



آلات الجريان





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

آلات الجريان

الدكتور المهندس

علي خلوف

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

الدكتور المهندس

فريد أبو حامد

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

الدكتور المهندس

حكمت الأحمد

مدرس في قسم الميكانيك العام

الدكتور المهندس

عاصم قداح

مدرس في قسم الميكانيك العام

جامعة دمشق

Damascus University



الفهرس

مقدمة

15	الفصل الأول : مراجعة عامة في ميكانيك الموائع
19	1 - 1 - الخواص الفيزيائية للموائع
19	1 - 2 - توازن الموائع
20	1 - 2 - 1 - المعادلة الهيدروستاتيكية الأساسية
20	1 - 2 - 2 - قياس الضغط
21	1 - 2 - 3 - حساب قوة ضغط السائل على جدران الأوعية
23	1 - 2 - 4 - قوة الرفع الهيدروستاتيكية ، الطفو
24	1 - 3 - حركة الموائع
26	1 - 3 - 1 - مفهوم الجملة وحجم المراقبة
26	1 - 3 - 2 - معادلة الاستمرار ومعادلة الحركة ومعادلة القدرة
27	1 - 3 - 3 - المعادلة العامة لحركة الموائع
27	1 - 3 - 4 - معادلة الاستمرار
28	1 - 3 - 5 - معادلة الحركة
29	1 - 4 - تحريك السوائل
31	1 - 4 - 1 - معادلة برنولي (م. الطاقة) وتطبيقاتها مع وجود مضخة
31	1 - 4 - 2 - قانون الدفع الخطي وقانون الدفع الدوراني
34	1 - 5 - الجناح الحامل
37	1 - 5 - 1 - مفهوم الجولان
37	1 - 5 - 2 - نظرية الجناح الحامل
38	1 - 5 - 3 - القوى و العزوم المؤثرة على الجناح الحامل
40	1 - 5 - 4 - توزيع الضغط على الجناح الحامل
43	1 - 6 - الجريانات في الأنابيب
43	الفصل الثاني : المضخات وأنظمة الضخ (التصنيفات ومبدأ العمل)
49	2 - 1 - الآلات الهيدروليكية
49	2 - 2 - آلات الضخ
49	

55	3-2 - تصنيف المضخات من حيث خواص السائل المضخوخ والبارامترات الأساسية
56	2 - 4 - التطبيقات الصناعية لآلات الضخ المختلفة
59	2 - 5 - المؤشرات الديناميكية لمحطة الضخ
63	2 - 6 - البارامترات الفنية الرئيسية المميزة لعمل آلات الجريان
69	الفصل الثالث : آلات الضخ الطاردة المركزية
69	3 - 1 - المواصفات ومبدأ العمل
70	3 - 2 - الدوالاب الدائر
71	3 - 2 - 1 - الضاغط النظري الذي يعطيه الدوالاب الدائر (معادلة أويلر الحركية)
76	3 - 2 - 2 - تأثير زاوية الخروج β_2 على الضغط النظري الذي تولده الآلة
77	3 - 2 - 3 - الضغط الفعلي الذي تولده آلة الضخ الطاردة المركزية
78	3 - 2 - 4 - دراسة طبيعة الجريان بين ريش دوارة مستقيمة قطرية وفي مستوى الشكل
80	3 - 2 - 5 - تأثير تغير ظروف التشغيل في مثاقبات السرعة :
81	3 - 2 - 6 - حساب بعض القيم الرئيسية للدوارة
82	3 - 2 - 7 - فوائد الضغط في الدوارة
83	3 - 3 - فرع السحب وفرع الضخ وتصميم الغلاف الخارجي
83	3 - 3 - 1 - فرع السحب
84	3 - 3 - 2 - فرع الضخ
88	3 - 3 - 3 - طريقة تقريبية لحساب أبعاد الغلاف الحلزوني
89	3 - 4 - الضغط المحوري وسبل الوقاية منه
93	3 - 5 - المضخات الطاردة متعددة المراحل
96	3 - 6 - المضخات العمودية والمضخات الغاطسة
97	3 - 6 - 1 - المضخة العمودية
101	3 - 6 - 2 - المضخة الغاطسة
109	الفصل الرابع : المنحنيات المميزة لآلات الضخ ذات الريش .
109	4 - 1 - المنحنيات المميزة النظرية
109	4 - 1 - 1 - الضاغط النظري وعلاقته بالغزارة $H_T = f(Q)$
111	4 - 1 - 2 - العزم النظري M_T وعلاقته بالغزارة $M_T = f(Q)$

112	3-1-4 - الاستطاعة النظرية و علاقتها بالغازة $N_T = f(Q)$
112	4-1-4 - حالات خاصة
115	2-4 - المنحنيات المميزة الفعلية لألة الضخ الطاردة من أجل عدد دورات ثابت
116	1-2-4 - المنحني المميز للضاغط الفعلي للمضخة
117	2-2-4 - المنحني المميز للاستطاعة الفعلية
118	3-2-4 - تحديد شكل منحني المردود للألة
119	4-2-4 - ملاحظات واستنتاجات
120	3-4 - استطاعة ومردود آلة الضخ
121	1-3-4 - تحديد استطاعة المحرك الكهربائي
122	2-3-4 - مردود آلة الضخ
123	4-4 - وصل المضخات (على التسلسل وعلى التفرع)
123	1-4-4 - وصل المضخات على التسلسل
124	2-4-4 - المنحني المميز لمجموعة مضخات عند وصلها على التسلسل:
125	3-4-4 - وصل المضخات على التفرع
127	5-4 - التشابه في الآلات الطاردة
127	1-5-4 - شروط التشابه للآلات الطاردة
129	2-5-4 - قوانين التشابه العامة
130	3-5-4 - قانون النسب الخاصة
131	6-4 - العدد النوعي للدورات
132	1-6-4 - استخدام العدد النوعي للدورات (n_e) عند اختيار آلات الضخ ذات الريش
132	2-6-4 - علاقة شكل المنحنيات المميزة لألة الضخ بالعدد النوعي للدورات
133	7-4 - طرق الانتقال من منحني مميز إلى آخر
134	1-7-4 - الانتقال من منحني مميز إلى آخر عند تغيير عدد الدورات
136	2-7-4 - الانتقال من منحني مميز إلى آخر عند تغيير قطر الدوارة
136	3-7-4 - تأثير لزوجة السائل على البارامترات الأساسية للمضخة
139	الفصل الخامس : عمل المضخات في منظومات الضخ
141	1-5 - أنابيب النقل وتجهيزاتها

142	5 - 1 - 1 - المتطلبات الأساسية الواجب توفرها في أنابيب النقل المستخدمة في
145	العمليات التكنولوجية
146	5 - 1 - 2 - تجهيزات الشبكات
150	5 - 2 - المنحني المميز للشبكة وتحديد نقطة التشغيل
150	5 - 2 - 1 - التمثيل البياني للمنحني المميز للشبكة
152	5 - 2 - 2 - تحميل المنحنيات المميزة وتحديد نقطة تشغيل الآلة
155	5 - 3 - العوامل المؤثرة على المنحني المميز للشبكة و نقطة التشغيل
155	5 - 4 - وصل الأنابيب على التسلسل وعلى التفرع
156	5 - 4 - 1 - وصل الأنابيب على التسلسل
157	5 - 4 - 2 - وصل الأنابيب على التفرع
160	5 - 5 - عمل مجموعة آلات الضخ على التسلسل وعلى التفرع (الضاغط المخفض)
163	5 - 6 - استقرار عمل الآلات و ظاهرة الوميحاج
164	5 - 7 - المطرقة المائية في الأنابيب
165	5 - 7 - 1 - موجة الطرق والضغط
166	5 - 7 - 2 - الطرق المباشر وغير المباشر
168	5 - 8 - ارتفاع السحب المصموج به وارتفاع تثبيت المضخة
173	5 - 9 - ارتفاع السحب الموجب الصافي
174	5 - 10 - التكيف في محطات الضخ
175	5 - 10 - 1 - مؤشرات ظهور التكيف
178	5 - 10 - 2 - العوامل المساعدة على حدوث التكيف
179	5 - 10 - 3 - إجراءات الحد من احتمال حدوث التكيف
179	الفصل السادس : المضخات المحورية والمضخات الإعصارية
179	أولاً: 6 - 1 - المضخات المحورية
181	6 - 1 - 1 - الأساس النظري
188	6 - 1 - 2 - المعادلات النظرية الأساسية
191	6 - 1 - 3 - أداء وفاعلية المضخات المحورية
	6 - 1 - 4 - حساب المضخات المحورية

194	6 - 1 - 5 - المميزات وضبط التدفق .
195	ثانياً: 6 - 2 - المضخات الإعصارية
196	6 - 2 - 1 - طريقة عمل المضخة الإعصارية
197	6 - 2 - 2 - الأساس النظري
200	6 - 2 - 3 - المميزات الفعلية
201	6 - 2 - 4 - موازنة القوى المؤثرة في دولاب المضخة الإعصارية
202	6 - 2 - 5 - المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية
205	الفصل السابع : المضخات النافثة ومضخات الرفع الهوائي
205	أولاً: 7 - 1 - المضخات النافثة
205	7 - 1 - 1 - نظرية التشغيل ، مفاهيم أساسية
207	7 - 1 - 2 - أداء المضخات النافثة وحسابها
213	7 - 1 - 3 - حساب المضخة النافثة المائية
215	7 - 1 - 4 - المنحنيات المميزة للمضخات النافثة والتحكم بالغزارة
216	ثانياً: 7 - 2 - مضخات الرفع الهوائي
216	7 - 2 - 1 - نظرية التشغيل ، مفاهيم أساسية
219	7 - 2 - 2 - ضغط الهواء المطلوب وكميته
221	7 - 2 - 3 - استطاعة الضاغط
222	7 - 2 - 4 - تطبيقات مضخة الرفع الهوائي
223	الفصل الثامن : المضخات المكبسية والمضخات المسننية والمضخات اللولبية
223	أولاً: 8 - 1 - المضخات المكبسية
223	8 - 1 - 1 - مبدأ العمل والتصنيف
225	8 - 1 - 2 - التدفق الوسطي النظري و التدفق اللحظي النظري
227	8 - 1 - 3 - الحورات الهوائية ومخطط مؤشرات الأداء
229	8 - 1 - 4 - استطاعة ومردود المضخة المكبسية
231	8 - 1 - 5 - المنحنيات المميزة والعمل في منظومة ضخ
233	8 - 1 - 6 - تنظيم الغزارة في المضخات المكبسية
234	ثانياً: 8 - 2 - المضخات الصفاحية

236	ثالثاً: 8 - 3 . المضخات التخلخلية - الدائرية المائية
236	8 - 3 - 1 - مبدأ العمل
237	8 - 3 - 2 - التخلخل - الغزارة - الاستطاعة
238	رابعاً: 8 - 4 - المضخات المستنتية
241	خامساً: 8 - 5 - المضخات اللولبية
243	الفصل التاسع : الضواغط
243	9 - 1 - المفاهيم الأساسية
243	9 - 2 - أنواع الضواغط
244	9 - 2 - 1 - المبادئ التصميمية للضواغط
246	9 - 3 - ترموديناميك عملية الانضغاط
249	9 - 4 - المردود في الضواغط
251	9 - 5 - التبريد - مفهوم الانضغاط متعدد المراحل
252	9 - 6 - المواصفات الديناميكية للضواغط ذات الريش - تحديد المواصفات
253	9 - 6 - 1 - تحديد المواصفات عند تغير سرعة الدوران
254	9 - 6 - 2 - تحديد المواصفات عند تغير الخواص الفيزيائية للغاز
257	الفصل العاشر : تصنيف الضواغط ومواصفاتها
257	أولاً : الضواغط ذات الريش
257	10 - 1 - الضواغط الطاردة المركزية
257	10 - 1 - 1 - الضاغط الطارد المركزي المرحلي
260	10 - 1 - 2 - استطاعة الضاغط الطارد المركزي
260	10 - 2 - الضواغط المحورية
260	10 - 2 - 1 - مرحلة من الضاغط المحوري
263	10 - 2 - 2 - الأشكال التصميمية للضواغط المحورية
265	ثانياً : الضواغط الحجمية
265	10 - 3 - الضواغط المكبسية
265	10 - 3 - 1 - المخطط الرمزي للضاغط المكبسي
266	10 - 3 - 2 - عمليات انضغاط وتمدد الغاز في الضاغط المكبسي

267	10 - 3 - 3 - الاستطاعة والمردود
268	10 - 3 - 4 - الفراغ الميت - التدفق
271	10 - 3 - 5 - النماذج التصميمية للضواغط
274	10 - 3 - 6 - غزارة وضغط الضاغط المكبسي العامل على الشبكة
275	10 - 3 - 7 - تنظيم الغزارة في الضاغط المكبسي
278	10 - 4 - 4 - الضواغط الدورانية
278	10 - 4 - 1 - مبدأ العمل - التدفق
281	10 - 4 - 2 - الاستطاعة والمردود
281	10 - 4 - 3 - تنظيم غزارة الضواغط الدورانية
283	الفصل الحادي عشر : المراوح تصنيفها واستخدامها
283	11 - 1 - تصنيف المراوح
283	11 - 1 - 1 - المراوح الطاردة
288	11 - 1 - 2 - المراوح المحورية
291	11 - 2 - مقارنة بين المراوح الطاردة والمراوح المحورية
292	11 - 3 - العدد النوعي للدورات (n _s)
293	11 - 4 - الضغط الذي تولده المروحة
295	11 - 5 - استطاعة ومردود المروحة
297	11 - 6 - عمل المراوح في الشبكة
303	11 - 7 - اختيار المراوح
310	11 - 8 - استعمال المنحنيات المميزة في اختيار المراوح
313	11 - 9 - العمل المشترك للمراوح في الشبكة
317	الفصل الثاني عشر : السلوك الأيروديناميكي للمراوح ومولدات الطاقة الريحية
317	12 - 1 - نظرية المروحة
323	12 - 2 - الحساب الأيروديناميكي للمراوح الطاردة
328	12 - 3 - الحساب الأيروديناميكي للمراوح المحورية
335	12 - 4 - السلوك الأيروديناميكي عبر عتقة ريحية
339	12 - 5 - الأنفاق الهوائية

339	12 - 5 - 1 - تصنيف الأنفاق الهوائية
344	12 - 5 - 2 - مكونات النفق الهوائي
349	الفصل الثالث عشر : المحطات الكهرومائية
349	13 - 1 - تمهيد
350	13 - 2 - الوضع الطاقى في سورية
352	13 - 3 - المميزات الفنية لاستثمار المحطات الكهرومائية
354	13 - 4 - المحطات الكهرومائية في سورية
358	13 - 5 - الأسس و المبادئ الفيزيائية
359	13 - 5 - 1 - مبدأ عمل المحطة الكهرومائية
359	13 - 5 - 2 - ضاغط العنف
360	13 - 5 - 3 - استطاعة العنف
361	13 - 6 - التوصيف التقني
361	13 - 7 - نماذج البناء والتصنيف
364	13 - 7 - 1 - العنفات ذات رد فعل
364	13 - 7 - 2 - العنفات ذات فعل - دفعية
364	13 - 7 - 3 - المحطات الثانوية (المساعدة)
366	13 - 8 - طرق اختيار العنفات
368	13 - 9 - مكونات المحطة الكهرومائية
369	13 - 9 - 1 - السد
370	13 - 9 - 2 - بحيرة السد - الخزان
371	13 - 9 - 3 - بوابات السد
371	13 - 9 - 4 - بوابات الدخول
371	13 - 9 - 5 - أنابيب النقل (قناة ضبط الجريان)
371	13 - 9 - 6 - الحلزونات
373	13 - 9 - 7 - الموجه
374	13 - 9 - 8 - الموزع
374	13 - 9 - 9 - حجرة دولاب العنف

374	13 - 9 - 10 - دولاب العنف
382	13 - 9 - 11 - عمود الربط ونقل الحركة
383	13 - 9 - 12 - المولدة والمحوّلة
383	13 - 9 - 13 - حجرة الطاقة
384	13 - 9 - 14 - أنبوب التفريغ السفلي
391	13 - 9 - 15 - المعايرة ونظام الربط مع الشبكة
392	13 - 10 - الضياعات في العنف
394	13 - 11 - المحطات الكهرومائية الصغيرة المقامة على الأنهار
397	13 - 11 - 1 - تصنيف المحطات الكهرومائية الصغيرة
399	13 - 11 - 2 - محاسن استخدام المحطات الكهرومائية الصغيرة ومساوئها
400	13 - 11 - 3 - نماذج من المحطات الكهرومائية الصغيرة في سورية
403	الفصل الرابع عشر : أسس نظرية عمل العنفات المائية والتحكم بأدائها
403	14 - 1 - التيار الناشئ عن جهاز التوجيه في العنفات الرد فعلية
406	14 - 2 - حركة التيار في الدولاب العامل للعنفات الرد فعلية
410	14 - 3 - نظام عمل العنف
412	14 - 4 - معادلة الطاقة الأساسية للعنف (معادلة أويلر)
416	14 - 5 - خواص دورة العمل في العنفات المغرفية
418	14 - 6 - أنظمة التحكم والقيادة.
418	14 - 6 - 1 - ميكانيزم تنظيم استطاعة العنفات
419	14 - 6 - 2 - المحرك الموازر - محرك التشغيل (السيرفو. موتور) لجهاز التوجيه
422	14 - 6 - 3 - آلية تدوير ريش الدولاب العامل في العنفات ذوات الريش الدورانية
423	14 - 6 - 4 - تنظيم عمل العنفات
433	الفصل الخامس عشر : تصاميم العنفات المائية ذات الفعل - العنفات المغرفية
433	15 - 1 - التوصيف الفني لعنفه بلتون
437	15 - 2 - آلية عمل العناصر التصميمية لعنفه بلتون
441	15 - 3 - تصميم مكونات عنفه بلتون

451	الفصل السادس عشر : تصاميم العنفات المائية ذات رد الفعل
451	أولاً: 16 - 1 - تصميم العنفات القطرية المحورية (عنفة فرنسيس)
451	16 - 1 - 1 - التوصيف الفني لعنفة فرنسيس
453	16 - 1 - 2 - آلية عمل العناصر التصميمية لعنفة فرنسيس
455	16 - 1 - 3 - تصميم مكونات عنفة فرنسيس
461	ثانياً: 16 - 2 - العنفات المحورية (عنفة كابلان)
461	16 - 2 - 1 - التوصيف الفني لعنفة كابلان
469	16 - 2 - 2 - آلية عمل العناصر التصميمية لعنفة كابلان
471	16 - 2 - 3 - تصميم مكونات عنفة كابلان
475	الفصل السابع عشر : العنفات: اختيارها والمخاطر التي تتعرض لها
475	17 - 1 - تشابه العنفات وقوانين تشابه أنظمة عملها
478	17 - 2 - بارامترات التحويل للعنفات
478	17 - 3 - العدد النوعي لدورات العنفة (n_s)
480	17 - 4 - التكيف في العنفات المائية
480	17 - 4 - 1 - ظاهرة التكيف
482	17 - 4 - 2 - النخر التكيفي
483	17 - 4 - 3 - ثابت التكيف وارتفاع السحب المسموح به
488	17 - 5 - المطرقة المائية (الهيدروليكية)
496	17 - 6 - المنحنيات المميزة للعنفات
501	المراجع
505	الرموز والمصطلحات
511	الملحقات

تقديم

عرف الإنسان منذ القديم نظام دفع الماء و الهواء بغية ري الأراضي و تسخير الينابيع و نهوية الأماكن و غيرها باستعمال الميكانيزمات الناتجة عن فعل الماء و الهواء، وعن القوة العضلية للإنسان أو للحيوانات، وكان رفع المياه و طحن الحبوب عملاً يومياً في معظم مناطق العالم القديم .

تعد المصادر المائية ذات تقنية معروفة و مستخدمة منذ عقود طويلة ، وقد تطورت تقنية هذا المصدر من دولاب خشبي يقوم بتحويل قسم قليل من طاقة المياه إلى طاقة ميكانيكية إلى توربين و مولد ينتج طاقة كهربائية بكفاءة تصل إلى 90%، ولا أحد يعرف بالتحديد متى تم اختراع الدولاب المائي water wheel ، ولكن منظومات الري كانت موجودة قبل أكثر من 500 عام وإن أقدم جهاز كان اسمه نوركا norica وكان يقوم برفع الماء من نهر إلى خزان أو منظومة قنوات، هذا الجهاز استخدم قبل ميلاد السيد المسيح عليه السلام في بلاد الشام و الشرق الأقصى .

إن أقدم طاحونة مائية تدعى نورس Norse أو الطاحونة الإغريقية ، وقد ظهرت في مناطق الشرق العربي في القرن الثاني بعد الميلاد ، ثم ظهرت بعد عدة قرون في الدول الاسكندنافية ، وفي القرون اللاحقة أنشئت مطاحن مائية متطورة في الامبراطورية الرومانية وما جاورها في بلاد الشام و أوروبا .

وفي فترة ما بين 1650 و 1800 ميلادية أجريت عدة بحوث علمية لتحسين أداء دولاب المياه .

في عام 1832 اخترع مهندس فرنسي شاب اسمه Benoit Fourneyron دولاباً مائياً ذا كفاءة عالية، وبعد عدة سنوات استطاع المهندس الأمريكي جيمس فرانسيس James francis إنجاز تجارب كثيرة على عنفات ذات جريان دائري داخلي ، وبعد نصف قرن من التطور و قبل أن يكتشف فارادي faradays أن الكهرباء يمكن تحويلها إلى محطات كهربائية رئيسية ادعى غولدالمنغ Goldalming في عام 1881 إمكانية تجهيز مناطق مختلفة بالكهرباء من دولاب مائي ، وفي المرحلة نفسها تم اختراع دولاب بلتون Pelton wheel عام 1880 ، أما عنفة الإفتتاح turgo turbine فقد تم تطويرها عام 1920 باعتبارها إحدى العنفات المختلفة عن دولاب بلتون .

لقد أدى اختراع الآلة البخارية إلى ظهور المضخة المكبسية البخارية وإلى ظهور آلة دفع الهواء المكبسية غير أن اختراع المحرك الكهربائي أدى إلى ظهور المضخات و المراوح الطاردة و المحورية .

وفي عام 1832 اخترع المهندس سابلوكوف مروحة طاردة مكونة من جسم دائري (هيكل المروحة) يسمح بسحب الهواء من الجهتين ومن دوارة مزودة بأربع ريش مستقيمة و متوضعة داخل هذا الجسم ، بعد ذلك اخترع هذا المهندس المروحة المحورية واستعملها في تهوية مناجم الفحم الحجري ، ومع بداية القرن العشرين تم التوسع باستعمال المضخات الطاردة و النافثات لتسريع المياه الساخنة في شبكات التدفئة وكان العالم اويلر Euler قد وضع في القرن الثاني عشر الدراسة النظرية لعمل الآلات ذات الريش أما العالم جوكو فسكي فقد قام بوضع الدراسة النظرية للجناح الحامل التي تستعمل عند حساب المضخات و المراوح المحورية و تصميمها ، من جهة أخرى بذل العالمان برنولي و اويلر جهداً كبيراً لإيجاد النظرية الخاصة بعمل المحركات المائية واكتشف العام برنولي القانون الأساسي للهيدروديناميك الذي يحدد العلاقة بين الضغط و السرعة لتيار من السائل غير قابل للانضغاط ، أما العالم اويلر فقد وضع النظرية العائدة لعمل النفاثات المائية وحدد المعادلة الأساسية لهذا العمل و التي لا تزال تستعمل حتى يومنا هذا ، والعالم اويلر هو أول من اقترح ضرورة تزويد المحركات المائية بجهاز التوجيه، وأول من تقدم بمشروع لمحرك مائي يتضمن دوارة و جهازاً للتوجيه .

تأسيساً على جهود هؤلاء العلماء و التطور العلمي الحاصل توحدت هذه المفاهيم العلمية وتم تحديد مفهوم آلات الجريان بأنها تلك الآلات التي تعمل على تحويل القدرة الميكانيكية إلى قدرة نوعية للسائل أو تحويل القدرة النوعية للسائل إلى قدرة ميكانيكية ، و آلات الجريان التي تعمل على زيادة القدرة النوعية للسائل (القدرة الحركية) تسمى آلات الضخ (مضخات pump ، مراوح fan ، ضواغط compresor) و الآلات التي تستفيد من القدرة النوعية الحركية للسائل و تحويلها إلى قدرة ميكانيكية تسمى المحركات الهيدروليكية (النفاثات و المحركات الهيدروليكية الحجمية) .

اعتماداً على هذه المبادئ والتطبيقات تم إعداد هذا الكتاب الجامعي ليغطي احتياجات طلاب كليات الهندسة الميكانيكية الذين يدرسون مقرر آلات الجريان كمقرر تخصصي .
يغطي الكتاب مفردات مقرر آلات الجريان لطلاب السنة الرابعة ميكانيك عام ، ويجري العمل حالياً على إنجاز كتاب آخر مخصص للمسائل التي تتضمن تطبيقاً عملياً للأسس النظرية لآلات الجريان و التي تمثل موضوع هذا الكتاب وسيحتوي كتاب المسائل مجموعة من الأمثلة المحولة التي تساعد الطالب على فهم الكثير من المفاهيم النظرية إضافةً للكثير من المسائل غير المحولة التي تمثل تدريباً جيداً للطالب يساعده على أن يكون مهندساً ناجحاً بعد التخرج .
تم تأليف هذا الكتاب بالاستفادة من خبرة المؤلفين الطويلة في مجال تدريس مقرر آلات الجريان ومن المحاضرات التي ألقاها المؤلفون خلال السنوات الماضية ، وكذلك بالاستفادة من الكثير من المراجع والكتب التدريسية المستخدمة وبعده لغات حيث ساعد تعدد المؤلفين على إغناء الكتاب بسبب تنوع المدارس التي ينتمي إليها المؤلفون ، الأمر الذي أدى إلى الوصول للشمولية والوضوح وتغطية وإفحة للمواضيع المطروقة التي يهدف الكتاب إلى تغطيتها .
يمكن تقسيم مضمون هذا الكتاب إلى أربعة محاور كل منها يرتبط بأحد مجالات آلات الجريان وهذه المحاور هي :

المضخات والضواغط والمراوح و العنفات وفي كل محور من هذه المحاور تم استعراض الأسس النظرية والحسابية لهذا النوع من آلات الجريان وكذلك الجوانب الاستثمارية وبعض الظواهر السلبية الضارة بأداء هذا النوع من الآلات .

وزعت المحاور المطروقة على سبعة عشر فصلاً في كل منها تم إبراز معاني الكثير من الكلمات والمصطلحات باللغة الانكليزية عند ورودها لأول مرة وفي بعض الحالات مرات عدة لتساعد الطالب الذي يرغب باستخدام مراجع باللغة الانكليزية أو عند البحث في الانترنت لزيادة معارفه عن ذلك الموضوع .

تضمن الكتاب في الفصل الأول مراجعة سريعة لأهم المفاهيم والعلاقات الأساسية في ميكانيك السوائل التي تمثل القاعدة النظرية لآلات الجريان لتكون في متناول الطالب مستخدم الكتاب بيسر وسهولة يعود إليها عند الحاجة دون أن يحتاج للبحث عنها في كتب ومراجع أخرى ، وقدم الفصل الثاني عرضاً عاماً عن الآلات الهيدروليكية وتصنيف المضخات والمؤثرات الديناميكية و بارامترات عملية الضخ ، أما الفصول الثالث والرابع والخامس فقد خصصت للبحث في آلات الضخ الطاردة المركزية وخصائصها التصميمية والاستثمارية وكذلك بعض الظواهر الضارة التي

تنشأ في هذه الآلات أو في محطات الضخ أثناء استثمارها ، و في الفصول السادس والسابع والثامن غطيت الأنواع الأخرى من المضخات بحيث خصصنا لكل صنف من المضخات (مصنفة حسب مبدأ عملها) واحداً من هذه الفصول ، وفي الفصل التاسع عرضنا المفاهيم الأساسية المستخدمة عند دراسة الضواغط بينما خصص الفصل العاشر ليقدم عرضاً مختصراً عن أنواع الضواغط المختلفة موزعة حسب مبدأ عملها ، عرضت المراجع من حيث تصنيفها واختيارها واستخداماتها في الفصل الحادي عشر بينما أفرد الفصل الثاني عشر لدراسة السلوك الأيروديناميكي للمراوح ومولدات الطاقة الريحية ، وكذلك خصص الفصل الثالث عشر ليعرض واقع المحطات الكهرومائية في سوريا ولينتقل إلى دراسة عناصر هذه المحطات ومكوناتها وخصائصها التصميمية والاستثمارية لينتقل إلى الفصل الرابع عشر حيث يعرض أسس نظرية عمل العنفات المائية وطرق التحكم بأدائها ، أما الفصلان الخامس عشر والسادس عشر فبينما فيهما تصاميم العنفات ذات الفعل و العنفات ذات رد الفعل وخصص الفصل السابع عشر لدراسة طرق اختيار العنفات و بعض الظواهر السلبية التي يمكن أن تتعرض لها . كما زود الكتاب بمجموعة من الملاحق وفهرس الموضوعات إضافة لقائمة بالرموز والمصطلحات العلمية .

نأمل أن نكون قد وفقنا بتقديم كتاب جامعي مرجعي يلاقي توقعات طلبتنا الأعزاء ويلبي احتياجاتهم ، كما نأمل أن نكون قد أنجزنا كتاباً يرقى المكتبة الهندسية العربية بما يلزم في مجال آلات الجريان ويشكل إضافة بناءً مفيدة تلبي احتياجات الطلاب والمهندسين والباحثين في هذا المجال .

المؤلفون

دمشق

الفصل الأول

مراجعة عامة في ميكانيك الموائع

General Review Of Fluid Mechanics

1 - 1 - الخواص الفيزيائية للموائع : Fluid Properties

ميكانيك الموائع : هو علم ميكانيك الأجسام المائعة (Fluid) السائلة منها (Liquid) والغازية (Gas) ويعتمد على القوانين الأساسية ذاتها التي يستند إليها علم الميكانيك العام بهدف تفسير الظواهر الطبيعية المتعلقة بتوازن الموائع الساكنة والمتحركة ومن ثم محاولة وضع أسس وقواعد لتلك الظاهرة والاستفادة منها للتنبؤ عن حركة الموائع وخواصها في مختلف التطبيقات العملية والهندسية .

- الكثافة ρ : Density وهي عبارة عن كتلة واحدة الحجم $[kg/m^3]$ $\rho = \frac{m}{V}$

- الوزن النوعي γ : Specific Weight وهو وزن واحدة الحجم $[N/m^3]$ $\gamma = \rho \cdot g$

- اللزوجة μ : Viscosity

هي الصفة المميزة للموائع الحقيقية حيث تبدي مقاومة لتغير شكلها (حركة الأجسام ضمنها).
تحدد لزوجة السائل بثابت يسمى اللزوجة التحريكية μ ، وهو عبارة عن معامل تناسب بين إجهاد القص τ وسرعة التشوه (تدرج السرعة باتجاه الناظم على الجريان) و واحدتها

$$[\mu] = [Ns/m^2] = [Pa.s]$$

وكثيراً ما تستخدم اللزوجة الحركية ν الذي ينتج من حاصل قسمة اللزوجة التحريكية على كثافة السائل $\nu = \mu / \rho [m^2/s]$

لا تتغير قيمة اللزوجة التحريكية و اللزوجة الحركية بتغير الضغط في السوائل غير القابلة للانضغاط بينما تتناقص بشدة مع ارتفاع درجة الحرارة. أما في حالة الغازات فإن اللزوجة التحريكية لا تتغير بتغير الضغط وتنقص اللزوجة الحركية بزيادة الضغط بسبب زيادة الكثافة، وتزداد كل من اللزوجة التحريكية و اللزوجة الحركية بزيادة درجة الحرارة.

- الضغط p : Pressure

يمثل القوة النظمية المؤثرة في واحدة السطح وهو مقدار شعاعي جهته باتجاه الناظم على السطح ، لذلك فإن الضغط يمثل مقداراً سلمياً (له القيمة نفسها في كل الاتجاهات في نقطة معينة) .

.. ضغط التبخر p_v : Vapor Pressure

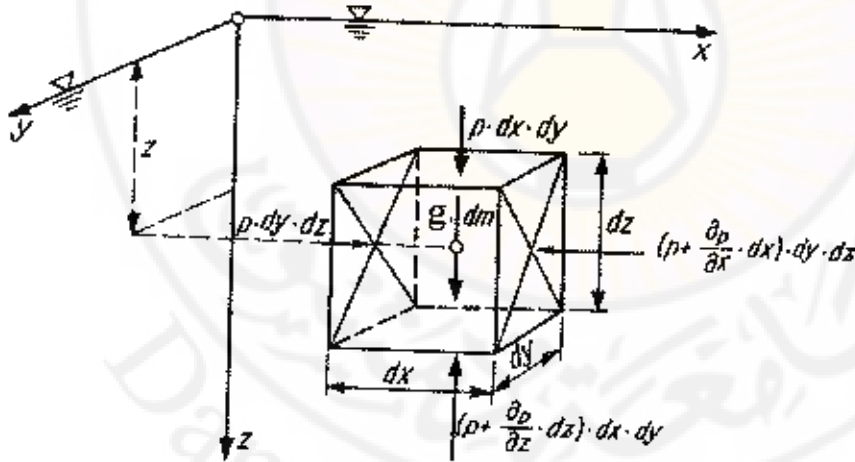
يطلق اسم ظاهرة التبخر على العملية التي يتحول فيها جزء من السائل تحت تأثير ضغط معين ودرجة حرارة معينة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. عندما تبدأ عملية التبخر لسائل يشغل حيزاً محدداً من إناء مغلق تماماً فإن الجزيئات المتبخرة تأخذ حجم الفراغ فوق السائل لتصل بعد فترة زمنية إلى كثافة معينة تتوقف عندها عملية التبخر (يصبح عدد الجزيئات المتبخرة مساوياً لعدد الجزيئات المتكاثفة) وبالتالي يكون هناك حالة توازن بين السائل وبخاره ونصل إلى حالة الإشباع ويطلق على الضغط السائد فوق سطح السائل اسم ضغط التبخر أو ضغط الإشباع p_v . وتزداد قيمته بازدياد درجة الحرارة.

إن لمعرفة قيمة ضغط التبخر أهمية عملية كبيرة بالنسبة للجريانات التي يبلغ فيها الضغط قيمة قريبة من ضغط التبخر. حيث يمكن أن يؤدي ذلك إلى نشوء ظاهرة التكيف الواجب تجنبها في المنشآت الهيدروليكية لما لها من آثار ضارة.

1 - 2 - توازن الموائع : Fluid Statics

1 - 2 - 1 - المعادلة الهيدروستاتيكية الأساسية : Basic Hydrostatic Equation

القوة الحجمية الوحيدة المؤثرة في السائل هي قوة ثقافته والنتيجة عن تسارع الجاذبية الأرضية $I_G = m \cdot g$ حيث g هو تسارع الجاذبية الأرضية والذي يفترض أنه ثابت.



الشكل (1 - 1) توازن القوى المؤثرة في جزء حجمي بشكل متوازي مستطيلات

ليكن لدينا سائل ساكن متجانس في حوض شكله غير محدد ومفتوح للأعلى (سطح السائل معرض للضغط الجوي) ، بفرض أن السطح الحر للسائل ينطبق على مستوى الإحداثيات xoy وأن المحور z شاقولي موجه نحو الأسفل. نقتطع من هذا السائل جزيئاً حجمياً متناهي الصغر بشكل متوازي مستطيلات أطوال أضلاعه dx, dy, dz ولنكن كتلته dm متوضعة في مركز ثقله الذي يبعد عن المستوى xoy مسافة z الشكل (I - 1) .

بما أن هذا العنصر في حالة توازن (نسبي أو مطلق) فيجب أن تكون محصلة القوى المؤثرة فيه معدومة . إن القوى المؤثرة في الجزيء هي القوى الناتجة عن الضغط على الجزيء وقوة ثقله.

بما أن الضغط تابع مكاني صرف $P = f(x, y, z)$ يغير قيمته من نقطة إلى أخرى فإن قيمة الضغط في النقطة $(x + dx, y, z)$ يمكن أن يحسب بالعلاقة $p(x, y, z) + \frac{\partial p}{\partial x} dx$ وذلك إذا نشرنا التابع بشكل سلسلة تايلور وحذفنا حدود المراتب العليا ، وبتطبيق قوانين التوازن نجد أن:

$$- \text{باتجاه المحور } x : p(x) = \text{const} .$$

$$- \text{باتجاه المحور } y : p(y) = \text{const} .$$

أي أن الضغط لا يغير قيمته باتجاه المحورين الأفقيين x, y وبالتالي فإن الضغط ثابت في أي مستوى أفقي .

$$- \text{باتجاه المحور } z : dp(z) = \gamma . dz .$$

وهي الصيغة التفاضلية للمعادلة الهيدروستاتيكية التي تنص على : في سائل ساكن متجانس خاضع لحقل الجاذبية الأرضية يزداد الضغط خطياً مع العمق بمقدار γ لكل وحدة طول .
بتكامل العلاقة السابقة واعتبار $\rho = \text{const}$ نجد أن $p = \gamma . z + p_a$ وتعرف هذه العلاقة باسم المعادلة الهيدروستاتيكية الأساسية.

1 - 2 - 2- قياس الضغط Pressure Measurements

يقاس الضغط في نقطة ما من سائل كفرق بين قيمته وقيمة ضغط قياسي معروف، يختار عادة إما ضغط الفراغ التام (الصفر المطلق) . أو الضغط الجوي الموسمي p_a . إذا قيس الضغط اعتباراً من الصفر المطلق سمي الضغط المطلق وإذا قيس الضغط في الجو الطبيعي (كما هو الأمر عادة) أي اعتباراً من الضغط الجوي سمي ضغط المقياس فإذا كان الفرق بين

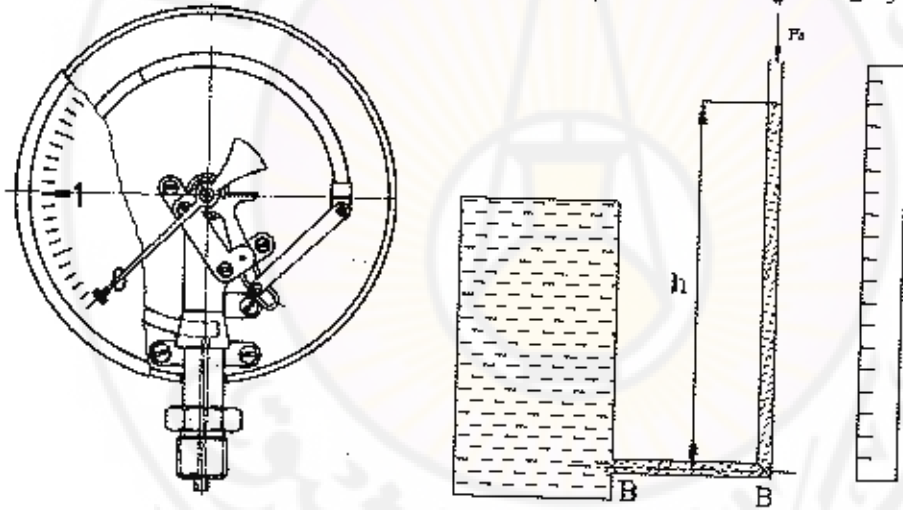
الضغط في النقطة المعتبرة والضغط الجوي موجباً سمي ضغط مقياس زائد وإذا كان سالباً سمي ضغط مقياس ناقص .

بمساعدة المعادلة الهيدروستاتيكية الأساسية ينتج :

$$p - p_a = \gamma \cdot h$$

عندما يكون : $p > p_a$ فإن $h_p = h = \frac{p - p_a}{\gamma}$ ويسمى الضاغط الموجب أو ارتفاع الضغط .

عندما يكون : $p < p_a$ فإن $h_s = h = \frac{p - p_a}{\gamma}$ ويسمى الضاغط السالب أو ارتفاع السحب .
إن الضاغط الموجب أو الضاغط السالب يمكن اعتبارهما مقياساً لفرق الضغط المؤثر في طرفي عمود سائل وزنه النوعي γ و ارتفاعه h_p, h_s على التوالي وعلى هذا الأساس يعتمد مبدأ المانومتر السائلي كما هو مبين بالشكل (1-2) المبسط :



الشكل (1-3) مقياس بوردون ذو النابض الأنبوبي

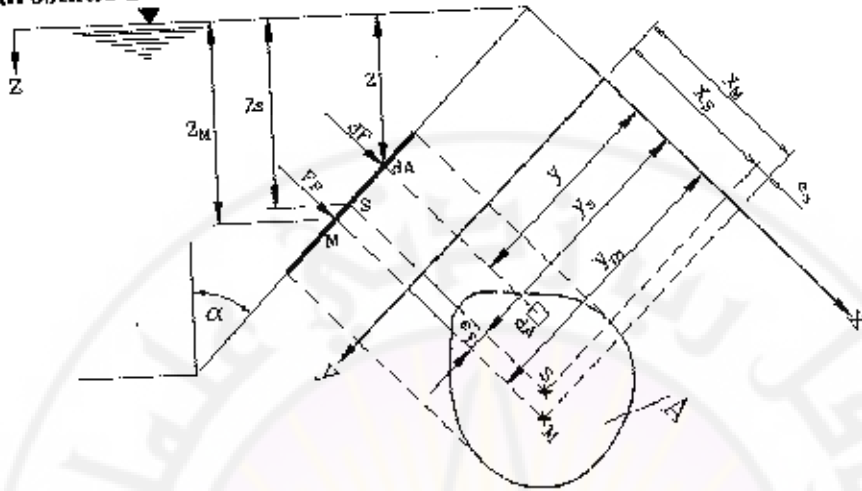
الشكل (1-2) المانومتر السائلي

إضافة للمانومترات السائلية توجد مقاييس ضغط جافة حيث يعتمد مبدأ عملها على تعريف الضغط كقوة مؤثرة في واحدة السطح حيث توازن قوة الضغط المؤثرة في مكبس أو حجرة قياس أو أنبوب نابضي بقوة مضادة لذلك يطلق على مقاييس الضغط هذه موازين الضغط ، وكمثال على هذه الموازين مقياس بوردون ذو النابض الأنبوبي ، كما هو مبين بالشكل (1-3) .

1 - 2 - 3 - حساب قوة ضغط السائل على جدران الأوعية

أ - حساب قوة الضغط على جدران الأوعية المائلة :

Hydrostatic Forces on Plan Surfaces :



الشكل (4 - 1) الضغط على جدران الأوعية المائلة

ليكن لدينا وعاء ذو شكل غير محدد مملوء بمائل وزنه النوعي γ وسطحه معرض للضغط الجوي، أحد جدرانه الجانبية مائل على الشاقول بزاوية α ، نحدد على هذا الجدار سطحاً اعتباطياً مساحته A ولنحسب قوة ضغط السائل على هذا السطح.
نختار جملة محاور إحداثية كما في الشكل:
حيث : x : الفصل المشترك بين السطح الحر للسائل ومستوي الجدار .
 y : متعامد مع x ويقع في مستوي الجدار ويتجه للأسفل .
 z : شاقولي موجه للأسفل .

إن قوة الضغط التي يؤثر بها سائل ساكن متجانس في سطح مستوٍ تساوي إلى جدار مساحة السطح A بالضغط الزائد المطبق في مركز السطح المدروس $p_s = \gamma \cdot z_s$ أي :

$$F_p = p_s \cdot A$$

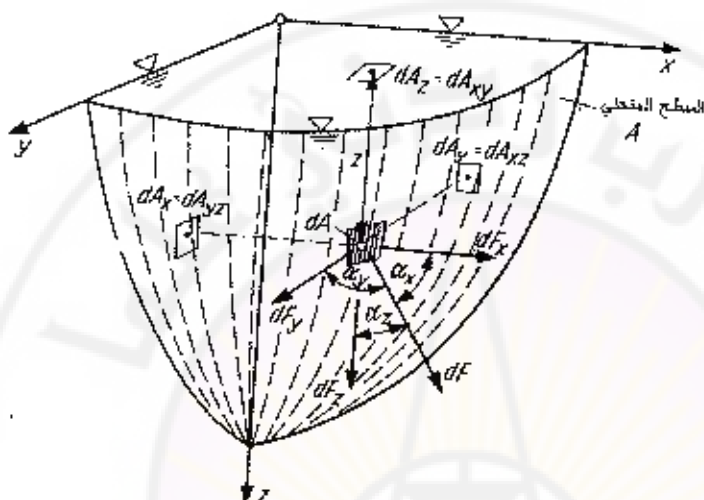
وتؤثر هذه القوة عمودياً في السطح A وفي نقطة M تدعى مركز الضغط (مركز الضغط لا ينطبق على مركز السطح S إلا إذا كان الضغط موزعاً بانتظام على السطح) يعطى البعد بين مركز السطح ومركز الضغط بالعلاقة :

$$e = y_m - y_s = \frac{I_s}{y_s \cdot A}$$

حيث : I_s هو عزم عطالة السطح A حول محور يمر من مركزه S موازيا للمحور ox .

ب - حساب قوة الضغط على جدران الأوعية المنحنية :

Hydrostatic Forces on Curved Surfaces :



الشكل (5-1) الضغط على جدران السطوح المنحنية

إن حساب قوة الضغط التي يؤثر بها سائل ساكن في السطوح المنحنية الفراغية يتطلب في الحالة العامة تحديد المركبات الثلاث للقوة باتجاه ثلاثة محاور متعامدة و عزوم القوة بالنسبة لهذه المحاور . نختار مجموعة إحداثيات ديكارتية x, y, z بحيث يكون المستوي xoy أفقياً منطبقاً على السطح الحر للسائل والمحور z شاقولياً نحو الأسفل ومنه تكون F_{px}, F_{py} هما المركبتين الأفقيتين والمركبة F_{pz} هي المركبة الشاقولية .

- مركبة قوة الضغط الأفقية التي يؤثر بها السائل على جدار وعاء منحني في اتجاه أفقي ما x أو y تماوي إلى قوة الضغط المؤثرة في السطح المستوي الناتج عن إسقاط الجدار على مستوي يعامد الاتجاه المفروض x أو y .

- مركبة قوة الضغط الشاقولية التي يؤثر بها السائل في سطح منحني تماوي إلى وزن عمود السائل الشاقولي القابع فوق السطح والممتد حتى السطح لآخر للسائل وتمر من مركز ثقل هذا العمود .

إن مركبات قوة الضغط F_{px}, F_{py}, F_{pz} لا تمر عادة من نقطة واحدة وبالتالي لا يمكن إيجاد محصلتها العامة .

في أكثر الحالات العملية يكون انحناء المسطوح وفق اتجاهين فقط كالسطوح الأسطوانية والمخروطية والكروية (سطوح الدرجة الثانية) . يستحسن في مثل هذه الحالات اختيار جملة المحاور الإحداثية بحيث ينطبق أحد هذه المحاور على الاتجاه المستقيم للسطح وبذلك يصبح لقوة الضغط مسقطان فقط .

1 - 2 - 4 - قوة الرفع الهيدروستاتيكية ، الطفو Buoyancy :

كل الأجسام المغمورة جزئياً أو كلياً في سائل ساكن وزنه النوعي تتلقى دفعاً شاقولياً إلى الأعلى بقوة تساوي وزن السائل المزاح وتؤثر في مركز الحجم المغمور من الجسم. تدعى هذه القوة قوة الرفع الهيدروستاتيكية أو ما يعرف بدافعة أرخميدس.

- توازن الأجسام الطافية:

حتى يطفو الجسم وبحالة توازن يجب أن يتحقق الشرطان التاليان:

أ - وزن الجسم يساوي دافعة أرخميدس . ب - يكون محور الطفو شاقولياً.

ويكون الجسم الطافي المتوازن بإحدى الحالات الثلاث التالية:

- طفو متوازن قلق : عندما يتعرض الجسم لأي قوة تحرفه عن وضع توازنه الابتدائي فإن القوى و العزوم الناتجة عن هذا الانحراف تؤدي إلى زيادة انحراف الجسم عن وضعه الابتدائي ولا يعود الجسم إلى وضعية توازنه الأولى .

- طفو متوازن حيادي : لا يؤدي انحراف الجسم عن وضعية توازنه إلى نشوء أية قوى أو عزوم تحرفه عن وضعية توازنه وبالتالي يكون الجسم في حالة توازن مطلق .

- طفو متوازن مستقر : تعمل القوى و العزوم الناتجة عن حرف الجسم عن وضعية توازنه على إعادة الجسم إلى وضعية توازنه الابتدائية . وحتى يكون الطفو مستقراً يجب أن يكون مركز الطفو الممنتج (الميتاسنتر) أعلى من مركز ثقل الجسم أي:

$$\frac{I_0}{V} > c \quad \text{حيث : } I_0 \text{ عزم عطالة سطح الطفو الأصغري,}$$

V حجم السائل المزاح .

c البعد بين مركز ثقل الجسم ومركز الحجم المغمور .

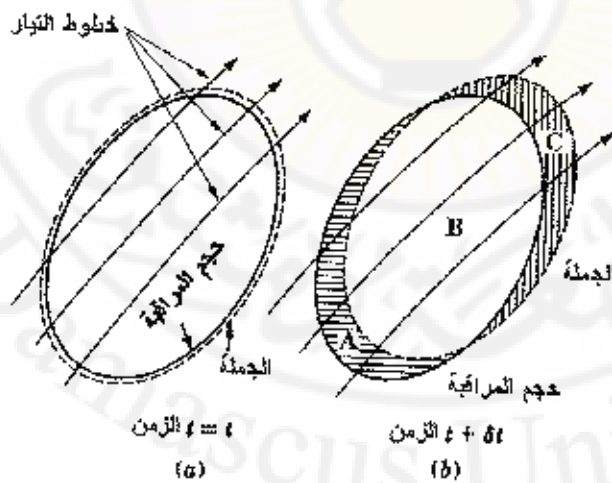
1 - 3 - حركة الموائع Fluid Flow Kinematics

تتغير بارامترات السائل المتحرك تبعاً للمكان والزمان في آلات الجريان أي أن الجريان غير مستقر في الحالة العامة لذا فإننا نحتاج إلى قوانين الترموديناميك إضافة إلى قوانين السوائل لدراسة الجريانات في الآلات الهيدروليكية .
تتشكل قوانين انحفاظ الكتلة المتمثل بمعادلة الاستمرار، وقانون مصونية الدفع الخطي المتمثل بمعادلة الحركة، وقانون مصونية الطاقة المتمثل بقانون الترموديناميك الأول الأساس النظري لدراسة الجريانات .

قبل استعراض هذه القوانين لابد من التذكير ببعض التعاريف الضرورية.

1 - 3 - 1 - مفهوم الجملة وحجم المراقبة System and control volume:

-- نعرف الجملة في مائع بأنها كمية من المائع ذات كتلة ثابتة مميزة عما يحيط بها وتشغل حيزاً محاطاً بسطح قد يكون وهمياً يفصل بين المائع في الجملة والمائع المحيط به وقد يكون حقيقياً كسطح صلب على تماس مع مائع الجملة. إن الحدود الخارجية للجملة تشكل سطحاً مغلقاً يحيط بحجم معين ويحتوي هذا الحجم على الجملة وقد يتغير الشكل الهندسي لهذا الحجم ولكنه يبقى دائماً محتوياً على نفس الكمية من المائع (نفس الكتلة)، وهذا المفهوم ينطبق على الموائع القابلة وغير القابلة للانضغاط وحين يتغير حجم الجملة بتغير السطح الخارجي المحيط بها فإن الكثافة تتغير وتبقى الكتلة ثابتة.



الشكل (1 - 6) الجملة مع حجم المراقبة المطابق عند الزمن t و الزمن $t + dt$ في حقل السرعة

حجم المراقبة: هو حجم ثابت في الفراغ له حدود مميزة ولا يغير مكانه ولا شكله . وتتم مراقبة حركة المائع أثناء دخوله وخروجه ومكوته في هذا الحجم . وقد تبين أويلر طريقة حجم المراقبة لدراسة الجريان في حين تبني لاغرانج طريقة الجملة لدراسة الجريان . باستخدام مفهوم الجملة وحجم المراقبة نستنتج المعادلة العامة لحركة الموائع والتي تمثل:

$$1 - 3 - 2 \text{ - معادلة الاستمرار ومعادلة الحركة ومعادلة القدرة .}$$

بأخذ الحالة العامة أي جريان سائل قابل للانضغاط ثلاثي البعد غير مستقر وبأخذ حجم محدد من الجريان يشغل حيزاً ثابتاً ندعوه حجم المراقبة وليكن V قيمة هذا الحجم . يفرض أن الجملة المفروضة هي كمية المائع الذي يشغل حجم المراقبة في اللحظة t ، مع مرور الزمن يتحرك المائع وتبدأ الجملة بمغادرة حجم المراقبة وتغير الجملة شكلها الهندسي ولكنها تحافظ على كتلتها ثابتة .

يبين الشكل (1-6) أن الجملة كانت تشغل كامل حجم المراقبة في اللحظة t (الحيزين A و B)، بعد فترة زمنية δt أصبحت الجملة تشغل الحيز B داخل حجم المراقبة والحيز C خارجه، كما أن كمية جديدة من المائع دخلت حجم المراقبة وشغلت الحيز A الذي أخلي حين غادرت الجملة حجم المراقبة .

إن للجملة المفروضة خواصاً Extensive Properties مثل كتلتها وكمية حركتها وقدرتها، وسنرمز بالرمز N لأي من هذه الخواص، فإذا قسمنا هذه الخاصة N على كتلة الجملة نحصل على خاصة واحدة الكتلة m Intensive Properties، استناداً لذلك فقد تمثل n كتلة واحدة الكتل (أي الواحد الصحيح) أو كمية الحركة لواحدة الكتل $\vec{v} = \frac{m \vec{v}}{m} = \vec{v}$ أو قدرة واحدة الكتل $n = E/m = e$.

$$1 - 3 - 3 \text{ - المعادلة العامة لحركة الموائع :}$$

General Equation For Fluids Motion :

يتمثل المعنى الفيزيائي لهذه المعادلة بأن : معدل تغير الخاصة N لجملة محددة من جريان مائع يساوي إلى المعدل الزمني لتغير تلك الخاصة داخل حجم المراقبة مضافاً له المعدل الصافي لانتقال الخاصة N عبر السطح الخارجي لحجم المراقبة . وهي محققة تحت أية شروط ويعبر عنها بالصيغة الرياضية التالية:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V n \rho dV + \int_A n \rho \vec{v} d\vec{A} \quad (1-1)$$

حيث : DN/Dt التفاضل الكلي ، $\partial/\partial t$ تفاضل جزئي .

N إحدى خواص الجملة مثل : كتلتها ، كمية حركتها ، قدرتها .

n [N/m] إحدى خواص الجملة لمواحدة الكتلة .

$\bar{v}$ شعاع السرعة .

V حجم المراقبة ، dV عنصر تفاضلي (لا متناهي في الصغر) من حجم المراقبة .

A مساحة السطح الخارجي لحجم المراقبة (سطح المراقبة) .

dA سطح عنصري صغير (تفاضلي) من سطح المراقبة واتجاهه ناظمي على

السطح .

يمكن إدخال المشتق بالنسبة للزمن إلى داخل التكامل في الحد الأول من الطرف الثاني من

المعادلة (1-1) وبالتالي تصبح :

$$\frac{DN}{Dt} = \int_V \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} dV + \int_A n\rho \bar{v} d\bar{A} \quad (1-2)$$

ومن قوانين التحليل الشعاعي يمكن تحويل التكامل السطحي لتكامل حجمي حيث يأخذ الحد

الثاني من المعادلة (1-2) الشكل :

$$\int_A n\rho \bar{v} d\bar{A} = \int_V \nabla(n\rho \bar{v}) dV$$

وتأخذ المعادلة (1-2) الشكل :

$$\frac{DN}{Dt} = \int_V \left[\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} + \nabla(n\rho \bar{v}) \right] dV \quad (1-3)$$

1-3-4 - معادلة الاستمرار Continuity Equation :

وفيها تكون الخاصية N هي الكتلة m فإن $m = N$ ، $n = N/m = 1$ وأن $\frac{DN}{Dt} = \frac{Dm}{Dt} = 0$ ،

وبالتالي تأخذ المعادلة (1-3) بعد التعويض وإجراء التكامل شكل معادلة الاستمرار العامة :

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (1-4)$$

في حالة الجريان وحيد البعد ضمن أنبوبة التيار بين مستويين عموديين على خطوط التيار أي

عموديين على شعاع السرعة عند الدخول وعند الخروج وبالتالي فإن الزاوية بين شعاع السرعة

والناظم للسطح تساوي 180° وبالتالي فإن المعادلة (1-1) تصبح :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A (\rho_2 v_2 \cdot dA_2 - \rho_1 v_1 \cdot dA_1) = 0$$

حيث dA_1 ، dA_2 سطحان عنصرين صغيرين من سطح الدخول A_1 و سطح الخروج A_2 بالترتيب.

وعندما تكون السرعة والكثافة منتظمتي التوزيع على السطحين A_1 و A_2 فإن العلاقة الأخيرة تصبح:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + (\rho_2 v_2 A_2 - \rho_1 v_1 A_1) = 0$$

وفي حالة الجريان المستمر ينعلم الحد الأول ويصبح معادلة الاستمرار لجريان مستمر وحيد البعد :

$$\rho_2 v_2 A_2 = \rho_1 v_1 A_1 = \dot{m} \quad (1-5)$$

وتطبق هذه المعادلة عند توفر الشروط التالية : - الجريان مستقر . - السرعة والكثافة منتظمتي التوزيع على كامل السطح A . - شعاع السرعة عمودي على السطح A . حيث : $\dot{m}$ التدفق الكتلي $[\text{kg/s}]$.

في حالة الجريان غير القابل للانضغاط تكون الكثافة ثابتة وتأخذ العلاقة (5-1) الصيغة:

$$A v = Q = \text{const}$$

حيث : $Q [m^3/s]$ التدفق الحجمي .

1 - 3 - 5 - معادلة الحركة Kinematic Equation :

وهي تطبيق لقانون نيوتن الثاني الذي ينص على : أن جداء كتلة جسم في تسارعه يساوي محصلة القوى الخارجية المؤثرة في حركة الجسم . من المعادلة (2-1) بعد وضع $N = m \bar{v}$ وبالتالي $n = N/m = \bar{v}$ تصبح :

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} (m \bar{v}) &= \int_V \frac{\partial (\rho \bar{v})}{\partial t} dV + \int_A \bar{v} (\rho \bar{v} \cdot d\vec{A}) = \sum \vec{F} \\ \frac{D}{Dt} (m \bar{v}) &= m \frac{D \bar{v}}{Dt} = m \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] \\ \int_A \bar{v} (\rho \bar{v} \cdot d\vec{A}) &= \int_A u_i (\rho \bar{v} dA) = \int_V \nabla_i (\rho u_i \bar{v}) dV \end{aligned} \quad (1-6)$$

حيث : $u_i = u, v, w$ مركبات السرعة . $i = x, y, z$ و $\bar{n}_i = \bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ أشعة الوحدة على المحاور .

$\sum F_i$ مجموع القوى الخارجية وتتألف من :

- القوى الحجمية F_V وعادة تمثل قوى الثقالة : $\vec{F}_V = \int_V \vec{B} \cdot \rho dV$ حيث $\vec{B}$ القوى الحجمية لوحدة الكتلة .

- القوى السطحية الناعمية والمماسية :

$\vec{F}_T$ - القوى الناعمية الناتجة عن ضغط المائع : $\vec{F}_T = - \int_A P d\vec{A}$ الإشارة (-) كون القوى

الناعمية موجهة إلى داخل المائع .

ب - القوى المماسية F_T الناتجة عن تأثير اللزوجة . وبالتالي فإن :

$$\sum \vec{F} = \int_V \vec{B} \cdot \rho dV - \int_A P d\vec{A} + F_T$$

بالتعويض في العلاقة (1-6) :

$$\int_V \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \int_V \vec{B} \cdot \rho dV - \int_A P d\vec{A} + F_T \quad (1-7)$$

هذه العلاقة لها ثلاث مركبات على المحاور الإحداثية : $i = x, y, z$ ذات أشعة الوحدة :

$\bar{n}_i = \bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ بإسقاطها على المحاور الإحداثية :

$$\int_V \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} dV + \int_A u_i (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) = \int_V B_i \cdot \rho dV - \int_A P \bar{n}_i dA + \bar{n}_i F_T \quad (1-8)$$

ب تحويل التكاملات السطحية إلى تكاملات حجمية :

$$\int_A u_i (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) = \int_V \nabla \cdot (\rho u_i \vec{V}) dV - \int_A P \bar{n}_i dA = - \int_V \frac{\partial P}{\partial x_i} dV$$

بالتعويض في العلاقة (1-8) وإهمال تأثير اللزوجة أي $F_T = 0$ نحصل على :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \vec{V}) = \rho B_i - \frac{\partial P}{\partial x_i}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right] + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) u_i = \rho B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

وبملاحظة أن الحد بين القوسين [] يمثل معادلة الاستمرار ويساوي الصفر ، تصبح المعادلة الأخيرة بالشكل :

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) u_i \right] = \rho B_i - \frac{\partial P}{\partial X}$$

من تعريف التفاضل الكلي نجد :

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho B_i - \frac{\partial P}{\partial X}$$

وهي عبارة عن إحدى مركبات معادلة الحركة وجميع هذه المركبات نحصل على المعادلة الشعاعية التالية :

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{B} - \nabla P$$

هذه المعادلة تعرف باسم معادلة أويلر الحركية. بما أن القوى الحجمية عادة هي قوة الثقالة تصبح معادلة أويلر :

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = g - \frac{1}{\rho} \text{grad}P \quad (1-9)$$

بإسقاط هذه العلاقة على أحد المحاور الإحداثية وليكن x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} + w \frac{\partial u}{\partial Z} = g_X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X}$$

وفي حالة الجريان المستقر وحيد البعد وبأخذ المحور الشاقولي (محور الثقالة) موجبا للأعلى تصبح العلاقة الأخيرة :

$$u \frac{du}{dX} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dX} + g \frac{dZ}{dX} = 0$$

1 - 4 - تحريك السوائل Fluid Dynamic :

1 - 4 - 1 - معادلة برنولي (م. الطاقة) وتطبيقاتها مع وجود مضخة :

Bernoulli's Equation & It's Applications :

تشتق معادلة برنولي من معادلة أويلر الحركية باتجاه خط التيار ويمكن كتابتها بإحدى الصيغ الثلاث :

1 - معادلة الارتفاعات :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-10)$$

حيث: z_1 ، z_2 الارتفاع الهندسي لكلا النقطتين (1) و (2)

$\frac{p_1}{\rho g}$ و $\frac{p_2}{\rho g}$ ارتفاع الضغط لكلا النقطتين (1) و (2)

$\frac{v_1^2}{2g}$ و $\frac{v_2^2}{2g}$ ارتفاع السرعة لكلا النقطتين (1) و (2)

2 - معادلة الضغط:

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (1-11)$$

حيث: $\rho g z_1$ ، $\rho g z_2$ ضغط الثقالة في كل من النقطتين (1) و (2)

p_1 و p_2 الضغط الستاتيكي لكل من النقطتين (1) و (2)

$\frac{\rho v_1^2}{2}$ و $\frac{\rho v_2^2}{2}$ الضغط الديناميكي لكل من النقطتين (1) و (2)

3 - معادلة القدرة:

$$g z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1-12)$$

حيث: $g z_1$ ، $g z_2$ القدرة الكامنة للسائل في النقطتين (1) و (2)

$\frac{p_1}{\rho}$ و $\frac{p_2}{\rho}$ قدرة للضغط في النقطتين (1) و (2)

$\frac{v_1^2}{2}$ و $\frac{v_2^2}{2}$ القدرة الحركية للسائل في النقطتين (1) و (2)

هذه الصيغ الثلاث لمعادلة برنولي تمثل معادلة انحفاظ الطاقة لسائل مثالي غير قابل للانضغاط
($\rho = \text{const}$, $\eta = 0$)

أما بالنسبة للجريانات الحقيقية فإنها تترافق مع ضياعات في الطاقة بسبب فواقد الاحتكاك و الفواقد المكانية وفي هذه الحالة نستخدم معادلة برنولي المعممة والتي نأخذ الشكل التالي:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (1-13)$$

حيث $\sum h_f$ مجموع الفواقد في الجريان وتضاف إلى الحد الثاني بقيمة موجبة أما إذا وضعت في الحد الأول فتأخذ إشارة سالبة وهذه الفواقد نوعان :

$$\Sigma h_f = h_f + h_k \quad (1-14)$$

حيث h_f فواقد الاحتكاك وتعطى بالعلاقة :

$$h_f = \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (1-15)$$

حيث λ ثابت فاقد الاحتكاك ويتعلق بعدد رينولدز $Re = \frac{v.d}{\nu}$ وبالمخسونة النسبية $\frac{\epsilon}{d}$
 L طول الأنبوب d قطر الأنبوب ν السرعة الوسطية وتحسب من معادلة الاستمرار $Q = v.A$

h_k الفواقد المحلية (المكانية) وتتعلق بالشكل الهندسي للمقطع (أكواع ، وصلات ، تقريعات ، ...) وتحدد بالعلاقة:

$$h_k = \sum k \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (1-16)$$

حيث $\sum k$ ثابت الفقد المحلي ويتعلق قيمته بالشكل الهندسي للمقطع.

نعوض (1-15) و (1-16) في (1-13) نجد:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2.g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (1-17)$$

معادلة برنولي (م. الطاقة) مع وجود مضخة

إذا وضعت مضخة بين النقطتين (1) و (2) في شبكة اتجاه الجريان فيها من (1) إلى (2) نأخذ معادلة برنولي الشكل التالي:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_p = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_f \quad (1-18)$$

حيث H_p ضاغط المضخة [m] حيث يمكن حسابه من العلاقة السابقة:

$$H_p = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2.g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (1-19)$$

تبين العلاقة (1-19) أن المضخة تمنح قدرة إضافية للسائل المار عبرها ، تصرف هذه القدرة من أجل:

1 - رفع ضغط السائل من p_1 إلى p_2

2 - رفع سرعة السائل من v_1 إلى v_2

3 - رفع منسوب السائل من z_1 إلى z_2 .

4 - تغطية فواقد الاحتكاك

5 - تغطية الفواقد المحلية

1 - 4 - 2 - قانون الدفع الخطي وقانون الدفع الدوراني : Momentum Equation :

بالنسبة للكثير من مسائل الجريان التكنيكية يتركز السؤال على معرفة محصلة القوى التي تؤثر بها حدود معينة لجملة الجريان في السائل أو رد فعل هذه المحصلة كقوة يؤثر بها السائل في هذه الحدود وبخاصة الجدران الصلبة ، مثل هذه المسائل تعترضنا عند بناء آلات الجريان من عنفات ومضخات وضواغط وغيرها .

يتم ذلك بمساعدة قانون الدفع الخطي كما أن الاستطاعة التي يقدمها الدوالب الدائر لعنفه فرنسيس يمكن حسابها بسهولة بمساعدة قانون الدفع الدوراني أو قانون عزم الدفع .

تكتب الصيغة التكاملية لمعادلة الحركة (6-1) بالشكل التالي :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} \rho dV + \int_A \vec{v} \rho \vec{v} d\vec{A} = \sum \vec{F}$$

بإسقاط هذه المعادلة على المحاور الإحداثية الثلاثة نحصل على المعادلات السلمية التالية :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V u \rho dV + \int_A u \rho \vec{v} d\vec{A} &= \sum F_x \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V v \rho dV + \int_A v \rho \vec{v} d\vec{A} &= \sum F_y \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V w \rho dV + \int_A w \rho \vec{v} d\vec{A} &= \sum F_z \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

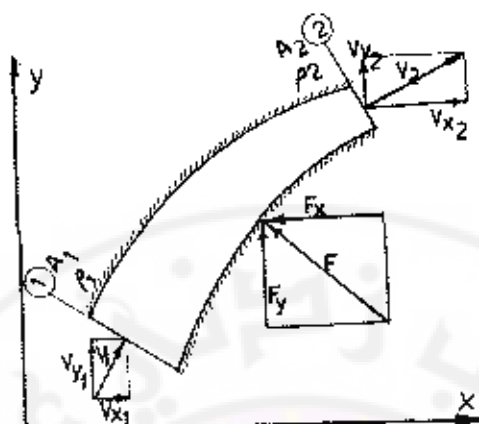
$$\vec{v} \cdot d\vec{A} = u dA_x + v dA_y + w dA_z \quad \text{ولكن :}$$

حيث : $\sum F_x$ ، $\sum F_y$ ، $\sum F_z$ مساقط المحصلة العامة لجملة القوى الخارجية.

في الجريانات المستقرة تصبح العلاقة (20-1) بالشكل :

$$\int_A u \rho \vec{v} d\vec{A} = \sum F_x \quad , \quad \int_A v \rho \vec{v} d\vec{A} = \sum F_y \quad , \quad \int_A w \rho \vec{v} d\vec{A} = \sum F_z \quad (1-21)$$

هذه المعادلات محققة في الجريان القابل للانضغاط وغير المنتظم على أن تؤخذ السرعة والكثافة الموافقة للسطح dA .



الشكل (7-1) حجم المراقبة حيث تكون السطوح التي يدخل ويخرج منها المائع عمودية على أشعة السرعة

عندما يتم اختيار حجم المراقبة بحيث تكون السطوح التي يدخل ويخرج منها المائع من وإلى حجم المراقبة عمودية على أشعة السرعة تكون الزاوية بين شعاع السرعة والناظم على السطح معدومة (0°) عند سطح الخروج ومستقيمة عند سطح الدخول (180°) ، وعندما تكون الكثافتان ρ_1 ، ρ_2 منتظمتين عند سطحي الدخول والخروج أي : ذات قيمة ثابتة في كل نقاط السطح A ، وكذلك السرعتان $\vec{v}_1$ ، $\vec{v}_2$ يكون لكل منهما قيمة ثابتة واتجاه ثابت عند جميع نقاط السطح A كما هو مبين في الشكل (7-1) فإن المعادلة (21-1) تصبح :

$$\left. \begin{aligned} \rho v_2 A_2 v_{x2} - \rho v_1 A_1 v_{x1} &= \sum F_x \\ \rho v_2 A_2 v_{y2} - \rho v_1 A_1 v_{y1} &= \sum F_y \\ \rho v_2 A_2 v_{z2} - \rho v_1 A_1 v_{z1} &= \sum F_z \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

عند تطبيق قانون الدفع الخطي على جريان مستقر غير منتظم أي ذو سرعة متغيرة على كامل مقطع أنبوية التيار كما في حالة حركة السوائل الحقيقية يستخدم مفهوم السرعة الوسطية لتيار الدفع $\bar{v}$ وتعرف بالعلاقة :

$$\rho \bar{v} A = \int_A \rho v dA$$

حيث v السرعة الموضعية غير المنتظمة .

