللحظي في الأحوال العادية) وعزم العطالة الذاتي الفعال I_e الذي يتغير بحسب موقع المقطع وعزم الانحناء المطبق، الشكل (7-8).

يمكن تحديد معامل المرونة اللحظي للخرسانة، وعزم العطالة المكافئ (وفقاً لعلاقة برانسون، وهي العلاقة المستخدمة أيضاً في الكود الأمريكي ACI والكود العربي السوري، وذلك للمقاطع العادية التسليح الواقعة في حالة التشقق، حيث: $M_a > M_{cr}$)، كما يلي:

$$E_{co} = 6645 \sqrt{f'_c} ; \quad (8-9)$$

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g \right] + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g ; \quad (8-10)$$

حيث:

f'_c - المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط، $[MPa]$.

I_{cr} - عزم الحالة الذاتي للمقطع المتشقق حول المحور المحايد، على ألا يزيد على.

I_g - عزم العطالة الذاتي لكامل المقطع الخرساني غير المتشقق حول المحور المار من مركز ثقل المقطع (مع إهمال التسليح).

M_a - عزم الانحناء الاستثنائي المطبق على المقطع عند حساب السهم.

M_{cr} - عزم الانحناء الاستثنائي المسبب للتشقق في الخرسانة، ويحدد من العلاقة:

$$M_{cr} = \frac{f_{cb} I_g}{y_t} ; \quad (8-11)$$

حيث: y_t - المسافة بين المحور المحايد حتى الطرف الأقصى للألياف المشدودة في المقطع

غير المتشقق $Un-cracked Section$.

f_{cb} - إجهاد الشد الأقصى للخرسانة في الشد الناجم عن الانحناء

$Module of Rupture$ ، ويحدد بالعلاقة:

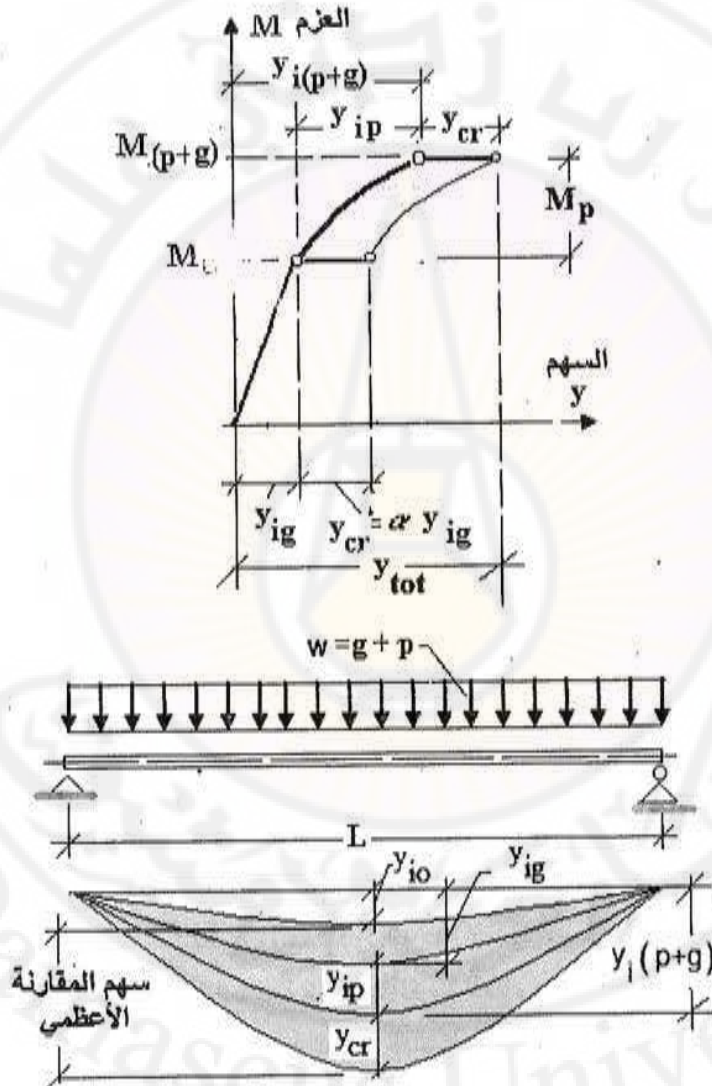
$$f_{cb} = 0.74 \sqrt{f'_c} ; \quad (8-12)$$

وبالنسبة للعناصر المستمرة، يمكن اعتماد عزم العطالة الذاتي الفعال عند حساب السهوم كمعدل قيمته في هذا العزم في مقطعي العنصر المعرضين لأقصى عزمي انحناء وموجب.

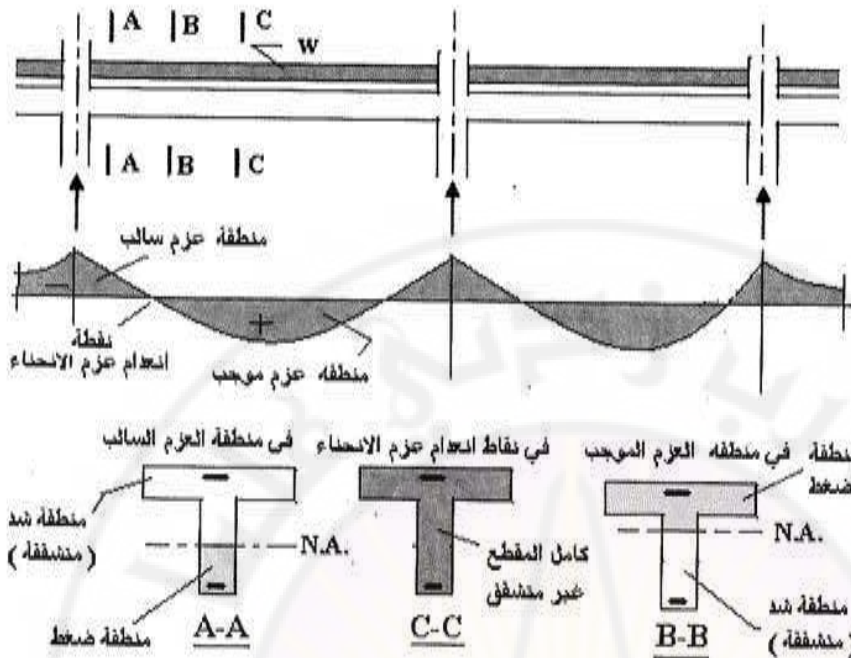
ملاحظة:

إن أجل المقاطع الخرسانية غير المسلحة والمقاطع العادية التسليح الواقعة في مرحلة ما قبل التشقق تؤخذ

$$(M_a \leq M_{cr} \text{ ، حيث: } I_e = I_g)$$



الشكل (6-8) تحديد السهم الأعظمي المقارن (دون سهم التقلص في الخرسانة).



الشكل (7-8) شكل المقطع العرضي عند حساب عزم العطالة المكافئ I_e في مقاطع جانز مستمر مقطعه العرضي من الشكل T مثلاً.

4-8- التحقق من السهوم المسموح بها *Allowable Deflections Check*:

تتعلق قيم السهوم بعوامل متعددة من أهمها الجملة الإنشائية، أشكال الأحمال المطبقة وقيمها ومدة تأثيرها، أبعاد العناصر وميزاتها المادية (الصلابة) وغير ذلك. ومن المشاكل الأساسية هنا عدم تجانس المادة، وتغير صلابة المقاطع على طول العنصر المدروس وغير ذلك. ولا بد أن تكون العناصر الإنشائية الخاضعة لعزوم انحناء ذات صلابة كافية لمنع التشكلات (السهوم) الناتجة عن ظاهرة الزحف *Creep Phenomenon* المرتبطة بتأثير الأحمال طويلة الأمد، وكذلك التشكلات التي تؤثر سلباً في قدرة تحمل هذه العناصر، وصلاحياتها للاستثمار الطبيعي. ووفقاً للكود العربي السوري، يمكن الاستغناء عن حساب

السهوم في المقاطع الخرسانية المسلحة المعرضة لعزوم انحناء في كل من الحالات التالية:

- عندما تحقق أبعاد المقاطع العرضية الحدود الدنيا المتعلقة بنسبة الارتفاع الكلي للمقطع إلى طول البحر الفعال في المجاز المدروس من العنصر، الجدول (5-8) مثلاً.

- عندما لا تزيد نسبة تسليح الشد الناتجة حسابياً في العناصر المعرضة للانحناء الصافي على $\mu_s = \frac{0.18 f'_c}{f_y}$ في المقاطع المستطيلة، على أن تؤخذ مساحة التسليح منسوبة لعرض الجسد b_w في المقاطع من الشكل T وما يحكمها.

- عندما يكون العنصر ذا وضع طبيعي من حيث طول بحره والأحمال المطبقة عليه، وغير مرتبط بتجهيزات أو معدات خاصة تتأثر بشكل حساس بقيم السهوم والاهتزازات الحاصلة. في حال عدم تحقق الشروط الواردة أعلاه، ينبغي حساب السهوم في العناصر الإنشائية ذات العلاقة، والتحقق من أن قيم السهوم الناتجة لا تتجاوز القيم المسموح بها وفق الجدول (6-8).

الجدول (5-8) النسبة العظمى بين طول البحر الفعال والارتفاع الكلي للمقطع العرضي $\frac{L}{h}$ في الجوائز التي

لا يزيد طول بحرها الأكبر على 15m (*).

ألفجار	استمرار من الجانبين	استمرار من جانب واحد	عدم استمرار من الجانبين	الارتباط الطرفي نوع الجوائز
6 (6)	16 (14)	15 (13)	14 (12)	ساقط
8 (8)	20 (18)	18 (16)	16 (14)	مغفي في البلاطات المفرغة

ملاحظة حول الجدول (5-8):

(*) تستخدم الأرقام خارج الأقواس عندما لا تقل المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط عن 20MPa، وتستخدم الأرقام داخل الأقواس في الحالات الأخرى.

الجدول (6-8) قيم السهوم المسموح بها. (يتبع...)

نوع العنصر	نوع السهم المدروس	الحد الأعلى للقيم المسموح بها بدلالة البحر الفعال L^*
- السطوح الأخيرة غير المرتبطة بعناصر غير إنشائية يمكن أن تتأثر بالسهم الكبير.	السهم الأني الناتج عن الأحمال الحية فقط.	$\frac{L}{180}$

..... تابع الجدول (8 - 6) قيم السهوم المسموح بها.

$\frac{L}{360}$	السهم الأثني الناتج من الأحمال الحية فقط.	- السقوف غير المرتبطة بعناصر غير إنشائية يمكن أن تتأثر بالسهم الكبير
$\frac{L}{240}$	السهم الكلي من الأحمال الميتة والحية والأفعال غير المباشرة مطروحاً منه السهم الأثني الناتج من الوزن الذاتي، كما يمكن أن يطرح منه السهم الأثني الناتج من الجزء من الأحمال الثابتة التي يكون مؤكداً أنها ستطبق على المنشأة قبل تحميلها بالعناصر غير الإنشائية أو الإكساءات.	- السقوف أو السطوح الأخيرة المرتبطة أو الحاملة لعناصر غير إنشائية أو إكساءات عالية لا تتأثر كثيراً بالسهم الكبير.
$\frac{L}{480}$	السهم الكلي (ويمكن أن يطرح منه السهم المعاكس على أن يطلب تفويض هذا السهم المعاكس صراحة على المخططات).	- السقوف أو السطوح الأخيرة المرتبطة أو الحاملة لعناصر غير إنشائية أو تجهيزات دقيقة يمكن أن تتأثر إلى حد بالغ بالسهم الكبير (**).
$\frac{L}{180}$	السهم الكلي من وزن الرافعة والحمل الحي.	- جميع العناصر (***) على أن يدرس تأثيرها في العناصر الإنشائية وغير الإنشائية أيضاً.
$\frac{L}{600}$		- الجوائز الحامل للرافعة في المنشآت الصناعية.

ملاحظات حول الجدول (8-6):

- * تؤخذ قيمة L مساوية إلى بحر العنصر الحر، للعناصر المستندة إلى أعمدة وجدران، وبحر العنصر من المحور إلى المحور، بالنسبة للعناصر المستندة إلى عناصر أخرى معرضة للانحناء.
- ** لا يطبق هذا الشرط، إلا في الحالات الاستثنائية للعناصر المرتبطة أو الحاملة لتجهيزات أو إكمالات دقيقة، يمكن أن تتضرر نتيجة السهوم التي تزيد على الحد المعين، ويمكن أن يخفض هذا الحد عند الأخذ بالحسبان قيمة التسامح في الحركة، التي يمكن أن تسمح بها العناصر أو التجهيزات المتأثرة بالسهم.
- *** هذا الشرط يطبق على الدوام، بالإضافة إلى ما يتوجب تطبيقه من الشروط الأخرى.

8-5- أمثلة حسابية توضيحية Illustrative Calculated Examples:

مثال (1):

كمره بسيطة (جانز بسيط) من الخرسانة المسلحة بحرهما الفعال $10m$ ، ومقطعها العرضي على شكل T ، وفق الأبعاد والتسليح المبين في الشكل (8-8)، والمطلوب التحقق من السهم المسموح به، حيث لا تستند على الكمره عناصر تتأثر كثيراً بالسهم، علماً أن $f'_c = 20MPa$; $f_y = 420MPa$ ، وأن الوزن الذاتي $g_o = 7.2kN/m$ ، وحمولة التغطية $g' = 4.2kN/m$ ، وفترة التحميل تتجاوز ثلاث سنوات، وضمن الشروط العادية.

الحل:

• التحقق من الأبعاد ونسبة التسليح المطلوبة لتحقيق السهم مبدئياً:

$$\mu_{sw} = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{17.68}{25 \times 55} = 0.0128 > 0.18 \times \frac{f'_c}{f_y} = \frac{0.18 \times 20}{420} = 0.00857,$$

$$h = 60cm < \frac{L}{14} = \frac{1000}{14} = 71cm.$$

وهذا يعني وجوب التحقق من السهم الكلي الناتج حسابياً.

• حساب السهوم الجزئية:

- مساحة المقطع العرضي:

$$A = 140 \times 60 - (140 - 25)(60 - 12) = 2880cm^2.$$

- بعد مركز ثقل المقطع غير المنتشق عن أقصى ليف خرساني مشدود:

$$y_t = \frac{40 \times 60 \times 30 - 115 \times 48 \times 24}{2880} = 41.50cm.$$

- عزم عطالة المقطع غير المنتشق حول المحور المار من مركز الثقل:

$$I_g = \frac{140 \times (60)^3}{3} - \frac{115 \times (48)^3}{3} - 2880 \times (41.5)^2 = 8.806 \times 10^5 cm^4.$$

- معامل مرونة الخرسانة:

$$E_{co} = 6645 \sqrt{20} = 2.97 \times 10^4 MPa$$

- النسبة المعيارية Modular Ratio:

$$n = \frac{E_s}{E_{co}} = \frac{2.1 \times 10^5}{2.97 \times 10^4} = 7.07$$

- العزم المسبب للتشقق M_{cr} :

بالعودة إلى الشكل (7-8)، يمكن كتابة العزم الستاتيكي للمقطع المكافئ ، ومساواة هذا العزم للصفر بهدف تحديد عمق منطقة الضغط، أي عمق المحور المحايد x ينتج أن:

$$S_e = 0 \Leftrightarrow \frac{140x^2}{2} - 7.07 \times 17.68(55 - x) = 0$$

$$\Rightarrow x = 9.06 < t_f = 12 \text{ cm.}$$

وهذا يعني أن المحور المحايد واقع في بلاطة الضغط. ويعامل المقطع كمستطيل عرضه 140 cm . ومن أجل تحديد عزم التشقق M_{cr} ، يتم أولاً تحديد قيمة مقاومة شد الخرسانة بالانحناء، أي:

$$f_{cb} = 0.74\sqrt{20} = 2.83 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = \frac{f_{cb} I_g}{y_t} = \frac{2.83 \times 8.806 \times 10^{-3}}{0.415} = 0.06 \text{ MNm.}$$

- عزم العطالة للمقطع المكافئ المشقق حول المحور المحايد (دون التسليح):

$$I_{cr} = \frac{140 \times (9.06)^3}{3} + 7.07 \times 17.68(55 - 9.06)^2 =$$

$$= 2.98 \times 10^5 \text{ cm}^4.$$

وبن أن الأحمال المطبقة موزعة بانتظام على الكمره البسيطة، يتم تحديد السهوم الأعظمية بالعلاقة العامة التالية (واتباع الخطوات المبينة أدناه):

$$y_{max} = \frac{5 M_{max} L^2}{48 E_{co} I_e}$$

(ا) السهم اللحظي الناتج عن الوزن الذاتي للكمرة المدروسة y_{io} :

- العزم الأعظمي المطبق في المنتصف:

$$M_{maxo} = 0.125 \times 7.2 \times 10^2 = 90 \text{ kNm.}$$

- عزم العطالة للمقطع المكافئ I_e :

$$I_e = \left[\left(\frac{0.06}{0.09} \right)^3 \times 8.806 \times 10^{-3} \right] + \left[1 - \left(\frac{0.06}{0.09} \right)^3 \right] \times$$

$$\times 2.98 \times 10^{-3} = 4.706 \times 10^{-3} \text{ m}^4.$$

$$y_{io} = \frac{5 \times 0.09 \times 10^2}{48 \times 2.97 \times 10^4 \times 4.706 \times 10^{-3}} = 0.0067m = 0.67cm.$$

وعلى ضوء ذلك ينتج:

(2) السهم اللحظي الناتج عن الحمولة الميتة الكلية y_{ig} :
- العزم الأعظمي المطبق في المنتصف:

$$M_{max g} = 0.125 \times 11.4 \times 10^2 = 142.5kNm.$$

- عزم العطالة للمقطع المكافئ I_e :

$$I_e = \left[\left(\frac{0.06}{0.1425} \right)^3 \times 8.806 \times 10^{-3} \right] + \left[1 - \left(\frac{0.06}{0.1425} \right)^3 \right] \times 2.98 \times 10^{-3} = 3.415 \times 10^{-3} m^4.$$

وعلى ضوء ذلك ينتج:

$$y_{ig} = \frac{5 \times 14.25 \times 10^2}{48 \times 2.97 \times 10^4 \times 3.415 \times 10^{-3}} = 0.01464m = 1.464cm.$$

(3) السهم اللحظي الناتج عن الحمولة الكلية (حية وميتة) y_{iq} :
بإتباع الطريقة السابقة أعلاه ينتج:

$$q = p + g = 17kN/m; M_{max q} = 212.5kNm; I_e = 3.11 \times 10^{-3} m^2.$$

ومنه: $y_{iq} = 2.396cm.$

(4) السهم اللحظي الناتج عن الحمولة الحية y_{ip} :

$$y_{ip} = y_{iq} - y_{ig} = 2.396 - 1.464 = 0.932cm$$

(5) السهم طويل الأمد نتيجة السيلان (التطبيق طويل الأمد للحمولات الميتة) y_{cr} :

بسبب عدم وجود تسليح ضغط محسوب يكون $\alpha = 2$ ، ولذلك ينتج:

$$y_{cr} = \alpha y_{ig} = 2 \times 1.464 = 2.298cm.$$

(6) السهم الأعظمي الكلي في منتصف الكمرة y_{max} :

يحدد وفقاً للعلاقة (8-5) أو العلاقة (8-8) كسهم للمقارنة (السهم الناجم عن الوزن الذاتي يحدث قبل بناء القواطع والمنشآت الأخرى التي يحملها العنصر المدروس):

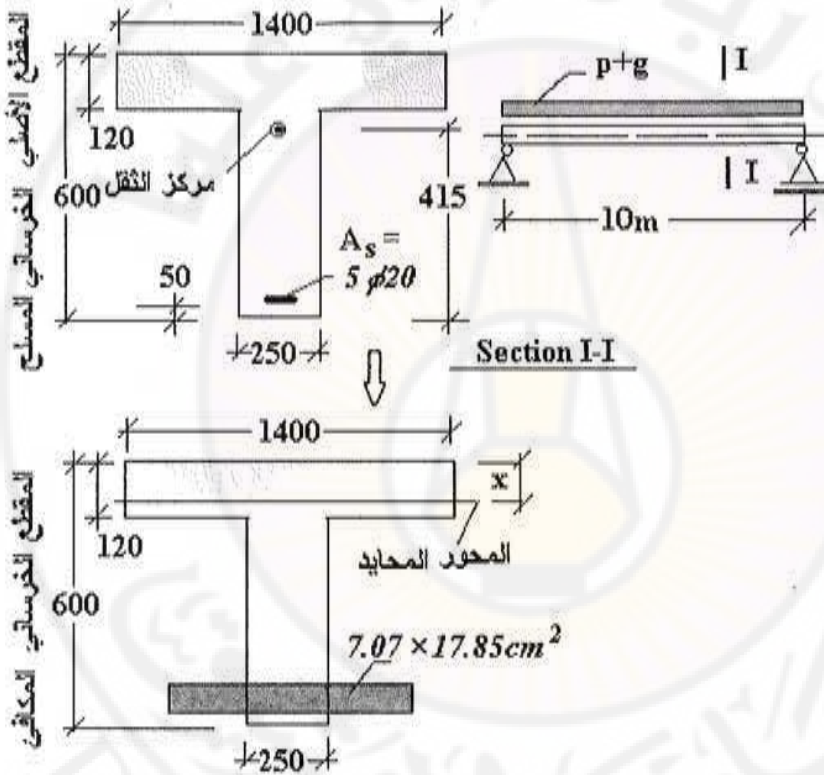
$$y_{max} = (1.464 - 0.67) + 0.932 + 2.298 = 4.654cm.$$

(7) المقارنة مع السهم المسموح به:

لأن الكمرة لا تحمل قواطع أو منشآت تتأثر كثيراً بالسهم ، تؤخذ القيمة المسموح بها مساوية:

$$y_{all} = \frac{L}{240} = \frac{1000}{240} = 4.167 \text{ cm} < y_{max} = 4.654 \text{ cm}.$$

وهذا يعني أن شرط السهم غير محقق، و لا بد من معالجة الموضوع بالإجراءات المناسبة، كالتخفيف من السهم الطويل الأمد باستخدام تسليح ضغط في المقطع (يحدد بنسبة معينة من تسليح الشد)، أي تصميم المقطع ليكون ثنائي التسليح (يترك ذلك للطالب).



الشكل (8-8) الجانز المدروس في المثال (1).

مثال (2):

جانز من الخرسانة غير المسلحة بحره الفعال $6m$ ومقطعه العرضي مستطيل أبعاده $40cm$ و $100cm$ ، والمطلوب:

(1) حساب السهم الناتج في حال التعرض لحمولة مينة موزعة بانتظام (دون الوزن الذاتي) قدرها $30kN/m$ وحمولة حية موزعة بانتظام قدرها $10kN/m$ ، وهو موجود في وسط رطب ومعرض لحمولة بعد شهر واحد من الصب.

(2) في حال اعتماد السهم الناتج في الطلب الأول، يطلب تحديد السهم الناتج في جانز مشابه معرض للحمولات السابقة نفسها، علماً أن هذا الجانز موجود في وسط جاف ويتعرض للحمولة بعد شهرين من الصب، وحيث إن: $f'_c = 20MPa$ ونسبة الماء إلى الإسمنت $\frac{w}{c} = 0.5$.

الحل:

(1) الطلب الأول:

$$25 \times 0.4 \times 1 = 10kN/m$$

(أ) الوزن الذاتي للجانز:

$$g = 30 + 10 = 40kN/m$$

(ب) الحمولة الكلية المينة:

(ج) معامل السيلان ϕ هنا بالطريقة الدقيقة (تحميل بعد شهر واحد ورطوبة نسبية (100%) وغير ذلك، راجع الكود العربي السوري أو الباب الثاني/ الفصل التاسع):

$$\phi = k_c k_d k_b k_d k_t = 1 \times 1 \times 0.1 \times 0.68 \times 1.2 = 0.08.$$

(د) معامل مرونة الخرسانة الزمني:

$$E_c = \frac{E_{co}}{1 + \phi} = \frac{6645\sqrt{20}}{1 + 0.08} = 2.75 \times 10^4 MPa$$

(هـ) السهم الناتج (سهم الحمولة الحية + سهم الحمولة المينة وضمنه سهم السيلان):

$$y = \frac{5gL^4}{384E_c I} + \frac{5pL^4}{384E_{co} I} = 0.074 + 0.017 = 0.091cm.$$

حيث أن $I = I_g$ لأن المقطع من الخرسانة غير المسلحة.

(2) الطلب الثاني (بالعودة إلى الطلب 1)، وكذلك:

(أ) معامل السيلان وفق الشروط الجديدة:

$$\phi = k_c k_d k_b k_d k_t = 2.7 \times 0.22 \times 0.9 \times 0.68 \times 1.2 = 0.44$$

$$E_c = \frac{E_{co}}{1 + \phi} = \frac{6645\sqrt{20}}{1 + 0.44} = 2.06 \times 10^4 \text{ MPa}$$

(ب) معامل المرونة الزمني للخرسانة: $2.06 \times 10^4 \text{ MPa}$

$$y = \frac{5gL^4}{384E_cI} + \frac{5pL^4}{384E_{co}I} = 0.123 + 0.017 = 0.14 \text{ cm}$$

نتيجة: يلاحظ أن وجود الجائز في وسط جاف يسبب زيادة السهم الناتج وذلك بسبب تأثير السيلان في الخرسانة.

مثال (3): (يحله الطالب).

ظفر من الخرسانة المسلحة حامل لعناصر غير إنشائية حساسة كثيراً للسهم مقطعه العرضي كما هو موضح في الشكل (8-9)، والمطلوب تحديد السهم الأعظمي لهذا الجائز ومقارنته بالسهم المسموح به، علماً أن:

طول البحر: 4m ، الحمولة الميتة موزعة بانتظام وقدرها 20kN/m (بما في ذلك الوزن الذاتي)، الحمولة الحية موزعة بانتظام وقدرها 10kN/m ، $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ، $f'_c = 20 \text{ MPa}$ ؛ $f_y = 420 \text{ MPa}$ وفترة التحميل تتجاوز ثلاث سنوات، وضمن الشروط العادية.

مثال (4): (يحله الطالب).

يبين الشكل (8-10) جائزاً بسيطاً من الخرسانة المسلحة مع مقطعه العرضي، وهو يتعرض لتأثير حمولة مركزة في منتصفه W ، والمطلوب:

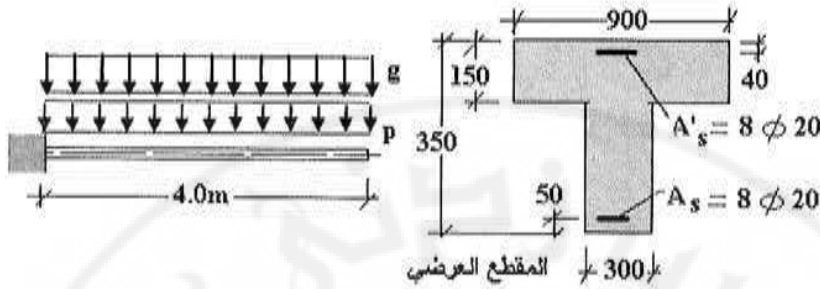
أ- إيجاد علاقة حساب السهم الأعظمي المرين للمقطع المتجانس تبعاً للحمولة W ، وتبعاً للعزم الأعظمي الناتج M ، مع تحديد المعامل β في علاقة حساب السهم المرين.