إذا أردنا حساب تيار الدفع بمساعدة السرعة $\vec{v}$ يلزم إدخال ما يسمى معامل عدم انتظام تيار الدفع أو معامل تصحيح تيار الدفع C_F الذي يعرف في حالة $\rho = \text{const}$ بالعلاقة :

$$C_F = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 dA$$

- بنفس الخطوات السابقة يمكن استخراج قانون الدفع الدوراني أي :

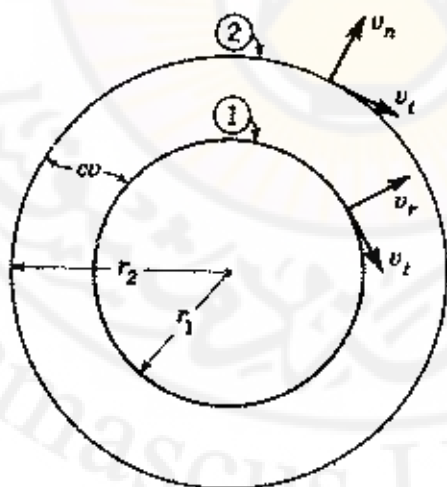
$$\vec{r} \times \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{r} \times \vec{v} dV + \int_A \rho \vec{r} \times \vec{v} \cdot \vec{v} dA$$

حيث : $\vec{r} \times \vec{F}$ المجموع الهندسي لكافة العزوم الستاتيكية للقوى الخارجية بالنسبة لمحور دوران ما .

الطرف الأيمن من هذه المعادلة يمثل معدل تغير الدفع الدوراني ضمن حجم التحكم بالإضافة إلى التدفق الصافي للدفع الدوراني من حجم التحكم .

لهذا القانون أهمية كبيرة في مسائل الجريان للآلات الهيدروليكية . عندما نطبق هذا القانون على حالات الجريان في المستوي XOY بحيث أن r البعد بين مركز الدوران وبين المركبة المماسية للسرعة v_t عن محور الدوران وأن v_n المركبة العمودية للسرعة تصبح معادلة قانون الدفع الدوراني :

$$T_Z = r \cdot F = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho r v_t dV + \int_A \rho r v_t v_n dA$$



الشكل (8-1) الجريان عبر مجرى حلقي كدولاب مضخة طاردة مركزية

للاستفادة من العلاقة السابقة وذلك بتطبيقها على جريان حلقي مستقر كما هو مبين في الشكل (1-8) ، تصبح العلاقة السابقة :

$$T_Z = \int_{A_2} \rho_2 r_2 v_{t2} v_{n2} dA_2 + \int_{A_1} \rho_1 r_1 v_{t1} v_{n1} dA_1 \quad (1-23)$$

ومن أجل جريان متناظر دورانياً تماماً حيث : ρ, r, v_t, v_n ثابتة على كل من مدخل ومخرج سطح التحكم فإن العلاقة السابقة تصبح : $T_Z = \rho Q [(r v_t)_2 - (r v_t)_1]$ حيث : $\int \rho v_n dA = \rho Q$ وهي ثابتة عند المدخل والمخرج .

1-5- الجناح الحامل The Airfoil :

طيران الأجسام الأثقل من الهواء تسببه قوة تؤثر في الأجنحة الحاملة تدعى قوة الرفع الهيدروديناميكية أو الأيروديناميكية (F_A) . هذه القوة تؤثر أيضاً في ريش دواليب التوجيه والدواليب العامل لآلات الجريان المحورية والقطرية (عنفات، مضخات، ضواغط، مراوح، رفاصات وغيرها) وبالتالي تلعب دوراً أساسياً في عملية شحن الجريان عبر الآلة بالقدرة أو استخلاصها منها . ترتبط ظاهرة قوة الرفع بوجود جولان غير معدوم في الجريان .

1-5-1 - مفهوم الجولان Circulation :



شكل (1-9) شكل توضيحي لمفهوم الجريان

لنفرض أن مائعاً مثاليًا بحالة حركة وليكن $\vec{v}$ شعاع السرعة عند أية نقطة من الجريان ، ولتكن A, B نقطتين لا على التبعين من الجريان المذكور ، نصل بين النقطتين A, B بخط كيفي يمكن أن يكون مستقيماً أو منحنياً كما في الشكل (1-9)

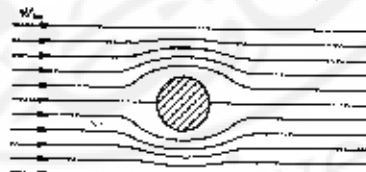
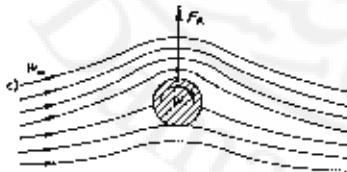
إذا فرضنا البعد S لقياس المسافات وفق الخط BA ، عند نقطة معينة من هذا الخط سيكون شعاع السرعة $\vec{v}$ مماسا لخط التيار المار من هذه النقطة كما أن $d\vec{s}$ هو شعاع الانتقال وفق الخط BA ، تشكل الجداء السلمي من مجموعة الشعاعين :

$$\int_A^B \vec{v} \cdot d\vec{s} = \int_A^B (u dx + v dy + w dz)$$

حيث dx, dy, dz هي مسافات $d\vec{s}$ على المحاور الإحداثية المتعامدة .
إذا كان الخط المفروض مغلقا أي إذا انطبقت A على B فإننا نعرف الجولان Γ بالعلاقة:
 $\Gamma = \oint \vec{v} \cdot d\vec{s}$. وتعتمد إشارة الجولان Γ على اتجاه الحركة على الخط المنحني المغلق ومن المتبع اعتبار الدوران عكس عقارب الساعة هو الاتجاه الموجب .
ملاحظة : في جريان لا دوراني يكون الجولان معدوما حول أي خط مغلق يحيط بأي منطقة من الجريان شريطة ألا تحتوي هذه المنطقة إلا على مائع .

1 - 5 - 2 - نظرية الجناح الحامل: Airfoil Theory

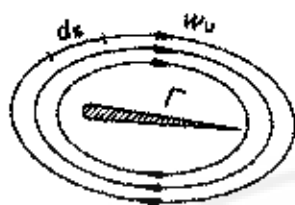
بمساعدة قانون الدفع الخطي ومعادلة الاستمرار ومعادلة برنولي يمكن حساب قوة الرفع الهيدروديناميكية المؤثرة في جناح حامل . إذا وضعت أسطوانة دائرية المقطع وذات طول لانهائي في جريان متوازٍ منتظم يتحرك بسرعة ثابتة w_∞ بحيث يكون محورها عموديا على اتجاه الجريان فإنه لا توجد أية قوة رفع كما هو مبين بالشكل (10-1) . أما إذا دارت الأسطوانة حول محورها مثل هذا الجريان الدوراني حول الأسطوانة يسمى الجريان مع الجولان إذا تدخل الجريان الانسحابي مع الجريان الجولاني فإن السرعة سوف تزداد على القسم العلوي من الأسطوانة والضغط يتناقص بحسب معادلة الطاقة . أما على القسم السفلي من الأسطوانة سوف يحدث العكس وبالتالي فإن الجريان حول الأسطوانة غير متناظر كما هو مبين في الشكل (11-1) .



الشكل (11-1) تدخل جريان انسحابي مع جريان جولاني

الشكل (10-1) جريان انسحابي متوازي

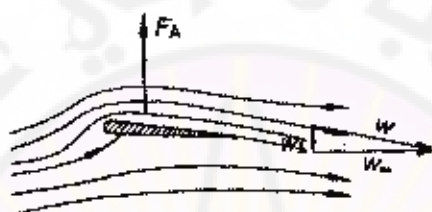
وينطبق ما ذكر عن الجريان حول الأسطوانة على الجريان حول جناح حامل كما هو مبين
الشكل (1-12)



جريان جولاني



جريان السحابي مع جريان جولاني



جريان السحابي متوازي

الشكل (1-12) الجريان حول جناح حامل

حسب قانون كوتا - يوكوفسكي الذي ينص على أنه : يؤثر السائل المثالي الذي يعبر سلسلة من
الأجنحة الحاملة في كل جناح بقوة رفع F_A فقط تتناسب طرذاً مع كثافة السائل ومع سرعة
ورود الجريان غير المشوشة ومع الجولان Γ حول البروفيل وتكون منحرفة عن اتجاه w_∞
بمقدار 90° بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة إذا اعتبر الجولان موجبا يعكس عقارب الساعة.

(1-24)

$$F_A = \rho \cdot w_\infty \cdot b \cdot \Gamma$$

حيث: ρ : كثافة السائل.

w_∞ : السرعة غير المشوشة.

Γ : الجولان .

b : عرض الجناح .

حسب قانون الدفع الخطي فإن قوة الرفع تكون متناسبة المركبة العمودية w_y المبينة على الشكل
أعلاه بالعلاقة التالية :

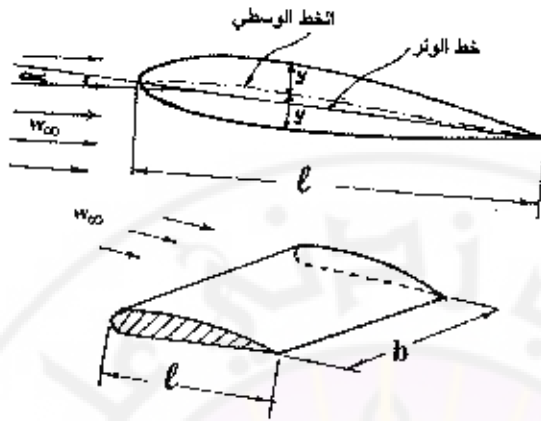
(1-25)

$$F_A = \rho \cdot Q \cdot w_y$$

حيث ρ : كثافة السائل .

w_f : المركبة العمودية على اتجاه الجريان.

Q : التدفق الحجمي .



الشكل (1-13) المفاهيم السابقة للجناح الحامل

ولفهم نظرية الجناح الحامل لابد من إيضاح بعض المفاهيم وإدخال بعض التعاريف :

الجناح : هو جسم أسطواني مولداته متوازية ودليله ذو شكل هندسي معين يمتاز بانسيابية مع خطوط التيار .

الخط الوسطي : هو خط التناظر بين نقاط السطح العلوي ونقاط السطح السفلي للجناح .

الوتر : هو المستقيم الواصل بين مركز تحدب الطرف القائد للجناح (مقدمة الجناح) ومركز تحدب الطرف اللاحق (مؤخرة الجناح) .

الامتداد : هو طول الجناح b وفق الاتجاه العمودي على السرعة .

المساحة المسقطة : وهي مساحة مسقط الجناح على مستوٍ يوازي الجريان ، حين يكون للجناح مقطع ثابت منتظم فإن المساحة المسقطة للجناح ستكون مساوية لجذاء وتره في

امتداده: $A = l \cdot b$.

نسبة التطاول : $\lambda = A / b^2$.

الحنو : هو المسافة الأعظمية بين الخط الوسطي والوتر وهو مقياس لمقدار انحناء الجناح .

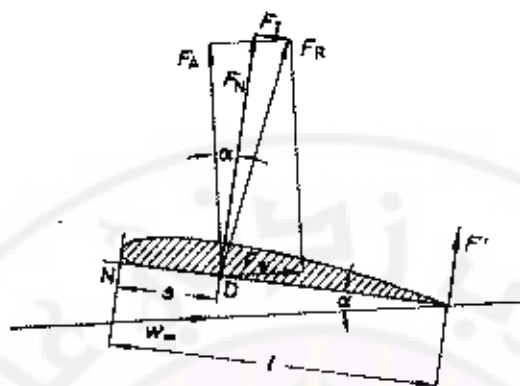
زاوية الهجوم α : وهي الزاوية بين الوتر واتجاه التيار الحر .

1- 5- 3 - القوى والعزوم المؤثرة في جناح حامل :

1 - قوة الرفع العمودية على اتجاه الجريان F_R وتعطى بالعلاقة :

$$F_A = C_a \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \quad (1-26)$$

ولا يشترط أن تكون شاقولية وإنما يعتمد ميلها على الأفق على اتجاه التيار الحر .



الشكل (1-14) القوى المؤثرة على جناح حامل

2- قوة الجر أو المقاومة F_{pp} وهي مركبة القوة الإجمالية المؤثرة في الجناح وفق اتجاه الجريان وتعطى بالعلاقة :

$$F_W = C_W \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \quad (1-27)$$

3- المحصلة F_R وتعطى بالعلاقة :

$$F_R = \sqrt{F_A^2 + F_W^2} \quad (1-28)$$

4- مسقط المحصلة F_R عمودياً على الوتر (l) :

$$F_N = F_A \cdot \cos \alpha + F_W \cdot \sin \alpha \quad (1-29)$$

5- مسقط المحصلة على منحنى الوتر (l) :

$$F_T = F_W \cdot \cos \alpha - F_A \cdot \sin \alpha \quad (1-30)$$

حيث : ρ : كثافة السائل .

w_{∞} : السرعة غير المشوشة .

$A = b \cdot l$: المساحة المسقطة .

C_a : معامل الرفع .

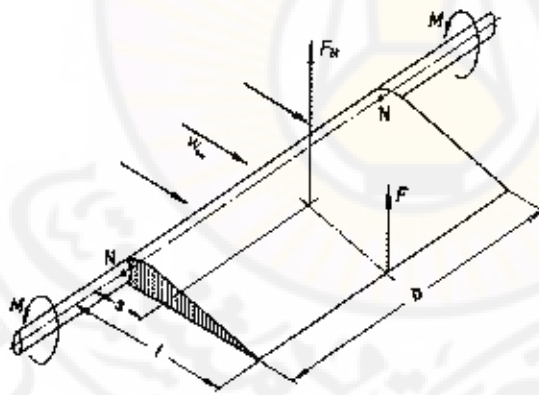
C_W : معامل (الاحتكاك) المقاومة .

إن معامل الرفع C_a ومعامل الاحتكاك C_w يتعلقان بشكل البروفيل ، وزاوية الهجوم α ، ويخشونة سطح البروفيل ، وبعدد رينولدز . أما نقطة تأثير القوة (النقطة D) على الشكل (1-14) فتحدد من خلال العزم المطبق على الجناح الحامل من قوى الجريان . إن العزم المؤثر في الجناح ينتج من القوة المؤثرة في الحافة الخلفية للجناح (F') : $M = F' \cdot l$ هذه القوة تحسب من العلاقة :

$$F' = C_m \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \Rightarrow M = C_m \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A l \quad (1-31)$$

حيث: C_m معامل العزم.
ومن ناحية أخرى ينتج العزم من القوة الناعظمية F_N مضروباً ببُعدها s عن مركز الدوران كما هو مبين بالشكل (1-15) :
وبما أن الزاوية α تكون صغيرة جداً وبشكل عام يمكن وتقريب مقبول جداً الافتراض أن : $F_N = F_A$ ومنه :

$$M = F_A \cdot s = C_a \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \cdot s \quad (1-32)$$

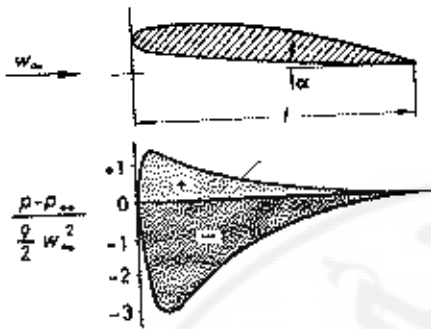


الشكل (1-15) العزم المؤثرة على جناح حامل

من تساوي العلاقتين السابقتين للعزم نوجد المسافة s :

$$C_a \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \cdot s = C_m \frac{\rho}{2} w_{\infty}^2 A \cdot l \Rightarrow s = \frac{C_m}{C_a} l$$

1- 5- 4 توزيع الضغط على الجناح الحامل:



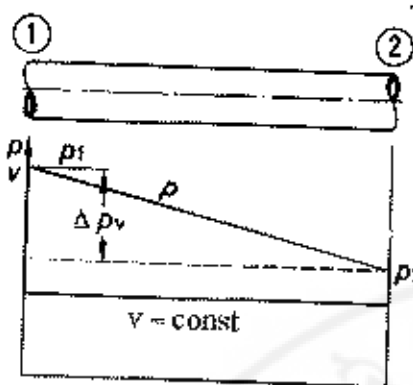
بسبب الجريان غير المتناظر حول جناح حامل فإن السرعات على السطح المنحني العلوي للجناح الحامل أكبر من السرعات على السطح السفلي للجناح الحامل الأقل انحناء من السطح العلوي حيث يؤدي ذلك إلى نشوء منطقة ضغط ناقص على السطح العلوي ومنطقة ضغط زائد على السطح السفلي.

الشكل (16-1) توزيع الضغط على جناح حامل

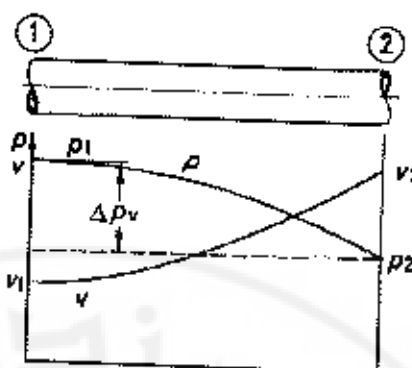
في الشكل (16-1) نلاحظ توزيع الضغط على الجناح الحامل وفيه نجد أن القيمة العظمى في منطقة الضغط الناقص على السطح العلوي تقع بالقرب من مقدمة الجناح ويمكن أن تصل قيمتها إلى ثلاثة أضعاف الضغط التحريكي غير المشوش $\frac{\rho}{2} w_{\infty}^2$.

1- 6- الجريانات في الأنابيب Flow In Conduits :

عند حركة (انتقال) الهواء والغازات والأبخرة في الأنابيب يحدث انتشار للجريان، إذ أن الضغط يتناقص على طول الجريان بسبب فواقد الاحتكاك وبالتالي فإن درجة الحرارة والضغط والكثافة والسرعة جميعها تتغير على طول الأنبوب في الحالة العامة. في جريانات السوائل غير القابلة للانضغاط يتناقص الضغط خطياً على طول الأنبوب بينما تبقى السرعة ثابتة إذا كان مقطع الأنبوب ثابتاً، أما في حالة الغازات (سوائل قابلة للانضغاط) فإن تغير الضغط يكون لا خطياً ولا تحافظ السرعة على قيمتها في الأنابيب ثابتة المقطع الشكل (17-1).



سوائل غير قابلة للانضغاط



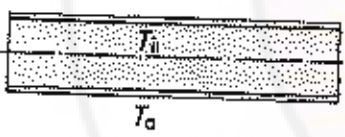
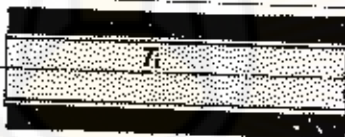
سوائل قابلة للانضغاط

الشكل (17-1) تغير الضغط والسرعة على طول أنبوب الجريان

بالمقارنة مع طاقة الضغط والطاقة الحركية تهمل الطاقة الكامنة المكانية في جريان الغازات لصغرهما بسبب قلة كثافة السائل . ويتعلق منحنى توزيع الضغط والسرعة بنوع الانتشار وفقد الاحتكاك ، ويميز نوعين من الجريانات في الأنابيب :

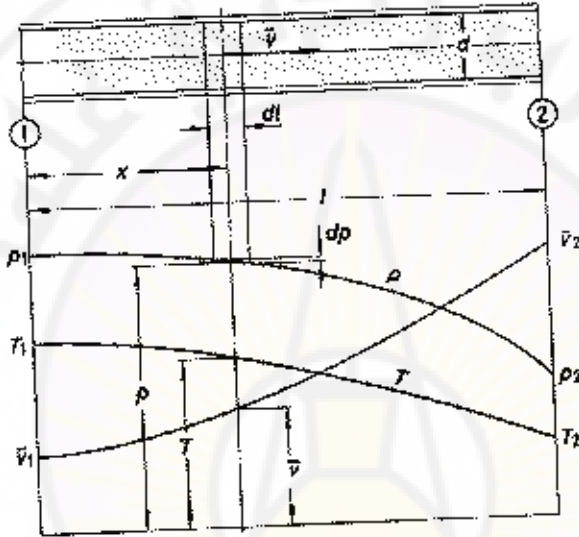
- 1 - الجريان في أنبوب عارٍ غير مغلف بمادة عازلة .
- 2 - الجريان في أنبوب مغلف بمادة عزل حراري .

الجدول (1-1) يبين مقارنة بين الحالتين السابقتين .

 أنبوب غير معزول	 أنبوب معزول
يتم للتبادل الحراري مع الوسط المحيط وبالتالي فإن درجة حرارة الغاز ستتوازن تدريجياً مع درجة حرارة الوسط المحيط ، لذلك وتقريباً مقبول يمكن اعتبار الجريان ايزوترمياً . مثل جريان الغاز في الأنابيب الموجودة تحت الأرض .	بسبب العازل المغلف للأنبوب فإن التبادل الحراري مع الوسط الخارجي يكون صغيراً لدرجة يمكن إهماله وبالتالي يمكن اعتبار الجريان أديباتياً في هذه الحالة . يستخدم هذا النوع من الجريانات عندما نسعى للحفاظ على درجة حرارة الغاز المنقول سواء أكان بارداً أو ساخناً مثل : جريان بخار الماء ضمن الأنابيب

إن الحالتين المذكورتين في الجدول أعلاه (الجريان الإيزوثيرمي والجريان الأديباتي) هما حالتان حديتان نظريتان إذ إن الجريانات الحقيقية للغازات تكون دوما مرفقة بتبادل حراري كما أن درجة الحرارة لا تبقى ثابتة تماما .
الجريانات في الأنابيب دائرية المقطع :

سنقوم في هذه الفقرة بعرض العلاقات الخاصة والبارامترات المؤثرة في الجريانات المستقرة للسوائل القابلة للانضغاط في الأنابيب دائرية المقطع كما هو مبين في الشكل (1-18) .
ضباغات (فواقد) الجريان في أنبوب ثابت المقطع (الحالة العامة) :



الشكل (1-18)

لحساب فواقد الاحتكاك على جزء من الأنبوب طوله dl نستخدم العلاقة :

$$dp = -\lambda \frac{dl}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (1-33)$$

الإشارة (-) في الطرف الأيمن من العلاقة تدل على أن الضغط يتناقص على طول الأنبوب باتجاه الجريان.

من معادلة الحالة :

$$\rho = \frac{p}{RT} \Rightarrow R = \frac{p}{\rho T} = \frac{p_1}{\rho_1 T_1}$$

$$\rho = \rho_1 \frac{T_1}{T} \cdot \frac{p}{p_1} \quad (1-34)$$

ومن معادلة الاستمرار للجريانات القابلة للانضغاط عند ثبوت المقطع :

$$V \cdot \rho = V_1 \cdot \rho_1 = \text{const} \Rightarrow V = V_1 \frac{\rho_1}{\rho}$$

بالاستفادة من العلاقة (1-25) :

$$V = V_1 \frac{T_1 \cdot p_1}{T \cdot p} \quad (1-35)$$

بتعويض العلاقتين (1-34) و (1-35) في العلاقة (1-33) :

$$dp = -\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho_1}{2} \frac{T_1}{T} \frac{p}{p_1} \frac{V_1^2 \cdot T^2 \cdot p_1^2}{T_1^2 \cdot p^2} \cdot dl$$

$$dp = -\lambda \frac{\rho_1 V_1^2}{2 d T_1} \frac{p_1}{p} \cdot \frac{T}{p} dl \quad (1-36)$$

لحساب انخفاض الضغط $(p_1 - p_2)$ بمكاملة العلاقة (1-35) لابد من معرفة تغير الضغط ودرجة الحرارة في مقاطع الأنابيب المختلفة أي : $p = f(x)$; $T = f(x)$ بما أن الكثافة ρ تتناقص على طول الأنابيب (جريان تمدد أو انتشار) فإن التدفق الحجمي Q والسرعة v سوف تزداد وكذلك فإن اللزوجة الحركية ν تتغير أيضا ، كما أن عدد رينولدز لم يعد ثابتا على طول الأنابيب .

إن معامل الاحتكاك λ تابع لعدد رينولدز وللخشونة النسبية $\frac{d}{k}$ وبالتالي فإنه يتغير أيضا .
لذا فإن مكاملة العلاقة (1-35) غير ممكن في الحالة العامة، ولإجراء هذا التكامل لابد من القبول ببعض الافتراضات :

1 - اعتبار معامل الاحتكاك λ ثابتا وحسب كتاب عدد رينولدز وللخشونة النسبية $\frac{d}{k}$.

2 - استبدال درجة الحرارة T بدرجة الحرارة الوسطية $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$.

3 - إهمال قوى العطالة الناتجة عن التسارع بسبب زيادة السرعة .

$$\frac{1}{p_1} \cdot p \cdot dp = -\lambda \frac{\rho_1 V_1^2}{2 d} \cdot \frac{\bar{T}}{T_1} dl$$

$$\frac{1}{\rho_1} \int_{p_1}^{p_2} p \cdot dp = -\lambda \frac{\rho_1 V_1^2}{2d} \cdot \frac{\bar{T}}{T_1} \int_0^l dl$$

$$\frac{1}{\rho_1} \left[\frac{p^2}{2} \right]_{p_1}^{p_2} = \lambda \frac{\rho_1 V_1^2}{2d} \cdot \frac{\bar{T}}{T_1} l$$

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot \rho_1} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_1 V_1^2}{2} \cdot \frac{\bar{T}}{T_1} \quad (1-37)$$

تناقص الضغط عند الإجراء الإيزوثيرمي :

في الإجراء الإيزوثيرمي $\bar{T} = T_1$ وبالتالي تأخذ العلاقة (1-37) الشكل التالي :

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot \rho_1} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_1 V_1^2}{2} \quad (1-37)$$

حسب هذه العلاقة فإن هبوط الضغط $\Delta p = p_1 - p_2$ يتعلق بالبارامترات الابتدائية (بارامترات الجريان عند مدخل الأنبوب) $(\lambda ; Re_1 ; \rho_1 ; v_1 ; V_1)$ وكذلك طول الأنبوب وقطره .
انخفاض الضغط في حالة الإجراء الأديباتي :

يحسب هبوط الضغط في حالة الإجراء الأديباتي باستخدام العلاقة (1-37) بعد حساب $\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ لذلك لابد من حساب T_2 بالطرق العددية ، ومنها الطريقة التالية :

1 - بحسب فرق الضغط بفرض أن الجريان إيزوثيرمي باستخدام العلاقة (1-38) ومن ثم بحسب الضغط p_2 ونحسب T_2 للإجراء الأديباتي باستخدام العلاقة :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

بعد ذلك نحسب درجة الحرارة الوسطية .

2 - بحسب فرق الضغط $\Delta p = p_1 - p_2$ من جديد باستخدام العلاقة (1-28) ونحسب الضغط p_2 ودرجة الحرارة T_2 والحرارة الوسطية كما سبق ، ونكرر هذه العملية حتى الحصول على الدقة المطلوبة .

ملاحظة : من أجل سرعات عالية وأقطار أنابيب كبيرة فإن دقة الحساب بالطريقة السابقة تقل كثيراً .



الفصل الثاني

آلات وأنظمة الضخ ،التصنيفات ومبدأ العمل

Pumping Machines And Pumping Systems , Classifications And Operating Principle

1 - 2 - الآلات الهيدروليكية Hydraulic machines

هي تلك الآلات التي تعمل على تحويل القدرة الميكانيكية إلى قدرة نوعية للسائل أو تحويل القدرة النوعية للسائل إلى قدرة ميكانيكية.

الآلات الهيدروليكية التي تعمل على زيادة القدرة النوعية للسائل (القدرة الحركية) تسمى آلات الضخ (مضخات ، مراوح، ضواغط). والآلات الهيدروليكية التي تستفيد من القدرة النوعية (الحركية) للسائل وتحولها إلى قدرة ميكانيكية تسمى المحركات الهيدروليكية (العنفات، المحركات الهيدروليكية الحجمية). ويبين الشكل (1-2) المبدأ الأساسي لعمل كل من محطة ضخ ومحطة كهرومائية والمقارنة بينهما ، كما يبين الشكل (2-2) تصنيف الآلات الهيدروليكية.

2 - 2 - آلات الضخ Pumping Machines :

تستخدم المضخات في محطات الضخ لرفع السائل من مستوى سفلي إلى مستوى علوي وتستمد هذه المضخات الطاقة من محركات كهربائية أو محركات ذات احتراق داخلي أو أي نوع آخر من المحركات. إضافة إلى ذلك فإن المضخات تعمل على التغلب على مقاومات الاحتكاك في الأنابيب والتغلب على الضغط في خزان التجميع عندما يكون الخزان مغلقاً.

مبدأ عمل آلات الضخ

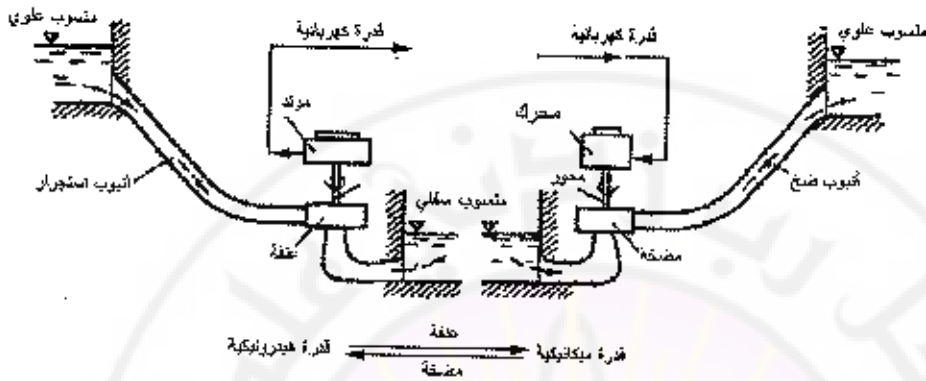
تعمل جميع المضخات على زيادة طاقة السائل إلا أنها تختلف عن بعضها البعض بآلية نقل الطاقة للسائل. مثلاً يزداد ضغط السائل في آلات الضخ ذات الريش عن طريق دوران السائل في الدوارة، وفي الآلات النافثة عن طريق المزج بين تيارين يتمتعان بقدرتين مختلفتين، أما في الآلات الحجمية فيزداد الضغط نتيجة الضغط المباشر على السائل.

أولاً - آلات الضخ ذات الريش - الآلات الديناميكية - Dynamic Pumps :

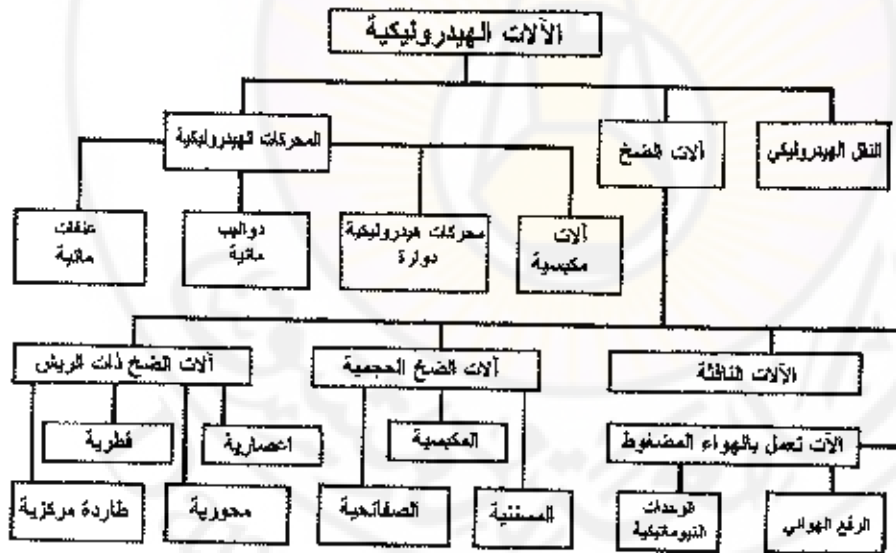
يصنف هذا النمط من الآلات في الصناعة الحديثة إلى ثلاثة أنواع: الطاردة المركزية

Centrifugal والمحورية Axial والإعصارية Regenerativ-turbine، نجد هذه المضخات تطبيقات واسعة نظراً لسهولة وصلها المباشر مع طيف واسع من المحركات الكهربائية

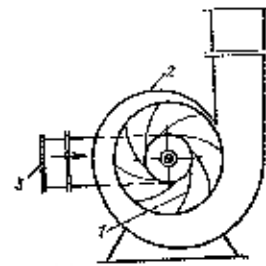
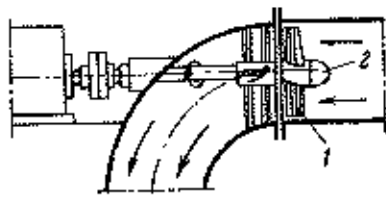
ولمزدودها الجيد ومسهولة تجميعها وصيانتها كما أنها قادرة على تأمين غزارات كبيرة بضغط عالية .



الشكل (2-1) مقارنة بين مبدأ عمل محطة ضخ ومحطة كهرومائية .

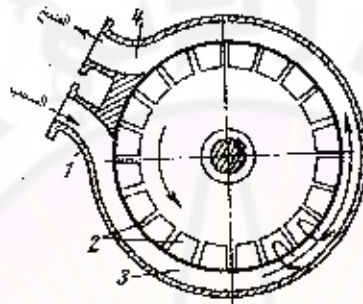


الشكل (2-2) تصنيف الآلات الهيدروليكية



الشكل (2-4) مضخة محورية

الشكل (2-3) مضخة طاردة مركزية



الشكل (2-5) مضخة إعصارية

يمثل الشكل (2-3) رسماً تخطيطياً لمضخة طاردة مركزية، في هذا النوع من المضخات تثبت الريش العاملة على أقراص (1) يوصل أحدها مباشرة إلى محور الدوران الموصول مباشرة إلى المحرك، يدخل السائل عبر أنبوب السحب (3) يكتسب السائل طاقة أثناء حركته بين الريش وبفعل القوى الطاردة يتحرك مبتعداً عن محور الدوران ليخرج من الدواليب العامل إلى جسم الآلة الذي يشكل مغلفاً على شكل حلزون (2) ومنه يخرج السائل عبر أنبوب الضخ (4). أما الشكل (2-4) فيمثل رسماً تخطيطياً لمضخة محورية، حيث تثبت الريش (1) بزاوية معينة على محور دوران (2) لتشكل الدواليب العامل الذي يتوضع داخل أنبوب لجريان المائع ، وعند مرور السائل بين الريش فإن الأخيرة تؤثر فيه وتزيد طاقته وتحركه باتجاه محور المضخة. يعطى الرسم التخطيطي للمضخة الإعصارية ومبدأ عملها بالشكل (2-5) يتوضع الدواليب العامل مع الريش المستوية القطرية (2) في جسم المضخة بشكل مركزي، عند عمل المضخة يدخل السائل عبر فتحة السحب (1) وعند وصوله إلى جوف المضخة يدخل في القناة بين ريشتين متجاورتين

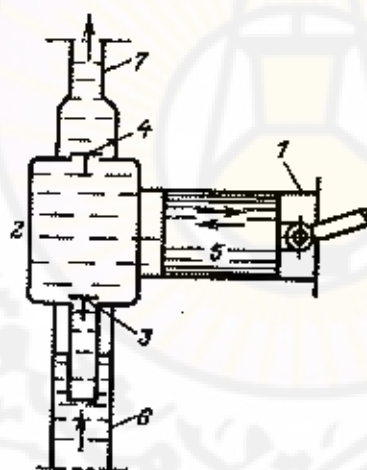
متحركاً بحركة إحصارية ليخرج من جديد إلى القناة في جسم المضخة (3) ليعود للدخول بين ريشتين جديدتين وهكذا إلى أن يصل إلى مخرج المضخة (4).

ثانياً - آلات الضخ الحجمية (ذات الإزاحة الموجبة) :

Positive-Displacement Pumps :

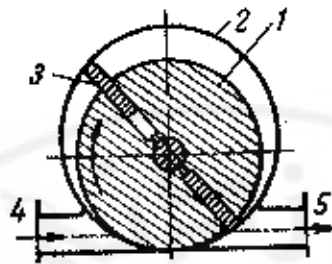
تعتمد هذه المضخات في عملها على أن سحب السوائل وإزاحتها يتم بواسطة عناصر صلبة (مكابس ، صفائح ، مسننات) تتحرك داخل حجرات وذلك عن طريق الضغط المباشر على السائل ولها عدة أنواع نبين اثنين منها هنا .

يمثل الشكل (6-2) التصميم الأبسط لمضخة ترددية (مكبسية) Reciprocating Pump وفيها أسطوانة (1) متصلة إلى حجرة صمامات (2) يتوضع فيها صمام للسحب (3) وآخر للضغط (4) ، يتحرك مكبس (5) داخل الأسطوانة بحركة ترددية ، ويتم السحب عبر الأنبوب (6) ويضخ السائل إلى الأنبوب (7) بالتناوب . يتم تحريك المكبس بواسطة محرك يوصل بالربط المباشر أو بواسطة جملة نقل حركة . إن سرعة المكابس في هذه الآلات محدودة وبالتالي لا يمكن ربطها بمحركات كهربية ذات سرعات عالية، كما أن التوافق في الآلات الترددية يرتبط بشروط الحركة للمكبس.



الشكل (6-2) مضخة مكبسية

المضخات الحجمية الدورانية **Sliding-gate rotary pumps** والمعروفة باسم المضخات الدورانية لا تخضع لهذه السليبيات، وتمثل المضخة الصفائحية نموذجاً لهذه المضخات وهي مبينة في الشكل (7 - 2) :



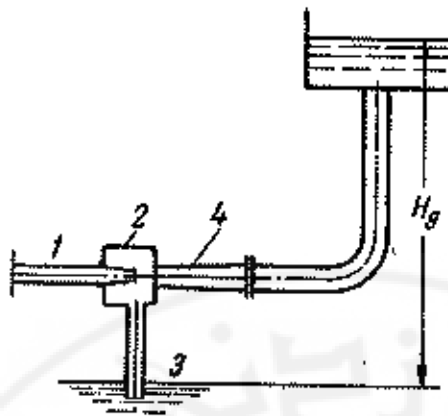
الشكل (7 - 2) مضخة صفائحية

وتتألف من دوارة مصممة (1) متوضعة بشكل لا مركزي داخل جسم الآلة مزودة بقنوات قطرية متساوية العرض لا تصل إلى مركز الدوران (2) محور الدوارة يمتد إلى خارج جسم الآلة ليوصل إلى محور دوران المحرك تحوي القنوات على صفائح (3) قابلة للحركة بشكل قطري ترددي ضمن القناة بفعل القوى الطاردة المركزية التي تتعرض لها . عندما تدور الدوارة (1) يدخل السائل عبر فتحة السحب (4) ليضخ بعد اكتسابه الطاقة عبر فتحة المضخ (5) . هذا النوع من المضخات هي مضخات عكوسة أي أنه إذا عكست جهة دوران محور المضخة فإن المضخة تعمل على ضخ السائل في الاتجاه المعاكس . يوصل محور هذه المضخة مباشرة إلى محور دوران المحرك الكهربائي.

ثالثاً - المضخات النافثة وآلات الرفع الهنيوماتيكي للسوائل

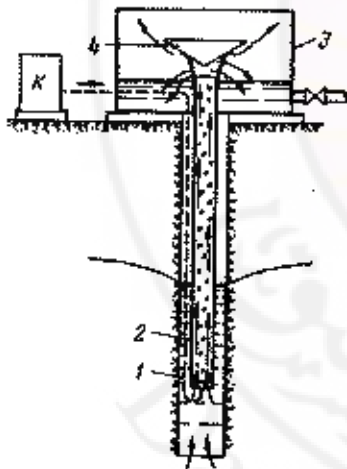
Jet Pumps and Penumatic Lifts For Liquids :

تتمتع المضخات النافثة بالكثير من التطبيقات والاستخدامات، يبين الشكل (8 - 2) مخططاً لمضخة نافثة حيث يجري السائل العامل عبر الفوهة (1) تعمل هذه الفوهة على زيادة سرعة الجريان تدريجياً ونتيجة لذلك فإن الطاقة الحركية للجريان تزداد لتصل إلى قيمة كبيرة عند دخول السائل إلى الحجرة (2) ، يؤدي تزايد الضغط الديناميكي في الحجرة إلى انخفاض



الشكل (8 - 2) مخطط لمضخة نافثة

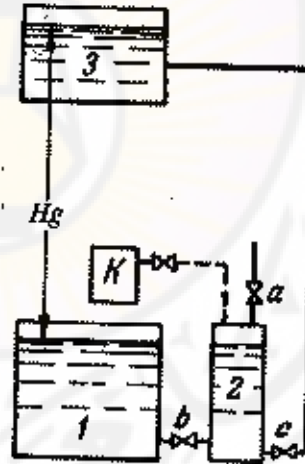
الضغط الستاتيكي (طبقاً لقانون انحفاظ الطاقة) فيها وبالتالي يتولد فرق في الضغط بين الضغط داخل الحجرة (2) والضغط الجوي المطبق على السائل في الحوض (3) مما يؤدي إلى سحب السائل من الحوض (3) إلى الحجرة (2) حيث يمتزج السائلان العامل والمسحوب ويخرجان معاً عبر أنبوب متوسع (4) ثم إلى أنبوب الضخ الموصول إلى خزان الضخ ذي الارتفاع H_g .



الشكل (10 - 2) مضخات نيوماتيكية

لرفع السوائل لأغراض صناعية

- 1- حوض
- 2- أسطوانة هواء
- 3- خزان
- 4- أنبوب الرفع
- 5- مضغط K



الشكل (9 - 2) مخطط للرفع النيوماتيكي

يبين الشكل (9 - 2) مخططاً للرفع النيوماتيكي المرحلي للسوائل حيث يرفع السائل من الحوض (1) إلى الخزان (3) بارتفاع H_g باستخدام مضغط K وأسطوانة هواء (2)، مع

توقف الضاغط وفتح الصمامين a, b يتم ملء أسطوانة الهواء (2) بالسائل من الحوض (1) ، بعد ذلك يغلَق الصمامين a, b ويشغل الضاغط K ليدفع السائل عبر الصمام c من الأسطوانة (2) إلى الخزان (3) . تنظم دورة التزويد بفواصل زمنية. تم تصنيع مضخات بنوماتيكية لرفع السوائل لأغراض صناعية، وتعرف باسم الروافع الهوائية أو الغازية . يستخدم هذا النوع من الروافع - على سبيل المثال - لرفع الماء والنفط من آبار الحفر، هذا النوع من الرفع مبين بشكل تخطيطي في الشكل (10-2) حيث يتوضع أنبوب رفع الماء (2) داخل الأنبوب المغلف (1). يأتي الهواء المضغوط من الضاغط K عبر أنبوب تزويد الهواء المضغوط (المبين بخط منقطع) إلى أسفل أنبوب رفع الماء. أثناء المرور عبر فلتر فإن الهواء سيمتزج بشكل جيد ليشكل مزيجاً من الماء والهواء في أنبوب رفع الماء، هذا المزيج يتمتع بكثافة أقل من كثافة الماء في الجوف المحصور بين أنبوب الرفع والأنبوب المغلف ، وبالتالي لتحقيق التوازن في الضغط فإن عمود السائل ذي الكثافة يجب أن يكون أكبر وبالتالي سيرتفع مزيج الماء والهواء داخل أنبوب الرفع وبنسبة معينة فإن هذا المزيج سيصل إلى الحافة العلوية لأنبوب الرفع ويتجاوزها . أي أن ضغط عمود الماء الأثقل الموجود داخل المغلف سيدفع المزيج إلى الأعلى وعندما يصل المزيج إلى أعلى أنبوب الرفع (4) وينسكب في الخزان (3) فإنه سيفصل إلى ماء يبقى في الخزان وهواء ينطلق بشكل حر.

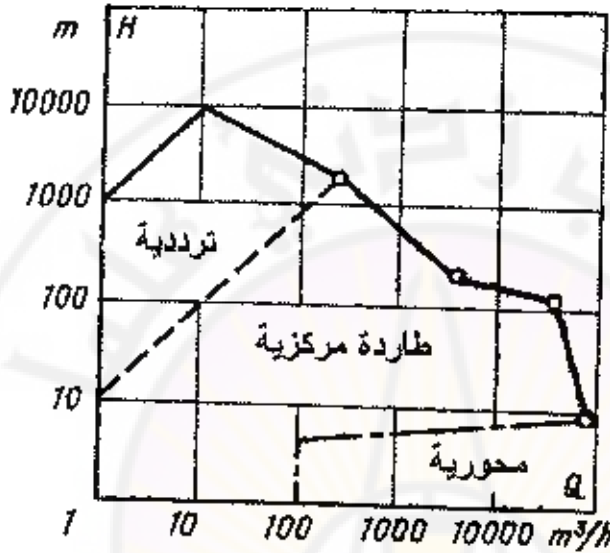
مردود هذه الآلات منخفض إلا أنها تتميز بعدم وجود أجزاء متحركة ولذلك فإنها تجد تطبيقاً واسعاً، كما أنها تستخدم لتحريك السوائل والغازات. في بعض الأحيان ترفع السوائل وتتقل باستخدام الرفع البنوماتيكي باستخدام الهواء المضغوط أو غاز.

2-3 - تصنيف المضخات من حيث خواص السائل المضخوخ والبارامترات الأساسية : Pumps Classification Based On Fluid Properties And Main Parameters :

يبين الشكل (2-2) تصنيف الآلات وفق خواص السوائل التي تحركها . غازات أو ماء نقي أو محاليل يمكن أن تضخ باستخدام أي نوع من المضخات المذكورة أعلاه . تضخ السوائل الأكثر لزوجة باستخدام المضخات الحجمية والمضخات ذات الريش . ومن وجهة نظر اهتراء أجزاء الآلة فإن مزيج الماء مع الأملاح والوجل يضخ عادة باستخدام مضخات ذات ريش أو نافثة.

البارامترات الأساسية الأهم لأي مضخة هي الغزارة والضاغط اللذان تقدمهما ، وبالتالي فإنه من المفيد من الناحية الاستثمارية تصنيف المضخات وفق هذين البارامترين.

كل صنف من المضخات يناسب مجالاً محدداً من الغزارة والضغط. وبالتالي فإننا نجد أن استخدام المضخات المكبسية و الدورانية يناسب الحاجة لضخ غزارات قليلة نسبياً بضغط عالية وهذا يعود لقابليتها أن تقدم ضغوطاً عالية جداً لكميات قليلة من السائل ، وهذه الحالة لا توافق أبداً حالة المضخات المحورية



الشكل (11 - 2) مجال أنواع المضخات المستخدمة حسب الغزارة والضغط المطلوبين

التي تصمم وتصنع لضخ كميات كبيرة من السائل بضغط منخفض. وكما هو واضح من الشكل فإن المضخات الطاردة المركزية تغطي مجالاً واسعاً من الغزارات والضغط مما يجعلها الأكثر استخداماً وانتشاراً .

باستخدام المعطيات والبيانات المتوفرة للمضخات المصممة والمستخدمه وربط ضاغط وغزارة العمل لهذه المضخات يمكننا الحصول على المخطط اللوغاريتمي (11 - 2) الذي يبين مجال الضغط والغزارة الذي يعمل به كل صنف من أصناف المضخات المذكورة من أجل ضخ الماء.

2 - 4 - التطبيقات الصناعية لألات الضخ المختلفة : Industrial Applications

المضخات ذات الريش هي الأوسع انتشاراً في المنشآت الاقتصادية لاسيما أنها تعمل على ضخ السوائل والغازات كما أنها يمكن أن تولد ضغطاً يصل إلى $2500 [mH_2O]$ وأكثر وتدفقاً ساعياً يصل إلى $100000 [m^3/h]$ أو $1000000 [m^3/h]$ من السائل أو الغاز. على التتالي. تستخدم محطات الطاقة البخارية المضخات الطاردة المركزية لتغذية المراجل ولتزويد

أبراج التبريد بالماء اللازم ولتغذية منظومات المياه ولتدوير المياه لتبريد العنفات ، وكذلك لتدوير الماء الساخن لتسخين أنابيب البخار الرئيسية.

تستخدم المضخات الطاردة المركزية أيضا في محطات توليد الطاقة الكهربائية، وفي تزويد المساكن بالماء اللازم وكذلك في منظومات إطفاء الحريق. تصمم مضخات طاردة مركزية تقليدية أو مغلقة خاصة للاستخدام ضمن مجالات الهندسة النووية.

بسبب زيادة استطاعة العنفات البخارية فقد أصبحت تستخدم مضخات محورية لتزويد المبردات بالماء اللازم. كما تستخدم مراوح طاردة مركزية كبيرة السعة مجهزة لتوليد ضغوط كبيرة مطبقة كطاردات الدخان أو مراوح نافخة في وحدات المراحل. يتم الآن استخدام وحدات جريان محوري قسري ثلثية لمتطلبات المراحل ذات المواصفات العالية .

من بين المضخات الحجمية تستخدم المضخات المكسية في محطات الطاقة الحرارية لتغذية المراحل البخارية صغيرة السعات كما تستخدم المضخات الدورانية في التشحيم و في أنظمة التحكم بالعنفات والمضخات والضواغط الضخمة.

تستخدم المضخات النافثة لطرود الهواء من مبردات العنفات البخارية ولمزج الماء الداخل والخارج من مأخذ المستخدمين في أنظمة التدفئة. تستخدم الضواغط المكسية لتبريد السطوح الحارة لوحدات المراحل من خلال بخ الهواء ولتزويد أدوات التحكم البنيوماتيكي بالهواء المضغوط في محطات الطاقة.

يستخدم الرفع الهوائي في بعض الأحيان في محطات الطاقة الحرارية لرفع الماء اللازم من الأبار لتغذية أنظمة التزويد بالمياه الرئيسية أو الاحتياطية.

إضافة لذلك ما تزال هناك الكثير من الاستخدامات لكل أنواع المضخات في مجال هندسة الطاقة .

تستخدم المضخات الطاردة المركزية لتزويد الماء اللازم ولتأمين العناصر الكيميائية المختلفة والمحاليل والوقود اللازم في عمليات الإنتاج. الضواغط الطاردة المركزية هي النموذج الرئيسي من آلات التزويد بالهواء (الغاز) المضغوط . لاقت هذه الآلات تطبيقاً واسعاً في المنظومات التي تحتاج لنقل الغاز لمسافات طويلة.

المراوح المحورية والطاردة المركزية لها الكثير من الاستخدامات. أكثر مهمات التهوية الصناعية تستخدم فيها مراوح طاردة مركزية بشكل رئيسي. الضواغط المحورية تستخدم لضغط الغاز و تزويده بكميات كبيرة و تلاقي هذه الآلات انتشاراً واسعاً في مجموعات العنفات الغازية.

تستخدم المضخات المحورية بشكل متزايد في مجال الهندسة الحرارية وهندسة الطاقة وتحل محل المضخات الطاردة المركزية ولاسيما في التطبيقات ذات الحاجة لغزارات كبيرة. الاحتياجات البيوميكانيكية من أجل تشغيل المعادن أو وحدات تصنيع الآلات يتم الحصول على الهواء المضغوط اللازم لها استخدام ضواغط مكسية أو دورانية.

الصناعات الكيميائية الرئيسية تستخدم بشكل واسع ضواغط ترددية عالية الضغط. المضخات النافثة ، الرفع الغازي ، الوحدات البيوميكانيكية تستخدم للكثير من الأغراض في الصناعات الكيميائية والنفطية.

المضخات الطاردة المركزية والنافثة المخصصة لضخ مياه الصرف الصحي والأحوال تجد استخداماً في أنظمة التخلص من الأحوال في محطات الطاقة الحرارية وفي الأنظمة الهيدروليكية للتخلص من الفضلات.

تستخدم المضخات للكثير من الأغراض والمنشآت السكنية والاقتصادية إذ لا تكاد منشأة أو مؤسسة تخلو من المضخات ومن أنواع الاستثمار للمضخات:

- مضخات الري: تستخدم في المنشآت الزراعية وهي غالباً من الآلات الطاردة المركزية وفي حالة ضخ الماء من الآبار العميقة تستخدم مضخات غاطسة وهي مضخات طاردة متعددة المراحل.

- مضخات معالجة المياه البحرية: وهي أيضاً من الآلات الطاردة المركزية وتستخدم لاستثمار مياه البحر من أجل إطفاء الحرائق أو التبريد باستخدام الماء البحري وكذلك تزويد أحواض تربية الأسماك بمياه البحر.

- مضخات تزويد أحواض السباحة بالماء وتنقية المياه: وتصنع من الفولاذ أو الفير غلاس وتزود بفلتر تساعد على تنقية مياه تزويد أحواض السباحة مهما كان مصدر هذه المياه، ومن هذه المضخات نوع يحمل على عربة نقالة يستخدم لتنظيف أحواض المسابح ومزودة بيد تيليسكوبية لمراقبة الآلة تحت الماء.

- مضخات معالجة السوائل الثقيلة والزيوت: وهي غالباً مسننية معدة خصيصاً لنقل السوائل عالية اللزوجة والخالية من الشوائب وهي ذات أحجام مختلفة تناسب المساحة الصغيرة المقروكة للمضخة ، وأنواعها كثيرة فمنها الأفقية ومنها الشاقولية. وتستخدم أيضاً لضخ المازوت في المنشآت الحرارية ، كما تعمل على حقن الوقود بضغط الاشتعال في غرفة الاحتراق المركزي.

- مضخات التدفئة المركزية وأنظمة تشغيل الماء الساخن: وهي مضخة طاردة ذات تشغيل وإيقاف آليين، تصنع من مواد لا يترسب الكلس عليها . وتستخدم كمضخة تسريع في أنظمة التدفئة المركزية.

- مضخات معالجة زيت الزيتون والخل: ويمكن أن تكون مكبسية تستخدم لمعالجة السوائل الخفيفة كالخل أو طاردة تستخدم لمعالجة السوائل الثقيلة. و تعمل هذه الآلات لنقل كميات كبيرة من السائل من مكان إلى آخر في المخزن. وتصنع من الحديد الصلب.

- مضخات الكترونية ذات سعة متغيرة: تتكون من غشاء لدن ومغناطيس الكتروني ومجموعة صمامات ولوحة قيادة، لتحديد سعة المضخة المتغيرة فإن الدارة الإلكترونية تعطي الإلكترونيات الأحادية التي تحدد تشغيل المغناطيس الالكتروني وتحكم به فيتحرك الغشاء الذي يضخ التدفق المطلوب وتستخدم هذه المضخات للحالات الخاصة عالية الدقة. إضافة لما ذكر أعلاه يمكن الحديث عن أنواع أخرى كثيرة جداً من استخدامات آلات الضخ مثل :

- مضخات خدمة عامة.

- مضخات ذات حجم صغير لإزالة الماء المهدور و المجاري .

- مضخات الاستعمالات المنزلية .

- أنظمة الحفر العميقة و الماء الموحل .

- مضخات غاطسة للأبار العميقة .

- مضخات شمسية

2- 5 - المؤشرات الديناميكية لمحطة الضخ:

Dynamic Parametres of Pumping Station :

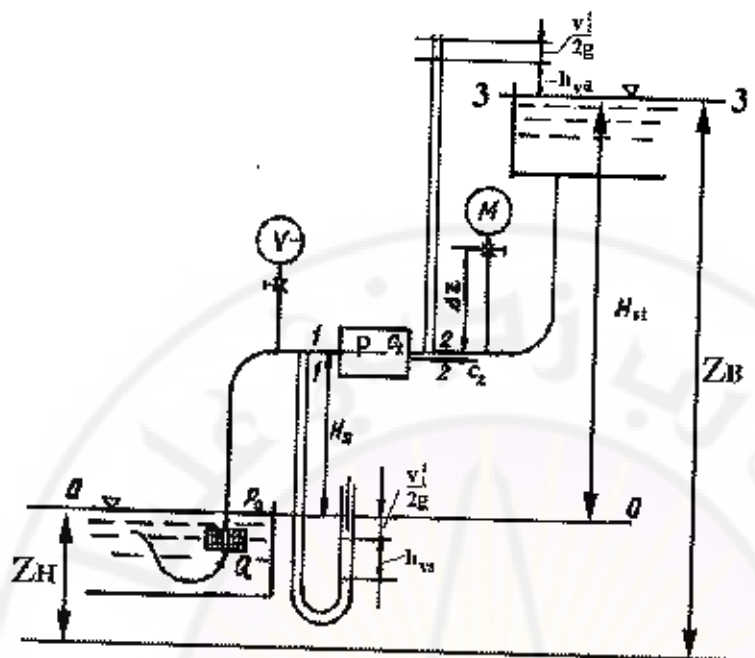
يبين الشكل (12-2) المخطط الهيدروليكي لمحطة ضخ يتضمن المضخة وأنبوبي

السحب والضخ ، وحسب المخطط يمكن تحديد مؤشرات هذه المحطة كالتالي :

- الضاغط الستاتيكي H_{st} : ويعبر عن الفرق بين مستوي السائل في الخزانين العلوي والسفلي ، ويتعبّر آخر يعبر عن الارتفاع الذي يرتفع إليه السائل ويعطى بالعلاقة:

(1-2)

$$H_{st} = Z_H - Z_h$$



الشكل (2-12) المخطط الهيدروليكي لمحطة الضخ .

أما إذا كانت عملية الضخ إلى خزان مغلق وهناك ضغط زائد فوق الماء P عندها يصبح الارتفاع الستاتيكي:

$$H_{st} = Z_B - Z_H + \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (2-2)$$

- ارتفاع السحب H_s : الارتفاع الهندسي للسحب H_s ويعبر عن ارتفاع محور المضخة عن مستوي الماء في الخزان السفلي.

- الضغط عند مدخل المضخة: يمكن حساب الضغط عند مدخل المضخة بتطبيق معادلة برنولي بين المستوي 0-0 والمقطع 1-1 . نعد المستوي 0-0 مستوي مقارنة منطقاً على سطح الماء في الخزان السفلي حيث يكون $Z_0 = 0$ ، $V_0 = 0$ ، $P_0 = P_a$

$$z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = H_s + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{vs} \quad (2-3)$$

وبالتالي يتحدد الضغط عند مدخل المضخة بالعلاقة:

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - \left(H_s + \frac{v_1^2}{2g} + h_{vs} \right)$$

حيث h_{vs} الضباغات في أنبوب السحب

تشير العلاقة الأخيرة إلى وجود ضغط ناقص في المقطع 1-1 .

أما الارتفاع التخلخلي لسحب المضخة H_B فيعرف بالعلاقة:

$$H_B = \frac{p_a - p_1}{\rho g} = H_s + \frac{v_1^2}{2g} + h_{vs} \quad (2-4)$$

وبما أن الضغط المطلق للسائل لا يمكن أن يكون أقل من الصفر فإن قيمة H_B تكون دائماً

وفي حالة ضغط جوي عند سطح البحر حيث $p_a = 10^5 [Pa]$ والسائل المراد

ضخه هو الماء وتكون قيمة الارتفاع الهندسي للسحب $H_B < 10 [m]$ دوماً.

- **الضغط عند مخرج المضخة (مدخل خط الضخ):** نطبق معادلة برنولي بين المقطع 2-2

ومستوي السائل في الخزان العلوي باعتبار أن مستوي المقارنة هو نفسه 0-0 وبالأخذ بعين

الاعتبار أن قيمة السرعة للسطح الحر للسائل معدومة $V_B = 0$ والضغط المطلق على السطح

هو الضغط الجوي p_a نجد:

$$\frac{p_2}{\rho g} + H_s + \frac{v_2^2}{2g} = H_{st} + h_{vd} + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} \quad (2-5)$$

حيث h_{vd} الضباغات الهيدروليكية في أنبوب الضخ

$$\frac{p_2 - p_a}{\rho g} = H_{st} - H_s - \frac{v_2^2}{2g} + h_{vd} \quad (2-6)$$

- **ضاغط المضخة H_p عند الضخ من خزان سفلي إلى خزان علوي:**

ضاغط المضخة يساوي إلى فرق الطاقة النوعية للسائل عند مخرج أنبوب الضخ e_2 وعند

مدخل أنبوب السحب e_1 .

$$H_p = e_2 - e_1$$

يقدر ضاغط المضخة بالأمتار ولتحديده نطبق معادلة برنولي على نقطتين من خط تيار الأولى

تقع على سطح السائل في الخزان السفلي والثانية على سطح السائل في الخزان العلوي كما هو

مبين على الشكل (2-12) .

بفرض أن سرعة السائل عند طرف سحب المضخة v_s وضغطه p_s وسرعة السائل عند طرف دفع المضخة v_d والضغط p_d ولنعتبر أن المضخة تثبت على ارتفاع H_s من السطح السائب للماء وأن الخزان العلوي يرتفع عن محور المضخة بمقدار h_d وأن طول أنبوب الامتصاص L_s وقطره d_s وطول أنبوب الضخ L_d وقطره d_d وفرق الارتفاع بين طرفي دفع وسحب المضخة مهمل لأنه في معظم المضخات تركيب بوضعية أفقية، بتطبيق العلاقة:

$$Hp = \frac{p_3 - p_1}{\rho g} + \frac{v_3^2 - v_1^2}{2g} + (z_3 - z_1) + \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2-7)$$

باعتبار أن $p_1 = p_3 = p_a$ و $v_1 = v_3 = 0$ يصبح ضاغط المضخة بالشكل:

$$\begin{aligned} Hp &= (z_3 - z_1) + \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \\ &= h + \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \end{aligned} \quad (2-8)$$

أي أن ضاغط المضخة يستهلك من أجل رفع السائل بالمقدار $h = h_s + h_d$ وفي تغطية فواقد الاحتكاك والفواقد المحلية في كل من أنبوبي السحب والدفع. بتطبيق معادلة برنولي بين طرفي المضخة (طرف السحب s وطرف الضخ d) بحسب رموز الشكل السابق نجد:

$$z_s + \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = -Hp + z_d + \frac{p_d}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} \quad (2-9)$$

ومنه يكون ضاغط المضخة :

$$Hp = (z_d - z_s) + \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad (2-10)$$

ولما كان غالباً $d_d = d_s$ وبالتالي $v_d = v_s$ وفرق المنسوب بين طرفي المضخة $z_d - z_s$ يمكن إهماله وبالتالي تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

$$Hp = \frac{p_d - p_s}{\rho g} \quad (2-11)$$

أي أن ضاغط المضخة يساوي إلى فرق ارتفاع الضغط بين طرفي السحب والدفع.

2 - 6 - الپارامترات الفنية الرئيسية المميزة لعمل آلات الجريان :

Main Technical Parameters Specialized The Flow Machines :

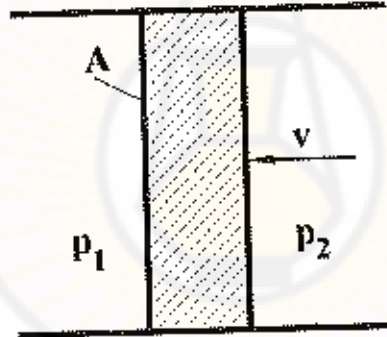
كل آلة جريان سواء أكانت صفة أم مضخة أم مروحة أم ضاغطاً يجب أن تتمتع بالمعطيات الفنية التالية:

1 - الغزارة (Capacity (Rate of flow) : تمثل حجم السائل الذي تضخه المضخة خلال واحدة الزمن.

للمضخات $Q [m^3/s]$ ، أما للمراوح $L [kg/s]$.

2 - الضغط (الضاغط) (Pressure (Head) : ضغط آلة الضخ هو مفهوم طاقي يعبر عن قانون انحفاظ الطاقة. نطبق هذا القانون على حركة السائل المار عبر آلة الضخ ضمن شرط أن درجة حرارة السائل تبقى ثابتة أثناء مروره عبر آلة الضخ ، ويعبر عنه كما يلي:

تغير الطاقة الميكانيكية للجسم (السائل) يساوي مجموع أعمال القوى الخارجية، ولصياغة هذا القانون بعلاقة رياضية نحدد القوى المؤثرة في السائل وهي : القوى الكتلية و قوى الضغط و قوى الاحتكاك و القوى التي يكتسبها السائل أثناء مروره في الجسم العامل بالآلة الضخ مثلاً (الدوارة في آلة الضخ الطاردة المركزية).



الشكل (13 - 2) مخطط لإيضاح عمل قوى الضغط

أ - عمل قوى الضغط :

نفهم عمل هذه القوى نأخذ المثال التالي حسب الشكل (13 - 2) :

لنتكن لدينا أسطوانة مساحة مقطعها A يتحرك فيها مكبس وفي لحظة زمنية محددة يكون الضغط على يمين المكبس p_2 وعلى يساره p_1 بحيث $p_1 < p_2$ فتكون قوى الضغط $p_2.A > p_1.A$. نتيجة لتأثير هاتين القوتين فإن المكبس يتحرك يساراً (باتجاه القوة الأصغر).

- الضغط المنخفض) وبالتالي عمل محصلة قوى الضغط الناتجة عن تحريك المكبس بسرعة v خلال زمن t تعطى بالعلاقة: يحدد عمل كل من هذه القوى كما يلي :

$$W_p = (p_2 - p_1) A \cdot v \cdot t = (p_2 - p_1) Q \cdot t \quad (2-12)$$

ب - عمل قوى الاحتكاك :

نعلم سابقاً أن فاقد الضغط h_w هو عبارة عن العمل الذي تقوم به قوى الاحتكاك أثناء مرور السائل منسوباً إلى واحدة وزن السائل المتحرك وبما أنه خلال الزمن t يمر وزن من السائل عبر آلة ضخ مقداره $\gamma \cdot Q \cdot t$ لذا فإن محصلة عمل قوى الاحتكاك أثناء مرور السائل في هذا الوزن يعطى بالعلاقة:

$$W_f = \gamma \cdot Q \cdot t \cdot h_w \quad (2-13)$$

ج - عمل القوى الناتجة عن الجزء العامل لآلة الضخ :

لنفرض أن العمل الذي يقدمه الجزء العامل في آلة الضخ لواحدة وزن السائل H_T ولما كان وزن السائل الذي يمر خلال فترة زمنية t هو $(\gamma \cdot Q \cdot t)$ ، يكون العمل الذي يقوم به الجزء العامل في آلة الضخ أثناء تحريك السائل من المقطع 1-1 إلى المقطع 2-2 المبينة على الشكل :

(2-15)

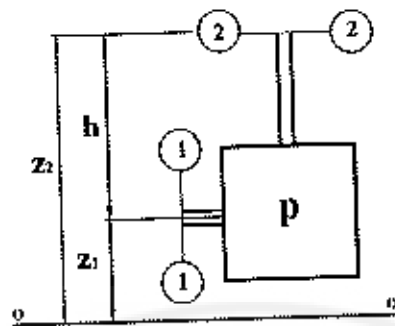
$$W_H = \gamma \cdot Q \cdot t \cdot H_T \quad (2-14)$$

إن عمل القوى المحددة بالعلاقات (2-12) و (2-13) و (2-14) يجب أن يساوي تغير الطاقة الميكانيكية التي تساوي بدورها إلى مجموع الطاقة الحركية $\frac{mv_2^2}{2}$ والطاقة الكامنة mgh .

يعطى تغير الطاقة الحركية للسائل عند مروره من المقطع 1-1 إلى المقطع 2-2 بالعلاقة :

(2-15)

$$\Delta E_K = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{\rho \cdot Q \cdot t \cdot v_2^2}{2} - \frac{\rho \cdot Q \cdot t \cdot v_1^2}{2} \quad (2-15)$$



الشكل (2-14) مخطط حساب عمل القوى الناتجة عن الجزء العامل للآلة

لتحديد تغير الطاقة الكامنة نختار مستوي مقارنة 0-0 كما في الشكل أعلاه وبفرض أن كمية السائل المارة عبره خلال زمن t هي : $m = \rho Q t$ فإن تغير الطاقة الكامنة لسائل تعطى بالعلاقة:

$$\Delta E_p = \rho Q t g Z_2 - \rho Q t g Z_1 \quad (2-16)$$

عندها يكتب قانون انحفاظ الطاقة لحركة السائل عبر آلة الضخ بالشكل :

$$\Delta E_k + \Delta E_p = W_H - W_T - W_P \quad (2-17)$$

في العلاقة أدخلت W_T (عمل قوى الاحتكاك) و W_P (عمل قوى الضغط) بإشارات سالبة لأنها تعمل على كبح السائل أثناء مروره في المضخة. بتعويض العلاقات من (2-12) إلى (2-16) في العلاقة (2-17) نجد:

$$\frac{\rho Q t}{2} (v_2^2 - v_1^2) + \rho Q g t (z_2 - z_1) = \gamma Q t H_T - \gamma Q t h_w - Q t (p_2 - p_1) \quad (2-18)$$

$$\gamma Q t (H_T - h_w) = \gamma Q t \left(\frac{v_2^2}{2g\gamma} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) - \gamma Q t \left(\frac{v_1^2}{2g\gamma} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) \quad (2-19)$$

ولكن $H = H_T - h_w$ ضاغط المضخة

$$H = \left(\frac{v_2^2}{2g\gamma} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) - \left(\frac{v_1^2}{2g\gamma} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) \quad (2-20)$$

يسمى الحد $\left(\frac{v_2^2}{2g\gamma} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right)$ احتياطي الطاقة الكلية للتيار عند الخروج من الآلة.

يسمى الحد $\left(\frac{v_1^2}{2g\gamma} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right)$ احتياطي الطاقة الكلية للتيار عند مدخل الآلة.

بالتالي من العلاقة (2-19) نجد أن العمل الذي يقوم به الجزء الفعال من الآلة بصرف على تغير الطاقة الكلية للتيار المار عبر الآلة . أما H يسمى ضاغط المضخة ويعبر عن الطاقة المعطاة لمواحدة وزن السائل المار عبر المضخة.

أما إذا كانت آلة الضخ مروحة فإن العلاقة (2-20) تكتب بالشكل :

$$\gamma.H = \left(\frac{\rho v_2^2}{2} + \gamma.z_2 + p_2 \right) - \left(\frac{\rho v_1^2}{2} + \gamma.z_1 + p_1 \right) \quad (2-21)$$

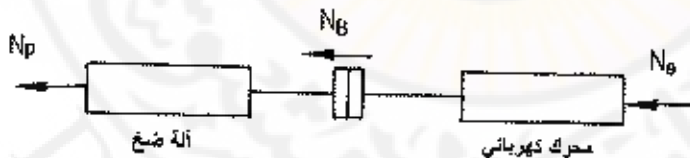
فإذا أخذنا بعين الاعتبار أن الحد $\gamma.z$ صغير بالمقارنة مع الحدود الأخرى وأن $\gamma.H = p$ يمكن أن نكتب (2-21) بالشكل:

$$\Delta p = \left(p_2 + \frac{\rho.v_2^2}{2} \right) - \left(p_1 + \frac{\rho.v_1^2}{2} \right) \quad (2-22)$$

ج - الاستطاعة Power: وهي الطاقة المصروفة (المكتسبة) خلال واحدة الزمن. الاستطاعة المفيدة هي الاستطاعة التي يكتسبها السائل أثناء مروره ضمن الآلة . وتحسب استطاعة المضخة بالعلاقة :

$$N_P = \gamma Q H \quad (2-23)$$

في محطات الضخ أو التهوية تختلف الاستطاعة من نقطة لأخرى



الشكل (2-15) مخطط حساب الاستطاعات المختلفة في محطة الضخ .