ب- بافتراض أن الجائز من الخرسانة المسلحة وواقع في شروط عادية، وأن الحمولة المركزة المطبقة ميتة $W=G$ ، وأن السهم اللحظي الناتج عن تأثير الوزن الذاتي $y_{io} = 5.6 \text{ mm}$ ، يطلب التحقق من حالة حد السهم المسموح به بعد مضي مدة أكثر من ثلاث سنوات على تطبيق الحمولة، حيث عمر الخرسانة لحظة تطبيق الحمولة أقل من ثلاثة أشهر، علماً أن السهم

المسموح به $y_{all} = \frac{L}{240}$ (بفرض أن الجائز حامل لعناصر غير إنشائية لا تتأثر كثيراً للسهم)، وكذلك:

$$G = 50kN; f'_c = 20MPa; f_y = 420MPa$$

$$L = 10m, E_s = 210000MPa, A_s = 5T25$$



الشكل (8-9) الجانز الظفري في المثال (3).

مثال (5): (يحله الطالب).

يبين الشكل (8-11) ظفراً من الخرسانة المسلحة موثقاً في جدار حامل مع مقطعه العرضي الأحادي التسليح واقعاً في شروط غير عادية (يؤخذ معامل الزحف في الخرسانة $\phi = 0.4$) وخاضعاً لتأثير عزم انحناء ثابت القيمة $M = 100kNm$ مؤلف من قسم حي $M_p = 0.4M$ وآخر ميت $M_G = 0.6M$ والمطلوب تحديد الثابت β في علاقة تحديد السهم المرن، وكذلك قيمة السهم الأعظمي الناتج عن تأثير العزوم المذكورة أعلاه (بإهمال الوزن الذاتي)، علماً أن: $E_s = 2.1 \times 10^5 MPa; f'_c = 20MPa; f_y = 300MPa$.

مثال (6): (يحله الطالب)

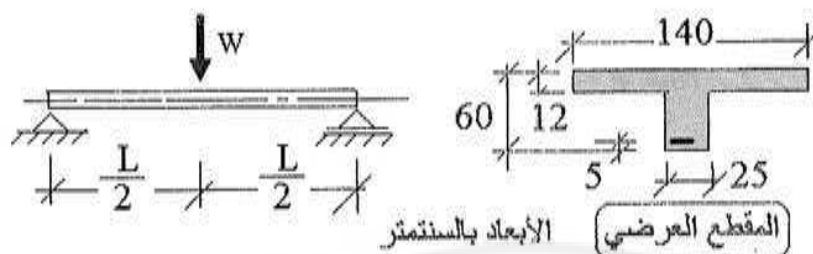
يبين الشكل (8-12) جانزاً بسيطاً من الخرسانة المسلحة مع مقطعه العرضي أحادي التسليح، وهو يتعرض (إضافة إلى الوزن الذاتي) لتأثير حمولة مركزة في منتصفه: حبة P وميتة G ، والمطلوب:

أ - إيجاد علاقة حساب السهم الأعظمي المرن للمقطع المتجانس كتابع لعزم الانحناء، وتحديد قيمة معامل الاستناد وشكل الحمولة β .

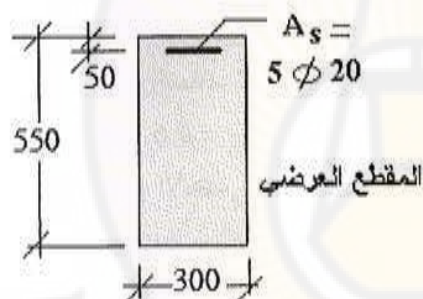
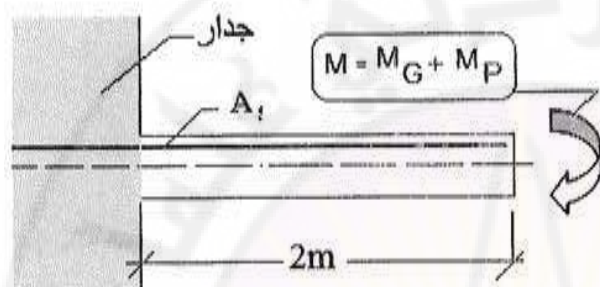
ب- بافتراض أن الجانز واقع في شروط غير عادية، حيث يساوي معامل السيلان $\phi = 0.5$ ، يطلب حساب السهم الأعظمي الكلي الناتج عن تأثير الأحمال المطبقة، علماً أن:

$$G = 50kN; P = 30kN; f'_c = 25MPa; f_y = 400MPa, L = 8m,$$

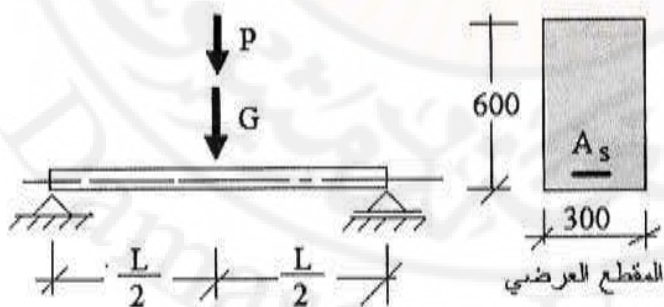
$$E_s = 210000MPa; E_{co} = 21000MPa; A_s = 5T25$$



الشكل (10-8) الجائز المدروس في المثال (4).



الشكل (11-8) الجائز المدروس في المثال (5).



الشكل (12-8) الجائز المدروس في المثال (6).

الفصل التاسع

تأثير التشوهات الحجمية

والزحف في الخرسانة المسلحة

Influence of Volumetric and Creep Strains on Reinforced Concrete

(إعداد د. م. قاسم زحيلي)

- 1-9- مقدمة.
- 2-9- خواص الخرسانة الانسيابية.
- 3-9- انكماش الخرسانة وانتفاخها.
- 4-9- التشوهات الناجمة عن التغيرات الحرارية.
- 5-9- التشوهات الناجمة في الخرسانة تحت تأثير الأحمال المطبقة.
- 6-9- معامل تشوه الخرسانة.
- 7-9- التشوهات طويلة الأمد في الخرسانة الزحف أو الزحف.



9-1- مقدمة Introduction:

تنشأ في العناصر الخرسانية المسلحة تشوهات مختلفة لها طبيعة حجمية نتيجة تأثير أشكال متعددة من الأفعال التي قد تكون مباشرة نتيجة تطبيق الأحمال، أو غير مباشرة ناتجة عن أفعال ذاتية كالانكماش والانفخاخ والحرارة والعوامل الكيماوية المرتبطة بظاهرة الكرىنة وتأكسد التسليح وغير ذلك. وتبعاً للأسباب التي تنشأ عنها هذه التشوهات في الجسم، وتبعاً لطبيعة التغيرات، يُمكن تصنيف تشوهات الخرسانة على النحو التالي:

النوع الأول:

تشوهات ذاتية ناتجة عن تأثير الخرسانة بالوسط المحيط (حرارة، رطوبة) دون تأثير أي حمولات، وهي تشوهات الانكماش *Shrinkage* والانفخاخ *Swelling* ويضاف إليها التشوهات الحرارية *Thermal deformation*.

الحد الأعلى التقريبي لقيم تشوهات الانكماش هو:

$$\varepsilon_{shc} = 30 \times 10^{-5} \quad \text{الخرسانة الثقيلة:}$$

$$\varepsilon_{shc} = 45 \times 10^{-5} \quad \text{الخرسانة العادية:}$$

أما قيم تشوهات الانفخاخ فإنها أقل من قيم تشوهات الانكماش بـ (2 - 5 مرات).

النوع الثاني:

تشوهات ناجمة عن تطبيق حمولات خارجية وهي التشوهات اللحظية والتشوهات مع الزمن (الزحف *Creep*)، ويخضع أي عنصر خرساني إلى تشوهات ناتجة عن التحميل، وبما أن الخرسانة مادة ذات خواص مرنة-لدنة، فإنها تسلك تحت تأثير الحمولات سلوكاً متغيراً تبعاً لطبيعة هذه الحمولات وحجمها ومدة تطبيقها. هذا من ناحية، و من ناحية أخرى تبعاً لمقاومة الخرسانة المدروسة وعمرها وتركيبها.

تساوي القيمة العظمى للتشوهات الناتجة عن الحمولات اللحظية للخرسانة للضغط المركزي

$$\varepsilon_c = 190 \times 10^{-5} \quad \text{، وإضافة لذلك:}$$

$$\bar{\varepsilon}_{cr} = 20 \times 10^{-5} \quad \text{القيمة الوسطية للزحف في حالة الضغط اللامركزي:}$$

$$\bar{\varepsilon}_{cr} = (270 \rightarrow 450) \times 10^{-5} \quad \text{القيمة الوسطية للزحف في حالة الانعطاف:}$$

يعمل حديد التسليح على الضغط عندما تعمل الخرسانة على الانكماش، أما عندما تعمل الخرسانة في مجال الانتفاخ فإن حديد التسليح يعمل على الشد، فوجود حديد التسليح يحد من التشوهات الناتجة عن الانتفاخ والانكماش في الخرسانة.

9-2- خواص الخرسانة الانسيابية *Concrete Strain Properties*:

ما طبيعة تشوهات الخرسانة؟

يفهم من تشوه جسم صلب أنه التغير الحاصل في أبعاد هذا الجسم الأولية. يُمكن أن يحدث التغير في أبعاد الجسم الصلب باتجاه واحد، ويسمى الجسم في هذه الحالة عنصراً خطياً، أي إن التشوهات تأخذ محورين:

تشوهات طولية وتشوهات عرضية، أما إذا حدث التغير في أبعاد الجسم الصلب في جميع الاتجاهات فإن الجسم في هذه الحالة يسمى عنصراً حجماً (أي تشوهات تأخذ ثلاثة محاور، وهي التشوهات الشاقولية والتشوهات العرضية والتشوهات المماسية)، و تبعاً للأسباب التي تولد هذه التغييرات للجسم ولطبيعة التغييرات يُمكن تصنيف تشوهات الخرسانة على الشكل التالي:

1- التشوهات الذاتية للخرسانة (الانكماش والانتفاخ):

تتجم هذه التشوهات عن تصلب الخرسانة بسبب تغير محتوى الماء داخلها أثناء فترة التصلب *Hardening* وتتميز هذه التشوهات بطبيعتها الحجمية.

2- التشوهات الناجمة عن التغيرات الحرارية:

أثناء فترة أخذ وتصلب الخرسانة تتحرر كمية حرارة كبيرة ناجمة عن التفاعلات بين الماء والإسمنت، أو أثناء استئثار المنشأ فإن الخرسانة تتعرض لاختلاف في درجات حرارة الوسط المحيط، و ينجم عن هذا الاختلاف تمدد العناصر الخرسانية، وتتميز أيضاً هذه التشوهات بطبيعتها الحجمية.

3- تشوهات الخرسانة الناجمة عن تطبيق الحمولات الخارجية:

تتميز هذه التشوهات بطبيعتها الخطية وتنتج تحت تأثير الإجهادات الداخلية المتولدة في مقاطع العناصر الإنشائية بسبب تطبيق الحمولات الخارجية عليها. يمكن أيضاً تصنيف تشوهات العناصر الخرسانية تبعاً لنوع هذه التشوهات على الشكل التالي:

- تشوهات مرنة *Elastic Strains* :

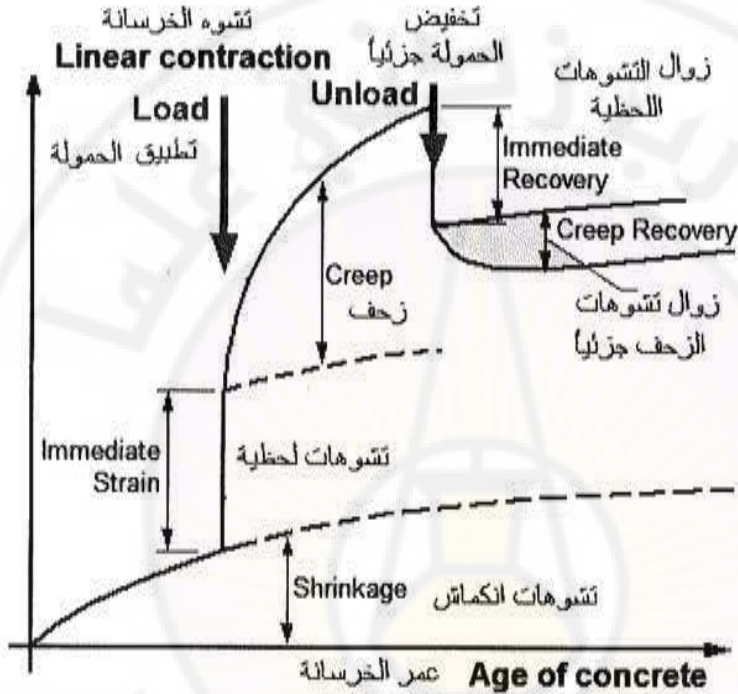
تتميز هذه التشوهات بكونها تتناسب طردياً مع قيم الإجهادات الفعلية المطبقة على المقطع والمولدة لهذه التشوهات. تكون هذه التشوهات مستقلة عن عامل الزمن وقابلة للزوال فيما لو زُفعت الإجهادات المطبقة على المقطع. تظهر هذه التشوهات من أجل أية قيمة للإجهادات المطبقة (أو بتعبير آخر للتحميل قصير الأمد، ثابتة بثبات المقطع العرضي للعنصر الخرساني، أي إن العنصر في حالة الاستقرار في أبعاده، وعندما يتخطى العنصر حد المرونة في هذه الحالة يدخل العنصر عتبة جديدة تسمى عتبة المرونة - اللدونة، أي إنه بدأت تظهر التشوهات اللدنة على حساب تناقص التشوهات المرنة إلى أن تصل إلى حدٍ تتساوى عنده التشوهات المرنة مع التشوهات اللدنة. في هذه الحالة من الممكن القول أن العنصر مازال في حالة الأمان. وعندما تبدأ التشوهات المرنة - اللدنة تتجاوز حدود التساوي وتصبح قيمة التشوهات اللدنة أكبر من قيمة التشوهات المرنة، يدخل العنصر في هذه الحالة مرحلة عدم الاستقرار والأمان إلى أن يصل العنصر إلى مرحلة الانهيار. مما سبق نستنتج أن عتبة الزحف للخرسانة والخرسانة المسلحة هي ضئيلة وتكاد تكون معدومة إذا ما قورنت بعتبة الزحف لحديد التسليح في حالة تطبيق الحملات للحظية)

- تشوهات لدنة *Plastic Strains* :

تظهر هذه التشوهات بعد أن تتجاوز الإجهادات الفعلية المطبقة على العنصر حداً معيناً يُسمى (الإجهاد المرن). تأخذ هذه التشوهات بالتزايد حتى يصل العنصر إلى مرحلة الانهيار. تتميز هذه التشوهات بكونها غير قابلة للرجوع عند رفع الإجهادات المطبقة. تنجم هذه التشوهات عن الانزياحات النسبية *Relative Displacements* بين بلورات المونة الإسمنتية والحصويات، حيث تتولد داخل كتلة الخرسانة شبكة من التشققات الناعمة جداً. يبين الشكل (9-1) تغير تشوهات الخرسانة مع الزمن وفقاً للأحمال المطبقة عليها بشكل عام. فقبل تطبيق الحمولة تعاني الخرسانة تأثير الانكماش، وعند تطبيق الحمولة تحصل تشوهات لحظية ناجمة عن هذه الحمولة، ومع استمرار تطبيق هذه الحمولة، تحصل ظاهرة الزحف، وعند إزالة قسم من الحمولة بعد عمر معين للخرسانة تزول التشوهات اللحظية وقسم من تشوهات الزحف، ثم يستمر الزحف تحت تأثير الحمولة المتبقية، وفي حال إزالة الحمولة كلها يبقى تأثير تشوهات الانكماش فقط.

- تشوهات لزجة *Viscous Strains* :

تتميز هذه التشوهات بسرعة انزياحها، حيث تكون متناسبة مع قيم الإجهادات الفعلية المطبقة، وتزداد قيم هذه التشوهات مع الزمن تحت تأثير فعل الحمولات المطبقة طويلة الأمد، وتكون عادةً هذه التشوهات قابلة للرجوع بشكل جزئي.



الشكل (9-1) تغير تشوهات الخرسانة مع الزمن وطبيعة الأحمال المطبقة.

تظهر هذه التشوهات تحت تأثير أي نوع من الإجهادات المطبقة، حيث تتخادم مع الزمن حتى تصل إلى قيمة حدية ثابتة، ومن الممكن تحديد قيم هذه التشوهات عند تحميل العنصر الخرساني بحمولات طويلة الأمد لمرحلة زمنية معينة ودرجة التحميل تخطت عتبة المرونة، وبعد فترة زمنية نقوم بإزالة الحمولة المطبقة بشكل مطلق إلى الصفر ونراقب ساعات قياس التشوه عند إزالة الحمولة مباشرة، فالتشوهات التي تعود بشكل سريع تكون هي التشوهات المرنة، وبعد مرور 4 ساعات على إزالة الحمولة نبدأ بمراقبة هذه الساعات لمدة 28 يوماً، وتمثل قيم التشوهات

التي عادت خلال هذه الفترة المذكورة قيمة التشوّهات اللزجة، وبما أن التشوّهات اللزجة عادت مع الزمن فإنها تنتمي إلى التشوّهات المرنة (أي إن عودة هذه التشوّهات مع الزمن أعطت استقراراً جديداً للعنصر بعد إزالة الحمولة ما بين التصاق المونة الإسمنتية مع الطبقة البلورية، وأيضاً نتجت عن عامل مرونة الطبقة البلورية في الحصى، أما التشوّهات التي لم تعد بعد هذه الفترة فإننا نسميها التشوّهات المتبقية وهي تنتمي إلى التشوّهات اللدنة).

9-3- انكماش الخرسانة وانتفاخها *Concrete Shrinkage and Swelling*:

تتميز هذه التشوّهات بكونها ذاتية وذات خاصية حجمية حيث تلجأ عن تغيير محتوى الماء داخل كتلة المونة الإسمنتية. مثلاً لو تصلبت الخرسانة تحت تأثير الهواء مباشرة وكانت رطوبة الوسط المحيط منخفضة نسبياً لحدث نتيجة لذلك انكماش في كتلة الخرسانة المتصلب وهو تغيير حجم الخرسانة باتجاه التناقص، أي إن الخرسانة تعمل على الشد نحو الداخل - أي إن الخرسانة تعمل على ظاهرة الانكماش ونسبي ظاهرة الانكماش في هذه الحالة ظاهرة الانكماش الخرساني (*Concrete shrinkage*). أما إذا حُفِظَت الخرسانة وعُزِلَت عن الوسط الخارجي، مثال على ذلك: لو غُلِقت العينة الخرسانية بطبقة من الشمع ولم يُسمح للخرسانة تحرير الماء منها أو تُصلبها في وسط محيط ذي درجة رطوبة عالية، فسيحدث نتيجة لذلك تغيير في حجم كتلة الخرسانة باتجاه التزايد، أي إن الخرسانة تعمل على الضغط خارج مركزها الحجمي، وتسمى هذه الظاهرة بانتفاخ الخرسانة.

تزداد قيم الانتفاخ والانكماش مع الزمن. يكون معدل الزيادة في البدء مرتفعاً، ثم يأخذ بالتناقص تدريجياً حتى يتخامد نهائياً. تتم هذه المرحلة خلال فترة زمنية تتراوح بين (2 إلى 5) سنوات. لقد أثبتت التجارب أن معدل حدوث الانكماش يتم على الشكل التالي:

* ينكمش أو ينتفخ العنصر بحدود 50% من قيمة انكماشه النهائية خلال شهر واحد.
* يصل الانكماش أو الانتفاخ بحدود 75% من القيمة النهائية بعد ستة أشهر من صب الخرسانة.

* يصل الانكماش أو الانتفاخ القيمة النهائية بعد (2 إلى 5) سنوات.

* يكون تزايد قيم الانكماش تبعاً للزمن على شكل تابع لوغاريتمي.

تجدر الملاحظة أنه إذا غيرنا رطوبة الوسط المحيط فإن انكماش الخرسانة يتراجع بشكل جزئي، ويبقى جزء من التشوّهات ثابتاً غير قابل للرجوع. ويُلاحظ أيضاً أن قيمة تشوّهات

الانكماش أكبر نسبياً من قيم الانقفاخ للخرسانة كما دُكر سابقاً. تنجم ظاهرة الانكماش في الخرسانة عن تغير محتوى الماء داخل بنية المونة الإسمنتية والخرسانة وعن شيخوخة التركيب الغروي للجزء المتفاعل من المونة الإسمنتية (أي فقدان الماء داخل التركيب الغروي حيث يصغر حجم الكتلة المتفاعلة).

* تتعلق عملية انكماش الخرسانة بالعوامل الأساسية التالية:

- يزداد الانكماش كلما ازداد عيار الإسمنت في الخرسانة، وكذلك بازدياد السطح النوعي للإسمنت المستخدم.
 - يزداد الانكماش بازدياد النسبة بين الماء والإسمنت في الخلطة.
 - يزداد الانكماش عند إضافة مواد إضافية للخلطة مثل (كلور الكالسيوم).
 - ينقص الانكماش عند ازدياد معامل التشوه (المرونة) للحصويات المستخدمة (يستثنى من ذلك الحصويات الناجمة عن البازلت).
 - ينقص الانكماش عندما تزداد درجة اكتناز الخرسانة (نسبة فراغات قليلة).
 - يكون انكماش الخرسانة أقل بكثير من انكماش المونة الإسمنتية.
 - يزداد الانكماش بمعدل كبير وسرعة كبيرة عند تصلب الخرسانة في وسط جاف ودرجة حرارة مرتفعة. ويقل الانكماش كثيراً إذا تصلبت الخرسانة في وسط عالي الرطوبة وبدرجات حرارة معتدلة.
 - يتعلق الانكماش بالأبعاد الهندسية للعنصر الخرساني فمن أجل العناصر الخيطية يزداد الانكماش كلما صغرت أبعاد المقطع العرضي للعنصر. أما إذا كان العنصر مسطحاً فإن الانكماش يزداد كلما قلت سماكة هذا السطح الخرساني (القشريات مثلاً).
 - يزداد الانكماش عند استخدام الحصويات ذات الوزن الحجمي الأصغر.
- تجدرُ الملاحظة بأن ظاهرة الانكماش تُولد في الخرسانة تشوهات غير منتظمة، حيث تكون هذه التشوهات كبيرة عند السطح وصغيرة داخل كتلة الخرسانة (بخاصة في المنشآت الكتلية). في هذه الحالة تتعرض المنشآت الكتلية نتيجة للانكماش إلى إجهادات شاده عند السطح وإجهادات ضاغطة داخل الكتلة.
- نتيجة لذلك يتشقق المنشأ الكتلّي عند سطحه الخارجي. وكى تُخفف من ظاهرة الانكماش في المنشآت الخرسانية فإنه يتوجب حفظ الخرسانة في وسط خارجي رطب لوقت محدد يبدأ من

تاريخ صبها حتى تكتسب مقاومة عالية نسبياً وكافية لمنع حدوث التشققات تحت تأثير ظاهرة انكماش الخرسانة.

✓ تأثير الانكماش في عناصر الخرسانة المسلحة:

يكون انكماش الخرسانة المسلحة وانفاجها عادة أقل من انكماش الخرسانة العادية وانفاجها، وذلك بسبب وجود التسليح داخل كتلة الخرسانة حيث يعيق عملية انكماش الخرسانة فيما لو كانت هذه الخرسانة حرة. يستطيع التسليح إعادة تطور انكماش الخرسانة بواسطة عمليات التماسك الوثيقة بين التسليح والخرسانة، علماً أن التسليح الذي يقاوم الإجهادات الناتجة عن انكماش أو انفاج الخرسانة هو تسليح إنشائي، ويكون غالباً في الجوائز التي يبلغ ارتفاعها أكبر من 65 سم، وأيضاً يوضع تسليح الانكماش في البلاطات التي تعمل باتجاه واحد وباتجاهين وفي البلاطة التي تعمل باتجاهين يكون تسليح الانكماش هو التسليح الثانوي. أما في البلاطة التي تعمل في اتجاه واحد فيكون تسليح الانكماش هو التسليح الإنشائي. يجدر التنويه هنا إلى أن انكماش الخرسانة المسلحة وانفاجها يقلان كلما زادت نسبة تسليح العنصر المدروس.

يسبب الانكماش في عناصر الخرسانة المسلحة حالة إجهادية أولية على الشكل التالي: يتولد في تسليح العنصر الخرساني المسلح إجهادات ضاغطة وفي الوقت نفسه يتولد في الخرسانة حالة إجهادية شادة (أما إذا كان العنصر الخرساني المسلح متعرضاً للانفاج فإن التسليح سيخضع لإجهادات شاده والخرسانة لإجهادات ضاغطة).

نستطيع تحديد قيم هذه الإجهادات المتولدة في أي مقطع من مقاطع العنصر الخرساني المسلح فيما لو عرفنا قيمة تشوه الانكماش النسبي الممكن حصوله في العنصر الخرساني ϵ_{sh} (حيث ϵ_{sh} - مقدار تشوه الانكماش المتوقع للخرسانة العادية) وكذلك نسبة التسليح في المقطع

$$\mu_s = \frac{A_s}{B_c} \text{ حيث:}$$

A_s - مساحة التسليح.

B_c - مساحة الخرسانة الصافية دون فراغات التسليح).

لكي نحسب هذه الإجهادات الناجمة عن الانكماش في الخرسانة المسلحة لا بد من اعتماد الفرضيات التبسيطية التالية:

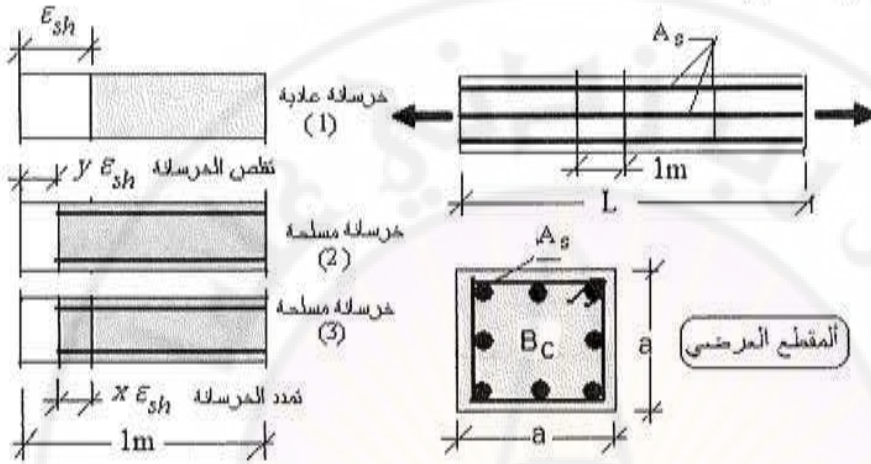
- يُعد الانكماش ثابت القيمة على طول العنصر الخرساني المسلح.

- يبقى معامل المرونة للخرسانة E_c ثابتاً مع الزمن.

- يسمح بصلاحيّة قانون $Hooke$:

$$\sigma = E \varepsilon$$

سنحاول فيما يلي أن نشرح ذلك من أجل عنصر خرساني مسلح حر (غير مقيد) ومنتظم التسليح على كامل المقطع مثل شدادات الخرسانة المسلحة الشكل (9-2-1)، وعنصر خرساني مقيد، الشكل (9-2-ب).



الشكل (9-2-أ) تشوهات الانكماش في شداد خرساني مسلح غير مقيد.