توصل المضخة غالباً بمحرك كهربائي يتطلب استطاعة N_e تتحول إلى استطاعة ميكانيكية على محور الخرج من المحرك مقدارها N_B قيمتها أصغر من N_e بسبب الفواقد في المحرك الكهربائي ويعبر عن هذه الفواقد بمرئود المحرك الكهربائي $\eta_e = N_B / N_e$. تسمى

الاستطاعة التي تحصل عليها آلة الضخ عند مدخلها N_B بالاستطاعة اللازمة لآلة الضخ. تنقل هذه الاستطاعة لتيار السائل المار عبر الآلة ويخرج السائل من الآلة باستطاعة مفيدة N_p وتكون $N_p < N_B$. ويعبر عن نسبة استطاعة الخرج إلى الدخل للمضخة بمردود المضخة $\eta_p = N_p / N_m$ في المضخات الحجمية تتحدد الاستطاعة المفيدة بالعلاقة :

$$N_p = Q \cdot (p_2 - p_1) \quad (2-24)$$

4 - مردود آلة الضخ Efficiency : يتحدد ضياع الاستطاعة في الآلة الهيدروليكية بمردودها η_p ويقسم إلى :

مردود هيدروليكي ، مردود حجمي ، مردود ميكانيكي .

المردود الميكانيكي : يعبر عن الضياع في الاستطاعة على مختلف أشكال الاحتكاك في الجزء الفعال لآلة الضخ فإذا كانت هذه الضياعات هي ΔN فعندها يكون المردود الميكانيكي :

$$\eta_m = (N_B - \Delta N) / N_B$$

المردود الحجمي : تظهر الضياعات الحجمية نتيجة تسريبات جزء من السائل المضخوخ عبر الخلوصات الموجودة في آلة الضخ ونتيجة لعودة السائل من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض وهذه الضياعات تتعلق بالخواص التصميمية للآلة فإذا كانت التسريبات الحاصلة خلال واحدة الزمن هي q عندها يكون المردود الحجمي :

$$\eta_o = \frac{Q}{Q + q} \quad (2-26)$$

المردود الهيدروليكي : بالأخذ بعين الاعتبار الضياعات نتيجة المقاومات الهيدروليكية في مدخل ومخرج الجزء العامل لآلة

الضخ. فإذا كانت ضياعات الضغوط في الجزء العامل لآلة الضخ هي h_w عندها يكون المردود الهيدروليكي :

$$\eta_H = \frac{H}{H + h_w} \quad (2-27)$$

أما مردود المضخة الكلي فيعطى بالعلاقة :

$$\eta_p = \eta_m \cdot \eta_o \cdot \eta_H = \frac{N_p}{N_B} \quad (2-28)$$

ويتعلق هذا المردود بعدة عوامل هي: - نوع وإبعاد وتصميم الآلة، نوع السائل المضخوخ، نظام عمل الآلة، مواصفات الشبكة التي تعمل عليها الآلة.
أما المردود الكلي للمحطة المكونة من (محرك-آلة) ضخ فيعطي بالعلاقة: $\eta_y = N_p / N_e$
ويطلق عليه المردود الطاقوي.

- 5 - عدد الدورات n : وتقدر عادة بدورة في الدقيقة r.p.m.
- عند كل عدد دورات n مختلف تتمتع الآلة بغزارة محددة وتولد ضغطاً مختلفاً، إذا تغير كل من الغزارة والضغط بتغير عدد الدورات n .
- أهم الشروط الواجب مراعاتها لاستثمار الآلة :
- 1 - التوافق بين معطياتها وبين شروط الاستثمار في الضغط والغزارة.
 - 2 - إمكانية تنظيم الغزارة والضغط في حدود معينة.
 - 3 - سهولة التركيب.
 - 4 - سهولة الصيانة.
 - 5 - ثباتها في العمل.
 - 6 - التركيب على محور واحد مع المحرك وسهولة الأتمتة.
 - 7 - قلة الضجيج.

الفصل الثالث

آلات الضخ الطاردة المركزية

Centrifugal Pumps

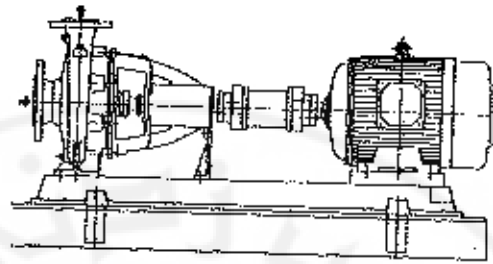
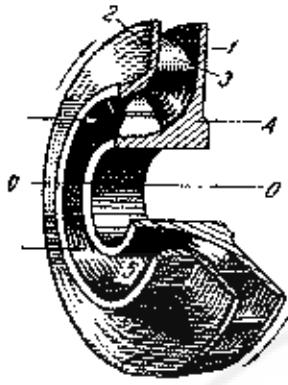
3 - 1 - المواصفات ومبدأ العمل : Principle of Operation

يبين الشكل (1-3) منظراً عاماً لألة طاردة مركزية موصولة مباشرة إلى محور المحرك حيث يدخل السائل المراد ضخه إلى المضخة موازياً لمحور الدوران متجهاً إلى مركز الدولاب العامل بواسطة أنبوب الامتصاص المرتبط بهيكل المضخة ويكون حوض الامتصاص غالباً مكشوقاً ومعرضاً للضغط الجوي لذلك لابد من توفير تداخل في أنبوب الامتصاص ليتمكن السائل من الاندفاع نحو مركز الدولاب ويجهز الدولاب بشفرات يدخل السائل في الأفتية المشكلة بينها حيث تعطي هذه الشفرات عزماً دورانياً للسائل يجبره على الحركة المستمرة من المركز إلى المحيط بعد ذلك يطرد السائل من هذا المجال إلى النافذة الحلزونية بفعل القوى النافذة ، تشكل النافذة الحلزونية هيكل المضخة و تقود السائل إلى فتحة الخروج ليخرج منها قطريا ومن ثم إلى الشبكة وتساعد على تخفيف سرعة السائل أثناء الدفع أي تحول جزءاً من القدرة الحركية إلى قدرة ضغط تساعد السائل على الاندفاع. وفي بعض التصميمات تزود النافذة الحلزونية بموجه على شكل حلقة ثابتة مزودة بأجنحة موجهة غير متحركة تحيط بالدولاب العامل تعمل على تنظيم حركة انتقال الماء من قنوات الدولاب إلى الحلزون .

للمضخات النافذة أنواع:

- 1 - وحيدة الدوارة وتستخدم للتغلب على ارتفاعات لا تتجاوز $60 [m H_2O]$.
 - 2 - متعددة الدورات وتستخدم للتغلب على ارتفاعات أكبر من $60 [m H_2O]$ وتكون مثبته على محور واحد وتكون ضمن تجويف عامل واحد
- مزايا هذه الآلة :

- المردود العالي . - سهولة التصنيع . - التدفق الانسيابي للسائل .
 - إمكانية جعل الآلة والمحرك على محور واحد . - سهولة التنظيم .
- مساوئ هذه الآلة: لهذه الآلة سببة رئيسية وهامة وهي أن تدفق الآلة يتعلق بالضغط المضاد في الشبكة والتغير في هذا الضغط يفود إلى تغير في الغزارة .



الشكل (1 - 3) منظر عام لآلة طاردة مركزية موصولة مباشرة إلى محور المحرك .

تتألف الآلة الطاردة المركزية من عنصرين:

- 1 - الدولاب الدائر Impeller .
- 2 - المغلف الخارجي (الحلزوني) Voliot Case .

2 - 3 - الدولاب الدائر

إن نقل الطاقة من محور الآلة الطاردة إلى تيار السائل يتم عبر الدولاب الدائر أثناء مرور السائل بين الريش. يبين الشكل (2 - 3) مخططاً عاماً للدولاب العامل لآلة ضخ طاردة حيث يتألف الدولاب الدائر من قرصين، قرص أمامي قائد (1) يثبت على محور الدوران وتثبت الريش (3) عليه (القرص الخلفي)، وقرص أمامي (2) يعمل على تثبيت الريش لمنعها من الانحناء أو تغيير وضعيتها تحت تأثير القوى المؤثرة فيها ويحوي القرص الأمامي فتحة سحب (5) تسمح بعبور السائل إلى داخل الدولاب العامل . في المضخات يتم تصنيع القرص الأمامي مع الريش عن طريق السكب.

حركة التيار في الدولاب الدائر لآلة الضخ:

إن بنية الدولاب الدائر لآلة الضخ سواء أكانت مضخة أم مروحة تشبه البروفيل الشبكي حيث تنتهي الريش بنهاية حادة ، عادة يكون $b_1 > b_2$ وأحياناً يكون $b_1 = b_2$

حيث b_1 عرض الريشة عند الدخول و b_2 عرض الريشة عند الخروج. تتحدد الطاقة المقدمة للسائل في الدولاب الدائر بفعل تغير المواصفات الحركية له أثناء حركته في القنوات بين الريش وتوصف هذه الحركة بالقيم التالية:

السرعة المحيطية u : وتنتج عن دوران السائل مع الدولاب العامل بسرعة دورانه نفسها وبالتالي يكون شعاعها محمولاً على مماس الدائرة المارة من النقطة التي تدرس فيها الجزيء السائلي والتي تبعد r عن محور الدوران، واتجاهها باتجاه دوران الدولاب الدائر الذي يدور بسرعة زاوية ω وقيمتها $u = \omega r$.

السرعة النسبية w : وتعتبر عن حركة الجزيء السائلي بالنسبة لجملة إحداثيات مرتبطة مع الدولاب أي أنها تمثل سرعة حركة التيار بالنسبة للدولاب الدائر و يكون شعاع هذه السرعة محمولاً على مماس الريشة.

السرعة المطلقة c : تمثل سرعة حركة الجزيء السائلي بالنسبة لجسم الآلة الثابت وتساوي إلى المجموع الشعاعي للسرعتين w, u .

تسمى الزاوية المشكلة بين السرعة المطلقة والسرعة المحيطية بـ α وهي زاوية حسابية ، أما الزاوية الخارجية المشكلة بين السرعة النسبية والسرعة المحيطية فتسمى الزاوية بـ β وهي زاوية تصميمية .

لتفرض جزيئة سائلية تقع عند مدخل الدولاب الدائر في النقطة (1) حسب الشكل (3-3) ، فإنها سوف تتمتع بسرعة محيطية u_1 وسرعة نسبية w_1 ومحصليهما السرعة المطلقة c_1 ، يتحدد اتجاه w_1 بقيمة الزاوية β_1 التي تسمى زاوية الدخول. تتحرك هذه الجزيئة حتى تصل للنقطة (2) وعندها تمثل سرعة محيطية u_2 وسرعة نسبية w_2 ومحصليهما c_2 ، يتحدد اتجاه السرعة النسبية w_2 بالزاوية β_2 أو زاوية الخروج.

3-2-1 - الضاغط النظري الذي يعطيه الدولاب الدائر (معادلة أويلر الحركية) :

Theoretical Head (Euler's Equation):

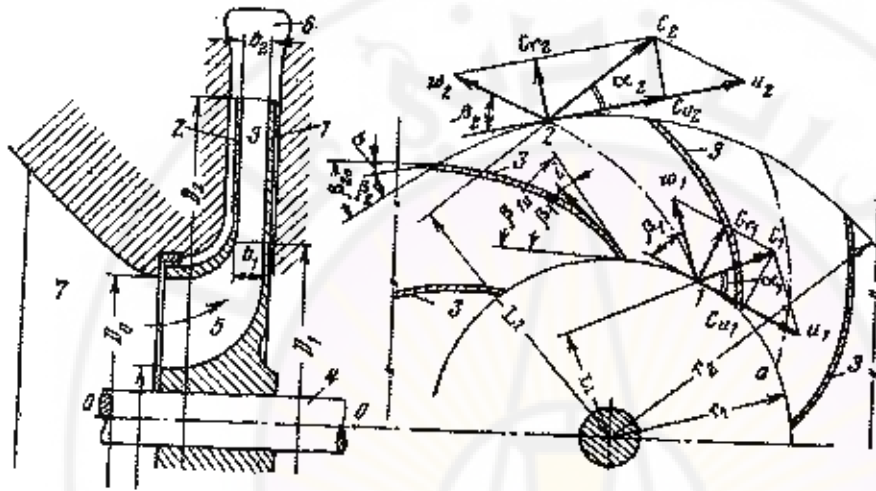
يعرف ضاغط المضخة بأنه مفهوم طاقي يعبر عن مقدار الطاقة المقدمة لواحدة وزن السائل.

يتعلق الضاغط الذي يعطيه الدولاب الدائر بسرعة التيار المار عبر هذا الدولاب (بتغير المواصفات الحركية للريان) وكذلك يتعلق بأبعاده.

إن دراسة حركة التيار في الأنفية المنحنية معقدة للغاية ولتبسيط هذه الدراسة نقوم بالافتراضات التالية:

- 1 - نفترض أن للتيارات مسارات ثابتة محددة شكلها يشبه شكل الريش (للتيار بنية مسارية).
- 2 - نفترض أن التيار متناظر محورياً أي أن له الموصفات الحركية والهندسية نفسها.
- 3 - نفترض أن التيار مستوي.

بحسب الضابط النظري من أجل جريان مثالي.
يتحقق الشرطان (1) و (2) بفرض أن عدد الريش لا نهائي أو كبير جداً وبمسافات الريش قليلة.



الشكل (3-3) مقطع جانبي وأمامي للدولاب العامل ،
ومثلتي السرعة عند الدخول والخروج في الفتحات بين ريش الدولاب.

لاستنتاج معادلة أويلر نطبق معادلة عزم كمية الحركة والتي تنص على : أن تغير عزم القوى الخارجية يساوي إلى مجموع تغير عزم كمية الحركة. بفرض أن تدفق السائل الحجمي عبر الدولاب هو Q وأن كثافة السائل ρ التي تبقى ثابتة ضمن الدوارة عندها يكون:

$$\text{عزم كمية الحركة خلال واحدة الزمن عند الدخول : } \rho \cdot Q \cdot c_1 \cdot L_1$$

$$\text{عزم كمية الحركة خلال واحدة الزمن عند الخروج : } \rho \cdot Q \cdot c_2 \cdot L_2$$

حيث : $\rho \cdot Q$ التدفق الكتلي عبر الدولاب

c_1, c_2 السرعة المطلقة عند الدخول والخروج L_1, L_2 أذرع السرعة c_1, c_2 حسب الشكل

(3-3)

فإذا كان العزم النظري M_T هو العزم الخارجي المعطى للتيار من قبل محور التدوير خلال واحدة الزمن و يفرض أن الافتراضات المذكورة أعلاه محققة ومن أجل جريان مثالي:

$$M_T \cdot \Delta t = (\rho \cdot Q \cdot c_2 \cdot L_2 - \rho \cdot Q \cdot c_1 \cdot L_1) \cdot \Delta t$$

$$M_T \cdot \Delta t = \rho \cdot Q (c_2 \cdot L_2 - c_1 \cdot L_1)$$

ولكن

$$L_1 = r_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad L_2 = r_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (3-2)$$

$$M_T = \rho \cdot Q (c_2 \cdot r_2 \cdot \cos \alpha_2 - c_1 \cdot r_1 \cdot \cos \alpha_1)$$

واضح من مثلثات السرعة أن $c_{u1} = c_1 \cdot \cos \alpha_1$; $c_{u2} = c_2 \cdot \cos \alpha_2$ وبالتالي :

$$M_T = \rho \cdot Q (c_{u2} \cdot r_2 - c_{u1} \cdot r_1)$$

$$N_T = M_T \cdot \omega_0 = \rho \cdot Q (c_{u2} \cdot r_2 \cdot \omega_2 - c_{u1} \cdot r_1 \cdot \omega_1) = \rho \cdot Q (c_{u2} \cdot u_2 - c_{u1} \cdot u_1) \quad (3-4)$$

من جهة أخرى فإن هذه الاستطاعة يمكن أن تحسب كجداً كتلة السائل المار عبر الدولاب خلال واحدة الزمن مضروبة بالعمل النوعي الذي تعطيه آلة الضخ.

$$(3-5)$$

$$N_T = \rho \cdot Q \cdot A_T$$

$$(3-5')$$

$$A_T = \frac{P_T}{\rho} = g \cdot H_T$$

حيث A_T هو العمل النوعي .

بمقارنة (3-4) مع (3-5) نجد:

$$A_T = u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1} \quad (3-6)$$

ومنه

$$H_T = \frac{1}{g} (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) \quad (3-7)$$

$$p_T = \gamma \cdot H_T = \rho (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) \quad (3-8)$$

المعادلتان الأخيرتان تدعيان معادلة أويلر العنقية وهي المعادلات الأساسية لآلات الضخ الطاردة.

استنتاجات وملاحظات:

أ - يمكن إيجاد علاقة الضاغط النظري بالسرع المحيطية والنسبية والمطلقة عند الدخول والخروج بين الريش انطلاقاً من معادلة أويلر العنقية وبإستفادة من مثلثات السرعة :

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2c_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1 = w_3^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2c_{u1} \cdot u_1$$

$$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2c_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 = w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2c_{u2} \cdot u_2 \quad (3-9)$$

نحدد من هذه العلاقات قيم الجداءات $u_1 c_{u1}$ ، $u_2 c_{u2}$ ونعوضها في العلاقة (3-7) فنجد:

$$H_T = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_3^2 - w_2^2}{2g} \quad (3-10)$$

الحد الأول $\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$ يعبر عن الضاغط الناتج عن تغير الطاقة الحركية للسرعة المطلقة

للسائل في الأفقية بين الريش، ويسمى الضاغط الديناميكي.

الحد الثاني $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$ يعبر عن الضاغط الناتج عن عمل القوى الطاردة المركزية.

الحد الثالث $\frac{w_3^2 - w_2^2}{2g}$ يعبر عن تغير الضاغط الناتج عن تغير الطاقة الحركية للسرعة النسبية

في الأفقية بين الريش.

ويكون الضاغط الستاتيكي:

$$H_{st} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

أي أن الضاغط الستاتيكي يزداد نتيجة عمل القوى الطاردة المركزية وانخفاض الطاقة الحركية للسرعة النسبية.

$$P_{TM} = \rho \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \right)$$

أما إذا صممت القناة ما بين الريش بحيث يبقى المقطع بين الريش ثابتاً عندها $w_1 = w_2$ ويتحدد الضغط الستاتيكي بالعلاقة:

$$P_{TM} = \frac{\rho}{2} (u_2^2 - u_1^2)$$

ب - إن الحد c_{u1} يمثل عملية نقل التيار قبل الدخول في القناة ما بين الريش، من أجل ذلك يركب جهاز توجيه أو جهاز نقل التيار، وإذا صممت آلة الضخ وكان جهاز التوجيه موجوداً فإن الحد c_{u1} يبقى موجوداً، أما إذا لم يكن جهاز التوجيه موجوداً فهذا يعني أن الدخول بين الريش

يكون قطرياً، أي أن الزاوية $\alpha = 90^\circ$ وبالتالي ينعدم الحد c_{n1} وتأخذ معادلات أويلر العنقية الشكل التالي:

$$\begin{aligned} M_T &= \rho \cdot Q \cdot r_2 \cdot c_{n2} \\ N_T &= \rho \cdot Q \cdot u_2 \cdot c_{n2} \\ H_T &= \frac{1}{g} \cdot u_2 \cdot c_{n2} \\ p_T &= \rho \cdot u_2 \cdot c_{n2} \end{aligned} \quad (3-11)$$

ج - مسقط السرعة المطلقة على امتداد نصف القطر يسمى المركبة القطرية للسرعة ويعطى بالعلاقة:

$$c_r = c \cdot \sin \alpha$$

الغزارة الداخلة للدولاب العامل تساوي جداء مساحة فتحة الدخول $2\pi \cdot r_1 \cdot b_1$ في مركبة السرعة القطرية c_{r1} .

$$Q = 2\pi \cdot r_1 \cdot b_1 \cdot c_{r1} = 2\pi \cdot r_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (3-12)$$

والغزارة الخارجة من الدولاب:

$$Q = 2\pi \cdot r_2 \cdot b_2 \cdot c_{r2}$$

حيث: b_1 عرض الريشة عند الدخول، b_2 عرض الريشة عند الخروج.

د - من معادلة أويلر العنقية :

$$p_T = \rho (u_2 \cdot c_{n2} - u_1 \cdot c_{n1})$$

نستنتج أن:

- هذه المعادلة تحدد الضغط النظري أي أن السائل لا يصادف أي نوع من المقاومات أثناء الجريان في الأفقية بين الريش.

- يزداد الضغط p_T بزيادة الكثافة ρ وزيادة السرعة المحيطية u_2 التي تزداد بدورها بزيادة القطر D_2 و زيادة عدد الدورات.

- يزداد الضغط p_T عند تناقص الحد الثاني $u_1 \cdot c_{n1}$ من هذه المعادلة وتكون قيمة هذا الحد معدومة عندما تكون $\alpha_1 = 90^\circ$ أي أن السائل يصل إلى الدوارة وفق الاتجاه المنطبق على قطر الدوارة وعندها $c_{n1} = 0$ ، وبذلك تعمل الآلة عند أعظم غزارة وأكبر ضغط.

3-2-2 - تأثير زاوية الخروج β_2 على الضغط النظري الذي تولده الآلة :

تزداد الدوارة في آلة الضخ الطاردة بریش منحنية نحو الأمام $\beta_2 > 90^\circ$ أو بریش مستقيمة قطرية $\beta_2 = 90^\circ$ أو بریش منحنية نحو الخلف $\beta_2 < 90^\circ$ ، تكون زاوية دخول السائل بين الريش دوماً $\beta_1 < 90^\circ$ لكل الحالات، وبفرض ما يكبر انحناء الريشة نحو الأمام باتجاه دوران الدوارة تزداد السرعة C_2 وتزداد قيم C_{u2} ويزداد φ_2 (معامل فتل التيار) ، ويزداد معامل الضغط ψ لأن: $C_{u2} = u_2 - w_2 \cdot \cos \beta_2$ ولأن $\cos \beta_2$ يكون موجباً عندما $\beta_2 < 90^\circ$ ومعدوماً عندما $\beta_2 = 90^\circ$ وسالباً عندما $\beta_2 > 90^\circ$ ومن المعادلة السابقة نستنتج ما يلي:

- تزداد قيمة C_{u2} كلما ازداد انحناء الريش نحو الأمام باتجاه حركة الدوارة وذلك إذا حافظت u_2 على قيمتها وبذلك تزداد قيمة الضغط النظري، غير أن فاقد الضغط Δp يزداد كلما زاد انحناء ريش الجريان بين الريش وكلما زادت سرعة الخروج المطلقة C_2 وبذلك تنخفض قيمة المردود وتتغير قيمة معامل الضغط ψ .

- تنخفض قيمة C_{u2} كلما ازداد انحناء الريش نحو الخلف وبذلك تنخفض قيمة الضغط النظري وتزداد قيمة المردود حيث تنخفض في هذه الحالة قيمة الفواقد الهيدروليكية للجريان بسبب التغير الضئيل في اتجاه جريان السائل داخل الأقنية بين الريش.

تصنع الريش في المضخات الطاردة عادة منحنية نحو الخلف الأمر الذي يسمح بالحصول على المردود العظمي للآلة، وفي هذه الحالة تنخفض قيمة الضغط النظري P_r ، إلا أن هذا الانخفاض لا يكون ملموساً لدى المضخات الطاردة، لأن هذه المضخات تؤمن الضغط الفعلي P_d الكافي بفضل كثافة السائل الكبيرة وبفضل السرعات المحيطية u_2 المسموح بها.



الشكل (4-3) أشكال الريش في الآلات الطاردة تبعاً للزاوية β_2

للإقلال من مقاومة دخول السائل للدوارة تصنع بداية الريشة في آلات الضخ الطاردة منحنية نحو الاتجاه المعاكس لجهة الدوران $\beta_1 < 90^\circ$. عند حساب وتصميم الآلات الطاردة تؤخذ قيم معامل الضغط ψ كما يلي:

$$\psi = 1 + 1.1 \quad \text{للريش المنحنية نحو الأمام}$$

$$\psi = 0.7 + 0.9 \quad \text{للريش المستقيمة القطرية}$$

$$\psi = 0.5 + 0.7 \quad \text{للريش المنحنية نحو الخلف}$$

3 - 2 - 3 - الضغط الفعلي الذي تولده آلة الضخ الطاردة المركزية :

Generated Actual Head :

لدراسة عمل آلات الضخ ذات الريش (مراوح، مضخات) وحسابها نستخدم بعض المعادلات اللا بعدية وهي :

$$1 - \text{عامل قتل التيار} : \varphi = \frac{cu}{c}$$

$$2 - \text{مردود الآلة} : \eta$$

$$3 - \text{عامل الضغط} : \psi = \varphi \cdot \eta$$

$$4 - \text{زاوية الخروج} : \beta$$

بالعودة لمعادلة أويلر :

$$p_T = \rho \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1})$$

وبإدخال معامل قتل التيار في هذه المعادلة:

$$(3-13)$$

$$p_T = \rho \cdot (u_2^2 \cdot \varphi_2 - u_1^2 \cdot \varphi_1)$$

في الواقع إن الضغط الفعلي الذي تعطيه آلة الضخ هو أقل من الضغط النظري المحسوب بسبب الضياعات الحاصلة في الضغط ΔP وهي تتألف من ضياعات في الدوارة و ضياعات داخل الناشرة (المغلف الخارجي)، فإذا كان η هو مردود الآلة يكون الضغط الفعلي الذي تعطيه الآلة :

$$P_d$$

$$p_d = p_T \cdot \eta = \rho \cdot \eta \cdot (u_2^2 \cdot \varphi_2 - u_1^2 \cdot \varphi_1) \quad (3-14)$$

حيث η مردود الآلة، ويحسب بمعرفة الضياعات الحاصلة في الناشرة والدوارة.

$$\eta = \frac{p_d}{p_T} = \frac{p_T - \Delta P}{p_T}$$

أما إذا لم تزود الآلة بجهاز قتل التيار ، عندها $\varphi_1 = 0$ ، ويتحدد الضغط الفعلي عندها بالعلاقة:

$$P_d = \rho \cdot \eta \cdot \varphi_2 \cdot u_2^2 \quad \psi = \eta \cdot \varphi$$

بإدخال مفهوم معامل الضغط نحصل على:

$$P_d = \rho \cdot \psi \cdot u_2^2$$

من أجل آلة ضخ محورية

$$\psi = 0.05 \div 0.2$$

من أجل آلة ضخ طاردة

(أكبر بفضل القوى النابذة)

$$\psi = 0.4 \div 1.2$$

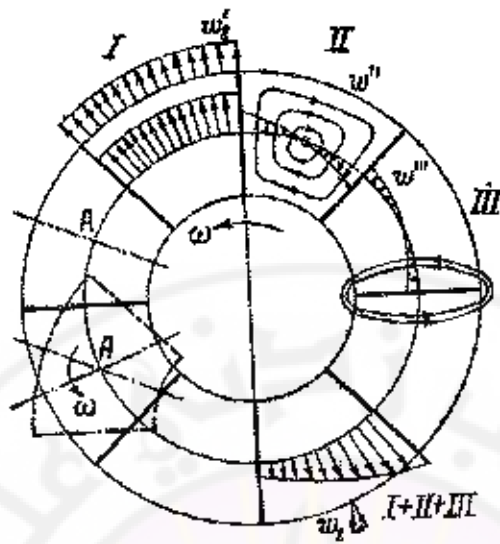
تتخفض قيمة ψ بانخفاض عدد الريش وذلك بسبب انخفاض قيمة C_{r2} التي تؤثر في φ_2 ، وتبلغ قيمة أعظمية عند عدد ريش 16 ريشة، أما إذا ازداد عدد الريش على 50 ريشة تبدأ قيمة ψ بالانخفاض.

3 - 2 - 4 دراسة طبيعة الجريان بين ريش نواورة مستقيمة قطرية وفي مستوى الشكل :

إن صورة الجريان معقدة ضمن الألفية بين الريش، لدراستها نلجأ إلى تقسيمها إلى عدة جريانات أكثر بساطة كما هو مبين في الشكل (5-3) وهي:

الجريان الانتقالي المحوري / :

هو الجريان بين ألفية الدوارة وكأنها ثابتة. يتجه من مركز الدوارة إلى محيطها بسرعة قطرية تتناقص كلما ابتعدنا عن المركز حسب معادلة الاستمرار.



الشكل (3-5) الحركات النسبية في قنوات الدوارة

الجريان الدوراني II :

الناتج عن دوران الدوارة ونتيجة لمعطاة السائل، فإنه يسعى للبقاء ضمن الأضيق بين الريش، وبالتالي فهو يدور بسرعة زاوية ω مساوية تقريبا للسرعة الزاوية ω لدوران الدوارة وباتجاه معاكس. أما السرعة الخطية (المحيطية) للجريان فإنها تتناسب طرذا مع البعد عن مركز الدوران وتكون بنفس جهة الدوران عند مركز الدوارة وبالاتجاه المعاكس عند مخرجها.

الجريان الجولاني III :

الناتج عن فرق الضغط بين وجهي الريشة فهو يؤثر في طبيعة الجريان بين الأضيق، وبالتالي في سرعة السائل ضمنا وذلك حسب نظرية يوكوفسكي (الجناح الحامل). ويختلف عن الجريانيين السابقين في أنه يحصل بين القنوات بينما يحصلان داخل القناة .

محصلة مركبات السرعة الثلاث الناتجة عن الجريانات الثلاث السابقة الذكر مبينة على الشكل W_m .

ملاحظة: نتيجة التوزع غير المنتظم للسرع في المقاطع المختلفة ضمن الأضيق بين الريش فإن قيمة المركبة المماسية C_{m2} تنخفض مما يؤدي إلى انخفاض قيمة الضاغط النظري H_T .

3-2-5 - تأثير تغير ظروف التشغيل في مثلثات السرعة :

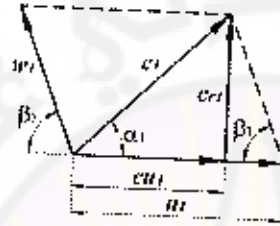
لا تستخدم موجهات عند مدخل الدوارة كثيراً ، وبالتالي يكون دخول السائل إلى الدوارة قطريا $\alpha_1 = 90^\circ$ ، الحالة العامة في الشكل (3-6) من مثلث السرعة عند الدخول نجد :

$$\operatorname{tg} \beta_1 = - \frac{c_{r1}}{u_1 - c_{u1}}$$

أما عند الدخول القطري

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{c_{r1}}{u_1}$$

(3-15)



الشكل (3-6) مثلث السرعة عند الدخول

ومن معادلة الاستمرار يمكن حساب المركبة القطرية c_{r1} من العلاقة :

$$c_{r1} = \frac{Q}{2\pi r_1 b_1 u_1}$$

حيث : Q - الغزارة ، r_1 - نصف القطر الداخلي للدوارة ، b_1 - عرض الريش عند الدخول ، u_1 - معامل تصميم يأخذ بعين الاعتبار سماكة الريش عند مقطع الدخول ، وتتراوح قيمته بين 0.85 ÷ 0.95 .

بتعويض قيمة c_{r1} في العلاقة (3-15) ينتج :

$$\operatorname{tg} \beta_1 = - \frac{Q}{2\pi r_1 b_1 u_1 u_1} \quad (3-16)$$

بالنسبة لألة ضخ محددة وشكل ريش معين فإن قيم c_{r1} ، u_1 تتناسب طردياً مع عدد الدورات n ،

لذلك يمكن كتابة :

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{Q}{a.n} \quad (3-17)$$

حيث : n - عدد الدورات ، a - معامل تتناسب .

من هذه العلاقة نلاحظ أن قيمة الزاوية β_1 تزداد بازدياد الغزارة وتقلص بازدياد عدد الدورات .

- زاوية الهجوم وزاوية التباطؤ:



الشكل (3-7) زاوية الهجوم

تصمم الريش الدوارة بزاوية β_1 دخول ثابتة ويعرف الفرق بين هذه الزاوية وزاوية دخول المسائل إلى الدوارة β_1 بزاوية الهجوم i :

$$i = \beta_1' - \beta_1 \quad (3-18)$$

وهذه الزاوية تؤثر في قيمة الضياعات داخل الدوارة. إن القيمة المتكلى لزاوية الهجوم بالنسبة للدوارة ذات الريش المنحنية للخلف تتراوح في المجال من $(-3^\circ \text{ : } 5^\circ)$ ،

أما بالنسبة للدوارة ذات الريش المنحنية للأمام، فإن مجال القيم المتكلى لزاوية الهجوم يكون أكبر من ذلك. موجبة.

بالعودة لمثلث السرعة عند الخروج فإننا نجد اختلافاً بين زاوية خروج المسائل من الدوارة β_2 والزاوية التصميمية δ للريش عند الخروج β_2' ، والفرق بينهما يسمى زاوية التباطؤ

$$\delta = \beta_2' - \beta_2$$

هذه الزاوية وبخلاف الزاوية (i) لا تتعلق بنظام عمل الآلة وتكون دوماً موجبة .

3-2-6 - حساب بعض القيم الرئيسية للدوارة:

أ - اختيار عدد الريش Z

يتم اختيار عدد الريش Z لآلة الضخ بحيث يؤمن مردوداً أعظماً لها، فإذا كان هذا العدد قليلاً ظهرت بؤر إعصارية أو مناطق انقطاع في التيار ضمن الألفية بين الريش، مما يؤدي إلى زيادة قيمة الضياعات، أما إذا كان عدد الريش كبيراً فإن الضياعات ستزداد بسبب زيادة سطوح الاحتكاك.

تؤكد نتائج التجريب العملي أن الاختيار الأمثل لعدد الريش يتحقق عندما تكون المسافة بين كل ريشتين متتاليتين مساوية لنصف طول الريشة، وبناء عليه يمكن تحديد عدد الريش باستخدام العلاقة التجريبية التالية:

$$Z = 6.5 \frac{m+1}{m-1} \sin \frac{\beta_1' + \beta_2'}{2} \quad (3-20)$$

حيث: $m = \frac{D_2}{D_1}$

تبين التجارب أيضا أن قيمة m (نسبة الأقطار) ليست ذات تأثير فعال على قيمة المردود لذلك يمكن اختيارها ضمن مجالات واسعة وغالبا يتم اختيارها ضمن المجال $1.25 < m < 3.3$ والمجال المفضل لنسبة الأقطار $[1.4 \div 1.6]$.

ب - حساب عرض الريش عند المدخل b_1 :

يتم اختيار عرض الريش الدوارة عند المدخل بحيث تجعل سرعة الدخول إلى الآلة c_0 مساوية تقريبا لمرعة الدخول إلى الدوارة c_1 وبما أن قطر الدخول للدوارة يساوي تقريبا D_0 وبفرض أن معامل التصحيح $\mu_1 = \mu_0$ وحسب معادلة الاستمرار:

$$c_0 = \frac{4Q}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \mu_0} \quad , \quad c_1 = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \mu_1} \quad (3-21)$$

$$c_0 = c_1 \Rightarrow \frac{4Q}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \mu_0} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \mu_1} \Rightarrow b_1 = \frac{D_0}{4}$$

ولكن في كثير من الحالات العملية يتم حساب عرض الدوارة:

$$b_1 = (1 \div 1.5) \cdot \frac{D_1}{4}$$

وهذه العلاقة تعطي نتائج أفضل من حيث أداء آلة الضخ ومردودها.

ج - حساب عرض الريش عند الخروج b_2

يتم حساب عرض الدوارة b_2 عند المخرج في معظم الحالات من شرط تساوي المركبتين القطريتين للسرعة المطلقة عند المدخل وعند المخرج من الدوارة:

$$c_{r2} = \frac{Q}{\pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot \mu_2} \quad , \quad c_{r1} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \mu_1} \quad (3-22)$$

$$c_{r1} = c_{r2} \Rightarrow \frac{Q}{\pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot \mu_2} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \mu_1} \Rightarrow b_2 = \frac{b_1 \cdot D_1}{D_2}$$

عملياً للمضخات ذات الاستطاعات الصغيرة والمراوح ومن أجل سهولة التصنيع يمكن جعل

$b_1 = b_2$ ، ولكن هذا بسبب انخفاضاً في المردود بحوالي $\% (2 \div 3)$.

3 - 2 - 7 - فواقد الضغط في الدوارة **Losses In The Impeller**:

- 1 - فاقد ناتج عن الاحتكاك في السائل في الأقنية بين الريش.
- 2 - فاقد ناتج عن تشكل الأعاصير داخل السائل.
- 3 - فاقد ناتج عن الصدمات عند دخول السائل للدوارة وعند خروجه منها.

الفواقد الثلاثة تكون متناسبة مع مربع السرعة النسبية وتحدد بالعلاقة التجريبية:

$$\Delta P_R = \sum \xi \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \sum \xi \frac{\gamma \cdot w^2}{2g} \quad (3-23)$$

وبتقريب معقول واستناداً للتجارب ويفترض $W_1 = W_2$ و $\sum \xi = 0.4$ وبالتالي يمكن تحديد قيمة الضغط الفعلي p_d الذي تولده الدوارة:

$$p_d = p_T - \Delta p_R$$

ومردود الدارة الهيدروليكي:

$$\eta_H = \frac{p_d}{p_T} = \frac{p_T - \Delta p_R}{p_T} \quad (3-24)$$

3-3 - فرع السحب وفرع الضخ وتصميم الغلاف الخارجي :

Suction Approach And Discharge Portion:

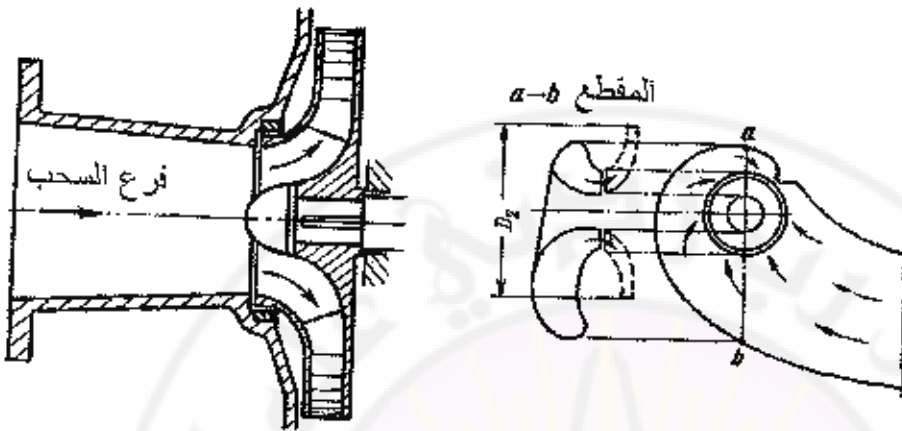
3-3-1 - فرع السحب :

يعرف جزء الآلة الذي يؤمن وصول السائل من خط التغذية إلى عين الدوارة بفرع السحب . بالنظر إلى الغرض المطلوب من فروع السحب فإنها يجب أن تحقق متطلبات معينة ، يجب أن يحقق فرع السحب - المصمم بشكل مناسب - توزيعاً منتظماً و متناظراً محورياً للجريان عبر مدخل الدوالب الدائر وإلا فإن المردود الهيدروليكي للدوالب العامل وبالتالي المردود الكلي للآلة سينخفض، يمكن الحصول على الجريان المطلوب عند مدخل الدوارة بجعل فرع السحب على شكل موجه مستقيم في حالة جريان محوري الشكل (8-3) أو شكل غلاف حلزوني في حالة الجريان العرضي الشكل (9-3) .

لتقليل ضياعات القدرة في فرع السحب فإنه يجب أن تكون السرعات فيه صغيرة و بالتالي فإن مقطع الجريان لفرع السحب يتناقص تدريجياً مما يؤمن زيادة السرعة لتصل إلى قيمتها عند مدخل الدوالب العامل. يصمم فرع السحب بحيث يؤمن وصلاً سهلاً للآلة مع أنبوب التغذية . إن شكل فرع السحب وحجمه وتوزيعه يؤثر في ميزات الآلة بشكل عام كما يؤثر في مقدار الطاقة المقدمة للسائل أثناء مروره بالدوالب العامل . تعتمد الحسابات الهيدروليكية لفرع السحب على معادلة الاستمرار من أجل تيار حتمي و سرعة وسطية معروفين بفرض أن السرعة الوسطية تبقى ثابتة على طول فرع السحب $c_{m} = const$.

3-2-3 - فرع الضخ:

هو ذلك الجزء من الآلة الذي يعمل على تجميع المائع الخارج من الدوارة وتوجيهه باتجاه أنبوب الضخ .



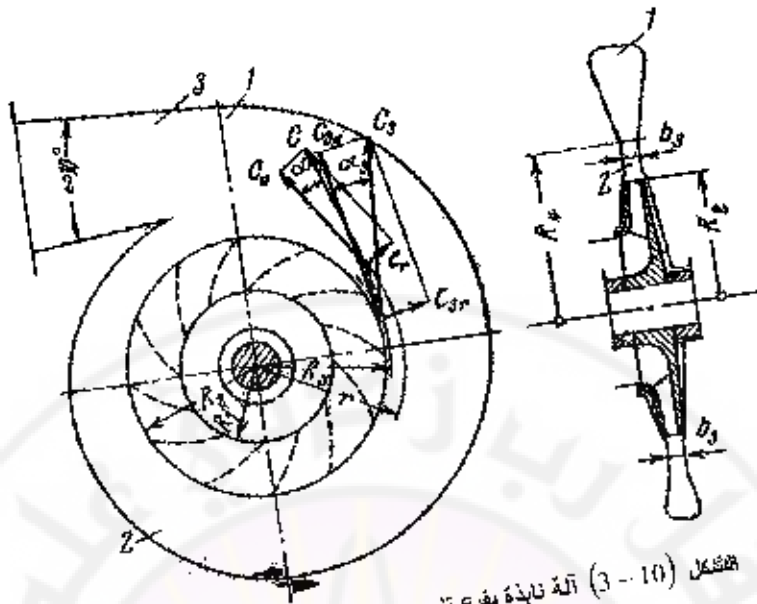
الشكل (3-8) فرع السحب لمضخة ذات دخول محوري للسائل إلى الدولاب الدائر.

الشكل (3-9) فرع السحب على شكل غلاف حلزوني ذو مساحة متغيرة

يُصمم فرع الضخ على شكل ناشرة تعمل على تحويل جزء من القدرة الحركية إلى قدرة كامنة. في آلات الضخ الطاردة توجد ثلاثة أنواع من فروع الضخ وهي الغلاف الدائري والغلاف الحلزوني والغلاف ذو الريش الناشرة (المتباعدة) . بشكل الغلاف الدائري فراغا اسطوانيا ذا عرض ثابت يحيط بدولاب الآلة الشكل (3.10)

أما الغلاف الحلزوني فهو بشكل قناة ناشرة منحنية تحيط بالدولاب ، و المستخدم بشكل عام مغلف ينتج عن دمج النوعين السابقين الشكل (3.10) . الوظيفة الأساسية لفرع الضخ هي حمل السائل (الغاز) من الدوارة إلى أنبوب الضخ إلا أنه يجب أن يصمم بحيث تكون الضياعات أصغرية وأن يحافظ قدر الإمكان على جريان متناظر محوريا خلال الدولاب العامل . إضافة إلى ذلك فإن السرعة يجب أن تتناقص تدريجيا حتى قيمتها عند مقطع الدخول لأنبوب الضخ . لتخفيض السرعة عند مخرج الضخ للآلة يتم وصل الغلاف الحلزوني بأنبوب الدفع عبر ناشر مخروطي مستقيم (3) زاوية انفراجه مقدارها 10° .

تشكل الريش الناشرة في النموذج الثالث عدة قنوات ناشرة تحيط بالدولاب العامل الأشكال (3-11) و (3-12) .



الشكل (10 - 3) آلة نابذة بفرع تزويد مؤلف من غلاف دائري مع حلزون

أثبتت التجارب أن حركة السوائل والغازات الحقيقية في الغلاف الدائري تخضع للقوانين المستخدمة نفسها من أجل مائع غير لزج لذلك يمكن تحليل أداء فرع الضخ (بتقريب أولي) على أنه لا يوجد احتكاك فيه. سندرس أداء الغلاف الدائري لآلة تضخ سائلاً غير قابل للانضغاط، ونفرض أن R_3 , C_3 هي نصف القطر والسرعة المطلقة عند بداية الغلاف الدائري وأن C_r , نصف القطر والسرعة المطلقة عند أي نقطة من مقطع اختياري من الغلاف الشكل (3-3). لتحديد العلاقة بين سرعتين C_3 , C_r . بما أن الجريان مثالي (الاحتكاك مهملاً) فإن السرعة المحيطة تحدد اعتماداً على قانون ثبات كمية الحركة الزاوية $r \cdot C_u = \text{const}$:

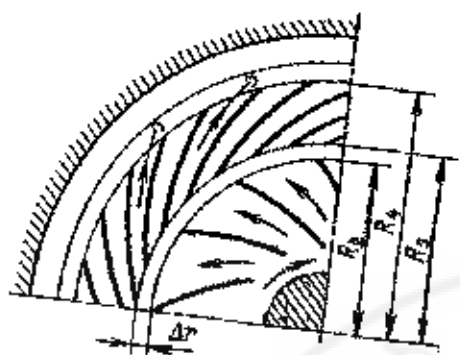
$$R_3 \cdot C_{u3} = r \cdot C_u \Rightarrow C_u = C_{u3} \frac{R_3}{r}$$

ركبة السرعة القطرية من معادلة الاستمرار:

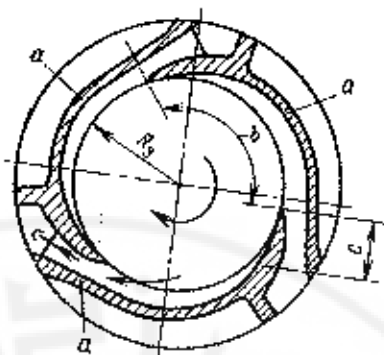
$$Q = 2 \pi R_3 \cdot u \cdot C_{r3} = 2 \pi R \cdot u \cdot C_r$$

$$C_r = C_{r3} \frac{R_3}{r}$$

للمسألة نفرض أن $b_3 \cdot \mu_3 = b \cdot \mu$ وبما أن $b = \text{const}$ نجد: $C_r = C_{r3} \frac{R_3}{r}$ أن العلاقة التي تربط المركبات القطرية للسرعة ببعضها هي نفس العلاقة التي تربط لمماسية ببعضها وبالتالي فإن مثلثات السرعة تكون متشابهة ويكون $\alpha = \alpha_3$ الشكل عبارة أخرى يأخذ خط التيار شكل حلزون لوغاريتمي.



الشكل (3-11) غلاف ذو ناشر بريش لآلة نابذة (ضواغط متعدد المراحل)



الشكل (3-12) غلاف ذو ناشر بريش لآلة نابذة (المضخة متعددة المراحل)

بما أن مركبة السرعة القطرية c_r تتناسب عكساً مع نصف قطر مساحة الجريان و بالتالي فإن نسبة السرعة تخضع للعلاقة :

$$c_r = c_{3r} \frac{R_3}{r}$$

(3-25)

هذه العلاقة تبين الحاجة لأبعاد كبيرة للآلة وهي من المساوئ الرئيسية للغلاف الدائري و بشكل فعلي فإن تخفيض السرعة في غلاف بدون ريش إلى النصف يقتضي أن يتضاعف القطر D_2 (عند نهاية الغلاف الدائري) أي $D_2 / D_1 = 2$. لهذا السبب ليس من المناسب استخذ الغلاف الدائري في المضخات ذات المرحلة الواحدة.

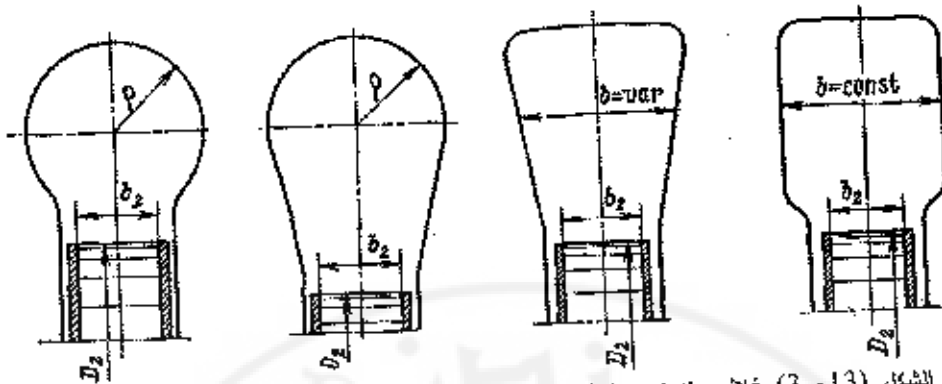
بعد الخروج من الغلاف الدائري أو من الدوالب الدائر في حالة عدم وجود الغلاف الدائري المسائل يدخل الغلاف الحلزوني الشكل (3-12) ويفرض الحالة الثانية : يدخل الجريان الخارج من الدوالب إلى الحلزون بسرعة c_2 في حين أن السرعة الوسطية الحلزون تكون أقل بسبب ضياعات الصدمة التي تحسب من العلاقة :

$$\frac{(c_2 - c'_a)^2}{2g}$$

(3-26)

حيث c'_a السرعة الوسطية في الحلزون نتيجة للصدمة وعند استخدامها في الحسابات

(3-27)



الشكل (14-3) غلاف حلزوني بمقاطع دائرية الشكل

الشكل (13-3) غلاف حلزوني بمقاطع شبه منحرف الشكل ومستطيلة

بالإضافة إلى ضياعات الصدمة ΔH_{sh} هناك ضياعات تنتج عن الاحتكاك بجدران الحلزون عند انحراف الجريان فيه وكذلك هناك ضياعات في الفاشر من بعد الحلزون ينشر إلى الضياعات الكلية ΔH_{vf} كنسبة من الارتفاع الناتج السرعة من أجل القيمة c'_a :

$$\Delta H_{vf} = \xi_{vf} \cdot \frac{c_a'^2}{2 \cdot g} \quad (3-28)$$

اعتمادا على شكل الحلزون وبفرض أن: $\xi_{vf} = 0,2 + 0,35$ عند ازدياد السرعة c'_a فإن ضياعات موجات الصدمة تنقص في حين ضياعات الاحتكاك (المتضمنة الناتجة عن انحراف الجريان) تزداد و لذلك هناك قيمة مثلى ل سرعة c'_a عندما تكون الضياعات الكلية أصغرية .

$$\text{من شرط القيمة الحدية للصغرى الضياعات} \quad \frac{\partial (\Delta H_{sh} + \Delta H_{vf})}{\partial c_a} = 0 \quad \text{ينتج :}$$

$$(c'_a)_{opt} = \frac{c_2}{k_1 + \frac{\xi_{vf}}{k_1}} \quad (3-29)$$

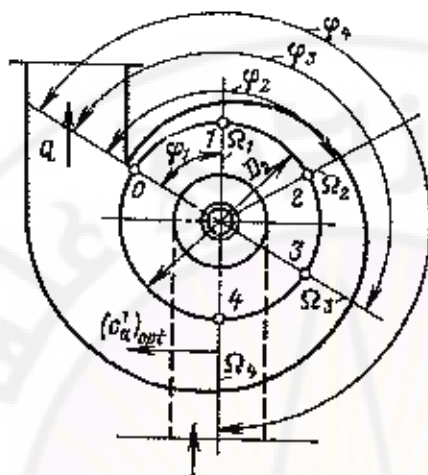
إذا أخذنا $k_1 = 1,2$ و $\xi_{vf} = 0,3$ يكون $(c'_a)_{opt} \approx 0,7 \cdot c_2$ من أجل آلة ذات غلاف حلزوني فإن السرعة في الحلزون يمكن أن تحدد من العلاقة (3.27) بتعويض c_4 بـ c_2 وهي السرعة من بعد قناة التوجيه الحلقية .

أشكال المقاطع العرضية للمغلفات الحلزونية مبينة في الأشكال (3-13) و (3-14) .

3-3-3 - طريقة تقريبية لحساب أبعاد المغلاف الحلزوني :

تعتمد هذه الطريقة في حساب الأبعاد على اعتبار سرعة و تدفق حجمي محددين للجريان

بالاستفادة من معطيات الشكل (3-15)



الشكل (3-15) تصميم أبعاد المغلاف الحلزوني

وبفرض أن التدفق هو $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_z$ عبر المقاطع الاختيارية $1, 2, 3, \dots, z$ يساوي مقدار تزويد الدولاب من خلال الأقواس $0-1, 0-2, 0-3, \dots, 0-z$ لأن هذه المقاطع معرفة بزوايا $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_z$ يكون:

$$Q_1 = \frac{\phi_1}{360} Q, \quad Q_2 = \frac{\phi_2}{360} Q, \quad Q_3 = \frac{\phi_3}{360} Q, \quad \dots, \quad Q_z = \frac{\phi_z}{360} Q \quad (3-30)$$

من معادلات الاستمرار نحصل على مساحات المقاطع الموافقة :

$$\Omega_1 = \frac{Q_1}{(c'a)_{opt}}, \quad \Omega_2 = \frac{Q_2}{(c'a)_{opt}}, \quad \Omega_3 = \frac{Q_3}{(c'a)_{opt}}, \quad \dots, \quad \Omega_z = \frac{Q_z}{(c'a)_{opt}} \quad (3-31)$$

يمكن استخدام $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \dots, \Omega_z$ في حساب الأبعاد الخطية المطلوبة من أجل شكل مقطع عرضي ملائم وبذلك نحدد أبعاد الحلزون.

بالأخذ بالحسبان التدفق الإضافي المار عبر الخلوص بين الحلزون والدولاب يجب أن تؤخذ

$$(c'a)_{opt} \approx 0,65 \cdot c_2$$

عند حساب أبعاد غلاف يحوي ممبر توجيه حلقى وحلزوني فإن مساحات المقطع العرضي التصحيحية هي مجموع المساحات الكلية للاثين.

تستخدم معظم الآلات النابذة متعددة المراحل غللاً ذا ريش توجيه متباعدة و السبينة في الأشكال (3-11) و (3-12) كما هو واضح من الأشكال فإن الناشر ذا الريش هو مجرى حلقى ثابت بعدد كبير من الريش المتعاقبة الشكل (3-11) أو عدد صغير من ريش لها شكل بروقيل مناسب والتي تشكل قنوات ذات ريش الشكل (3-12). النواشر ذات الريش الأشكال (3-11) و (3-12) موجودة في آلات الجريان الغازي النابذة والمضخات الطاردة المركزية على التوالي.

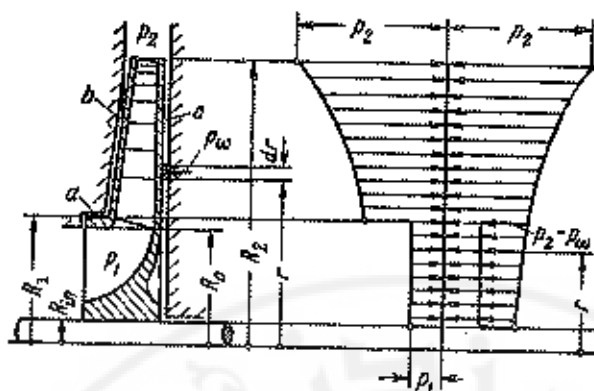
تختلف حالات الخدمة وفقاً لحالات التصميم ، يلاحظ انفصال الجريان عن سطح الريشة وما ينتج عنه من انخفاض حاد لمردود الآلة من أجل كل أنواع النواشر الريشية . يتأثر أداء الآلة النابذة بشكل كبير بالخلوص القطري Δr بين نهايات ريش الدوالب العامل و بداية ريش الناشر . الخلوص الصغير Δr يؤدي إلى حدوث ضجيج كبير في ظروف تشغيل الآلة النابذة . يظهر التأثير الأمثل للخلوص الأسطواني Δr على أداء الآلة في النقطتين التاليتين:

أولاً : السرعات C_2 (الموزعة بشكل غير متساوي على محيط الدوالب) تتساوى في الخلوص ثانياً : يحدث تأثير انفراج محدد (أي تحويل القدرة الحركية إلى ضغط) . بشكل طبيعي لا تزيد Δr عن 10 mm في المضخات الطاردة المركزية وربما تصل إلى عدة عشرات من المليمترات في الضواغط.

3 - 4 - الضغط المحوري وسبل الوقاية منه (Axial Pressure (Axial Thrust :

في المضخات ذات السحب من جهة واحدة، ونتيجة لاختلاف توزيع الضغط على طرفي الدوارة ، الناتجة عن وجود فتحة دخول السائل، تنشأ قوة محورية تسبب إزاحة الدوارة مع عمود الدواران باتجاه أنبوب السحب.

يخرج السائل من خلال الأفقية بين ريش الدوارة تحت ضغط P_2 ، ويندفع جزء من هذا السائل عالي الضغط باتجاه طرفي الدوارة (المنطقتين b و c) بفعل فرق الضغط الذي يؤدي إلى انتقال السائل من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض، فيؤثر الضغط P_2 من جهة اليمين (المنطقة c) في كامل السطح الخلفي للدوارة أي في قرص بأقطار $(D_2 - d)$. أما جهة اليسار (المنطقة $(D_2 - d)$) فإن الضغط P_2 يؤثر في السطح الأمامي على قرص أقطاره



الشكل (3-16) توزيع الضغط على وجهي الدائرة

$(D_2 - D_1)$ فقط ويؤثر ضغط الدخول p_1 في باقي السطح الأمامي للدائرة أي في قرص أقطاره $(D_1 - d)$ وبما أن الضغط p_1 يختلف عن قيمة الضغط p_2 فإن هناك فرقاً واضحاً بين القوتين المؤثرتين على وجهي الدائرة ويبين الشكل (3-16) توزيع الضغط على وجهي الدائرة (واضح على الشكل المذكور أن الضغط المؤثر في المنطقتين a و b ليس ثابتاً إنما يتناقص كلما ابتعدنا عن مخرج الدولاب العامل بفعل ضياعات الجريان وأن الضغط المطبق على الوجه الخلفي للدولاب العامل وفي المنطقة المقابلة تماماً لمنطقة السحب لا يساوي p_2 إنما يقل عنه بمقدار فواقد الجريان بين مخرج الدولاب العامل والنقطة المعتبرة أي أن قيمة الضغط الوسطية على السطح المذكور هي $(p_2 - p_w)$ وتبسيطاً للدراسة نفرض أن الضغط المطبق على هذه المنطقة هو p_2 .

نعطى القوة المؤثرة في الوجه الأمامي للدائرة نتيجة ضغط السائل عليها بالعلاقة:

$$F_1 = p_2 \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4} + p_1 \frac{\pi (D_1^2 - d^2)}{4} \quad (3-32)$$

أما القوى المؤثرة في السطح الخلفي للدائرة فتعطى بالعلاقة:

$$F_2 = p_2 \frac{\pi (D_2^2 - d^2)}{4} \quad (3-33)$$

وبالتالي تكون محصلة هاتين القوتين:

$$F = (p_2 - p_1) \frac{\pi (D_1^2 - d^2)}{4} \quad (3-34)$$

وذلك بإهمال تغير الضغط P_2 في المنطقتين (c, b) وهذه القوة تتجه باتجاه خط السحب لأن $P_2 > P_1$ ، وواضح من العلاقة أن قيمة هذه القوة تزداد بزيادة $P_2 - P_1$ كما تزداد بزيادة $(D_1^2 - d^2)$ وكذلك بزيادة عدد المراحل في المضخة (زيادة عدد الدورات) .
يمكن أن تعطى القوة F باستخدام العلاقة التقريبية:

$$F = \frac{\pi(D_1^2 - d^2)}{4} \rho \cdot g \cdot H \quad (3-35)$$

حيث H ضاغط المضخة.

إن القوة F المحورية ناتجة عن فرق الضغط بين وجهي الدوارة وإضافة لهذه القوة هناك قوة محورية أخرى تنتج كرد فعل لتغيير اتجاه السائل عند دخوله محورياً إلى خروجه عمودياً (قطرياً) وهذه القوة تتجه من الوجه الأمامي إلى الوجه الخلفي للدوارة أي أنها تعاكس جهة القوة F . يمكن حساب القوة الناتجة عن تغيير اتجاه حركة السائل باستخدام العلاقة:

$$F_R = K_r \cdot \rho \cdot Q \cdot c_1 \quad (3-36)$$

حيث K_r ثابت تجريبي يتعلق بالعدد النوعي للدورات.

c_1 السرعة المطلقة عند الدخول إلى الدوارة.

وبالتالي تكون محصلة القوى المحورية المؤثرة في الدوارة هي F^I :

$$F^I = F - F_R \quad (3-37)$$

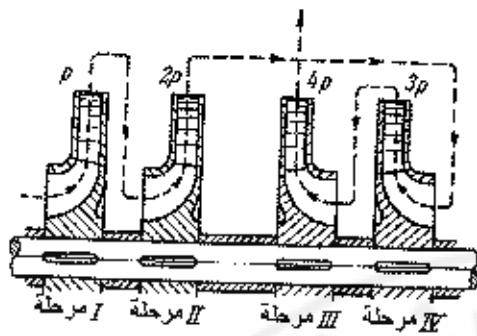
... في المضخات الكبيرة تكون القوى المحورية كبيرة جداً بحيث تؤدي إلى إزاحة الدوارة مع عمود الدوران باتجاه جهة السحب مما يؤدي إلى تلامس جسم الآلة (الناشرة) مع الدوارة. هذا يؤدي إلى زيادة الاحتكاك واهتراء الدوارة وانخفاض الغزارة والمردود وازدياد الاستطاعة المستهلكة.

- في المضخات متعددة المراحل تكون القوى المحورية ذات قيم عالية لأن محصلة القوى المؤثرة هي مجموع القوى المؤثرة في كل دوارة على حدة.

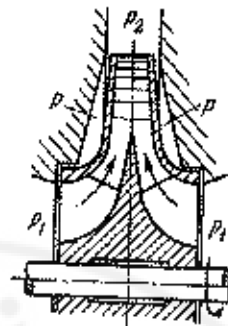
إن وجود القوى المحورية إحدى أسباب المضخات الطاردة، لذلك لا بد من معالجتها وإيجاد سبل الوقاية منها وأهم السبل المتبعة لذلك:

1- أن تتم عملية السحب من الجهتين في الدوارة ذات المرحلة الوحيدة الشكل (17-3) .

2- في الآلات المتعددة المراحل تركيب بعض الدورات بحيث تسحب من أنيمين بينما تركيب باقي الدورات لتسحب من اليسار الشكل (18-3) .



الشكل (3-18) متعددة المراحل

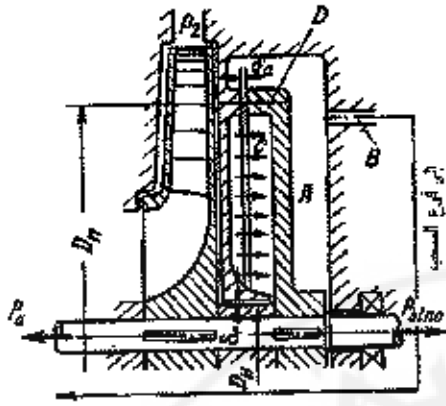


الشكل (3-17) ذات مرحلة واحدة

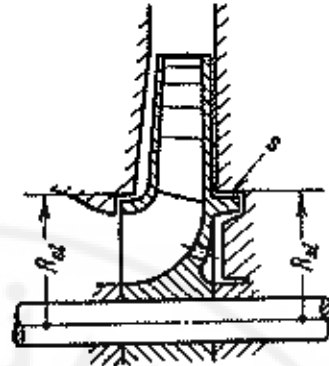
3- في المضخات وحيدة المرحلة ذات استطاعات أقل من $7[KW]$ تكون المضاجع التدرجية كافية لتحمل الضغط المحوري فيها، أما بالنسبة لمضخات ذات استطاعة أكبر من $7[KW]$ فيتم توازن القوى المحورية عن طريق:

- أ - تصنيع عدد من الثقوب بين المنطقة C ذات الضغط P_2 والقنوات بين الريش عند المدخل ذات الضغط P_1 مما يسمح بتوازن الضغط بين الجهتين. هذه الطريقة مفيدة لتخفيف قوى الضغط المحوري إلا أنها تؤثر سلباً في عملية السحب مما يقلل مردود الآلة الشكل (3-19).
- ب - في المضخات ذات الاستطاعات الكبيرة يمكن تخفيف حدة الضغط المحوري بواسطة نتوء على السطح الجانبي للدوارة ، وتصنيع نتوء للإحكام على السطح الداخلي لجسم المضخة الشكل (3-19).

- 4 - استخدام المساند الهيدروليكية المؤلفة من قرص مثبت بشكل جيد على عمود الدوران ، بحيث تقع الجهة اليسرى تحت تأثير الضغط P_2 ، أما الجهة اليمنى فتتعرض إما للضغط الجوي أو لضغط السحب P_1 ويتم اختيار قطر القرص بحيث تتوازن قوى الضغط المطبقة عليه مع محصلة القوى المحورية F^* . تستخدم هذه الطريقة في المضخات الضخمة الشكل (3-20).



الشكل (3 - 20) موازنة القوى المحورية باستخدام مسند الترس الهيدروليكي



الشكل (3 - 19) موازنة القوى المحورية باستخدام الفتحات والثقب

3 - 5 - المضخات الطاردة متعددة المراحل Multistage Centrifugal Pumps :

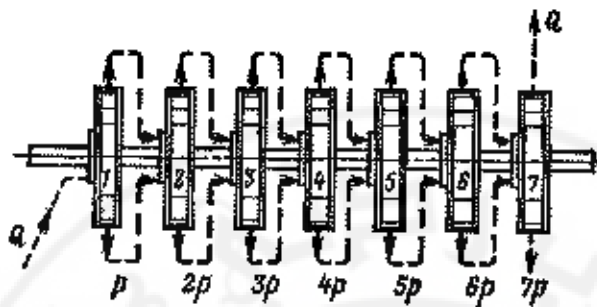
حسب معادلة أويلر العنقية فإن الضاغط النظري الذي تولده دوارة مضخة طاردة يتبع لقيمة الجداء $(u_2 \cdot u_1)$ ، أي أنه للحصول على قيمة عالية للضاغط باستخدام دوارة واحدة (مضخة وحيدة المرحلة) لابد من تحقيق سرعات دوران محيطية عالية جدا والتي يصعب تأمينها لصعوبة تحقيق شروط المتانة اللازمة وزيادة احتمال حدوث التكهف .

بسبب ضرورة تحقيق شروط المتانة فإن السرعات المحيطية تحدد حسب نوع معدن الآلة ، لا يجب أن تتجاوز السرعة u_2 مقدار $40 [m/s]$ من أجل الدورات المصنعة من حديد الصلب وحوالي $300 [m/s]$ للدورات المصنوعة من الفولاذ ويمكن أن تصل هذه السرعة إلى $500 [m/s]$ في بعض أنواع الخلائط ذات المتانة العالية المستخدمة لصناعة أنواع خاصة من المضخات .

أما في المضخات المستخدمة لضخ الماء والسوائل لأغراض خدمية فإن السرعة المحيطية والضاغط النظري محدودان بشروط منع حدوث تكهف .

في المنشآت الصناعية حيث تحتاج إلى سوائل وغازات بضغط عالية وكذلك عند ضخ الماء من الآبار العميقة تخفق المضخات وحيدة المرحلة في تأمين الضاغط المطلوب ونلجأ في مثل هذه الحالات إلى استخدام مضخات طاردة متعددة المراحل .

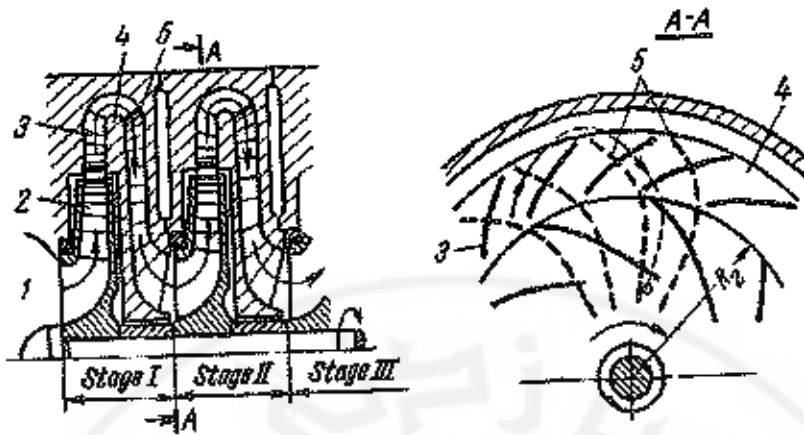
تتكون المضخة الطاردة متعددة المراحل عادة من عدد من الآلات وحيدة المرحلة الموصولة إلى بعضها على شكل سلسلة و مثبتة على محور دوران واحد يعطي الشكل (21-3) فكرة عن آلة من هذا النمط مكونة من سبع مراحل .



الشكل (21-3) مخطط وظيفي لآلة طاردة متعددة المراحل .

أو أن تتكون الآلة متعددة المراحل من عدد من الدورات مربوطة مع بعضها على شكل سلسلة و متوضعة داخل جوف واحد وفي هذه الحالة فإن الضاغط الذي تقدمه المضخة هو الضاغط الكلي ويساوي مجموع الضواغط المقدمة من الدورات العاملة كل على حدة . في الحالة العامة تكون الدورات متشابهة ولها الأبعاد والمواصفات نفسها وبالتالي فإنها تقدم الضاغط نفسه وعندها يكون الضاغط الكلي الذي تقدمه المضخة متعددة المراحل مساويا لضاغط المرحلة مضروبا بعدد المراحل .

يبين الشكل (22-3) مقطعا في مضخة طاردة متعددة المراحل ، وفيه يدخل السائل عبر جزء السحب (1) إلى الدوارة الأولى للآلة (2) حيث تقدم الريش مقدارا محددا من الطاقة للسائل المار عبرها والذي ينتقل بعد ذلك إلى ريش التوجيه (3) وينساب السائل حول الحاجز (4) الذي يفصل المرحلتين الأولى عن الثانية متحركا خلال جهاز التوجيه العكسي (5) بين المرحلتين المذكورتين ليندخل إلى دوارة المرحلة الثانية ومن المرحلة الثالثة يوجه التيار إلى المرحلة الثالثة وهكذا . يمثل جهاز التوجيه العكسي صفة ملازمة لتصميم الآلات الطاردة متعددة المراحل .



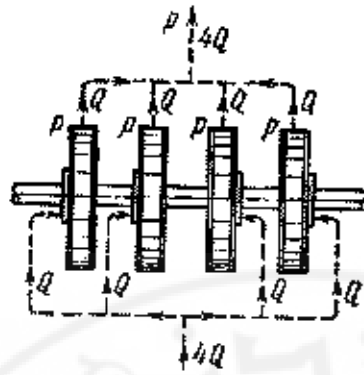
الشكل (22 - 3) مقطع طولى ومقطع عرضي في مضخة طاردة متعددة المراحل

عند خروج السائل من ريش توجيه المرحلة الأولى فإنه يمتلك قيمة كبيرة جداً للمركبة المماسية للسرعة المطلقة وبالتالي يحصل دوران للسائل حول محور الآلة . وبالتالي فإن دخول السائل إلى المرحلة الثانية بهذه السرعة سيؤدي حتماً إلى انخفاض كبير في مقدار الطاقة المقدمة لأن قيمة هذه الطاقة تعتمد على الفرق بين سرعة الخروج وسرعة الدخول المقدمة للسائل وذلك حسب علاقة العمل (الطاقة) النوعي العلاقة.