باعتداد الاصطلاحات التالية:

L - طول العنصر الخرساني المسلح.

ε_{sh} - انكماش الخرسانة العادية في واحدة الطول دون وجود تسليح أو عائق يمنعه من الانكماش.

A_s - مساحة التسليح في العنصر الخرساني المسلح.

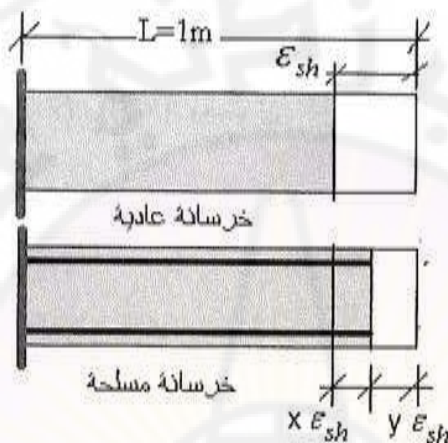
B_c - مساحة الخرسانة الصافية (دون مساحة التسليح).

$\mu = \frac{A_s}{B_c}$ - نسبة التسليح في العنصر الخرساني المسلح.

لنأخذ واحدة الأطوال من العنصر الخرساني المسلح ولنفترض أن التشوه النسبي لهذا العنصر الخرساني دون التسليح والحر يساوي ε_{sh} .

سنتشوه الخرسانة المسلحة مقداراً مساوياً $y \epsilon_{sh}$ نتيجة لوجود التسليح في الخرسانة. تمثل قيمة التشوه ϵ_{sh} مقدار التشوه الحاصل في قضبان التسليح باتجاه العنصر (أي تتعرض هذه القضبان إلى إجهادات ضاغطة)، بينما كان من المفروض أن تتشوه الخرسانة العادية الحرة طولاً مقداره ϵ_{sh} ، لكن بسبب وجود التسليح تتشوه الخرسانة مقداراً يساوي:

$$x \epsilon_{sh} = (1 - y) \epsilon_{sh}$$



الشكل (9-2-ب) تشوهات الانكماش في عنصر خرساني مقيد.

تتعرض الخرسانة في هذه الحالة إلى إجهادات شادة نتيجة تطاولها بمقدار $x \epsilon_{sh}$ من

طولها الفعلي فيما لو أنها لم يُمنع من التشوه. وبافتراض أن:

ϵ_{sh} - يمثل التشوه النوعي للخرسانة العادي الحر.

$y \epsilon_{sh}$ - التشوه النوعي للتسليح الموجود في الخرسانة.

$x \epsilon_{sh}$ - التشوه النوعي للخرسانة في العناصر الخرسانية المسلحة.

ويما أن: $1 - y = x$ ، هذا يعني أن $y = 1 - x$.

تقدّر الإجهادات الشادة المتولدة في الخرسانة من علاقة (Hooke):

$$\sigma_c = x \epsilon_{sh} E_c \quad (9-1)$$

أما الإجهادات الضاغطة المتولدة في التسليح فتحسب من العلاقة التالية:

$$\sigma_s = y \epsilon_{sh} E_s = (1 - x) \epsilon_{sh} E_s \quad (9-2)$$

المجاهيل الموجودة هي الإجهادات الضاغطة في الخرسانة σ_c والإجهادات الشادة الموجودة في التسليح σ_s ، والنسبة بين تشوه التسليح والتشوه الكلي للخرسانة y (3 مجاهيل ومعادلتين).
لحل هذه المعادلات لا بد من الاستفادة من شروط التوازن وباعتبار أنّ العنصر غير مقيد (حر)، ولا تؤثر فيه قوى خارجية (أي إن محصلة الإجهادات الشادة الداخلية يجب أن تتساوى مع محصلة الإجهادات الضاغطة الداخلية) نجد أن:

$$\sigma_c B_c = \sigma_s A_s \quad (9-3)$$

حيث: μ - تمثل نسبة مساحة التسليح المشدود إلى مساحة المقطع العرضي .

من العلاقاتين (9-1) و (9-2) و (9-3)، وحيث إن $n = \frac{E_s}{E_c}$ ينتج:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{x \varepsilon_{sh} E_c}{(1-x) \varepsilon_{sh} E_s}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{x}{1-x} \times \frac{1}{n} = \mu$$

$$x = (1-x) n \mu \Rightarrow x(1+n\mu) = n\mu \Rightarrow$$

$$x = \frac{n\mu}{1+n\mu} ; y = \frac{1}{1+n\mu}$$

بالتعويض بقيمة x في المعادلتين (9-1) و (9-2)، ينتج ما يلي:

$$\sigma_c = \frac{n\mu}{1+n\mu} \times \varepsilon_{sh} E_c \quad (9-4)$$

$$\sigma_s = \left(1 - \frac{n\mu}{1+n\mu}\right) \times \varepsilon_{sh} \times E_s \Rightarrow$$

$$\sigma_s = \frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} \times E_s \quad (9-5)$$

يلاحظ من العلاقات أعلاه ما يلي:

- تكون تشوهات الانكماش للخرسانة المسلحة أقل بكثير من تشوهات الانكماش للخرسانة العادية. ونقل هذه التشوهات كلما زادت نسبة التسليح في العنصر الخرساني المسلح، حيث يقوم التسليح بدور كبح تشوهات الانكماش.

- ترتفع الإجهادات الضاغطة في التسليح كلما كانت نسبة التسليح أصغر. وترتفع الإجهادات الشادة في الخرسانة كلما ازدادت نسبة التسليح في العنصر الخرساني المسلح. تتعلق قيم الإجهادات الأولية المتولدة في التسليح والخرسانة بشكل مباشر، وتتناسب طردياً مع قيم تشوهات الانكماش في الخرسانة العادية ϵ_{sh} .

يعتمد الكود العربي السوري القيم القصوى لمعامل الانكماش للعناصر الخرسانية المسلحة على الشكل التالي:

قيم معامل الانكماش بالمليمتر في المتر ($\epsilon_{sh} \times 10^{-3} mm/m$)، كما هو مبين في الجدول (1-9).

الجدول (1-9) قيم معامل الانكماش (الانكماش) بالمليمتر في المتر.

نوعية وسلك العضو			نوعية ودرجة الرطوبة للجو المحيط
جدران سمك متوسط 50 سم	كمرات عادية مستطيلة القطاع عمق 60 سم	بلاطات رقيقة سمك 10 سم	
0.07	0.09	0.14	عالي الرطوبة (نسبة 90%)
0.19	0.24	0.36	متوسط الرطوبة في الهواء الطلق (نسبة 70%)
0.29	0.36	0.55	عالي الجفاف (نسبة 40%)

من ناحية أخرى لتقدير الأفعال المتولدة في المنشآت الخرسانية المسلحة نتيجة لحادثة الانكماش يقوم الكود العربي بتقسيم المنشآت إلى قسمين:

- المنشآت التي لا يعترض تشوهها الخارجي أي موانع أو حواجز، فيجري هذا التشوه بحرية تامة، ولا يلحق هذا النوع من المنشآت أية أفعال من جراء الحرارة والانكماش.

- المنشآت التي لا تملك الحرية التامة في التشوه الخارجي وتعد مقيدة التشوه، فينتج عن ذلك أفعال من جراء الانكماش يمكن تقديرها على الوجه التالي:

- يُؤخذ فعل الانكماش بشكل تشوه تقصيري منتظم، ويتراوح معامل تشوه التقصير في المجال ($0.1 \rightarrow 0.5 mm/m$)، حسب المناطق الواردة في الجدول (1-9). ينتج عن هذا التشوه في المنشآت المقيدة أحمال محورية تختلف حسب عوامل الانكماش المعتمدة.

يمكن أن تؤخذ على سبيل التسهيل الأرقام التالية للبلاطات الخرسانة بسماكة 12cm والمعرضة لمدة سنة واحدة تقريباً:

- أ - في المناطق الاستوائية ذات الرطوبة العالية درجة (90%) والدائمة، يؤخذ ما يعادل انخفاضاً منتظماً في الحرارة يساوي (10°C).
- ب - في المناطق المعتدلة ذات الرطوبة المتوسطة درجة (75%)، يؤخذ ما يعادل انخفاضاً منتظماً في الحرارة يساوي (25°C).
- ج - في المناطق الجافة الصحراوية (رطوبة درجة 60%)، يؤخذ ما يعادل انخفاضاً منتظماً في الحرارة يساوي (40°C).
- د - في المناطق الصحراوية ذات الجفاف العالي والدائم (رطوبة درجة 40% أو أقل)، يؤخذ ما يعادل انخفاضاً منتظماً في الحرارة يساوي (50%) .
- أما في حال تعرض المنشآت مقيدة التشوه لمفعولي الحرارة والانكماش معاً، فيؤخذ حاصل جميع الأحمال الناتجة من تأثير أفعال الحرارة والانكماش، مع إنقاص ما يعادل (10°C) () لتحديد فعل الحرارة على المنشآت المقيدة.

ترتيبات تتعلق بالمنشآت حرة التشوه :

في المنشآت حرة التشوه، تؤخذ الاحتياطات اللازمة لتمكين هذه المنشآت من تشوهها تحت تأثير الحرارة والانكماش، وتحسب مقادير التشوه باعتبار التشوه الناتج من الانكماش في البلاطات الخرسانية المعرضة لمدة سنة واحدة (ϵ_{sh360}) مساوياً للقيم التالية وذلك تبعاً للمناطق المبينة سابقاً.

$$(\epsilon_{sh360}) = 0.1 \text{ mm / m} \quad \text{المناطق الاستوائية:}$$

$$(\epsilon_{sh360}) = 0.25 \text{ mm / m} \quad \text{المناطق المعتدلة:}$$

$$(\epsilon_{sh360}) = 0.40 \text{ mm / m} \quad \text{المناطق الجافة الصحراوية:}$$

$$(\epsilon_{sh360}) = 0.50 \text{ mm / m} \quad \text{المناطق الصحراوية ذات الجفاف العالي:}$$

أما إذا اختلف عمر العنصر الخرساني عن السنة فيمكننا إجراء التصحيح التالي:

إذا كان زمن تعرض البلاطات الخرسانية يختلف عن 360 يوماً، تُضرب القيم المدونة أعلاه بمعامل تدريجي بحسب كما يلي:

$$\frac{\epsilon_{sh,j}}{\epsilon_{sh360}} = 0.4 \text{Log}_{10} \left(\frac{j}{1.17} \right)$$

حيث عمر الخرسانة بالأيام، على ألا يتجاوز في الحساب عشرة أيام كحد أدنى، وألف يوم كحد أعلى ($10 \leq j \leq 1000$).

حساب الانكماش وفق توصيات الاتحاد الدولي لسبق الإجهاد *FIP* واللجنة الأوروبية - الدولية للخرسانة *CEB*

تقدّر قيم تشوهات الانكماش النسبي في المنشآت الخرسانية والمنشآت الخرسانية المسلحة باستخدام العلاقة التجريبية التالية، الشكل (9-3):

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_c K_b K_d K_p K_t$$

حيث :

ϵ_c - تمثل قيمة الانكماش الأساسية وتتعلق بقيمة الرطوبة النسبية للوسط المحيط للعنصر المراد دراسته تتراوح قيمتها $0 \rightarrow 0.5 \text{mm/m}$.

K_b - معامل تصحيح يتعلق بعمار الإسمنت والنسبة بين الماء والإسمنت $\frac{W}{C}$.

K_d - معامل يتعلق بالأبعاد الهندسية للعنصر الخرساني المدروس وبخاصة بسماكة العنصر الوهمية d_m .

تُحسب سماكة العنصر الوهمية d_m بأنها النسبة بين مساحة المقطع العرضي للعنصر B ونصف محيط العنصر $U/2$ المتصل بشكل مباشر مع الهواء.

- من أجل مقطع دائري مصمت نصف قطره R : $d_m = R$

- من أجل مقطع حلقي سماكته e : $d_m \approx e$

- من أجل مقطع مربع ضلعه a : $d_m = 0.5a$

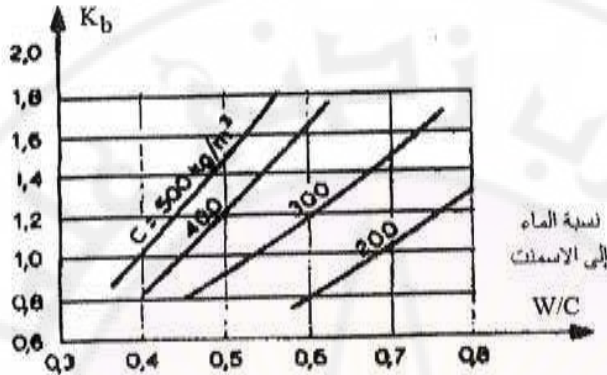
- من أجل مقطع مستطيل $b \times h$: $d_m = \frac{bh}{b+h}$

- من أجل بلاطة ذات سماكة نحيفة e : $d_m \approx e$

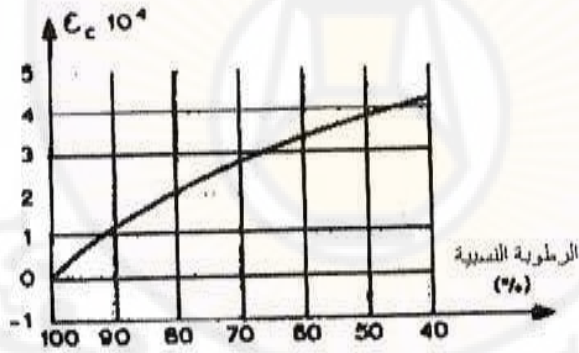
K_p - معامل يتعلق بنسبة التسليح الطولي p في المقطع العرضي، ويعطى بالعلاقة:

حيث: $K_p = \frac{1}{1+nP}$ ($n = 20 \rightarrow 25$)

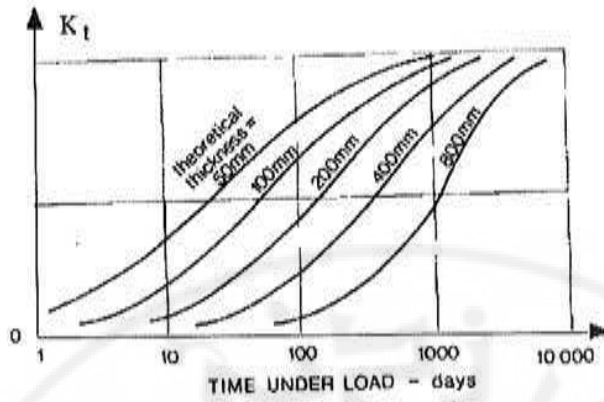
K_f - معامل يتعلق بعمر المنشأ وأبعاده الهندسية، حيثُ يسمح بتقدير قيمة انكماش الخرسانة تبعاً للعمر بشكل تقريبي . نلاحظ أنه من أجل عناصر خرسانية مسلحة خطية وعمر 3 سنوات أو أكثر، تكون قيمة المعامل $K_f = 1$. أما من أجل عناصر خرسانية كتلية لا تتجاوز قيمة المعامل $K_f = 0.5$ من أجل خرسانة عمرها بحدود 3 سنوات، وتصل إلى الواحد بعد 30 سنة تقريباً.



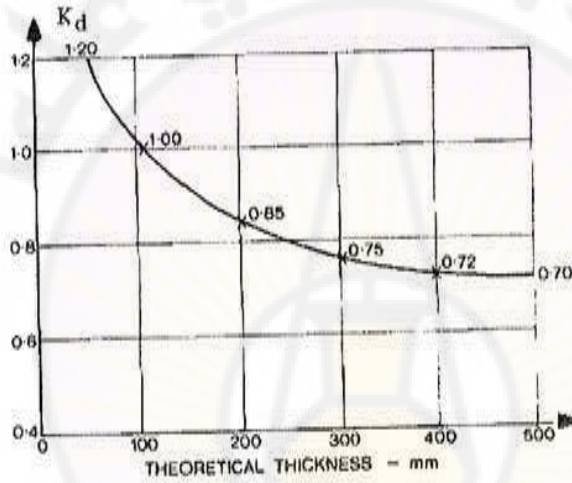
الشكل (3-9) تحديد المعامل K_b .



الشكل (4-9) تغير تشوهات الانكماش الأساسية في الخرسانة E_c تبعاً للرطوبة النسبية.



الشكل (5-9) تحديد المعامل K_t



الشكل (6-9) تحديد المعامل K_d



الشكل (3-9) أثر الحرارة على انكماش الخرسانة.

مثال توضيحي (1):

من أجل منشأ في وسط محيط رطوبته النسبية 70 %، ينتج:

$$\varepsilon_c = 28.10^{-5}$$

$$K_b = 1.0 \leftarrow \frac{w}{c} = 0.48 \quad c = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$K_d = 1.0 \leftarrow d m = 10 \text{ cm} \quad \text{السماكة الوهمية للمنشأ:}$$

$$K_p = 1 \quad \text{الخرسانة غير مسلحة:}$$

$$K_t = 1.0 \quad \text{بما أن عمر المنشأ 3 سنوات يكون أثر الانكماش كلياً، أي:}$$

مثال توضيحي (2):

يُطلب حساب الإجهادات في شداد غير مقيد نسبة تسليحه مساوية 0.01، كما يُطلب حساب الانكماش الكلي في هذا الشداد علماً أن طوله الكلي 20 متراً وأن الشداد منفذ في منطقة معتدلة الرطوبة.

$$\varepsilon_{sh} = 0.3 \times 10^{-3} \quad \text{نعد تشوه الانكماش مساوياً:}$$

$$\mu = \frac{A_s}{Bc} = 0.01 \quad \text{نسبة التسليح:}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 10, \quad E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{معامل مرونة الفولاذ:}$$

نحسب أولاً الإجهادات في الفولاذ والخرسانة وفقاً للعلاقات التالية:

$$\sigma_c = \frac{\mu}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} E_s =$$

$$= \frac{0.01}{1+10 \times 0.01} \times 0.3 \times 10^{-3} \times 2100000 = 5.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_s = \frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} E_s \frac{\mu}{1+10 \times 0.01} \times 0.3 \times 10^{-3} \times$$

$$\times 2100000 = 570 \text{ kg/cm}^2$$

بافتراض أن نسبة التسليح ارتفعت إلى $\mu = 0.02$ ، ففي هذه الحالة تصبح الإجهادات الشادة في

الخرسانة مساوية $\sigma_c = 10.5 \text{ kg/cm}^2$. نلاحظ أننا لو ضاعفنا نسبة التسليح لأدى ذلك

إلى تضاعف إجهاد الشد في الخرسانة وتناقص إجهاد الضغط في التسليح (في حالتنا من أجل تسليح $\mu = 2\%$ ، يصبح إجهاد الضغط في التسليح مساوياً بحدود :

$$\sigma_s = 525 \text{ kg/cm}^2$$

- عندما نستخدم في العناصر نسبة تسليح كبيرة يتوجب علينا معالجة الخرسانة لتخفيف الإجهادات الأولية الناشئة الشادة.

حساب النقص في واحدة الأطوال في الشداد:

نحسب مقدار تشوه الخرسانة x من العلاقة التالية:

$$x = \frac{n\mu}{1+n\mu} = \frac{10 \times 0.01}{1+0.1} = \frac{0.1}{1.1} = 0.0909$$

$$y = 1 - 0.0909 = 0.9090$$

$$L = 20 \text{ m} \quad \text{طول الشداد} \quad \varepsilon_{sh} = 0.3 \times 10^{-3}$$

بُحسب النقص الكلي في طول الشداد من العلاقة:

$$\Delta l = y \varepsilon_{sh} \times l = 0.3 \times 10^{-3} \times 2000 \times 0.909 = 0.55 \text{ cm.}$$

✓ تأثير الانكماش في العناصر الخرسانية غير المقيدة وغير متناظرة التسليح:

لو كان لدينا عنصر خرساني غير مقيد ومتناظر التسليح، ومقدار انكماش الخرسانة النوعي

$$\varepsilon_{sh}$$

نتيجة لوجود التسليح الذي يعيق عملية الانكماش في الخرسانة يتشوه العنصر المسلح بمقدار

$y \varepsilon_{sh}$ نتيجة لذلك سيتولد في الخرسانة إجهادات شد تحسب من العلاقة التالية:

$$\sigma_c = x \varepsilon_{sh} E_c = \frac{n\mu}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} E_c \quad ; \quad (9-6)$$

أما إجهاد الضغط في الفولاذ:

$$\sigma_s = y \varepsilon_{sh} E_s = \frac{l}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} E_s \quad ; \quad (9-7)$$

$$y = \frac{l}{1+n\mu} \quad , \quad x = \frac{n\mu}{1+n\mu} \quad \text{حيث:}$$

ويُحسب الانكماش الحاصل في الخرسانة المسلحة المتناظر التسليح.

$$\Delta l = \frac{l}{1+n\mu} \times \epsilon_{sh} \times l$$

(طول العنصر الكلي المدروس)

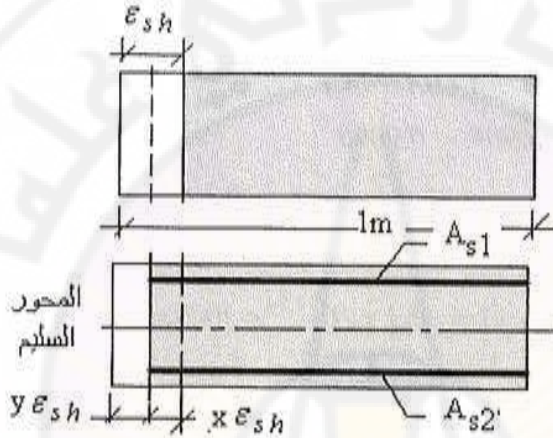
بسبب التناظر يكون التشوه الناتج عن الانكماش منتظماً.

حيث:

ϵ_{sh} - انكماش الخرسانة غير المسلح.

ϵ_s - انكماش الفولاذ.

B_c - مقطع العنصر الخرساني.

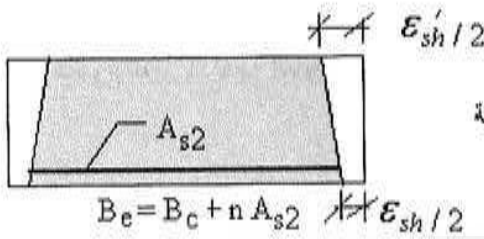


$$B_e = B_c + n A_{s1} + n A_{s2}$$

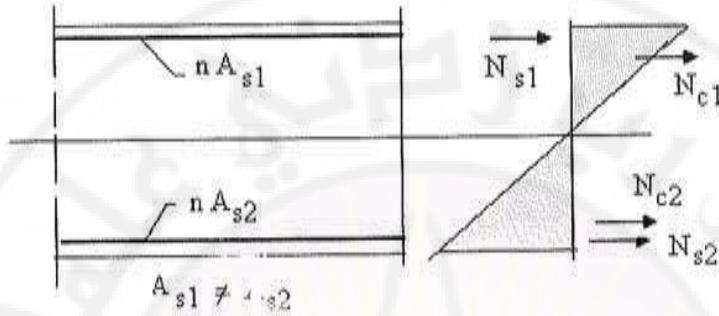
الشكل (8-9) تأثير الانكماش في العناصر الخرسانية غير المقيدة وغير متناظرة التسليح.
(التسليح من الطرفين)

في المقاطع الخرسانية ذات التسليح من طرف واحد، الشكل (9-9)، فإنه يُلاحظ أن الانكماش الحاصل في الجهة التي لا تحتوي على قضبان تسليح أكبر من الجهة المسلحة، وذلك لأن قضبان التسليح تعيق تشوه الخرسانة فيحصل نتيجةً لذلك قوى شادة في الخرسانة وقوى ضاغطة في الفولاذ.

أما إذا كان العنصر مسلحاً بشكل غير متناظر (تسليح علوي A_{s1} ، تسليح سفلي A_{s2})، ينكمش العنصر الخرساني بشكل غير متناظر، حيث يتولد في التسليح العلوي والسفلي إجهادات قد تكون ضاغطة وقد تكون شادة وكذلك في الخرسانة.



الشكل (9-9) تأثير الانكماش في العناصر الخرسانية غير المقيدة وغير متناظرة التسليح. (التسليح من طرف واحد)



الشكل (10-9) تأثير الانكماش في العناصر الخرسانية غير المقيدة وغير متناظرة التسليح. (التسليح من الطرفين)

تحسب الإجهادات الشادة في الخرسانة وفق العلاقة التالية:

$$\mu = \frac{A_s}{B_c} = \frac{A_{s1} + A_{s2}}{B_c}$$

$$\sigma_c = \frac{\mu}{1 + n\mu} \epsilon_{sh} E_s = \frac{A_s}{B_c + nA_s} \epsilon_{sh} E_s$$

يكون المقطع المكافئ للعنصر آخذين بعين الاعتبار تأثير التسليح

$$B_e = B_c + n(A_{s1} + A_{s2})$$

نتيجة للتسليح غير المتناظر ينشأ المقطع بشكل غير منتظم.

سيتمولد عن ذلك جملة من القوى الداخلية على الشكل التالي، الشكل (10-9):

N_{c1} محصلة القوى المتولدة في الخرسانة في المنطقة الواقعة فوق المحور السليم:

N_{c2} محصلة القوى المتولدة في الخرسانة في المنطقة الواقعة تحت المحور السليم:

N_{s1} محصلة القوى المتولدة في التسليح العلوي:

N_{s2} محصلة القوى المتولدة في التسليح السفلي:

يكون الإجهاد في الخرسانة المسلحة محسوباً من العلاقة التالية: (حَصَلْنَا عَلَى هَذِهِ الْعِلَاقَةِ بِاعْتِبَارِ مَجْمُوعِ الْقُوَى الدَّاخِلِيَّةِ الْمَتَوَلِّدَةِ فِي الْمَقْطَعِ مَسَاوِيَةً لِلصَّفْرِ مِنْ شَرَطِ التَّوَاظُنِ الدَّاخِلِيِّ).

$$\sigma_c = \frac{A_s \varepsilon_{sh} E_s}{B_e}$$

وَمِنْ نَاحِيَةِ أُخْرَى نَلَاظِحُ أَنَّ جِذَاءَ $\sigma_c B_e$ يُمَثِّلُ قُوَّةَ وَهْمِيَّةٍ مَطْبُوقَةً عَلَى الْخَرَسَانَةِ نَسْمِيهَا T تَمَثِّلُ الْقُوَّةَ النَّاجِمَةَ عَنِ انْكَمَاشِ الْخَرَسَانَةِ وَتَسَاوِي: $T = \sigma_c B_e = A_s \varepsilon_{sh} E_s$ تَعْمَلُ هَذِهِ الْقُوَّةُ الْوَهْمِيَّةُ T عَلَى خَلْقِ حَالَةٍ إِجْهَادِيَّةٍ فِي الْخَرَسَانَةِ قَدْ تَكُونُ ضَاغِطَةً أَوْ شَادَةً تَبَعاً لِتَوَازُنِ التَّسْلِيحِ.