الآن إذا وضع بين مخرج المرحلة الأولى ومدخل المرحلة الثانية ريش ناشرة و جهاز توجيه عكسي فإنهما سيجبران السائل على أن يدخل إلى نواة المرحلة الثانية قطرياً وبمواصفات مطابقة قدر الإمكان لمواصفات الدخول إلى المرحلة الأولى .

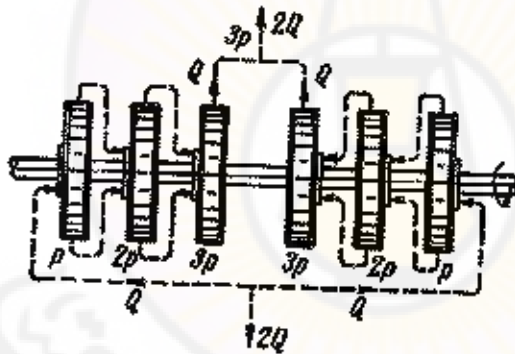
يهدف جهاز التوجيه العكسي إلى الوصول إلى الحالة المثالية لدوران السائل مما يمكن من الحصول على نقل الطاقة الأكثر فعالية في المرحلة الثانية (أداء أكثر فعالية في المرحلة الثانية).

تستطيع الآلات الطاردة متعددة المراحل تقديم ضواغط عالية جداً ، فمثلاً للمضخات المائية يمكن أن يصل الضاغط حتى $4000 [mH_2O]$ ، كما أن بعض هذه المضخات يمكن أن يتألف من 30 مرحلة وأكثر . إذا كانت الغزارة المطلوبة من أجل ضاغط محدد كبيرة ولم تكن الأبعاد التصميمية لمقاطع الجريان سبب أو لآخر تسمح بتأمين هذه الغزارة فإنه يمكن من خلال ترتيب تقريبي للدورات تحقيق الغزارة المطلوبة تسمى مضخة متعددة الجريان (تعمل بنفس مبدأ وصل المضخات على التفرع)، كما هو مبين في الشكل (23 - 3)



الشكل (23 - 3) مخطط وتطبيقات لمضخة طاردة متعددة الجريان .

من أجل ضواغط عالية وغزارات عالية تستخدم مضخات متعددة الجريان بعدد من المراحل (ثلاث أو أربع مراحل لكل منها) موصولة مع بعضها على التسلسل بحيث تؤمن ضاغطة عالية ضمن مجموعة المضخة الواحدة ، ويبين الشكل (24 - 3) نموذجا عن طريقة وصل المراحل والمجموعات الذي يؤمن في النتيجة الضاغطة والغزارة المطلوبين ويسمى النموذج المختلط (مشابه لحالة الوصل المختلط للمضخات)



الشكل (24 - 3) مخطط وتطبيقات لمضخة طاردة من النموذج المختلط .

3 - 6 - المضخات العمودية والمضخات الغاطسة :

يشيع استخدام المضخات العمودية والمضخات الغاطسة في مجال الري لضخ الماء من الآبار العميقة حيث تحقق المضخات التقليدية إذ إنه وكما هو معلوم لا يمكن لأي مضخة أن تسحب على ارتفاع أكبر مما يرفع الضغط الجوي وهو في الحالة النظرية المثالية لا يصل إلى عشرة أمتار وتقل قيمة ارتفاع السحب عمليا عن هذه القيمة كثيرا إذ إنها لا تصل في أحسن الأحوال إلى ثمانية أمتار، لهذا السبب ومن أجل استخراج المياه من أعماق أكبر من تلك التي

تحققها المضخات الأفقية كان الحل بإرسال المضخات إلى الأعماق لتعمل على رفع الماء بدلا من سحبها مما يؤمن إمكانية استخراجه من أعماق سحيقة . ويتكون كلا النوعين من مضخة طاردة مركزية رأسية واحدة متعددة المراحل ، لكل مرحلة منها دولاب دائري غالبا ما يكون من النوع مختلط الجريان (دخول محوري وخروج قطري) و تجهز المضخة بمجموعة من التواشير بين الدورات لخفض سرعة المياه ورفع ضغطه.

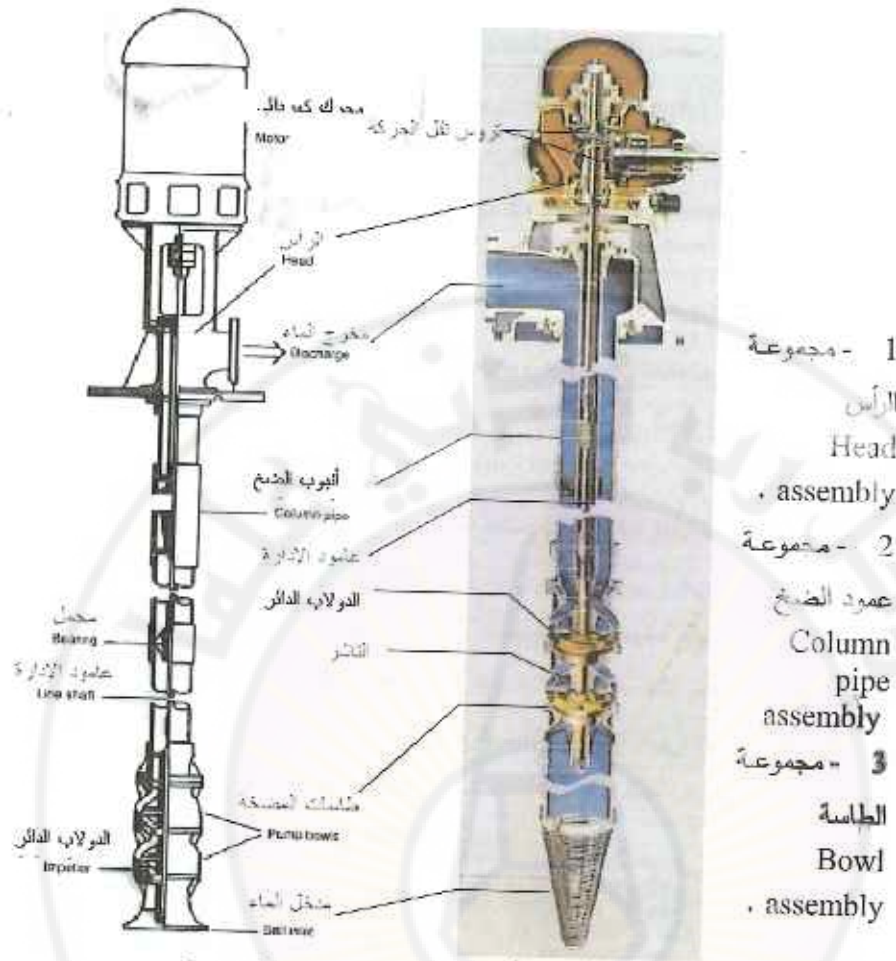
ولضمان انسباية جريان الماء بين مراحل المضخة ، تجمع مراحل المضخة جميعها على عمود إدارة واحد مثبت بواسطة مجموعة من المحامل موضوعة جميعها داخل أنبوب رأسي يستقر داخل بئر الماء . وتعمل المضخة وهي مغمورة جزئيا أو كليا في ماء البئر (فتحة السحب يجب أن تكون مغمورة حتما) .

يكمن الفارق الرئيس بين هذين النوعين من المضخات في طريقة نقل الحركة إلى المضخة وموقع المحرك الذي يديرها : حيث يوضع المحرك (ديزل أو كهربائي) في المضخات العمودية في الأعلى خارج البئر ، والذي يتصل مباشرة أو عبر مجموعة نقل حركة بعمود ينقل الحركة إلى المضخة الموضوعة في عمق البئر الذي يصل إلى عدة مئات من الأمتار تحت سطح الأرض ، أما في المضخات الغاطسة فتستخدم حصرا المحركات الكهربائية التي تتركب أسفل المضخة وتنزل معها داخل البئر تحت سطح الماء ويكون للمضخة والمحرك عمود الدوران نفسه .

3 - 6 - 1 - المضخة العمودية Line shaft turbine pump :

يستخدم هذا النوع لضخ غزارات ضمن مجال واسع $[m^3/h] (2 \div 6000)$ ويمكن أن ترفع الماء من أعماق تصل إلى حوالي $600 [m]$ ولكن يفضل ألا تزيد عن $200 [m]$ حتى لا ينخفض مردودها بسبب زيادة الاحتكاك في المحامل ، ولها نوعان رئيسيان ، يتم في الأول منهما تزليق عمود الإدارة ومحامله بالزيت إذ يكون العمود داخل غلاف خارجي مغلق ويسمى العمود المغلف enclosed line shafting أما في النوع الثاني فتتم فيه عملية التزليق بواسطة الماء ويكون العمود معرضا محيطا بأنبوب الضخ مباشرة ويسمى العمود المفتوح open line shafting ، يستخدم النوع الثاني في الحالات التي تتطلب أن يكون الماء نظيا و خاليا تماما من الزيت كما هو الحال في ماء الشرب . أما النوع الأول فيستخدم في مجالات الري المعتادة نظرا لنعومة تشغيله هذا النوع وقلة تآكل المحامل فيه وبالتالي طول عمره الافتراضي .

تتكون المضخة التوربينية بشكل عام ، كما يوضح الشكل (25-3) من ثلاث مجموعات رئيسية هي :

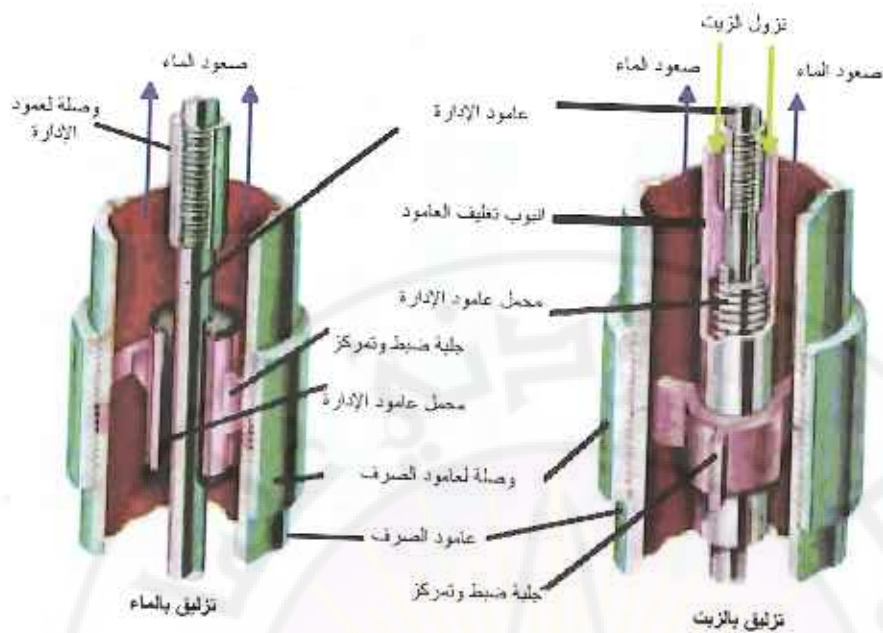


الشكل (25-3) مخطط ومقطع في المضخة العمودية

مجموعة الرأس :

تتكون مجموعة الرأس ، كما هو مبين في الشكل (26-3) من :

- كوع الطرد - المحرك الكهربائي أو مجموعة نقل الحركة في محرك الديزل - دعامة تثبيت - صندوق مانع التسرب - مجموعة التزييت في حالة العمود المزلق بالزيت .
- يصنع الرأس غالبا من الحديد الزهر ويستخدم لتثبيت المحرك الذي يزود غالبا بمحمل دفع لحمل مجموعة العمود والأجزاء الدوارة . كما يزود الرأس بصامولة لضبط الخوص بين الأجزاء الدوارة وغلاف الطاسة عن طريق رفعه أو خفضه . كما تزود الرأس في حالة التزييت بالزيت بمزيتة وآلية لشد أنبوب التفليف بعد التركيب لضمان استقامة المحامل ، أما في حالة التزييت بالماء فتزود بصندوق مانع لتسرب الماء .



الشكل (3 - 27) مقطع في مجموعة عمود الضخ

مجموعة الطاسة :

تتكون مجموعة الطاسة كما يوضح الشكل (3 - 28) من جزء دوار ذي جريان مختلط يدور داخل غلاف يسمى بالطاسة (Bowl) . وللمضخة طاسة واحدة أو مجموعة طاسات بعدد مراحل المضخة ، وتسمى بالطاسات البينية (Intermediate Bowls) حيث تتصل برأس انسيابي عند مدخل المضخة وتنتهي بالطاسة العليا عند مخرج المضخة . تعمل الطاسة بمثابة موجه لجريان الماء الخارج من الدوارة في اتجاه يصنع بينه وبين محور المضخة زاوية معينة) . تشمل مجموعة الطاسة أيضا كراسي المحمل وعمود إدارتها .



الشكل (28-3) مجموعة الطاسة

3-6-2 - المضخة الغاطسة Submersible Pump :

عندما يزداد عمق البئر عمق عن 200 m تظهر مشاكل في المضخات العمودية نتيجة لطول عمود الإدارة وما يتبع ذلك من زيادة كبيرة في ضياعات الاحتكاك داخل المحامل و يصبح استخدام هذه المضخات غير اقتصادي . لذا يفضل استخدام المضخات الغاطسة لمثل هذه الظروف حيث إنها تستخدم محركاً كهربائياً مركباً أسفل المضخة كما في الشكل (29-3) وتعمل جميعها وهي غاطسة في قاع البئر حيث تسحب منه الماء وتدفعه إلى الأعلى عن طريق أنبوب الضخ .

والمضخة الغاطسة شبيهة تماماً بالمضخة العمودية من حيث التركيب والعمل إلا أن محركها مركب في أسفلها . ولهذا المحرك تصميم خاص يتناسب مع وجوده في الماء لذا فهو ذو عزل جيد صغير القطر وطولاني حتى يتناسب مع الآبار الضيقة .

تحتوي محركات المضخات، الغاطسة ذات السعات الصغيرة على كرسي تحميل دفعي (Thrust Bearing) عند نهاية المحرك السفلية ليتحمل دفع المضخة السفلي وكرسي تحميل دفعي صغير أعلى المحرك ليتحمل الدفع العلوي التحظي أثناء بدء التشغيل للمضخة .
أما بعض المحركات المستخدمة في الآبار العميقة ففيها غرفة حيك منفصلة موجودة بين المحرك والمضخة وتحتوي على كرسي أو كراسي تحميل دفعية .
تمتاز المضخات الغاطسة بهدوء التشغيل فهي تتركب في الحداثق والمناطق الأهلة بالسكان كما أنها تستطيع جلب الماء من أعماق بعيدة قد تصل إلى آلاف الأمتار .
تستخدم المضخات الغاطسة في الوقت الحاضر بشكل واسع لما تتمتع به من مزايا فنية واقتصادية واستطاعات كبيرة وغزارات عالية يستفاد منها في ضخ المياه من الآبار العميقة ومن أهم المجالات التي تستخدم فيها هذه المضخات :

- 1 - أنظمة الري والصرف .
 - 2 - أنظمة إطفاء الحرائق .
 - 3 - أنظمة تغذية المياه المنزلية آليا .
 - 4 - في التطبيقات الصناعية الحديثة المختلفة .
- يمكن أن تزود المضخات الغاطسة بتجهيزات خاصة عند الطلب أو حسب وسيط التشغيل المستخدم .

مزايا المضخات الغاطسة :

- 1 - إمكانية تركيب المحرك على محور واحد مع المضخة .
- 2 - ضجيج منخفض لوجود المضخة والمحرك في الأسفل .
- 3 - استطاعة وغزارة كبيرتان وضغط كبير .
- 4 - سهولة الصيانة .
- 5 - غير قابلة للصدأ .

مساوئ المضخات الغاطسة :

- 1 - ضرورة أن يكون ارتفاع الماء فوق شيك السحب كبيراً حتى لا ينفد الماء فوقها مما يؤدي لعملها على الناشف وتلفها .
- 2 - تصميم مضخات غاطسة خاصة لضخ الأحماض والمواد الكيميائية في المنشآت الصناعية .

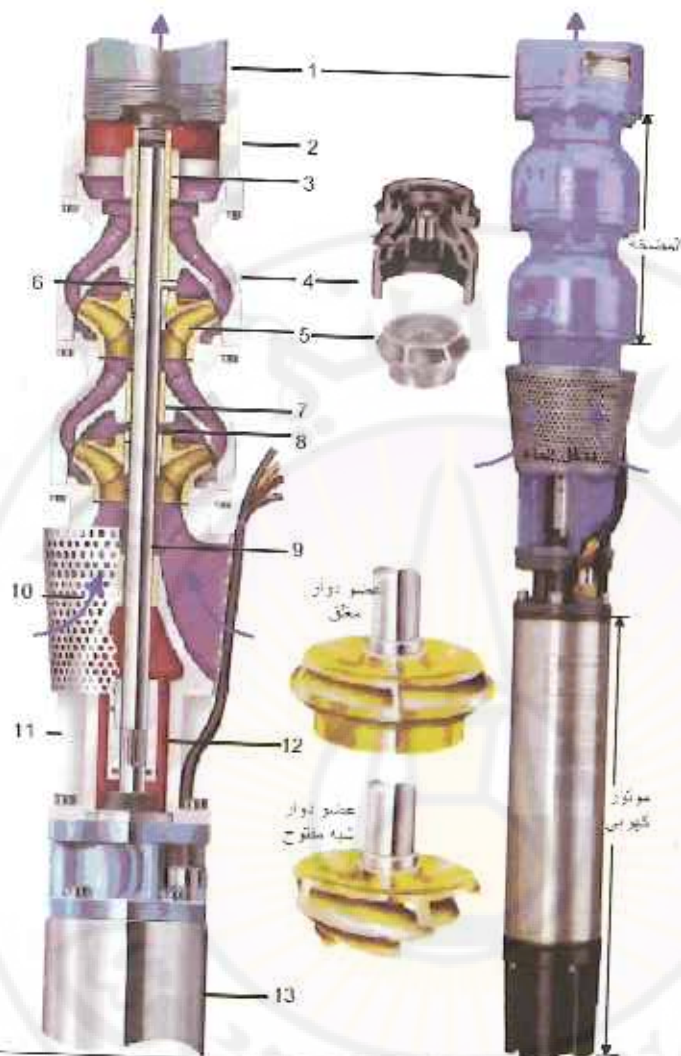
تتميز المضخات الغاطسة بقدرتها على تحمل وجود شوائب ميكانيكية (بقساوة تعادل قساوة الرمال الموجودة في الأنبار الارتوازية) يصل تركيزه النسبي في الماء حتى $40 [g / m^3]$ ، وتزود المضخات الغاطسة عند التركيب بدارة تحكم تعمل على تشغيل المضخة وفصلها تبعاً لمستوى الماء في البئر بشكل أوتوماتيكي ، وتزود المضخة أيضاً بجهاز قياس مستوى الماء في البئر عندما تكون المضخة بحالة عمل أو توقف عن العمل ، ويبين الشكل (30-3) مخطط تركيب مضخة غاطسة .

يجب أن يعار مدخل الكيل إلى المحرك أهمية خاصة كيلا يتسرب السائل إلى داخل المحرك فيعطله لذلك تستخدم في هذه المنطقة مانعة لدخول السائل .

إن درجة عزل ملفات المحرك تسمح بارتفاع درجة الحرارة حتى $150^{\circ}C$ كحد أعظمي ، لكن إذا ارتفعت درجة الحرارة أكثر من $125^{\circ}C$ تقوم حساسات خاصة بقطع التيار عن المحرك حتى لا تتأثر ملفاته بذلك ونحترق .

يمكن للمضخات الغاطسة أن تضخ سوائل تصل درجة حرارتها إلى $90^{\circ}C$ ومن أجل الصيانة يجب رفع المضخة كل سنة وفحص الزيت المستعمل فإذا كان لونه حليبياً معكراً فهذا يدل على أن الماء قد تسرب إلى الزيت واختلط معه ، ويجب تبديل المانعة عندئذ لأنها سبب العطل . في المضخات التي تضخ المواد الكلسية والمواد المتسخة يستخدم مدخل ومخرج خاص بسائل التبريد لتلافي الاختلاط .

يجب أن يوجه الجريان باتجاه مدخل المضخة مباشرة وأن نتجنب وجود مناطق ركود ومناطق ذات سرعات منخفضة داخل المضخة كيلا تتجمع فيها العوالق وتكون سبباً في تعطل المضخة إذا زاد عدد المضخات الغاطسة في المحطة عن 6 مضخات فإنه يفضل تقسيم خزان السحب إلى قسمين

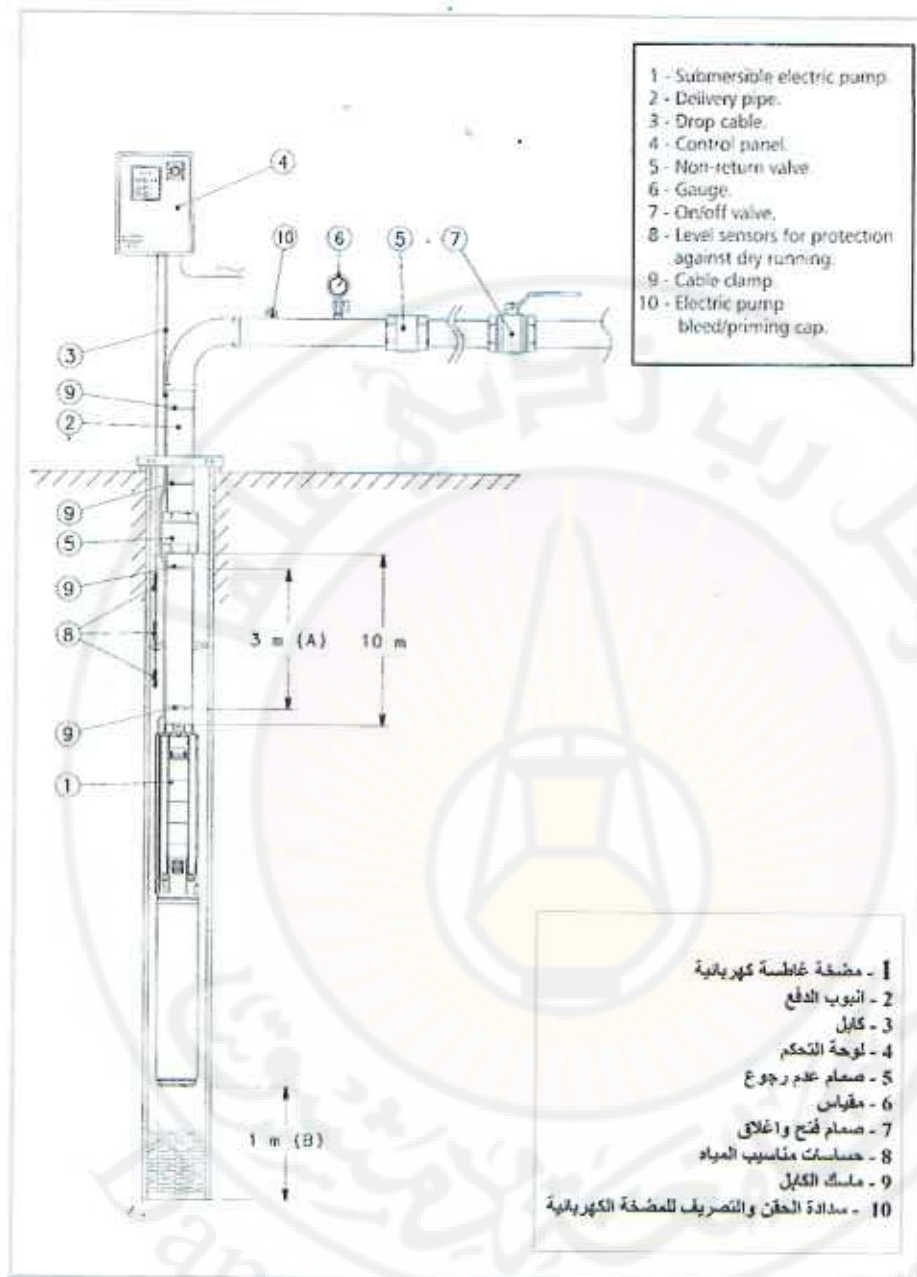


- 1- أنبوب الضخ . 2 - طاسة الضخ . 3 - محمل الضخ . 4 - طاسة وسيطة .
 5 - الدولاب الدائر . 6 - طوق الدفع . 7 - محامل الطاسة الوسيطة 8 - طوق تثبيت . 9 -
 عمود المضخة 10 - مدخل السحب 11 - وصلة السحب
 12 - قارنة ربط عمود المضخة بعمود المحرك 13 - محرك كهربائي

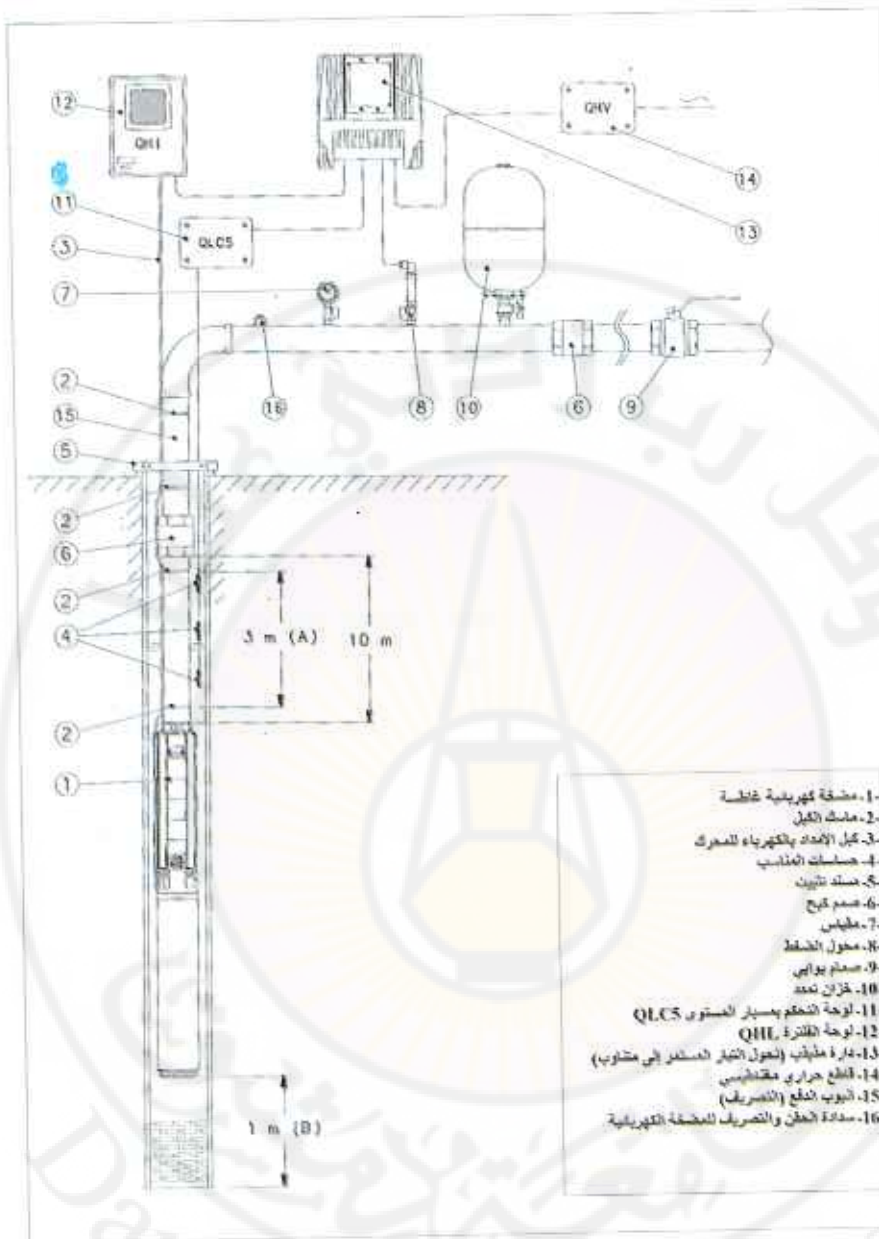
الشكل (29 - 3) مخطط مضخة غاطسة

بين الجدول (1-3) مقارنة بين المضخات العمودية والمضخات الغاطسة .

المضخة العمودية	المضخة الغاطسة
- مردود المحرك عالي - كابل الكهرباء قصير وبالتالي الضياعات فيه قليلة. - المحرك موجود على سطح الأرض وبالتالي يسهل الوصول إليه وإلى جملة نقل الحركة	- مردود المحرك منخفض نسبياً - كابل الكهرباء طويل جداً والضياعات فيه كبيرة. - المحرك موجود في عمق البئر وبالتالي يصعب الوصول إليه وإلى جملة نقل الحركة.
- عمود الإدارة طويل جداً وبالتالي تزداد بشكل كبير الضياعات في مجموعة المحامل المستخدمة . - تعمل بسرعات دوران محدودة بسبب طول العمود أقل من $1500 [r.p.m]$ ولذلك يكون التآكل قليلاً	- عمود الإدارة قصير جداً وبالتالي تكون الضياعات قليلة جداً في مجموعة المحامل المستخدمة . - يمكن العمل بسرعات دوران عالية تصل إلى $3000 [r.p.m]$ ولذلك يكون التآكل كبيراً
- تستخدم لأعماق لا تتجاوز منات قليلة من الأمتار. - تحتاج لأبار مستقيمة نظراً لمواصفات عمود نقل الحركة وضرورة التوضع المحوري للمضخة مع العمود	- تستخدم لأعماق تصل لآلاف الأمتار. - تتماشى مع بعض الانحناءات على طول البئر
- تحتاج لوقت طويل لتثبيتها داخل البئر . - تحتاج لضبط الجزء العامل قبل بدء التشغيل .	- تثبت بوقت قصير داخل البئر . - لا تحتاج لعملية ضبط قبل بدء التشغيل .
- تكلفتها قليلة نسبياً	- تكلفتها كبيرة نسبياً



الشكل (3-30) مخطط تركيب مضخة غاطسة .



الشكل (31 - 3) منظومة تحكم بالمضخة الغاطسة .

اختيار المضخات الغاطسة :

تستخدم المضخات الغاطسة عند الحاجة لضغوط عالٍ واستطاعة عالية توجد جداول تعطي أبعاد المضخات الغاطسة متعددة المراحل وأوزانها والمعادن الداخلة في تصنيعها ، كما توجد

جداول تبين أداء المضخة الغاطسة عند أنواع مختلفة وسرعات دوران محددة حيث يمكن تحديد المواصفات التالية :

ارتفاع المضخة مع المحرك ، ارتفاع المحرك فقط ، ارتفاع المضخة فقط ، قطر المضخة الخارجي ، قطر أنبوب الضخ ، الوزن الكلي ، وزن المضخة ، وزن المحرك ، إضافة لتحديد المواصفات الكهربائية وفق نوع المضخة ذات المحرك أحادي الطور أو وفق نوع المضخة ذات المحرك ثلاثي الطور ، واستطاعة المحرك واستطاعة الدخول وسعة وتوتر المكثف ، كما تعطي هذه الجداول قيم الضغط التبريدي عند غزارة مختلفة مقدرة بـ $[m^3/h]$ أو $[l/min]$.

كما يمكن اختيار المضخات الغاطسة بواسطة المنحنيات المميزة التي تبين العلاقة بين الضغط التبريدي والغزارة للمضخات ذات المراحل المتعددة إضافة لمنحنيات أخرى تبين العلاقة بين $NPSH = f(Q)$ ، $P/stage = f(Q)$ ، $\eta = f(Q)$ مستوى ارتفاع السحب الموجب الصافي ، ويمكن تصحيح هذه الخيارات عند المربود الأعظمي .

الشروط الواجب مراعاتها عند تركيب المضخة الغاطسة واستثمارها :

- 1 - فحص المضخة والمحرك لكشف الأضرار فيها (وإخبار الوكيل المعتمد أو الشركة البائعة)
- 2 - تنظيف حفرة البئر من الأجسام الغريبة والرمال قبل التركيب .
- 3 - عدم تشغيل المضخة لضخ سائل يحوي كمية زائدة من الشوائب لأنه يؤدي إلى اهترائها .
- 4 - عند وجود غاز أو هواء في الماء يمكن أن ينقص التدفق ويحدث التكيف الذي يؤدي المضخة .
- 5 - إذا عملت المضخة أثناء إغلاق صمام التفريغ يمكن أن يؤدي ذلك إلى إيذاء المضخة .
- 6 - يجب عدم السماح بتجمد الماء داخل المضخة أو داخل أي جزء من أجزاء المضخة والشبكة إذ إن التجمد سيضر بالنظام ويوقف المضخة عن العمل ويؤذيها .
- 7 - لا توصّل المضخة بمأخذ التغذية الكهربائية قبل تركيبها وتخيديمها .
- 8 - يجب التأكد أن توتر وفولطية خط التغذية موافق للتوتر و الفولطية اللزمين لمحرك المضخة .
- 9 - اختبار ماء البئر قبل الاستخدام .
- 10 - عند التركيب يجب حفظ البئر مغطى قدر الإمكان لمنع سقوط الأوراق والأجسام الغريبة داخل البئر إذ إن ذلك يمكن أن يلوث الماء ويسبب أضراراً ميكانيكية للمضخة .

الفصل الرابع

المنحنيات المميزة لآلات الضخ ذات الريش.

Curves Characterizing Blade Pumping Machines

1 - 4 - المنحنيات المميزة النظرية Theoretical Characteristics Curves

الخطوط المميزة النظرية للمضخات الطاردة هي تلك الخطوط التي تعطي بالعلاقات:

$$H_T = f(Q) \quad , \quad M_T = f(Q) \quad , \quad N_T = f(Q)$$

أي ارتباط كل من ضاغط المضخة وعزمها واستطاعتها النظرية بغزارة التدفق وكذلك بعدد دوراتها.

توصف هذه العلاقات بمنحنيات، تسمى هذه المنحنيات بالـ **المنحنيات النظرية للمضخات**. ويمكن رسم هذه المنحنيات في إحدى حالتين:

1- عند قيم ثابتة لعدد الدورات $n = \text{const}$.

2- من أجل قيم متغيرة لعدد الدورات $n \neq \text{const}$.

العلاقات الأكثر أهمية هي العلاقات التي تربط بين الضاغط والغزارة $H_T = f(Q)$.

1 - 1 - 4 - الضاغط النظري وعلاقته بالغزارة $H_T = f(Q)$

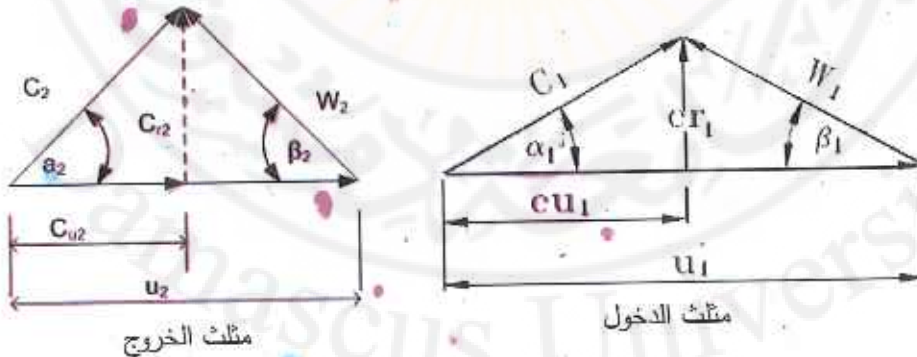
Variation Of The Theoretical Head With Capacity :

يعطي الضاغط النظري للمضخات ذات الريش بالعلاقة:

$$H_T = \frac{1}{g} (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (4-1)$$

وللانتقال من هذه الصيغة إلى الصيغة $H_T = f(Q, n)$ فإننا نعالج هذه المسألة كما يلي:

من ممثلي السرعة عند الدخول والخروج الشكل (4-1) نجد:



الشكل (4-1) ممثلي السرعة.

$$c_{u2} = c_2 \cos \alpha_2 = u_2 - w_2 \cos \beta_2 \quad (4-2)$$

$$c_{u1} = c_1 \cos \alpha_1 = u_1 - w_1 \cos \beta_1 \quad (4-3)$$

ومن المثلثات المذكورة لدينا:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{c_{r1}}{w_1 \cos \beta_1} \quad , \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{c_{r2}}{w_2 \cos \beta_2}$$

أي أن:

$$w_1 \cos \beta_1 = \frac{c_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_1} \quad , \quad w_2 \cos \beta_2 = \frac{c_{r2}}{\operatorname{tg} \beta_2}$$

بإستبدال قيم $w_1 \cos \beta_1$ و $w_2 \cos \beta_2$ في المعادلات (4-2) و (4-3) تصبح على الشكل:

$$c_{u1} = u_1 - \frac{c_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_1} \quad , \quad c_{u2} = u_2 - \frac{c_{r2}}{\operatorname{tg} \beta_2} \quad (4-4)$$

ولكن قيم السرعة المحيطية تعطى بالعلاقات:

$$u_1 = r_1 \omega_n = \frac{2 \pi r_1}{60} n \quad , \quad u_2 = r_2 \omega_b = \frac{2 \pi r_2}{60} n \quad (4-5)$$

كما تعطى الغزارة المارة عبر المضخة بالعلاقة:

$$Q = 2 \pi r_1 b_1 c_{r1} = 2 \pi r_2 b_2 c_{r2} \quad (4-6)$$

ومن العلاقة (4-6) نجد قيمة c_{r1} و c_{r2} بالشكل:

$$c_{r2} = \frac{Q}{2 \pi r_2 b_2} \quad , \quad c_{r1} = \frac{Q}{2 \pi r_1 b_1} \quad (4-7)$$

الآن بالعودة إلى العلاقة (4-1) واستبدال هذه القيم فيها نجد:

$$H_T = \frac{1}{g} \left[u_2 \left(u_2 - \frac{c_{r2}}{\operatorname{tg} \beta_2} \right) - u_1 \left(u_1 - \frac{c_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_1} \right) \right] \quad (4-8)$$

$$H_T = \frac{1}{g} \left[\left(u_2^2 - u_2 \frac{c_{r2}}{\operatorname{tg} \beta_2} \right) - \left(u_1^2 - u_1 \frac{c_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_1} \right) \right]$$

$$H_T = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{2 \pi r_2}{60} n \right)^2 - \frac{2 \pi r_2 n}{60} \cdot \frac{Q}{2 \pi r_2 b_2 \operatorname{tg} \beta_2} - \left(\frac{2 \pi r_1}{60} n \right)^2 + \frac{2 \pi r_1 n}{60} \cdot \frac{Q}{2 \pi r_1 b_1 \operatorname{tg} \beta_1} \right]$$

$$H_T = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{2\pi r_2}{60} \right)^2 - \left(\frac{2\pi r_1}{60} \right)^2 \right] n^2 - \left(\frac{1}{60 b_2 \operatorname{tg} \beta_2} - \frac{1}{60 b_1 \operatorname{tg} \beta_1} \right) Q n \quad (4-9)$$

باستخدام الرموز التالية:

$$B_1 = \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{60 b_1 \operatorname{tg} \beta_1}, \quad A_1 = \frac{1}{g} \left(\frac{2\pi r_1}{60} \right)^2$$

$$B_2 = \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{60 b_2 \operatorname{tg} \beta_2}, \quad A_2 = \frac{1}{g} \left(\frac{2\pi r_2}{60} \right)^2$$

وباستبدال هذه الرموز في العلاقة (4-9) فإنها تأخذ الشكل:

$$H_T = (A_2 - A_1) \cdot n^2 - (B_2 - B_1) n \cdot Q \quad (4-10)$$

أو:

$$H_T = A \cdot n^2 - B \cdot n \cdot Q \quad (4-11)$$

حيث:

$$A = A_2 - A_1 = \frac{4\pi^2}{3600 g} (r_2^2 - r_1^2)$$

$$B = B_2 - B_1 = \frac{1}{60 g} \left(\frac{1}{b_2 \operatorname{tg} \beta_2} - \frac{1}{b_1 \operatorname{tg} \beta_1} \right)$$

تظهر العلاقة (4-11) أن الضاغط النظري يتناسب مع الغزارة ومع مربع عدد الدورات.

4-1-2 - العزم النظري M_T وعلاقته بالغزارة $M_T = f(Q, n)$

Variation Of The Theoretical Momentum With Capacity:

تعطى علاقة العزم النظري بالشكل:

$$M_T = \rho \cdot Q (r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1}) \quad (4-12)$$

والمطلوب هنا الانتقال من هذه الصيغة إلى الصيغة $M_T = f(Q, n)$. يشكل مشابه للخطوات المتبعة في الفقرة السابقة لحسب قيمة كل من c_{u2} , c_{u1} ونعوضها في (4-12) وبالتالي تصبح كما يلي:

$$M_T = \rho \cdot Q \left[r_2 \left(u_2 - \frac{c_{r2}}{\operatorname{tg} \beta_2} \right) - r_1 \left(u_1 - \frac{c_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_1} \right) \right]$$

$$M_T = \rho \cdot Q \left[r_2 \left(\frac{2\pi r_2 n}{60} - \frac{Q}{2\pi r_2 b_2 \lg \beta_2} \right) - r_1 \left(\frac{2\pi r_1 n}{60} - \frac{Q}{2\pi r_1 b_1 \lg \beta_1} \right) \right] \quad (4-13)$$

وباستخدام الرموز التالية:

$$C_1 = \frac{\rho}{2\pi b_1 \lg \beta_1}, \quad D_1 = \frac{2\pi \rho r_1^2}{60}$$

$$C_2 = \frac{\rho}{2\pi b_2 \lg \beta_2}, \quad D_2 = \frac{2\pi \rho r_2^2}{60}$$

وباستخدام هذه الرموز في العلاقة (4-13) وإصلاحها فإنها تأخذ الشكل:

$$M_T = (D_2 - D_1) \cdot n \cdot Q - (C_2 - C_1) \cdot Q^2$$

أو بالصيغة:

$$M_T = D \cdot n \cdot Q - C \cdot Q^2 \quad (4-14)$$

وهذه العلاقة تبين أن العزم المطبق على دولاب المضخة يتناسب مع عدد الدورات ومع مربع الغزارة.

4-1-3 - الاستطاعة النظرية وعلاقتها بالغزارة $N_T = f(Q)$

: Variation Of The Theoretical Power With Capacity

$$N_T = M_T \cdot \omega_0 = \rho \cdot Q (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})$$

والمطلوب تحويل هذه العلاقة إلى الصيغة $N_T = f(Q)$ وهذا يتم بطريقة مشابهة للإجراء في أولاً ونحصل على النتيجة التالية:

$$N_T = E \cdot n^2 \cdot Q - K \cdot n \cdot Q^2 \quad (4-15)$$

حيث E, K ثابتان. فالاستطاعة التي تستهلكها المضخة تتناسب مع مربع عدد الدورات ومع مربع الغزارة.

4-1-4 - حالات خاصة

أ - إذا كان الدخول إلى المضخة قطعياً $\alpha_1 = 90^\circ$ عندها تتعوم المركبة c_{u1} وتأخذ العلاقات السابقة شكلاً أبسط أي:

$$H_T = \frac{1}{g} u_2 c_{u2} = A_2 \cdot n^2 - B_2 \cdot n \cdot Q \quad (4-16)$$

$$M_T = \rho Q (r_2 c_{u2}) = D_2 \cdot n \cdot Q - C_2 \cdot Q^2 \quad (4-17)$$

$$N_T = \rho Q (u_2 c_{u2}) = E_2 \cdot n^2 \cdot Q - K_2 \cdot n \cdot Q^2 \quad (4-18)$$

ب - إذا كان عدد الدورات ثابتاً $n = \text{const}$ و $\alpha_1 = 90^\circ$:
يتم تدوير المضخة بواسطة محرك، ويكون عدد دورات المحرك ثابتاً (بغض النظر عن الاستطاعة التي يقدمها المحرك إلى المضخة) وبالتالي يمكن اعتبار عدد الدورات ثابتاً كقيمة الثابت في العلاقات الأساسية المذكورة أعلاه والتي تأخذ عندها الأشكال التالية:

$$H_T = A^* - B^* \cdot Q \quad (4-19)$$

حيث:

$$B^* = \frac{1}{g} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{n}{b_2 \cdot \text{tg} \beta_2} \quad , \quad A^* = \frac{n^2}{g} \left(\frac{2 \pi r_2}{60} \right)^2$$

$$M_T = D^* \cdot Q - C^* \cdot Q^2 \quad (4-20)$$

حيث:

$$C^* = \frac{\rho}{2 \pi b_2 \text{tg} \beta_2} \quad , \quad D^* = \frac{2 \pi \rho r_2^2}{60} \cdot n$$

$$N_T = E^* \cdot Q - K^* \cdot Q^2 \quad (4-21)$$

حيث:

$$E^* = \frac{4 \pi^2 \rho r_2^2 n^2}{3600} \quad , \quad K^* = \frac{\rho n}{60 b_2 \text{tg} \beta_2}$$

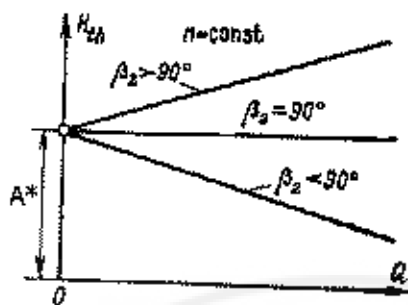
التمثيل البياني للعلاقات (4-19)، (4-20)، (4-21) على حجة إحداثيات (H_T, Q) ثم (M_T, Q) و (N_T, Q) :

لنأخذ العلاقة (4-19) ونرسم المنحني الذي يمثل هذه العلاقة:

$$H_T = A^* - B^* \cdot Q$$

أ - عندما تكون $Q = 0$ فإن $H_T = A^*$

ب - إن هذه العلاقة تمثل مستقيماً ومن (أ) واضح أنه يتقاطع مع المحور الشاقولي في النقطة A^* ، أما بالنسبة للنقاط الأخرى فإنها تتعلق بقيمة الزاوية β_2 أي:



الشكل (4-2) علاقة الضاغط النظري بالجزارة

1- عندما $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$ فإن $B^* = 0$ (ريش مستقيمة قطرية) تمثل العلاقة (4-19)

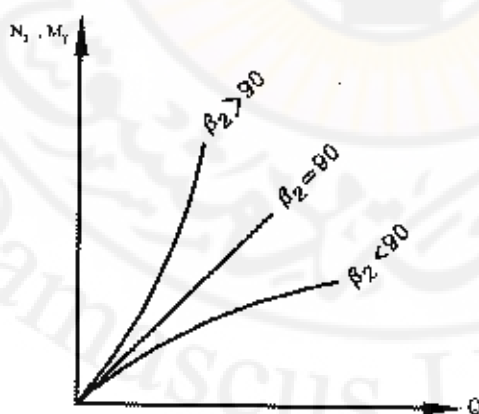
خطاً مستقيماً موازياً للمحور الأفقي (الضاغط لا يتغير بتغير الجزارة).

2- عندما $\beta_2 > \frac{\pi}{2}$ فإن $B^* < 0$ وبالتالي فإن قيمة H_T تتزايد مع تزايد الجزارة (ريش منحنية نحو الأمام).

3- عندما $\beta_2 < \frac{\pi}{2}$ (ريش منحنية نحو الخلف) يكون $B^* > 0$ وبالتالي فإن ضاغط المضخة يتناقص مع ازدياد الجزارة.

ملاحظة: يزداد الضاغط النظري من أجل نفس الجزارة مع ازدياد انحناء الريش نحو الأمام.

وبنفس المناقشة يمكن تمثيل العلاقتين (4-20) و (4-21) أي علاقة كل من العزم النظري M_T والاستطاعة النظرية N_T بالجزارة Q كما في الشكل (4-3):



الشكل (4-3) تغير العزم والاستطاعة النظريين بتغير الجزارة .

4 - 2 - المنحنيات المميزة الفعلية لآلة الضخ الطاردة من أجل عدد دورات ثابت :

Actual Curves :

إن الضاغط H_T الذي درسنه في الفقرة السابقة وأوجدنا علاقته بالغازة وعدد الدورات وأبعاد المضخة هو ضاغط نظري ناتج عن مثلاثات السرعة عند الدخول والخروج من وإلى الدوارة. أما الضاغط الحقيقي الذي تولده المضخة والذي يصرف لرفع السائل وتغطية الفواقد في أنبوبي السحب والدفع فهو عملياً أقل من الضاغط النظري بمقدار قيمة الفواقد التي تحصل ضمن المضخة، أي أن الضاغط الفعلي يساوي إلى الضاغط النظري مطروحاً منه فواقد الجريان ضمن دولاب المضخة، لذلك لتحديد قيمة الضاغط الفعلي لا بد من تحديد الفواقد ضمن المضخة. تتكون الفواقد في المضخة من ثلاثة أنواع:

فواقد العطالة h_a . فواقد الاحتكاك h_f . وفواقد الصدم h_v .

هذه الفواقد جميعها تتعلق بقيمة الغازة، ويمكن حسابها باستخدام علاقات تجريبية. فواقد العطالة h_a :

تعطى فواقد العطالة بالعلاقة التجريبية التالية :

$$h_a = C_1 - C_2 \cdot Q = C \cdot H_T \quad (4-22)$$

حيث C هو ثابت فواقد العطالة ويحدد تجريبياً. وبمثل فواقد العطالة بيانياً كما في الشكل (4-4)

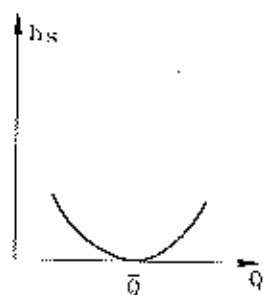
فواقد الاحتكاك h_f :

تناسب هذه الفواقد مع مربع السرعة وبالتالي مع مربع الغازة، وتتنوع مع انعدام الغازة ويزداد بازديادها، وتعطى بالعلاقة:

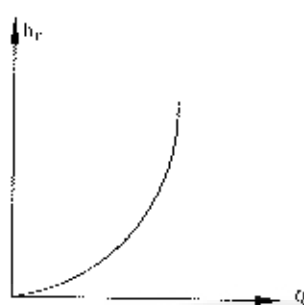
$$h_f = a \cdot Q^2 \quad (4-23)$$

حيث a ثابت يتعلق بخشونة الجدران ومساحتها. الشكل (4-5) يبين فواقد الاحتكاك بيانياً. فواقد الصدم:

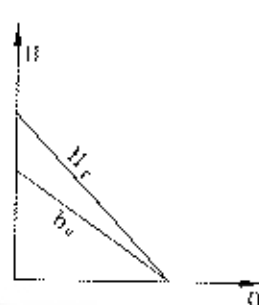
تحدث هذه الفواقد عند مدخل دولاب المضخة نتيجة لاختلاف زاوية دخول السائل عن زاوية الريش β_1 مما يؤدي إلى نشوء دوامات عند المدخل، وبعبارة أخرى فإن هذه الفواقد تحصل نتيجة اختلاف الغازة المتدفقة عبر المضخة عن الغازة التصميمية للمضخة (الغازة الاسمية).



الشكل (4-6) التمثيل البياني
لفواقد الصدم



الشكل (4-5) التمثيل البياني
لفواقد الاحتكاك



الشكل (4-4) التمثيل البياني
لفواقد العطالة

وتتناسب هذه الفواقد مع مربع الفرق بين الغزارة الفعلية Q والاسمية $\bar{Q}$:

$$h_s = K(Q - \bar{Q})^2 \quad (4-24)$$

حيث K ثابت يتعلق بشكل حافة الريش الأمامية عند مدخل الدولاب. ويبين الشكل (4-6) تمثيلاً بيانياً لها

4-2-1 - المنحني المميز للضاغط الفعلي للمضخة Actual Performance Curves

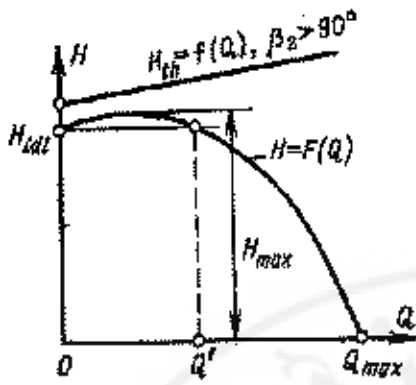
بعد أن حددنا الفواقد ضمن المضخة وكنا قد حددنا الضاغط النظري أصبح بالإمكان أن نصف الضاغط الفعلي بالعلاقة:

$$H = H_T - (h_a + h_r + h_s) \quad (4-25)$$

فإذا أردنا إيجاد علاقة الضاغط الفعلي H كتابع للغزارة، فما علينا إلا استبدال قيم H_T وكل من الفواقد الثلاثة من المعادلات المذكورة أعلاه كتوابع للغزارة، وعندها نحصل على معادلة تصف علاقة الضغط الفعلي بالغزارة وهي من الشكل:

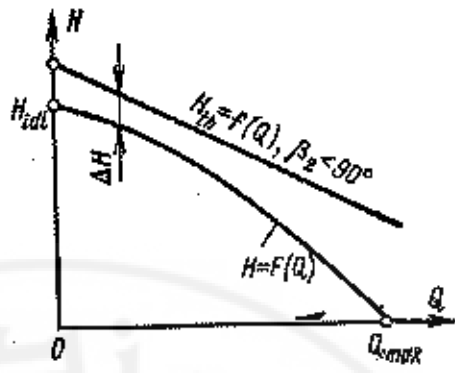
$$H = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C \quad (4-26)$$

ولدى التمثيل البياني لهذه العلاقة $H = f(Q)$ فإنه من الطبيعي أن يتوضع هذا المنحني إلى الأسفل من منحني الضاغط النظري. وكما رأينا سابقاً فإن المنحني المميز للضاغط النظري ينبع زاوية الخروج β_2 ، وبالتالي فإن تمثيل الضاغط الفعلي يتم بنفس الطريقة. وتبعاً لذلك نميز الشكلين التاليين:



الشكل (4-7) المنحني المميز الفعلي

$$\beta_2 > 90^\circ$$



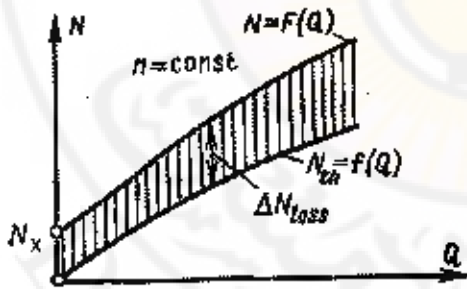
الشكل (4-8) المنحني المميز الفعلي

$$\beta_2 < 90^\circ$$

يمثل الشكل (4-7) المنحني المميز الفعلي $H = f(Q)$ من أجل زاوية خروج $\beta_2 > 90^\circ$ ، نلاحظ أن هذا المنحني يتمتع بنهاية عظمى، وبالتالي يمكن أن تكون هناك قيم مختلفة للغزارة من أجل نفس الضاغط ولنفس الآلة مما يؤدي إلى عمل غير مستقر تماماً للمضخة، وهذه السلبية تجعل الآلات التي تتمتع بهذا النوع من المنحنيات غير مرغوب فيها.

وفي الشكل (4-8) يبين المنحني المميز الفعلي $H = f(Q)$ آلة تتمتع بزاوية خروج $\beta_2 < 90^\circ$ ، وتؤخذ عادة من $(20^\circ - 35^\circ)$

4-2-2 - المنحني المميز للاستطاعة الفعلية Actual Power Curve



الشكل (4-9) المنحني المميز للاستطاعة الفعلية والنظرية
آلة ضخ طاردة

يمكن الحصول على المنحني الفعلي لاستطاعة الآلة بنفس طريقة الحصول على الضاغط الفعلي لكن هنا من الاستطاعة النظرية ومن الضياعات الكلية الحاصلة في المضخة.

إن الاستطاعة الفعلية المقدمة للمضخة تكون أكبر من تلك التي تقدمها المضخة بمقدار الاستطاعة اللازمة للتغلب على

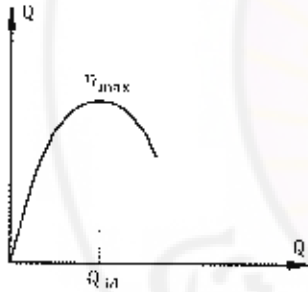
مجموع الفوائد ضمن المضخة، وكما لاحظنا فإن العلاقة التي تربط الاستطاعة بالغازة هي علاقة من الدرجة الثانية وتبقى طبيعة هذه العلاقة ثابتة في حالة الاستطاعة الفعلية، إلا أن منحنى الاستطاعة الفعلية يقع فوق منحنى الاستطاعة النظرية وذلك بسبب الضياعات. كما في الشكل (4-9) من الواضح أنه عندما تنعدم الغازة $Q = 0$ فإن الاستطاعة النظرية $N_T = 0$ أما الاستطاعة الفعلية $N = N_p$ وهي الاستطاعة اللازمة للتغلب على الفوائد نتيجة تشكل الأعاصير بين الريش وفوائد الاحتكاك في المضخة. نحصل على غازة معدومة عند الإغلاق التام للشبكة.

4-2-3 تحديد شكل منحنى المردود للألة Efficiency Curve

من العلاقة التي تعرف المردود الكامل للألة

$$\eta_T = \frac{N_p}{N_B} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot N_B} \quad (4-27)$$

يتضح أنه بواسطة المنحنيات الفعلية للضاغط وللأستطاعة يمكن إنشاء المنحنى المميز لمردود الألة. يتعدى المردود عند انعدام الغازة أو الضاغط وفي كافة عمل أنظمة الآلات $N \neq 0$ وضمن المجال $Q \in [0, Q_{max}]$ ، فإن قيمة المردود تصل إلى قيمة أعظمية، الشكل (4-10).



الشكل (10-4) المنحنى المميز لمردود مضخة طاردة

وعندما تعمل الألة بشروط موافقة للمردود الأعظمي فإن هذه الشروط هي شروط العمل المثالية، إذ إنه عندها يتم تأمين الغازة والضاغط المطلوبين بأقل استطاعة ممكنة وبالتالي يجب اختيار آلات لتعمل وفق شروط العمل المثالية غير أنه من الممكن السماح باختيار آلات تعمل على غازات توافق

مردودا قدره $\eta = 0,9 \eta_{max}$. تتمتع الآلات الطاردة في الوقت الحاضر بفعالية عالية إذ يصل مردودها إلى $\eta = 0,9$ ، كما أن الآلات المحورية تتمتع بمردود أكبر من ذلك $\eta > 0,9$.

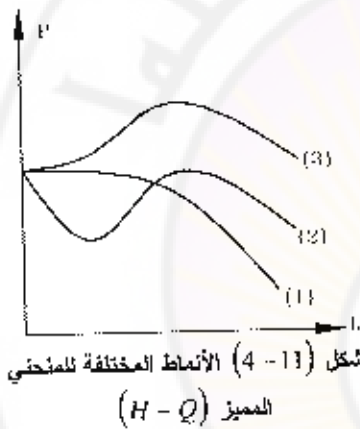
4 - 2 - 4 - ملاحظات واستنتاجات:

أ - يعد المنحني $(p-L)$ للمراوح و $(H-Q)$ للمضخات هو المنحني المميز الأهم ويسمى منحني الضغط أو منحنى عمل الآلة ، وبواسطة هذا المنحني يتم اختيار الآلة التي توافق شروط العمل.

عند تغير الغزارة تتغير سرعة خروج السائل من الدوارة وكذلك تتغير C_{p2} التي تدخل في حساب الضغط النظري كما تتغير قيمة الفاقد الهيدروليكي وقيمة معامل الضغط ψ

$$\psi = \eta \cdot \varphi = \frac{p_T - \Delta p}{p_T} \cdot \frac{C_{p2}}{u_2}$$

ونتيجة تغير القيم المذكورة أعلاه فإن منحنى الضغط يمكن أن يأخذ أحد الأشكال التالية الموضحة بالشكل (4-11):



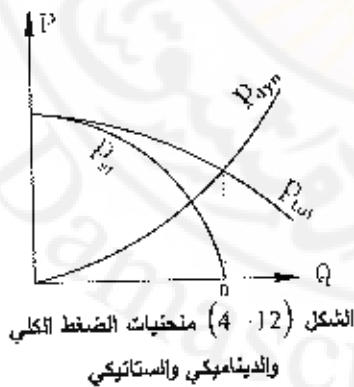
إما أن يكون منحنى الضغط هابطا باستمرار (1) أو صاعدا ثم هابطا (3) أو مترجعا على شكل سرج (2) تصنف المنحنيات (2) و (3) آلات الضخ التي يتغير فيها فاقد الضغط بشكل غير منتظم مع تغير الغزارة، وهذا ينتج عن الخواص التصميمية للآلة.

ب - منحنى الضغط الديناميكي والضغط الستاتيكي: يعطى الضغط الديناميكي بالعلاقة $p_{dyn} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ ، بالتالي يتناسب مع مربع الغزارة Q^2 و يمثل بيانياً بقطع مكافئ.

وبما أن الضغط الكلي هو مجموع الضغطين الديناميكي والستاتيكي ، يمكن كتابة:

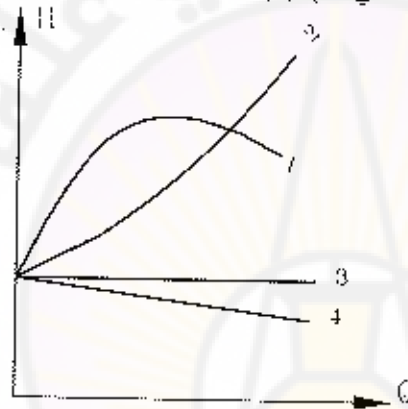
$$p_{st} = p_{tot} - p_{dyn}$$

ولإيجاد منحنى الضغط الستاتيكي نقوم بطرح الضغط الديناميكي من الكلي فنحصل على p_{st}



كما في الشكل (4-12) النقطة B توافق عمل الآلة عندما $Q = 0$ أي أن فتحة الخروج مغلقة تماماً، والنقطة D توافق العمل الحر للآلة $p_w = 0$ أي أن فتحة الخروج مفتوحة بشكل كامل.

ج - يبين الشكل (4-13) منحنيات الاستطاعة التي تختلف حسب نوع الريش وحسب نوع الآلة، فإذا كانت الريش منحنية نحو الخلف فإن منحنى الاستطاعة يأخذ الشكل المنحني رقم (1)، أما إذا كانت الريش منحنية نحو الأمام فإن منحنى الاستطاعة يأخذ الشكل رقم (2). في الآلات المحورية تختلف منحنيات الاستطاعة عن تلك للآلات الطاردة ففي بعض الآلات تبقى الاستطاعة ثابتة رغم تغير الغزارة، المنحني رقم (3)، أما في البعض الآخر فإن الاستطاعة تنخفض مع ازدياد الغزارة، المنحني رقم (4).



الشكل (4-13) علاقة منحنيات الاستطاعة بنوع الريش ونوع الآلة

4 - 3 - استطاعة ومردود آلة الضخ Pump power & Efficiency :

تحدد الاستطاعة المفيدة التي تقدمها المضخة (الاستطاعة التي يكتسبها السائل في

المضخة):

$$N_p = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H}{1000} \quad [kW] \quad (4-28)$$

حيث : $Q [m^3 / s]$ - الغزارة .

$H [m H_2O]$ - الضاغط الفعلي للمضخة.

$\rho [kg / m^3]$ - الكثافة.

أما إذا استعملنا الجداء $\gamma = \rho \cdot g$ حيث γ الوزن النوعي مقدراً بـ $[kp / m^3]$ تصبح العلاقة

السابقة:

$$N_p = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102} [kW]$$

إن الاستطاعة الفعلية التي تستهلكها المضخة أكبر من الاستطاعة التي تقدمها للمائل، وذلك بسبب وجود المقارومات داخل المضخة التي تتطلب صرف جزء من الاستطاعة للتغلب عليها، وبالتالي يمكن صياغة قيمة الاستطاعة الفعلية المقدمة للمضخة بالعلاقة:

$$N_B = \frac{N_p}{\eta_r} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_r} \quad (4-29)$$

حيث η_r هو المردود الكامل للمضخة، ويعطى من قبل المنتج أي أن المردود الكامل للمضخة هو عبارة عن نسبة الاستطاعة المفيدة المقدمة إلى السائل إلى الاستطاعة الفعلية المقدمة للمضخة.

$$\eta_T = \frac{N_p}{N_B} \quad (4-30)$$

ويصل المردود في المضخات الحديثة إلى حوالي $0.9 \div 0.95$.

4 - 3 - 1 - تحديد استطاعة المحرك الكهربائي

عند تحديد استطاعة المحرك الكهربائي اللازم لتشغيل مضخة استطاعة الدخل لها N_B يجب أن نأخذ بعين الاعتبار عاملين:

1 - الحمولات المفاجئة:

بالأخذ بعين الاعتبار الحمولات المفاجئة على المضخة ندخل عامل أمان K لدى حساب استطاعة المحرك الكهربائي N_m والتي تعطى بالعلاقة:

$$N_m = K \cdot N_B = \frac{K \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_r} [kW] \quad (4-31)$$

حيث أن k - عامل أمان يأخذ بالحسبان الحمولات المفاجئة وله القيم التالية:

$$N_B < 1 [kW] \text{ عندما } k = 1,5$$

$$N_B = 1 \div 2 [kW] \text{ عندما } k = 1,3$$

$$N_B = 2 \div 5 [kW] \text{ عندما } k = 1,2$$

$$N_B > 5 [kW] \text{ عندما } k = 1,1$$

2 - طريقة نقل الحركة من المحرك إلى المضخة:

تحدد استطاعة المحرك الكهربائي بالأخذ بعين الاعتبار الضياعات في جملة نقل الحركة، ولهذه الغاية يدخل في علاقة حساب الاستطاعة المذكورة قيمة مردود نقل الحركة

$$N_M = K \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_r \cdot \eta_u} \quad (4-32)$$

حيث η_r هو مردود جملة نقل الحركة.

إذا كان وصل محور المضخة إلى محور المحرك الكهربائي مباشرة تكون $\eta_r = 1$ ، وإذا كان الوصل بواسطة الأتشفة (سيور) عندها يكون $\eta_r = 0.95$ للأتشفة ذات مقطع V أو بشكل شبه منحرف وتكون $\eta_r = 0.9$ للأتشفة المسطحة.

4 - 3 - 2 - مردود آلة الضخ :

تتنوع الضياعات في المضخة فمنها ما يحصل نتيجة وجود أجزاء متحركة وأخرى ثابتة ومنها ما يحصل نتيجة الجريان الحقيقي والأخير يحصل نتيجة وجود اتصال بين منطقة الضغط المرتفع ومنطقة الضغط المنخفض . لذلك يعبر عن الضياعات بالمراديد الجزئية الموافقة وهي المردود الحجمي:

ويعبر عن مقدار تسربات السائل من قسم الضخ إلى قسم السحب داخل المضخة نتيجة لفرق الضغط بين القسمين، فإذا كانت غزارة التدفق في الشبكة هي $Q [l/s]$ فإن غزارة تدفق داخل المضخة تكون $Q + q$ وعندها يحسب المردود الحجمي:

$$\eta_0 = \frac{Q}{Q + q} \quad (4-33)$$

وتتراوح قيمة المردود الحجمي من $0.95 \div 0.98$ ، حيث q هي مقدار تسربات السائل داخل المضخة من منطقة الضخ (الضغط المرتفع) إلى منطقة السحب (الضغط المنخفض).

المردود الهيدروليكي:

يعبر عن مقدار فاقد الضغط اللازم للتغلب على المقاوومات الهيدروليكية داخل المضخة، ويحسب بالعلاقة:

$$\eta_h = \frac{H}{H + h} \quad (4-34)$$

حيث H - الضاغط الفعلي الذي يجب أن تولده المضخة.

h - فاقد الضغط داخل المضخة.

تتراوح قيمة المردود الهيدروليكي بحدود $\eta_H = 0,90$ أو أكثر قليلاً.
المردود الميكانيكي:

يبين مقدار فاقد القدرة اللازم للتغلب على الاحتكاكات في المضاجع والمساند وأمكنة الاحتكاك الأخرى:

$$\eta_M = \frac{N_H - N_{TR}}{N_B} \quad (4-35)$$

حيث N_B - الاستطاعة الفعلية المقدمة للمضخة.

N_{TR} - فاقد الاستطاعة اللازم للتغلب على مقاومات الاحتكاك.

وأخيراً فإن المردود الكامل η_T يساوي إلى جداء المراديب الجزئية:

$$\eta_T = \eta_0 \eta_h \eta_M \quad (4-36)$$

4-4 - وصل المضخات على التسلسل وعلى التفرع

Series & Parallel Connection Of Centrifugal Pumps

في بعض الشبكات لا تكفي مضخة واحدة لتأمين الغزارة أو الضاغط أو كليهما معاً فنلجأ عندها لوصل عدد من المضخات لتأمين الغزارة والضاغط المطلوبين في هذه الشبكة وذلك كالآتي:

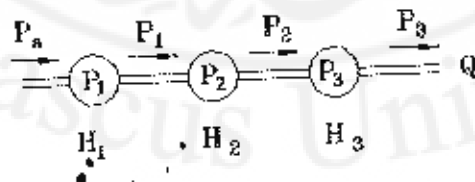
1 - عند الحاجة إلى غزارة كبيرة لا تستطيع مضخة واحدة تأمينها فإننا نقوم بوصل عدد من المضخات على التفرع.

2 - عند الحاجة إلى تأمين ضاغط كبير لا تؤمنه مضخة واحدة فإننا نقوم بوصل عدد من المضخات على التسلسل.