تَطْبِيقُ هَذِهِ الْقُوَّةِ الْوَهْمِيَّةِ T عِنْدَ مَحْصَلَةِ التَّسْلِيحِيَّيْنِ A_{s1} وَ A_{s2} بِالنِّسْبَةِ لِلْمَحْوَرِ الْمَارِ مِنْ مَرْكَزِ ثَقْلِ الْمَقْطَعِ الْمَكَافِي، وَتَبْعِدُ عَنِ مَرْكَزِ ثَقْلِ الْمَقْطَعِ الْمَكَافِي بِالْقِيَمَةِ e ، حَيْثُ تُولَدُ عِنْدَ الْمَحْوَرِ الْمَارِ مِنْ مَرْكَزِ ثَقْلِ الْمَقْطَعِ الْمَكَافِي عِزْماً يُحَسَّبُ عَلَى الشَّكْلِ التَّالِي: $M = T e$. تُؤَلِّدُ الْقُوَّةَ اللَّامْرَكِزِيَّةَ أَيْضاً إِجْهَادَاتٍ فِي الْخَرَسَانَةِ تَحْسَبُ عَلَى الشَّكْلِ التَّالِي:

$$\sigma_c = \frac{T}{B_e} \mp \frac{T e}{y_e} \times y ; \quad (9-8)$$

حَيْثُ تَمَثِّلُ y بَعْدَ النِّقْطَةِ الْمَدْرُوسَةِ عَنِ مَرْكَزِ ثَقْلِ الْمَقْطَعِ الْمَكَافِي.

مِثَالُ تَوْضِيحِي (3):

لَدَيْنَا بِلَاطَةٌ ظَلْفِيَّةٌ مَجَاوِزُهَا 240cm وَسَمَاكَتُهَا 20cm تَخْضَعُ لِلانْكَمَاشِ وَيَقْدَّرُ الطَّوْلِي. لَا يُوْجَدُ تَسْلِيحٌ ضَغْطُ سَفْلِي.

بِ $\varepsilon_{sh} = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m/m}$ سُلِّخَتْ هَذِهِ الْبِلَاطَةُ بِتَسْلِيحٍ عُلُويٍّ مَقْدَارُهُ 25.4 cm^2 بِالْمَتْرٍ يُطَلَّبُ حِسَابُ الْإِجْهَادَاتِ الْمَتَوَلِّدَةِ فِي الْمَقْطَعِ الْخَرَسَانِيِّ وَالتَّسْلِيحِ لِلظَّفْرِ. وَحِسَابُ السَّهْمِ الْمَتَوَلِّدِ عَنِ هَذَا الْانْكَمَاشِ.

$$B_c = 100 \times 20 = 2000 \text{ cm}^2 \quad \text{مِسَاحَةُ الْخَرَسَانَةِ:}$$

$$A_s = A_{s1} + 0 \quad \text{مِسَاحَةُ التَّسْلِيحِ:}$$

$$nA_s = 25.4 \times 10 = 254 \text{ cm}^2 \quad \text{المِسَاحَةُ الْمَكَافِئَةُ لِلتَّسْلِيحِ:}$$

$$B_e = B_c + nA_s = 2000 + 254 = 2254 \text{ cm}^2 \quad \text{المِسَاحَةُ الْمَكَافِئَةُ لِلْمَقْطَعِ:}$$

تَحْدِيدُ الْمَحْوَرِ الْمَارِ مِنْ مَرْكَزِ ثَقْلِ الْمَقْطَعِ الْمَكَافِي:

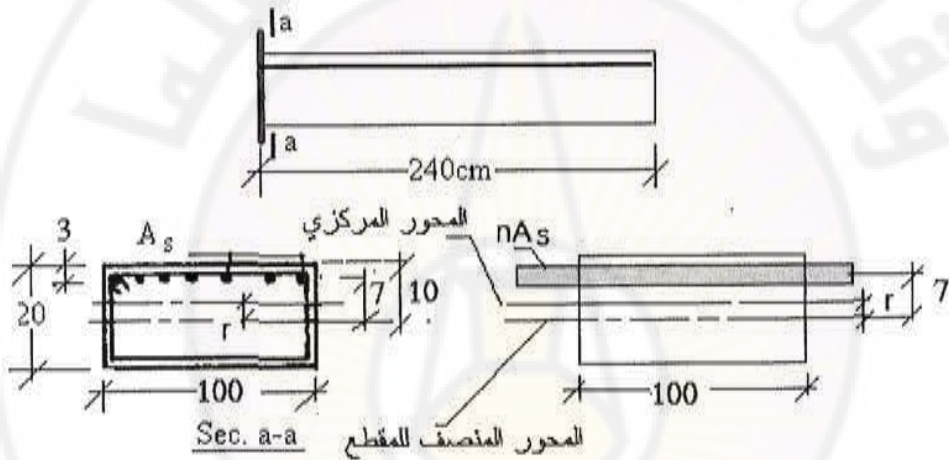
$$r = \frac{\sum s_i}{\sum B_i} = \frac{nA_s(0.5h - a) + 0.5bh \times 0.25h - 0.5bh \times 0.25h}{Be} =$$

$$= \frac{10 \times 254 \times 7}{2254} = 0.789 \text{ cm}$$

عزم عطالة المقطع المكافئ حول مركز الثقل:

$$I_e = \frac{bh^3}{12} - B_e r^2 + nA_s (0.5h - a)^2 =$$

$$= \frac{100 \times 20^3}{12} + 2254 \times 0.789^2 + 254 \times (7.89)^2 \approx 77710 \text{ cm}^4$$



الشكل (9-11) المثال التوضيحي.

تُحسب القوة الوهمية T من العلاقة التالية:

$$T = A_s \varepsilon_{sh} E_s = 25.4 \times 0.4 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^6 = 21336 \text{ kg}$$

تُطبّق هذه القوة عند مركز ثقل التسليح العلوي.

تكون لا مركزية هذه القوة بالنسبة للمحور المار من مركز ثقل المقطع المكافئ مساوية:

$$e = 0.5h - (a + r) = 7 - 0.789 = 6.21 \text{ cm}$$

تولد هذه القوة عزماً بحسب وفق العلاقة التالية:

$$Te = 21336 \times 6.211 = 132518 \text{ kg cm}$$

نحسب الإجهادات في المقطع الخرساني وفق العلاقة التالية:

$$\sigma_c = \frac{T}{B_e} + \frac{T.e}{I_e} y$$

تصبح العلاقة على الشكل التالي:

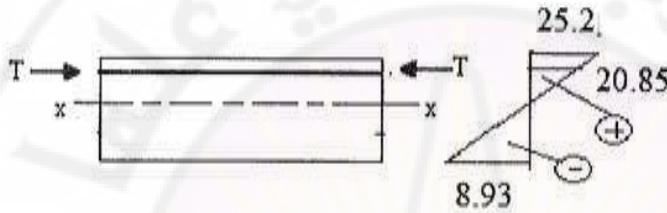
$$\sigma_c = \frac{21336}{2254} \pm \frac{132518}{77710.2} y$$

$$y = +9.21 \text{ cm}$$

الإجهاد عند اللبف العلوي:

$$\sigma_c = 25.174 \text{ kg/cm}^2$$

(شد)



الشكل (9-12) الإجهادات في المقطع الخرساني والتسليح.

$$y = -10.79 \text{ cm}$$

عند اللبف السفلي:

$$\sigma_c = -8.933 \text{ kg/cm}^2$$

(ضغط)

عند التسليح العلوي:

$$\sigma_c = 20.85 \text{ kg/cm}^2$$

$$y = +6.21 \text{ cm}$$

(شد)

ويكون الإجهاد في قضبان التسليح :

$$\sigma_s = \epsilon_{sh} E_s - n\sigma_c = 0.4 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^5 - 10 \times 20.85 =$$

$$= 631.5 \text{ kg/cm}^2$$

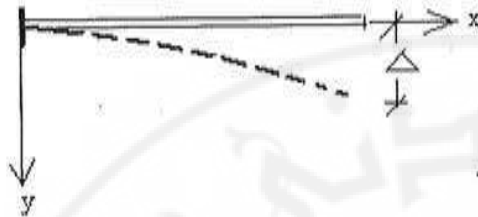
حساب سهم البلاطة الظرفية:

معادلة السهم نتيجة الانكماش، حيث العزم نتيجة الانكماش في الخرسانة $M(x) = Te$

$$E_{co} I_e \frac{d^2 y}{dx^2} M(x) = Te = Const$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = K \rightarrow \frac{dy}{dx} = Kx + C_1 \rightarrow y = K \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot C_2$$

$$\begin{array}{lll} x=0 & y=0 & C_2=0 \\ x_0=0 & \frac{dy}{dx}=0 & C_1=0 \end{array} \quad \text{من الشروط البدائية :}$$



الشكل (13-9) السهم الناتج.

$$y = Te \frac{x^2}{2}$$

$$y_{max} = Te \frac{l^2}{2} \times \frac{1}{E_c I_e}$$

$$y_{max} = \Delta = \frac{132522}{E_c \times 77710} \times \frac{240^2}{2} = \frac{49113.7}{E_{co}} = 0.234 \text{ cm}$$

$$E_{co} = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{حيث:}$$

9-4- التشوهات الناجمة عن التغيرات الحرارية Thermal Strains :

تتجم التشوهات الحرارية في العناصر الخرسانية عن اختلاف درجات الحرارة للوسط المحيط خلال عمر المنشأ و في فترة تصلب الخرسانة. يتولد داخل كتلة الخرسانة نتيجة لارتفاع درجة حرارته بسبب التفاعل الكيميائي أثناء فترة تصلب الخرسانة حالة إجهادية تلخص على الشكل التالي: إجهادات ضاغطة داخل كتلة الخرسانة وإجهادات شادة على سطح كتلة الخرسانة تقدر على الشكل التالي :

$$\sigma_c = E_{co} a \Delta t^o \quad (9-9)$$

حيث: σ_c - إجهاد الشد المتولد عند سطح الخرسانة الخارجة.

A - معامل التمدد الحراري للخرسانة.

E_{co} - معامل المرونة للخرسانة.

Δt^0 - مقدار التغير في درجة الحرارة.

أما إذا تعرضت المنشآت إلى اختلاف درجة الحرارة للوسط المحيط الخارجي، وكانت هذه المنشآت مقيدة التشوه، فإن الحمل الناتج من حرارة الجو الخارجي يُؤخذ مساوياً لفعل التغير الأقصى للحرارة خلال سنة كاملة ($\mp \Delta t^0$).

بحسب التشوه الحاصل في عناصر المنشآت وفق العلاقة التالية :

$$\varepsilon_{ct} = a_t \Delta t^0 \quad (9-10)$$

حيث : a_t - معامل التمدد الحراري للخرسانة.

α_t - التشوه النوعي الناتج من تغير الحرارة.

ومن ثم تُحسب الإجهادات الناتجة من هذا التشوه النوعي.

الحرارة الاصطناعية *Industrial Temperature*:

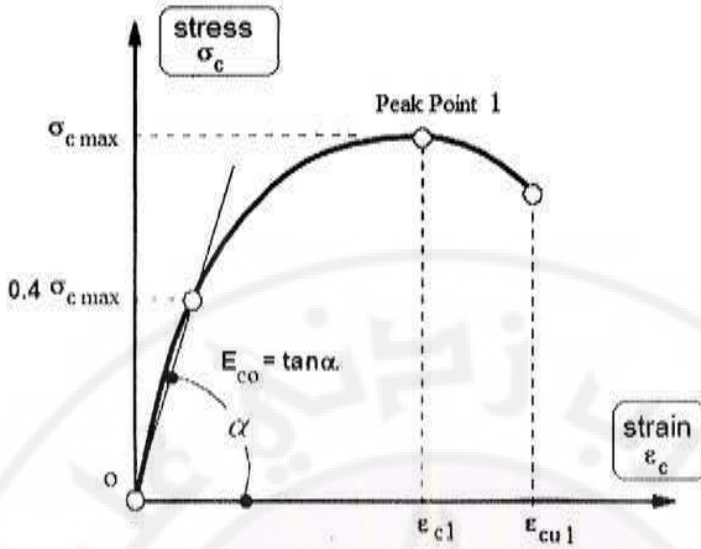
- في المنشآت المختلفة المعرضة لحرارة اصطناعية يُؤخذ فعل هذه الحرارة الاصطناعية باعتماد

معامل التمدد الحراري للخرسانة المسلح مساوياً $\alpha_t = 1 \times 10^{-5}$ ، هذا يعني أن: $a_t = 0.01 \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$

- في المنشآت كبيرة السماكة والمعرضة لحرارة اصطناعية مختلفة على كل من الوجهين، يُؤخذ المعامل التمددي ($\alpha_t = 10^{-5}$) ذاته لقياس انتقال التمدد المختلف على الوجهين، ومن ثم دوران المقاطع وحساب عزوم الانعطاف في حال وجودها.

9-5- التشوهات الناجمة في الخرسانة تحت تأثير الأحمال المطبقة:

يخضع أي عنصر خرساني إلى تشوهات عند خضوعه إلى التحميل. وبما أن الخرسانة تُعدُّ مادة ذات خواص مرنة - لزجة - لدنة فإنها تسلك تحت تأثير الحملات بشكل متغير تبعاً لطبيعة الحمولة وشدتها ومدة تطبيقها من ناحية، ولمقاومة الخرسانة المدروسة وتركيبها وعمرها. فلو أخذنا عينة من الخرسانة وعرضناها إلى التحميل بشكل تدريجي ورسمنا المنحني التجريبي (σ_c, ε_c) الذي يربط بين التشوه النوعي ε_c للخرسانة والإجهاد المطبق σ_c ، فإننا نحصل على منحني يتعلق شكله بعوامل متعددة نذكر أهمها: سرعة التحميل والخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة، الشكل (9-14) والشكل (9-15).



الشكل (9-14) منحنى الإجهاد- التشوه في الخرسانة تجريبيا وتحديد معامل المرونة.

يلاحظ بوضوح أن العلاقة التي تربط بين الإجهادات المطبقة على الخرسانة والتشوه النوعي الناتج عنها لا تخضع إلى قانون Hooke إلا في المرحلة البدائية من التحميل، حيث يمكن اعتبار مادة الخرسانة مرنة وخاضعة بدقة مقبولة إلى قانون Hooke الخطي $(\sigma_c = E_{co} \epsilon_e)$.

لو تم تطبيق التحميل على العينة بشكل مستمر طويل الأمد فإننا نلاحظ إضافة إلى التشوهات التي تتولد في العينة، تظهر تشوهات من طبيعة لزجة - لدنة ناجمة عن التطبيق الطويل الأمد للحمولات على الخرسانة. لوحظ تجريبيا أن هذه التشوهات قد تصل إلى عدة أضعاف لقيم التشوهات المرنة.

عندما تخضع الخرسانة إلى حمولات ستاتيكية قصيرة الأمد تكون قيم التشوهات اللزجة المتولدة في الخرسانة صغيرة نسبياً، لذلك من أجل مجال معين من التحميل يمكننا اعتبار التشوهات النوعية الكلية للخرسانة ϵ_p مساوياً لمجموع التشوهات المرنة ϵ_e والتشوهات اللدنة ϵ_p ، أي:

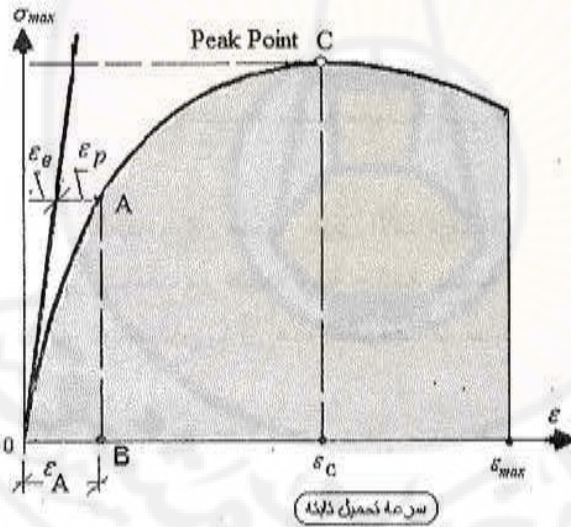
$$\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p$$

يجدر التنويه إلى كون الخرسانة مادة ذات طبيعة انكسار هش حيث تكسر الخرسانة عند تشوهات نوعية حدية صغيرة جداً. وعند انكسار الخرسانة على الضغط تصل قيم التشوه النوعي

الخرسانة إلى $(10^{-3}) mm/m$. أما عندما تنكسر الخرسانة على الشد فيكون تشوهها النوعي نحو $\epsilon_t = (0.1 \rightarrow 0.15) mm/m$.

لو حاولنا قراءة المنحني (σ_c, ϵ_c) للضغط المحوري للتحميل المستمر القصير الأمد (تحميل يدوم بضع ساعات فقط) لنموذج من الخرسانة نلاحظ ما يلي: إن المنحني الذي يربط بين الإجهادات والتشوهات ليس خطياً منذ المراحل الأولى للتحميل. لو رسمنا المماس لهذا المنحني نلاحظ أن هذا المماس يمثل العلاقة الخطية التي تربط الإجهادات بالتشوهات (تانون Hooke). لو قورن هذا الخط المستقيم بالمنحني الفعلي لوجد أنه من أجل إجهاد معين مطبق على الخرسانة تتشوه هذه الخرسانة تشوه كلي ϵ_c يمكن تقسيمه إلى جزء مرن ϵ_e وجزء لدن - لزج ϵ_p . لو أزلنا الحمولة عن العينة، نلاحظ أن التشوهات المرنة تزول بزوال التحميل، وبعد فترة من رفع الحمولة يزول جزء من التشوهات اللزجة، أما الجزء المتبقي من التشوهات فينسميه التشوهات اللدنة غير القابلة للرجوع. راجع الشكل (9-22).

من ناحية أخرى، نلاحظ أن المنحني الذي يربط التشوهات بالإجهادات يتأثر بجملة من العوامل نذكر منها:



الشكل (9-15) التشوهات المرنة، اللزجة واللدنة في الخرسانة.

1- مقاومة الخرسانة Concrete Strength:

إن المنحني (σ_c, ϵ_c) ليس ثابتاً من أجل جميع أنواع الخرسانة، بل يتأثر بمقاومة الخرسانة على الضغط حيث يتخذ الجزء الهابط من المنحني (σ_c, ϵ_c) شكلاً حاداً من أجل المقامات

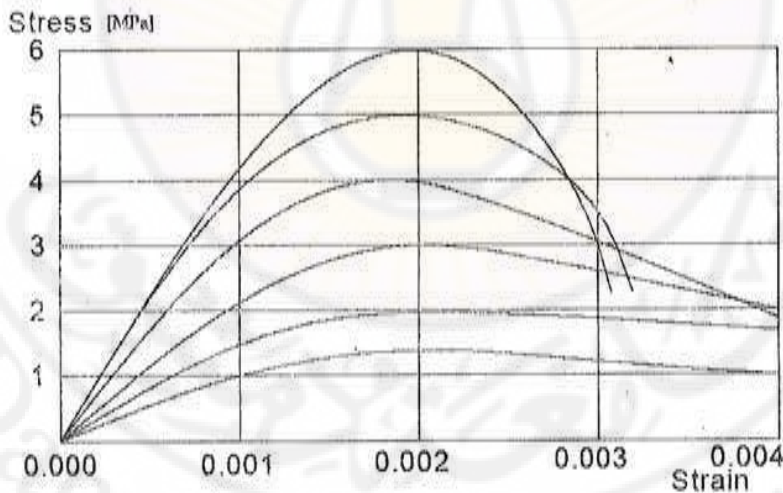
العالية (يكون انكسار المقاومات العالية للخرسانة فجائياً). بينما يتخذ هذا الجزء شكلاً انسيابياً وغير حاد من أجل المقاومات المنخفضة (يكون انكسار الخرسانة في هذه الحالة هادئاً) ، الشكل (9-16).

2- سرعة التحميل:

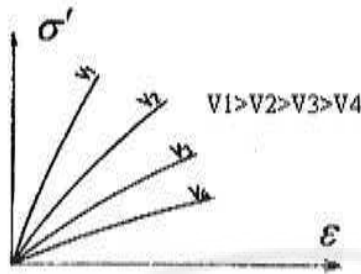
يتعلق شكل المنحني ($\sigma - \epsilon$) بسرعة تحميل الخرسانة على الضغط، حيث تزداد قيم التشوهات اللدنة للخرسانة كلما كانت سرعة التحميل أكثر بطئاً. بنجم ذلك بسبب ظاهرة الزحف التي تحصل في الخرسانة بعد تعريضه للحمولات، انظر الشكل (9-17).

3- تغير تشوهات الخرسانة مع مرور الزمن:

إذا عرض نموذج من الخرسانة إلى إجهاد ضغط σ_1 ، انظر الشكل (9-18)، وكان هذا الإجهاد صغيراً نسبياً فإننا نلاحظ أن المنحني (σ_c, ϵ_c) يقترب من الخط المستقيم، وتعمل الخرسانة في هذه المرحلة كمادة مرنة تخضع لقانون *Hooke* ($\sigma = E \epsilon$). يكون التشوه الحاصل مرناً تقريباً ويساوي ϵ_c . لو تركنا العينة خاضعة للإجهاد الثابت σ_1 فترة من الزمن Δt لوجدنا أنه مع ثبات قيمة الإجهاد يتابع التشوه على التزايد حتى يصل إلى تشوه قيمته ϵ_1 . إذا رفعنا الإجهاد إلى قيم أخرى $\sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_n$ ، وفي كل مرحلة نثبت الإجهاد لفترة من الزمن، فنجد أن التشوه يصل إلى القيم $\epsilon_2, \epsilon_3 \dots \epsilon_n$.



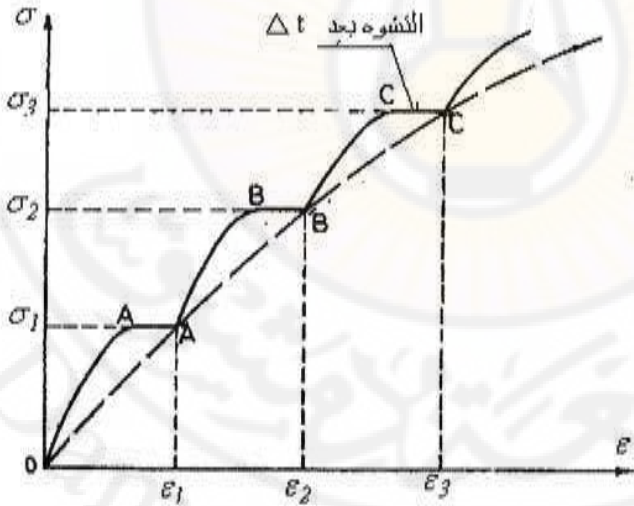
الشكل (9-16) شكل المنحني ($\sigma - \epsilon$) في الخرسانة مع تغير المقاومة على الضغط.



الشكل (17-9) تأثير سرعة التحميل على المنحني ($\sigma - \epsilon$) في الخرسانة.

وبوصل النقاط A' , B' , C' نحصل على منحني التشوه. ويمكن الحصول على هذا المنحني نفسه إذا كانت فترة التحميل الكلي مستمرة دون توقف.

إن التشوه الذي يحصل مع ثبات الإجهادات في المراحل كافةً يعود إلى حادثة الزحف. لقد ثبت تجريبياً أن هناك حداً نهائياً للزحف حيث يتوقف عند التشوه مهما زادت فترة التحميل، ويكون هذا الحد ثابتاً من أجل أي إجهاد، ولا يتعلق بسرعة التحميل أو بمدته من أجل قوى تحميل مختلفة تتراوح من حمولة أنية تكون فيها الخرسانة مادة مرنة (مجموع التشوهات اللدنة تساوي الصفر) إلى التحميل على فترة زمنية طويلة جداً أو سرعة بطيئة جداً.



الشكل (18-9) تأثير الزمن في تشوهات الخرسانة.

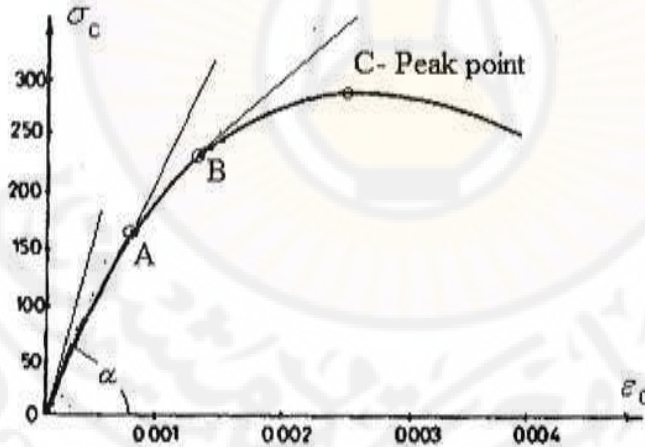
هناك أيضاً عوامل أخرى تؤثر في تشوه الخرسانة منها شكل العينة المجربة (أو شكل العنصر المدروس) ونوعية الخرسانة ورطوبة الوسط المحيط وعمر الخرسانة أثناء التحميل. سنبحث هذه العوامل في أبحاث أخرى.

9-6- معامل تشوه الخرسانة (معامل المرونة *Elastic Modulus*) :

يبدو واضحاً مما سبق أنه يصعب تحديد معامل مرونة للخرسانة لأن الخرسانة مادة غير مرنة لا تتناسب فيها التشوهات مع الإجهادات تناسباً خطياً حيث تتغير تشوهات الخرسانة مع الزمن بسبب حادثة الزحف. لذلك نعرّف عادةً عدة عوامل لتشوه الخرسانة لكل منها استعماله الخاص ونذكر منها ما يلي :

1- معامل التشوه المرن (معامل المرونة المماسي *Tangent Elastic Modulus*) :

يُعرّف معامل التشوه المرن للخرسانة أنه يساوي ميل المماس للمنحنى $\sigma_c - \epsilon_c$ عند نقطة البدء. وتصبح علاقة *Hooke* على الشكل التالي، الشكل (9-19) و (9-20):
تعرف القيمة $E_{CO} = \tan \alpha$ بأنها معامل يون *Young Modulus* أو معامل المرونة المماسي. تكون هذه العلاقة صحيحة في المجال (*OA*) فقط أي عندما تكون قيمة الحمولة المؤثرة في الخرسانة صغيرة.



الشكل (9-19) تحديد معامل مرونة الخرسانة.

إذا تجاوزت الحمولة المطبقة حداً معيناً تظهر في الخرسانة تغيرات كبيرة في تشوهات الخرسانة حيث تصبح علاقة *Hooke* غير صحيحة. يجدر بالذكر أن نظرية المرونة المطبقة

على المنشآت الخرسانية المسلحة تعتمد أساساً على أن الإجهادات الفعلية تحت تأثير حمولات الاستمرار تقع في المجال المرن (OA)، حيث قيمة هذه الإجهادات لا تزيد على (30-40%) من مقاومة الخرسانة، ومن ثم يُمكننا الاعتماد على العلاقة المرنة للإجهادات والتشوهات دون ارتكاب خطأ كبير.

2- معامل تشوه الخرسانة النظري:

يُمثل معامل تشوه الخرسانة النظري بشكل عام في نقطة ما من المنحني (ϵ, σ) نسبة

$$E_c = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ أي: } E_c = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

3 - معامل تشوه الخرسانة العملي:

يُعرّف معامل تشوه الخرسانة العملي بأنه ظل الزاوية للخط المستقيم الواصل بين النقطة ذات الإجهاد الفعلي σ_c ونقطة الأصل كما هو مبين في الشكل (9-20). نكتب ذلك على الشكل التالي:

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \tan \theta$$

$$\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p$$

$$E_{co} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_e} \rightarrow \sigma_c = E_{co} \epsilon_e$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_e + \epsilon_p} \rightarrow \sigma_c = (\epsilon_e + \epsilon_p) E_c$$

$$\epsilon_c = \frac{E_{co} \epsilon_e}{\epsilon_e + \epsilon_p}$$

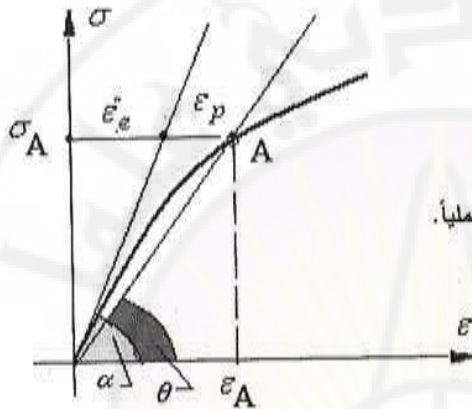
$$E_c = E_{co} \frac{\epsilon_e}{\epsilon_e + \epsilon_p}$$

حيث:

ϵ_p - التشوه اللدن (تشوه الزحف).