4-4-1 - وصل المضخات على التسلسل :

يستخدم عند الحاجة لتوليد ضاغط كبير لا تستطيع مضخة واحدة تأمينه وفي هذه الحالة تكون الغزارة في المضخات المتتالية ثابتة، أي :

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_n \quad (4-37)$$



الشكل (4-14) وصل عدة مضخات على التسلسل

أما بالنسبة للطاقة التي يكتسبها الجريان عند مروره في المضخات، فإن السائل عند مروره بالمضخة الأولى يكتسب طاقة فيخرج منها بضغط p_1 ويدخل إلى المضخة الثانية بضغط p_1 ليكتسب طاقة ويخرج منها بضغط p_2 يدخل به إلى المضخة الثالثة والتي يخرج منها بضغط p_3 كما في الشكل (4-14). أما الضاغط الكلي الذي يكتسبه السائل نتيجة مروره في سلسلة المضخات يساوي إلى مجموع الضواغط الجزئية (أي مجموع ضواغط المضخات كل على حده) ويعطى بالعلاقة:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_n \quad (4-38)$$

ولما كانت علاقة الضاغط الفعلي للمضخة بالغزارة تعطى بالشكل:

$$H = AQ^2 + BQ + C \quad (4-39)$$

فإن علاقة الضاغط الكلي H الناتج عن وصل عند (n) من المضخات على التسلسل يعطى بالعلاقة:

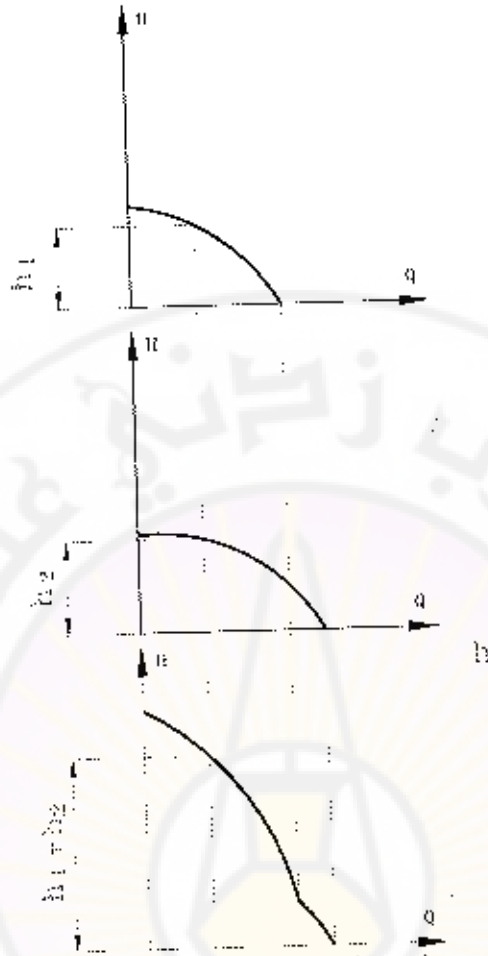
$$H = (\sum A_n)Q^2 + (\sum B_n)Q + \sum C_n \quad (4-40)$$

وفي الحالة الخاصة التي يكون فيها لكل المضخات نفس المواصفات (نفس الخطوط المميزة) عندها يمكن أن نكتب العلاقة (4-40) بالشكل:

$$H = n (AQ^2 + BQ + C) \quad (4-41)$$

4-4-2 - المنحني المميز لمجموعة مضخات عند وصلها على التسلسل:

لإيجاد المنحني المميز $(H - Q)$ لمجموعة مضخات موصولة على التسلسل فإننا نقوم بجمع المنحنيات المميزة لكل المضخات بشكل متتالي، أي أننا عند كل قيمة للغزارة نجمع قيم الضواغط للمضخات فنحصل على قيمة الضاغط الموافقة للغزارة المحددة عند وصل مجموعة المضخات على التسلسل الشكل (4-15).



الشكل (4-15) المنحني المميز لعمل مضختين على التسلسل

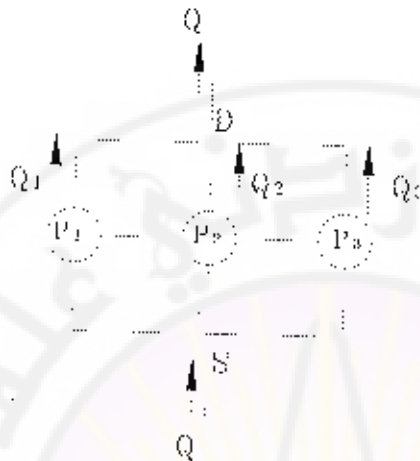
4 - 4 - 3 - وصل المضخات على التفرع

عند الحاجة إلى غزارة كبيرة لا تستطيع مضخة واحدة تأمينها فإننا نلجأ إلى وصل عدة مضخات على التفرع الشكل (4-16) ، تقوم كل مضخة من هذه المضخات بضخ جزء من الغزارة الكلية المطلوبة، وتكون الغزارة الكلية مساوية إلى مجموع الغزارات الجزئية:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (4-42)$$

ويكون الضاغط ثابتاً لكل المضخات إذ إنها تشترك بنقطة التفرع عند مداخلها وكذلك نقطة التجميع عند مخرجها أي أن ضغط السحب وضغط الدفع هما نفسيهما لكل المضخات وبالتالي يمكن أن نكتب:

$$H = H_1 = H_2 = H_3 = \dots H_n \quad (4-43)$$



الشكل (4-16) وصل المضخات على التفرع

وإذا كانت المضخات الموصولة على التفرع متشابهة فإنه:

$$Q = n \cdot Q_1 \quad (4-42')$$

$$H = H_1 = H_2 = H_3 \dots \dots \quad (4-43')$$

حيث (n) عدد المضخات الموصولة على التفرع.

وفي هذه الحالة تكون معادلة المنحني المميز لمجموعة المضخات الموصولة على التفرع هي:

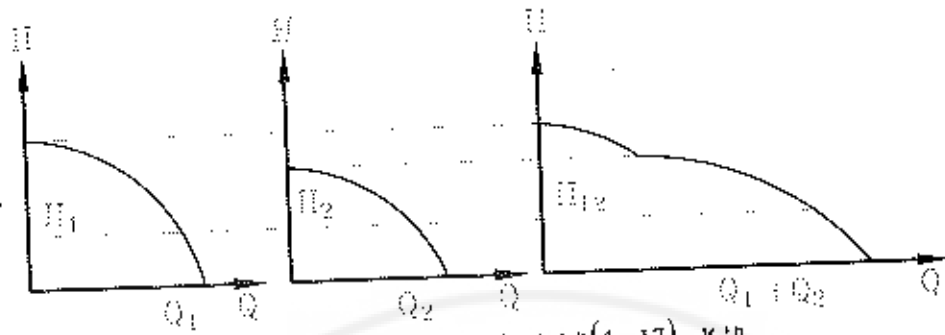
$$H = A \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + B \left(\frac{Q}{n} \right) + C \quad (4-44)$$

أما في الحالة العامة فإننا نحصل على المنحني المميز لمجموعة مضخات موصولة على التفرع

$(H - Q)$ عن طريق جمع المنحنيات المميزة للمضخات جمعاً أفقياً الشكّل (4-17) أي

نجمع قيم الغزارات الموافقة للضواغط المتساوية ونمثل قيمة الغزارة الناتجة مع قيمة الضاغط كما

في الشكّل:



الشكل (4-17) المنحنى المميز لعملي مضختين على النفرع

4 - 5 - التشابه في الآلات الطاردة : Similitude Of Centrifugal Pumps

لدى تصميم الآلات الهيدروليكية نستخدم عادة نماذج، حيث يتم إجراء التجارب على هذه النماذج مما يسمح بإجراء التعديلات اللازمة على التصميم قبل تنفيذ الآلة الهيدروليكية الأصل، لذلك فإن النموذج ينشأ بالأخذ بعين الاعتبار قوانين التشابه مما يحقق تشابهها من حيث الأداء مع الأصل.

نقول عن التين إنهما متشابهتان من حيث الأداء إذا تحققت الشروط التالية:

- 1 - تشابه الجريان: (مقلات السرعة عند الدخول والخروج).
- 2 - تشابه الخطوط المميزة: (الضاغط، العزم، الاستطاعة).
- 3 - تساوي الفوائد النسبية: (تساوي المراديد).

4 - 5 - 1 - شروط التشابه للآلات الطاردة:

نقول عن التين إنهما متشابهتان هيدروليكيًا إذا توفرت الشروط التالية:

- التشابه الهندسي:

الذي ينص على ضرورة وجود تناسب ثابت بين أبعاد الآلة الأصل والنموذج، ولا ننسى أن التشابه الهندسي يعطي تساوي الزوايا التصميمية للآلة الأصل مع ما يقابلها من النموذج، فإذا رمزنا لأبعاد الآلة الأصل بالرمز (') فيكون:

D_1, D'_1 : هما القطر الداخلي للدوارة في الآلة الأصل والنموذج.

D_2, D'_2 : هما القطر الخارجي للدوارة في الآلة الأصل والنموذج.

h_1, b_1' : عرض الريش عند الدخول في الآلة الأصل والنموذج.

h_2, b_2' : عرض الريش عند الخروج في الآلة الأصل والنموذج.

وكذلك الأمر بالنسبة لبقية الأبعاد والزوايا التصميمية فإن شروط التشابه الهندسي:

$$\frac{D_1}{D_1'} = \frac{D_2}{D_2'} = \frac{h_1}{b_1'} = \frac{h_2}{b_2'} \quad (4-45)$$

$$\beta_1 = \beta_1' , \quad \beta_2 = \beta_2'$$

- التشابه الحركي:

يشترط التشابه الحركي أن يكون الجريان في النموذج مشابها للجريان في الأصل، أي أن تتشابه معدلات السرعة عند الدخول والخروج.

$$\frac{u_1}{u_1'} = \frac{c_1}{c_1'} = \frac{c_{u1}}{c_{u1}'} = \frac{c_{r1}}{c_{r1}'} = \frac{w_1}{w_1'}$$

$$\frac{u_2}{u_2'} = \frac{c_2}{c_2'} = \frac{c_{u2}}{c_{u2}'} = \frac{c_{r2}}{c_{r2}'} = \frac{w_2}{w_2'} \quad (4-46)$$

$$\beta_1 = \beta_1' , \quad \beta_2 = \beta_2' , \quad \alpha_1 = \alpha_1' , \quad \alpha_2 = \alpha_2'$$

- التشابه التحريكي:

يشترط أن تكون نسبة قوى العطالة وقوى الاحتكاك ثابتة لكل من النموذج والأصل:

F_r, F_r' : قوى الاحتكاك للأصل والنموذج.

F_k, F_k' : قوى العطالة للأصل والنموذج.

إذ شرط التشابه التحريكي: $\frac{F_k}{F_r} = \frac{F_k'}{F_r'}$ ومسطيع كتابة:

$$\frac{F_k}{F_r} = \frac{F_k'}{F_r'} \quad (4-47)$$

إلا أن $\frac{F_k}{F_e}$ تساوي عدد رينولدز التشابهي Re . أي أنه ليتحقق التشابه التحريكي يجب أن يكون عدد رينولدز ثابتاً لكل من الأصل والنموذج $(R_e = R'_e)$.

- تساوي المراتيد:

ليتحقق التشابه التحريكي يجب أن تكون المراتيد متساوية للأصل والنموذج.

(4-48)

$$\eta = \eta'$$

4-5-2 - قوانين التشابه العامة

من مثلثات السرعة عند الدخول والخروج يمكن أن نستنتج ما يلي:

$$\frac{u_1}{u'_1} = \frac{c_1}{c'_1} = \frac{c_{r1}}{c'_{r1}} = \frac{n_1 \cdot D_1}{n'_1 \cdot D'_1}$$

- نسبة الغزارة:

تعطى الغزارة بشكل عام:

$$Q = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot c_{r1} = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot c_{r2}$$

وبالتالي تكون نسبة الغزارة للمارة عبر الجسم الأصلي إلى تلك المارة عبر النموذج.

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\pi \cdot D'_2 \cdot b'_2 \cdot c'_{r2}}{\pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot c_{r2}}$$

ومن شروط التشابه الحركي يكون:

$$\frac{c'_{r2}}{c_{r1}} = \frac{u'_1}{u_1} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{D'_1}{D_1}$$

من شروط التشابه الهندسي:

$$\frac{D'_1}{D_1} = \frac{b'_1}{b_1}$$

بالتعويض:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} \left(\frac{D'_1}{D_1} \right)^3 \quad (4-49)$$

أي أن الغزارات في الآلات المتشابهة تتناسب مع مكعب نسبة الأقطار ونسبة عدد الدورات.

- نسبة الضغط:

$$p_T = \rho \cdot u_2 \cdot c_{u2} \quad , \quad H_T = \frac{1}{g} \cdot u_2 \cdot c_{u2} \quad , \quad H'_T = \frac{1}{g} \cdot u'_2 \cdot c'_{u2}$$

$$\frac{H'_T}{H_T} = \frac{u'_2 \cdot c'_{u2}}{u_2 \cdot c_{u2}} = \left(\frac{u'_2}{u_2} \right)^2 = \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D'_1}{D_1} \right)^2 \quad (4-50)$$

- نسبة الاستطاعة:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = \gamma \cdot Q \cdot H \quad , \quad N' = \gamma' \cdot Q' \cdot H'$$

$$\frac{N'}{N} = \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot \left(\frac{Q'}{Q} \right) \cdot \left(\frac{H'}{H} \right) = \frac{\gamma'}{\gamma} \left(\frac{n'}{n} \right)^3 \left(\frac{D'_1}{D_1} \right)^5 \quad (4-51)$$

الاستطاعة في الآلات المتشابهة تتناسب مع نسبة الأقطار مرفوعة إلى القوة الخامسة، ونسبة عدد الدورات مرفوعة للقوة الثالثة.

4-5-3 - قانون النسب الخاصة

إذا عملت مضخة ما بعدد دورات n يكون لها ضاغط H وغزارة Q واستطاعة N ، فإذا تغير عدد دورات هذه المضخة من n إلى n_1 عندها يكون:

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{n_1}{n} \quad , \quad \frac{H_1}{H} = \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 \quad , \quad \frac{N_1}{N} = \left(\frac{n_1}{n} \right)^3 \quad (4-52)$$

وهي قوانين النسب الخاصة التي تبين تغير بارامترات أداء مضخة ما عند تغير عدد دوراتها.

4 - 6 - العدد النوعي للدورات (The specific speed n_s):

هو ذلك العدد من الدورات للمضخة الذي تعطي عنده المضخة ضاغطاً $H = 1 [mH_2O]$ واستطاعة $N = 1 [hp]$ عندها تكون الغزارة $Q = 0,075 [m^3 / s]$ وذلك عند عمل الآلة بالمردود الأعظمي. بالاستفادة من علاقة نسب الغزارات ونسب الضواغط ويفرض أن النموذج يعمل بالعدد النوعي للدورات n_s ولدينا لهذا النموذج القطر الخارجي للدورة D_r فإنه علاقتي نسب الغزارات والضغوط تكتبان كما يلي:

$$\frac{Q}{Q_s} = \frac{n}{n_s} \left(\frac{D}{D_s} \right)^3$$

$$\frac{H}{H_s} = \left(\frac{n}{n_s} \right)^2 \left(\frac{D}{D_s} \right)^2$$

وبما أن $H = 1 [mH_2O]$ و $Q = 0,075 [m^3 / s]$ ويرفع المعادلة الثانية للقوة (3/2) وينقسم المعادلة الأولى على الثانية نحصل على:

وبعد جذر هذه المعادلة:

$$\left(\frac{n_s}{n} \right)^2 = \frac{Q}{0,075 \cdot H^{3/2}}$$

$$n_s = 3,65 \cdot \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (4-53)$$

حيث: n - عدد الدورات في الدقيقة.

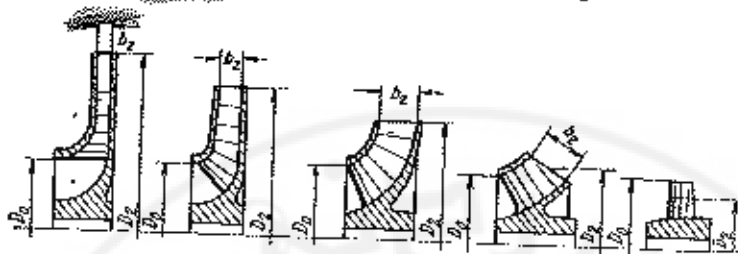
Q - الغزارة وتؤخذ حتماً $[m^3 / s]$.

H - الضاغط ويؤخذ حتماً $[mH_2O]$.

يعد العدد النوعي للدورات n_s مقياس تشابه فإذا امتلكت مضختان نفس n_s وكانت لهما قيم مختلفة للاستطاعة والغزارة والضاغط فإنهما تعدان متشابهتين.

4 - 6 - 1 - استخدام العدد النوعي للدورات n_p عند اختيار آلات الضخ ذات الريش:

يعد العدد النوعي للدورات بارامتراً هاماً يلعب دوراً أساسياً في تسهيل عملية اختيار وحساب الآلة اللازمة للعمل، ولإيضاح ذلك نبين علاقة نوع المضخة بالعدد النوعي للدورات.



D_2/D_1	≈ 2.5	≈ 2	≈ 1.5	≈ 1.2	≈ 0.8
$n_p(r.p.m)$	$40 \div 80$	$80 \div 150$	$150 \div 300$	$300 \div 600$	$600 \div 1200$
	بطيئة الدوران	عادية	سريعة	قطرية	محورية
	غزارات قليلة		دورات		
	مضاطع كبير				

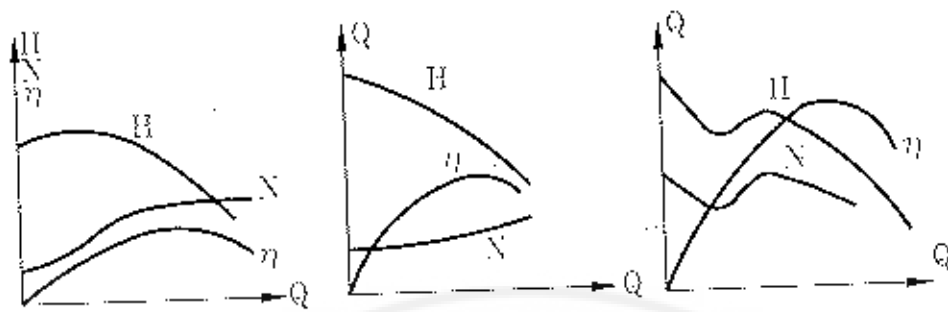
الشكل (4-18) علاقة العدد النوعي للدورات بمواصفات الدواليب العامل

وكما هو واضح من العلاقة الحسابية للعدد النوعي للدورات n_p ، فإن المضخات ذات الأعداد النوعية الكبيرة للدوران تتمتع بغزارة كبيرة وضواغط صغيرة، والمضخات ذات الأعداد النوعية القليلة للدوران تتميز بغزارات قليلة وضواغط كبيرة.

كما أن n_p للآلة المحورية أكبر منه للآلة الطاردة، لأن الآلات المحورية تعطي ضغطاً أقل وغزارات أكبر عند عملها بالشروط نفسها، ويبين الشكل (4-18) ارتباط العدد النوعي للدورات بمواصفات الآلة.

4 - 6 - 2 - علاقة شكل المنحنيات المميزة لآلة الضخ بالعدد النوعي للدورات :

وجدنا في الدراسة السابقة أن المنحنيات المميزة تتعلق بشكل الدواليب الدائر وبنفس الوقت فإن شكل الدواليب الدائر يرتبط بالعدد النوعي للدورات كما رأينا سابقاً وبالتالي يمكن إعطاء شكل المنحنيات المميزة للضواغط H والاستطاعة N والمردود η كتابع للغزارة Q وذلك بالأخذ بالاعتبار قيم n_p العدد النوعي للدورات.



50-100 200-300 500-800
دوران بطيء دوران متوسط دوران سريع

الشكل (4-19) تغير الشكل العام للمنحنيات المميزة للمضخات تبعاً لعدد الدورات

نلاحظ من الشكل (4-19) تغير الشكل العام للمنحنيات المميزة للمضخات الطاردة تبعاً لعدد الدورات النوعي وواضح من هذه المخططات زيادة شدة تناقص الضغوط H مع ازدياد الغزارة عند ازدياد العدد النوعي للدورات في حالة أعداد قليلة ومتوسطة أما في حالة عدد نوعي كبير للدورات فيلاحظ وجود انكسار في المنحني المميز لضغط المضخة. يتأثر المردود بازدياد العدد النوعي للدورات إذ إن تزايد المردود يكون أسرع كلما ازداد العدد النوعي للدورات. كذلك يتأثر منحنى الاستطاعة فعند الدوران البطيء تزداد الاستطاعة مع ازدياد الغزارة وينخفض ازدياد الاستطاعة مع ازدياد الغزارة في حالة أعداد متوسطة للدورات وتنخفض الاستطاعة مع ازدياد الغزارة في المضخات سريعة الدوران نتيجة للانخفاض السريع للضغط مع ازدياد الغزارة.

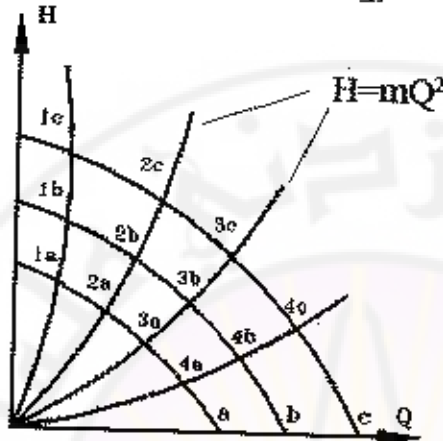
4 - 7 - طرق الانتقال من منحني مميز إلى آخر:

نحصل عادة على المنحنيات المميزة لنموذج محدد يدور بعدد ثابت من الدورات فإذا أردنا الانتقال من هذه المنحنيات المميزة إلى منحنيات مميزة لألة مشابهة لهذا النموذج وتدور بعدد دورات مختلف أو تضخ سائلاً ذا لزوجة مختلفة عن تلك المستخدمة في النموذج فإنه يمكننا الانتقال من المنحني المميز للنموذج إلى المنحني المميز للألة باستخدام قوانين التناسب وحتى نتمكن من هذا الانتقال يجب أن يكون هناك ثبات في نظام عمل الآلة أي أن تتشابه مثلثات السرعة وأن يكون المردود ثابتاً أي :

$$\psi = \text{const} \quad , \quad \eta = \text{const}$$

4 - 7 - 1 - الانتقال من منحنى مميز إلى آخر عند تغيير عدد الدورات:

نفرض أن المنحنى المميز $H = f(Q)$ معطى لمضخة تدور بعدد دورات ثابت n_a والمطلوب رسم المنحنى المميز لهذه المضخة عند دورانها بعدد دورات $n_b > n_a$ بفرض أن المردود η ثابت ولا يتعلق بعدد الدورات.



الشكل (20 - 4) إيجاد المنحنى المميز لضاغط المضخة عند تغير عدد الدورات

يمكن رسم المنحنى المميز المطلوب بالاستفادة من قوانين التناسب:

$$\frac{H_b}{H_a} = \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^2 \quad \frac{Q_b}{Q_a} = \frac{n_b}{n_a}$$

ومنها يمكن استنتاج قيم H_b و Q_b كما يلي :

$$H_b = H_a \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^2 \quad Q_b = Q_a \frac{n_b}{n_a} \quad (4-54)$$

لرسم المنحنى المميز نختار نقطة ما من المنحنى المميز a ونحدد إحداثياتها (Q_{a1}, H_{a1}) ثم نقوم بحساب إحداثيات (Q_{b1}, H_{b1}) عند عدد دورات n_b باستخدام العلاقات رقم (4-54):

$$Q_{b1} = Q_{a1} \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^2, \quad H_{b1} = H_{a1} \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^2$$

ثم نختار نقطة ثانية (2) ونوجد إحداثياتها (Q_{a2}, H_{a2}) ونحسب إحداثيات (Q_{b2}, H_{b2}) ونستمر في هذه العملية حتى نحصل على نقطة ثالثة ورابعة لرسم المنحنى المميز المطلوب كما هو مبين على الشكل (20 - 4).

بالطريقة نفسها يمكن إنشاء المنحني المميز الموافق لعدد دورات n وبالوصل بين النقاط المنشأة اعتماداً على نقطة واحدة من الخطوط المختلفة الموافقة لأعداد دورات مختلف نحصل على منحني بشكل قطع مكافئ يحقق العلاقة :

$$(H = mQ^2) \quad (4-55)$$

والذي يسمى خط منحني التناسب، حيث m ثابت تناسب للمعادلة التربيعية للقطع.
ملاحظات :

1° - أنشئت هذه المنحنيات بفرض أن المردود ثابت و هذا صحيح فقط عندما يكون الضاغط الستاتيكي في الشبكة معنوم .

2° - إن نقاط تقاطع خطوط التناسب مع الخطوط المميزة $H = f(Q)$ عند أعداد دورات مختلفة تحدد بارامترات الآلة (H, Q) عند انتقالها من نظام عمل إلى آخر .

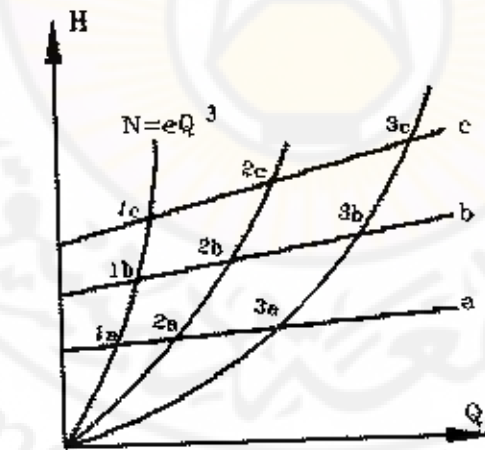
3° - تحدد منحنيات الاستطاعة $N = f(Q)$ عند تغير عدد الدورات بالطريقة نفسها كما هو موضح في الشكل (4-21) باستخدام علاقات التناسب :

$$Q_b = Q_a \left(\frac{n_b}{n_a} \right) \quad N_b = N_a \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^3$$

أما منحنيات الاستطاعة فتمثلها علاقة من الشكل :

$$(N = eQ^3)$$

(4-56)



الشكل (4-21) تحديد منحنيات الاستطاعة عند تغير عدد الدورات

4 - 7 - 2 - الانتقال من منحني مميز إلى آخر عند تغيير قطر الدوارة

إذا كان لدينا آلتان متشابهتان ، وتعملان بنفس عدد الدورات ، وكان للآلة الأولى القطر D وللثانية القطر D' فإن نسبة غزارة الأولى إلى الثانية تعطى بالعلاقة :

$$\frac{Q}{Q'} = \left(\frac{D}{D'} \right)^3$$

أما الضغوط فإنها تخضع للعلاقة :

$$\frac{P}{P'} = \left(\frac{D}{D'} \right)^2$$

بينما تخضع الاستطاعات للعلاقة :

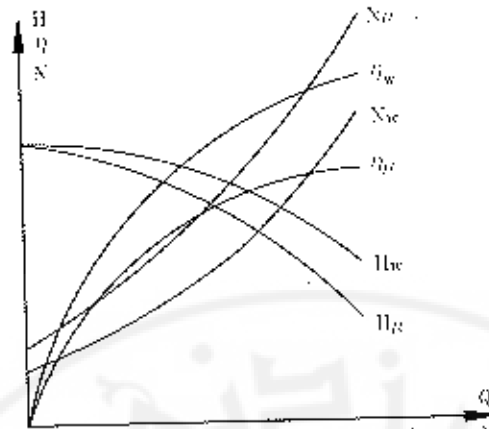
$$\frac{N}{N'} = \left(\frac{D}{D'} \right)^5$$

بمساعدة هذه النسب يتم الانتقال من منحني مميز إلى آخر عند تغيير قطر الدوارة وثبات عدد الدورات، ويتم ذلك بطريقة مشابهة للانتقال من منحني مميز إلى آخر عند تغيير عدد الدورات لمضخة ما.

4 - 7 - 3 - تأثير لزوجة السائل على البارامترات الأساسية للمضخة

تجرب المضخات الخارجية من المصانع عادة باستخدام الماء بدرجة حرارة لا تزيد عن $30^\circ C$ وكثافة $\rho = 988 [kg/m^3]$ ، ولكن المضخات تستخدم في الصناعة في ظروف تختلف عن ظروف التجربة ، كما أن المضخة يمكن أن تستخدم لضخ سوائل ذات لزوجة مختلفة عن لزوجة الماء كأن تضخ الزيوت النباتية أو المعدنية ، النفط ، المحاليل ... الخ. وفي هذه الحالة تصبح الخطوط المميزة التي وضعها المصنع غير صالحة للاستعمال ويجب حساب الخطوط المميزة على اللزوجة المستخدمة فعلاً . تؤثر اللزوجة في المقاومة الهيدروليكية إذ تزداد المقامات الهيدروليكية بزيادة اللزوجة ، نتيجة لزيادة المقاومة فإن الغزارة والضغوط والمردود تنقص بزيادة اللزوجة بينما تزداد الاستطاعة اللازمة لإنجاز البارامترات نفسها .

إن الحساب النظري لتأثير اللزوجة على البارامترات الأساسية وشكل المنحنيات المميزة معقد وصعب، لذلك فلحساب تأثير اللزوجة على هذه البارامترات نستخدم معاملات تصحيح يتم الحصول عليها بشكل تجريبي .



الشكل (4-22) تأثير تغير اللزوجة على المنحنيات المميزة للمضخة

تعطى قيم هذه المعاملات بجدول خاصة تجريبية وهي تتحدد من الخواص التصميمية للآلة ومن نظام تحميل الآلة ولزوجة السائل ، ويتم استخدام هذه المعاملات كما يلي :

نرمز للبارامترات الخاصة بعمل الآلة على الماء بالذالة (w) والبارامترات الخاصة بعمل الآلة على سائل لزوجته أكبر من لزوجة الماء بالذالة (μ)

فيكون : $N_{\mu} > N_w$ ، $\eta_{\mu} < \eta_w$ ، $H_{\mu} < H_w$ ، $Q_{\mu} < Q_w$ ، فإذا رمزنا لتوابعت تصحيح

الضغط والغزارة والمردود والاستطاعة بالرموز : f_N ، f_{η} ، f_Q ، f_H

عندها يكون : $\eta_{\mu} = f_{\eta} \cdot \eta_w$ ، $Q_{\mu} = f_Q \cdot Q_w$ ، $H_{\mu} = f_H \cdot H_w$ ،

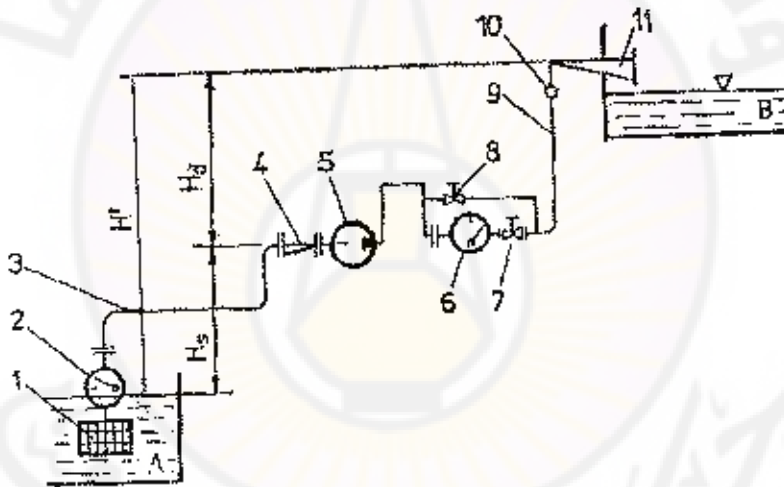
الشكل (4-22) ، $N_{\mu} = f_N \cdot N_w$



الفصل الخامس

عمل المضخات في منظومات الضخ Pumps Work In Pumping Systems

تعمل آلات الضخ الطاردة غالباً في منظومات شبكات محددة ، على الرغم من وجود بعض الاستثناءات (مثلاً مروحة تعمل على تحريك هواء الغرفة) ففي هذه الحالة تثبت الآلة على عمود داخل الغرفة أو في أحد جدرانها .
عند استخدام المضخات في الشبكات فإننا نستخدم عدداً من العناصر الضرورية في هذه الشبكة . ويمثل الشكل (5-1) الحالة الأكثر شمولاً لهذه العناصر حيث :



الشكل (5-1) مخطط يبين عمل مضخة في شبكة مع التجهيزات الملحقة

- 1- فلتتر : مركب عند مدخل أنبوب السحب يعمل على تنظيف المسائل من الشوائب الميكانيكية (رمل - وحل) عند دخوله إلى الشبكة .
- 2- صمام عدم رجوع : يعمل على عدم رجوع الماء من المضخة إلى خزان السحب A ، مما يحافظ عليها مملوءة عند التوقف عن العمل أو عند إعادة ملئها بالماء للتشغيل .

كما يمكن إضافة مضخة أخرى إلى المضخة بأقل فواقد هيدروليكية ممكنة .

- 4- نقاصة : تعمل على تحقيق استقرار التيار قبل دخوله إلى المضخة .
- 5- مضخة : تعمل على تقديم طاقة للسائل (رفع طاقة السائل) .
- 6- صمام عدم رجوع : يمنع عودة السائل في أنبوب الدفع بالاتجاه المعاكس وبالتالي فإنه يحمي المضخة وجزء السحب من أثر الضغوط العالية المطبقة في جزء الدفع من الشبكة .
- 7- سكر حازوني : يعمل على إغلاق أنبوب الدفع وفتحه عند تشغيل المضخة كما يستخدم في الكثير من الحالات للتحكم بالتدفق المار عبر الشبكة . (يمكن أن تستخدم أنواع مختلفة من السكورة) .
- 8- أنبوب لإعادة ملء المضخة بالماء عند إعادة تشغيلها ، حيث يؤخذ الماء من أنبوب الدفع ، كما يعمل هذا الأنبوب أيضا على موازنة الضغط على طرفي السكر .
- 9- أنبوب الدفع : يعمل على إيصال الماء إلى خزان الضخ B ، بأقل فواقد هيدروليكية ممكنة .
- 10- جهاز لقياس التدفق : يعمل على قياس التدفق المرسل من المضخة إلى الخزان ، غالبا عداد مياه أو أداة مشابهة .
- 11- ناشرة : تعمل على تحويل جزء من الطاقة الحركية للسائل إلى طاقة كامنة عند خروج السائل من أنبوب الدفع إلى الخزان وبالتالي يعمل على تقليل الضياعات التي يمكن أن تنشأ عن السرعات العالية الغير مفيدة .
- في الحياة العملية وعند تنفيذ الشبكات يمكن الاستغناء عن بعض هذه العناصر .
- عندما يكون المنحني المميز للمضخة معلوماً وتتوفر شروط استخدام هذه المضخة للعمل في شبكة ما لتقدم ضاغطة محدداً (كرفع سائل بفرق ارتفاع جغرافي محدد) الشكل (1-5) وبأبعاد محددة للشبكة في هذه الحالة يجب دراسة حالة العمل المشترك المضخة مع الشبكة من خلال منحنياتها المميزة ويمثل المنحني المميز للشبكة علاقة الضياعات المختلفة في الشبكة كتابع للغرارة إضافة إلى مقدار فرق الطاقة الكامنة لهذا السائل بين بداية الشبكة ونهايتها.

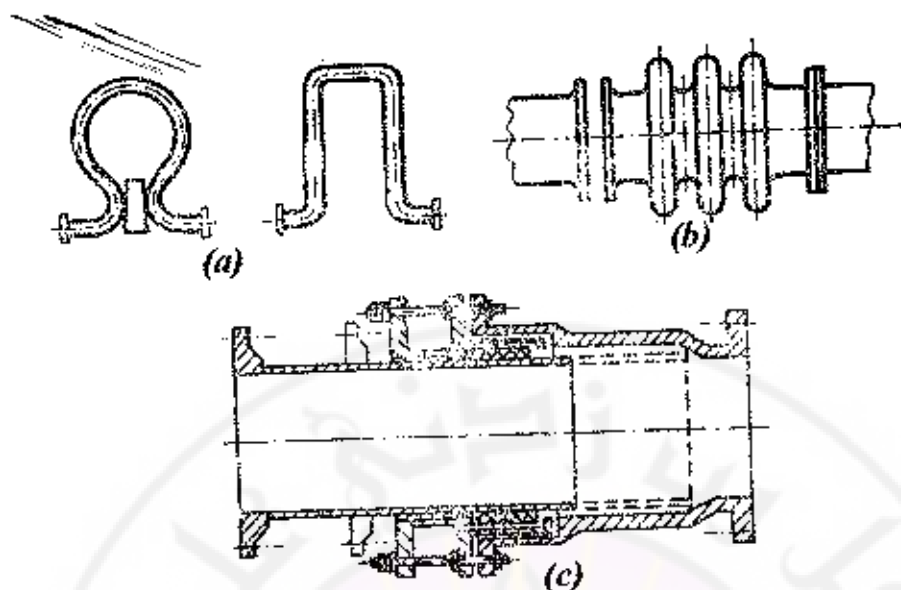
5-1 - أنابيب النقل وتجهيزاتها :

تمثل أنابيب النقل منظومات منسجمة من الأنابيب المخصصة لنقل الموائع والغازات والأجسام المسائلة ، تصنف هذه المنظومات بحسب أهميتها الاستثمارية بالنسبة للبلد والغاية من استخدامها إلى :

- منظومات وطنية : تمتد على كامل أراضي البلد (خطوط نقل الغاز والنفط والماء)
 - ضمن المدن : منظومات نقل الماء والغاز وشبكات التدفئة وشبكات الصرف الصحي والتي تخدم المدينة .
 - الشبكات التكنولوجية : تستخدم في المنشآت الصناعية والسفن والنقل ومنشآت الطاقة وغيرها .
- كما يحدد الهدف من الأنابيب حسب نوع السائل المنقول : أنابيب نقل المياه وأنابيب نقل الزيوت ، وأنابيب نقل البنزين وغيرها ويمكن أن تصنف الأنابيب حسب الضغط المطبق عليها :
- تخلخلية : تعمل من أجل ضغوط أقل من الضغط الجوي مثل أنابيب المسحب في مجموعات الضخ التي تستخدم المضخات الأفقية (ذات ارتفاع تثبيت موجب) .
 - مخصصة لضغوط منخفضة حتى $1,5 [MPa]$.
 - مخصصة لضغوط متوسطة من $1,5 \div 10 [MPa]$.
 - مخصصة لضغوط كبيرة أكبر من $40 [MPa]$.
- تعد أنابيب النقل التكنولوجية بارتفاعها كانت درجة حرارة السائل أقل من $50^\circ C$ ، أما إذا كانت درجة حرارة السائل المنقول أكبر من $50^\circ C$ فإنها تعد حارة .
- تمثل درجة قساوة السائل المنقول عنصرا يتم على أساسه تصنيف أنابيب النقل كالتالي :
- أنابيب مخصصة لنقل السوائل غير القاسية (سرعة التآكل تصل حتى $0,1 [mm / year]$) .
 - أنابيب مخصصة لنقل السوائل متوسطة القساوة (سرعة التآكل محدودة $0,1 \div 0,5 [mm / year]$) .
 - أنابيب مخصصة لنقل السوائل عالية القساوة (سرعة التآكل أكبر من $0,5 [mm / year]$) .

5-1-1 - المتطلبات الأساسية الواجب توفرها في أنابيب النقل المستخدمة في العمليات التكنولوجية :

- أ- أن تمتلك المواصفات الميكانيكية اللازمة والملائمة لشروط العمل من ضغط ودرجة حرارة السائل المنقول .
 - ب- الثبات بمواجهة تأثير قساوة السائل والحفاظ على المواصفات خلال كامل فترة الاستثمار .
 - ت- أن تكون ذات ضياعات هيدروليكية قليلة وذات إجهادات حرارية مهمة .
 - ث- وثوقية وأمان وراحة أثناء الاستثمار .
 - ج- ذات سعر قليل واقتصادية أثناء الاستثمار .
- تصنع أنابيب النقل من مواد عدة فمنها الحديدية والفولاذية والنحاسية و من الألمنيوم والسيراميكية والبلاستيكية والمطاطية ، ويحدد معدن الأنبوب ومادته حسب الهدف من الاستخدام .
- يتم وصل الأنابيب إلى بعضها أو إلى الآلات أو إلى تجهيزاتها بوصلات ثابتة غير قابلة للفك (باستخدام اللحام) أو بوصلات متغيرة يمكن فكها كالفلنشات وحلقات شد - وصل أو بالتعشيق بالأسنان مباشرة (من أجل أنابيب ذات أقطار تصل حتى $75 [mm]$) .
- عند تغير درجة حرارة السائل المنقول تتغير أطوال الأنابيب المعدنية الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى تشوه غير محمود في الأنابيب وتشوه في التوافقية العامة في الشبكة . لهذا فإن أنابيب النقل المستخدمة في شبكات خاضعة لمثل هذا التأثير تزود بوصلات انزلاقية أو انضغاطية كما تستخدم في بعض الحالات أجهزة خاصة تدعى المعدلات (توازن التشوهات الحرارية) . يبين الشكل (5-2-a) موازنات يتم الحصول عليها من خلال تشي الأنبوب بشكل مناسب أما الشكل (5-2-b) فيبين استخدام عنصر من خاص ويظهر الشكل (5-2-c) معدلا معددا خاصا بهم عند كون تغيرات الأطوال واضحة ، وتؤمن الوثوقية في هذا النوع من المعدلات باستخدام جوان حلقى خاص .
- عندما يكون الحفاظ على درجة حرارة السائل المنقول ضروريا يطلى الأنبوب بطبقة من مادة عازلة تعمل على تقليل التبادل الحراري مع الجدران.



الشكل (2-5) بعض أنواع المعدلات المستخدمة للتغلب على تأثير التمددات الحرارية

توضع إشارات خاصة فوق الأنابيب التي تستخدم لنقل سوائل خطيرة على صحة الأشخاص وتكون الإشارات بخطوط ذات ألوان محدودة تعبر عن الخطورة : الأحمر من أجل الغازات والسوائل سريعة الاشتعال 0 الأصفر من أجل السوائل والمواد المشعة والمادة 0 الأخضر للسوائل والغازات غير الضارة 0

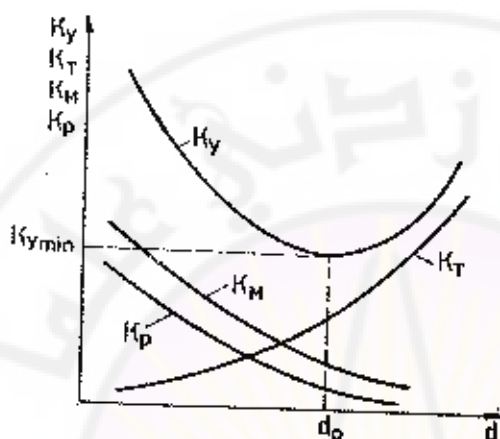
ينتمن الحساب الهيدروليكي لأنابيب النقل تحديد أقطار الأنابيب في المقاطع المختلفة ومخطط توضعاتها بهدف الحصول على الحد الأدنى من الضياعات الهيدروليكية في الأنابيب وبالتوافق مع ما ذكر في الفصل الأول (1 - 4 - 1) يمكن الوصول إلى ذلك من خلال زيادة الأقطار وتقليل قيم معاملات الفقد الطولي والمقاومات المكانية (1-15) و (1-16) من أجل ذلك يجب الأخذ بعين الاعتبار أن أقطار الأنابيب d تمثل العامل الأشد تأثيراً على قيم الضياعات الهيدروليكية عموماً وفي الوقت نفسه وفي الجهة الأخرى فإن زيادة أقطار الأنابيب ستؤدي إلى زيادة كتلتها وزيادة أسعارها لذلك ولحل هذه المشكلة يجب إجراء تحليل اقتصادي تكنولوجي بهدف تحديد القيمة الدنيا لمعامل الاستهلاك السنوي للمنظومة K_p ، حيث :

$$K_Y = K_T + K_M + K_P \quad (5-1)$$

حيث : K_T النفقات الاستثمارية السنوية للأنابيب .

K_{st} النفقات الاستثمارية السنوية للآلات (مضخة ، ضاغط ، مروحة ،) حيث تتناقص الاستطاعة اللازمة بزيادة القطر d بسبب نقصان الضياعات الهيدروليكية

K_p نفقات استهلاك الطاقة في المنشأة (محركات ، بطاقة كهربائية لمحركات الإدارة ، صيانة ، مواد تزييت ، وغيرها) وهي تتناسب مع استطاعة الآلة إلى حد بعيد .



الشكل (3-5) تغير الاستهلاك السنوي لمحطة ضخ كتابع لقطر الأنبوب

يمثل الشكل (3-5) تغير الاستهلاك السنوي كتابع لقطر الأنبوب لمحطة ضخ ، وعند اختيار قطر الأنبوب يجب مراعاة الأقطار القياسية للأنابيب. ويجب أن يؤخذ القطر الموافق لـ K_{rmin} عند اختيار أقطار الأنابيب يمكن اعتماد بعض القيم التوجيهية (كتقريب أولي) حسب العلاقة:

$$d = (0,8 + 0,2) Q^{0,42} \quad (5-2)$$

ومن أجل أنابيب ذوات أقطار $d < 100 [mm]$ ينصح على قيم محددة للسرعة العظمى التي تساعد بدورها في حساب قطر الأنبوب باستخدام معادلة الاستهلاك:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (5-3)$$

في محطات ضخ الماء التي تستخدم آلات ضخ طاردة ينصح أن تكون سرعة السريان في قسم السحب $v = 1 + 1,5 [m/s]$ وفي قسم الضخ $v = 3 + 3,5 [m/s]$.

يتطلب الحساب الدقيق لشبكة الأنابيب تحديد أبعاد ومواصفات تجهيزات الوصل المستخدمة لجمع الأنابيب (غالباً الفتشحات) وتحديد سماكات جدرانها ولهذه الغاية من الضروري أن يكون معلوما ضغط السائل المنقول ومخطط التحميل وبالتالي القوى والعزوم المؤثرة في الأنابيب .
تحدد سماكة جدار الأنبوب بالعلاقة :

$$\delta = \frac{d}{200 \sigma_x + p} + \delta_K \quad (5-4)$$

حيث : d قطر الأنبوب .

σ_x [MPa] إجهاد الشد المسموح به . و تعتمد قيمته على نوع المعدن وعلى شروط وطريقة التشغيل .

p [MPa] الضغط .

δ_K قيمة تأخذ بالحسبان سرعة الحث (التآكل) من الأنبوب ، وهي تعتمد على نوع الأنبوب وغالباً تنحصر قيمتها في المجال : $\delta_K = 0,5 + 2$ [mm] .

يمثل الضغط الشرطي P_v بارامتراً مهماً لكل أنبوب ، وهو يمثل الضغط العامل الأعظمي المسموح به داخل الأنبوب .

5- 1- 2 - تجهيزات الشبكات :

تمثل تجهيزات الشبكات مجموعة العناصر التي تتركب على الشبكة بهدف إغلاقها أو توزيع وتنظيم ومزج السوائل والغازات التي تنقل بهذه الشبكة .

بمساعدة التجهيزات الخاصة ومن خلال تغيير تدفق الجريان يتم تأمين تنظيم البارامترات المختلفة في العمليات التكنولوجية: الضغط ، ودرجة الحرارة ، وتركيز المكونات ، وغيرها .

تصنف للتجهيزات بحسب الغاية المستخدمة لأجلها إلى المجموعات الرئيسية التالية :

- تجهيزات الإغلاق : وتخصص للإغلاق الكامل للشبكة وتمثل % 80 من التجهيزات المستخدمة في الشبكات .

- تجهيزات التنظيم : وتستخدم لتنظيم البارامترات في العمليات التكنولوجية من خلال تغيير التدفق . تنضم إلى هذه المجموعة منظمات الضغط ومنظمات مستوى السائل وغيرها .

- تجهيزات التوزيع والمزج وتخصص لتوزيع السائل باتجاهات محددة .

- تجهيزات الحماية : وتخصص لحماية المنظومة من زيادة الضغط عن القيم المحددة ، لهذه الغاية تتركب صمامات حماية .

- تجهيزات دفاعية : وتخصص لحماية الأنابيب والآلات من تغيرات البارامترات التكنولوجية المفاجئة (حالات الطوارئ) . تعمل عناصر هذا النوع من التجهيزات في حالات الطوارئ على فصل جزء محدد من النظام . تنضم إلى هذه المجموعة صمامات الحماية العكسية وكذلك المكورة ذات رد الفعل السريع.
- تجهيزات فصل الكتل والأطوار : وتستخدم للفصل الآلي للغازات عن السوائل استنادا إلى حالتها .

5 - 2 - المنحني المميز للشبكة وتحديد نقطة التشغيل :

هو المنحني الذي يمثل تغير فاقد الضغط في الشبكة كتابع للغزارة، ولتحديد هذا المنحني يجب أن توجد علاقة فاقد الضغط (الضاغط) بالغزارة، لهذه الغاية نقوم بتجزئة الشبكة إلى ثلاثة أجزاء:

1 - قسم السحب (خط السحب) .

2 - المضخة.

3 - قسم الدفع (أنبوب الضخ) .

في قسمي السحب والدفع تحدث فرواقد الضغط بجميع أشكالها أما في المضخة فيكتسب السائل الطاقة التي يتغلب فيها على فرواقد الضغط في الشبكة. إذا فاقد الضغط الكلي في كامل الشبكة يساوي إلى مجموع فاقد الضغط في قسم السحب وفي قسم الدفع وبالاستفادة من الرسم التوضيحي (4-5) يكون لدينا :

- فاقد الضغط في قسم السحب:

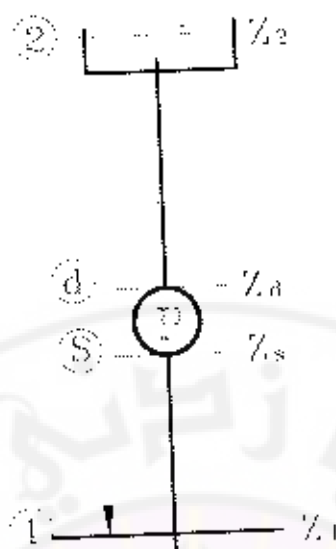
لتحديد هبوط الضغط في قسم السحب نطبق معادلة برنولي بين السطح (1) ومقطع الدخول إلى المضخة (s) نستخدم الدالة 1 للبارامترات عند السطح (1) و s عند المقطع (s):

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\gamma} + Z_s + \frac{v_s^2}{2g} + \Delta h_s \quad (5-5)$$

$$\frac{P_1 - P_s}{\gamma} = \frac{v_s^2 - v_1^2}{2g} + (Z_s - Z_1) + \Delta h_s \quad (5-6)$$

المعادلة (5-6) تبين فاقد الضغط في أنبوب السحب .

حيث : Δh_s مجموع فرواقد الاحتكاك والفواقد المكانية في أنبوب السحب.



الشكل (4-5) مخطط توضيحي

أما فاقد الضغط في أنبوب الدفع فنحصل عليه بتطبيق معادلة برنولي بين المقطع (d) والمستوي (2):

$$\frac{P_d}{\gamma} + Z_d + \frac{v_d^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_d \quad (5-7)$$

$$\frac{P_1 - P_s}{\gamma} = \frac{v_s^2 - v_1^2}{2g} + (Z_s - Z_1) + \Delta h_s \quad (5-8)$$

المعادلة (5-8) تمثل فاقد الضغط في أنبوب الدفع حيث Δh_d مجموع فواقد الاحتكاك و الفواقد المكانية في أنبوب الدفع.

وبالتالي يكون فاقد الضغط الكلي في الشبكة عبارة عن مجموع (5-6) و (5-8):

$$\frac{P_1 - P_s}{\gamma} + \frac{P_d - P_2}{\gamma} = \frac{V_s^2 - V_1^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_d^2}{2g} + (Z_s - Z_1) + (Z_2 - Z_d) + \Delta h_s + \Delta h_d \quad (5-9)$$

تمثل المعادلة (5-9) هبوط الضغط الكلي في كامل الشبكة. ولترتيب هذه المعادلة نقوم بعزل البارامترات الخاصة ببداية الشبكة ونهايتها في طرف والبارامترات الأخرى ضمن الشبكة في الطرف الآخر فتأخذ المعادلة (5-9) الشكل:

$$\frac{P_d - P_s}{\gamma} + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} + (Z_d - Z_s) = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + \Delta h_s + \Delta h_d \quad (5-10)$$

يمثل الطرف الأول من المعادلة (5-10) الطاقة التي يكتسبها السائل أثناء مروره في المضخة وهي الطاقة التي تبذل لتغطية كافة العناصر في الطرف الثاني ونسميها ضاغط الشبكة (يساوي ضاغط المضخة) h :

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + \Delta h_s + \Delta h_d \quad (5-11)$$

من المعادلة (5-11) نلاحظ أن ضاغط الشبكة يتألف من مركبتين:

أ - المركبة الهيدروستاتيكية h_{st} :

$$h_{st} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) \quad (5-12)$$

وهذه المركبة ثابتة بالنسبة لشبكة ما محددة ولا تتغير بتغير غزارة الجريان في الشبكة.

ب - المركبة الهيدروديناميكية h_{dyn} :

$$h_{dyn} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \Delta h_s + \Delta h_d \quad (5-13)$$

وهذه المركبة تتغير قيمتها مع تغير قيمة سرعة الجريان في الشبكة أي أنها تتغير بتغير الغزارة ولذلك يجب أن نوجد علاقتها بالغزارة:

$$Q = V \cdot A \Rightarrow V = \frac{Q}{A} \quad (5-14)$$

يعطى مجموع الفواقد في أنبوب المسحب Δh_s بالعلاقة:

$$\begin{aligned} \Delta h_s &= \sum h_{rs} + \sum h_{ks} \\ \sum h_{rs} &= \sum \frac{\lambda_s \cdot l_s}{d_s} \cdot \frac{V_s^2}{2g} = \sum \frac{\lambda_s \cdot l_s}{d_s} \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A_s^2} \\ \sum h_{rs} &= Q^2 \sum \frac{\lambda_s \cdot l_s}{d_s} \cdot \frac{1}{2g \cdot A_s^2} \\ \sum h_{rs} &= \sum K_s \cdot \frac{V_s^2}{2g} = \sum K_s \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A_s^2} \end{aligned} \quad (5-15)$$

$$\sum h_{rs} = Q^2 \sum \frac{K_s}{2g \cdot A_s^2} \quad (5-16)$$

بالطريقة نفسها نوجد فواقد الاحتكاك في أنبوب الدفع:

$$\sum h_{rd} = Q^2 \sum \frac{\lambda_d \cdot l_d}{d_d} \cdot \frac{1}{2g \cdot A_d^2} \quad (5-17)$$

وكذلك الفواقد المكانية في أنبوب الدفع:

$$\sum h_{rd} = Q^2 \sum \frac{K_d}{2g \cdot A_d^2} \quad (5-18)$$

أما فرق ارتفاع السرعة فيصبح:

$$\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \cdot A_2^2} - \frac{Q^2}{2g \cdot A_1^2} = Q^2 \left(\frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \right) \quad (5-19)$$

بتعويض المعادلات من (5-15) إلى (5-19) في المعادلة (5-13) تصبح:

$$h_{dyn} = Q^2 \left(\frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \right) + Q^2 \sum \frac{\lambda_s \cdot l_s}{2g \cdot d_s \cdot A_s^2} + Q^2 \sum \frac{K_s}{2g \cdot A_s^2} + Q^2 \sum \frac{\lambda_d \cdot l_d}{2g \cdot d_d \cdot A_d^2} + Q^2 \sum \frac{K_d}{2g \cdot A_d^2} \quad (5-20)$$

$$h_{dyn} = Q^2 \left[\left(\frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \right) + \sum \frac{\lambda_s \cdot l_s}{2g \cdot d_s \cdot A_s^2} + \sum \frac{K_s}{2g \cdot A_s^2} + \sum \frac{\lambda_d \cdot l_d}{2g \cdot d_d \cdot A_d^2} + \sum \frac{K_d}{2g \cdot A_d^2} \right] \quad (5-21)$$

الحد ضمن القوسين في المعادلة (5-21) هو عبارة عن ثابت بالنسبة لشبكة ما محددة يتعلق بالمواصفات الهندسية لهذه الشبكة و مواصفات الجريان ضمنها.

$$h_{dyn} = a \cdot Q^2 \quad (5-22)$$

وبما أن الضغط المتأثري بالنسبة للشبكة يبقى ثابتاً أي:

$$h_{st} = e \quad (5-23)$$

يمكن كتابة علاقة ضاغط الشبكة الكلي كتابع للغزارة بالشكل:

$$h = e + a \cdot Q^2 \quad (5-24)$$

5 - 2 - 1 - التمثيل البياني للمنحني المميز للشبكة :

عند التمثيل البياني للمنحني المميز للشبكة لدينا حالتان كما هو مبين على الشكل (5 - 5) :

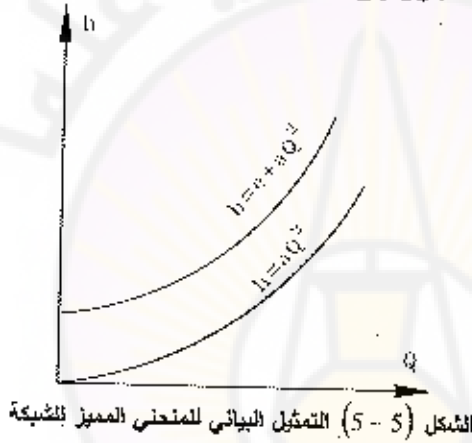
1 - المركبة الهيدروستاتيكية معدومة :

$$P_1 = P_2, \quad Z_1 = Z_2, \quad h_{st} = 0$$

وبالتالي فإن علاقة ضاغط الشبكة بالغزارة تأخذ الشكل: $h = a.Q^2$ وهي معادلة قطع مكافئ يمر من مبدأ الإحداثيات ومحوره ينطبق على المحور الشاقولي.

2 - في حالة وجود مركبة هيدروستاتيكية: $h = e + a.Q^2$

وهي معادلة قطع مكافئ يمر من النقطة $(0, e)$ ومحوره ينطبق على المحور الشاقولي أي أن المنحني المميز في الحالة أ ينزلق إلى الأعلى بمقدار (e) .



5 - 2 - 2 - تحميل المنحنيات المميزة وتحديد نقطة تشغيل الآلة :

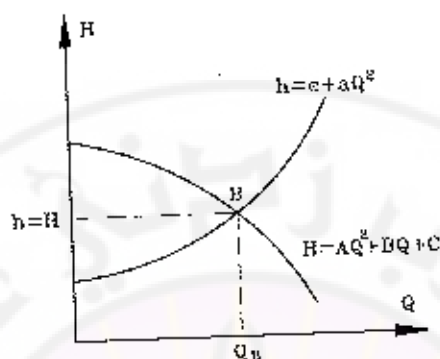
عند دراسة المنحنيات المميزة الفعلية للمضخات الطاردة أوجدنا علاقة الضاغط الفعلي للمضخة بالغزارة عند ثبات عدد الدورات وهي من الشكل:

$$H = A.Q^2 + B.Q + C$$

حيث A, B, C ثوابت تتعلق بالمواصفات الهندسية للدوارة وبعدها الدورات. كما أوجدنا في الفقرة السابقة علاقة المنحني المميزة للشبكة وهي من الشكل:

$$h = e + a.Q^2$$

نقوم بالتمثيل البياني لهاتين العلاقتين على مخطط واحد كما هو مبين في الشكل (5-6) مع مراعاة أن تكون مقاييس التمثيل للمنحنيين واحدة، تسمى نقطة تقاطع المنحنيين $(H-Q)$ و $(h-Q)$ نقطة عمل الآلة أو نقطة التشغيل وهي النقطة



الشكل (5-6) إيجاد نقطة التشغيل

التي تكون فيها الغزارة التي تضخها الآلة هي نفس الغزارة في الشبكة وعندها تولد الآلة ضغطاً مساوياً إلى هبوط الضغط في الشبكة، أي:

$$H = h \quad Q = \text{const}$$

بعد تحديد قيمة الغزارة وضغوط المضخة يمكننا تحديد مردود الآلة واستطاعتها باستخدام المنحنيات المميزة (الغير كاملة) كل على حدة أو (الكاملة) كما في الشكل (5-7):
كما يمكن إيجاد بارامترات نقطة التشغيل تحليلياً بالحل المشترك لجملة المعادلتين:

$$H = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C$$

$$h = e + a \cdot Q^2$$

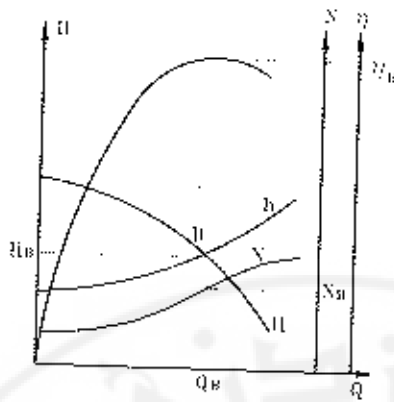
$$H_B = h_B$$

$$a Q_B^2 + e = A Q_B^2 + B Q_B + C$$

$$(A - a) Q_B^2 + B Q_B + (C - e) = 0$$

$$\Delta = B^2 - 4(A - a)(C - e)$$

$$Q_B = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2(A - a)}$$



الشكل (5-7) تحديد البارامترات المختلفة لعمل الآلة باستخدام المنحنيات المميزة الكاملة

ثم نحسب الضاغط بتعويض قيمة Q_N في إحدى المعادلتين $H = f(Q)$ أو $h = f_1(Q)$.

5-3 - العوامل المؤثرة في المنحني المميز للشبكة ونقطة التشغيل

في الواقع العملي هناك الكثير من العوامل التي تؤثر في المنحني المميز للشبكة (أو على فواقد الجريان للشبكة) كما أن تغيير مواصفات الآلة أو السائل يؤدي إلى تغيير المنحني المميز للآلة مما يؤدي إلى انحراف نقطة التشغيل. من هذه العوامل:

أ- انقطاع الشبكة أو اختناقها:

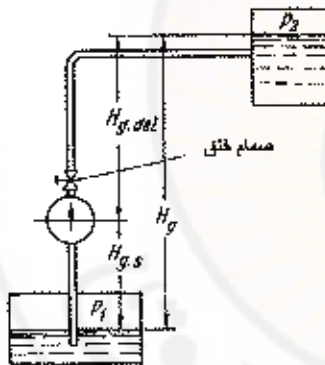
لكن لدينا آلة ضخ طاردة تعمل على شبكة ضخ كالمبينة في الشكل (5-8)، يبين الشكل (5-9) منحنيات الضاغط والاستطاعة والمردود للمضخة الطاردة المركزية عند عملها بعدد دورات ثابت $n = const$ وعلى الشكل نفسه يبين المنحني المميز للشبكة عندما يكون صمام الخنق مفتوحاً تماماً.

يكون عمل الآلة مستقرًا عندما تقدم ضاغطاً مساوياً للضاغط اللازم للتغلب على فواقد الشبكة وبالتالي فإن نقطة التشغيل التي تعمل عندها الآلة في هذه الحالة هي النقطة (a) حيث يتقاطع المنحنيان المميزان للآلة والشبكة، أي أن الآلة ستضخ الغزارة Q بضغط H واستطاعة N ومردود η عندما يكون صمام الخنق مفتوحاً تماماً كما هو مبين في الشكل (5-9)، إذا قمنا بخنق الشبكة عن طريق إغلاق صمام الخنق جزئياً (قليلاً) فإن هذا سيؤدي إلى زيادة المقاومة الهيدروليكية للشبكة وبالتالي فإن المنحني المميز لها سيزداد تفعراً بينما يحافظ المنحني المميز للآلة على وضعه أي أن نقطة التشغيل ستزلق على المنحني

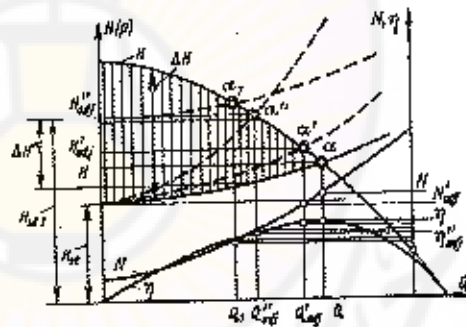
المميز للآلة حتى النقطة (a') ولذلك فإن بارامترات عمل الآلة ستتغير عندها لتأخذ القيم Q'_{adj} ، H'_{adj} ، N'_{adj} ، η'_{adj} وإذا زدنا إغلاق الصمام فسيزداد تغير المنحني المميز للشبكة وتنتقل نقطة التشغيل إلى النقطة (a'') أي أن الآلة ستعمل عند البارامترات Q''_{adj} ، H''_{adj} ، N''_{adj} ، η''_{adj} نلاحظ أن الغزارة المضخوخة تكون أعظمية عندما يكون صمام الخنق مفتوحاً تماماً وتنقص عند إغلاق الصمام إذاً فإن هذا الصمام يستخدم للتحكم بالغزارة وتنظيمها ، وواضح من الشكل أيضاً أن إغلاق الصمام يؤدي إلى زيادة الضاغط الذي يقدمه الآلة .

إذا ازداد الضغط المطبق في الخزان العلوي p_2 ، هذا يعني أن المركبة الهيدروستاتيكية للمنحني المميز للشبكة ستصبح H_{ST1} بدلاً من H_{ST} في الحالة الأولى أي أن المنحني المميز للشبكة سينزلق إلى أعلى بمقدار الفرق بين المركبتين الهيدروستاتيتين وفي هذه الحالة فإن نقطة التشغيل تنتقل إلى النقطة (a₁) وستعمل الآلة على ضخ السائل بالبارامترات Q_1 ، H_1 ، N_1 ، η_1 .

إن اقتطاع جزء من الشبكة أو تقليل الفوائد فيها سيؤثر في نقطة التشغيل بشكل معاكس لما ذكر أعلاه .



الشكل (8-5) مخطط آلة ضخ تعمل على شبكة .



الشكل (9-5) تأثير الضواغط الميكانيكية .

ب - تأثير عدم الدقة في حساب الشبكة :

إن عدم الدقة في حساب الشبكة يؤدي إلى عدم تطابق المنحني المميز الفعلي للشبكة مع المنحني المميز الحسابي ، فإذا كان الفاقد الفعلي في الشبكة أكبر من الفاقد الحسابي عندها فإن المنحني المميز الفعلي سيقع أعلى من المنحني المميز الحسابي أما إذا كان الفاقد المحسوب

أكبر من الفاقد الفعلي فإن المنحني المميز الحسابي سوف يقع فوق المنحني المميز الفعلي لهذه الشبكة.

ج - تأثير الإحكام السيئ للشبكة:

يؤدي الإحكام السيئ للشبكة إلى تسرب السائل من الشبكة إلى خارجها، أو العكس من خارج الشبكة إلى داخلها. فإذا تسرب السائل إلى داخل الشبكة فإن الغزارة ستزداد مما يؤدي إلى زيادة الفواقد عن قيمتها الحسابية وبالتالي انزياح المنحني المميز للشبكة نحو اليمين، أما عند تسرب السائل إلى خارج الشبكة فإن الغزارة وبالتالي السرعة ستقلصان وستقلص قيمة الفواقد في الشبكة عن قيمتها الحسابية مما يؤدي إلى انفراج المنحني المميز الفعلي نحو اليسار عن المنحني المميز الحسابي للشبكة.

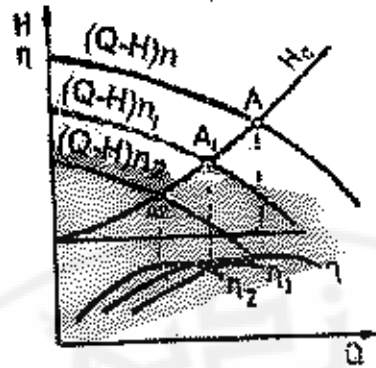
د - تأثير الشوائب الميكانيكية:

عند نقل السائل شوائب ميكانيكية فإن مقاومة الشبكة تزداد عنها في حالة ضخ سائل نقي، كما أن الفواقد في المضخة ستزداد مما يؤدي إلى انحراف المنحني المميز لهما، في هذه الحالة سيقع المنحني المميز للمضخة أخفض من المنحني المميز لها في حالة ضخ سائل نقي، كما أن المنحني المميز للشبكة سيصبح أكثر تفعراً مما هو الحال في حال مرور سائل نقي أي أن الغزارة ستقل والضغوط سيزداد. كما أن منحنى الاستطاعة في هذه الحالة سيتغير وتكون الاستطاعة اللازمة لعمل الآلة عند ضخ سائل نقي أقل من الاستطاعة اللازمة عند ضخ سائل يحمل معه شوائب ميكانيكية كما هو مبين في الشكل (9-5).

هـ - تأثير تغير عدد دورات الآلة على نقطة التشغيل:

عند تغير عدد دورات الآلة فإن المنحني المميز لها ينتقل من المنحني الموافق لعدد الدورات في الحالة الأولى n إلى المنحني الموافق لعدد الدورات الجديد n_1 الشكل (10-5) (كما قد درسنا طريقة الانتقال من المنحني H إلى المنحني H_1 و H_2 باستخدام قوانين التناسب). وبما أن المواصفات الهندسية للشبكة لا تتأثر بتغير عدد دورات الآلة فإن المنحني المميز لها يبقى نفسه وتنتقل نقطة التشغيل على المنحني المميز للشبكة من النقطة A إلى النقطة A_1 التي تمثل نقطة تقاطع المنحني المميز للشبكة مع المنحني المميز للآلة عند عدد دورات n_1 فإذا كانت $n > n_1$ فإن الآلة عندها ستضخ غزارة Q_1 بضغوط H_1 بحيث تكون $Q_A > Q_{A_1}$ و $H_A > H_{A_1}$.

بالطريقة نفسها يمكن إيجاد تغير نقطة التشغيل عند تغيير قطر الدوارة.



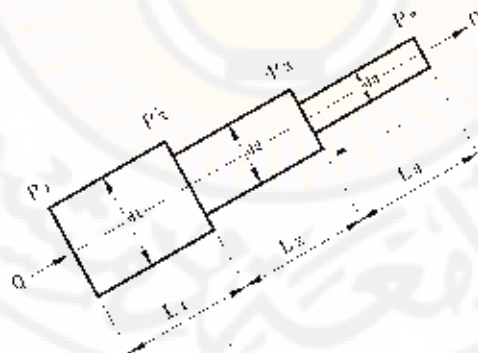
الشكل (5-10) تأثير تغير عدد الدورات على نقطة التشغيل

5-4 - وصل الأنابيب على التسلسل وعلى التفرع :

في الكثير من الشبكات نلاحظ استخدام أنابيب ذات أقطار مختلفة موصولة على التسلسل أو أن يتفرع الأنبوب الرئيسي إلى عدة أنابيب فرعية.

في الشكل (5-11) نلاحظ أنابيب التسلسل :

ب على اليسار و
بين الشكل (5-11) نلاحظ أنابيب التسلسل و
الحالة تكون الغزارة المارة في كل الأنابيب ثابتة:



الشكل (5-11) وصل الأنابيب على التسلسل

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_n \quad (5-25)$$

أما هبوط الضغط الكلي فيساوي إلى مجموع هبوطات الضغط الجزئية في الأنابيب المختلفة

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \Delta Z + \sum \Delta h$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n \quad h = e + a \cdot Q^2 \quad (5-26)$$

$$h = e_1 + a_1 \cdot Q^2 + e_2 + a_2 \cdot Q^2 + e_3 + a_3 \cdot Q^2$$

$$h = (e_1 + e_2 + e_3) + (a_1 + a_2 + a_3) Q^2$$

$$h = \sum_{i=1}^n e_i + Q^2 \sum_{i=1}^n a_i \quad (5-27)$$

حيث: h هبوط الضغط الكلي بالأمطار المائية لـ n أنبوب موصولة على التسلسل.

e_i فرق المنسوب بين طرفي كل أنبوب من الأنابيب.

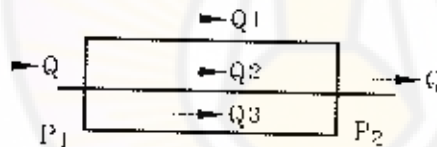
a_i ثابت كل أنبوب.

يمكن الحصول على المنحنى المميز الكلي عن طريق الجمع الشاقولي للمنحنيات المميزة للأنابيب المختلفة.

5-4-2 - وصل الأنابيب على التفرع

يصف الشكل (5-12) هذه الحالة و يكون هبوط الضغط ثابتاً لكل الفروع:

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} = h_1 = h_2 = h_3 \quad (5-28)$$

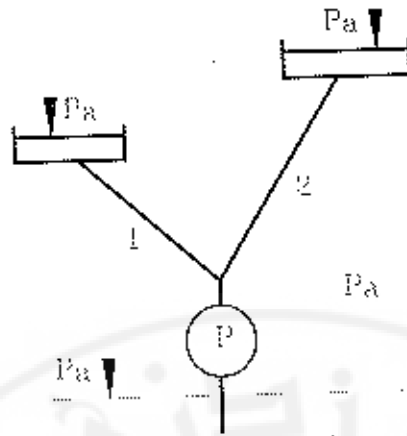


الشكل (5-12) وصل الأنابيب على التفرع

أما الغزارة الكلية فتساوي إلى مجموع الغزارات الجزئية المارة في الفروع المختلفة:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5-29)$$

ليس من الضروري أن تعود الأنابيب المتفرعة إلى الالتقاء ثانية لتكون لدينا حالة وصل على التفرع شريطة أن تكون الضغوط عند نهاية الأنابيب متساوية. وذلك كما هو الحال عند تغذية خزانين مختلفين عن طريق مضخة واحدة الشكل (5-13). يمكن الحصول على المنحني المميز لمجموعة الأنابيب الموصولة على التفرع عن طريق الجمع الأفقي للمنحنيات المميزة الخاصة بالفروع المختلفة.



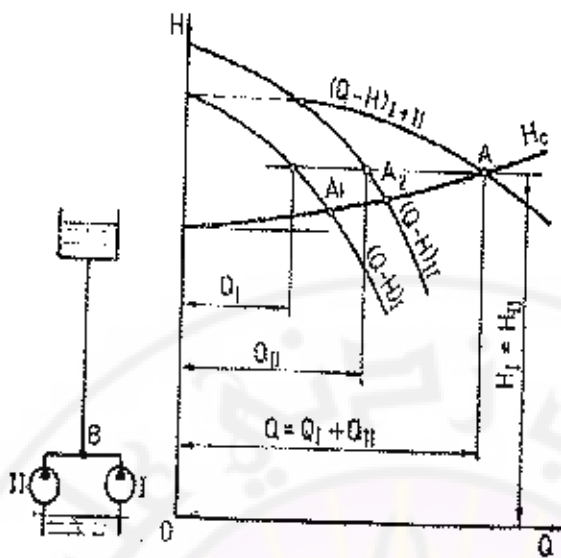
الشكل (5 - 13) وصل خزانين على التفرع

5 - 5 - عمل مجموعة آلات على التسلسل وعلى التفرع (الضاغط المخفض)

عندما تكون حاجة لضخ كميات أكبر من المائع ولا تستطيع مضخة واحدة كبيرة ضخها عندها يجب وصل مضختين أو أكثر على التفرع . في الحالات التي تتسع فيها غرفة الآلات لعدد من المضخات والتي يمكن أن تعمل على التفرع ، تتشكل شروط للاستثمار الأمثل بهذه المجموعة وذلك بالأخذ بعين الاعتبار الاحتياجات المتغيرة للمستهلك من خلال وصل أو فصل قسم من هذه المضخات الموصولة على التفرع .

يبين الشكل (5 - 14) عمل مضختين على التفرع لكل منهما المنحني المميز الخاص بها (الخطين I و II) تضخ كلتا الآلتين المائع إلى خزان مشترك عبر شبكة (أنبوبيا ضخ) لها المنحني المميز المبين على الشكل وقد رسم أعلى من خط سوية المائع في الخزان العلوي ويقدم الطاقة الضرورية التي يجب أن يأخذها المائع من المضخة حتى يمكن نقله من الخزان السفلي إلى الخزان العلوي المنحني المميز لمجموع المضختين عند عملهما على التفرع يتم الحصول عليه من خلال جمع التدفقات لكلا المضختين من أجل نفس الضاغط .

نتيجة لهذا الجمع نحصل على المنحني المميز المبين على الشكل (I + II) . من الواضح أنه من أجل ضواغط أكبر من الضاغط الأعظمي لإحدى المضختين (على الشكل المضخة I) فإن مضخة واحدة فقط ستعمل في هذه الحالة (على الشكل المضخة II) بينما تكون المضخة الثانية غير فاعلة (على الشكل المضخة I) . أما من أجل ضواغط أقل من الضاغط الأعظمي لهذه المضخة (المضخة الأولى) فستعمل المضختان معا .



الشكل (5-14)

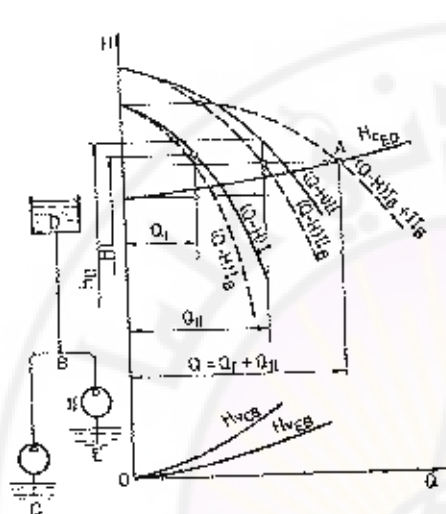
العمل المشترك لمجموعة مضختين موصولتين على التفرع وتقعان في نفس غرفة الآلات

نقطة تقاطع المنحني المميز الكلي لمجموع المضختين مع المنحني المميز للشبكة تعطي نقطة التشغيل A .

يحدد التدفق الكلي المار عبر الشبكة (عبر مجموع المضختين) بإسقاط هذه النقطة على المحور الأفقي ويحدد الضاغط الكلي بإسقاط هذه النقطة على المحور الشاقولي، وهو الضاغط الذي تعمل به كل مضخة على حدة، من نقطة التشغيل ينشأ مستقيم أفقي وعندها تمثل نقاط تقاطع هذا المستقيم مع المنحنيات الفردية لكلا المضختين نقاط تشغيل كل منهما ومن نقاط التشغيل هذه تحدد البارامترات المختلفة لعمل كل مضخة (ضاغط، غزارة، مردود، استطاعة).

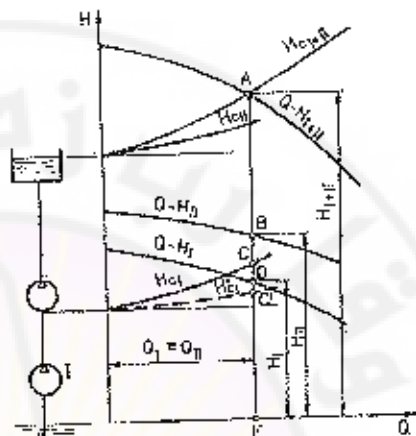
من أجل عمل الآلات على التفرع وعندما لا تكون هذه الآلات في نفس الغرفة (لا تكون قريبة من بعضها) عندها فإن كل آلة سيكون لها أنبوب ضخ خاص بها لإيصال المائع منها إلى أنبوب الضخ المشترك، إذا في هذه الحالات من الضروري تحويل المنحني المميز للآلة إلى منحني مميز ملائم لأنبوب الضخ المشترك لكل من المضختين. ينفذ المنحني الجديد بحيث نتصور أن المضخة تنقل إلى النقطة B بداية أنبوب الضخ المشترك، هذه المنحنيات ممثلة

على الشكل (5-15) يخطوط منقطة ويتم الحصول عليها بسهولة حيث يتم طرح الضياعات الهيدروليكية في الأنبوب الذي يصل من المضخة إلى بداية الأنبوب المشترك من المنحني المميز لهذه المضخة . بهذه الطريقة تتحول المسألة إلى مسألة مشابهة لما ورد ذكره عن عمل آلتين موجودتين بنفس الغرفة وتعملان على التفرع.



الشكل (5-15)

العمل المشترك لمجموعة مضختين موصولتين على التفرع وموجودتان بعيدتين عن بعضهما .



الشكل (5-16)

عمل مضختين على التسلسل بعيدتين عن بعضهما .

استناداً إلى ما سبق نستنتج أنه من الضروري قبل كل شيء أن تحسب خطوط الضياعات الهيدروليكية للأنابيب الخاصة بكل من المضختين والتي سميت على الشكل (5-15) H_{p1} و H_{p2} ، ثم بعد ذلك يتم حساب المنحني المميز لأنبوب الضخ المشترك أي من النقطة B حتى الخزان العلوي ومن تقاطع هذا المنحني مع المنحني المميز المحصل الناتج عن الجمع الأفقي للمنحنيات المخفضة تنتج نقطة التشغيل لمجموع الآلتين على التفرع .

في الحالات التي يكون فيها التدفق والضغوط معلومين في منشأة تعمل فيها مجموعة مضخات أي أن نقطة التشغيل معلومة فإذا تبين أنه لا يمكن الحصول على التدفق المطلوب باستخدام مضخة واحدة موجودة عندها تحل المسألة عكسياً وبالتالي بمعرفة المنحني المميز للمضخة الأولى يمكن تحديد المضخة الثانية التي يجب ربطها على التفرع مع الأولى .

يبين الشكل (16 - 5) عمل الآتين على التسلسل ومن الواضح أنه في هذه الحالة تضخ كلتا الآتين الغزارة نفسها وبالتالي فإن إيجاد المنحني المميز لمجموع الآتين على التسلسل يتم بالجمع الشاقولي لمنحنياتها (تجمع الضواغط الموافقة لنفس الغزارة). نقطة تقاطع المنحني المميز الناتج مع المنحني المميز للشبكة تمثل نقطة تشغيل المجموعة. تمثل المسافة OE الضاغط الذي تقدمه المضخة الأولى كما تمثل المسافة BE الضاغط الذي تقدمه المضخة الثانية، أما المسافة CE فتُمثل الطاقة اللازمة لنقل التدفق من المضخة الأولى إلى المضخة الثانية. من الملاحظ أن الجزء CD يبين أن طاقة المضخة الأولى لا توصل المائع إلى المضخة الثانية وبالتالي يجب أن تغطي المضخة الثانية ذلك بجزء من طاقتها وبالتالي فإن المضخة الثانية ستعمل بارتفاع سحب يساوي إلى CD . تبعاً للمنحني المميز للمضخة الأولى يمكن أن تكون النقطة C أخفض من النقطة D في هذه الحالة تكون شروط عمل المضخة الثانية أفضل لأنها تعمل بضغوط أقل من ذلك المبين على الشكل (16 - 5)، هذه الحالة مبينة بالخط المنقط للفوق وكذلك النقطة C' . المقطع CD يعطي ارتفاع الضغط الذي ستعمل عنده المضخة الثانية.

5 - 6 - استقرار عمل الآلات وظاهرة البومباج :

عند عمل آلة ضخ في شبكة ما فإن بارامترات عمل هذه الآلة تحددها نقطة التشغيل والتي تنتج عن تقاطع المنحني المميز للآلة $(H-Q)$ مع المنحني المميز للشبكة $(h-Q)$ وعندها تضخ المضخة السائل بغزارة يكون عندها ضاغط المضخة كافياً للتغلب على فواقد الجريان الكلية في الشبكة.

وقد بينا أن هناك الكثير من العوامل التي تؤثر في نقطة التشغيل فتؤدي إلى انزياحها، ومن هذه العوامل ما يتعلق بالآلة كزيادة عدد دوراتها أو تغيير أقطارها كما أن هناك بعض العوامل التي تتعلق بالشبكة كخنفها أو إزالة أجزاء منها. كما بينا عند دراستنا للمنحني المميز الفعلي للآلة $(H-Q)$ أن هذا المنحني يمكن أن يأخذ أشكالاً مختلفة تبعاً لتغير قيمة الفواقد في الآلة كتابع لتغير الغزارة وهذه الأشكال هي:

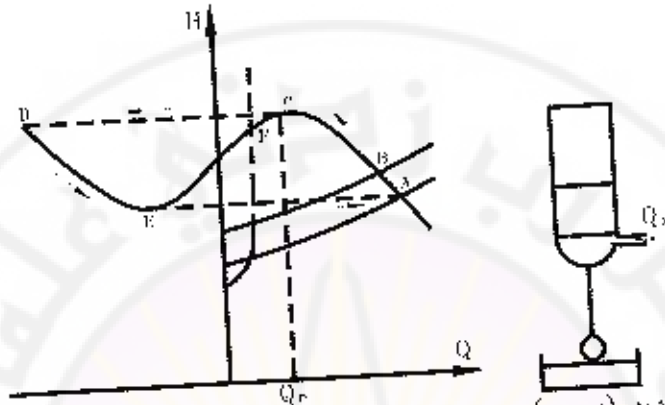
... منحني هابط باستمرار مع ازدياد الغزارة.

- منحني صاعد ثم هابط مع ازدياد الغزارة (يتمتع بنهاية حدية عظمى).

- منحني مرجي: وهو أخطر هذه الأشكال إذ إن الآلات التي تمتلك منحنياً مميزاً له شكل سرج تكون معرضة لنظام عمل غير مستقر أو ما يسمى ظاهرة البومباج.

كيف تحدث ظاهرة الوميح:

لنكن لدينا مضخة ذات منحنى مميز مرجعي تضخ الماء إلى خزان برجي، فإذا كانت الغزارة المستجرة من الخزان Q_x أقل من الغزارة المضخوخة فإن مستوى الماء في الخزان سيرتفع وبالتالي فإن المنحني المميز للشبكة سينزلق إلى الأعلى وتنزلق نقطة التشغيل على المنحني المميز للألة من النقطة A إلى النقطة B .



الشكل (5-17) مضخة ذات منحنى مميز مرجعي تضخ الماء إلى خزان برجي

كما في الشكل (5-17). فإذا كانت الغزارة المستجرة من الخزان Q_x دوماً أقل من الغزارة المضخوخة فإن سوية السائل في الخزان وبالتالي المنحني المميز للشبكة سيستمر بالارتفاع حتى تصل نقطة التشغيل إلى النقطة C التي توافق أكبر ضاغط يمكن أن تقدمه المضخة، وفي هذه الحالة فإن الفواقد في الشبكة (ضاغط الشبكة) سيصبح أكبر من الضاغط الأعظمي الذي يمكن أن تقدمه المضخة H_C ، ونتيجة لذلك فإن السائل وبحت تأثير الضاغط الذي يتمتع به في الشبكة سيجري في الاتجاه المعاكس وهذا يوافق بيانياً حدوث قفزة من النقطة C إلى النقطة D الواقعة في الربع الثاني.

نتيجة لجريان السائل بالاتجاه المعاكس يأخذ ضاغط الشبكة بالتناقص بسبب نقصان ارتفاع السائل في الخزان وبسبب نقصان فواقد الجريان مما يؤدي إلى نقصان الغزارة المتدفقة بالاتجاه المعاكس، وتنزلق نقطة التشغيل على المنحني المميز للألة حتى تصل إلى النقطة E الموافقة لضاغط أصغري للشبكة تستطيع المضخة التغلب عليه لتعود من جديد إلى ضخ السائل في الاتجاه الصحيح (اتجاه الضخ) وهو ما يوافق بيانياً قفزة جديدة لنقطة التشغيل من النقطة E

درست هذه الظاهرة من قبل البروفسور جوكوفسكي نظريا وتجريبيا منذ العام 1898 م .



الشكل (21-5) أنبوب دراسة المطرقة المائية .

5-7-1 - موجة الطرق والضغط :

إذا وضع صمام (منكر) في نهاية الأنبوب الشكل (21-5) قابل للفتح والإغلاق السريعين ، عند جريان السائل من الخزان A عبر الأنبوب بسرعة v_0 وعند الإغلاق المفاجئ للسكر فإن السرعة أمامه ستصبح مساوية للصفر ونتيجة لذلك فإن الضغط سيزداد بمقدار Δp . موجة الصدم الناتجة ستنتشر من منطقة الضغط الأعلى إلى منطقة الضغط الأقل بسرعة a وبالتالي بعد فترة زمنية $\Delta t = l/a$ ستصل إلى بداية الأنبوب . ولأن الخزان ذو حجم كبير فإن موجة الصدم ستبتدئ بداخله ، بسبب الضغط العالي داخل الأنبوب فإن الأخير سيزداد قطره d بقيمة ما . بفعل تشوه الأنبوب فإن السائل بداخله سينزاح باتجاه الخزان ، بفعل هذا فإن الضغط أمام السكر سينخفض بشكل حاد ، الضغط المنخفض يصل إلى السكر بعد فاصل زمني مقداره $T = 2l/a$ والذي يسمى طور المطرقة الهيدروليكية . نتيجة للضغط المنخفض فإن الأنبوب سيتقلص وينقص قطره d بقيمة ما تتناسب مع قيمة الضغط المنخفض . بعد فترة زمنية مقدارها $3 \Delta t$ فإن السائل في الأنبوب سيكون ساكنا (غير متحرك) ويضغط منخفض . تحت تأثير الضغط الزائد $\rho g H$ المطبق في بداية الأنبوب والذي هو أعلى من الضغط أمام السكر وتحت تأثير مرونة (لدونة) الأنبوب فإن السائل سيبدأ بالحركة باتجاه السكر . بعد فترة زمنية $4 \Delta t$ ستولد زيادة في الضغط من جديد وتكرر هذه العملية حتى تتخامد بفعل لزوجة السائل (الاحتكاك في السائل) .

حسب الدراسات التي أجراها جوكوفسكي فإن الزيادة في الضغط Δp_{hm} تحسب باستخدام العلاقة :

$$\Delta p_{hm} = \rho v_0 a \quad (5-30)$$

حيث يمكن أن تحسب سرعة انتشار موجة الصدمة بالعلاقة :

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{k} + \frac{d}{\delta E}}} \quad (5-31)$$

حيث k معامل يتعلق بمرونة المائع ، δ سماكة جدار الأنبوب .

E معامل يتعلق بمرونة المادة التي صنع منها الأنبوب .

تعطى سرعة انتشار موجة الطرق عند الضغط الجوي لبعض السوائل كالتالي :

للماء $a = 1460 [m/s]$ عند درجة حرارة $t = 19^\circ C$.

للبنزين $a = 1116 [m/s]$ عند درجة حرارة $t = 17^\circ C$.

للزيت $a = 1330 [m/s]$ عند درجة حرارة $t = 17^\circ C$.

في الحالات التي لا يغلق فيها السكر لحظيا ، هذا يعني أن السرعة v_0 تصل إلى قيمة ما v_1 في لحظة معينة من الإغلاق وفي هذه الحالة فإن مقدار الزيادة في الضغط تحسب بالعلاقة :

$$\Delta p_{int} = \rho (v_0 - v_1) a \quad (5-32)$$

5-7-2- الطرق المباشر وغير المباشر :

العبارة المذكورة أعلاه لحساب ضغط الطرق تستخدم عند حصول ما يسمى المطرقة

الهيدروليكية المباشرة أي عندما يكون زمن إغلاق السكر t_3 هو :

$$t_3 < T = 2l/a \quad (5-33)$$

أما في الحالات المخالفة أي $t_3 > T$ فإن المطرقة تدعى غير مباشرة ، وفي هذه الحالة فإن موجة الصدم تعود إلى عنصر الإغلاق قبل أن يغلق ولذلك فإن الزيادة في الضغط Δp_{int} تكون في هذه الحالة أقل من قيمتها في حالة المطرقة الهيدروليكية المباشرة. إذا قبلنا أن تغير السرعة يتم وفق قانون تغير خطي فإن زيادة الضغط في حالة المطرقة الهيدروليكية غير المباشرة يمكن أن تحسب بالعلاقة :

$$\Delta p_{int} = \frac{2 \rho v_0 l}{t_3} \quad (5-34)$$

تظهر العلاقة الأخيرة أن : المطرقة غير المباشرة وخلافا للمباشرة التي تتبع سرعة انتشار موجة الطرق فإنها تتبع طول الأنبوب وزمن إغلاق السكر .

أثبتت التجارب أنه من أجل ضغوط فعلية أكبر فإن زيادة ضغط الصدم تكون أكبر من تلك المحسوبة باستخدام علاقات جوكوفسكي بمقدار $(10 \div 20)\%$ ويعود السبب في ذلك إلى زيادة معامل مرونة السائل مع تغير الضغط .

عند حدوث المطرقة الهيدروليكية بشكل واضح حاد ، تصل زيادة الضغط إلى ضعف قيمته في الأنبوب والذي يمكن أن يؤدي إلى أضرار جسيمة في الأنبوب أو في الآلة المربوطة عليه. للحماية ولتقليل خطر حدوث المطرقة الهيدروليكية في الشبكات تستعمل الكثير من الوسائل والطرق الأكثر انتشاراً هو استخدام ما يسمى الخزانات الهيدروليكية أو الخزانات الهوائية وغيرها . لتقليل مقدار الضغط الناتج عن المطرقة الهيدروليكية يتم اختيار زمن إغلاق السكر وطول الأنبوب أمامه بحيث تكون المطرقة الهيدروليكية غير مباشرة .

5 - 8 - ارتفاع السحب المسموح به وارتفاع تثبيت المضخة

Allowable Suction Head

بحسب ارتفاع السحب من أجل المضخات التي تتركب فوق مستوى السطح المراد سحبه (المضخات الأفقية) فقط ، وهذه المضخات تقوم بدفع السائل إلى ارتفاعات عالية وإلى خزانات توزيع ، أما المضخات العمودية والغاطسة والتي تقع تحت سطح الماء - فارتفاع السحب لها موجب دوماً .

يبين الشكل (1-5) مخطط تركيب مضخة طاردة والتجهيزات اللازمة لتعمل على سحب الماء وضخه من خزان سفلي إلى خزان علوي . نتيجة دوران الدوارة ، ينخفض الضغط عند مدخل المضخة عن الضغط الجوي ، يدعى هذا الانخفاض :

الارتفاع التكفي للسحب h_s .

يتم سحب السائل بعد أن تولد المضخة الفرق اللازم بين الضغط على السطح الحر والضغط عند مدخل المضخة . لتطبيق معادلة برنولي على نقطتين من خط تيار الأولى على السطح السائب للسائل في الخزان السفلي والثانية عند مدخل المضخة ، باعتبار أن مستوي المقارنة هو السطح الحر للسائل :

$$Z_0 + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + h_v + \frac{V^2}{2g} + \sum \Delta h_s \quad (5-35)$$

حيث : Z_0 الارتفاع الهندسي للسطح الحر للسائل ويساوي الصفر .

$\frac{P_a}{\gamma}$ ارتفاع الضغط الجوي ، (عند سطح البحر $\frac{P_a}{\gamma} = 10 \text{ mH}_2\text{O}$) .

$\frac{V_0^2}{2g}$ ارتفاع سرعة السطح السائب للسائل وهو مهمل لصغر قيمته $V_0 \approx 0$

$\frac{P_1}{\gamma}$ ارتفاع ضغط الدخول إلى المضخة .

h_v الارتفاع الهندسي للسحب .

$\frac{V_1^2}{2g}$ ارتفاع السرعة عند مدخل المضخة .

$\sum \Delta h_s$ ارتفاع الفواقد في أنبوب السحب .

$$h_v = \frac{P_a - P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} - \sum \Delta h_s \quad (5-36)$$

يسمى المقدار $\frac{P_a - P_1}{\gamma}$ الارتفاع التكفي للسحب h_k .

$$h_k = h_v + \frac{V_1^2}{2g} + \sum \Delta h_s \quad (5-37)$$

أي أن الارتفاع التكفي للسحب يساوي إلى مجموع الارتفاع الهندسي للسحب وارتفاع الفواقد في أنبوب السحب وارتفاع السرعة في أنبوب السحب .

العلاقة (5-36) تمثل الارتفاع الهندسي للسحب أو الارتفاع الذي يجب أن تثبت المضخة عليه .

$$h_H = h_k - \frac{V_1^2}{2g} - \sum \Delta h_s \quad (5-38)$$

يتعلق ارتفاع تثبيت المضخة h_H بدرجة حرارة السائل فكلما ازدادت درجة حرارة السائل المضخوخ قل الارتفاع التكفي المسموح به h_k .

توضح النشرات الفنية قيمة الارتفاع التكفي المسموح به عند درجة حرارة $20^\circ C$ ، لذلك عند ضخ سائل بدرجة حرارة أعلى من $20^\circ C$ فإن ارتفاع تثبيت المضخة يحسب بالعلاقة :

$$h_H = h_k - \frac{V_1^2}{2g} - \sum \Delta h_s - \frac{P_v}{\gamma} \quad (5-39)$$

حيث P_v / γ ضغط أبخرة الماء عند درجة الحرارة المعتبرة . تعطى قيم ضغط الأبخرة عند درجات الحرارة المختلفة في جداول :

درجة حرارة الماء $^\circ C$	20	30	40	50	60	70	80	90
ضغط الأبخرة mH_2O	0,24	0,43	0,75	1,25	2,02	3,17	4,82	7,14

كما أن النشرات الفنية للمضخات تعطي العلاقة بين الارتفاع الهندسي الممكن للسحب h_v ودرجة حرارة الماء :

80	70	60	50	40	20	0	درجة حرارة الماء [C°]
0	1	3,5	5	7	7,5	8	الارتفاع h_v [m]

أما إذا زادت درجة حرارة الماء عن $80^\circ C$ عندها يجب أن يكون محور المضخة أخفض من السطح الحر للسائل. كما أن ارتفاع السحب يتأثر بتغير الموقع الذي ستركب فيه المضخة نتيجة لاختلاف قيمة الضغط الجوي بتغير الموقع الجغرافي ، لذا يحسب ارتفاع تثبيت المضخة من العلاقة :

$$h_{II} = h_k - \frac{V_1^2}{2g} - \sum \Delta h_s - \frac{P_v}{\gamma} - \frac{\Delta P_a}{\gamma} \quad (5-40)$$

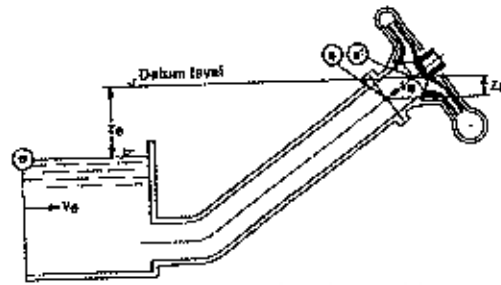
حيث : $\frac{\Delta P_a}{\gamma}$ يمثل الفرق بين قيمة الضغط الجوي عند سطح البحر وقيمته في مكان تركيب المضخة مقدراً بأمطار سائل .

1500	1000	800	600	400	200	100	0	الارتفاع عن سطح البحر [m]
8,6	9,2	9,4	9,6	9,8	10,1	10,2	10,3	الضغط الجوي [mH ₂ O]

5 - 9 - ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH) : Net Positive Suction Head

يمثل ارتفاع السحب الموجب الصافي $NPSH$ مفهوماً مهماً جداً للحكم على سلوك السحب للمضخة الطاردة المركزية ، هذه القيمة تسمح بتقدير احتياطي الأمان لعدم حدوث تكهف $Cavitation$ خلال تشغيل المضخة .

تستخدم حالياً قيمة $NPSH$ بينما كان يستخدم سابقاً مفهوم ارتفاع ضغط التوقف $retaining pressure head$ والذي له نفس المفهوم الفيزيائي لارتفاع السحب الموجب الصافي ، ويكمن الفرق بين القيمتين في القيمة العددية لـ Z_s بسبب اختلاف مستويات القياس لعمليات الحساب الشكل (22-5) .



الشكل (5-22) موضع النقاط المرجعية

أثناء تطور الجريان عبر الدوالب الدائر لمضخة طاردة مركزية يحدث انخفاض في قيمة الضغط الستاتيكي بالمقارنة مع قيمته قبل الدوالب لاسيما عند مدخل الريشة ، يعتمد مقدار انخفاض الضغط على سرعة الدوران ونقطة التشغيل والشكل الهندسي لمدخل الدوالب الدائر و كذلك على بروفيل سرعة الجريان و كثافة السائل المضخوخ و لزوجته .

لتجنب حدوث التكيف في الدوالب الدائر للمضخة الطاردة المركزية أو لتخفيض احتمال حدوث التكيف إلى حد مقبول فانه من الضروري أن يكون الضغط قبل الدوالب الدائر أكبر بمقدار كاف من ضغط التبخر للسائل المضخوخ.

عند تحديد قيمة ارتفاع السحب الموجب الصافي يجري الحديث عن قيمتين : الأولى : قيمة $NPSH$ المطلوبة من المضخة الطاردة المركزية $NPSH_{req}$ والتي تتوافق مع ارتفاع ضغط التوقف H_{II} للمضخة ، و الثانية $NPSH$ المتاحة $NPSH_{av}$ لمنشأة الضخ و التي تتوافق مع ارتفاع الضغط المحرز $H_{II,s}$ في المنشأة. وتحدد قيمة الأخيرة بالعلاقة :

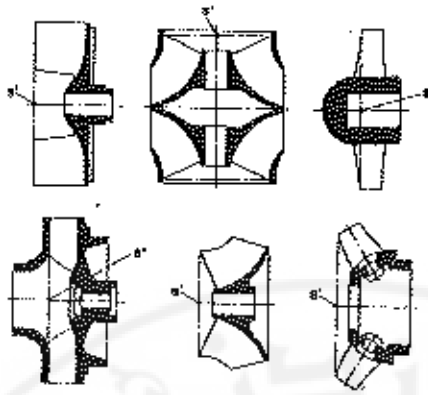
$$NPSH_{av} = \frac{P_{tot,s} - P_v}{\rho \cdot g} \quad (5-41)$$

حيث: P_v ضغط التبخر المانع الضخ عند النقطة s الشكل (5-22)

ρ كثافة مائع الضخ عند النقطة s

g تسارع الجاذبية

$P_{tot,s}$ الضغط الكلي عند فرع السحب للمضخة الشكل (5-22)



الشكل (5-23) موقع النقطة المرجعية s' مع تغيرات نماذج دواليب المضخة

ترتبط النقطة s بمركز فرع السحب وإذا لم يكن هناك فرع سحب مثل المضخة ضمن أنابيب ذات توصيلات ملحومة أو كما في المضخة الغاطسة ذات فوهة دخول. وبالتالي عند بدء الحديث عن قيمة $NPSH$ يجب تحديد موضع s والذي يرتبط بشكل واضح مع فرع السحب للمضخة. تعطى قيمة الضغط الكلي عند النقطة s بالعلاقة

$$p_{tot,s} = p_s + p_a + \rho \cdot \frac{v_s^2}{2} \mp z_s \cdot \rho \cdot g$$

حيث $p_s + p_a$ الضغط الستاتيكي المطلق عند النقطة s وهو مجموع الضغط الجوي p_a والضغط الستاتيكي p_s ويمكن أن يكون أكبر أو أصغر من الضغط الجوي. v_s سرعة الجريان في المقطع العرضي عند النقطة s z_s الارتفاع المكاني للنقطة s بالنسبة لمستوى القياس الشكل (5-22) لتحديد قيمة $NPSH$ تعتمد النقطة المرجعية s' نقطة مركز الدواليب الدائر أي: (نقطة تقاطع محور المضخة مع المستوى المتوضع بزاوية صحيحة بالنسبة لمحور المضخة و يمر من النقاط الخارجية لحافة الدخول للريشة الشكل (5-22)). تدل الإشارة السالبة لـ z_s على أن الدواليب الدائر أعلى من منطقة السحب كما في الشكل (5-22) و إذا كانت النقطة s أعلى من النقطة s' ستكون إشارة z_s موجبة و تصبح علاقة $NPSH$ المتاحة:

$$NPSH_{av} = \frac{p_s + p_a - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{v_s^2}{2g} \mp z_s \quad (5-42)$$

إذا أدخلنا القيم عند المقطع العرضي لمداخل المنشأة :

$$NPSH_{av} = \frac{p_s + p_b - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s - H_{v.c.s} \quad (5-43)$$

حيث: p_s الضغط عند المقطع العرضي لمداخل منشأة الضخ و v_s السرعة عند نفس المقطع

z_s الفرق في الارتفاع المكاني بين مداخل المنشأة والمستوى المرجعي

له إشارة سالبة إذا كان المستوى المرجعي فوق مستوى السائل

له إشارة موجبة إذا كان المستوى المرجعي أدنى من مستوى السائل

$H_{v.c.s}$ ارتفاع الفواقد (الضبايعات) في جزء السحب من المنشأة من مقطع الدخول

للمنشأة A_s حتى مقطع الدخول للمضخة A_g و الذي يتضمن ضبايعات الأنابيب

والمداخل والصمامات والوصلات (ضبايعات الاحتكاك و الضبايعات المكانية)

قيمة $NPSH$ للمضخة المطلوبة:

تحدد قيمة $NPSH_{req}$ من المضخة بنفس طريقة تحديد قيمة $NPSH_{av}$ للمنشأة أي :

$$NPSH_{req} = \left(\frac{p_{tot,s} - p_D}{\rho \cdot g} \right)_{min} = \left(\frac{p_s + p_b - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \right)_{min} \quad (5-44)$$

للمرموز نفس المعاني الواردة من أجل قيمة $NPSH$ من أجل المنشأة.

الفرق الواضح وهو أن المقدار بين القوسين يجب ألا يساوي أو يقل عن القيمة الأصغرية المبرينة وهذه القيمة تتعلق بالمضخة و تطبيقاتها ، وإلا فإن معيار تكهف المضخة الطارئة المركزية سوف يتدهور ، وهذه المعايير هي :

1 - التكهف الأولي المرئي عند $NPSH_1$ (وهو فقاعات) عند حافة الدخول للشفرة حتى طول الفقاعة السطحي (وهو يلاحظ فقط مرئياً)

2 - متوسط الضاغط ΔH الناتج عن التكهف حتى مقدار أعظمي بتعريف

$\Delta H = 0.03 H$ و في بعض الحالات من أجل مضخات ذات سرعة نوعية عالية فإن

$\Delta H = 0.00 H$ أي لحظة تآكل الضاغط الكلي للمضخة بالتكهف و يرمز لهما

$NPSH_0$ و $NPSH_3$

3 - التآكل في معدن المضخة المتزايدة المركزية بسبب التكهف حتى كتلة أعظمية (يحدد

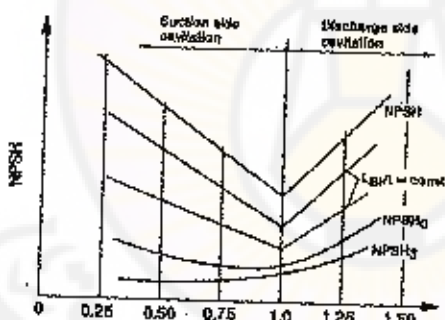
التآكل المعياري بوحدة كتلة / زمن)

4 - المعيار الوارد في البند 2 السابق ولكنه يؤخذ كنسبة من المردود بدلا من أن يؤخذ كنسبة من الضاغط $\Delta\eta = 0,03\eta$

5 - ازدياد معدل الضجيج نتيجة التكيف حتى مستوى صوت أعظمي (يحدد معدل الضجيج المعياري ويقاس تقنيا) .

6 - انخفاض ضاغط المضخة بسبب التكيف حتى انهيار كامل الضاغط

عندما يتم إعطاء قيمة $NPSH$ للمضخة يجب تحديد المعيار الذي تم اعتماده ، على كل حال ، نادرا ما تستخدم المعايير (4 ÷ 6) وكذلك المعيار الأول لأنه يحتاج إلى تجارب كثيرة ، لهذا يعتمد عادة المعيار $NPSH_{req} = NPSH_3$. كل المعايير المذكورة أعلاه وكل قيم $NPSH$ الناتجة عنها تعتمد على نقطة التشغيل ، المنحني المميز كما هو مبين في الشكل (24-5) . نلاحظ هنا منحنيات $NPSH_{req}$ للدولاب (دائر مقابل التدفق والبارامترات المعتمد وفقاً لنوع التكيف ، على سبيل مثال الطول L_{Bl} ينتج عن الفقاعة وعلاقتها مع فراغ بين الشفرت (الريش) والمراقب بدقة لهذه المنحنيات يحدد قيمة $NPSH_{min}$ المتاحة ثم يحدد نوع التكيف المتوقع كتابع من التيار الحجمي .



الشكل (24-5) $NPSH_{req}$ من أجل المعايير المختلفة كتابع

للتدفق النسبي $Q/Q_{shock-free}$

المنحني العلوي $NPSH_1$ يصور التكيف المثالي إذا كانت قيمة $NPSH_{min}$ أكبر من $NPSH_1$ فإنه لا يوجد تكيف وسيثور الدولاب بدون فقاعات وكلما نقصت قيمة $NPSH_{min}$ كانت الفقاعة أطول من قيمة أصغرية ويزيد طول الفقاعة عند حمل جزئي و انحراف في التيار

الحجمي (التدفق) وبقاء التيار الحجمي ثابتاً عند طول فقاعة تكهف اصغري يتوافق مع اتجاه التدفق في المدخل الخالي من الصدمة و يمثل الحالة الأصغر في ازدياد سرعة المائع على طرفي المسحب و الضغط للسفرة (الريشة) لهذا نعرف التيار الحجمي الخالي من الصدمة $Q_{shock-free}$. عندما يكون $Q < Q_{shock-free}$ يزداد التكهف على جهة المسحب أما عندما يكون $Q > Q_{shock-free}$ فيزداد التكهف على جهة الضغط.

عند تعريف قيمة $NPSH_{req}$ المطلوبة لآبد من تحديد المعيار في الحكم على التكهف ولا ننسى أن المعايير هي أقل استخداماً إن تحديد قيمة $NPSH_{req}$ هي مسألة خبرة تتعلق باختبارات $NPSH$ و خاصة عند تحول من سرعة مضخة إلى أخرى أو على مضخة شبيهة تختلف في الحجم أو من وسط (مائع) إلى آخر (خاصة إذا كان هناك غاز منحل أو غير منحل في سائل المضخ). إن نقطة التشغيل لمضخة طاردة مركزية يمكن أن تأخذ النقطة التي يكون عندها التشغيل مستمراً (متتابع) بحيث يكون عندها $NPSH_{av} \geq NPSH_{req}$ هناك قيم تتعلق بقيمة $NPSH$ مثل رقم المسحب اللا بعدي أو معامل التكهف

$$\sigma_a = \frac{NPSH}{u_{1,a}^2 / 2g}$$

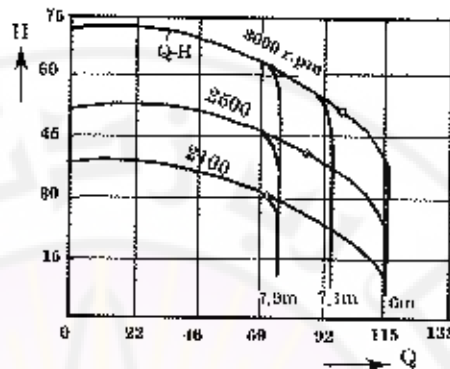
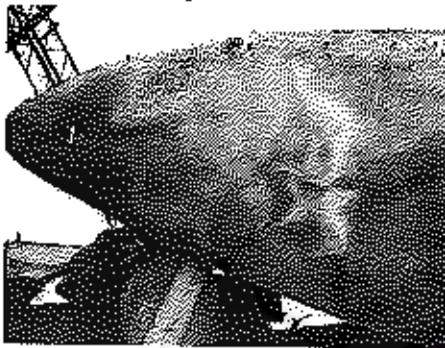
حيث $u_{1,a}$ السرعة المحيطة الأعظمية لحافة مدخل الدوالات الدائر

5 - 10 - التكهف في محطات الضخ Cavitations :

عند انخفاض الضغط الستاتيكي في منطقة ما مملوءة بسائل ساكن أو متحرك إلى قيم أقل من قيمة ضغط التبخر الموافق لدرجة حرارة السائل فإن السائل الموجود في هذه المنطقة يبدأ بالغليان ويلاحظ تشكل البخار في كامل حجمه عند هذه المنطقة. وبالتالي فإن أكثر المناطق عرضة لهذا التحول الطوري هي مدخل المضخة حيث يتولد ضغط تخلخل ، كما أنه عند حركة السائل في الأفقية بين الريش ينخفض الضغط على الوجه الخلفي للريشة ، وبالتالي فإن الضغط المطلق يمكن أن ينخفض إلى قيمة مساوية أو قيمة أقل من قيمة ضغط الأبخرة المشبعة في بعض النقاط . عند انتقال الفقاعات المملوءة بالبخار إلى منطقة ذات ضغط أعلى من ضغط التبخر يتكاثف البخار محمرا حجما كان يشغله مما يؤدي إلى اندفاع السائل المحيط بالفقاعة بسرعة كبيرة لملء الفراغ الناتج فإذا كانت فقاعات البخار واقعة على سطح التيار (سطح الريشة) عند التكاثف فإن السائل سيصطدم بسطح الريشة بنفس السرعة التي اكتسبها ليملا الفراغ الناتج

عن انفجار الفقاعة البخارية ، ويحدث نكرا موضعيا في المعدن . ويترافق هذا بضجيج مميز ، تدعى هذه الظاهرة بظاهرة التكيف .

يمكن أن يحدث التكيف بشكل موضعي وذلك عند كون الضغط قريبا من ضغط الأبخرة المشبعة الموافقة لدرجة حرارة السائل وعندها تحدث عمليات التبخر والتكاثف بشكل نبضي ويتردد كبير .



الشكل (25 - 5) أثر التكيف على المنحنيات المميزة .
الشكل (26 - 5) تآكل الأنابيب وريش الدواليب العاملة .

5 - 10 - 1 مؤشرات ظهور التكيف Cavitations Indicators :

1 - الضجيج والاهتزاز : وتحدث بسبب انفجار فقاعات البخار عند وصولها إلى مناطق الضغط العالي .

2 - الهبوط الحاد للمنحنيات المميزة (H - Q) في المضخات وكذلك انخفاض قيمة المردود والاستطاعة حيث يظهر ذلك واضحا على الشكل (25 - 5) .

3 - تآكل الأنابيب وريش الدواليب العاملة كما هو مبين في الشكل (26 - 5) .

عند دراسة شروط نشوء التكيف في الآلات الطاردة المركزية تستخدم عادة المعادلة التالية :

$$h_a + h_s = h_{za} + h_v + \frac{c_i^2}{2g} + \frac{\xi w_1^2}{2g} \quad (5-45)$$

حيث : - $H_a [m]$: الضغط المطلق على سطح السائل الذي يغذي المضخة .

- $h_s [m]$: الضاغط السنتريكي مقدرا بارتفاع عمود سائل مقاسا من محور المضخة .

وتكون قيمة h_s سالبة عند تركيب المضخة أعلى من سطح السائل (ارتفاع السحب) .

- $h_v [m]$: ضغط التبخر الموافق لدرجة حرارة الماء في قسم السحب .

- $h_{za} [m]$: ضياعات الضغط في قسم السحب .

- $c_1 [m/s]$: السرعة المطلقة الوسطية في مدخل الدولاب العامل .

- $\frac{\xi w_1^2}{2g} [m]$: الهبوط (الضياع) المكاني للضغط في مكان ظهور التكيف كتابع

للضغط الوسطي، هذا الهبوط ينتج بسبب فرق الضغط بين وجهي الريشة الأمامي والخلفي.

5 - 10 - 2 - العوامل المساعدة على حدوث التكيف :

حتى لا يحدث التكيف يجب أن تبقى قيمة الحد الأدنى من المعادلة (45 - 5) أكبر من قيمة الحد الأعلى. إن تحليل المعادلة السابقة يسمح بتحديد العوامل التي تؤثر في نشوء التكيف ، أي:

1 - الضغط الجوي المنخفض .

2 - ارتفاع السحب الكبير .

3 - الضغط المطلق القليل المؤثر فوق سطح السائل في خزان السحب (الخزان الذي يغذي المضخة).

4 - الضياعات الكبيرة بسبب المقاومات الهيدروليكية في قسم السحب.

5 - السرعة المطلقة الكبيرة في الأنابيب أو عند مدخل الدولاب العامل.

6 - الهبوط المكاني الكبير في الضغط $\frac{\xi w_1^2}{2g}$. حيث:

ξ : معامل الفقد المكاني . w_1 : السرعة النسبية الوسطية عند مدخل الدولاب العامل .

عند قيم محددة للسرعات c_1 ، w_1 يظهر تصميم الآلة تأثيراً على التكيف ، فإذا ساعد تصميم المدخل على نشوء أعاصير أو دوارات قوية فإن هذا يساعد على ظهور التكيف .

إلى الآن لا يزال تحديد بدء التكيف في الآلات الهيدروليكية غير ممكن ببساطة وقد أدخل توما مفهوم معامل التكيف التجريبي σ عند دراسته مشاكل التكيف .

يفترض أن مجموع الضياعات المكانية في الضغط عند المدخل والضغط الديناميكي يمكن أن يعبر عنها كجزء من الضغوط الكلية للمضخة H :

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{\xi w_1^2}{2g} = \Delta h = \sigma H \quad (5-46)$$

حيث : σ : معامل التكيف ، أو الحساسية التكيفية ويحدد بطريق تجريبي .

بالأخذ بعين الاعتبار المعادلة (45 - 5) يمكن أن نكتب :

$$H_a + h_s - h_v - h_{20} = \sigma H$$

أو :

$$\sigma = \frac{H_a + h_s - h_v - h_{20}}{H} \quad (5-47)$$

ولنفس المضخة عند عملها بأعداد دورات مختلفة أو لمجموعة مضخات متشابهة تعمل بظروف عمل متماثلة (n_s نفسها) :

$$\sigma = \frac{\Delta h}{H} = const \quad (5-48)$$

إذا حدد المعامل σ بشكل تجريبي لتصميم معين فإنه يمكن أن يستخدم الضغط اللازم عند المدخل لمعرفة الضاغط الكلي للآلة. عند تحديد المعامل σ بشكل تجريبي لآلة ما ، يجب أن تحدد شروط بدء التكيف وكموثرات على ذلك تؤخذ المظاهر التالية : الهبوط الحاد في المنحني $(Q-H)$ ، انخفاض المردود ، ظهور الضجيج والاهتزاز . غالباً يؤخذ هبوط المردود كمؤشر رئيسي إذ إنه لا يرتبط بالعدد النوعي للدورات ويمكن أن يلاحظ قبل ظهور المؤشرات الأخرى. عند دراسات التكيف بشروط محددة تحدد القيمة الدنيا التي يمكن أن يصل إليها هذا المعامل دون أن يحدث التكيف .

هناك طرق عدة لتمثيل نتائج اختبارات التكيف بيانياً ، واحدة من هذه الطرق تتم بتحديد قيمة المعامل σ لأجل بعض النقاط من المنحني $(Q-H)$ وتحمل على الشكل كنابع لـ n_s لهذه النقاط .

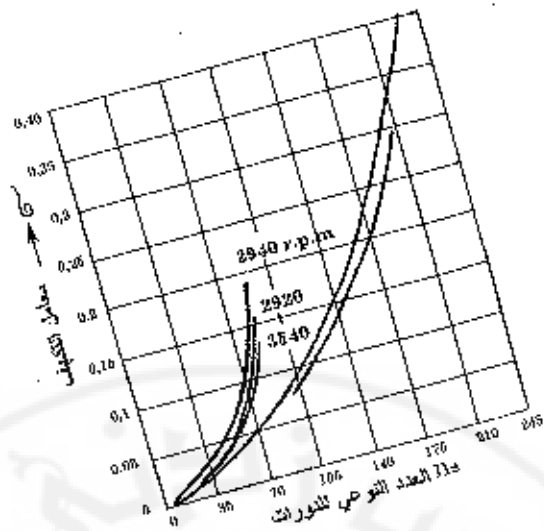
يمثل الشكل (5-27) علاقات تجريبية $\sigma(n_s)$ تم الحصول عليها لمضخات مختلفة. ينشأ أيضاً منحنى المردود كنابع لمعامل التكيف عند عدد دورات وندفق ثابتين ويعطي الهبوط الحاد لمنحني المردود مؤشراً على بدء التكيف. لتأمين عمل دون تكيف لمضخة ما (بمعامل تكيف σ معلوم) يمكن أن تستخدم مضخات بأعداد نوعية مختلفة للدورات بعد تحديد عدد الدورات الذي يستعمل به المضخة ، واستناداً إلى الدراسات النظرية تعطى العلاقات التالية :

- من أجل مضخات ذات سحب من جهة واحدة :

$$\sigma = \frac{216 n_s^{4/3}}{10^6} \quad (5-49)$$

- من أجل مضخات ذات سحب من الجهتين :

$$\sigma = \frac{137 n_s^{4/3}}{10^6} \quad (5-50)$$



الشكل (27-5)

سافة للمعامل المذكور يستخدم في بعض الحالات ما يسمى معامل تكهيف العدد النوعي C_{kr} ، بالتعريف يعبر عن عدد دورات الدوالب الذي يشابه هندسيا الدوالب المدروس $Q = 1 [m^3/s]$ وارتفاع تكهيف $\Delta h = 1 [m]$ يساعد على مقارنة المواصفات التكهيفية ذات المختلفة بغض النظر عن أبعاد المضخة أو العدد النوعي للدورات لهذه المضخة. مة C_{kr} بالعلاقة :

$$C_{kr} = \frac{\eta \sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta h}{10}\right)^{3/4}}$$

بين C_{kr} و σ بالشكل :

$$\frac{\eta_s}{C_{kr}} = \left(\frac{\sigma}{10}\right)^{3/4} \cdot 3.65$$

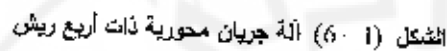
من المعادلتين (5-49) و (5-50) في المعادلة (5-52) نجد :

$$= 870 = \text{const}$$

سحب من الجهتين :

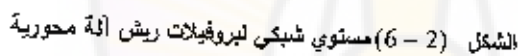
$$\eta_0 = \text{const}$$

ثلاث سرع متشابهة مناسبة عند مدخل الدوالب العامل



إن نظرية عمل الآلات المحورية تبني على استخدام نظرية البروفيل الشبكي.

إذا قطعت النواة بأسطوانة قطرها (r) ونشر هذا المقطع مع مقاطع الريش فإنه يعطي مستويًا شبكيًا لبروفيلات ريش الآلة المحورية الشكل (2-6).



تتبع الخصائص الهندسية للشبكة القيم الأساسية التالية :

4 : خطوة الريش و تساوي إلى المسافة بين النقاط المتتالية لمقاطع الريش مقاسة باتجاه حركة الشبك .

B : عرض الشبكة المقاس موازياً لمحور h : طول مقطع الريشة (الوتر) .

• زوايا الريشة عند الدخول وعند الخروج : β_{2v}, β_{1v}

β_w : زاوية تثبيت الريشة أي الزاوية بين $\vec{w}$ الريشة و محور الشبك .

هناك أيضاً نسبة وتر الريشة إلى الخطوة:

$$p = b /$$

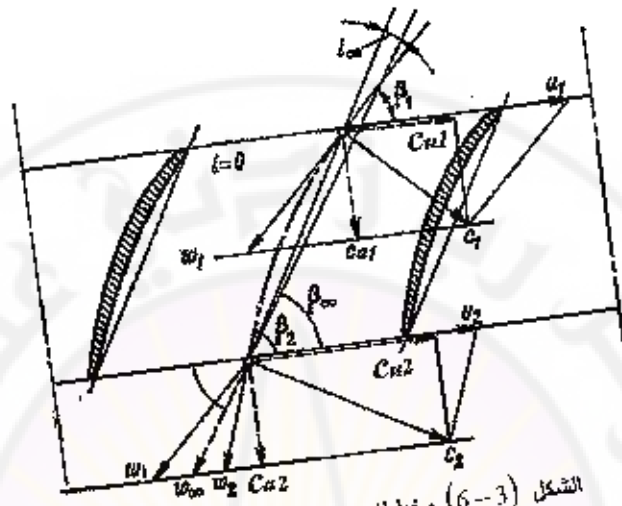
$$(6-1)$$

إن مقلوب نسبة الوتر إلى الخطوة يعرف بما يسمى الخطوة النسبية :

$$\tau \equiv 1/p = t/\hbar$$

$$\{6-2\}$$

بإنشاء مخططات السرعة عند الدخول والخروج يصبح من الممكن إدخال البارامترات الحركية للجريان عبر الشبك الشكل (3-6):
 عند الدخول والخروج: (u_1, w_1, c_1) هي على التوالي السرعات المحيطية و النسبية و المطلقة



الشكل (3-6) مخططات السرعة لريشة آلة محورية

β_1 : β_2 : زوايا الدخول والخروج ، أي بين محور الشبكة و السرعات النسبية عند المدخل و مخرج.
 : زاوية الهجوم عند الدخول (بين المماس للخط الوسطي للبروفيل واتجاه السرعة النسبية عند دخول

: زاوية الهجوم عند شبكة الريش (بين وتر الريشة و اتجاه السرعة النسبية الوسطية)
 مثلثات السرعة نلاحظ أن البروفيل الشبكي يغير السرعة النسبية والمطلقة من حيث القيمة ناه الشكل (3-6).

ية الإضافية هي فعل الفل المؤثر في الجريان الناتج عن الشبكة $(c_{u2} > c_{u1})$.

2 - المعادلات النظرية الأساسية
 :: Basic Theoretical Equations
 : Continuity Equation

بذه المعادلة على آلة محورية ويفرض أن طول الريشة هو Δr الشكل (1-6)، ومن صغير Δr يمكن اعتبار أن السرعة لا تتغير (ثابتة) ، وفي هذه الحالة فإن مساحة

مقطع الدخول ومساحة مقطع الخروج متساويان أي أن: $\Omega_1 = \Omega_2 = t \Delta r$ في المعادلة (6-3) أشعة السرعات c_1 ; c_2 عمودية على مستويات المقطع Ω_1 ; Ω_2 على التوالي ، لذلك وبفرض أن Ω_1 ; Ω_2 عموديان على محور الآلة مما يسمح القبول أن c_1 ; c_2 هي المركبات المحورية للسرعة المطلقة ، ومن الشكل (6-3) واضح أن:

$$c_{a_1} = w_{a_1} ; c_{a_2} = w_{a_2}$$

إذاً : وبالاختصار على Ω_1 ; Ω_2 نكتب معادلة الاستمرار بالشكل :

$$\rho_1 c_{a_1} = \rho_2 c_{a_2} \quad , \quad \rho_1 w_{a_1} = \rho_2 w_{a_2} \quad (6-4)$$

للسوائل غير القابلة للانضغاط $\rho_1 = \rho_2$ وبالتالي :

$$c_{a_1} = c_{a_2} ; w_{a_1} = w_{a_2} = w_a \quad (6-5)$$

ب) معادلة الطاقة Energy Equation :

لا يتم تقديم أي نوع من الطاقة للجريان خلال العملية عند حركته النسبية عبر دوارة آلة محورية ، و هنا يتم فقط تحويل الطاقة من حركية إلى كامنة و التي تترافق بضياغ في الطاقة. عندما تتغير الطاقة الحركية النوعية للحركة النسبية تدريجياً من $w_1^2/2$ حتى $w_2^2/2$ ، فإن الضغط و الكثافة يتغيران باستمرار و يمكن أن نكتب معادلة الطاقة بالصيغة:

$$\frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \Delta L$$

(6-6)

حيث ΔL : الطاقة النوعية المتحولة إلى حرارة.

تغير الطاقة الكامنة المعبر عنه بالتكامل من الطرف الأيمن بالعلاقة (6-6) يمكن أن يحسب إذا كانت العلاقة بين p و ρ وبالطبع العملية الترموديناميكية في قناة الجريان داخل دول الآلة معلومة. العملية إيزوثرمية في الآلات ذوات الضغط المنخفض (مراوح) ، و بوليتروبية في الضواغط المحورية. يمكن حساب الطاقة التي تقدمها دوارة المراوح الشبكية للجريان من المعاد الأساسية لسلالات الط - ماردة المركزية حيث $u_1 = u_2 = u$

$$L_{th} = u (c_{u2} - c_{u1}) = u \Delta c_u \quad \text{و من مثلثات السرعة المبينة على الشكل (6-3)} \\ \text{أن:} \quad c_{u1} = u_1 - c_{a1} \operatorname{ctg} \beta_1 \quad ; \quad c_{u2} = u_2 - c_{a2} \operatorname{ctg} \beta_2$$

بإدخال قيم كل من c_{u1} و c_{u2} في معادلة L_{th} و باستخدام العلاقة (6-5) ينتج :

$$L_{th} = u c_u (\text{ctg } \beta_1 - \text{ctg } \beta_2) \quad (6-7)$$

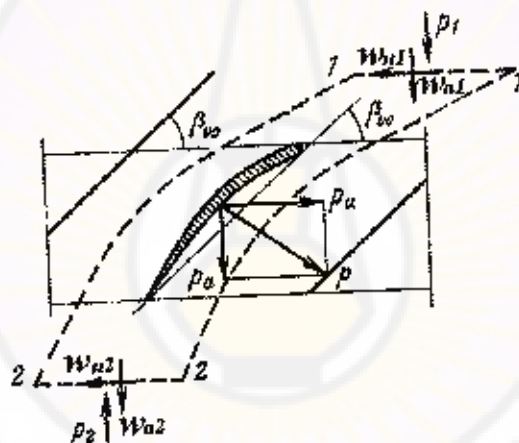
معادلة الطاقة للسرعة المطلقة للحركة عبر شبكة الريش على الدوارة لألة محورية يمكن أن تكتب بطريقة مشابهة للعلاقة:

$$\left[u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1} = c_p (T_2 - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + q \right] \quad (6-8)$$

$$u c_u (\text{ctg } \beta_1 - \text{ctg } \beta_2) = c_p (T_2 - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + q$$

ج) معادلة كمية الحركة Momentum Equation:

نستخدم هذه المعادلة لحساب قوى التأثير المتبادل بين الجريان عبر الآلة وريش الآلة المحورية. لنكن P (انظر الشكل (1-6) والشكل (4-6)) القوة المؤثرة في الجريان من جزء من الريشة بطول Δr ، ولنكن P_u, P_v هي مماسات هذه القوة على محور الآلة ومحور الشبكة على التوالي و B_{ro} زاوية تثبيت الريشة



الشكل (4-6) تحديد القوى المؤثرة على الريشة حسب نظرية كمية الحركة

نفترض أن الحركة النسبية للجريان تتم على عرض يساوي خطوة الريش t . نعتبر المقطع (1-1) كتلة مقدارها $\Delta r t w_{o1} \rho_1$ كل ثانية ولها كمية حركة مقدارها $\Delta r t w_{o1} \rho_1$ باتجاه محور الآلة، وب نفس الطريقة نجد كمية الحركة في المقطع (2-2) ويساوي $\Delta r t w_{o2} \rho_2$. إذا كانت P_1 و P_2 هي ضغوط الجريان في المقطعين (1-1) و (2-2). تكون القوى الناتجة عن هذه الضغوط $\Delta r t P_1$ و $\Delta r t P_2$. الدفع الناتج عن

القوى المطبقة باتجاه السرعة الابتدائية يساوي إلى تغير كمية الحركة (حيث يؤخذ كلا المقدارين من أجل ثانية واحدة 1s)، وبالنتيجة :

$$(P_u + \Delta r t p_1 - \Delta r t p_2) \cdot 1s = -(\Delta r t \rho_2 w_{a2}^2 - \Delta r t \rho_1 w_{a1}^2)$$

إشارة ناقص في الطرف الأيمن للعلاقة السابقة تدل على أن تغير كمية الحركة يولد قوة لتؤثر في الريش باتجاه معاكس لجهة P_u . إذا :

$$P_u = \Delta r t (p_2 - p_1) + \Delta r t (\rho_1 w_{a1}^2 - \rho_2 w_{a2}^2) \quad (6-9)$$

من أجل سائل غير قابل للانضغاط $\rho_1 = \rho_2$ وملاحظة المعادلة (6-5) $w_{a1} = w_{a2}$

، يكون :

$$P_u = \Delta r t (p_2 - p_1) \quad (6-10)$$

البروفيل الشبكي الذي يعمل على تحريك سائل غير قابل للانضغاط ، لا يغير السرعة المحورية للجريان ، وتصرف القوة المحورية المؤثرة في الجريان من أجل زيادة الضغط .
لتحديد المركبة المماسية P_u باستخدام معادلة كمية الحركة ، نكتب هذه المعادلة بعد إسقاطها على محور الشبكة .

كمية الحركة في المقطعين (1-1) و (2-2) هي:

$$\Delta r t w_{a2} \rho_2 w_{a2} \text{ و } \Delta r t w_{a1} \rho_1 w_{a1}$$

تأخذ معادلة كمية الحركة الصيغة : $P_u \cdot 1s = -(\Delta r t w_{a2} \rho_2 w_{a2} - \Delta r t w_{a1} \rho_1 w_{a1})$ ومنها ينتج :

$$P_u = \Delta r t (\rho_1 w_{a1} w_{a1} - \rho_2 w_{a2} w_{a2})$$

باستخدام العلاقة (6-4) نجد :

$$P_u = \Delta r t \rho_1 w_{a1} (w_{a1} - w_{a2}) \quad (6-11)$$

نحصل على النتيجة بالجمع الشعاعي للقوى P_u و P_a .

د (معادلة الجولان Circulation Equation :

تعطى الصيغة العامة للجولان بالشكل : $C_v = \oint_A c \cos \alpha ds$ ويمكن تطبيقها على

البروفيل الشبكي بسهولة .

بأخذ المنحني المغلق (1-1-2-2-1) الشكل (6-4) ، يمكن أن يعبر عن الجولان

كمجموع محصلة التكاملات التالية :

$$C_v = \int_1^2 w_{u1} dt + \int_1^2 w ds - \int_2^1 w_{u2} dt - \int_2^1 w ds$$

ولما كانت الخطوط (1-2) و (2-1) متساوية هندسياً و السرعات على نقاط تقاطعها

متساوية فإن الحدين الثاني و الرابع يحذفان . و بالتالي :

$$C_v = \int (w_{u1} - w_{u2}) dt$$

و بفرض أن w_{u1} و w_{u2} ثابتتان وسطياً على خطوة الريش :

$$C_v = (w_{u1} - w_{u2}) t \quad (6-12)$$

هـ (نظرية كوتا _ بوكوفسكي Kutta - Zhukowsky Theorem :

لريشة على شكل صفيحة لها $t = 1$ تتحرك بفضاء لا متناه ، تحسب قوة الرفع من النظرية

المعروفة باسم كوتا _ بوكوفسكي باستخدام العلاقة :

$$P_r = \rho w C_v \quad (6-13)$$

حيث w : السرعة النسبية للجريان

C_v : الجولان على طول المنحني المغلق الذي يحتوي الريشة . إن ريشة معزولة لا تغير

بإرامترات الجريان : السرعة النسبية هي نفسها للجريان الداخل و الخارج إلى الريشة . كما يمكن

ملاحظة من الشكل (3-6) أن شبكة الريش تغير السرعة النسبية بالقيمة و الاتجاه

($w_1 \neq w_2$) . في ذلك ينحصر الفارق الجوهرى بين تأثير ريشة معزولة (ريشة واحدة) و

تأثير شبكة الريش على الجريان .

الآن بتطبيق نظرية كوتا _ بوكوفسكي من أجل شبكة الريش و بفرض أن الجريان مثالي و

السائل غير قابل للانضغاط .

فإذا كان طول الريشة مساوياً لوحد الطول و $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ فإننا نحصل على النتيجة التالية

من المعادلتين (6-11) و (6-12) :

$$P_r = \rho w_u C_v$$

بالنسبة لمعادلة الطاقة المطبقة لأجل سائل مثالي غير قابل للانضغاط و على المقاطع (1-1)

و (2-2) الشكل (4-6) لدينا : $p_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2}$ أو بعد الترتيب :

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (w_{u2}^2 - w_{u1}^2) \quad (6-10) \text{ نجد :}$$

$$P_a = \rho \frac{w_{u1} + w_{u2}}{2} C_v$$

قوة الرفع لأجل ريشة ضمن شبكة الشكل (5-6) هي:

$$P_y = \sqrt{P_u^2 - P_a^2} = \rho C_v \sqrt{\left(\frac{w_{u1} + w_{u2}}{2}\right)^2 + w_a^2}$$

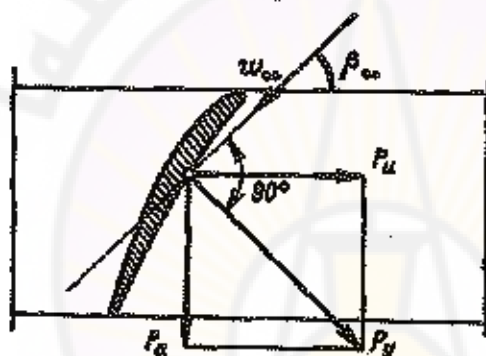
$$w_\infty = \sqrt{\left(\frac{w_{u1} + w_{u2}}{2}\right)^2 + w_a^2} \quad \text{الترميز المستخدم عموماً هو :}$$

و بالتالي

$$P_y = \rho C_v w_\infty$$

(6-14)

ويعبر هذه العلاقة عن قانون كوتا - بيوكوفسكي من أجل ريشة ضمن شبكة.



الشكل (5-6) قوة الرفع لأجل ريشة ضمن شبكة

واضح من الشكل (3-6) أن w_∞ هي القيمة الوسطية لشعاع السرعة :

$$\bar{w}_\infty = \frac{1}{2}(\bar{w}_1 + \bar{w}_2)$$

من أجل جريان الغاز خلال الشبكة يمكن أن تؤخذ الكثافة ρ في المعادلة (6-14) كمتوسط حسابي للكثافات عند الدخول و الخروج . من السهل لملاحظة أن اتجاه القوة P_y عمودي على شعاع w_∞ .

(و) المعاملات الأيروديناميكية Aerodynamic Coefficients :

إذا استخدمت الطريقة المعروفة في الأيروديناميك لحساب القوى المؤثرة في ريشة واحدة معزولة و طبقت على شبكة ريش فإنها يمكن أن تكتب بالشكل :

$$P_y = C_y \rho b \frac{w_\infty^2}{2} ; \quad P_x = C_x \rho b \frac{w_\infty^2}{2} \quad (6-15)$$

حيث C_x و C_y هي معاملات الرفع و المقاومة على الترتيب.

P_y و P_x الرفع و المقاومة الناتجة عن التأثير المتبادل بين الجريان و الريشة في الشبكة .

المعامل C_y يمكن أن يحدد تجريبياً فقط أما المعامل C_x فيمكن أن يوجد من الدراسات النظرية بشكل تقريبي أو أن يحدد بشكل دقيق استناداً إلى بيانات تجريبية .

بمعالجة المعادلتين (6-14) و (6-15) بشكل مشترك نجد : $\rho w_\infty C_y = C_x \rho b \frac{w_\infty^2}{2}$ بالمقارنة مع المعادلة (6-12) تجعل المعادلة أعلاه ممكناً أن نجد قيمة C_y :

$$C_y = 2 \frac{t}{b} \frac{w_{1u} - w_{2u}}{w_\infty}$$

وباستخدام النسب المثلثية أنظر الشكل (6-3) :

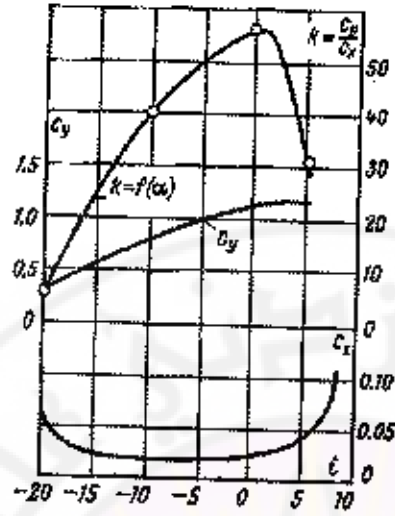
$$\frac{w_{1u}}{w_\infty} = \text{ctg} \beta_1 \sin \beta_\infty ; \quad \frac{w_{2u}}{w_\infty} = \text{ctg} \beta_2 \sin \beta_\infty$$

ينتج :

$$C_y = 2 \frac{t}{b} (\text{ctg} \beta_1 - \text{ctg} \beta_2) \sin \beta_\infty \quad (6-16)$$

تسمح هذه المعادلة بحساب المعامل C_y بمعرفه بارامترات شبكة الريش.

يتم الحصول على القيم التجريبية لكل من C_y و C_x من خلال اختبار شبك ريش مختلف الأشكال وبزوايا هجوم متعددة في نفق هوائي . حيث تقاس السرعة والكثافة والقوى P_y و P_x ومن ثم تحسب C_y و C_x باستخدام العلاقة (6-15). تعرض النتائج المستحصل عليها من الاختبارات في النفق الهوائي على شكل مخطط ، على سبيل المثال كما في الشكل (6-6) . في مرحلة التصميم ، يختار المخطط لنموذج هندسي لشبك محدد ويتم إيجاد قيم C_y و C_x من المخطط من أجل زاوية هجوم نوعية مع قيم P_y و P_x المحسوبة بالعلاقة (6-15) .



الشكل (6-6) نتائج الاختبارات عند السرعات المنخفضة لشبك ريشة محدد

6-1-3 - أداء وفاعلية المضخات المحورية Performance & Efficiency Of

Axial - Flow Pumps

يحسب الضاغط النظري الذي يمكن أن تقدمه دوارة آلة ضخ محورية باستخدام معادلة أويلر.

وبالأخذ بعين الاعتبار أن $u_1 = u_2 = u$ نحصل على المعادلة (6-7)، الآن وبإدخال معامل التدفق في المعادلة:

$$\varphi = \frac{c_a}{u} \quad (6-17)$$

يحدد معامل التدفق الحجمي الذي يعبر واحدة السطح من المقطع العرضي لشبك الريش، عندها نجد:

$$H_{th} = \frac{u}{g} c_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) = \frac{u^2}{g} \varphi (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) \quad (6-18)$$

الضغط النظري المقدم من الدوارة هو:

$$p_{th} = \rho g H_{th} = \rho u^2 \varphi (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) \quad (6-19)$$

تضيق الطاقة في الآلات المحورية بفعل الاحتكاك وتشكل الأعاصير في الجريان وتسرب السائل من الوصلات والاحتكاك الميكانيكي في المساند والمحامل .
في الآلات المحورية التي تعمل على تحريك سائل غير قابل للانضغاط ، يحكم على جودة الشبك من خلال مردود الشبك :

$$\eta_{cs} = \frac{p}{p + \Delta p} = \frac{p}{p_{th}} \quad (6-20)$$

حيث p و p_{th} الضغط الفعلي والضغط النظري المرفوع خلال الشبك . Δp ضياع الضغط في الشبك .