إذا افترضنا أن النسبة بين التشوه اللدن والتشوه المرن مساوية ϕ ، حيث $\phi = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_e}$ وتصبح العلاقة على الشكل التالي:

$$E_c = E_{co} \frac{l}{1 + \frac{\epsilon_p}{\epsilon_e}} = E_{co} \frac{l}{1 + \phi}$$



الشكل (9-20) تحديد معامل مرونة الخرسانة عملياً.

تحديد معامل التشوه الطولي للخرسانة وفق الكود العربي السوري :
- في حالة الأحمال اللحظية أو المتغيرة تغيراً سريعاً وعندما تكون إجهادات التشغيل أقل من 40% من مقاومة الكسر f'_{cj} يُؤخذ معامل التشوه الطولي اللحظي من العلاقة التالية:

$$E_{co} = 21000 \sqrt{f'_{cj}}$$

حيث: E_{co} - معامل التشوه الطولي اللحظي للخرسانة ويقدر بالكغ/سم².

f'_{cj} - مقاومة الخرسانة المتوسطة على الضغط في تاريخ تقويم معامل التشوه بالكغ / سم² (لخرسانة عمرها / يوم).

- في حالة الأحمال ذات الأجل الطويل وعدم وجود تسليح للضغط في المقاطع المعرضة لعزوم الانعطاف يجوز أخذها من العلاقة:

$$E_c = 7000 \sqrt{f'_{cj}}$$

لو كان معامل المرونة للفولاذ مساوياً E_s فإن معامل التكافؤ يصبح مساوياً:

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

- من أجل تحديد الأبعاد وحساب الإجهادات بطريقة المرنة، ومن أجل تبسيط الحسابات العادية، تُعدُّ النسبة المعيارية n ثابتة ومساوية 15، أي إن:

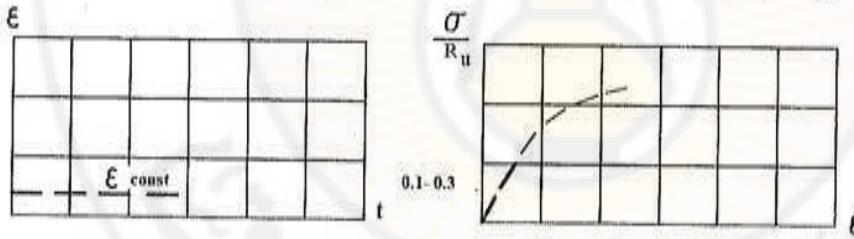
$$n = \frac{E_s}{E_c} = 15$$

- عند تحديد القيم غير المحددة ستاتيكيًا وكذلك عند تصميم الوحدات الإنشائية التي لا يُسمح فيها بوجود شروخ (تشققات) ناتجة من الشد تعد النسبة المعيارية n مساوية 10،

9-7- التشوهات طويلة الأمد في الخرسانة (الزحف أو الزحف):

عندما تتعرض الخرسانة إلى حمولات خارجية تظهر فيها تشوهات يمكن تصنيفها كما يلي:
تشوهات مرنة:

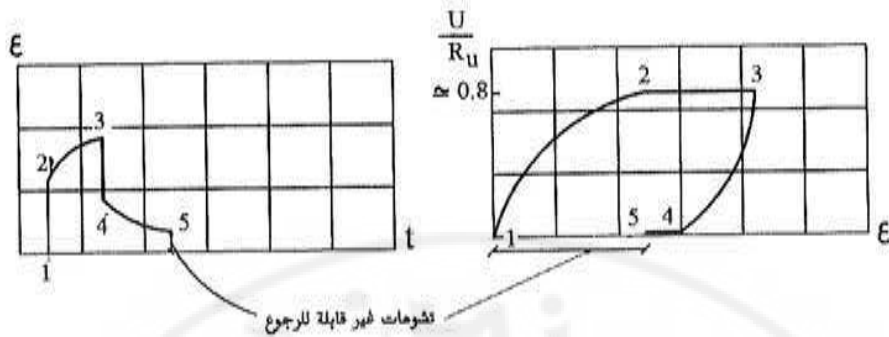
يكون معدل الإجهاد $0.1 \rightarrow 0.3 R_{pp}$ تقريباً، حيث R_{pp} مقاومة الكسر، في هذه الحالة يمكن تجاوزاً اعتبار العلاقة بين $(\sigma - \epsilon)$ خطية، حيث تكون هذه التشوهات مستقلة عن عامل الزمن، وقابلة للزوال فيما لو رفعت الإجهادات المطبقة على المقطع. الشكل (9-21).



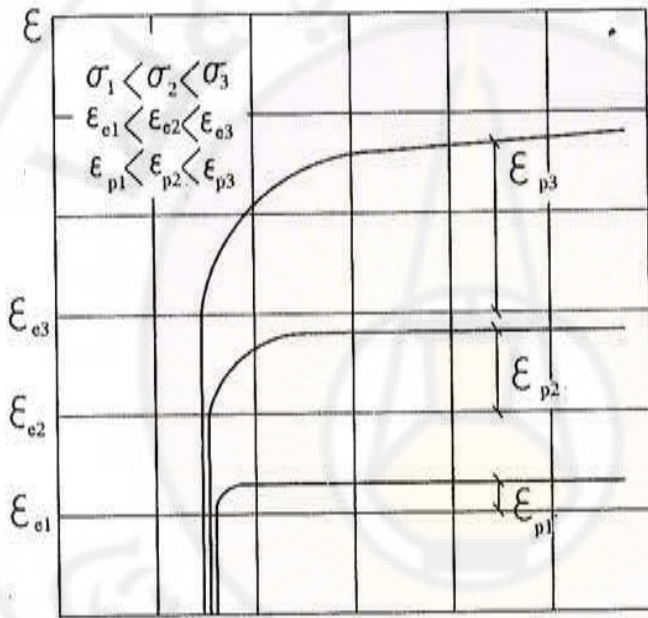
الشكل (9-21) التشوهات المرنة.

تشوهات لزجة:

تظهر هذه التشوهات عندما يكون معدل الإجهاد $0.3 \rightarrow 0.6 R_{pp}$ تقريباً، وتكون علاقة المنحني بين (σ, ϵ) غير خطية، وهذه التشوهات تزداد مع الزمن مع أن الإجهادات ثابتة كما أن هذه التشوهات قابلة للرجوع جزئياً عند رفع الإجهادات عنها، الشكل (9-22).



الشكل (9-22) التشوهات اللزجة



الشكل (9-23) تغير التشوهات اللدنة مع عمر الخرسانة.

تشوهات لدنة:

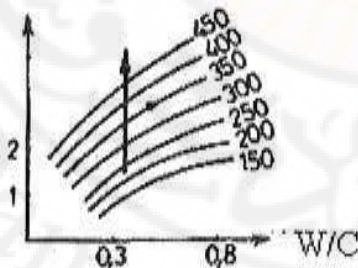
تظهر التشوهات عندما يكون معدل الإجهاد أكبر من $0.85R_{pr} \rightarrow 0.8$ تتطور هذه التشوهات بشكل كبير مع الزمن وتستمر في الزيادة حتى انهيار للرجوع إذا رفعنا الحمولة عن العنصر الخرساني قبل انهياره. تنجم هذه التشوهات عن الانزياحات النسبية بين بلورات المونة الإسمنتية والحصويات، كما تظهر تشققات شعرية أثناء فترة التحميل، تتطور هذه التشققات وتتشابك ثم يتم الانهيار، الشكل (9-23).

من أهم العوامل المؤثرة في زحف الخرسانة ما يلي:

- يؤدي ازدياد عيار الإسمنت C إلى ازدياد تشوه الزحف، الشكل (9-24).
- يزداد تشوه الزحف في الخرسانة بازدياد نسبة الماء إلى الإسمنت.
- رطوبة الجو المحيط: إن زيادة رطوبة الجو المحيط تؤدي إلى تقليل تشوه الزحف، وهذا ما يدعو لجعل الوسط المحيط رطباً بعد الصب مباشرة، الشكل (9-25).
- رص الخرسانة: كلما كانت عمليات الرص للخرسانة فعالةً وجيدة كان تشوه الخرسانة أقل كما تصبح الانضغاطية *Compressibility* مع الزمن أقل .
- يقوّل تشوه زحف الخرسانة كلما كانت نوعية الإسمنت المستخدم أفضل.
- التدرج الحبيبي: يكون تشوه زحف الخرسانة أقل كلما كان التدرج الحبيبي للحصويات أمثل.
- تؤثر أيضاً نوعية الحصويات في تشوه زحف الخرسانة، فإذا كانت الحصويات ثقيلة كان تشوه الزحف أقل. أما إذا كانت خفيفة الوزن فإن تشوه الزحف يزداد.
- سماكة المقطع : يزداد تشوه زحف الخرسانة كلما قلت سماكة العنصر الخرساني.
- يؤثر عمر الخرسانة عند التحميل في قيم تشوه زحف الخرسانة. فإذا عرضنا الخرسانة إلى الحمولات في وقت مبكر فإن الزحف سيكون كبيراً، وكلما تأخرنا في تحميل العناصر قلت تشوهات الزحف في الخرسانة، الشكل (9-26).
- مقدار إجهادات التحميل بالنسبة للمقاومة: كلما كان الإجهاد المطبق صغيراً فإن الزحف الناتج يكون صغيراً أيضاً، أما إذا كان الإجهاد المطبق كبيراً فإنه ينجم عنه تشوهات زحف أكبر.

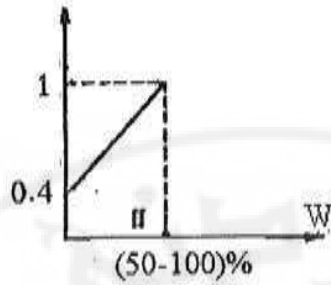
نسبة ϵ_c النهائية إلى ϵ_c

عند رطوبة 50 %

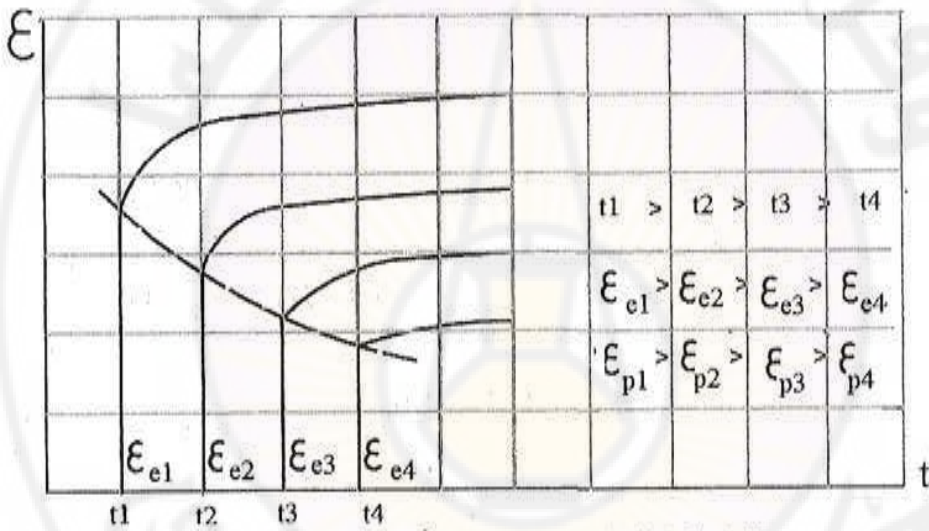


الشكل (9-24) تأثير عيار الإسمنت على الزحف في الخرسانة.

التشوه النهائي اللدن عند رطوبة معينة
إلى التشوه اللدن عند رطوبة 50 %



الشكل (9-25) تأثير رطوبة المحيط على الزحف.



الشكل (9-26) تناسب التشوهات المرنة و اللدنة عكسا مع زيادة عمر الخرسانة.

تقدير تشوهات زحف الخرسانة وفق الكود العربي السوري :

يقدر تشوه الزحف في الخرسانة ϵ_{cr} في الأحوال العادية (الرطوبة 70% - كمية الإسمنت

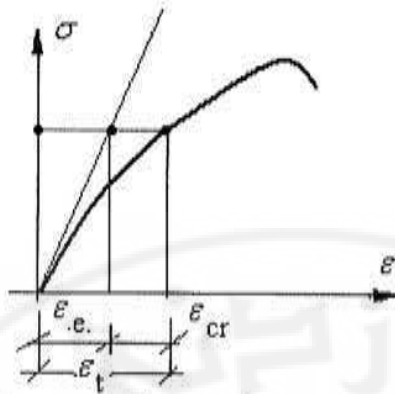
350 كغ/م³ خرسانة وعمر الخرسانة 28 يوما) كما يلي:

أ - في الأعضاء المحملة محورياً الخاضعة لإجهاد ضغط مرن مقداره σ_c وتشوه مرن مناظر

ϵ_{ce} ، الشكل (9-27).

بعد التشوه نتيجة الزحف مساوياً :

$$\epsilon_{cr} = \phi \epsilon_e$$



الشكل (9-27) التشوه الكلي في الخرسانة (عناصر محملة محورياً).

ويكون التشوه الكلي مساوياً $\epsilon_f = \epsilon_e(1 + \phi)$ ، حيث:

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_e} \quad \phi - \text{نسبة الزحف إلى التشوه المرن (معامل الزحف)، و يساوي:}$$

$$\phi = \phi_1 K_1 K_2 K_3 \quad \text{يحسب } \phi \text{ وفق العلاقة التالية:}$$

تمثل ϕ_1 التشوه اللدن النهائي إلى التشوه اللدن في وسط ما عندما تكون باقي العوامل مساوية إلى الواحد، وتعطى قيم ϕ_1 كما في الجدول (9-2-أ).

الجدول (9-2-أ).

الوسط المحيط	داخل الماء	وسط رطب جدا	وسط متوسط الرطوبة	وسط جاف
قيم ϕ_1	0.5 - 1.0	1 - 2	2 - 3	3 - 4

K_1 - معامل قساوة أو صلابة الخرسانة وهو يتعلق بعمر الخرسانة عند تعرضه للحمولة، وتأخذ K_1 القيم المبينة في الجدول (9-2-ب).

الجدول (9-2-ب).

قيم العامل K_1	1.5	1	0.8	0.6
عمر الخرسانة عند تعرضه للحمولة	7	28	90	0.000

يتعلق المعامل K_2 بكمية الإسمنت المستعمل (عيار الإسمنت)، ويؤخذ مساوياً للواحد عندما يكون عيار الإسمنت مساوياً 350 كغ إسمنت / للمتر المكعب. ينقص أو يزداد المعامل K_2 بمقدار 5% من أجل كل زيادة أو نقص مقداره 50 كغ/ للمتر المكعب في عيار الإسمنت، انظر الجدول (9-2-ج).

الجدول (9-2-ج).

500	450	400	350	300	250	200	عيار الإسمنت كغ/م ³ خرسانة
1.15	1.10	1.05	1.00	0.95	0.90	0.85	K_2 قيمة العامل

K_3 - معامل يتعلق بنوعية الحصىات وبساوي الواحد للحصىات العادية، ويكبر هذا الرقم إذا كانت الحصىات خفيفة فيصل إلى القيمة 2.

من أجل العناصر الخرسانية المصبوبة في الأحوال العادية (الرطوبة النسبية 70% كمية الإسمنت 350 كغ/م³ خرسانة) يعطي الكود العربي قيماً للتابع ϕ تبعاً لعمر الخرسانة المصبوبة، كما في الجدول (9-2-د):

الجدول (9-2-د).

1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100	56	28	10	عمر الخرسانة باليوم
2.50	2.21	2.16	2.10	2.02	1.95	1.84	1.75	1.54	1.25	56	0.70	0.25	ϕ

حساب الزحف في المنشآت الخرسانية المسلحة وفقاً لـ *CEB-FIP* :

تعطي اللجنة الأوروبية - الدولية للخرسانة صيغة تجريبية لحساب تشوهات الزحف في الخرسانة

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e + \varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_e} (1 + \phi)$$

على الشكل التالي:

حيث :

ϵ_c - التشوهات النوعية للخرسانة الكلية $\frac{\Delta l}{l}$ وتساوي التشوهات المرنة اللحظية للخرسانة

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_c}{E_{co}} \quad \text{مضافاً إليها التشوهات الناجمة عن الزحف} \quad \epsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{E_{co}} \phi$$

σ_c - الإجهادات المتوسطة الفعلية المطبقة على الخرسانة.

E_{co} - معامل مرونة الخرسانة اللحظي بعد 28 يوماً.

ϕ - معامل الزحف و يتعلق بجملة من العوامل وبحسب وفق العلاقة التجريبية التالية:

$$\phi = k_b k_a k_c k_e k_i$$

حيث إن:

k_c - معامل يتعلق بالشروط المناخية للوسط المحيط (الرطوبة).

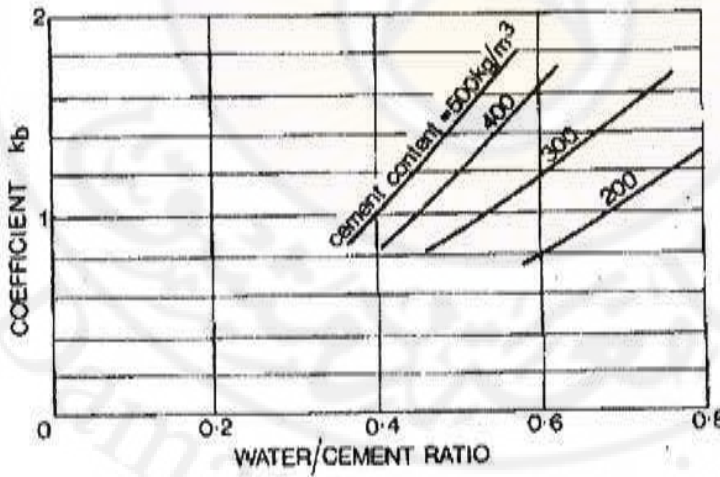
k_a - معامل يتعلق بعمر الخرسانة عند تحميل الخرسانة.

k_e - معامل يتعلق بعبارة الإسمنت C للمتر المكعب خرسانة وبالنسبة بين الماء للإسمنت تماماً كما في الانكماش.

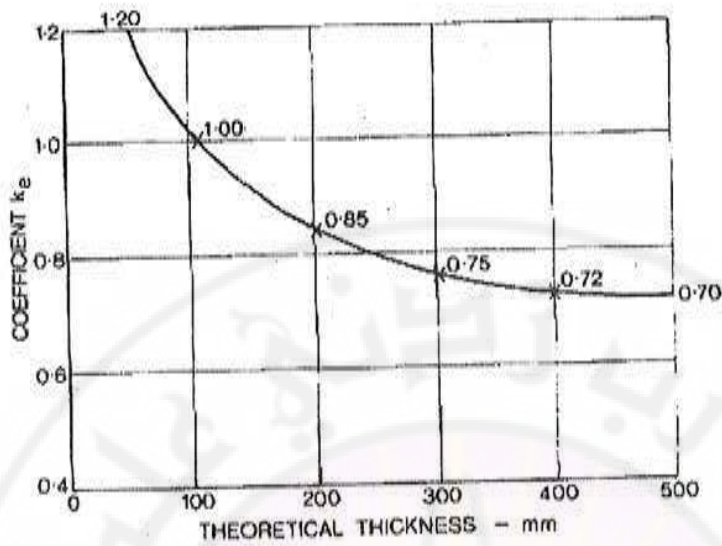
k_e - معامل يتعلق بالأبعاد الهندسية للعنصر الخرساني المسلح تماماً كما في الانكماش.

k_i - معامل يأخذ بعين الاعتبار ازدياد زحف الخرسانة مع الزمن (تماماً كما في الانكماش).

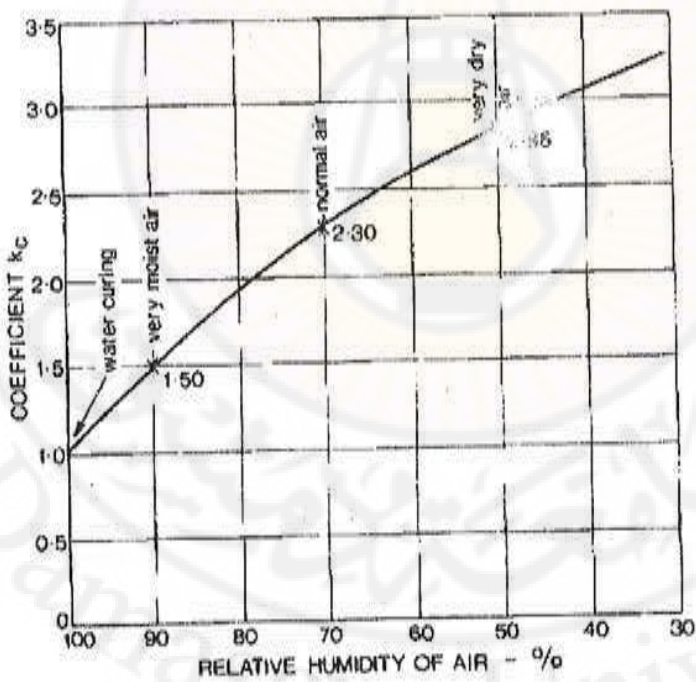
تحدد العوامل k_i وفق الشكل (9-28).



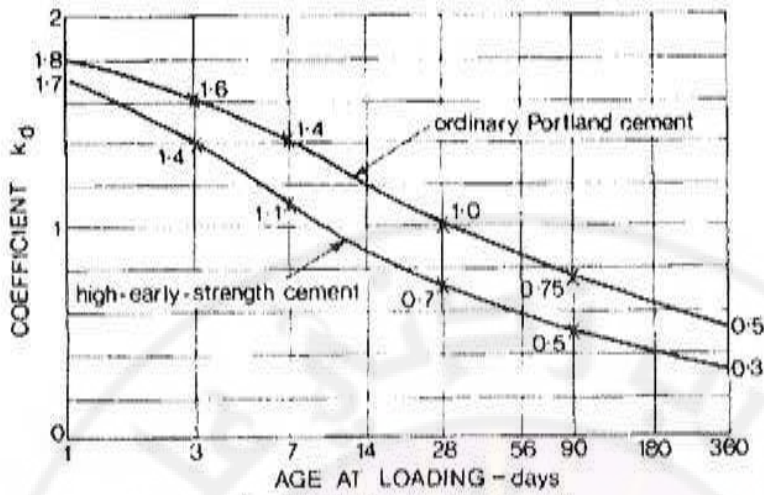
الشكل (9-28) تحديد المعامل k_b .



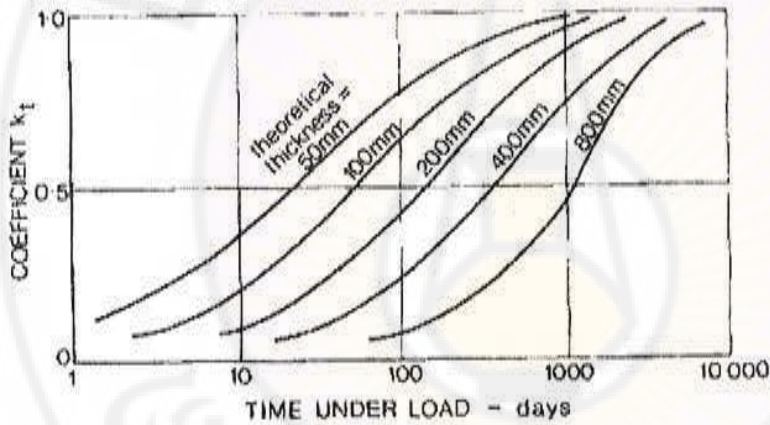
الشكل (9-28 - ب) تحديد المعامل k_e .



الشكل (9-28 - ج) تحديد المعامل k_c .



الشكل (9-28) تحديد المعامل k_d



الشكل (9-28) تحديد المعامل k_t

مثال توضيحي (4):

معامل تأثير الرطوبة النسبية للوسط المحيط: $k_c = 2.0$

معامل تأثير عمر تطبيق الحمولة 28 يوما (الإسمنت عادي): $k_a = 1.0$

معامل تأثير عيار الإسمنت: $k_b = 1.0$, $\frac{W}{C} = 0.48$, $C = 350 \text{ kg/m}^3$

معامل تأثير السماكة الافتراضية للعنصر: $K_e = 1.00$, $d_m = 10 \text{ cm}$

معامل تأثير عمر الخرسانة أكثر من ثلاث سنوات (الزحف مستهلك كلياً تقريباً): $k_t = 1.0$.
وينتج أن:

$$\phi = k_c k_a k_h k_d k_t = 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 2$$

إذا كانت المقاطع الخرسانية ثنائية التسليح، بحسب تأثير تشوهات الزحف كما يلي:
بسبب الزحف نتيجة للأحمال الدائمة على العناصر الخرسانية المسلحة سهماً إضافياً يزداد مع الزمن وتتوقف قيمته القصوى على نسبة تسليح الضغط في المقطع. يمكن حساب هذا السهم الإضافي بضرب قيمة السهم اللحظي نتيجة للأحمال الدائمة والمحسوبة في المعامل α الذي يؤخذ مساوياً إلى 2 في المقاطع التي لا تحوي على تسليح ضغط وفق ما هو مبين سابقاً. أما في الحالات الأخرى فتؤخذ قيمة α من العلاقة التالية، راجع الفصل الثامن:

$$\alpha = [2 - 1.2 \frac{A'_s}{A_s}] \quad \text{، وبحيث يكون: } \alpha \leq 0.8$$

في الحالات غير الاعتيادية (الجو الحار أو الجاف جداً، أو عند تحميل الخرسانة بعد ثلاثة أشهر من صب الخرسانة). يمكن حساب التشوهات الناتجة من الزحف انطلاقاً من تشوهات الانكماش آخذين بعين الاعتبار جميع العوامل التي تؤثر في زحف الخرسانة.