إذا رفع الشبك الضغط من p_1 إلى p_2 عندها :

$$\eta_{cs} = \frac{p_2 - p_1}{p_2 - p_1 + \Delta p} \quad (6-21)$$

وبالنسبة لسائل غير قابل للانضغاط وحسب المعادلة (6-6) لدينا :

$$p_2 - p_1 + \Delta p = \rho \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \quad (6-22)$$

ومن مثلثات المبرج عند الدخول والخروج ينتج :

$$\rho \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} = \rho (w_{u1} - w_{u2}) w_a \operatorname{ctg} \beta_\infty$$

حيث β_∞ الزاوية بين شعاع w_∞ ومحور الشبك .
باستخدام المعادلة (6-22) ينتج لدينا :

$$p_2 - p_1 + \Delta p = \frac{P_u}{t} \operatorname{ctg} \beta_\infty$$

استنادا للمعادلة (6-10) لشبك فيه $\Delta r = 1$:

$$p_2 - p_1 = \frac{P_a}{t}$$

وبالتالي :

$$\eta_{cs} = \frac{P_a}{t} ; \frac{P_u}{t} \operatorname{ctg} \beta_\infty = \frac{P_a}{P_u \operatorname{ctg} \beta_\infty} \quad (6-23)$$

حسب الشكل الشكل (6-7) يمكن إيجاد قيمة P_u و P_a :

$$P_u = P_y \cos \beta_\infty - P_x \sin \beta_\infty ; P_a = P_x \cos \beta_\infty + P_y \sin \beta_\infty \quad (6-24)$$

بتعويض قيم P_u و P_o في المعادلة (6-23) بعد معالجتها :

$$\eta_{cs} = \frac{1 - \mu \operatorname{ctg} \beta_{cs}}{1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_{cs}} \quad (6-25)$$

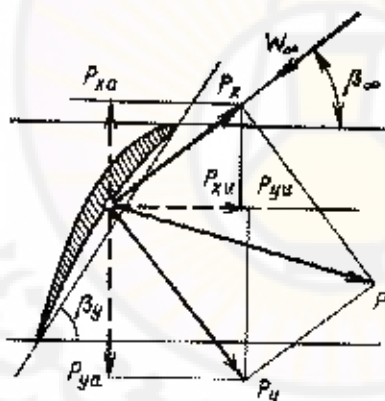
حيث μ نسبة المقاومة - الرفع للريشة . ومن أجل ريش الآلات المحورية $\mu = 0,02 \div 0,04$.
 ومن أجل $\mu = 0,03$ و $\beta_{cs} = 25 \div 45^\circ$ يكون مردود الشبك $\eta_{cs} = 0,9 \div 0,94$.
 ولزيادة مردود آلة محورية يجب أن تستخدم بروفيلات ريش بحيث تؤمن μ بأصغر ما يمكن .
 يستنتج الضغط الفعلي من الضغط النظري المحدد بالعلاقة (6-19) :

$$p = p_{th} \eta_{cs} = \rho u^2 \varphi (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \eta_{cs} \quad (6-26)$$

الضغط الفعلي المولد من آلة ضخ محورية يتشكل من مجموع عدة مراحل فعل جزء السحب ومن ثم المرور عبر شبك الريش وبعد ذلك منطقة الضخ (الناشرة) . تعمل منطقة الضخ كناشرة مما يؤدي لزيادة الضغط :

$$\Delta p_{dif} = \rho \frac{c_3^2 - c_4^2}{2} \quad (6-27)$$

حيث c_3 و c_4 السرعة المطلقة عند منطقة الضخ (مدخل ومخرج الناشرة) .



الشكل (6-7) مركبات القوة المؤثرة على الريشة في آلة الجريان المحورية

إذا كان $\sum \Delta p$ ضياع الضغط في جزء السحب ومنطقة الضخ يكون الضغط المولد في المرحلة :

$$p_u = \rho u^2 \varphi (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \eta_{cs} + \Delta p_{dif} - \sum \Delta p \quad (6-28)$$

تحسب الضياعات $\sum \Delta p$ باستخدام العلاقات الهيدروليكية .

تعتمد معاملات الفقد المكانية على تصميم كل من جزء السحب ومنطقة الضخ. مردود المرحلة الهيدروليكي هو :

$$\eta_h = \frac{P_{st}}{P_{th}} \quad (6-29)$$

المضخات والمراوح المحورية $\eta_h = 0,75 \div 0,92$.
يؤخذ المردود الميكانيكي لمجموع الضياعات الناتجة عن الاحتكاك في المساند والمحامل وكذلك الناتجة عن احتكاك القرص: $\eta_m = 0,94 \div 0,98$. ضياعات التسرب قليلة ويمكن أن تهمل وبالتالي يكون المردود الفعلي لمرحلة: $\eta = \eta_h \eta_m = 0,7 \div 0,9$ وتحسب استطاعة محور الدوران من العلاقة:

$$N = \frac{M \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta} \quad (6-30)$$

6-1-4 - حساب المضخات المحورية : Calculation Of Axial - Flow Pumps

تحدد الأبعاد الرئيسية للمضخات والمراوح المحورية استنادا لمعادلة أويلر ومعادلة الاستمرار . وب نفس الوقت يتم اعتماد مميزات العمل النوعية والنسب التصميمية لآلات متفردة وجيدة الأداء.

تحدد قيم البارامترات التالية قبل البدء بالتصميم :

H الضاغط مقاسا بالأمتار ارتفاع عمود من السائل المراد تحريكه في هذه الآلة .

$Q [m^3/s]$ الغزارة . وكذلك الخواص الفيزيائية للسائل .

ترتبط الآلات المحورية لمحركات كهربائية بشكل مباشر وفي هذه الحالة فإن عدد دورات محور الآلة سيكون مساويا لعدد دورات المحرك الكهربائي .

تتمتع الآلات المحورية عادة بسرعات دوران أكبر من تلك لآلات الطاردة بمرّة ونصف إلى مرتين من أجل بارامترات تشغيل نفسها، لذلك تعرف الآلات المحورية بالنسبة للمستهلكين بأنها آلات أسرع من الآلات الطاردة.

يجب أن تراعى قيم حدية للسرعات المحيطية عند نهايات الريش أثناء التصميم. فمثلا : في المضخات المحورية يسمح بوصول السرعة المحيطية إلى $60 [m/s]$ ، أما في المراوح المحورية فيمكن أن تصل هذه السرعة حتى $100 [m/s]$ لتجلب الأصوات عالية الضجيج . في الضواغط المحورية يجب أن تؤخذ ضمن المجال 200 - 300 وحتى $400 [m/s]$ بهدف تقليل عدد المراحل. على العموم هناك ميل لتحديد عدد ماخ $M = c/a$ عند نهايات ريش

الدوارة بحدود $(0,8 \div 0,9)$. (باستثناء الضواغط فوق الصوتية والتي هي خارج إطار البحث هنا) .
بحسب قطر نواة (صرة) الدولاب النسبي بالعلاقة:

$$\nu = \frac{D_h}{D_{out}} = 0,4 \div 0,8$$

يؤخذ معامل الضغط φ بحدود $0,4 \div 0,8$. يحدد قطر دوارة الآلة من معادلة الاستمرار :

$$c_a = \frac{Q}{0,785 D_{out}^2 (1 - \nu^2)} = k_\varphi \nu u = k_\varphi \nu \frac{\pi D_{out} n}{60}$$

حيث : $k_\varphi = \frac{c_a}{u_h}$. وبشكل أوضح يمكن تحديد قطر الآلة المحورية D_{out} :

$$D_{out} \approx 2,9 \sqrt[3]{\frac{1}{\nu(1-\nu^2)}} \sqrt[3]{\frac{Q}{k_\varphi n}} \quad (6-31)$$

بإعطاء ν و k_φ فإن المعادلة أعلاه تحدد قطر الآلة المحورية ، حيث تؤخذ $0,6 \div 1$:

عادةً . بعد ذلك يحدد قطر النواة $D_h = \nu D_{out}$ ليصار إلى تحديد طول الريشة :

$$l_v = \frac{D_{out} - D_h}{2}$$

إن عدم إمكانية تطبيق سرعات دوران عالية تظهر بشكل واضح من خلال المعادلة (6-31) التي تبين أن D_{out} تنقص بزيادة n . كما تمت الإشارة أعلاه ، فإن حركة عناصر الريشة بشكل مختلف من مركز الدولاب تؤدي إلى اختلاف فعالية أدائها . لذلك ، فإن الحسابات يجب أن تتجزأ

على أساس القطر الوسطي التربيعي $D_{rms} = \sqrt{\frac{D_{out}^2 - D_h^2}{2}}$ ، والريش على شكل الجناح

يمكن أن تستخدم فقط عندما $\nu \geq 0,7$. من أجل $\nu < 0,7$ ، تقسم الريشة على طولها من 7 إلى 10 أجزاء ، وبحسب القطر الوسطي التربيعي على كل جزء من هذه الأجزاء بشكل مستقل ، والتي تؤدي نتائجها إلى حساب زوايا الدخول والخروج المختلفة للريشة ، وأيضاً الشكل الانحنائي لكامل الريشة (الشكل اللولبي) . لما كانت المركبة المحورية للسرعة $c_a = \varphi u_{out}$ معلومة

لأجل قيم متباعدة φ ، هنا لدينا ، أن الريش لا تزود بزوايا قتل عند المدخل :

$$\beta_1 = \arctg \frac{c_a}{u_{av}}$$

$$\beta_2 = \arctg \frac{c_a}{u_{av} - c_{u2}}$$

تحدد قيمة c_{H2} من المعادلة الأساسية للآلة :

$$c_{2u} = \frac{g H}{\eta_h u_{av}}$$

حيث : H الضاغط المقدم من مرحلة واحدة من الآلة .

η_h المردود الهيدروليكي وهو بحدود $(0,75 \div 0,92)$.

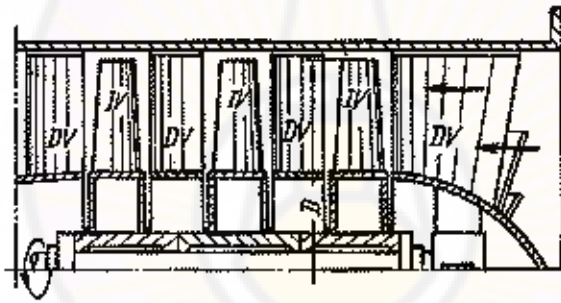
زوايا الدخول والخروج للريشة هي :

$$\beta_{2v} = \beta_{1v} + \Delta\beta_v \quad \beta_{1v} = \beta_1 + i \quad ; \quad i = 2 \div 7^\circ$$

تؤخذ قيم i استنادا إلى النتائج التجريبية لاختبارات شبك الريش المجراة في النفق الهوائي .

يعتمد عدد ريش للدوارة في المضخات المحورية بحدود من 3 إلى 6 ريش ويصل هذا العدد إلى 40 في المراوح المحورية. في الآلات المحورية متعددة المراحل، تتوضع بين كل مرحلتين متتاليتين ريش ثابتة توجه التيار من ريشة إلى الريشة التي تليها الشكل (8-6) تتمتع ريش

التوجيه بزاوية دخول $\alpha_2 = \arctg \frac{c_a}{c_{H2}}$ وزاوية خروج $\alpha_3 \approx 90^\circ$.



الشكل (8-6) آلة جريان محورية ذات ثلاثة مراحل

بمعرفة الخطوة النسبية $\tau = 0,5 \div 1,5$ يحدد وتر البروفيل $b = t/\tau$ (حيث تحسب t من قطر الدوارة ومن عدد الريش المعتمد). يمكن رسم بروفيل الريشة من خلال بناء خط القوس الأساسي من أجل الزوايا β_{v1} , β_{v2} المحددة و b وباستخدام المؤشرات النسبية للبروفيلات. من أجل الريش الطويلة $\nu < 0,7$ يتغير وتر البروفيل على طول الريشة ، أي أن: $b_h = (1 \div 1,5) b_{out}$ حيث b_{out} وتر البروفيل عند دائرة القطر الخارجي للدوالب .

6-1-5 - المميزات وضبط التدفق Characteristics & Capacity Regulation

كما هو الحال في الآلات الطاردة المركزية فإن المنحنيات المميزة تعطى لكل من الضاغط (الضغط) والاستطاعة والمردود كتوابيع للغزارة . ترسم المنحنيات المميزة من أجل عمل الآلة بعدد دورات ثابت استنادا إلى نتائج تجريبية ، ومن ثم تحسب المنحنيات المميزة عند عمل الآلة بأعداد دورات مختلفة استنادا إلى قوانين التشابه . تعتمد المنحنيات المميزة في شكلها على تصميم الآلة وعلى مواصفاتها الأيروديناميكية .

خلافا لآلات الطاردة فإن للمنحني المميز ضاغط - غزارة شكل سرج الشكل (9-6) ومن الممكن أن يكون هذا المنحني هابطا باستمرار من أجل الآلات ذات الضغوط المنخفضة يرجع الشكل المرجعي للمنحني إلى أن الرفع ينقص من أجل الغزارات المنخفضة وتزداد زوايا الهجوم .

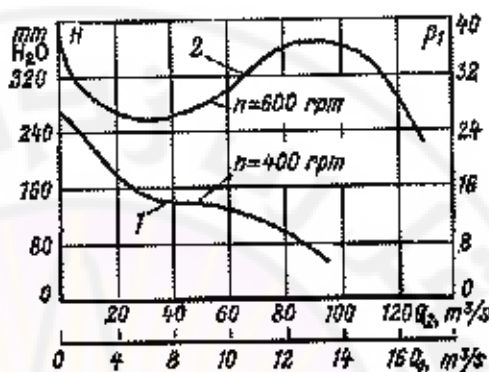
يلاحظ أن منحنيات الاستطاعة تبين انخفاضا مع ازدياد الغزارة Q أو أنها تحافظ على خط أفقي الشكل (10-6) وبالنسبة فإن الآلات المحورية يجب أن تعمل والتصاميم مفتوحة تماما على خط الضخ أي بالغزارة الأعظمية (تحت الحمل) .

يتمتع منحني المردود في الآلات المحورية عندما تكون ريش الدولاب العامل مثبتة بإحكام على النواة بذروة واضحة . الانحراف في شروط التشغيل عن الشروط المثالية مستوذي إلى تغير المردود ونقصاته عن القيمة العظمى الموافقة لشروط التشغيل المثالية .

تنتج الآلات المحورية في بعض الحالات بحيث تكون الريش قابلة للتعديل أي أنها قابلة لأن تدار بالنسبة للدولاب أثناء التشغيل، في هذه الحالة ، يمكن أن يتغير التدفق تبعا لوضع الريش دون أن ينقص المردود بشكل ملحوظ .

تختار منطقة التشغيل للآلة ضمن الجزء المستقر للمنحنيات المميزة إلى اليمين من الذروة B الشكل (10-6) . الضغط الأعظمي المسموح به يساوي 0,9 من قيمة الضغط في النقطة B من المنحني . ويسمح أن يتم التشغيل بحيث ينخفض المردود إلى $0,9 \eta_{max}$. كما هو الحال في الآلات الطاردة فإن المنحنيات المميزة للآلات المحورية يمكن أن تحمل على إحداثيات لا واحدة . يمكن تغيير الغزارة في الآلات المحورية بطرق عدة منها تغيير السرعة ، التحكم بريش الدوارة و ريش التوجيه عند المدخل أو عن طريق الخنق .

أما استخدام دوارات ذوات ريش قابلة للتوجيه أو استخدام ريش توجيه عند مدخل الآلة فهي تمثل هلا جيدا للتحكم بالغازة لأنها تجعل من الممكن استثمار طاقة التشغيل بشكل اقتصادي فعال .



$\Omega = \text{const}$ ثرثرة محورية

في هذه الآلة يتم سحب السائل نتيجة دوران الدوارة حيث يدخل بين الريش ليضرب منها بفعل القوى النابذة إلى قناة التجميع مشكلاً بذلك إعصاراً محورياً. تتمتع قناة التجميع بمركز مغاير لذلك الذي يتمتع به عمود الدوران. يتأخر السائل داخل القناة بسرعه عن الدوارة الدائرية فيضطر التيار الإعصاري إلى الدخول من جديد في المجال بين الريش لينال قدرة إضافية من الدوارة. تنتهي قناة التجميع بفتحة الضخ ، ويفصل الحاجز في قناة التجميع بين السحب والضخ. تولد المضخة الإعصارية ضغطاً أكبر من $(7 + 3)$ مرات من الضغط الذي تولده آلة طاردة لها نفس الأبعاد ونفس عدد الدورات. بما أن فتحة الدخول إلى المضخة وفتحة الخروج منها موجودتان في القسم العلوي للمضخة فإنها تبقى مملوءة بالسائل ولا حاجة لصب السائل فيها عند إعادة التشغيل لذلك فإن المضخات الإعصارية ذاتية الامتصاص.

- 195 -

مساوي هذه الآلة: انخفاض المردود الذي لا يزيد عن 45 %

تستخدم المضخة الإعصارية في :

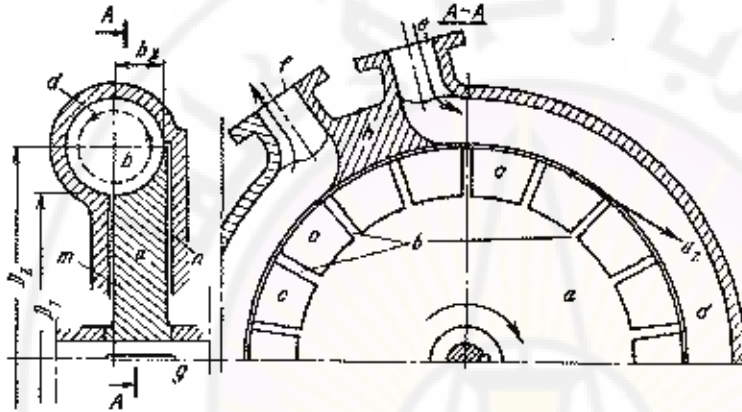
1 - الصناعات الكيميائية لضخ المواد الحساسة أو المواد اللزجة.

2 - لضخ المواد النقطية - (بنزين - كحول - الخ) .

3 - لضخ السوائل المشبعة بالغازات.

4 - في بعض الاستخدامات الزراعية

6 - 2 - 1 - طريقة عمل المضخة الإعصارية Theory Of Operation :



الشكل (11-6) المخطط التصميمي لمضخة إعصارية

يبين الشكل (11-6) المخطط التصميمي للمضخة الإعصارية ، بشكل الدولاب الدائر a مع الريش القطرية المستوية b أفتية منحنية V ، قناة الدفع g ، الحاجز الداخلي h . تتولد في السائل الداخل إلى الأفتية بين الريش عند دوران الدولاب قوى طاردة مركزية، وهذا يؤدي إلى حركة مستمرة للسائل في هذه الأفتية عبر المقطع الأسطواني $\pi D_2 b_2$ إلى قناة الدفع g ،

يخرج السائل بشكل مستمر من الأفتية المتشكلة إلى قناة مقطعها الدائري $\frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2)$.

وبهذا الشكل يتشكل في قناة الدفع جريان إعصاري ، مبين على الجهة اليسرى من الشكل (11-6) بشكل مهشور . غير ذلك تظهر في هذه القناة جريانات مماسية باعتبار أن السائل المقذوف من الأفتية بين الريش يملك سرعة مماسية c_{H2} . وبالتالي فإن مبدأ عمل المضخة الإعصارية هو أن طاقة السائل المتحرك عبر الأفتية مابين ريش الدولاب الدائر تزداد

نتيجة لتأثير القوة الطاردة المركزية ، يتحرك السائل ذو الطاقة المرتفعة بشكل تيار إعصاري إلى جهة الدفع ومن ثم فيما بعد إلى أنبوب الدفع .

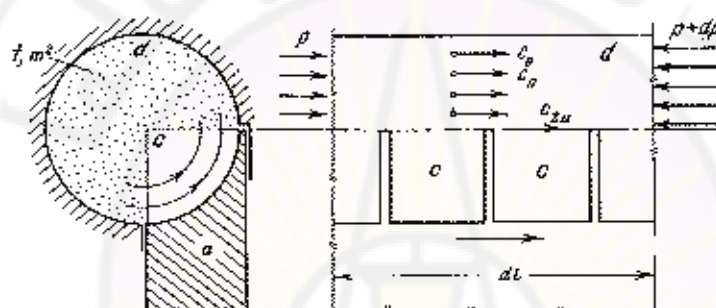
6-2-2 - الأساس النظري Basic Theory:

القيم النظرية للبارامترات الأساسية (دون اعتبار الضياعات) - يمكن إيجاد الضغط والغزارة للمضخة الإعصارية من معادلة كمية الحركة . بفرض :

$q [m^3 / cm]$ التدفق عبر الأفنية بين الريش من أجل واحدة طول قناة الدفع.

$c_{u2} [m/s]$ القيمة الوسطية للمركبة المماسية للسرعة المطلقة عند الخروج من الأفنية بين الريش إلى قناة الدفع.

$c_0 [m/s]$ السرعة الوسطية للتيار في قناة الدفع .



الشكل (12-6) حساب الضغط المتولد عن المضخة الإعصارية

بفرض أن محور قناة الدفع مستقيم تقريباً ، تبعا للشكل (12-6) تكون معادلة كمية الحركة للتيار الخارج من الدوالب إلى القناة :

$$[fp - f(p + dp)]_T \Delta t = \rho \cdot g \cdot dl \cdot \Delta t \cdot c_0 - \rho \cdot g \cdot dl \cdot \Delta t \cdot c_{u2}$$

وبالتالي :

$$dP_T = \rho \frac{g}{f} (c_{u2} - c_0) dl^* \quad (6-32)$$

من (6-32) نجد أن الضغط يزداد في قناة الدفع مع اتجاه الحركة بالتناسب مع طول القناة .
بمكاملة (6-32) نحصل على ارتفاع الضغط النظري على طول قناة الدفع l :

$$P_T = \rho \frac{g}{f} (c_{u2} - c_0) l$$

ارتفاع الضاغط النظري من أجل الطول l للقناة :

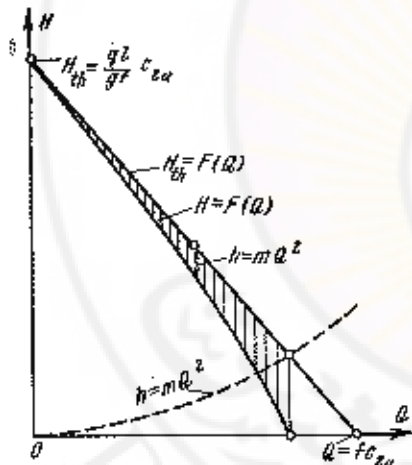
$$H_T = \frac{P_T}{\rho g} = \frac{q \cdot l}{f \cdot g} (c_{u2} - c_0) \quad (6-33)$$

التدفق في مقطع القناة $Q = f \cdot c_0$ لذلك فالمعادلة (6-33) تقود للمواصفات النظرية للمضخة الإعصارية بالصيغة التالية :

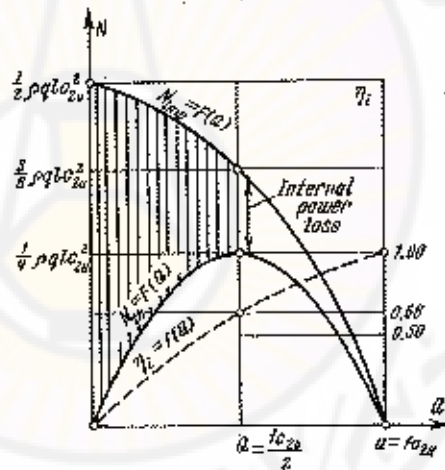
$$H_T = \frac{q \cdot l}{f \cdot g} \left(c_{u2} - \frac{Q}{f} \right) \quad (6-34)$$

ونظرا لثبات q ، c_{u2} على طول قناة الدفع فإن المعادلة (6-34) تمثل بيانيا بخط مستقيم كما في الشكل (6-13) .

تناسب ضياعات الضغط في جوف المضخة مع مربع الغزارة ، لذلك عند إنشاء المنحني المميز لهبوط الضغط والمبين على الشكل (6-13) ستكون معادلته $h = mQ^2$ ، وتكون معادلة المنحني المميز الفعلي $H = f(Q)$.



الشكل (6-13) المميزات النظرية والفعلية لضغط المضخة الإعصارية



الشكل (6-14) استطاعة ومردود المضخة الإعصارية

الاستطاعة النظرية للمضخة الإعصارية :

$$N_T = \rho g Q H_T$$

وباعتبار المعادلة (6-34) نجد :

$$N_T = \rho \frac{q \cdot l}{f \cdot g} \left(C_{u2} - \frac{Q}{f} \right) Q \quad (6-35)$$

تمثل هذه المعادلة بياناً على الشكل (6-14) فيكون المنحني عبارة عن قطع مكافئ متناظر حول محوره الشاقولي ، بملاحظة أن $N_T = 0$ عندما $Q = 0$ ، $Q = f \cdot C_{u2}$ كما أن القيمة الأعظمية لـ N_T توجد باشتقاق N_T بالنسبة لـ Q :

$$\frac{dN_T}{dQ} = \rho \frac{q \cdot l}{f \cdot g} \left(C_{u2} - 2 \frac{Q}{f} \right) = 0$$

وبالتالي فإن قيمة Q التي تكون عندها الاستطاعة أعظمية N_T $\Rightarrow Q = f \cdot C_{u2} / 2$ ، وبالتالي فإن القيمة الأعظمية لـ N_T تحسب من العلاقة :

$$(N_T)_{\max} = \rho q C_{u2}^2 / 4 = m C_{u2}^2 / 4 \quad (6-35)$$

حيث m كتلة المسائل المار عبر القنوات بين ريش الدولاب الدائر في ثانية واحدة ، الشكل (6-14) يبين المنحني المميز $N_T = f(Q)$. يزيد الدولاب العامل للمضخة المركبة المماسية للسرعة من C_0 حتى C_{u2} ، مركبة السرعة للجريان الإعصاري في قناة الدفع والدولاب الدائر تبقى ثابتة تبعاً لشرط الاستمرار . لذلك فإن الاستطاعة المبذولة من قبل الدولاب الدائر للمضخة الإعصارية يمكن حسابها كفرق الطاقة الحركية الآتية للتيار عند المخرج والمنخل :

$$N_{p,K} = \frac{m C_{u2}^2}{2} - \frac{m C_0^2}{2} = \rho \frac{q \cdot l}{2} \left(C_{u2}^2 - \frac{Q^2}{f^2} \right) \quad (6-36)$$

بإعطاء قيم مختلفة للغزارة وإيجاد قيم $N_{p,K}$ الموافقة يتم إنشاء المنحني $N_{p,K} = f(Q)$ كما في الشكل (6-14) بالتذكير أن : $N_{p,K}$ هي الاستطاعة النظرية المبذولة من قبل الدولاب . N_T هي الاستطاعة النظرية المفيدة .

يمثل المردود الداخلي النسبة بين N_T و $N_{p,K}$ وباستفادة من العلاقات (6-35) و (6-36) :

$$\eta_i = \frac{N_T}{N_{p,K}} = \frac{2Q}{f \left(C_{u2} + \frac{Q}{f} \right)}$$

وباستبدال الغزارة بقيمتها $Q = f \cdot C_0$ نجد أن :

$$\eta_i = \frac{2c_{10}}{c_{u_2} + c_0} \quad (6-37)$$

بإعطاء قيم مختلفة للغزارة وإيجاد قيم المردود الداخلي الموافقة يمكن رسم المنحني المميز للمردود الداخلي كما هو مبين على الشكل (14-6) (المنحني المنقط)، تحسب قيمة ضياعات الطاقة الداخلية الناتجة عن نقل الطاقة من الدولاب الدائر لتيار السائل في قناة الدفع تحسب بالفرق بين $N_T = f(Q)$ و $N_{P,K} = f(Q)$.

نستنتج مما سبق أنه عند عدد دورات ثابت للدوارة فإن الضياعات الداخلية للطاقة في المضخة الإعصارية تكون أكبر كلما صغرت الغزارة وبالتالي فإن استئثار المضخة الإعصارية عند نظام خنق كبير غير اقتصادي .

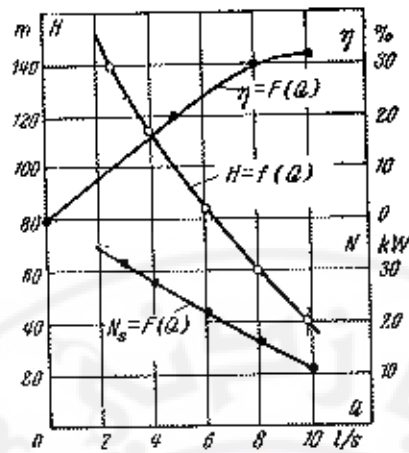
6-2-3 - المميزات الفعلية Actual Characteristics:

إضافة إلى الضياعات الداخلية والتي تصف ضياعات الطاقة الداخلية الحاصلة عند نقل الطاقة من الدولاب العامل إلى السائل في قناة الدفع والتي عبرنا عنها بدلالة المردود الداخلي بالعلاقة (36-6) تلاحظ ضياعات حجمية وهيدروليكية وميكانيكية للطاقة .

هنا الضياعات الحجمية كبيرة وتصل حتى 20% من الطاقة المعطاة لمجور المضخة الإعصارية . وتعبر عن تسرب السائل عبر الفراغات بين سطوح الحاجز K - انظر الشكل (11-6) وبين حواف الريش b للدولاب الدائر من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة السحب $p_2 > p_1$.

الضياعات الهيدروليكية للطاقة تظهر نتيجة الاحتكاك وتشكل الأعاصير عند بدء الحركة الإعصارية للسائل في قناة الدفع دائرية الشكل . إن سرعات هذه الحركة عالية و الضياعات الهيدروليكية للطاقة تصل حتى 30% من الطاقة عند المحور .

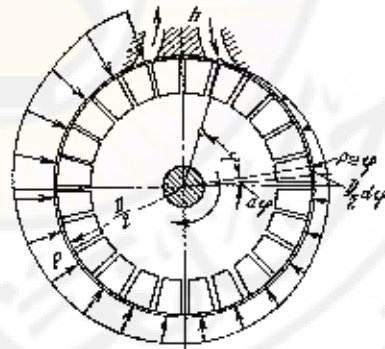
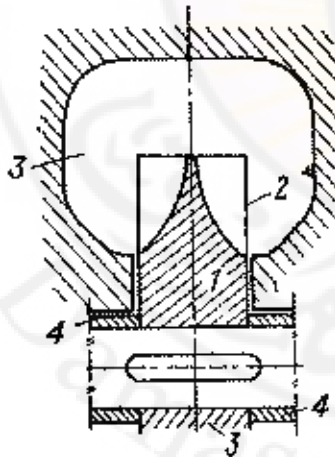
الضياعات الميكانيكية كما هو في المضخات الطاردة المركزية نتيجة الاحتكاك في المساند والمضاجع والاحتكاك الحاصل في السطوح غير الدائرية لدولاب المضخة ، هذه الضياعات تشكل حوالي 10% من الطاقة المعطاة للمضخة . وبالتالي باعتبار هذه الضياعات جميعها فإن مردود المضخة الإعصارية لا يزيد عن 50% . يبين الشكل (15-6) المنحنيات المميزة للتجريبية للمضخة الإعصارية نوع $B-2,7$ والمردود الأعظمي لها لا يتجاوز 32%.



الشكل (15-6) المنحنيات المميزة التجريبية للمضخة الإعصارية

6-2-4 موازنة القوى المؤثرة في دواليب المضخة الإعصارية Impeller Balancing

الدواليب العامل للمضخة الإعصارية محاط بقوى طولية وعرضية تؤثر في المحور . تظهر القوة الطولية نتيجة اختلاف الضغط عند السطوح المتقابلة للدواليب وذلك في الفراغات المحورية m و n انظر الشكل (11-6) هذه القوى ليست كبيرة ويمكن إهمال تأثيرها الشكل (16-6) . تظهر القوة العرضية نتيجة زيادة الضغط في قناة الدفع باستمرار كما تظهر المعادلة (32-6) والتجربة أيضا وتتناسب مع الزاوية φ الشكل (17-6) .



الشكل (6-6) الدواليب الدائر مع القوى المحورية المتوازنة

الشكل (17-6) توزيع الضغط على طول

1 الدواليب الدائر ذو المقطع المتناظر 2 الريش العاملة
3 قناة الدفع ذات المقطع المتناظر 4 الجلبة

. قناة الدفع للمضخة الإعصارية

إذا كان H الضاغط الذي تعطيه المضخة ، فإن الضغط في مقطع ما من القناة يساوي :

$$\frac{\rho g H}{2\pi} \varphi \sin \varphi \quad \text{أما مركبته العرضية فتساوي :} \quad \frac{\rho g H}{2\pi} \varphi$$

القوة العرضية المؤثرة على طول $\frac{D}{2} d\varphi$ من أجل عرض B للدوارة ستكون :

$$B \frac{D}{2} \frac{\rho g H}{2\pi} \varphi \sin \varphi d\varphi$$

القوة العرضية الكلية :

$$P_x = B \frac{D}{2} \frac{\rho g H}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi \sin \varphi d\varphi$$

بعد إجراء التكامل وإجراء إصلاح بسيط نجد أن :

$$P_x = \frac{\rho g H B D}{2} \quad (6-38)$$

تأخذ القوة العرضية في المضخات الإعصارية قيمة عالية فمثلا من أجل $\rho = 10^3 [kg/m^3]$, $D = 150 [mm]$, $H = 100 [mH_2O]$, $B = 40 [mm]$ تكون $P_x = 3000H$ أي تقريبا $3000 [kgf]$.

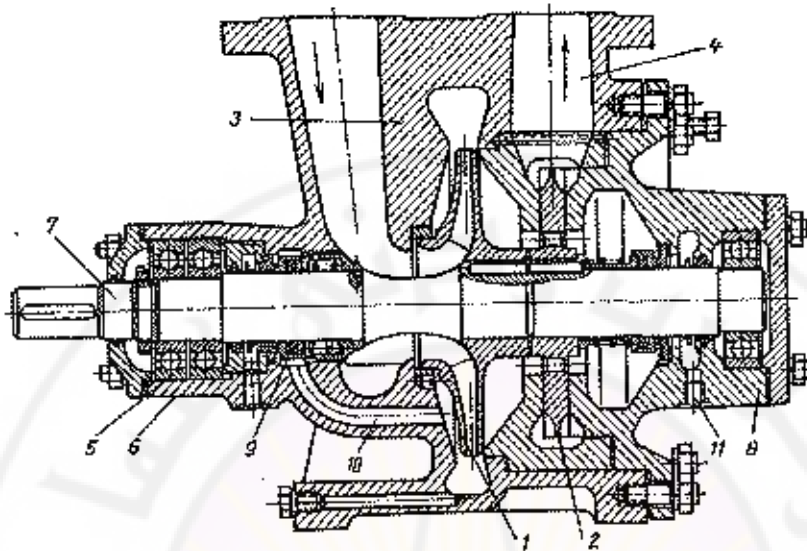
تؤثر القوة العرضية في المحور بإجهادات متغيرة ومتذبذبة وهذا يؤدي إلى التوائه وإزاحة أفراس سطوح الدوارة ، وهذا يستدعي زيادة الفراغات المحورية والتي ستؤثر في أداء المضخة .
للتخلص من القوة العرضية يستخدم شكل مغلق للدولاب الدائر ، حيث يتم تشكيل أفتية عن طريق التفريز على أفراس المسطوح للدولاب الدائر ، هذا يؤدي إلى موازنة مركبة القوى العرضية (الناتجة عن عدم انتظام توزيع الضغط) في أي مقطع طولي في الأفتية بين الريش .

6-2-5 - المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية - Centrifugal Regenerative

: Turbine Pumps

يتم تحريك المسائل في المضخات الإعصارية ودفعه من قبل الدولاب الدائر عند محيط الدوارة أي : في منطقة السرعات العالية ، وهذا يزيد احتمال حدوث التكهف عند مدخل الدوارة حيث أثبتت التجارب إمكانية حدوث التكهف عند سرعات دوران كبيرة .
ولتجنب حدوث التكهف يمكن زيادة الضغط عند المدخل في الدوارة الإعصارية ، ولتحقيق ذلك يتم تركيب دوارة طاردة مركزية إضافية على محور الدوارة الإعصارية . المضخة من هذا النوع

والمكونة من دوارتين متتاليتين طاردة وإعصارية تسمى المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية . والمبينة بالشكل (18-6) .



الشكل (18-6) المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية

الشكل يبين مقطعاً طولياً لمثل هذه المضخات ، حيث تتكون المضخة من دوارتين متتاليتين الأولى طاردة مركزية والثانية إعصارية و متوضعتين على المحور نفسه . يتم دخول السائل بداية إلى الدوارة المركزية حيث يطرد بعدها إلى قناة موجودة في الجسم (3) ويقذف التيار إلى قناة حلزونية وبعدها يدخل إلى قناة مصممة في الهيكل إلى فتحة دخول الدوارة الإعصارية ، الأخيرة تدفع السائل عبر القناة (4) إلى أنبوب الدفع .

إن استخدام الدوارة الطاردة المركزية يسمح فعلياً برفع السرعة عند مدخل الدوارة الإعصارية وبالتالي الحصول على ضغوط عالية للمضخة الإعصارية وللمضخة ككل .

في المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية جزء من الضغط الكلي يتحقق من خلال الدوارة الطاردة المركزية والتي مردودها أعلى من مردود الدوارة الإعصارية . لذلك فإن مردود المضخة الإعصارية - الطاردة المركزية أعلى من مردود المضخة الإعصارية لوحدها (للمضخات الإعصارية $\eta = 50\%$ وللإعصارية - الطاردة $\eta = 55\%$) .

إن عدد الدورات النوعي للمضخات الإعصارية - الطاردة $n_s = 10 \div 25$ وبالتالي مجال استخدام هذا النوع من المضخات تبعاً للضغط والغزارة قريب من مجال استخدام المضخات الحجمية (المكبسية و الدورانية) .

يتم تنظيم غزارة المضخات الإعصارية بواسطة خنق التيار عند المخرج أو تغيير عدد الدورات وغالباً تستخدم الطريقة الأولى لبساطتها غير أن طريقة تغيير عدد الدورات تؤمن توفيراً في القدرة (أكثر اقتصادية) .



الفصل السابع

آلات المضخ النافثة وآلات الرفع الهوائي

Jet & Air – Lift Pumps

أولا 7 - 1 آلات المضخ النافثة Jet Pumps:

تتميز عن باقي الآلات في أنها لا تحتوي أجزاء متحركة وتتكون من نافورة وحجرة للمزج وناشرة والجزء العامل هو السائل نفسه.

مبدأ العمل:

يتم مزج سائلين أو غازين تحت تأثير الضغط المتولد من آلة مضخ أخرى حيث يندفع السائل المضخوخ بسرعة كبيرة من النافورة ويمتزج مع السائل المسحوب داخل حجرة المزج ثم يندفع المزيج إلى الناشرة حيث تتحول القدرة الحركية إلى قدرة كامنة (تتحول القدرة الحركية إلى ضغط). يمكن أن يكون السائل المضخوخ غازاً أو بخاراً أو ماء.

مميزات الآلة : سهولة التصميم.

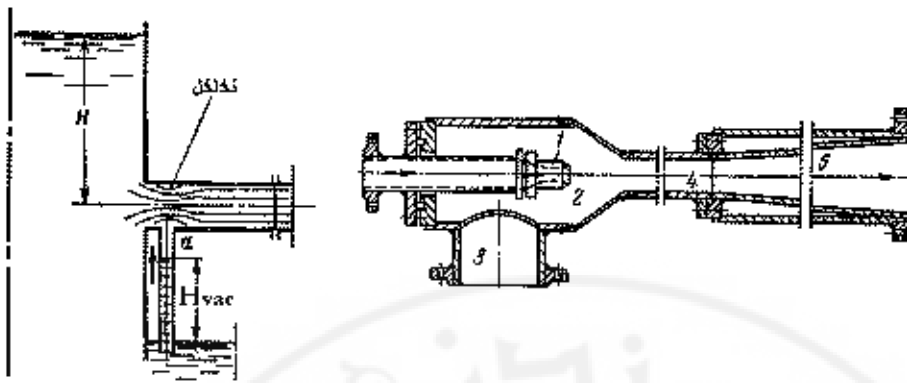
المساوئ : المردود المنخفض حوالي 43 % .

7 - 1 - 1 - نظرية التشغيل ، مفاهيم أساسية:

Theory Of Operation , Basic Notions:

يتم توليد تخلخل في المنطقة المتضيقة من التيار النافوري الموجه من خلال فوهة أسطوانية كما في الشكل (1 - 7) . يجب أن يكون ارتفاع التخلخل $H_{vac} = 0,74 H$ حيث : H الضاغط المؤثر أمام الفوهة . للتأكد من حدوث ضاغط المسحب H_{vac} نستطيع وصل الفوهة إلى سطح سائل أخفض من محورها بواسطة أنبوب قياس .

خلال الرفع بضاغط H ، يعطى السائل القادم من الأنبوب a قوة رفع مساوية لتلك التي يقدمها السائل المار عبر الفوهة وذلك عند امتزاجهما معا ويحمل التيار النافوري الخارج من الفوهة السائل المسحوب من الأنبوب a معه باتجاه الجريان ، وتعمل عندها الفوهة كمضخة نافثة .

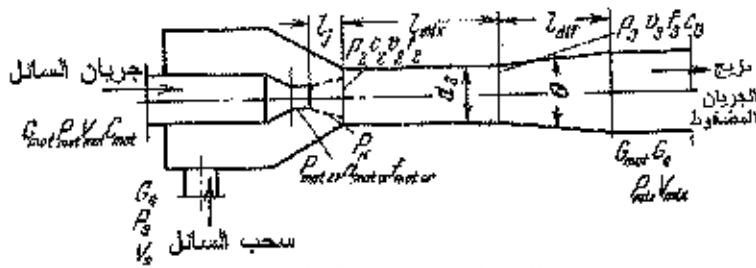


الشكل (2 - 7) مخطط تصميمي للمضخات النفاثة المستخدمة في الصناعة
الشكل (1 - 7) فوهة أسطوانية تعمل كمضخة نافثة

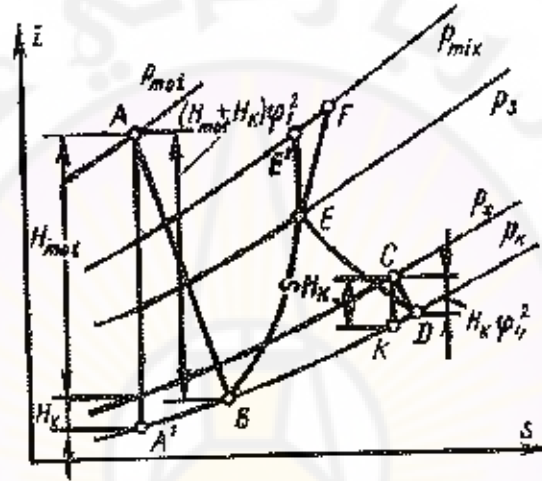
لا يعد استخدام المضخات النفاثة اقتصادياً ولا عملياً بسبب الضياعات الكبيرة للطاقة في الفوهة الأسطوانية.

يبين الشكل (2 - 7) مخططاً تصميمياً للمضخات النفاثة المستخدمة في الصناعة . يندفع سائل التشغيل (ماء ، بخار ، غاز) بسرعة عالية من الفوهة (1) إلى حجرة السحب (2) حيث يحتك مع السائل المسحوب عبر الأنبوب (3) . بتأثير الاحتكاك وتبادل كمية الحركة على سطح نافورة سائل التشغيل ، يمتص الأخير السائل المسحوب ويحركه إلى غرفة المزج (4) ويعددها إلى الناشر المخروطي (5) . غرفة المزج هي المكان حيث يتم تبادل كمية الحركة بين سائل التشغيل والسائل المسحوب بينما تقوم الناشرة بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كامنة حيث يتدفق المزج بعدها إلى خط الضخ

في الصناعة يُستخدم نوعان من المضخات النفاثة: المضخات القاذفة المائية والمضخات النفاثة البخارية ، وهما متشابهان من حيث التشغيل ومختلفان بنوع سائل التشغيل المستخدم . البارامترات الرئيسية في المضخات النفاثة هي : تدفق سائل التشغيل G_{mot} ، تدفق السائل المسحوب (سعة المضخة) G_s ، ضغط سائل التشغيل p_{mot} ، ضغط السائل المسحوب p_s المحقق من المضخة ، ضغط مزيج السائل الخارج من المضخة p_{min} . يبين الشكل (3 - 7) الضغوط و الكثافات والسرعات الفعلية والإيزوإنثروبية والتدفق الكتلي ومساحات مقاطع الجريان وذلك لكل المقاطع الأساسية في مخطط مضخة نافثة .



الشكل (7-3) مخطط مضخة نافثة



الشكل (7-4) مخطط أداء ضاغط نفث على الإحداثيات (i - S)

7-1-2- أداء وحساب المضخات النافثة:

Performance And Calculation Of Jet Pumps:

يبين الشكل (7-4) مخطط أداء ضاغط نفث على الإحداثيات (i - S). نحدد حالة سائل التشغيل عند مدخل الضاغط بالنقطة A ، عندما يتحرك الجريان عبر النافثة تتحول طاقته $H_{mot} + H_k$ إلى طاقة حركية وبالتالي فإن سرعة الجريان تزداد من c_{mot} إلى c_B . هذه العملية تتم على طول المنحني البوليتروبي AB . الحرارة المحولة إلى طاقة حركية في هذه العملية تساوي $(H_{mot} + H_k) \varphi_1^2$ ، حيث φ_1 معامل السرعة للقوة . حالة سائل التشغيل عند مدخل حجرة المزج تحدد بالنقطة B حالة البخار المدفوع داخلا بواسطة الضاغط تمثل بالنقطة C . في جزء الدخول لنافورة الجريان في مقطع مدخل حجرة المزج ، تتغير حالة

الجريان على طول الخط CD ، وتكون الزيادة في الطاقة الحركية $\varphi_4^2 H_K$ ، حيث φ_4 معامل السرعة في ممر السحب. يتضغط السائل المسحوب في حجرة المزج على طول الخط DE وسائل التشغيل على طول الخط BE .

يزداد الضغط على طول الخط EF حتى قيمته النهائية عند مخرج النافذة. الآن نكتب معادلة كمية الحركة لحجرة المزج حيث يكون سائل التشغيل والسائل المسحوب قد امتزجا ويفرض أن φ_2 يمثل معامل السرعة لحجرة المزج:

$$m_{mot} c_B \varphi_2 + m_s c_D \varphi_2 - (m_{mot} + m_s) c_E = f_3 (p_3 - p_K)$$

في هذه المعادلة يقبل أن الضغط ثابت في كل نقاط مقطع مدخل الحجرة ويساوي p_K ، بالتقسيم على m_{mot} ينتج :

$$\varphi_2 (c_B + u c_D) - (1+u) c_E = \frac{f_3 (p_3 - p_K)}{m_{mot}} \quad (7-1)$$

حيث نعرف $u = m_s / m_{mot}$ بأنها نسبة وزن التشغيل .

معادلة المنخ لمقطع الخروج من حجرة المزج:

$$m_{mot} + m_s = c_E f_3 \rho_3$$

ومنه ينتج:

$$f_3 = \frac{m_{mot} (1+u)}{c_E \rho_3} \quad (7-2)$$

من المعادلات (7-1) و (7-2) نستطيع أن نستنتج الصيغة التالية لنسبة وزن التشغيل :

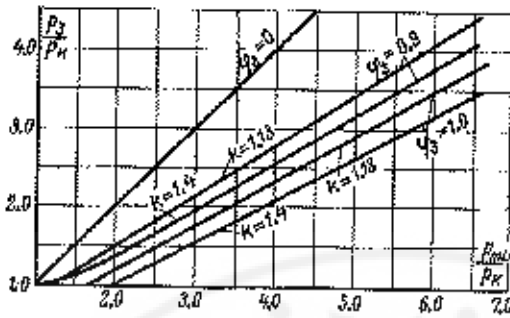
$$u = \frac{\varphi_2 c_B - c_E \left[1 + \frac{p_3 - p_K}{c_E^2 \rho_3} \right]}{c_E \left[1 + \frac{p_3 - p_K}{c_E^2 \rho_3} \right] - \varphi_2 c_D} \quad (7-3)$$

كما هو معروف من الترموديناميك ، فإن سرعات الغاز أو البخار يمكن أن تحدد من السرعات الحرجة ونسب الضغط النهائي إلى الابتدائي ومعاملات السرعة . نتيجة لذلك : فإن السرعات الفعلية (c_B, c_E, c_D) المتضمنة في المعادلة (7-3) يمكن أن توصف بدلالة البارامترات المذكورة :

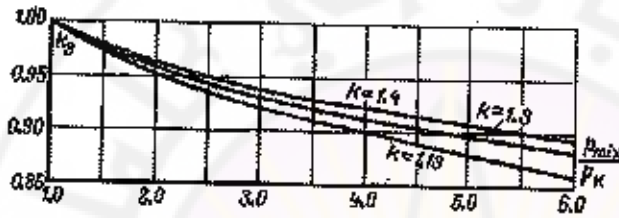
$$u = \frac{K_1 a_{mot\ cr} \sqrt{1 - \left(\frac{p_K}{p_{mot}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} + K_3 a_{mix\ cr} \sqrt{1 - \left(\frac{p_K}{p_{mix}}\right)^{\frac{k-1}{k}}}}{K_3 a_{mix\ cr} \sqrt{1 - \left(\frac{p_K}{p_{mix}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} - K_2 a_{s\ cr} \sqrt{1 - \left(\frac{p_K}{p_s}\right)^{\frac{k-1}{k}}}} \quad (7-4)$$

حيث : $K_1 = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3$ معامل السرعة لسائل التشغيل .
 $K_2 = \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4$ معامل السرعة للسائل المسحوب .
 K_3 معامل يأخذ بالاعتبار عمل الانضغاط بين حجرة المزج والناشرة .
 $a_{s\ cr}$, $a_{mix\ cr}$, $a_{mot\ cr}$ السرعات الحرجة لسائل التشغيل وللمزج وللناشرة المسحوب على التوالي .

من المعادلة (7-4) ينتج أنه : إذا كانت بارامترات الجريان لسائل التشغيل والسائل المسحوب وضغط الضخ النهائي محددة فإن نسبة وزن التشغيل تحدد من خلال نسبة التمدد p_K / p_s لجريان السحب عند جزء الدخول لغرفة المزج ومن خلال المعامل K_3 . يجب أن تصمم الآلات بحيث تكون نسبة وزن التشغيل أعلى ما يمكن ، لأن ذلك سيعني زيادة تدفق السائل المسحوب من أجل كمية محددة من سائل التشغيل . يسعى الاستثمار الأمثل لإيجاد قيمة عظمى لـ u تعود لوجود علاقات مثالية $p_3 / p_K = f(p_{mix} / p_K)$ تعتمد على الأس الأديباتي ومعاملات السرعة للناشرة . هذه العلاقات مفصلة على الشكل (5-7) للعديد من قيم k و φ_3 . واضح من المخطط أن القيم المحددة لـ k و φ_3 تتبع لمجالات محددة من الانضغاط في كامل الآلة وكذلك في حجرة المزج . مهما تكن قيم k و φ_3 ، فإن نسبة الانضغاط المثلى في غرفة المزج تزداد مع نسبة الانضغاط الكلية . لمعامل الناشرة φ_3 تأثير كبير على أداء الضاغط . قيم φ_3 الصغيرة توافق قيم نسبة الانضغاط الكلي الأصغر مع نسب انضغاط معطاة في حجرة المزج . مع المردود القليل للناشرة ، فإنه من الطبيعي أن ينجز القسم الأكبر من الانضغاط في حجرة المزج . إذا حددت القيم المشار إليها p_{mix} / p_K ; p_3 / p_K من المخطط (5-7) فإن التقسيم المثالية الموافقة K_3 يمكن أن تحدد ويمكن أن تظهر العلاقة $K_3 = f(p_{mix} / p_K)$ بيانياً الشكل (6-7) .



الشكل (5-7) نسبة الانضغاط المثالية في حجرة المزج.



الشكل (6-7) القيم المثالية للمعامل $K_{2 \text{ vs}}$ مع نسبة الانضغاط

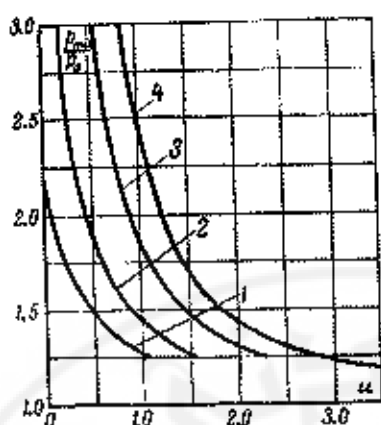
باستخدام المخطط الناتج تستطيع حساب عدد من القيم h من العلاقة (4-7) وإيجاد H_{max}

تعتمد نسبة وزن التشغيل على نسبة الضغط الابتدائي بين سائل التشغيل والسائل المسحوب وعلى نسبة الانضغاط الكلي والأس الأدبياتي للجريان .

يحلل الشكل (7-7) هذه العلاقة بتطبيقها على بخار محمص له $k = 1.3$ لقيم مختلفة لـ p_{mot} / p_s . من أجل قيمة ما لـ p_{mot} / p_s فإن نسبة وزن التشغيل تزداد بنقصان نسبة الانضغاط .

تحتسب أبعاد ضاغط نفات بحجرة مزج أسطوانية باستخدام العلاقات النظرية والتجريبية التالية :
مساحة المقطع العرضي لعنق الفوهة :

$$f_{\text{mot cr}} = \frac{G_{\text{mot}}}{\sqrt{g k \left(\frac{1}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \sqrt{\frac{V_{\text{mot}}}{P_{\text{mot}}}} \quad (7-5)$$



الشكل (7-7) نسبة الانضغاط للبخار المحمص $k = 1,3$ vs محسوية لنسبة وزن التشغيل

مساحة المقطع العرضي لمخرج الفوهة :

$$f_2 = \frac{\sqrt{\frac{k+1}{2} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}{\left(\frac{p_s}{p_{mot}} \right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{p_s}{p_{mot}} \right)^{\frac{k-1}{k}}}} f_{mot\ cr} \quad (7-6)$$

مساحة المقطع العرضي لحجرة المزج :

$$\sqrt{\frac{k+1}{2} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} (1+u) \frac{a_{mix\ cr}}{a_{mot\ cr}} \frac{p_{mot}}{p_{mix}} \cdot \frac{\left(\frac{p_{mix}}{p_3} \right)^{\frac{k+1}{k}}}{\left(\frac{p_{mix}}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \cdot f_{mot\ cr} \quad (7-7)$$

طول حجرة المزج :

$$l_{mix} = 6 d_3 \text{ من أجل } u \leq 0,5 \text{ و } l_{mix} = 10 d_3 \text{ من أجل } u \geq 2 \quad (7-8)$$

زاوية التوسع للناشرة $\theta = 8 \div 10^\circ$ وطول الناشرة :

$$l_{dif} = (6 \div 7) (d_j - d_3) \quad (7-9)$$

يجب أن تتوضع النفثة وحجرة المزج والناشرة بحيث تتطابق محاورها بشكل تام وأي انحراف عن هذه الوضعية يؤدي إلى تدهور شديد بأداء الضاغط .

من القيم الهامة جدا هي المسافة l بين مقطع مخرج الفوهة ومقطع الدخول إلى حجرة المزج . إن الخطأ في اختيار هذه المسافة يمكن أن يؤدي إلى فعل نبضي للنفثة عند دخولها حجرة المزج ، والذي يؤدي إلى نقصان فعالية أدائها (نقصان المردود) . تعتبر المسافة l الأفضل

عندما تكون مساحة المقطع العرضي للنفثة ومساحة المقطع العرضي حجرة المزج متساويتين . طول النافورة l_f الشكل (7-8) يرتبط بنسبة وزن التشغيل ويحدد من العلاقات التجريبية :

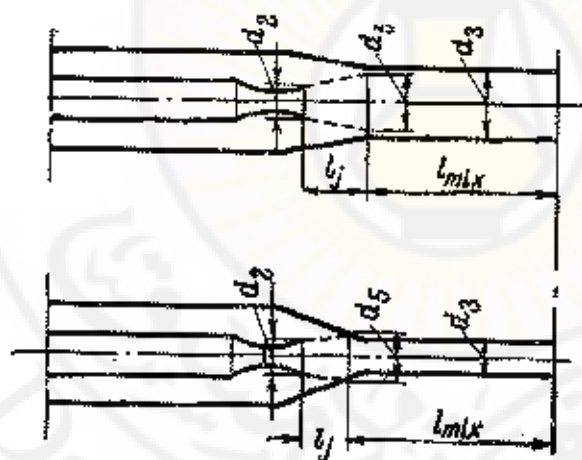
$$u \geq 0,5 \quad \text{من أجل} \quad l_f = \frac{0,37 + u}{4,4 a} \quad (7-10)$$

$$u < 0,5 \quad \text{من أجل} \quad l_f = \sqrt{0,083 + 0,76 u} - 0,29 \frac{d_2}{2 a}$$

حيث: $a = 0,07 \div 0,09$ نسبة إلى u . قطر النافورة الحرة على مسافة l_f من الفوهة هو:

$$u \geq 0,5 \quad \text{من أجل} \quad d_f = 1,55 d_2 (1 + u) \quad (7-11)$$

$$u < 0,5 \quad \text{من أجل} \quad d_f = 3,4 d_2 \sqrt{0,083 + 0,76 u}$$



الشكل (7-8) النافورة الحرة ضمن غلاف المضخة النفثة

إذا كانت نتيجة الحساب $d_f < d_3$ يمكن أن نأخذ $l = l_f$ ، ومن أجل $d_f > d_3$ فإن l يجب أن تؤخذ أكبر من l_f من وجهة النظر التصميمية.

7-1-3 - حساب المضخة القاذفة المائية : Calculation Of Water- Jet Pump

المضخة القاذفة المائية تشابه من حيث التشغيل المضخة النافثة الغازية . حجم السائل يمكن أن يعتبر ثابتاً نظراً لصغر قابلية الانضغاط ، ومن المعادلة الأديباتية ينتج أن ($k = \infty$) بإدخال ($k = \infty$) في المعادلة (7-4) ينتج لأجل المضخة القاذفة المائية :

$$u = \frac{K_1 \sqrt{\Delta p_{mot} + \Delta p_K} - K_3 \sqrt{\Delta p_{mix} + \Delta p_K}}{K_3 \sqrt{\Delta p_{mix} + \Delta p_K} - K_2 \sqrt{\Delta p_K}} \quad (7-12)$$

حيث :

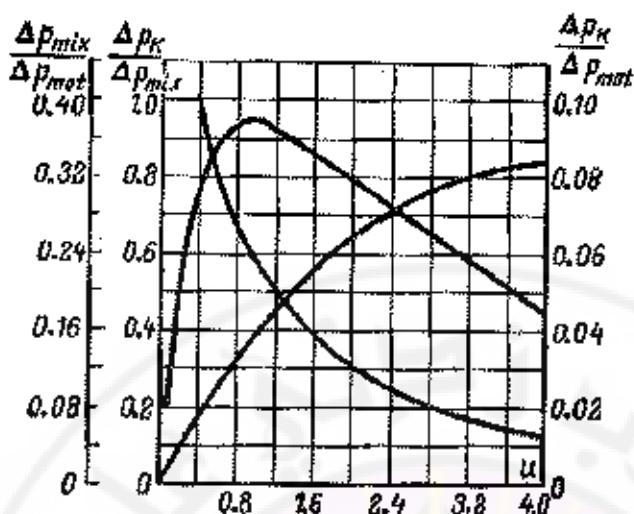
$$K_3 = \sqrt{\beta} \left[1 + \frac{\varphi_3^2 (1 - \beta)}{2\beta} \right] ; \quad \Delta p_{mot} = p_{mot} - p_s ; \quad \Delta p_K = p_s - p_K ;$$

$$\Delta p_{mix} = p_{mix} - p_s ; \quad \beta = \frac{p_{mix} - p_s}{p_{mix} - p_K}$$

تأخذ نسبة وزن التشغيل u قيمة عظمى عندما تكون K_3 أصغريه . لذلك يمكن أن نحدد القيمة المثالية لـ β من الحالة الأصغرية :

$$\beta_{opt} = \frac{\varphi_3^2}{2 - \varphi_3^2} \quad (7-13)$$

في الحسابات نفرض $\varphi_3 = 0,9$ وعندها $\beta_{opt} = 0,67$ و $K_{3\ opt} = 0,98$. إذا حددت قيم نسبة وزن التشغيل u وتغير ضغط التشغيل $p_{mot} - p_s$ ، يمكن أن نحدد القيمة المثالية لتغير الضغط $p_s - p_K$ من الحالة العظمى للفرق $p_{mix} - p_s$. نتائج دراسة هذه التأثيرات معطاة بيانياً على الشكل (7-9) .



الشكل (7-9) تغير فروق الضغط كتوابع لنسبة وزن التشغيل للمضخة القاذفة المائية

تُعطي المنحنيات تصورا عن كيفية تغير فروق الضغط كتوابع لنسبة وزن التشغيل المعادلات الأساسية لحساب أبعاد المضخات القاذفة المائية هي كالتالي:

$$f_2 = \frac{G_{mot}}{\varphi_1} \sqrt{\frac{1}{2 g \gamma_{mot} \Delta p_{mot}}} \quad (7-14)$$

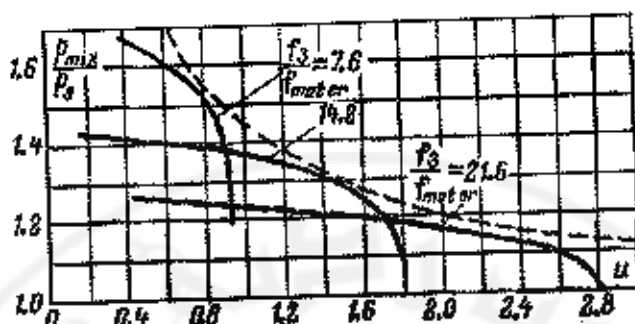
$$f_3 = \frac{1-u}{\sqrt{\beta}} \sqrt{\frac{\Delta p_{mot}}{\Delta p_{mix} + \Delta p_K}} \quad (7-15)$$

ومن أجل حجرة مزج اسطوانية :

$$I_{mix} = 4 d_3 \text{ من أجل } u \leq 1, \quad I_{mix} = 8 d_3 \text{ من أجل } u \geq 3 \quad (7-16)$$

يحدد طول النافذة من العلاقة (7-9). المسافة بين مقطع الخروج من الفوهة ومقطع الدخول إلى حجرة المزج تحدد بطريقة مشابهة لتلك في الضواغط النافثة.

Jet Pump Characteristics & Capacity Regulation :

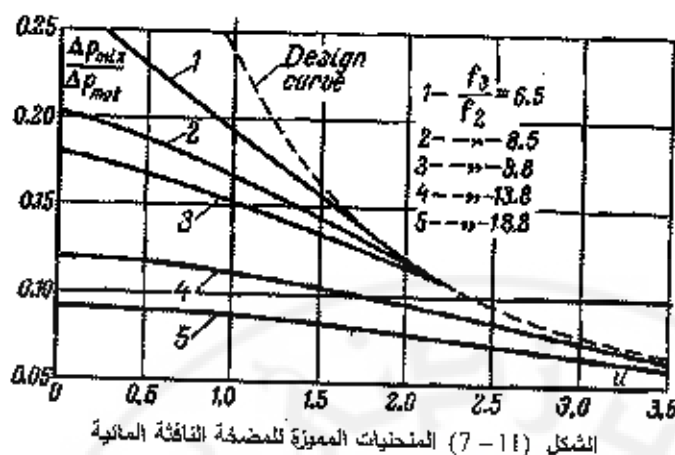


الشكل (10-7) المنحنيات المميزة لضواغط بخاري نفثات عند النسبة $p_{mix} / p_s = 6$

تستخدم المضخات النافثة لأجل مجال واسع من الغازات ونسب الانضغاط يوصف أداء المضخات النافثة تحت تأثير شروط تشغيل مختلفة بواسطة المنحنيات المميزة $p_{mix} / p_s = f(u)$ والتي تنشأ استناداً إلى معطيات تجريبية . يمثل الشكل (10-7) نموذجاً لمنحنيات من هذا النوع لضواغط بخاري نفثات ، المنحني المستمر يمثل المنحنيات الفعلية، أما المنحنيات النظرية فتتمثل بالخط المنقط. واضح من المنحنيات الفعلية أن زيادة نسبة وزن التشغيل ومن أجل قيم مختلفة لتدفق سائل التشغيل تؤدي لنقصان نسبة الانضغاط. من الملفات الهبوط الحاد بقيم نسبة الانضغاط من أجل القيم العالية لـ u ، وهذا شائع لأجل كل المنحنيات الفعلية. يحافظ هذا التأثير على وجوده تحت حدود ظروف التشغيل للضواغط ، عندما تصل السرعة في حجرة المزج إلى قيمتها الحرجة ولا يمكن زيادة قيمة u . المنحني التصميمي مضمن في المنحنيات الفعلية ، لأن لكل ضاغط قيمة مردود أعظمي خاصة به على المنحنيات $u - p_{mix} / p_s$ وهذه القيمة يجب أن تقع على المنحني التصميمي. المنحنيات $u - p_{mix} / p_s$ هي منحنيات نسبية ولذلك فالمنحنيات المميزة من هذا النمط هي نفسها للمضخات المتشابهة هندسياً. تؤكد الدراسات الشاملة عن الضواغط النافثة أن نسبة الانضغاط ونسبة وزن التشغيل تعتمدان على النسبة f_3 / f_{motor} لحد كبير . فالقيمة القليلة لهذه النسبة تعني قيمة أكبر لنسبة الانضغاط وقيمة أخفض لنسبة وزن التشغيل ، والعكس بالعكس. المعادلة (3-7)

$$\Delta p_{mix} / \Delta p_{mot} = f(u) \quad \text{العلاقة :}$$

$$\Delta p_{mot} = p_{mot} - p_s \quad ; \quad \Delta p_{mix} = p_{mix} - p_s \quad \text{حيث :}$$



هذه العلاقة تظهر على الشكل (11-7) بالخط المنقط ، والخطوط المستمرة تبين المنحنيات التجريبية لمضخة فعلية. المميز للمضخة القاذفة المائية هو زيادة فرق الضغط $P_{mix} - P_s$ مع نقصان نسبة وزن التشغيل. وبالتالي يكون فرق الضغط أعظميا عندما تكون $u = 0$. من المنحنيات التجريبية المبينة على الشكل (11-7) ينتج أنه من أجل قيمة ثابتة لنسبة وزن التشغيل فإن فرق الضغط $P_{mix} - P_s$ يتحدد من خلال النسبة f_3 / f_2 . يتم الحصول على فرق الضغط الأكبر في المضخات المائية عندما تكون نسب مساحات المقاطع صغيرة بين حجرة المزج ومخرج القوة .

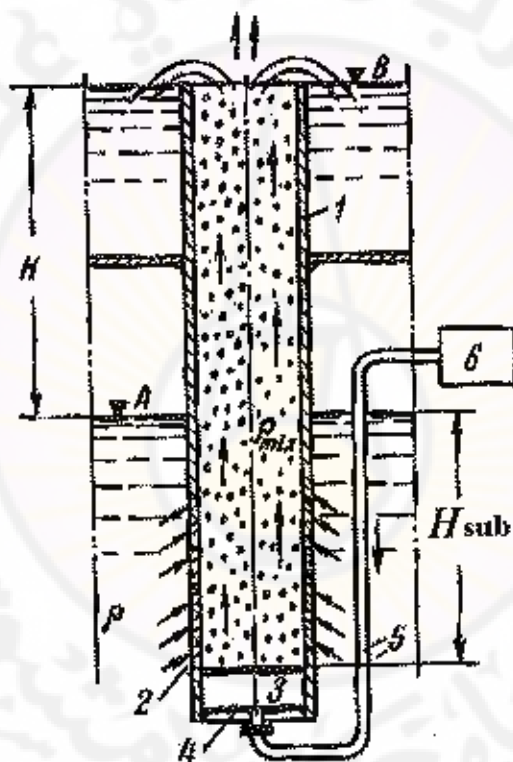
ثانيا 7 - 2 - مضخات الرفع الهوائي Air - Lift Pumps

7 - 2 - 1 - نظرية التشغيل ، مفاهيم أساسية:

Theory Of Operation , Basic Notions:

يمكن أن يرفع السائل من سوية إلى أخرى بالطريقة المذكورة في الفصل الثاني (2-2) . حسب الشكل (11-7) لدينا أنبوب شاقولي (1) فيه عدد من الثقوب (2) في الجزء السفلي وحجرة للهواء (3) ، القاعدة السفلية لحجرة الهواء مزودة بفوهة للاتصال بأنبوب تزويد الهواء (5) ، أعلى الحجرة له عدد كبير من الثقوب الصغيرة لتمرير الهواء المزود من خلال الأنبوب وهذا يشكّل مزيجا من الماء وفقااعات الهواء في الأنبوب (1) . وكما هو حال خزانات توازن السائل في خزانات الوصل فإن عمود السائل خارج الأنبوب يساوي من حيث الارتفاع إلى ضاغط العطس (الغمر) H_{sub} والذي يوازن نفسه مع عمود المزيج الأخرى في الأنبوب (1) .

يتم اختيار الغمر لا ليوازن فقط بل ليتجاوز ضغوط عمود المزيج في الأنبوب (1) والذي يساوي $H_{sub} + H$ لذلك طالما أن الهواء يضخ باستمرار في الحجرة فإن تدفقاً مستمراً من المزيج سيخرج من الأنبوب (1) إلى المستوي B حيث ينبعث المزيج من القمة المفتوحة للأنبوب ويتخلص من فقاعات الهواء إلى الهواء الجوي. طبعاً يسحب الماء بشكل مستمر مستقر من الفتحات (2) عند قعر الأنبوب. حسب طبيعة عمل المضخة فإن الهواء أو غازاً ما يستخدم لرفع الماء ، لذلك تدعى المضخة الموصوفة أعلاه بمضخة الرفع الهوائي، أو مضخة الرفع الغازي حسب التوسيط المستخدم.



الشكل (7-12) مخطط عمل مضخات الرفع الهوائي

بفرض أن ρ و ρ_{mix} هي كثافة الهواء والمزيج على التوالي وبالتالي فإن حالة توازن السائل المحيط بالأنبوب (1) عند الجزء السفلي منه تحت المستوي A والمزيج داخل الأنبوب تكتب بالشكل:

$$\rho \cdot H_{sub} = \rho_{mix} \cdot (H_{sub} + H)$$



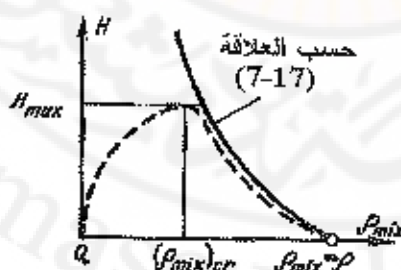
هذه المعادلة تجعل من الممكن حساب ضاغط السائل المنتج من قبل مضخة الرفع الهوائي:

$$H = H_{sub} \left(\frac{\rho}{\rho_{mix}} - 1 \right) \quad (7-17)$$

وبالتالي فإن الضاغط المقدم من مضخة الرفع الهوائي لسائل بكثافة نوعية يتناسب مع مقدار الغمر وكذلك مع محتوى الهواء في المزيج. تمثل العلاقة (7-17) بياناً من أجل $H_{sub} = const$ كما في الشكل (7-13)؛ عندما تنتهي ρ_{mix} إلى الصفر فإن الضاغط ينتهي إلى اللانهاية. هذه النتيجة استنتجت من توازن السائل في خزانات الموازنة وهي غير صالحة من أجل مزيج يتحرك بظروف طبيعية (جريان حقيقي). إذ إن الطاقة المستجدة لتشغيل مضخة رفع هوائي لا تصرف لرفع السائل من المستوى السفلي إلى المستوى العلوي فقط بل للتغلب على مقاومات الجريان ولتقديم الطاقة الحركية للسائل أيضاً.