✓ تأثير الزحف في العناصر الخرسانية المسلحة:

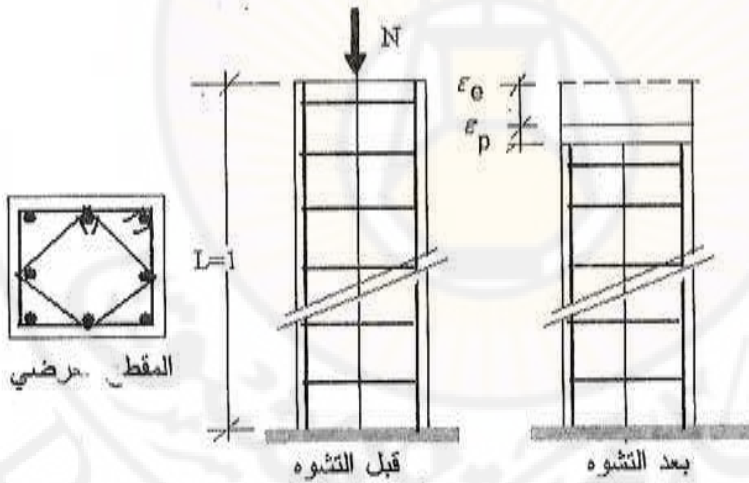
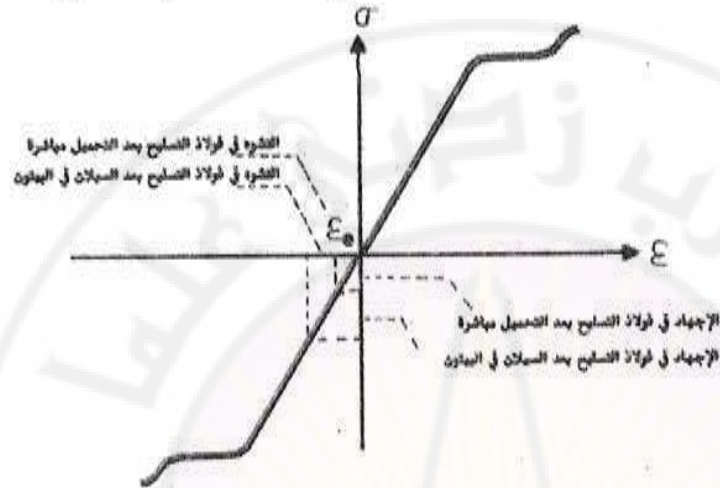
لقد تبين من التجربة أن تشوهات الزحف في الخرسانة العادية تكون أكبر منها في العناصر الخرسانية المسلحة ونقل تشوهات الزحف في الخرسانة المسلحة كلما زادت نسبة التسليح حيث يقوم التسليح بإعاقه هذه التشوهات .

تحدث تشوهات الزحف في العناصر الخرسانية المسلحة مع الزمن بحيث تعمل على إعادة توزيع الإجهادات في المقطع ما بين الخرسانة وقضبان التسليح، حيث يبدأ التسليح مع الزمن بأخذ جزء من حمولة الخرسانة المخصصة له لحظة التحميل .

في لحظة تحميل العنصر يحدث في العنصر تشوه أني متساوٍ للخرسانة والتسليح بأن واحد، وفي الوقت نفسه يتم توزيع القوة المطبقة على مقطع العنصر على التسليح والخرسانة من شرط تساوي التشوهات. بعد تحميل العنصر الخرساني تبدأ الخرسانة مع الزمن بالتشوه، وتسبب حادثة الزحف تشوهات إضافية تؤدي إلى تشوه الفولاذ بشكل إضافي حيث ينجم عن ذلك زيادة الإجهاد في التسليح وانخفاض الإجهادات في الخرسانة، أي إن الخرسانة تحصل لها حالة تعب إجهادي، وتأخذ حالة التعب الإجهادية هذه حديد التسليح إلى مرحلة يبدأ فيها السيلان (الخضوع)

Yielding، كونه لا يستطيع تحمل تعب الخرسانة، ولذلك ينهار العنصر نتيجة الزحف الزمني طالما الحمولة المطبقة ثابتة القيمة، أي إن:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_c}{E_{co}} = \frac{\sigma_s}{E_s} \Rightarrow \sigma_s = \frac{E_s}{E_{co}} \sigma_c = n \sigma_c$$



الشكل (9-29) تأثير زحف الخرسانة في العمود المدروس.

لتوضيح هذه الظاهرة سندرس حالة بسيطة لعمود خرساني مسلح يتعرض للضغط بقوة ناظمية N ، وتحت تأثير هذه القوة يتشوه المقطع بمقدار ε_e ، وبسبب التماسك يكون تشوه الخرسانة والتسليح متساوياً، الشكل (9-29).

نتوزع القوة النازمية على الخرسانة والتسليح على الشكل التالي:

$$N = N_c + N'_s$$

$$= B_c \sigma_c + A_s \sigma_s = B_c \sigma_c + \varepsilon_e E_s A_s$$

لكن من فرض تساوي التشوهات بين التسليح والخرسانة نكتب:

وتصبح علاقة التوازن على الشكل التالي (باعتبار أن: $\sigma_c = E_{co} \varepsilon_e$):

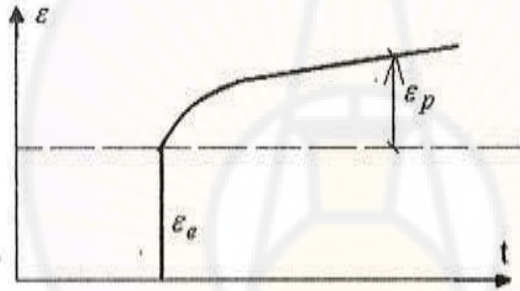
$$N = \sigma_c (B_c + n A_s) \rightarrow \sigma_c = \frac{N}{B_c + n A_s}$$

$$\varepsilon_e E_{co} = \sigma_c = \frac{N}{B_c + n A_s}$$

الإجهاد في الخرسانة:

الإجهاد في التسليح:

$$\varepsilon_e E_s = \sigma_s = \frac{n N}{B_c + n A_s}$$



الشكل (9-30) التشوهات اللدنة نتيجة الزحف بعد التحميل.

بعد تحميل الخرسانة، الشكل (9-30)، تبدأ الخرسانة بالزحف تحت تأثير الحملات المطبقة لمدة طويلة الأمد (الثابتة)، وبسبب التماسك بين الخرسانة والتسليح فإن التسليح سينتسوه أكثر من التشوه الأني ε_e ، ويصبح تشوّهه ε_p أكبر من ε_e . نتيجة لذلك سيزيد الإجهاد في التسليح، وبحسب الإجهاد الجديد من علاقة Hooke: $\sigma_{sp} = \varepsilon_p E_s$ ، ومن ثم ستزداد قيمة القوة النازمية التي يأخذها التسليح فتصبح مساوية $N = A_s \sigma_{sp}$ ، وبما أن القوة المطبقة على العمود ثابتة فإن القوة التي تأخذها الخرسانة بعد الزحف ستقل، وتُحسب من العلاقة التالية:

$$N_c = N - N_s$$

وسيفقد الإجهاد الضاغط على الخرسانة بسبب الزحف و يصبح مساوياً:

$$\sigma_c = \frac{N - N_s}{B_c}$$

وتحسب الزيادة في الإجهاد في فولاذ التسليح من العلاقة:

$$\Delta\sigma = \Delta\varepsilon_s \cdot E_s$$

وتحسب الزيادة في القوة التي يحصل عليها فولاذ التسليح هو:

$$\Delta N_s = A_s \cdot \Delta\sigma_s$$

وبما أن القوة الخارجية المطبقة على العمود ثابتة، وإن القوة المطبقة على فولاذ التسليح تزداد

بمقدار ΔN_s فهذا يعني أن القوة التي تأخذها الخرسانة قد تتخفف بمقدار $\Delta N_s = \Delta N_c$ (حيث إن القوة الخارجية المطبقة ثابتة).

و تكون القوة الجديدة في كل من فولاذ التسليح و الخرسانة كما يلي:

$$N_{SP} = N_s + \Delta N_s$$

$$N_{CP} = N_c + \Delta N_c$$

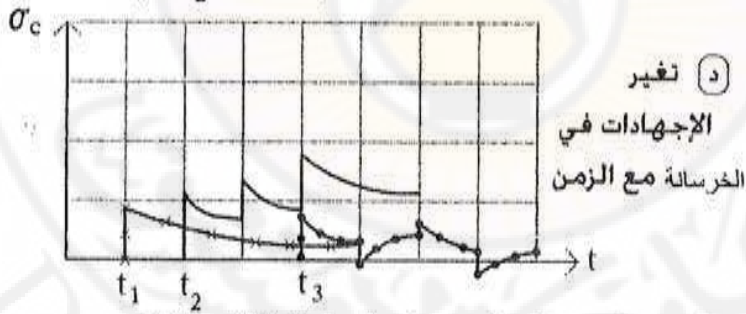
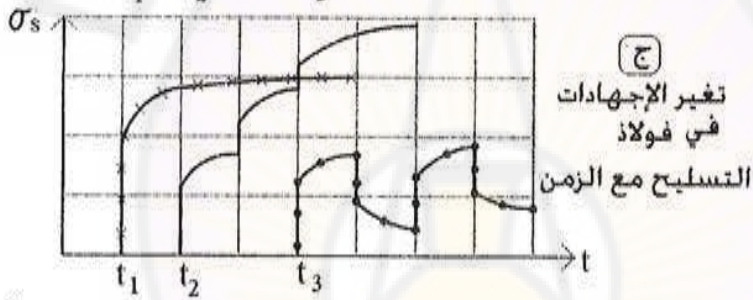
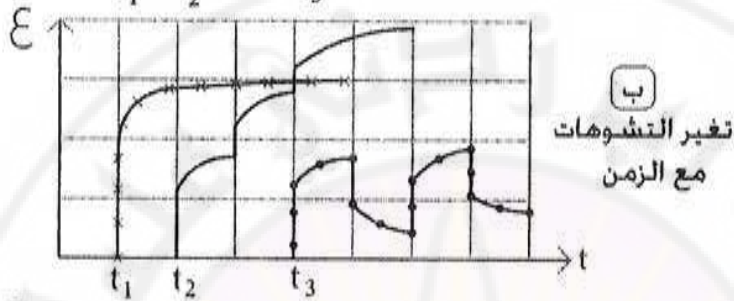
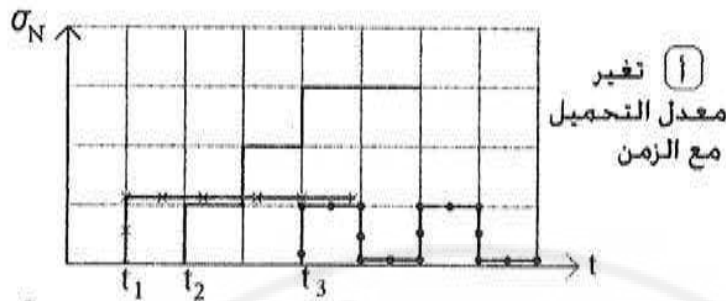
و تكون الإجهادات الجديدة في كل من فولاذ التسليح والخرسانة كما يلي:

$$\sigma_{SP} = \frac{N_{SP}}{A_s}, \quad \sigma_{CP} = \frac{N_{CP}}{B_c}$$

إذا للوصول إلى معرفة قيمة الإجهادات في كل من الخرسانة والفولاذ في أي مرحلة من مراحل الزحف يجب معرفة التشوهات التي تطرأ على العينة و كيفية تطورها و ذلك باتجاه تطبيق هذه الإجهادات. وتجدد الملاحظة أنه خلال الفترة التي تستمر فيها تشوهات الخرسانة التي تدوم من (3 إلى 5) سنوات تستمر عملية إعادة توزيع الإجهادات بين الخرسانة والتسليح، حيث ينقل مع الزمن الخرسانة جزءاً من حمولته ويعطيتها للتسليح.

تزداد الإجهادات في التسليح وفي الوقت نفسه نقل الإجهادات في الخرسانة مع الزمن في البداية بمعدل كبير، ثم تبدأ بالتخامد تدريجياً حتى تتخامد ظاهرة زحف الخرسانة .

إن تشوهات الزحف في العناصر الخرسانية تزداد كلما قلت نسبة التسليح في هذه العناصر. ومن ناحية أخرى تزداد الإجهادات الفعلية في قضبان التسليح بشكل قليل كلما زادت نسبة التسليح في العناصر المعرضة لظاهرة الزحف. أما الإجهاد في الخرسانة فسينقص بمعدل قليل كلما كانت نسبة التسليح في العناصر الخرسانية صغيرة.



- × × × عنصر معرض إلى حمولة ثابتة مع الزمن
 ————— عنصر معرض إلى حمولة متزايدة بشكل متدرج مع الزمن
 ● ● ● عنصر معرض إلى حمولة متغيرة بشكل موجي مع الزمن

الشكل (9-31) خصائص بعض أنظمة التحميل للعناصر الخرسانية المسلحة.

يجدر التنويه أيضاً إلى أن التسليح العرضي لا يؤثر في تشوهات الزحف في الخرسانة، وذلك بسبب كون هذه التشوهات ذات طابع خطي.

يلاحظ أيضاً أنه في العناصر الخرسانية المسلحة المضغوطة دائماً يؤثر الانكماش والزحف للخرسانة في الاتجاه نفسه، حيث تزداد الإجهادات الضاغطة في التسليح وتقل في الخرسانة.

من أجل عناصر خرسانية مضغوطة ذات إجهادات ضاغطة كبيرة نسبياً ونسب تسليح صغيرة قد يصل التسليح إلى حد الزحف، ولا بد من التنويه هنا إلى أن هذه الظاهرة لا تُعرض استقرار العنصر الخرساني المسلح إلى الخطر، وذلك لأننا لو زدنا الحمولة المطبقة على العنصر فإن الإجهادات الإضافية سيأخذها الخرسانة دون مشاركة التسليح. ورغم ذلك، وتجنباً لحدوث الزحف في فولاذ التسليح للعناصر الخرسانية ذات نسبة التسليح المتدنية (الصغيرة)، يُصح باستخدام نسب تسليح دنيا (أي لا تقل عن حد معين تمليه الكودات) في الأعمدة حتى لو كان هذا غير مطلوب حسابياً، وذلك للتخلص من تأثيرات الأفعال غير المباشرة كالانكماش والزحف.

أما من أجل العناصر الخرسانية المسلحة المنعطفة وذات التسليح الثنائي فإن المنطقة المضغوطة تتعرض إلى فعل انكماش الخرسانة نفسه وزحفها في الأعمدة المضغوطة لامركزياً أو الجوائز ثنائية التسليح، حيث يؤدي إلى زيادة إجهادات الضغط في التسليح وتقليل إجهادات الضغط في الخرسانة.

بالنسبة للعناصر الخرسانية المسلحة المشدودة مركزياً أو مناطق الشد للعناصر المنعطفة، فإن زحف الخرسانة يؤثر فيها بشكل ايجابي، حيث يؤدي زحف الخرسانة إلى تصغير إجهادات الشد فيها وتكبير إجهادات الشد في التسليح. أما الانكماش فيؤدي إلى العكس حيث يزيد إجهادات الشد في الخرسانة ويقلل من إجهادات الشد في التسليح (الانكماش والزحف هنا ذات تأثير متعاكس).

تؤثر عملية ارتخاء *Decompression* (أو تقليل) الإجهادات الشادة في الخرسانة إلى تأخير عملية تشكل الشقوق في الخرسانة أو تصغير عرضها إن تشكلت.

يبين الشكل (9-31) خصائص بعض أنظمة التحميل لعينات من الخرسانة المسلحة تتميز جميعها بما يلي:

- تتناسب قيمة التشوهات مع زيادة معدل الإجهادات.
- تزايد الإجهادات في فولاذ التسليح، وتخفض في الخرسانة في مرحلة التحميل.

- تتناقص الإجهادات في فولاذ التسليح وتترايد في الخرسانة في مرحلة تغير التشوهات المتراجعة (مرحلة إزالة الحمولة).

- في التحميل ذي الطابع الموجي تتطور الإجهادات نحو التناقص في الخرسانة في مرحلة إزالة الحمولة، وقد تظهر شقوق في الخرسانة نتيجة تطور الإجهادات الشادة عندما تصبح الخرسانة غير قادرة على تحمل إجهادات الشد فيها.

مثال توضيحي (5):

عمود من الخرسانة المسلحة مقطعه $30 \times 60 \text{ cm}^2$ وتسليحه الطولي مقطعه 18 cm^2 ، يتعرض هذا العمود إلى حمولة دائمة بعد شهرين من الصب مقدارها $N_1 = 85 \text{ tons}$ وحمولة حية مقدارها $N_2 = 25 \text{ tons}$ والمطلوب حساب الإجهادات الناتجة في الخرسانة والتسليح وذلك:

- بعد التحميل مباشرة.
- بعد تصلب الخرسانة بشكل كامل (علماً أن العمود موضوع في محيط متوسط الرطوبة)،
حيث:

$$E_s = 2100 \text{ t/cm}^2, \phi_1 = 2.1, E_{co} = 210 \text{ t/cm}^2$$

- بعد تطبيق الحمولة مباشرة:

$$E_c = E_{co}$$

$$n = \frac{E_s}{E_{co}} = \frac{2100}{210} = 10$$

- إجهاد الضغط في الخرسانة:

$$\sigma_c = \frac{N}{B_c + nA_s} = \frac{110000}{30 \times 60 + 10 \times 18} = 55.6 \text{ kg/cm}^2$$

- إجهاد الضغط في التسليح:

$$\sigma_s = n \sigma_c = 10 \times 55.6 = 556 \text{ kg/cm}^2$$

أما بعد تصلب الخرسانة بشكل كامل فإن معامل التشوه الطولي للخرسانة يصبح مساوياً:

$$E_c = \frac{E_{co}}{1 + \phi} = \frac{E_{co}}{1 + 2.1} = \frac{E_{co}}{3.1}$$

ويُصبح مُعامل التكافؤ n مساوياً: $31 = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2100}{67.74} \Rightarrow n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2100}{67.74} = 31$ ، وبما

أن الحملات الحية تُطبّق لفترات قصيرة فإننا نعد مُعامل التكافؤ لها $n=10$ ، وتصبحُ الإجهادات في العمود بعد التصلب على الشكل التالي:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \frac{N_1}{B_c + nA_s} + \frac{N_2}{B_c + nA_s} = \\ &= \frac{85000}{1800 + 30 \times 18} + \frac{25000}{1800 + 10 \times 18} = 36.32 + 12.63 \\ &= 48.95 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$$\sigma_s = 30\sigma_{c1} + 10\sigma_{c2} = 30 \times 36 + 10 \times 12.63 = 1242.3 \text{ kg/cm}^2$$

يلاحظ أن الإجهادات الضاغطة في الخرسانة قد انخفضت بنسبة

$12\% = \left(\frac{55.6 - 48.95}{55.6} \right) \%$ ، وأن التسليح قد تعرّض لزيادة في الإجهادات الضاغطة

بمقدار $\frac{1242.3}{556} = 2.23$ مرة. بناء على ما تقدم، يلاحظ أن الكود العربي السوري قد لحظ نسبة

تسليح دنيا في الأعمدة لا تقل عن 0.006 من المقطع الفعلي المستخدم للخرسانة .

مثال توضيحي (6):

تم تنفيذ بلاطة من الخرسانة المسلحة، الشكل (9-32)، وبفرض أن أبعاد البلاطة

$(300 \times 300 \times 20 \text{ cm})$ وفولاذ التسليح لكل طبقة: $A_{s2} = 10T10$ وكذلك:

$A_{s1} = 10T14$ و $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $n = 10$ ، وقد أظهرت أجهزة قياس

التشوه المثبتة على البلاطة بالاتجاهين بعد الصب مباشرة وحتى مرور شهرين على صب

الخرسانة تقلصاً قيمته 0.15 mm وذلك لمسافة 50 cm بين نقطتي التثبيت حسب

الشكل، والمطلوب:

1- حساب الإجهادات المتولدة في كل من الخرسانة وفولاذ التسليح بالاتجاهين.

2- حساب مقدار النقص في الأبعاد الثلاث للبلاطة.

الحل: تمثل القيمة $\Delta L_1 = 0.15 \text{ mm}$ الانكماش الحاصل للطول $L_1 = 50 \text{ cm}$ ، ومن ثم
 يكون الانكماش النسبي بالاتجاه L_1 على هذا الطول:

$$\frac{0.15}{500} = 30 \times 10^{-5}$$

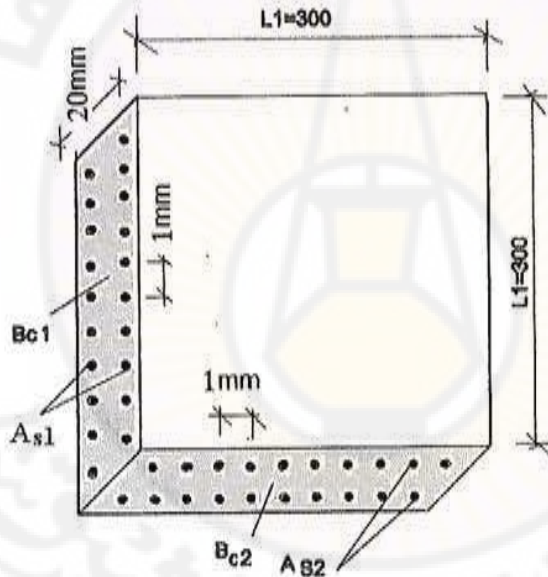
لحساب الانكماش النسبي في الخرسانة فيما لو كان المقطع دون فولاذ تسليح، أي حساب
 ϵ_{sh} :

أ- الانكماش النسبي في الاتجاه L_1 :

$$y_1 \epsilon_{sh} = 30 \times 10^{-5} \Rightarrow$$

$$\epsilon_{sh} = \frac{30 \times 10^{-5}}{y_1} = 30 \times 10^{-5} (1 + n\mu_2) = 30 \times 10^{-5} =$$

$$= \left(1 + 10 \times \frac{2 \times 10 \times 0.78}{300 \times 20} \right) = 30 \times 10^{-5} (1 + 0.026) = 30.78 \times 10^{-5}$$



الشكل (9-32) البلاطة المدروسة.

الانكماش في البلاطة بالاتجاه L_1 :

$$\Delta L_1 = 30 \times 10^{-5} \times 300 = 0.09 \text{ cm}$$

الانكماش في البلاطة بالاتجاه L_2 :

$$y_2 \varepsilon_{sh} = \frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} = \frac{1}{1+10 \times \frac{2 \times 10 \times 1.53}{300 \times 20}} \times 37.8 \times 10^{-5} = 25 \times 10^{-5}$$

ومن ثم فإن مقياس التشوه في الاتجاه L_1 يجب أن يعطي انكماشاً قيمته:

$$\Delta L_2' = y_2 \varepsilon_{sh} \times 50 = 25 \times 10^{-5} \times 50 = 0.125 \text{ mm}$$

النقص في طول البلاطة بالاتجاه L_2 :

$$\Delta L_2 = y_2 \varepsilon_{sh} \times 300 = 25 \times 10^{-5} \times 300 = 0.075 \text{ cm}$$

النقص في سماكة البلاطة:

$$\Delta L_3 = \varepsilon_{sh} \times L_3 = 37.8 \times 10^{-5} \times 20 = 0.0075 \text{ cm}$$

حساب الإجهادات في كل من الخرسانة وفولاذ التسليح:

$$\begin{aligned} \sigma_{el} &= \frac{\mu_2}{1+n\mu_2} \varepsilon_{sh} \times E_s = -\frac{0.026}{1+10 \times 0.026} \times 37.8 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= -16.3 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد شد.

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= \frac{1}{1+n\mu_2} \varepsilon_{sh} \times E_s = \frac{1}{1+10 \times 0.026} \times 37.8 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= 630 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد ضغط.

$$\begin{aligned} \sigma_{e2} &= \frac{\mu_1}{1+n\mu_1} \varepsilon_{sh} \times E_s = -\frac{0.051}{1+10 \times 0.051} \times 37.8 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= -26.8 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد شد.

$$\begin{aligned} \sigma_{s2} &= \frac{1}{1+n\mu_1} \varepsilon_{sh} \times E_s = \frac{1}{1+10 \times 0.051} \times 37.8 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= 525.6 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد ضغط.

من خلال النتائج الحسابية يتضح أن:

- 1- كلما زادت نسبة التسليح ازدادت إجهادات الشد في الخرسانة ونقصت إجهادات الضغط في فولاذ التسليح.
- 2- تظهر الإجهادات في الخرسانة عند وجود فولاذ التسليح فقط.

مثال توضيحي (7):

عنصر من الخرسانة المسلحة أبعاده $10 \times 10 \text{ cm}$ ، مساحة مقطع تسليحه العامل على الضغط قدرها $(4 \phi 10 \text{ mm} = 3.14 \text{ cm}^2)$ ، الشكل (9-33)، تعرض هذا العنصر إلى نظام التحميل المبين $(N - \tau)$ فأظهرت أجهزة قياس التشوه في هذه العينة القيم المبينة على لمخطط $(\epsilon - \tau)$ ، المطلوب:

حساب الإجهادات في كل من الخرسانة وفولاذ التسليح عند الأحمال (1-2-3-4-5-6) مع رسم المخططات $(\sigma_c - \tau)$ و $(\sigma_s - \tau)$ مع القيم الناتجة عن الحساب.

الحل :

قبل التحميل تعرض العنصر إلى الانكماش ومن ثم تولدت فيه إجهادات شادة في الخرسانة وإجهادات ضاغطة في فولاذ التسليح.

$$\mu = \frac{4 \times 0.78}{10 \times 10} = \frac{3.14}{100} = 0.0314$$

نسبة التسليح:

بما أن العنصر مؤلف من الخرسانة المسلحة فإن قيم التشوه المعطاة تمثل (ϵ_{sh}, y) حيث:

$$y = \frac{1}{1 + n\mu}$$

النقطة (1):

$$\begin{aligned} \sigma_{c1} &= -\frac{\mu}{1 + n\mu} \epsilon_{sh} \times E_s = -0.0314 \times 10 \times 10 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 \\ &= -6.6 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد شد.

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= \frac{1}{1 + n\mu} \epsilon_{sh} \times E_s = 10 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 \\ &= 210 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

إجهاد ضغط.

النقطة (2): تعرض العنصر إلى قوى شادة قيمتها 1 طن تؤثر بإجهادات شادة في كل من الخرسانة والفولاذ.

$$\sigma_{c2} = [\sigma_{c1}] - \frac{N}{Bc + nAs} = -6.6 - \frac{1000}{10 \times 10 + 10 \times 3.14} =$$

$$= 14.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s2} = [\sigma_{s1}] - \frac{nN}{Bc + nAs} = +210 - \frac{10 \times 1000}{10 \times 10 + 10 \times 3.14} =$$

$$= 134 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (3):

تعرض العنصر للزحف بين النقطتين (2) و (3):

$$\sigma_{s3} = [\sigma_{s3}] - (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) E_s = 134 + (-30 - (-20)) \times 10^{-5}$$

$$\times 2.1 \times 10^6 = -76 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_{s3} = \sigma_{s3} \times A_s = -76 \times 3.14 = -238 \text{ kg}$$

$$N_{c3} = -N - N_{s3} = -1000 - (-234) = -762 \text{ kg}$$

النقطة (4):

$$\sigma_{c4} = [\sigma_{c3}] + \frac{N}{Bc + nAs} = -4.62 + \frac{13 \times 10^3}{100 + 10 \times 3.14} =$$

$$= 91.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s4} = [\sigma_{s3}] + \frac{nN}{Bc + nAs} = -76 + \frac{10 \times 13 \times 10^3}{100 + 10 \times 3.14} =$$

$$= 9.13 \text{ kg/cm}^2$$

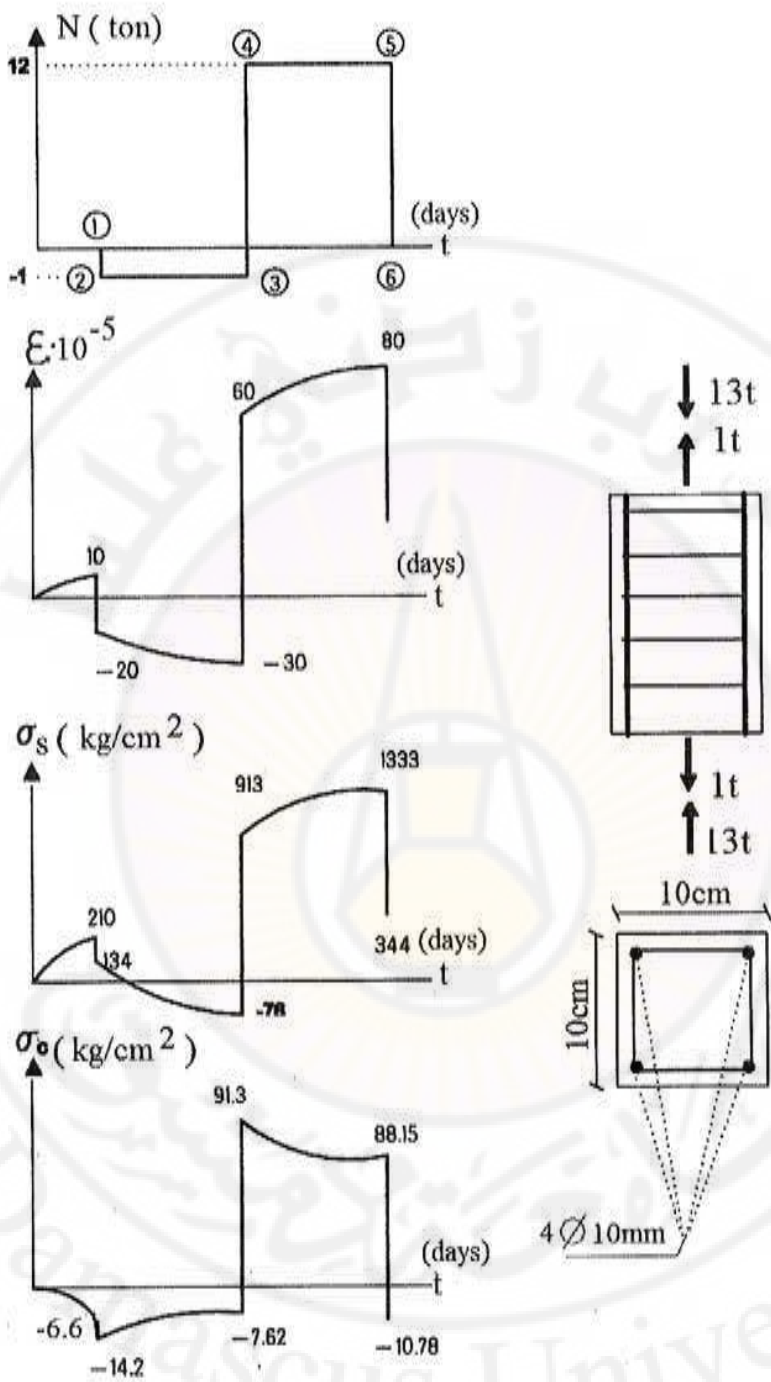
النقطة (5):

$$\sigma_{s5} = [\sigma_{s4}] + \Delta \varepsilon \times E_s = 9.13 + (80 - 60) \times 10^{-5} \times$$

$$= -2.1 \times 10^6 = 1333 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_{s5} = \sigma_{s5} \times A_s = 1333 \times 3.14 = 4185 \text{ kg}$$

$$N_{c5} = N - N_{s5} = 13000 - 4185 = 8815 \text{ kg}$$



الشكل (9-33) الإجهادات والتشوهات في التسليح والخرسانة في المثال التوضيحي (7).

$$\sigma_{cs} = \frac{8815}{100} = 88.15 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s6} = [\sigma_{s5}] - \frac{nN}{Bc + nAs} = 1333 + \frac{10 \times 13000}{100 + 10 \times 3.15} = 344 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{c6} = [\sigma_{cs}] - \frac{N}{Bc + nAs} = 88.15 - \frac{13000}{100 + 10 \times 3.15} = 10.78 \text{ kg/cm}^2$$

التشوه النسبي المتوقع في العنصر الخرساني بعد إزالة الحمولة كاملة:

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_5 - \frac{\sigma_{s5}}{E_s} = 80 \times 10^{-5} - \frac{1333}{2.1 \times 10^6} = 17 \times 10^{-5}$$

مثال توضيحي (8):

عنصر خرساني أبعاده $(10 \times 10 \text{ cm})$ ، الشكل (9-34)، يتعرض لحمولة متغيرة حسب نظام التحميل المبين في الشكل (9-35). احسب قيم الإجهادات في كل من الخرسانة وفولاذ التسليح في جميع النقاط في الحالتين التاليتين، علماً أن:

$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، $n = 10$ حيث إن:

الحالة الثانية	الحالة الأولى	
6 cm^2	2 cm^2	مساحة المقطع
$\mu = 0.06$	$\mu = 0.02$	نسبة التسليح
$4 \phi 14 \text{ mm}$	$4 \phi 8 \text{ mm}$	التسليح

يعدّ (خطأ) أن التشوهات لا تتغير مع تغير نسبة التسليح من أجل مقارنة تأثير التسليح على قيم الإجهادات، و يعدّ خطأ أن الحمولات والتشوهات متماثلة في الحالتين.

الحل: يتعرض العنصر الخرساني إلى انكماش قبل التحميل، ومن ثم فإن الإجهادات في كل من الخرسانة وفولاذ التسليح تحدد كما يلي:

النقطة (1): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$

$$\sigma_{cl} = \frac{\mu}{1 + n\mu} \varepsilon_{sh} E_s = -\mu y \varepsilon_{sh} E_s$$

$$= -0.02 \times 20 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = -8.4 \text{ kg/cm}^2$$

(ضغط)

$$\sigma_{s1} = \frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} \cdot E_s = y \cdot \varepsilon_{sh} \cdot E_s =$$

$$= 20 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = 420 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{شد})$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$ نحدد قيمة ε_{sh} للخرسانة العادية:

$$\frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} 20 \times 10^{-5} =$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{sh} = 20 \times 10^{-5} \times (1 + 10 \times 0.06) = 22 \times 10^{-5}$$

الإجهادات إذا أصبحت نسبة التسليح $\mu = 0.06$ إجهادات (شد)

$$\sigma'_{el} = -\frac{\mu}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} \cdot E_s =$$

$$= -\frac{0.06}{1+10 \times 0.06} \times 225 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = -17.33 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{s1} = -\frac{1}{1+n\mu} \varepsilon_{sh} \cdot E_s =$$

$$= -\frac{1}{1+10 \times 0.06} \times 225 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = 288.7 \text{ kg/cm}^2$$

(ضغط)

النقطة (2): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\sigma_{c2} = \sigma_{el} + \frac{N}{Bc + nAs} = -8.4 + \frac{20 \times 10^3}{100 + 10 \times 2} = 158.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{nN}{Bc + nAs} = 420 + \frac{10 \times 20 \times 10^3}{100 + 10 \times 2} = 2086 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

$$\sigma'_{c2} = \sigma'_{cl} + \frac{N}{Bc + nAs} = 17.33 + \frac{20 \times 10^3}{100 + 10 \times 2} = 107.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{s2} = \sigma'_{s1} + \frac{nN}{Bc + nAs} = 288.7 + \frac{10 \times 20 \times 10^3}{100 + 10 \times 2} = 1538 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (3): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \Delta\varepsilon \times E_s = 2086 + (80 - 50) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 =$$

$$= 2716 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_{s3} = \sigma_{s3} \times A_s = 2716 \times 2 = 5432 \text{ kg}$$

$$N_{c3} = N - N_{s3} = 20000 - 5432 = 14568 \text{ kg}$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$

$$\sigma'_{s3} = 1538 + 630 = 2168 \text{ kg/cm}^2$$

$$N'_{s3} = 2168 \times 6 = 13008 \text{ kg}$$

$$N'_{c3} = 20000 - 13008 = 6992 \text{ kg}$$

$$\sigma'_{c3} = \frac{6992}{100} = 69 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (-4):

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$

$$\sigma_{c4} = \sigma_{c3} - \frac{N}{Bc + nA_s} = 145 - \frac{14000}{100 + 10 \times 2} = 29 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} - \frac{nN}{Bc + nA_s} = 2716 - \frac{10 \times 14000}{100 + 10 \times 2} = 1549 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$

$$\sigma'_{c4} = 69 - \frac{14000}{100 + 10 \times 6} = -18.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{s4} = 2168 - \frac{10 \times 14000}{100 + 10 \times 6} = 1293 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (5):

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \varepsilon \times E_s = 1549 + (15 - 30) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 =$$

$$= 1234 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_{s5} = \sigma_{s5} \times A_s = 1234 \times 2 = 2468 \text{ kg}$$

$$N_{c5} = N - N_{s5} = 6000 - 2468 = 3532 \text{ kg}$$

$$\sigma_{c5} = \frac{3532}{100} = 35.32 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

$$\begin{aligned}\sigma'_{s5} &= \sigma'_{s4} + \Delta\varepsilon \times E_s = 1293 + (15 - 30) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= 978 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$$N'_{s5} = \sigma'_{s5} \times A_s = 978 \times 6 = 5868 \text{ kg}$$

$$N'_{c5} = N - N'_{s5} = 6000 - 5868 = 132 \text{ kg}$$

$$\sigma'_{c5} = \frac{N'_{c5}}{Bc} = \frac{132}{100} = 1.35 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (6): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\sigma_{c6} = \sigma_{c5} - \frac{N}{Bc + nA_s} = 35.3 + \frac{14000}{100 + 10 \times 2} = 152 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s6} = \sigma_{s5} + \frac{nN}{Bc + nA_s} = 1234 + \frac{10 \times 14000}{100 + 10 \times 2} = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

$$\sigma'_{c6} = 1.32 + \frac{14000}{100 + 10 \times 6} = 88.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{s6} = 978 + \frac{10 \times 14000}{100 + 10 \times 6} = 1853 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (7): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\begin{aligned}\sigma_{s7} &= \sigma_{s6} + \Delta\varepsilon \times E_s = 2400 + (90 - 70) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 \\ &= 2820 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$$N_{s7} = \sigma_{s7} \times A_s = 2820 \times 2 = 5640 \text{ kg}$$

$$N_{c7} = N - N_{s7} = 200 - 5640 = 14360 \text{ kg}$$

$$\sigma_{c7} = \frac{14360}{100} = 143.6 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

$$\begin{aligned}\sigma'_{s7} &= \sigma'_{s6} + \Delta\varepsilon \times E_s = 1853 + (90 - 70) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= 2273 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$$N'_{s7} = \sigma'_{s7} \times A_s = 2273 \times 6 = 1.3638 \text{ kg}$$

$$N'_{c7} = N - N'_{s7} = 20000 - 13638 = 6362 \text{ kg}$$

$$\sigma'_{c7} = \frac{6362}{100} = 63.62 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة (8): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\sigma_{c8} = \sigma_{c7} - \frac{N}{Bc + nAs} = 143.6 + \frac{14000}{100 + 10 \times 2} = 27 \text{ kg/cm}^2$$

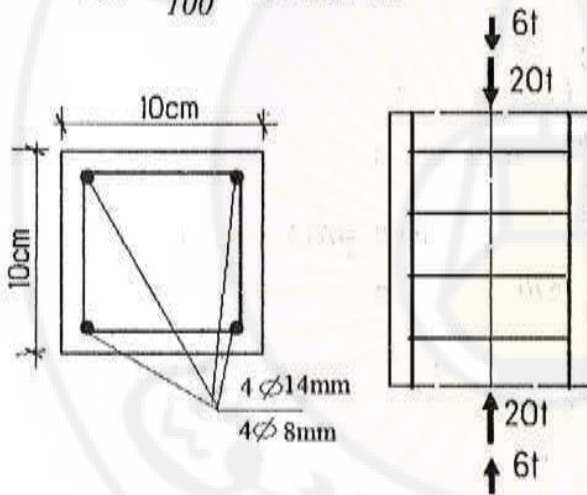
$$\sigma_{s8} = \sigma_{s7} + \frac{nN}{Bc + nAs} = 2880 - \frac{10 \times 14000}{100 + 10 \times 2} = 1714 \text{ kg/cm}^2$$

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

$$\sigma'_{c8} = 1.32 + \frac{14000}{100 + 10 \times 6} = 88.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{s8} = 63.6 - 116.6 = -53 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{c9} = \frac{618}{100} = 6.18 \text{ kg/cm}^2$$



الشكل (9-34) العنصر المدروس في المثال (8).

النقطة (9): من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.02$:

$$\sigma_{s9} = \sigma_{s8} + \Delta \epsilon \times E_s = 1714 + (25 - 35) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = 1504 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_{s9} = \sigma_{s9} \times A_s = 1504 \times 2 = 3008 \text{ kg}$$

$$N_{c9} = N - N_{s9} = 6000 - 3008 = 2992 \text{ kg}$$

$$\sigma_{c9} = \frac{2992}{100} = 29.9 \text{ kg/cm}^2$$

النقطة		1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_s [kg/cm ²]	μ									
	0.02	420	2086	2716	1549	1234	2400	2820	1714	1504
σ'_c [kg/cm ²]	0.06	288.7	1538	2163	1293	978	1853	2273	1107	897
	0.02	-8.4	158.2	145	29	35.32	152	143.6	27	29.9
	0.06	-17.33	107.7	69	-18.5	1.32	88.8	63.6	-53	6.18

من أجل نسبة التسليح $\mu = 0.06$:

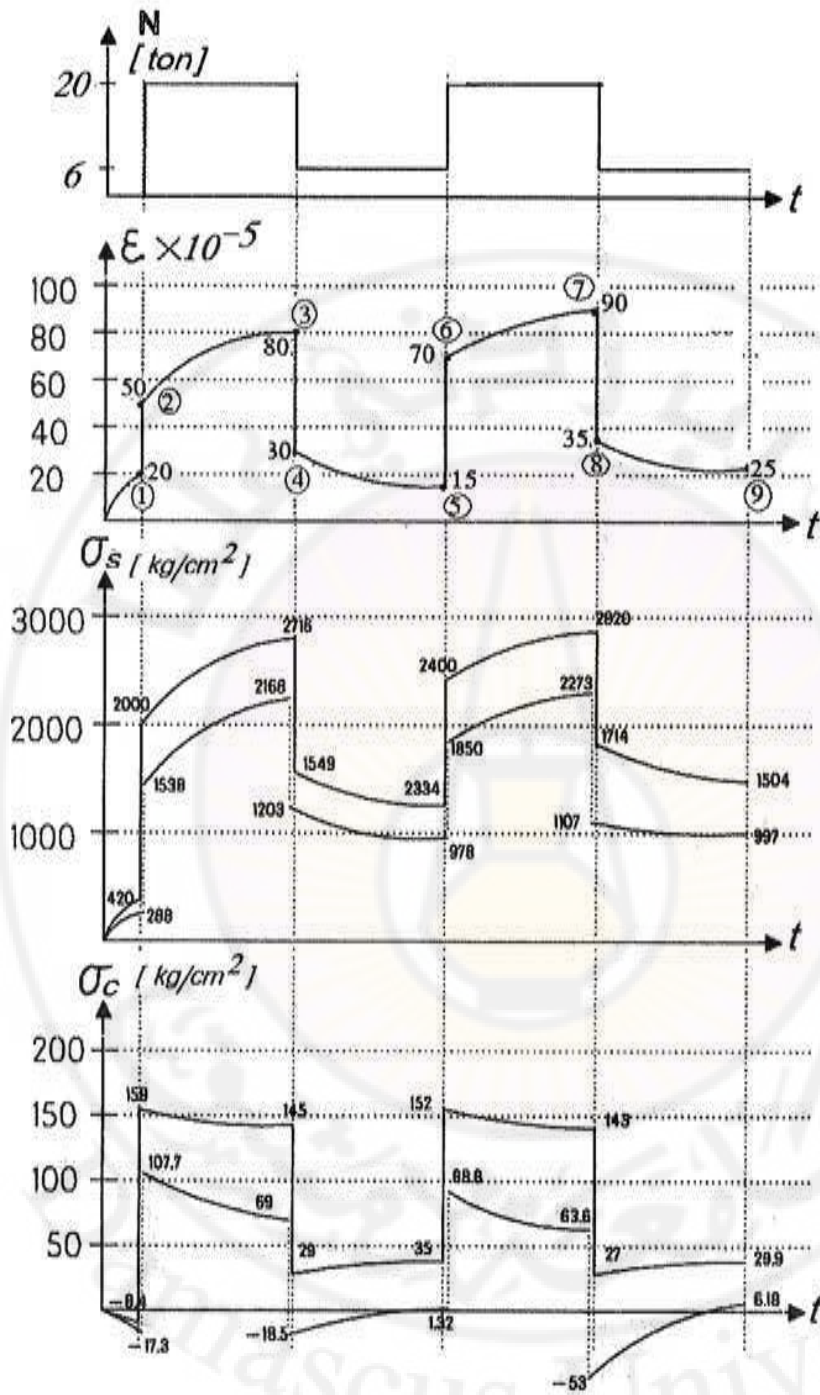
$$\begin{aligned} \sigma'_{s9} &= \sigma'_{s9} + \Delta\varepsilon \times E_s = 1107 + (25 - 35) \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 = \\ &= 897 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$N'_{s9} = \sigma'_{s9} \times A_s = 897 \times 6 = 5382 \text{ kg}$$

$$N'_{c9} = N - N'_{s9} = 6000 - 5382 = 618 \text{ kg}$$

مما تقدم يمكن استنتاج ما يلي:

- الإجهادات الناتجة عن تغير نسبة التسليح نجد أن الإجهادات في الفولاذ تكون أكبر عندما تكون نسبة التسليح أقل.
- عندما تصل الإجهادات العظمى في فولاذ التسليح إلى حد السييلان تتوقف عملية إعادة توزيع القوى بين الخرسانة وفولاذ التسليح.
- تتناقص الإجهادات الأصغرية في الخرسانة من الموجة التي تليها، ومن ثم فإن إجهادات الضغط الأصغرية قد تتحول إلى إجهادات شادة.
- تكون تشوهات الزحف شديدة في المراحل الأولى من التجميل ثم تنبأطاً تدريجياً حتى تتوقف بعد مرور زمن طويل قد يستغرق سنوات، وعندما يتوقف زحف الخرسانة تتوقف عملية إعادة توزيع القوى بين الخرسانة وفولاذ التسليح.



الشكل (9-35) الإجهادات في التسليح والخرسانة في المثال التوضيحي (8).



المراجع
References



1) المراجع باللغة العربية:

- [1] الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة، الطبعة الثانية 1995 م، والطبعة الثالثة 2004 م، نقابة المهندسين السوريين، دمشق.
- [2] الكود المصري لتنفيذ وتصميم المنشآت الخرسانية- كود رقم 203، إصدار 2001 م.
- [3] د. وهيب زين الدين، د. أحمد الحسن، د. محمد كرامة بدورة: اختبارات البيتون المتصلب بالطرائق المخربة وغير المخربة، نقابة المهندسين، دمشق 1993 م.
- [4] تقنيات وأعمال الخرسانة، الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج في السعودية.
- [5] د. غسان محمود، م. محمد بشير سؤدان: الحساب الإنشائي للمقاطع والعناصر الخرسانية المسلحة"، مقرر إنشائية (1) لطلاب السنة الرابعة في قسم الهندسة الطبغرافية، منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية 2005 م. (كتاب معدل).
- [6] د. غسان محمود، د. شريف برقايوي: المدخل إلى الخرسانة المسلحة وحساب المقاطع وفق طريقة الاجهادات المسموح ، مقرر خرسانة مسلحة (1) لطلاب السنة الثالثة- قسم الري والصرف. منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية 2007 م.
- [7] د. غسان محمود: اختبار قدرة التحمل الحدي للمقاطع البيتونية المسلحة المحملة لامركزيًا في إطار نظرية متكاملة وشاملة. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 12، العدد(1)، 1996 م.

(2) المراجع باللغات الأجنبية:

- [8] ACI committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
- [9] ACI committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999.
- [10] Nawy G. Edward, "*Reinforced Concrete, A Fundamental Approach*", 5th Edition, Pearson Education, Inc. 2003.
- [11] Wang C, Salmon C.G., Pincheira J.A., "*Reinforced Concrete Design*", 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [12] Nilson A. H., Darwin D., Dolan C. W., "*Design of Concrete Structures*", The McGraw- Hill Companies 2004.
- [13] MacGregor G. James, "*Reinforced Concrete Mechanics and Design*", 3th Edition, Prentice Hall, Inc. 1997.
- [14] Macginley T.J., Choo B.S., "*Reinforced Concrete Design Theory and Examples*", 2nd edition, London & New York 1990.
- [15] ICI and ISI, "*Manual for the design of RC building structures*", ECCS 203 – 2001, October 1985.
- [16] Concrete Society Technical Report No.54, "Diagnosis of Deterioration in Concrete Structures", 2004.
- [17] Concrete Society Technical Report No.22, "*Non-structural Cracks in Concrete*", 3rd , edition, 1992.
- [18] CEB/FIP Model code, "*Cracking and Deflection*", Lausanne 1985.
- [19] Kobiak J. , Stachurski W., "*Reinforced Concrete Structures*", Part I, Arkady , Warsaw 1991. (in Polish)
- [20] Starosolski W., "*Reinforced Concrete Structures*", PWN, Warsaw, 1985. (in Polish)
- [21] Szlezak F., "*Reinforced Concrete and Metallic Building*", Part 1, PWN, Warsaw 1986. (in Polish)
- [22] Bondarenko V.M., "*Reinforced Concrete Structures*", Visshaya Shkola, Moskva 1987. (in Russian)
- [23] Hoge B.P., "*Limit State Theory for Reinforced Concrete Design*", 2nd Edition, a Pitman International, Text 1976.

معجم مختصر للمصطلحات العلمية باللغتين
العربية والانكليزية

*A Brief Dictionary of
Arabic-English Scientific Terminology*



<i>Stress</i>	إجهاد
<i>Puncture Stress</i>	إجهاد الثقب
<i>Tangent Stress</i>	إجهاد مماسي
<i>Normal Stress</i>	إجهاد ناظمي
<i>Yield Stress</i>	إجهاد الخضوع / السيلان/
<i>Concrete Shrinkage Stresses</i>	إجهادات الانكماش في الخرسانة
<i>Bond Stresses</i>	إجهادات تماسك
<i>Volumetric Stresses</i>	إجهادات حجمية
<i>Thermal Stresses</i>	إجهادات حرارية
<i>Main/Principal/ Stress</i>	إجهادات رئيسية
<i>Tensile Stresses</i>	إجهادات شادة
<i>Compressive Stresses</i>	إجهادات ضاغطة
<i>Plane Stresses</i>	إجهادات مستوية
<i>Allowable Stresses</i>	إجهادات مسموح بها
<i>Friction</i>	احتكاك
<i>Test</i>	اختبار
<i>Behavior, Performance</i>	أداء / سلوك /
<i>Elastic Behavior</i>	أداء مرن
<i>Plastic Behavior</i>	أداء لدن
<i>Height</i>	ارتفاع
<i>Effective Height</i>	ارتفاع فعال
<i>Serviceability</i>	استثمار
<i>Stability</i>	استقرار
<i>Stirrup</i>	أسوارة
<i>Horizontal Stirrup</i>	أسوارة أفقية
<i>Vertical Stirrups</i>	أسوارة عمودية
<i>Moment Redistribution</i>	إعادة توزيع العزوم
<i>Granular Grading Curve</i>	منحني التدرج الحبي

<i>Roughness</i>	الخشونة
<i>Strength</i>	المقاومة
<i>Bond, Cohesion</i>	التماسك
<i>Sandy Equivalent</i>	المكافئ الرمل
<i>Fineness</i>	النعومة
<i>Safety</i>	أمان
<i>Absorption</i>	امتصاص
<i>Buckling</i>	انبعاج / تحنيط /
<i>Displacement</i>	انتقال
<i>Transitional</i>	انتقالي / مرحلي /
<i>Vertical Displacement</i>	انتقال شاقولي
<i>Horizontal Displacement</i>	انتقال أفقي
<i>Flexure, Bending</i>	انحناء
<i>Construction</i>	إنشاء
<i>Strain</i>	انفعال / تشوه نسبي /
<i>Failure</i>	انهيار
<i>Plastic Failure</i>	انهيار لدن
<i>Brittle Failure</i>	انهيار هش / مفاجئ /
<i>Collapse</i>	انكسار / تصدع /
<i>Shrinkage</i>	انكماش
<i>Concrete Shrinkage</i>	انكماش الخرسانة
<i>Dry Shrinkage</i>	انكماش جاف
<i>Plastic Shrinkage</i>	انكماش لدن
<i>Abrasion</i>	اهتراء
<i>Gravel</i>	بحص / ركام /
<i>River Gravel</i>	بحص نهري
<i>Oval Gravel</i>	بحص بيضوي
<i>Round Gravel</i>	بحص مدور

<i>Smooth Gravel</i>	بحص أملس
<i>Broken Gravel</i>	بحص مكسر
<i>Span</i>	بحر / مجاز ، فتحة /
<i>Effective Span</i>	بحر فعال
<i>Slab</i>	بلاطة
<i>Simply Supported Slab</i>	بلاطة بسيطة الاستناد
<i>Fixed Slab</i>	بلاطة موثوقة الاستناد
<i>Cantilever Slab</i>	بلاطة ظرفية
<i>One-Way Slab</i>	بلاطة عاملة باتجاه واحد
<i>Two-Way Slab</i>	بلاطة عاملة باتجاهين
<i>Mush-Room Slab</i>	بلاطة فطرية
<i>Inverted Mush-Room Slab</i>	بلاطة فطرية مقلوبة
<i>Beam Slab</i>	بلاطة كمرية
<i>Inverted Beam Slab</i>	بلاطة كمرية مقلوبة
<i>Solid Slab</i>	بلاطة مصمتة
<i>Hollow Slab</i>	بلاطة مفرغة
<i>Ribbed Slab</i>	بلاطة معصبة
<i>Building</i>	بناء ، تشييد
<i>Column Head</i>	تاج العمود
<i>Experiment (Test)</i>	تجربة (اختبار)
<i>Steel Tension Test</i>	تجربة شد الحديد
<i>Concrete Test in Compression (in tension)</i>	اختبار الخرسانة على الضغط (الشد)
<i>Tension Test in Splitting</i>	اختبار الشد بالفلق
<i>Tension Test in Flexure</i>	اختبار الشد بالانحناء
<i>Pullout Tension Test</i>	اختبار الشد بالسحب
<i>Freezing</i>	تجمد
<i>Compaction. Density</i>	تراص ، كثافة

<i>Relative Density</i>	تراص (كثافة) نسبي / قرينة التراص/
<i>Loading</i>	تحميل
<i>Reinforcement</i>	تسليح
<i>Single Reinforcement</i>	تسليح أحادي
<i>Maximum Reinforcement</i>	تسليح أعظمي
<i>Structural Reinforcement</i>	تسليح إنشائي
<i>Shrinkage Reinforcement</i>	تسليح انكماش/ تقلص/
<i>Hinging Reinforcement</i>	تسليح تعليق
<i>Equilibrium Reinforcement</i>	تسليح توازني
<i>Secondary Reinforcement</i>	تسليح ثانوي
<i>Double Reinforcement</i>	تسليح ثنائي
<i>Main Reinforcement</i>	تسليح رئيس
<i>Tensile Reinforcement</i>	تسليح شد
<i>Compression Reinforcement</i>	تسليح ضغط
<i>Longitudinal Reinforcement</i>	تسليح طولي
<i>Transverse Reinforcement</i>	تسليح عرضي
<i>Spiral Reinforcement</i>	تسليح حلزوني
<i>Torsion Reinforcement</i>	تسليح قتل
<i>Shear Reinforcement</i>	تسليح قص
<i>Bent-Up Reinforcement</i>	تسليح مكسح / مرفوع /
<i>Cracking</i>	تشقق
<i>Hairy Cracks</i>	تشققات شعرية/ دقيقة /
<i>Longitudinal Cracks</i>	تشققات طولية
<i>Transverse Cracks</i>	تشققات عرضية
<i>Inclined Circumferential /Cracks /</i>	تشققات قطرية / مائلة /
<i>Deformation</i>	تشكل، تشوه
<i>Plane Strains</i>	تشوهات مستوية
<i>Design</i>	تصميم

<i>Confinement</i>	تطويق
<i>Change</i>	تغير
<i>Linear Change</i>	تغير خطي
<i>Non-Linear Change</i>	تغير لاخطي
<i>Adhesion</i>	تلاصق
<i>Bond</i>	تماسك
<i>Balance, Equilibrium</i>	توازن
<i>Puncture</i>	ثقب
<i>Indirect Puncture</i>	ثقب غير مباشر
<i>Direct Puncture</i>	ثقب مباشر
<i>Beam</i>	جانز (كمره)
<i>Dropped Beam</i>	جانز ساقط
<i>Hidden Beam</i>	جانز مخفي
<i>Bearing Wall</i>	جدار حامل
<i>Shear Wall</i>	جدار قص
<i>Beam Web</i>	جسد الكمره (الجذع)
<i>Structural Scheme</i>	جملة إنشائية
<i>Skeleton Scheme</i>	جملة هيكلية
<i>State</i>	حالة
<i>Ultimate State</i>	حالة حدية
<i>Limit</i>	حد، نهاية
<i>Temperature</i>	حرارة
<i>Calculation, Computation</i>	حساب
<i>Aggregates</i>	حصويات
<i>Coarse Aggregates</i>	حصويات خشنة
<i>Oval Plain Aggregates</i>	حصويات ملساء مكورة
<i>Broken Aggregates</i>	حصويات مكسرة
<i>Fine Aggregates</i>	حصويات ناعمة

<i>Raft /Mat/ Foundation</i>	حصيرة
<i>Load</i>	حمولة / حمل /
<i>Service Load</i>	حمولة استثمارية
<i>Ultimate Load /UL /</i>	حمولة حدية
<i>Design (Calculation) Load</i>	حمولة تصميمية (حسابية)
<i>Live Load-LL- /Simultaneous /</i>	حمولة حية / لحظية /
<i>Permanent Load /Long-Term/</i>	حمولة دائمة / طويلة الأمد/
<i>Dynamic Load</i>	حمولة ديناميكية
<i>Static Load</i>	حمولة سكونية
<i>Surface Load</i>	حمولة سطحية
<i>Trapezoidal Load</i>	حمولة شبه منحرف
<i>Triangular Load</i>	حمولة مثلثية
<i>Concentrated Load</i>	حمولة مركزة
<i>Uniformly Distributed Load</i>	حمولة موزعة بانتظام
<i>Dead Load / DL /</i>	حمولة ميتة
<i>External</i>	خارجي
<i>Concrete</i>	خرسانة / بيتون /
<i>Fresh (Green) Concrete</i>	خرسانة طرية
<i>Hardened Concrete</i>	خرسانة متصلبة
<i>Heavy Concrete</i>	خرسانة ثقيلة
<i>Light Concrete</i>	خرسانة خفيفة
<i>High-Performance Concrete</i>	خرسانة عالية الأداء
<i>High-Quality Concrete</i>	خرسانة عالية الجودة
<i>Mass Concrete</i>	خرسانة كتلية
<i>Reinforced Concrete</i>	خرسانة مسلحة
<i>Prestressed Concrete</i>	خرسانة مسبقة الإجهاد
<i>Precast Concrete</i>	خرسانة مسبقة الصنع
<i>Cast in-Situ Concrete /Monolithic/</i>	خرسانة مصبوبة في المكان / ميليثية /

<i>Property</i>	خاصة
<i>Coarse</i>	خشن
<i>Linear</i>	خطي
<i>Concrete Mix</i>	خلطة خرسانية
<i>Internal</i>	داخلي
<i>Concrete Class</i>	درجة جودة الخرسانة
<i>Temperature Degree</i>	درجة الحرارة
<i>Compactness Degree</i>	درجة التراص
<i>Water-Tightness Degree</i>	درجة الكتامه
<i>Durability</i>	ديمومة
<i>Arm</i>	ذراع
<i>Force Arm</i>	ذراع القوة
<i>Internal Lever Arm</i>	ذراع المزوجة الداخلية
<i>Thaw</i>	ذوبان
<i>Reaction</i>	رد فعل
<i>Compaction</i>	رص / دمك
<i>Humidity , Water Content</i>	رطوبة
<i>Concrete Curing</i>	رعاية الخرسانة
<i>Sand</i>	رمل
<i>Well Compacted Sand</i>	رمل جيد التراص
<i>Medium Dense Sand</i>	رمل متوسط التراص
<i>Loose Sand</i>	رمل مخلخل التراص
<i>Coarse Sand</i>	رمل خشن
<i>Fine Sand</i>	رمل ناعم
<i>River Sand</i>	رمل نهري
<i>Broken Sand</i>	رمل مكسر
<i>Aggregates</i>	ركام / بحص
<i>Support</i>	ركيزة / مسند

<i>Wind</i>	رياح
<i>Angle</i>	زاوية
<i>Creep</i>	زحف / سيلان
<i>Cobbles</i>	زلط
<i>Time</i>	زمن
<i>Surface</i>	سطح
<i>Thickness</i>	سماكة، سمك
<i>Deflection</i>	سهم
<i>Long-Term Deflection</i>	سهم طويل الأمد
<i>Short-Term Deflection</i>	سهم لحظي
<i>Shrinkage Deflection</i>	سهم الانكماش
<i>Thermal Deflection</i>	سهم حراري
<i>Camber</i>	سهم منعكس
<i>Strip, Slice</i>	شريحة
<i>Edge Strip</i>	شريحة طرفية
<i>Compression</i>	ضغط
<i>Central Compression (Axial)</i>	ضغط مركزي (محوري)
<i>Eccentric Compression</i>	ضغط لا مركزي (لا محوري)
<i>Single-Axis Eccentric Compression</i>	ضغط لا مركزي أحادي المحاور
<i>Bilinear Eccentric Compression</i>	ضغط لا مركزي ثنائي المحاور
<i>Flow Table</i>	طاولة الانسياب
<i>Layer</i>	طبقة
<i>Protection Layer</i>	طبقة حماية
<i>Reinforcement Layer</i>	طبقة تسليح
<i>Sealing Layer</i>	طبقة عازلة
<i>Consistency</i>	طراوة
<i>Method, Way, Approach</i>	طريقة
<i>Length</i>	طول

<i>Anchorage Length / Bond/</i>	طول إرساء / تماسك /
<i>Effective Length</i>	طول فعال
<i>Equivalent Length</i>	طول مكافئ
<i>Cement Plaster</i>	طينة إسمنتية
<i>Cantilever</i>	ذفر
<i>Cementitious mortar</i>	طينة إسمنتية
<i>Web Width</i>	عرض الجسد / الجذع /
<i>Compression Slab Width</i>	عرض بلاطة الضغط
<i>Compression Zone Width</i>	عرض منطقة الضغط
<i>Moment</i>	عزم
<i>Maximum Moment</i>	عزم أعظمي
<i>Bending Moment</i>	عزم انحناء
<i>Equilibrium Moment</i>	عزم توازني
<i>Static Moment</i>	عزم ستاتيكي
<i>Torsion Moment</i>	عزم قتل
<i>Moment of Inertia</i>	عزم عطالة / قصور ذاتي/
<i>Resisting Moment</i>	عزم مقاوم
<i>Resistance Moment</i>	عزم مقاومة
<i>Section Resistance Moment</i>	عزم مقاومة المقطع / مميز المقطع/
<i>Width</i>	عرض
<i>Effective Width</i>	عرض فعال
<i>Section Width</i>	عرض المقطع
<i>Rib</i>	عصب
<i>Wide Rib</i>	عصب عريض
<i>Strengthening Rib</i>	عصب تقوية
<i>Joint</i>	عقدة
<i>Elastic Joint</i>	عقدة مرنة
<i>Semi- Solid Joint</i>	عقدة نصف صلبة

<i>Solid Joint</i>	عقدة صلبة
<i>Relationship</i>	علاقة
<i>Linear Relationship</i>	علاقة خطية
<i>Non-Linear Relationship</i>	علاقة لا خطية
<i>Column</i>	عمود
<i>Edge Column</i>	عمود طرفي
<i>Middle Column</i>	عمود وسطي
<i>Corner Column</i>	عمود ركني
<i>Circular Column</i>	عمود دائري
<i>Square Column</i>	عمود مربع
<i>Rectangular</i>	عمود مستطيل
<i>Aggregates Calibration</i>	عيار الحصىات
<i>Test Specimen</i>	عينة اختبار
<i>Dilation</i>	فاصل
<i>Shrinkage Dilation</i>	فاصل انكماش
<i>Expansion Dilation</i>	فاصل تمدد
<i>Casting Dilation</i>	فاصل صب
<i>Seismic Dilation</i>	فاصل زلزالي
<i>Settlement Dilation</i>	فاصل هبوط
<i>Torsion</i>	قتل
<i>Action</i>	فعل
<i>Load-Bearing Capacity</i>	قدرة التحمل
<i>Ultimate Load-Bearing Capacity</i>	قدرة التحمل الحدي
<i>Shear</i>	قص
<i>Base Shear</i>	قص قاعدي
<i>Indirect Shear</i>	قص غير مباشر
<i>Direct Shear</i>	قص مباشر
<i>Bar</i>	قضيب

<i>Reinforcement Bar</i>	قضيب تسليح
<i>Plain Reinforcement Bar</i>	قضيب تسليح أملس
<i>Rough Reinforcement Bar</i>	قضيب تسليح خشن
<i>Reinforcement Lugged Bar</i>	قضيب تسليح ذو نتوءات
<i>Bent-up Bar</i>	قضيب مكسح
<i>Straight Bar</i>	قضيب مستقيم
<i>Workability</i>	قابلية التشغيل
<i>Force</i>	قوة
<i>Axial Force</i>	قوة محورية
<i>Eccentric Force</i>	قوة لا محورية
<i>Tensile Force</i>	قوة شادة
<i>Compressive Force</i>	قوة ضاغطة
<i>Shear Force</i>	قوة قاصة
<i>Consistency</i>	قوام
<i>Mass</i>	كتلة
<i>Impermeable</i>	كثيم / غير نفوذ/
<i>Dense</i>	كثيف
<i>Density</i>	كثافة
<i>Cost</i>	كلفة
<i>Beam</i>	كمرة (جانز)
<i>Dropping Beam</i>	كمرة ساقطة / بارزة /
<i>Edge Beam</i>	كمرة طرفية
<i>Hidden Beam</i>	كمرة مخفية
<i>Inverted Beam</i>	كمرة مقلوبة
<i>Code</i>	كود / نورم/
<i>Non-Linear</i>	لا خطي
<i>Eccentric, Non-axial</i>	لا مركزي، لا محوري
<i>Balanced Eccentricity</i>	لا مركزية توازنية

<i>Small Eccentricity</i>	لا مركزية صغيرة
<i>Big Eccentricity</i>	لا مركزية كبيرة
<i>Plasticity</i>	لدونة
<i>Viscosity</i>	لزوجة
<i>Ductility, Flexibility</i>	لدونة ، مطاوعة
<i>Overall, Resultant</i>	محصلة
<i>Overall Load</i>	محصلة القوى
<i>Axis</i>	محور
<i>Rotation Axis</i>	محور دوران
<i>Neutral Axis</i>	محور محايد/ محور الخمول/
<i>Diagram ,Curve</i>	مخطط، منحنى
<i>Bending Moment Diagram</i>	مخطط عزم الانحناء
<i>Torsion Moment Diagram</i>	مخطط عزوم الفتل
<i>Shear Force Diagram</i>	مخطط قوى القص
<i>Abrams Cone</i>	مخروط أبرامس
<i>Phase, Stage</i>	مرحلة
<i>Elastic Phase</i>	مرحلة مرنة
<i>Plastic Phase</i>	مرحلة لدنة
<i>Paste Phase</i>	مرحلة عجينية
<i>Liquid Phase</i>	مرحلة سائلة
<i>Ultimate Equilibrium Phase</i>	مرحلة التوازن الحدي
<i>Component</i>	مركبة
<i>Horizontal Component</i>	مركبة أفقية
<i>Vertical Component</i>	مركبة شاقولية
<i>Centre of Gravity</i>	مركز الثقل
<i>Central</i>	مركزي
<i>Square</i>	مساحة
<i>Accelerators</i>	مسرعات

Support	مسند
Hinge Support	مسند مفصلي
Rigid /Hard/ Joint	مسند صلب
Edge Support	مسند طرفي
Wide Support	مسند عريض
Elastic Support	مسند مرن
Equation	معادلة، مساواة
Differential Equation	معادلة تفاضلية
Coefficient, Factor, Parameter	معامل
Transverse Strain Coefficient	معامل بواسون- معامل التشوهات العرضية
Safety Factor	معامل امان
Thermal Expansion Coefficient	معامل التمدد الحراري
Loading Factor	معامل تحميل
Pressure Decreasing Coefficient	معامل تخفيض الضغط
Shear Factor	معامل القص
Sand Fineness Factor	معامل نعومة الرمل
Resistance, Strength	مقاومة
Shear Resistance	مقاومة القص
Compressive Strength	مقاومة على الضغط
Tensile Strength	مقاومة على الشد
Characteristic Strength	مقاومة مميزة
Plasticizers	ملدنات
Plasticizing Materials	مواد ملدنة
Curve, Diagram	منحني
Granular Grading Curve	منحني التدرج الحبيبي
Specifications	مواصفات
Cementitious Grout	مونة إسمنتية
Mechanical Characteristics	مميزات ميكانيكية

<i>Thermal Conductivity</i>	ناقلية حرارية
<i>Electric Conductivity</i>	ناقلية كهربائية
<i>Result</i>	نتيجة
<i>Theory, Theorem</i>	نظرية
<i>Theory of Plasticity</i>	نظرية اللدونة
<i>Theory of Elasticity</i>	نظرية المرونة
<i>Balance Reinforcement Ratio</i>	نسبة التسليح التوازنية
<i>Longitudinal Reinforcement Ratio</i>	نسبة التسليح الطولي
<i>Transverse Reinforcement Ratio</i>	نسبة التسليح العرضي
<i>Spiral Reinforcement Ratio</i>	نسبة التسليح الحلزوني
<i>Sample, Specimen</i>	نموذج
<i>Test Sample</i>	نموذج اختبار
<i>Concrete Permeability</i>	نفوذية الخرسانة
<i>Settlement</i>	هبوط
<i>Foundation Settlement</i>	هبوط الأساسات
<i>Soil Settlement</i>	هبوط التربة
<i>Differential Settlement / Irregular/</i>	/ غير منتظم/ هبوط تفاضلي
<i>Uniform Settlement</i>	هبوط منتظم
<i>Brittleness</i>	هشاشة
<i>Semi- solid Joint</i>	عقدة شبه صلدة
<i>Solid Joint</i>	عقدة صلدة
<i>Unit Weight</i>	وزن حجمي
<i>Own Weight</i>	وزن ذاتي
<i>Specific Weight</i>	وزن نوعي

جداول ملحقة
Additional Tables



الجدول (م- 1) مساحات قضبان التسليح وفقاً للقطر والعدد.

عدد القضبان القطر [mm]	مساحة مقطع القضبان [mm ²]											وزن المتر الطولي للقضيب [kg]	
	1		2		3		4		5		6		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
3	0,071	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,57	0,64	0,71	0,78	0,85	
4	0,126	0,25	0,36	0,50	0,63	0,76	0,88	1,01	1,13	1,26	1,39	1,52	
5	0,196	0,39	0,59	0,79	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96	2,15	2,34	
6	0,283	0,57	0,86	1,13	1,42	1,7	2,0	2,26	2,55	2,83	3,12	3,41	
7	0,385	0,77	1,15	1,54	1,92	2,31	2,69	3,08	3,46	3,85	4,23	4,62	
8	0,503	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,53	5,03	5,53	6,03	
10	0,789	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85	8,64	9,42	
12	1,131	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31	12,44	13,57	
14	1,539	3,08	4,62	6,16	7,69	9,23	10,77	12,31	13,85	15,39	16,93	18,47	
16	2,011	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,1	20,11	22,12	24,13	
18	2,545	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,9	25,45	28,0	30,55	
20	3,142	6,28	9,41	12,56	15,71	18,85	21,99	25,14	28,28	31,42	34,56	37,7	
22	3,801	7,60	11,4	15,2	19	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01	41,81	45,61	
25	4,909	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,13	49,09	53,94	58,8	
28	6,158	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,1	49,26	55,42	61,58	67,74	73,9	
32	8,042	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,3	64,34	72,38	80,42	88,46	96,5	
36	10,18	20,36	30,54	40,72	50,9	61,08	71,26	81,44	91,62	101,8	111,98	122,16	
40	12,56	25,12	37,68	50,24	62,8	75,36	87,92	100,48	113,04	125,6	138,16	150,72	

الجدول (م-2) الأبجدية الإغريقية.

كبير	صغير	اللفظ باللغة الإنكليزية	اللفظ باللغة العربية
A	α	<i>Alpha</i>	ألفا
B	β	<i>Beta</i>	بيتا
Γ	γ	<i>Gamma</i>	غاما
Δ	δ	<i>Delta</i>	ديلتا
E	ϵ	<i>Epsilon</i>	إبسيلون
Z	ζ	<i>Zeta</i>	زيتا
H	η	<i>Eta</i>	إيتا
Θ	θ	<i>Theta</i>	ثيتا
I	ι	<i>Iota</i>	إيوتا
K	κ	<i>Kappa</i>	كابا
Λ	λ	<i>Lambda</i>	لامبدا
M	μ	<i>Mu</i>	ميو
N	ν	<i>Nu</i>	نيو
Ξ	ξ	<i>Xi</i>	كسي
O	\omicron	<i>Omicron</i>	أوميكرون
Π	π	<i>Pi</i>	بي
P	ρ	<i>Rho</i>	رو
Σ	σ	<i>Sigma</i>	سيجما
T	τ	<i>Tau</i>	تاو
Υ	υ	<i>Upsilon</i>	أبسيلون
Φ	ϕ	<i>Phi</i>	فاي
X	χ	<i>Khi</i>	خي
Ψ	ψ	<i>Psi</i>	بسي
Ω	ω	<i>Omega</i>	أوميغا

العلاقات بين وحدات النظام الدولي SI والنظام المتري

في هذا الكتاب، تم اعتماد الوحدات المدرجة في النظام الدولي SI، وهي الوحدات التي تميل معظم الكودات العالمية حالياً إلى استعمالها. أما وحدات النظام المتري فقد استقر رأي معظم الكودات العالمية على التخلي عنها.

وبالنظر لأن معظم المهندسين ما يزالون معتادين على وحدات النظام المتري أكثر من النظام الدولي، فيما يلي أهم العلاقات التي تربط الواحدات في كلا النظامين المذكورين.

يبين الجدول (م-3) مضاعفات وأجزاء النظام الدولي، ويبين الجدول (م-4) العلاقات علاقات التحويل بين الواحدات المستخدمة في كلا النظامين.

الجدول (م-3) مضاعفات وأجزاء وحدات القياس في النظام الدولي SI.

اللفظ باللغة العربية	اللفظ باللغة الإنكليزية	الرمز	عامل الضرب
تيرا	<i>Tera</i>	<i>T</i>	10^{12}
غيغا	<i>Giga</i>	<i>G</i>	10^9
ميغا	<i>Mega</i>	<i>M</i>	10^6
كيلو	<i>Kilo</i>	<i>k</i>	10^3
هيكو	<i>Hekto</i>	<i>h</i>	10^2
ديكا	<i>Deka</i>	<i>da</i>	10^1
ديسي	<i>Decy</i>	<i>d</i>	10^{-1}
سينتي	<i>Centi</i>	<i>c</i>	10^{-2}
ميلي	<i>Mili</i>	<i>m</i>	10^{-3}
ميكرو	<i>Mikro</i>	μ	10^{-6}
نانو	<i>Nano</i>	<i>n</i>	10^{-9}
بيكو	<i>Piko</i>	<i>p</i>	10^{-12}
فيمنثو	<i>Femto</i>	<i>f</i>	10^{-15}
أتو	<i>Atto</i>	<i>a</i>	10^{-18}

الجدول (م-4-1) وحدات القياس وفقاً للنظامين الدولي والمترى.

نوع القياس	وحدات النظام الدولي		وحدات النظام المترى		علاقة التحويل	
	الوحدة	الرمز	الوحدة	الرمز	إلى النظام الدولي	إلى النظام المترى
1	2	3	4	5	6	7
الطول	متر	m	متر	m	1m=1m	1m=1m
الكتلة	كيلوغرام	kg	كيلوغرام	kg	1kg=1kg	1kg=1kg
السرعة	متر لكل ثانية	m/s	متر لكل ثانية	m/s	1m/s=1m/s	1m/s=1m/s
التسارع الخطى	متر لكل ثانية مربعة	m/s ²	متر لكل ثانية مربعة	m/s ²	1m/s ² = 1m/s ²	1m/s ² = 1m/s ²
الزوايا المستوية	درجة°	راديان	rad	1° = $\frac{\pi}{180}$ rad	1 rad = $(\frac{180}{\pi})^\circ$
			غراد	Grad	1° = $\frac{10}{9}$ grad	1 grad = $(\frac{9}{10})^\circ$
الزمن	ثانية	s	ثانية	s	1s=1s	1s=1s

درجة الحرارة	درجة مئوية	درجة مئوية	درجة مئوية	درجة مئوية	درجة مئوية
	كلفين	درجة	°C	درجة مئوية	°C
			-		
		K			

$T_F = (T_c \times \frac{9}{5}) + 32$	$T_c = (T_F - 32) \times \frac{5}{9}$	-	-	F	درجة فارنهايت	
1kgf=9.81N 1tf=9.81kN	1N= = 0.102kgf 1kN=0.102tf	Kgf tf	كيلوغرام قوة طن قوة	N kN	نيوتن كيلونيوتن	القوة
1kgfcm= 0.098Nm 1kgfm= 0.00981kNm 1tf= 0.00981MNm	1Nm= 10.2kgfcm 1kNm=102 kgfm 1MNm= 102 tf m	kgfm kgf m tf m	كيلوغرام قوة سنتمتر كيلو غرام قوة متر طن قوة متر	Nm kNm MNm	نيوتن متر كيلو نيوتن متر ميغا نيوتن متر	العزم
1tf/m ² = 9.81kPa 1kgf/cm ² = 0.0918MPa 1atm= 0.0981MPa	1kPa=0.102 tf/m ² 1MPa=10.2 kgf/cm ² 1MPa= 10.2 atm	tf/m ² kgf/ m ² atm	طن قوة للمتر المربع كيلو غرام قوة للسنتمتر المربع ضغط جوي نظامي	Pa= N/m ² kPa = kN/m ² MPa= N/mm ²	باسكال كيلو باسكال ميغا باسكال	الاجهادات والضغط

الجدول (م-4-ب) عوامل التحويل بين وحدات النظام الدولي SI ونظام الباوند-إنش.

الرموز في نظام الباوند- إنش		
kip	Kilo pound	
psi	Pound per square inch	
pcf	Pound per cubic foot	
ksi	Kilo pound per square inch	
ksf	Kilo pound per square foot	
ft	foot	
i	inch	
عوامل التحويل Conversion Factors		
من	إلى	عامل الضرب
Kilo pound	Pound	10^3
kip	kN	4.448
N	Lb (Libra)	0.225
Lb	N	4.448
Inch	mm	25.4
Foot	cm	$30 \approx 0.3048$
psi	MPa	6.895×10^{-3}
MPa	psi	145
ksi	MPa	6.895
MPa	ksi	0.145
kip-ft	kNm	1.356
kNm	kip-ft	0.7375
kip/ft	kN/m	14.59
kN/m	Lb/ft	68.52
kcf	kN/m ³	160
ksf	kN/m ² , kPa	47.88
ksf	MPa	≈ 0.048

الجدول (م-5) الأوزان الحجمية لبعض المواد الأكثر استخداماً.

الوزن الحجمي، kN/m^3	العنصر
24	الخرسانة العادية دون تسليح
78.5	الفولاذ
25	الخرسانة المسلحة بنسبة 1%
30	الحجر البازلتى (حجم مليء)
28	الحجر الغرانيتي (حجم مليء)
27	الحجر الكلسي (حجم مليء)
23	الحجر الرملي (حجم مليء)
19-14	البلوك (الطوب) المجوف
18-15	البحص الزلط (حجم طبيعي غير مدكوك)
18-15	الرمال (حجم طبيعي غير مدكوك)
12-15	الإسمنت (فلت)
20-18	البناء العادي بالمونة
20-12	الخرسانة خفيفة الوزن
14	البناء بالحجر الخرساني المجوف
14	البناء بالبلوك (الطوب) المجوف
25-24	بلاط الرخام أو السيراميك
20	الطينة (لا يقل سمك الطين عن 20mm من كل جهة من الحوائط)
23	المجبول الإسفلتي

الجدول (م - 6) استمارة نتائج اختبار شد حديد التسليح ..

رقم الطلب:				الجمهورية العربية السورية			
تاريخ الطلب:				جامعة دمشق - كلية الهندسة المدنية			
رقم إيصال وتاريخ تسديد الفاتورة:				مخابر كلية الهندسة المدنية			
				تاريخ الاختبار			
				العدد الكلي للعينات المختبرة:			
							رقم العينة
							رمز العينة
							نوع العينة
							القطر الاسمي / ϕ / (مم)
							وزن العينة (كغ)
							طول العينة / ل / (سم)
							وزن المتر الطولي (غ / م)
						قبل التجربة	طول العينة ل = 5 ق (سم)
						بعد التجربة	
						المطلقة	الاستطالة
						النسبية (%)	
							حمولة المرونة (كغ)
							حد المرونة (كغ / سم ²)
							حمولة الانقطاع (كغ)
							حد الانقطاع (كغ / سم ²)
							ملاحظات
				التاريخ			
				القائم بالتجربة			
				محاسب المختبر			
				المشرف على المختبر			
				عميد الكلية			

الجدول (م - 8) إحصائية حول الكتاب.

عدد الجداول	عدد الأشكال	عدد الكلمات	عدد الصفحات	أجزاء الكتاب	
11	23	12654	64	الفصل (1)	الباب الأول
4	9	2413	20	الفصل (2)	
10	1	3563	20	الفصل (3)	
3	18	5538	34	الفصل (4)	
-	17	4088	26	الفصل (1)	الباب الثاني
-	7	2434	14	الفصل (2)	
4	16	5797	46	الفصل (3)	
4	35	10912	88	الفصل (4)	
1	21	6872	46	الفصل (5)	
4	32	7159	54	الفصل (6)	
2	17	5238	38	الفصل (7)	
6	12	5747	38	الفصل (8)	
7	35	8141	62	الفصل (9)	
-	-	2687	14	المقدمة و الفهرس	
-	-	1594	16	المعجم	
-	-	384	4	المراجع	
8	-	87	12	الجداول الملحقة	
-	-	97	8	البقية	
64	226	85405	604	المجموع	

تم بعونه تعالى

اللجنة العلمية :

- أ. د. م. محمد غريب

- د. م. عصام مالك

- د. م. زهير عامر

المدقق اللغوي : د. محمد عبد الله قاسم

- حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات -

All rights are reserved to the directorate of books and publications,
Damascus University