إذا كانت $\rho_{mix} = \rho$ هذا يعني أن المزيج لا يحوي هواء عندها $H = 0$ وبالتالي فإن زيادة محتوى الهواء في المزيج سيقلل من كثافته أي أن ضاغط المضخة سيصبح $H > 0$. إذا اندفع المزيج من النهاية العلوية للأنبوب سيكون هناك جريان مستمر وستزداد سرعة الجريان مع نقصان ρ_{mix} .

ستستمر السرعة بالازدياد مع نقصان ρ_{mix} إلى أن تصل الأخيرة إلى قيمة كثافة حرجية $(\rho_{mix})_{cr}$ حيث يؤدي نقصان الكثافة عن هذه القيمة إلى نقصان الضاغط بسبب زيادة ضباغات الجريان بشكل حاد وبسبب هروب الهواء وطاقته صاعداً إلى الأعلى من داخل السائل وصولاً إلى السطح، لذلك فإن منحنى الضاغط الفعلي الممثل على الشكل (7-13) بخط منقط ينطبق على المنحني النظري بدءاً من القيمة $(\rho_{mix})_{cr}$ فقط. يحسب ارتفاع الغمر عادة كنسبة مئوية من ارتفاع أنبوب مضخة الرفع الهوائي الكلي:



الشكل (7-13) تأثير ρ_{mix} على عمود السائل الناتج من مضخات الرفع الهوائي

$$H_{sub} [\%] = \frac{H_{sub}}{H + H_{sub}} \cdot 100 \quad (7-18)$$

وبالتالي يمكن حساب قيمة الغمر استناداً إلى هذه العلاقة بالصيغة :

$$H_{sub} = H \cdot \frac{H_{sub} [\%]}{100 - H_{sub} [\%]} \quad (7-19)$$

بحسب ارتفاع الغمر المطلوب لضخ سائل بارتفاع معين استناداً إلى العلاقة النظرية بعد الأخذ بعين الاعتبار معاملات تصحيح استناداً إلى التجارب والتي تستند إلى تبسيط جريان المزيج في الأنبوب لأن نموذج هذا الجريان معقد جداً .

لحساب H_{sub} تستخدم عادة البيانات في جداول تنسجم ومضخات الرفع الهوائي المتوفرة فعلاً ، ويمكن استخدام المعطيات التالية :

الجدول (7-1)

$H [m]$ up to	40	40 ÷ 75	90 ÷ 120	120 ÷ 180
$H_{sub} [\%]$	70	60	55	45

بمعرفة القيم المحددة لـ $H_{sub} [\%]$ يمكن حساب قيمة H_{sub} بالأمتار من العلاقة (7-19) ، من أجل ضواغط أقل من المبينة في الجدول فإن الغمر اللازم يكون الغمر اللازم أكبر من الضاغط المطلوب وبالتالي فإنه يأخذ طولاً كبيراً من ارتفاع الغمر تحت سطح سائل التزويد لتشغيل مضخة الرفع الهوائي .

7 - 2 - 2 - ضغط الهواء المطلوب و كميته:

Required Amount & Pressure Of Air:

إذا عملت مضخة رفع هوائي على ضخ سائل كثافته $\rho [kg/m^3]$ بتدفق مقداره $Q [m^3/s]$ و بضاغط $H [m]$ فإن هذه المضخة تكون قد قدمت استطاعة مفيدة $[J/s]$ مقدارها : $N_{usef} = \rho g Q H$

بفرض أن الهواء النظامي تحت ضغط $p_2 [Pa]$ يغذى إلى حجرة مضخة الرفع الهوائي بتدفق مقداره $V_1 [m^3/s]$ ، الطاقة المستجرة من قبل الضاغط و التمدد لرفع السائل عالياً داخل أنبوب مضخة الرفع الهوائي تساوي :

$$N_{comp} = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \frac{1}{\eta_{ise} \eta_m}$$

حيث η_{iso} كفاءة مضخة الرفع الهوائي:

$$\eta_{alp} = \frac{\rho g Q H}{P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1}} \eta_{iso} \eta_m \quad (7-20)$$

فعالية مضخة الرفع الهوائي تعتمد على ارتفاع الغمر و تساوي (0,5) تقريباً.

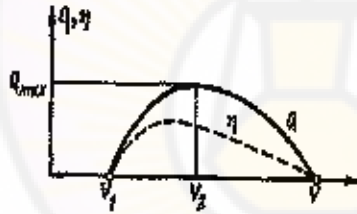
من المعادلة (7-20) ينتج أن:

$$V_1 = \frac{\rho g Q H}{\eta_{alp} P_1 \ln \frac{P_2}{P_1}} \eta_{iso} \eta_m \quad (7-21)$$

يمكن أن تستخدم المعادلة (7-21) لحساب كمية الهواء اللازمة لضخ التدفق Q بضغوط H من الواضح أن:

$$P_2 = \rho g H_{sub} \quad (7-22)$$

يمكن أن يعرض العمل المقدم من قبل مضخة الرفع الهوائي بمخطط $(V-Q)$ الشكل (7-14).



الشكل (7-14) علاقة الغزارة والمردود مع كمية الهواء المستهلكة لمضخة الرفع الهوائي

بكميات قليلة من الهواء المزود إلى حجرة مضخة الرفع الهوائي يكون تدفق المضخة معدوماً تبعاً للقيمة القليلة لـ ρ_{mix} . عندما يزداد تزويد الهواء ليصل إلى القيمة V_1 ، فإن عمود المزيج سيرتفع إلى الأعلى ليصل إلى فتحة الضخ عند النهاية العلوية للمضخة. عند ازدياد التزويد بالهواء تبدأ مضخة الرفع الهوائي برفع السائل و يزداد التدفق المضخوخ تدريجياً إلى أن تصل كمية الهواء المزودة إلى حجرة المضخة إلى القيمة V_2 والتي توافق النقطة $Q = Q_{max}$. إن أي زيادة إضافية لـ V ستسبب انخفاض التدفق الذي تقدمه المضخة وهذا يعود إلى زيادة المقاوومات الهيدروليكية في أنبوب مضخة الرفع الهوائي و زيادة محتوى الهواء في المزيج، يتغير

مردود مضخة الرفع الهوائي يتغير قيمة V و يصل المردود قيمته العظمى قبل أن يصل التدفق Q إلى قيمته العظمى. تحاكم اقتصادية مضخة الرفع الهوائي من خلال مفهوم الحجم النوعي للهواء المستهلك $[l \text{ air} / l \text{ liquid}]$ و يوصف بالعلاقة: $V_{sp} = \frac{V}{Q}$ يعتمد هذا المقدار لحد

كبير على ضاغط المسائل و غالباً وفق الجدول التالي :

الجدول (7-2)

$H [m]$	15	30	60	90
$V_{sp} [l/l]$	2	3,5	5,6	8,5

7-2-3 - استطاعة الضاغط Compressor Power :

إن الضاغط الذي يزود الهواء إلى مضخة الرفع الهوائي يجب أن يقدم ضغطاً p_{comp} أكبر من الضغط السائد في حجرة الهواء، أي:

$$p_{comp} = \rho g H_{sub} + \Delta p \quad (7-23)$$

حيث Δp ضياع الضغط في الأنابيب الواصلة من الضاغط إلى مضخة الرفع الهوائي .
تستخدم الضواغط الترددية المبردة في هذا النوع من المضخات و تحسب الاستطاعة المقدمة على محور الضاغط بالعلاقة:

$$N_{comp} = p_1 V_1 \ln \frac{p_{comp}}{p_1} \frac{1}{\eta_{ise} \eta_m} \quad (7-24)$$

من أجل الضواغط الترددية المبردة $\eta_m = 0,9$; $\eta_{ise} = 0,7$.
الطاقة الكهربائية المستجرة $[J / s]$ من قبل مجموعة رفع هوائي هي:

$$N_{el} = \frac{N_{comp}}{\eta_{mot} \eta_{dt}} = p_1 V_1 \ln \frac{p_{comp}}{p_1} \frac{1}{\eta_{ise} \eta_m \eta_{mot} \eta_{dt}} \quad (7-25)$$

عندما يكون وصل الضاغط و المحرك مباشراً يكون $\eta_{dt} = 1$ و عندما تستخدم سيرر بشكل حرف V يكون $\eta_{dt} = 0,96$.

و يكون مردود المجموعة الكلي هو:

$$\eta = \frac{N_{ref}}{N_{el}} = \frac{\rho g Q H}{p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}} \eta_{ise} \eta_m \eta_{mot} \eta_{dt} \quad (7-26)$$

و كما هو معروف بالقياسات المأخوذة لمجموعات رفع هوائي فإن $\eta = 0,2 \div 0,35$.

7 - 2 - 4 - تطبيقات مضخة الرفع الهوائي Air - Lift Pump Applications :

التصميم البسيط والأداء الموثوق لمضخات الرفع الهوائي أعطاهما قبولاً وتطبيقاً واسعاً ، وتستخدم لرفع الماء من أنفاق الحفر مهما كانت أقطارها وأعماقها وهي الأكثر بساطة ووثوقية لأداء هذا العمل. أما من ناحية المردود الطاقوي فإن هذه المضخات تهبط إلى مستوى مردود أنابيب الإمتصاص والمضخات الطاردة في الآبار العميقة ، في محطات التغذية الرئيسية بالماء في المشاريع الصناعية تستخدم آبار مزودة بمضخات رفع هوائي كمصادر احتياطية وفي هذه الحالة فإن المردود الطاقوي المنخفض يصبح ذا أهمية ثانوية . من أجل بعض المشاريع الصناعية والمناطق المأهولة ، الطريقة الوحيدة لتأمين المياه هي من خلال آبار تحت شروط موضوعية وفي هذه الحالة تكون مضخات الرفع الهوائي واحدة من وسائل رفع الماء مثل الأنواع الأخرى من المضخات . وتكون لمضخات الرفع الهوائي أهمية خاصة عند رفع الماء من الآبار ذات الأقطار الصغيرة حيث لا يمكن استخدام المضخات الطاردة أو المكبسية. عملياً من المفيد استخدام مضخات الرفع الهوائي عند رفع سوائل حساسة لارتفاعات صغيرة كما في الصناعات الكيميائية أو الغذائية. يمكن استخدام هذه المضخات حتى إذا كان السائل محملاً بالزغال والأوحال والرواسب .

السيئات الأساسية لمضخات الرفع الهوائي هي قلة المردود الطاقوي والغمر الكبير وعدم القدرة على ضخ السوائل في الشبكات والأنابيب الأفقية أو قليلة الميل وتلوث السائل المضخوخ بزيوت الصاغة والزيادة الكبيرة في محتوى الأوكسجين في السائل المضخوخ .

الفصل الثامن

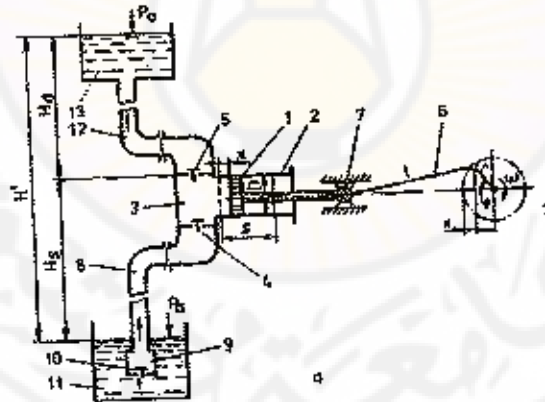
المضخات الحجمية

Positive Displacement Pumps

أولاً 8 - 1 - المضخات المكبسية Reciprocating Pumps .

8 - 1 - 1 - مبدأ العمل والتصنيف Principle Of Operation & Classification :

يمثل الشكل (1-8) مخطط منظومة ضخ بمضخة مكبسية واحدة ذات مكبس قرصي تعمل بواسطة ميكانيزم عمود مرفقي . يمثل الفراغ المحصور داخل الأسطوانة والمكبس الجوف العامل للمضخة ويتحرك المكبس بواسطة عمود المرفق (6) ويقوم المسند (7) بتحرير المكبس من القوى القطرية المؤثرة فيه . وفي منظومة الضخ أيضاً هناك أنبوب السحب (8) الذي يصل إلى خزان السحب وفي نهايته المغمورة في السائل (9) يوجد صمام الدخول (10) وكذلك أنبوب الضخ (12) حيث يتم سحب السائل من خزان السحب (11) وإرساله إلى خزان الضخ (13) . عند حركة المكبس من أقصى اليسار إلى أقصى اليمين يزداد حجم الحجرة العاملة وبالتالي ينخفض الضغط أمام صمام السحب (4) (شوط السحب) وتحت تأثير فرق الضغط يفتح الصمام و يدخل السائل إلى جوف الآلة عبر أنبوب السحب (8) .



الشكل (1-8) مخطط منظومة ضخ بمضخة مكبسية واحدة

عند حركة المكبس من أقصى اليمين إلى أقصى اليسار (شوط الضخ) يزداد الضغط في الحجرة مما يؤدي إلى إغلاق صمام السحب . و يتحدد الضغط فقط باستطاعة الحركة للمضخة . وكذلك موانع التسرب و جودة نوعيتها وإحكامها . بسبب القدرة على توليد ضغوط عالية جداً

فإن المضخات المكبسية تالقي تطبيقاً واسعاً في الصناعة . يستمر الضغط في جوف الآلة بالازدياد إلى أن يصل إلى قيمة يؤدي عندها فرق الضغط على طرفي صمام الضخ (5) إلى فتح هذا الصمام و تدفق السائل إلى أنبوب الضخ (12) . الصمامات في آلات الضخ المكبسية ذاتية الفعل تغلق تحت تأثير قفلها و تأثير قوة التناهي المركب عليها. و لحماية المضخة و الشبكة يجب وضع صمام حماية على أنبوب الضخ، يتصل مخرجه بخزان السحب .

تصنف المضخات المكبسية وفق أسس كثيرة منها مثلاً طريقة التحريك أو حسب عدد المكابس و شكل توزيعها أو حسب طريقة الفعل وتحت هذا العنوان نجد:

مضخات أحادية التأثير: آلية المكبس تتصل بسائل التشغيل من أحد سطوحها فقط و من أجل شوط ثانئي للمكبس يكون هناك شوط سحب و شوط ضخ و حسب الشكل (1-8) فإن حركة المكبس باتجاه اليسار تنجز سحب السائل ، و في الاتجاه المعاكس تنجز عملية الضخ . من أجل شوط ثانئي يكون حجم السائل المضخوخ:

$$V = F \cdot s \quad (8-1)$$

حيث : F مساحة سطح المكبس ، s طول شوط المكبس .

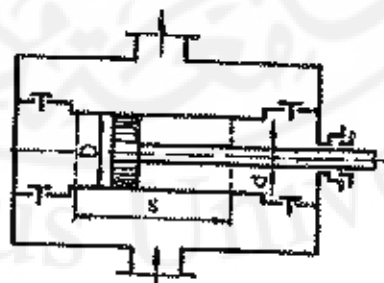
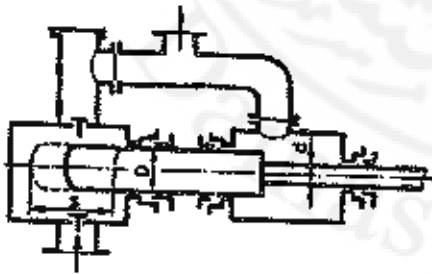
مضخات ثنائية التأثير: من أجل شوط ثانئي يُنفذ شوطاً سحب ~~شوطاً~~ ضخ، عند الحركة باتجاه اليمين يضخ حجم V_1 ، وعند الحركة باتجاه اليسار V_2 :

$$V_1 = (F - f) \cdot s ; V_2 = F \cdot s$$

وبالتالي الحجم المضخوخ خلال شوط ثانئي:

$$V = (F - f) \cdot s \quad (8-2)$$

مضخات ذات تأثير تفاضلي: يتم الضخ على وجهي المكبس و لكن من أجل شوط ثانئي ينجز شوط سحب واحد و شوطاً ضخ، الشكل (3-8) عند الحركة باتجاه اليمين يسحب السائل إلى الحجرة اليسارية و يضخ من اليمينية عبر أنبوب الضخ حجم مقداره: $V_1 = (F - f) \cdot s$



الشكل (8-2) مخطط مضخة مكبسية ثنائية التأثير الشكل (8-3) مخطط مضخة مكبسية تفاضلية

وعند الحركة المعاكسة يتم السحب ويضخ الفرق بين الحجمين المتشكلين على وجهي المكبس

$$V_1 = F \cdot s - (F - f) \cdot s \text{ أي:}$$

ويكون الحجم الكلي:

$$V = V_1 + V_2 = F \cdot s \quad (8-3)$$

حيث: $F = \pi D^2 / 4 [m^2]$ المقطع العرضي للمكبس، $D [m]$ قطر المكبس،

$f = \pi d^2 / 4 [m^2]$ المقطع العرضي للعمود حامل المكبس، $d [m]$ قطر عمود

حامل المكبس، $s [m]$ خطوة (شوط) المكبس.

المضخات ذات التأثير التفاضلي تعمل كالمضخات أحادية التأثير من حيث شوط السحب وكالمضخات ثنائية التأثير من حيث شوط الضخ. الحجم المضغوط من أجل شوط ثنائي واحد للمكبس أو من أجل دورة واحدة للمرفق يعرف بأنه الحجم العامل V . وللتبسيط يدخل مفهوم الحجم المميز W ويمثل الحجم المضغوط من أجل راديان واحد، من التعريفين السابقين فإن العلاقة بينهما واضحة:

$$V = 2 \pi W \quad (8-4)$$

8-1-2 - التدفق الوسطي النظري و التدفق اللحظي النظري :

يحدد التدفق الوسطي النظري Q_i كقيمة وسطية من أجل شوط ثنائي واحد دون احتساب الضياعات الحجمية. باستخدام العلاقات (2-8) و (3-8) و (4-8) يحدد التدفق الوسطي المثالي للمضخات المكبسية كالتالي:

من أجل مضخات تفاضلية أو أحادية التأثير الأشكال (1-8) و (2-8):

$$Q_i = \frac{z \cdot F \cdot s \cdot n}{60} \quad (8-5)$$

من أجل مضخات ثنائية التأثير الشكل (2-8):

$$Q_i = \frac{z \cdot (2F - f) \cdot s \cdot n}{60} \quad (8-6)$$

حيث $n [r.p.m]$ عدد الأشواط الثنائية للمكبس أو عدد دورات محور الدوران.
 z عدد المكابس.

باستخدام العلاقة (4-8) يمكن أن يعبر عن التدفق الوسطي النظري من خلال الحجم المميز بالعلاقة:

$$Q_i = W \cdot \omega [m^3 / s] \quad (8-7)$$

حيث $[\omega] \text{ s}^{-1}$ السرعة الزاوية لمحور الدوران. هذه العلاقة تصلح للمضخات المكسية و للمحركات الهيدروليكية .

تحرك المضخات المكسية غالباً باستخدام ميكانيزم القرص والمرفق الشكل (1-8) ذراع المرفق ذي القطر r يدور حول المحور O بسرعة زاوية ω وبواسطة وصلة طولها L يحرك مكبس المضخة . المسافة المقطوعة x من المكبس خلال فترة زمنية t تناسب زاوية دوران المرفق ، إذا كانت $r \gg L$ ، فإن المسافة x المقطوعة من المكبس من وضعه اليساري النهائي تحدد بالعلاقة:

$$x = r(1 - \cos \varphi) \quad (8-8)$$

سرعة حركة المكبس هي :

$$c = \omega r \sin \varphi \quad (8-9)$$

و تسارعه:

$$a = \omega^2 r \cos \varphi \quad (8-10)$$

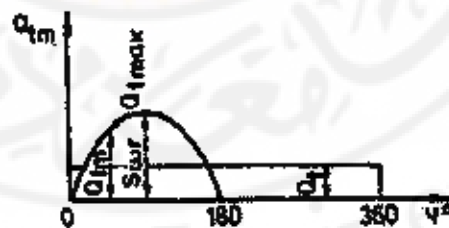
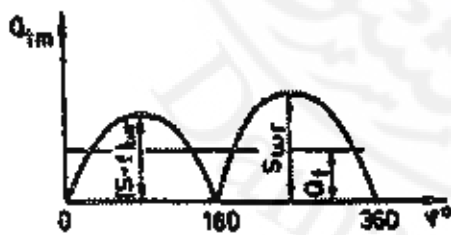
حيث φ هي زاوية دوران المرفق .

من المعادلة (8-9) ينتج أن سرعة المكبس تتغير تبعاً للزاوية φ بقانون جيبى، وواضح من العلاقة أن: $c = 0 \rightarrow \varphi = 0^\circ \text{ and } \varphi = 180^\circ$ أي في الوضعين الحدين للمكبس .

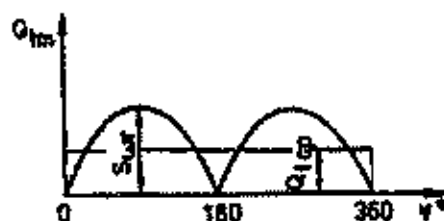
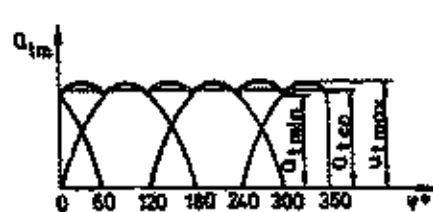
في حالة مضخة ذات مكبس واحد وحيد التأثير فإن التدفق اللحظي النظري هو :

$$Q_{im} = F \cdot c = F \omega r \sin \varphi \quad (8-11)$$

أي يعبر عنه باستخدام معادلة الاستمرار كناتج لجداء سرعة المكبس في مساحة مقطعه ، تتغير قيمة Q_{im} تبعاً للزاوية الدوران φ بقانون جيبى ، يبين الشكل (4-8) تغير الغزارة اللحظية المثالية كتابع للزاوية φ .



a - مضخة ذات مكبس واحد أحادية التأثير . b - مضخة ثنائية المكبس أحادية التأثير .



c - مضخة ذات مكبس واحد ثنائية التأثير .
d - مضخة ثلاثية المكابس أحادية التأثير

بزاوية طور 120°

الشكل (4 - 8) تغير الغزارة اللحظية النظرية في المضخات المكبسية

التدفق النظري الوسطي للمضخة المكبسية Q_r يمثل ارتفاع مستطيل على أساس المساواة مع الشوطين للمكبس أي من $\varphi = 0$ حتى $\varphi = 360^\circ$ ومساحة مساوية للمساحة المحصورة بين المنحني الممثل لتغير الغزارة اللحظية للمضخة و المحور الأفقي.

يعبر عن عدم انتظام الغزارة للمضخة المكبسية بمعامل عدم الانتظام:

$$\sigma = \frac{Q_{r \max} - Q_{r \min}}{Q_r} \quad (8-12)$$

حيث $Q_{r \min}$ و $Q_{r \max}$ هما التدفق اللحظي النظري الأعظمي و الأصغري بينما Q_r هي التدفق الوسطي النظري. يعطى معامل عدم الانتظام لمضخة وحيدة التأثير تبعاً لعدد المكابس بالجدول التالي:

الجدول (8-1)

عدد المكابس z	1	2	3	4	5
معامل عدم الانتظام σ	3,14	1,57	1,14	0,342	0,05

من وجهة نظر زيادة عدم الانتظام للتدفق فإنه ينصح باستخدام مضخات بأعداد كبيرة من المكابس.

8-1-3 - الحجرات الهوائية ، مخطط مؤشرات الأداء

Air Chamber , Indicator Diagram :

لتحقيق تدفق أكثر انتظاماً ولتخفيض تأثير قوى عطالة السائل في أنابيب السحب و الضخ

تزود المضخات المكبسية عادة قبل و بعد الحجرات العاملة لها بحجرات خاصة، للسحب (1) وللضخ (2) مملوءة جزئياً بالهواء الشكل (5-8) . يمثل الهواء وسطاً مرناً يقلل عدم انتظام التدفق في الأنابيب .من أجل حجم هواء كبير كفاية في الحجرات فإن تغير الضغط يكون

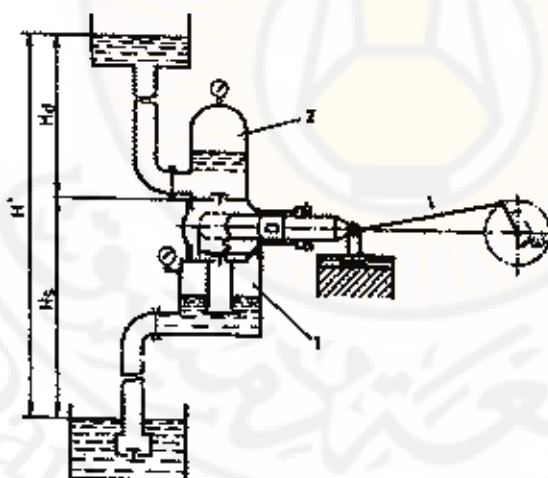
مهملاً. يجري السائل في أنابيب السحب والضخ تحت شروط ضغط ثابت تقريباً للهواء في الحجرات و بالتالي عملياً بسرعة ثابتة يتميز عمل الحجرات الهوائية بما يسمى معامل عدم الانتظام و الذي يحدد بالعلاقة:

$$\delta = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_m} \quad (8-13)$$

حيث $p_{\max}$; $p_{\min}$; $p_m = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2}$ هي على التوالي الضغوط الأعظمي و الأصغري و الوسطي للهواء في الحجرات. عادة من أجل الحجرات الهوائية عند جزء الضخ $\delta \leq 0,02$ و في منطقة السحب $\delta = 0,004 + 0,05$.
يحدد حجم الحجرة الهوائية بالعلاقة:

$$V_K = \frac{3}{2} \frac{\Delta V}{\delta} \quad (8-14)$$

حيث $\Delta V = V_{\max} - V_{\min}$; $V_{\max}$; $V_{\min}$ هي الحجم الأعظمي والأصغري في الحجرة، أما الحجم الوسطي للهواء في الحجرة $V_m = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$ فيقبل عادةً:
 $V_m = \frac{2}{3} V_K$



الشكل (8-5) مخطط مضخة مكبسية مع حجرات هوائية

مخطط مؤشرات الأداء للمضخة المكبسية يمثل مخطط تغير الضغط في الحجرة العاملة لشوط ثنائي واحد للمكبس (لدورة واحدة لمحور الدوران).

إذا استبدلت $p_i = \rho g H_i$ ، حيث H_i هو الضغط الداخلي:

$$P_i = \rho g H_i \frac{F s n}{60 \cdot 1000} = \frac{\rho g Q_i H_i}{1000} [kW] \quad (8-17)$$

حيث Q_i هي التدفق الوسطي النظري.

من أجل مضخات بأكثر من مكبس واحد تزداد الاستطاعة P_i بشكل يوافق عدد المكابس.

الاستطاعة المفيدة (الفعالة) للمضخة المكبسية هي:

$$P_e = \frac{\rho g Q H}{1000} [kW] \quad (8-18)$$

حيث Q هي الغزارة الفعلية. H هو الضاغط الفعلي للمضخة . المردود الحجمي

للمضخة المكبسية η_Q هو:

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_i} = \frac{Q}{Q + \Delta Q} \quad (8-19)$$

حيث ΔQ هي الضياعات الحجمية التي تعود إلى التأخر في إغلاق الصمامات و عدم الإحكام التام بين الصمامات و مضاجعها في حالة الإغلاق ووجود خلوصات حول المكبس وعدم الفعالية المطلقة لممانعات التسرب ووجود هواء أو بخار في الحجرة العاملة وغيرها من العوامل.

المردود الهيدروليكي للمضخة المكبسية η_H هو :

$$\eta_H = \frac{H}{H_i} = \frac{H}{H + \Delta H} \quad (8-20)$$

حيث ΔH الضياعات الهيدروليكية في المضخة .

مردود الأداء (المؤشرات) للمضخة η_i :

$$\eta_i = \frac{P_i}{P} = \frac{Q H}{Q_i H_i} = \eta_Q \eta_H \quad (8-21)$$

المردود الميكانيكي للمضخة المكبسية η_m :

$$\eta_m = \frac{P_i}{P} = \frac{P_i}{P_i + \Delta P} \quad (8-22)$$

حيث ΔP هو ضياعات الاستطاعة بسبب الاحتكاك مع الممانعات والاحتكاك في الأجزاء المتحركة وجملة نقل الحركة .

المردود الكلي للمضخة المكبسية η هو :

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \eta_Q \eta_H \eta_m \quad (8-23)$$

أو

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{1000 P} \quad (8-24)$$

حيث : $P [kW]$

أو :

$$P = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta} [kW] \quad (8-25)$$

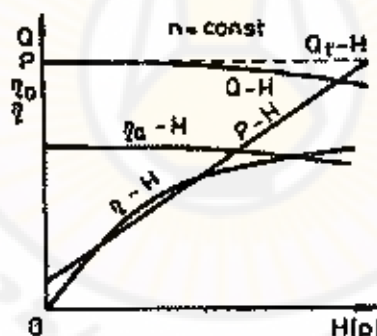
عموما تأخذ المراديد التجزئية للمضخات المكبسية القيم التالية :

$$\eta_Q = 0,85 \div 0,98 \quad ; \quad \eta_H = 0,85 \div 0,95 \quad ; \quad \eta_m = 0,85 \div 0,95 \quad ; \quad \eta = 0,65 \div 0,88$$

8-1-5 - المنحنيات المميزة ، العمل في منظومة ضخ Characteristics , Piping

تمثل المنحنيات المميزة المخططات التي تبين العلاقة بين الضاغط H و بقية البارامترات

أي الغزارة Q و الاستطاعة P و المردود η من أجل عدد دورات ثابت أي $n = const$ كما في الشكل (8-7).



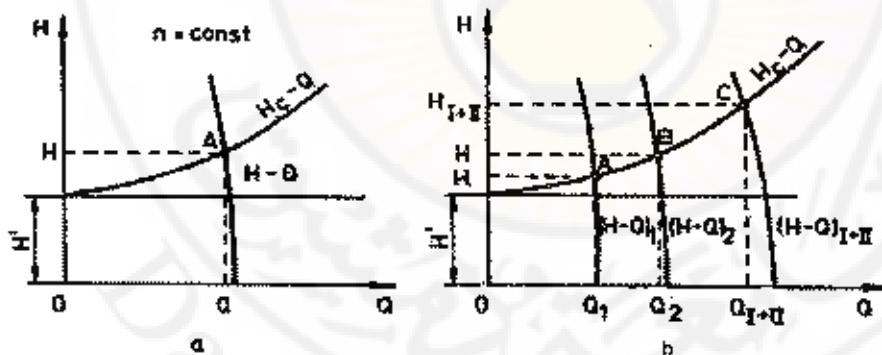
الشكل (8-7) المنحنيات المميزة لمضخة مكبسية .

في الآلات الحجمية التي تعمل على نقل الماء بما فيها المضخات فإنه بدلاً من استخدام الضاغط H بوحدة متر سائل يستخدم ضغط السائل عادةً p ، الذي يحدد بقيمة الفرق بين الضغوط عند مدخل المضخة و مخرجها أي :

$p = p_d - p_s$ (يهمل تأثير تغير الطاقة الحركية لصغرها) . في حالة $p = \rho g H$ وفي بعض الحالات يعطى الضغط عند مخرج المضخة فقط p_d (يعني عادة فقط مع p) المحدد

من أجل ضغط ثابت عند المدخل p_s ، يحدد التدفق الوسطي النظري Q_r حسب العلاقات (6-8) و (7-8) من قيمة الحجم العامل و عدد الدورات و هو لا يتعلق بقيمة الضاغط H أو الضغط p لذلك و من أجل جملة الإحداثيات المقبولة فإن العلاقة $(Q_r - H)$ تمثل بمستقيم مواز للمحور الأفقي (محور الضغوط) ، في الواقع فإنه مع زيادة ضغط المضخة تزداد ضياعات التدفق عبر الخلوصات و الوصلات في المضخة و نتيجة لذلك فإن المنحني المميز الفعلي $(Q - H)$ ينحرف عن النظري . تزداد استطاعة المضخة P بشكل طردي مع ازدياد الضغط p ، و عندما يكون الضغط معدوماً $H = 0$ أي من أجل عمل شوط فارغ يكون للاستطاعة قيمة صغيرة تستهلك للتغلب على الضياعات الميكانيكية و مقاومات الصمامات و مقاومات السائل داخل المضخة . مع ازدياد الضغط تنخفض الاستطاعة للشوط الفارغ بالنسبة للاستطاعة الكلية للمضخة و نتيجة لذلك فإن مردود المضخة η يزداد حتى يصل إلى القيمة المثالية التي يبدأ بعدها بالتناقص من جديد .

عند تحديد نظام العمل لمضخة مكبسية في شبكة ضخ محددة من المفيد استخدام المنحنيات المميزة التي تبين العلاقة بين الغزارة Q والضاغط H (أو الضغط p) والتي تستخدم كما في المضخات الطاردة أي على المحور الأفقي تمثل للغزارة و على المحور الشاقولي تحمل الضغوط و يحمل على نفس المخطط المنحني المميز للشبكة $H_c - Q$ و تحدد نقطة التشغيل كنقطة تقاطع المنحني المميز للألة و المنحني المميز للشبكة الشكل (8-8) .



الشكل (8-8) مخطط عمل آلة ضخ مكبسية في شبكة ضخ .

يبين الشكل (8-8-b) حالة عمل مضختين مكسيتين مختلفتين موصولتين على التفرع حيث يتم إيجاد المتحني المميز لمجموعة المضختين $(H-Q)_{1+2}$ من خلال جمع الغزرات لكلا المضختين من أجل الضواغط نفسها.

النقاط A , B تمثل نقاط التشغيل من أجل عمل أي من المضختين بشكل مستقل أما النقطة C فتمثل العمل المشترك للمضختين على التفرع . بنفس الطريقة يدرس عمل المضخات الترددية و الدورانية في حالة الوصل على التفرع .

8-1-6 - تنظيم الغزارة في المضخات المكبسية

Capacity Regulation In Reciprocating Pumps

يمكن تنظيم الغزارة من خلال الكثير من الطرق و منها:

أ - من خلال تغيير عدد الدورات أي من خلال تغيير عدد الأسواط الثنائية في الدقيقة و في هذه الحالة يتغير التدفق بنفس نسبة تغير عدد الدورات:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

حيث Q_1 , Q_2 التدفقات الموافقة لأعداد الدورات n_1 , n_2 .

لهذه الطريقة تستخدم محركات ذات أعداد دورات متغيرة (محركات تعمل بالتيار المستمر ، محركات تحريضية مع إمكانية التحكم بعدد الدورات و غيرها) أو من خلال التغيير عبر جملة نقل الحركة التي تربط المحرك بالمضخة هذه الطريقة للتحكم جيدة من وجهة نظر الطاقة و لكنها وفي الوقت نفسه معقدة لذلك فإنها تستخدم عادة مع المضخات الضخمة.

في المضخات المكبسية ذات التأثير المباشر لا يمكن تغيير عدد الأسواط من خلال ملء متغير لأسطوانة الآلة.

ب - من خلال تغيير طول شوط المكبس و يمكن التحكم بذلك بواسطة تغيير مواصفات آلية الذراع و المرفق تؤمن طريقة التحكم هذه حجم عامل محدد بدقة للأسطوانة و لذلك فإنها تستخدم في الآلات المكبسية الحاقنة.

ت - من خلال تنظيم مناسب لعمل صمام السحب في هذه الحالة يبقى صمام السحب مفتوحاً لفترة زمنية محددة خلال شوط الضخ للمضخة وبهذه الطريقة تسحب المضخة حجماً من السائل خلال شوط السحب مساوياً لحجمها الكامل و خلال شوط الضخ يعود جزء من هذا السائل إلى أنبوب السحب إلى أن يصل الضغط في الحجرة العاملة إلى القيمة المطلوبة و عندها يغلق

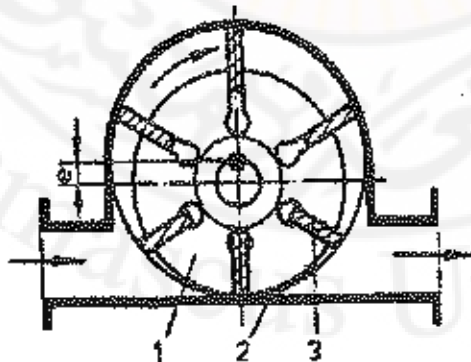
صمام السحب و يضخ السائل عبر أنبوب الضخ يتم التحكم بصمام السحب ألياً كهربائياً أو هيدروليكياً . هذه الطريقة غير محببة بسبب ضياع الطاقة خلافاً للحالتين المذكورتين أعلاه.

ث - من خلال أنبوب جانبي مع فتحة تصريف في هذه الحالة يعود جزء من السائل الخارج إلى أنبوب الضخ عبر أنبوب جانبي موصول إلى أنبوب السحب، يتم التحكم بكمية السائل العائد إلى أنبوب السحب بواسطة سكر . تستخدم هذه الطريقة لتقليل التدفق بما لا يقل عن 30 % من قيمة تدفق المضخة العادية، الطاقة المقدمة للسائل المعاد في هذه الحالة هي طاقة غير مفيدة مما يجعل هذه الطريقة في التحكم بالغزارة غير مقبولة و لا تجد لها تطبيقاً عملياً.

ثانياً 8 - 2 - المضخات الصفائحية Rigid rotor Vane (Sliding Gate) Pumps :

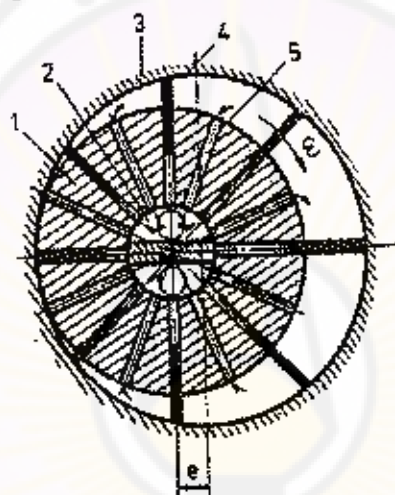
تعمل الآلات الصفائحية بمبدأ الآلات الحجمية ولكنها خلافاً للمضخات المكبسية فإن الفصل بين شوط السحب وشوط الضخ يتم بواسطة صفائح . وهناك نوعان مختلفان من هذه المضخات :

أ - مضخات صفائحية ذات سحب ودفع خارجيين كما في الشكل (9-8) وتتألف من جزء دوار (1) يتوضع بشكل لا محوري داخل جسم الآلة (2) . تتوضع مجموعة من الصفائح في قنوات قطرية محفورة في الدوارة ويتدفع هذه الصفائح للالتصق بالسطح الداخلي لجسم الآلة بفعل ضغط السائل أو بتأثير نوابض مثبتة داخل القنوات . عند دوران الدوارة ونتيجة التماس بين الصفائح والسطح الداخلي للآلة فإن هذه الصفائح تنزلق داخل القنوات في الدوارة ونتيجة لذلك فإن الفراغ المحصور بين جسم الآلة والدوارة يقسم بواسطة الصفائح إلى عدد من الحجرات (10÷12) والتي يتغير حجمها أثناء الدوران بشكل مستمر . وعندما يكبر حجم الحجرة ينجز شوط السحب بينما ينجز شوط الضخ عندما يصغر حجم الحجرة مما يعني أن كل حجرة تعمل على ضخ السائل مرة واحدة فقط من أجل دورة واحدة للدوارة لذلك تصنف هذه الآلة بأنها وحيدة التأثير



الشكل (9-8) مخطط مضخة صفائحية ذات سحب ودفع خارجيين

ب - مضخات صفائحية ذات سحب ودفع داخليين (كما في الشكل (8-10) تدور الدوارة (1) حول محور ثابت مهمته فصل داخل الدوارة إلى قسمين وفي قنوات الدوارة تتوضع الصفائح (4) وبين كل صفيحتين في جسم الدوارة تصنع قناة (5) تصل الحجرة المحصورة بين الصفيحتين المجاورتين وجسم الآلة مع تجويف محوري (2) داخل الدوارة وبسبب التوضع اللامركزي للدوارة داخل جسم الآلة وحسب اتجاه الدوران المبين على الشكل فإن القسم العلوي من المضخة والموافق لزيادة حجم الحجرات يعمل على سحب السائل من التجويف المحوري بينما يتم الضخ في النصف السفلي للمضخة . واضح أن السحب والضخ يتم عبر القنوات المشغولة في الدوارة بين صفيحتين متجاورتين كما أن محور الآلة غير متحرك ومقسوم إلى جزأين مفصولين عن بعضهما بواسطة حاجز واحد من القسمين للسحب والآخر للضخ .



الشكل (8-10) مخطط مضخة صفائحية ذات سحب ودفع داخليين

نتيجة التصميم الخاص فإنه يمكن التحكم بغزارة المضخات الصفائحية من خلال إمكانية تغير الحجم العامل للحجرات بتغيير لا مركزي الدوارة وجسم الآلة كما يمكن التحكم بها من خلال التحكم بعدد دورات الآلة .

في الآلات وحيدة التأثير فإن الدوارة والمحامل يتم تحميلها بالقوى من اتجاه واحد مما يؤثر على عمر الآلة ويعقد إمكانية تصنيع آلات باستطاعات عالية . في هذه الحالة من الأنسب استخدام آلات ثنائية التأثير الشكل (8-11) والتي تحمل بها الدوارة بقوى الضغط والغزارة بشكل أكثر توازناً (انتظاماً) . يتراوح المردود الحجمي لهذه الآلات في المجال $\eta_D = 0,7 \div 0,9$

والمردود الكلي $\eta = 0,6 \div 0,8$ ، تصنع الآلات الصفائحية لتعمل بتدفق يصل حتى $6 [dm^3 / s]$ لتحريك آلات قطع المعادن وتدفق حتى $25 [dm^3 / s]$ عند استخدامها لتحريك السوائل عالية اللزوجة، وتتراوح الضغوط التي تولدها بحدود $[2 \div 7 MPa]$ ، وعدد دورات $500 \div 1500 (3000) [r.p.m]$

يحدد التدفق اللحظي النظري بالعلاقة :

$$Q_{im} = 2R_e b \cos \varphi \quad (8-26)$$

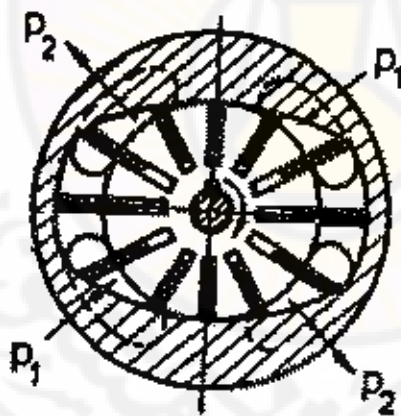
حيث R_e قطر جسم الآلة .

b عرض الصفيحة .

من أجل عدد صفائح كبير يصبح الفارق بين التدفق اللحظي الأعظمي والأصغري والتدفق الوسطي النظري قليل نسبياً ، أي :

$$Q_{im} = 2R_e b \omega = W \omega \quad (8-27)$$

في العلاقة الأخيرة ω هي السرعة و R_e ، b هي مساحة المقطع. وأضح هنا أننا نطبق معادلة الاستمرار وباستخدام مفهوم الحجم المميز W يمكن بسهولة إيجاد علاقة الاستطاعة الوسطية النظرية.



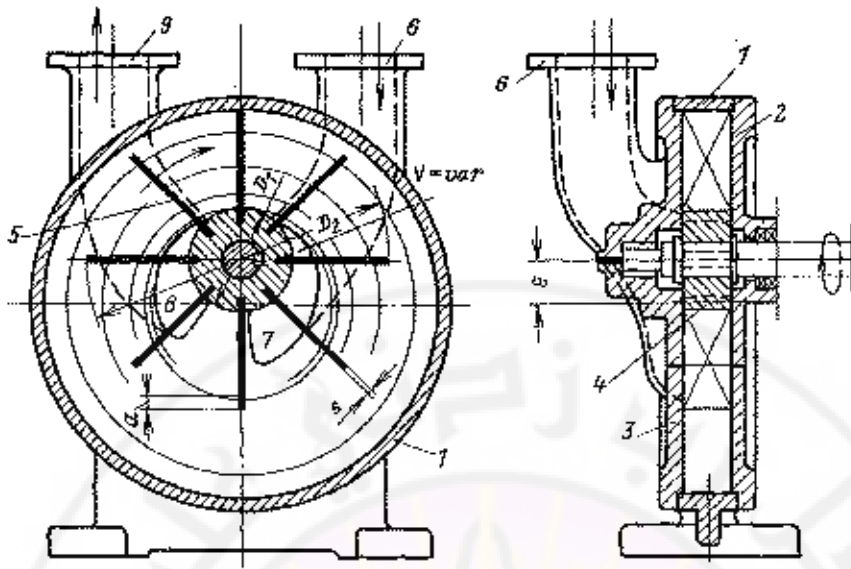
الشكل (8-11) مخطط مضخة صفائحية ثنائية التأثير.

ثالثاً 8 - 3 - المضخات التخلخلية - الدائرية المائية Liquid Ring Vacuum Pumps

8 - 3 - 1 مبدأ العمل Principle Of Operation :

من أجل الحصول على تخلخل وسحب الهواء و الغازات تستخدم المضخات التخلخلية - الدائرية المائية بشكل واسع .

يظهر الشكل (8-12) تصميم مثل هذا النوع من المضخات وطريقة عملها .



الشكل (8-12) المضخات التخلخلية - الدائرية المائية

على الجسم الأسطوانى (1) تثبت الأغشية (2) و (3) بشكل لا مركزي (الفرق ما بين المراكز C) جسم الدوارة (4) مع صفائح (5). عند دوران جسم الدوارة فإن الماء سيملاً جسم المضخة من الداخل مشكلاً حجماً دائرياً V حيث أن الحجم المميز على الشكل يتحرك من المكان المرتفع إلى المنخفض ويزداد تدريجياً ، لذلك تنشأ عملية سحب للهواء عبر الأنبوب (6) ودفعه عبر الفتحة (7). عند تحرك الحجم V من الموضع السفلي باتجاه الأعلى يتم تخفيض عملية طرد الهواء عبر الفتحة العرضية (8) وأنبوب الدفع (9).

واضح أن هذه الآلة يمكن أن تسحب وتطرد الهواء فقط عند وجود كمية كافية من الماء في حوضها. كما نلاحظ أن المضخة الدائرية المائية تشبه المضخة الدورانية الصفائحية تبعاً لطريقة عملها .

8 - 3 - 2 - التخلخل - الغزارة - الاستطاعة Vacuum - Capacity - Power :

صفائح أو ريش هذه المضخات لا يمكن أن تثبت بشكل مطلق مع الجسم. عملياً يوجد فراغ بين سطح الأقراص والصفائح يتراوح ما بين $1.1 \div 0.05 \text{ mm}$ ، أي أن هناك احتمال عودة السائل أو الغاز من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة السحب وهذا يؤثر في أداء المضخة. عند التثبيت المطلق للصفائح في الجسم والإغلاق الكامل للخناق المركب على أنبوب السحب، عندها تؤمن المضخة في جوفها تخلخلاً في الضغط مساوياً لضغط البخار المشبع عند درجة

حرارة الماء الموجود في المضخة. أي عندما $T = 293^\circ K$ فإن ضغط السحب تبعاً للشروط المشارة إليهما سيكون $2,38 [kPa]$ أي أن المضخة تولسدد تخلخل مساوياً: $\frac{103,3 - 2,38}{103,3} = 98\%$. فعلياً التخلخل الناتج عن مثل هذا النوع من المضخات

وعند الإغلاق الكامل لأنبوبة السحب لا يزيد عن 92%.

الغزارة $[m^3 / s]$ لهذا النوع من المضخات ومن أجل شروط السحب تتحدد بالعلاقة :

$$Q = \left\{ \pi \left[\left(\frac{D_2}{2} - a \right)^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \right] - Z(L - a)S \right\} \frac{h n}{60} \eta_0 \quad (8-28)$$

حيث : D_1, D_2 الأقطار الداخلية والخارجية للصفائح .

a الانغماس الأصغري للريشة في الدائرة المائية .

L الطول القطري للريشة ويساوي $\frac{D_2 - D_1}{2}$.

S سماكة الريشة .

b عرض الريشة .

n عدد الدورات .

η_0 المردود الحجمي ويساوي تقريباً 96%.

حساب استطاعة المضخة التخلخلية - الدائرية المائية يتم وفق الطريقة المتبعة في العلاقة

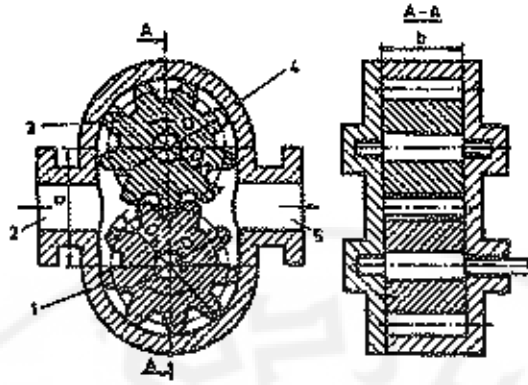
$$\left(N = \frac{M g H}{\eta_o \eta_M \eta_{II}} = \frac{M g H}{\eta} \right)$$

ومردود هذه المضخات لا يزيد عادة عن 50%.

يلاقى هذا النوع من المضخات انتشاراً واسعاً في العمليات التكنولوجية التي تتطلب تأمين تخلخل الغاز وسحبه ، في محطات الضخ الكبيرة يمكن استخدام هذه المضخة لملء المضخات الطاردة المركزية أو المحورية بالماء قبل تشغيلها.

رابعاً 8 - 4 - المضخات المسننية Gear Pumps.

تتميز الآلات المسننية ببساطة التصميم ووزنها الخفيف وأبعادها الخارجية الصغيرة نسبياً ، وتصمم بدولابين مسننين أو ثلاثة دوليب أو أكثر. وهي إما داخلية أو خارجية التعشيق المضخات المسننية الداخلية التعشيق سهلة التوليف ضمن مكان العمل وتستخدم في منظومات الضخ صغيرة الحجم مثل حراقات الوقود وغيرها .



الشكل (8-13) مخطط مضخة مستننية

يمثل الشكل (8-13) رسماً تخطيطياً للنموذج الأكثر شيوعاً من هذه المضخات وهو لمضخة مستننية بدولابين مستننين متشابهين (1) و (3) متعشقين فيما بينهما خارجياً و يتوضعان داخل جسم الآلة 4 أحد الدولابين المستننين (1) هو دولاب قائد يتصل مباشرة بعمود دوران محرك عبر محوره الذي يخرج من جسم الآلة ، الدولاب الثاني مفاد يحركه الدولاب القائد . الخلوصلات القطرية والجانبية بين الدوليب وجسم الآلة صغيرة جداً عند دوران الدوليب بالاتجاه المبين على الشكل يدخل السائل عبر فتحة السحب (2) إلى الفراغات الحرة بين الأسنان وتتقل في الحجر بين الأسنان وجسم الآلة باتجاه فتحة الضخ (5) .

هنا عند وصول السائل بين الأسنان إلى حجرة الضخ يفساب السائل من الفراغات بين الأسنان داخل حجرة الضخ . مكان انزلاق الأسنان يمثل بطانة (مانعة تسرب) حركية تعزل منطقة السحب عن منطقة الضخ في المضخة .

في لحظة التعشيق بين الأسنان ينتج انضغاط للسائل بينها يترافق مع زيادة حادة في الضغط ينتج عنها حمولات كبيرة بين الأسنان وعلى محامل الآلة ولتخفيف هذه الأحمال تصنع قنوات على جسم الآلة أو على الدوليب المستننة تسمح بوصول السائل المضغوط إلى جزء الضخ أو جزء السحب .

في المضخات المستخدمة لتوليد ضغوط عالية ، نتيجة لفرق الضغط الكبير بين مخرج المضخة p_2 ومدخل المضخة p_1 تؤثر في الدوليب المستننية قوى قطرية تؤدي إلى تحميل المحاور

والمحامل كما أنها يمكن أن تؤدي إلى انحراف الدواليب المسننة ، لذلك تصنع قنوات خاصة في هيكل هذه المضخات لتخفيف هذه الأحمال.

تستخدم الآلات المسننية من أجل طيف واسع من الضغوط التي يمكن أن يولدها فمنها من أجل ضغوط منخفضة تصل حتى $1 [MPa]$ وتستخدم عادة في منظومات التبريد أو التبريد أو لتحرك المسائل عالية اللزوجة ، أو متوسطة تصل حتى $3 [MPa]$ وتستخدم في منظومات النقل والتحرك الهيدروليكي لاسيما في آلات قطع المعادن، أو عالية بحدود $16 \div 25 [MPa]$ وتستخدم في النقل الهيدروليكي وفي الآلات ذات الحمولات الكبيرة مثل آلات الرفع والطحن والصناعات الثقيلة ولتوليد الضغوط العالية تستخدم مضخات مسننية متعددة المراحل.

يحدد التدفق الوسطي النظري لمضخة مسننية بدولابين مسننين متماثلين متعشقين خارجياً بأسنان مستقيمة بالعلاقة :

$$Q_t = 2 \pi b m \left(z + 1 - \frac{\pi^2 \cos^2 \alpha}{12} \right) \frac{n}{60} \quad [l/s] \quad (8-29)$$

حيث : $b [dm]$ عرض الدواليب .

$m [dm]$ موديول الدواليب .

z عدد أسنان الدواليب .

α زاوية التعشيق (عادة $\alpha = 20^\circ$) .

حجم الفراغ بين الأسنان عادة أكبر من حجم السن بقليل ، وبفرض أنهما متساويان فإنه يمكن حساب Q_t بدقة عملية مناسبة باستخدام العلاقة :

$$Q_t = \frac{2 \pi z m^2 n b}{60} = W \omega \quad (8-30)$$

حيث الحجم المميز $W = z m^2 b$.

المردود الحجمي للمضخات المسننية بحدود $0,98 : 0,75$ η_Q ويزداد بازدياد عدد الدورات ،

أما المردود الكلي لهذه المضخات $0,85 : 0,6$ η . يصل التدفق في المضخات المسننية

الصغيرة إلى $1,5 \div 0,02 [dm^3/s]$ أما في الكبيرة منها فيمكن أن يصل حتى

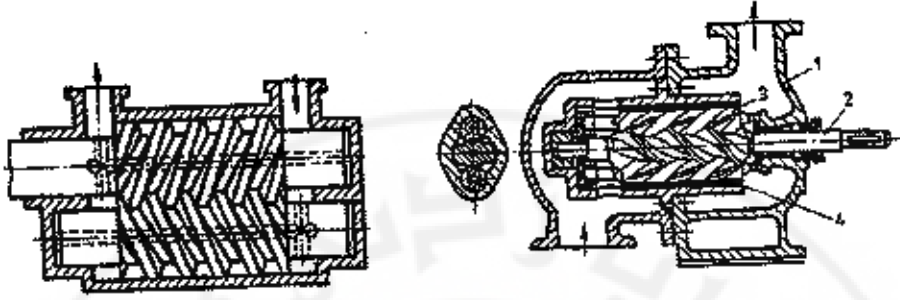
$20 \div 12 [dm^3/s]$. تتم عملية تنظيم الغزارة في المضخات المسننية من خلال التحكم (تغيير)

عدد الدورات أو من خلال نقل السائل من أنبوب الدفع إلى أنبوب السحب. الآلات المسننية هي

آلات عكوسة أي أنه إذا ضخ فيها سائل بضغط عالٍ فإنها تعمل كمحرك هيدروليكي.

خامسا 8-5 - المضخات اللولبية Screw Pumps .

يمكن أن تكون المضخات اللولبية أحادية اللولب أو ثنائية أو ثلاثية اللولب والأخيرة هي الأكثر انتشارا



الشكل (8-14) مخطط مضخة ثلاثية اللولب
الشكل (8-15) مخطط مضخة ثنائية اللولب

وبين الشكل (8-14) رسما تخطيطيا لهذا النوع . تتألف هذه المضخة من جسم الآلة (1) مثبت بداخله قميص (بطانة) بثلاث قنوات طويلة أسطوانية متداخلة فيما بينها ، قطر القناة الوسطى أكبر من قطر القناتين الجانبيتين (نفسه للقناتين) في القناة الوسطى يركب اللولب القائد (2) وفي القناتين الجانبيتين تركب اللولب المقادة (3) . القطر الداخلي للولب القائد يساوي إلى القطر الخارجي للولبين المقادين ، واللولب ثنائية الخطوة والأسنان ببروفيل سيكلويدلي . أحد طرفي اللولب القائد يمر عبر جسم الآلة ليتصل بالمحرك . يملأ السائل المسحوب القنوات بين ثانيا اللولب والمحصورة من الطرف الخارجي بالجدران الأسطوانية للقميص وبداخلها بأماكن الاتصال بين اللولب المتعشقة بإحكام . عند دوران اللولب فإن السائل القادم من أنبوب السحب يكون محصورا بين اللولب والقميص ويسبب التداخل المحكم بين اللولب فإن هذا السائل يندفع محوريا باتجاه أنبوب الضخ . يرتبط التدفق النظري Q_r في الآلات اللولبية بحجم الاسطوانة V التي يتحرك السائل ضمنها على طول اللولب في حدود خطوة واحدة لها t . الحجم $V = S t$ حيث S المقطع العرضي (واجهة) للمساحة الحرة بين القميص واللولب ، التدفق النظري هو :

$$Q_r = S t \frac{n}{60} [l/s] \quad Q_{tm} = 2R_e b \cos \varphi \quad (8-31)$$

تعمل المضخات ثلاثية اللولب عادة بعدد دورات حتى $n = 1800 [r.p.m]$ وتصل الغزارات التي تضخها حتى $250 [l/s]$ بضغط تصل إلى $35 [MPa]$ وتأخذ المراديد في هذا النوع

من الآلات القيم التالية : $\eta_Q = 0,75 \div 0,95$; $\eta_m = 0,85 \div 0,95$; $\eta = 0,65 \div 0,90$.
 في المضخات ثنائية اللولب الشكل (8-15) يكون للولين الأقطار نفسها ويكون التدفق النظري لها : $Q_t = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)t \frac{n}{60} [l/s]$ حيث D ; d القطر الخارجي والقطر الداخلي للولب ، t الخطوة ، n عدد الدورات في الدقيقة . عادة تصنع هذه المضخات بأحاديث مستطيلة مما يجعل عملية تصنيعها سهلة إلا أن ذلك يؤثر في توافقيتها . تستخدم لأجل تدفقات $0,6 [l/s]$ وفي بعض الحالات لتدفقات أكبر بكثير ، ومن أجل ضغوط حتى $10 [MPa]$ وتعمل بأعداد دورات تصل إلى أكثر من $10000 [r.p.m]$.

الفصل التاسع

الضواغط Compressors

9-1 - المفاهيم الأساسية Main Concepts :

تستخدم بعض آلات الجريان لتحريك الهواء أو الغازات الأخرى ودفعها وتصنف هذه الآلات حسب الضغوط التي تولدها إلى:

أ - المراوح : وتعمل بنسبة انضغاط تصل إلى $\epsilon = 1,15$.

ب - الضواغط : وفيها تكون نسبة الانضغاط $\epsilon > 1,15$.

وبالتالي فالضواغط هي تلك الآلات التي تقوم بضغط الغازات والهواء وتحركها باتجاه دائرة الأتابيب المحددة ، ويحدد عمل الضواغط بالبارامترات الأساسية التالية :

أ - التدفق الحجمي Q .

ب - الضغط الابتدائي p_1 .

ج - الضغط النهائي p_2 .

د - نسبة الانضغاط $\epsilon = \frac{p_2}{p_1}$.

هـ - عدد الدورات $n[r.p.m]$.

و - الأمطاعة N المطبقة على محور الضاغط .

9-2 - أنواع الضواغط Compressors Types :

تقسم الضواغط وفقاً لمبدأ عملها إلى المجموعات التالية:

الضواغط الحجمية : مكبسية ودورانية ، الضواغط ذات الريش : محورية وطاردة مركزية ، الضواغط التيارية .

يدار الضاغط بواسطة محرك كهربائي أو محرك احتراق داخلي وتستخدم الضواغط لضغط الهواء والغازات والأبخرة لضغوط تصل إلى : $10^3 [kp/cm^2]$ حيث يستخدم الهواء والغازات المضغوطة بشكل واسع في الصناعات الحديثة فمن بعض استخدامات الهواء المضغوط :

- تشغيل الأزاميل والمطارق الهوائية .

- تشغيل محركات الديزل الضخمة (عند الإقلاع) .

... تشغيل المحركات الهوائية في المناجم التي تستخدم لتجنب أخطار الانفجارات التي يمكن أن تنجم عن استخدام الكهرباء أو النار داخل المنجم .
 - توزيع الرسائل والبضائع في دوائر البريد وغيرها .
 ومن الغازات الأخرى المضغوطة يستخدم الأكسجين في عمليات اللحام ولأغراض طبية كما يستخدم غاز الأمونياك وغاز ثاني أكسيد الفحم وغاز الفريون في دارات التبريد .
 تعطى مجالات البارامترات المختلفة لعمل الضواغط حسب نوعها وفق الجدول التالي :

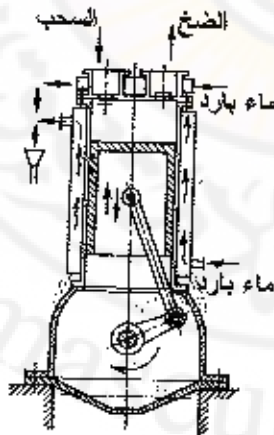
الجدول (9-1)

النوع	نسبة الانضغاط ϵ	الغزارة $Q [m^3 / min]$	عدد الدورات $[r.p.m]$
المكبسية	$2.5 \div 1000$	$0 \div 500$	$100 \div 3000$
الدورانية	$3 \div 12$	$0 \div 500$	$300 \div 15000$
الطاردة المركزية	$3 \div 20$	$100 \div 4000$	$1500 \div 45000$
المحورية	$2 \div 20$	$100 \div 15000$	$500 \div 20000$

9 - 2 - 1 - المبادئ التصميمية للضواغط :

9 - 2 - 1 - 1 - الضاغط المكبسي:

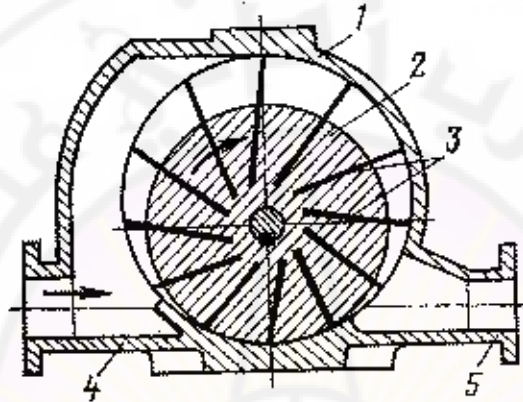
يبين الشكل (1-9) رسماً تخطيطياً لمكبس وحيد و. عند إنجاز دورة كاملة يتحرك المكبس شوطين الأول إلى الخلف حيث تتم عملية التمدد والسحب والثاني إلى الأمام حيث تتم عملية الانضغاط والدفع .



الشكل (1-9) المخطط التصميمي للضاغط المكبسي

9 - 2 - 1 - 2 - الضاغط الدوراني : (ذو الصفائح)

يتألف من محور مصمت صنعت عليه تجاويف وتتوضع داخل هذه التجاويف صفائح فولاذية، عند دوران المحور فإن هذه الصفائح تتحرك ضمن فراغ متغير المقطع الشكل (2-9) مما يؤدي إلى دخول الغاز بين الصفائح و انضغاطه ونقله من أنبوب السحب إلى أنبوب الدفع يوصل محور الضاغط مباشرة إلى محور المحرك أو عن طريق جملة نقل حركة



الشكل (2-9) المخطط التصميمي للضاغط الدوراني

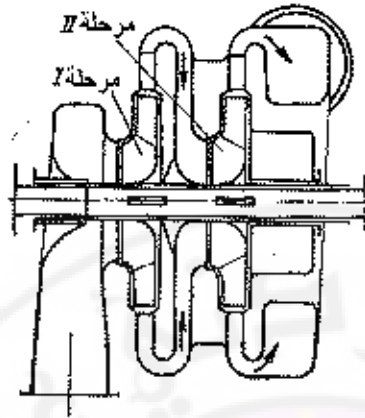
1 - الجسم 2 - الدور 3 - الريش 4 - أنبوب السحب 5 - أنبوب الدفع

9 - 2 - 1 - 3 - الضاغط الطارد المركزي:

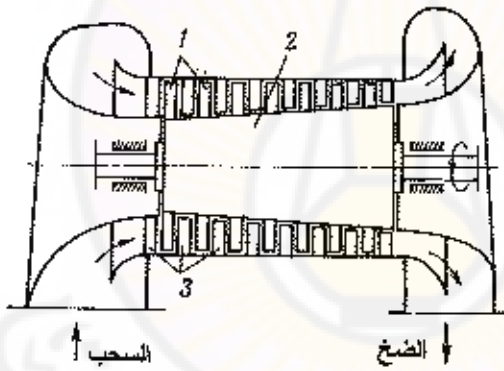
مبدأ عمله كالمضخة الطاردة المركزية تماماً الشكل (3-9) يوصل محوره إلى محور المحرك الذي بدوره مباشرة أو عن طريق جملة نقل حركة سواء أكان المحرك كهربائياً أم محرك احتراق داخلي أم كان الموصل إلى محور التوربين .

9 - 2 - 1 - 4 - الضاغط المحوري:

وهو عبارة عن محور دوران تثبت عليه مجموعة من الريش تدور معه وجسم الضاغط وتثبت عليه مجموعة من الريش تدعى ريش التوجيه. يتم سحب الغاز عبر أنبوب السحب محورياً لينضغط أثناء مروره بين الريش العاملة الذي يمكن أن يمر عبر عدة مراحل يدفع بعدها إلى أنبوب الدفع ليتم إيصاله إلى المستخدم . تدار الضواغط المحورية بمحركات كهربائية أو عنفات بخارية أو غازية.



الشكل (3 - 9) الضاغط الطاردي المركزي (بمرحلتين)



الشكل (4 - 9) الضاغط المحوري (سبع مراحل)

1 - الريش العاملة 2 - الدوارة 3 - ريش التوجيه

9 - 3 - ترموديناميك عملية الانضغاط Compressor Thermodynamics:

تميزت نظرية الضواغط بالدقة في الاستخدام وقد بنيت هذه النظرية على فرضية الغاز

المثالي الذي يخضع لمعادلة الحالة :

$$p = \rho RT$$

(9 - 1)

عندما يكون الضغط النهائي للضواغط الهوائية أكبر من $10 [M Pa]$ يجب استخدام معادلة الغاز الحقيقي

$$(9-2)$$

$$p = Z \rho R T$$

حيث Z : معامل الانضغاط .

المعادلات الأساسية :

إن الاستخدام المشترك لقانون الترموديناميك الأول ومعادلات الحالة للغاز المثالي يقود لاستنتاج معادلات عمليات الانضغاط والتمدد الحاصلة في الضواغط :

العملية البوليترابية

$$\frac{p}{\rho^n} = p v^n = \text{const} \quad (9-3)$$

العملية الأديباتية

$$\frac{p}{\rho^k} = p v^k = \text{const} \quad (9-4)$$

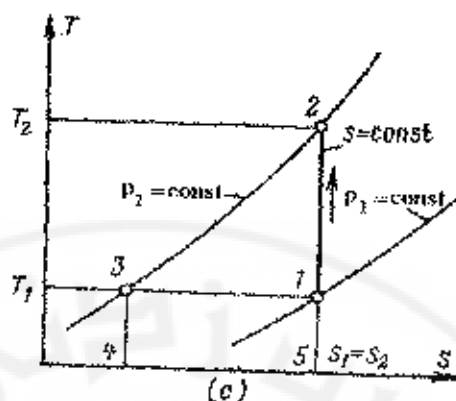
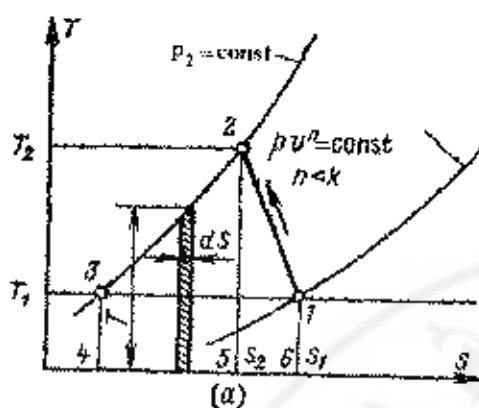
العملية الإيزوترمية:

$$\frac{p}{\rho} = p v = \text{const} \quad (9-5)$$

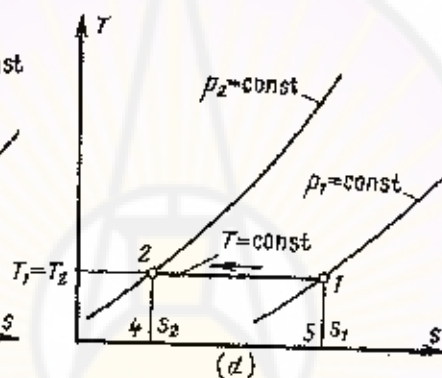
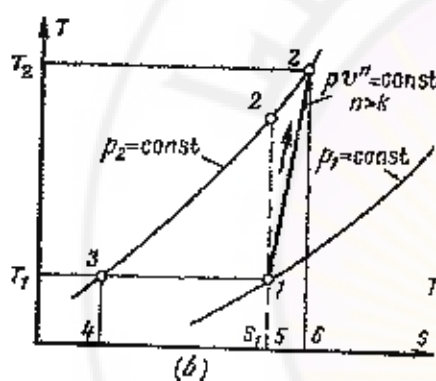
تعد العملية البوليترابية هي الحالة الأكثر تطبيقاً في الضواغط وذلك تبعاً للشروط الداخلية والخارجية مع اعتبار $n = 1.15 \div 1.8$. إضافة للحالات الثلاث السابقة هناك حالة رابعة في الضواغط وهي الحالة الإيزوترابية والتي تعبر عن ثبات القدرة نتيجة انعدام التبادل الحراري مع الوسط المحيط ومع الطاقة الداخلية الناتجة عن احتكاك الغاز المتحرك وهذه الحالة لا تطبق في الضواغط الحقيقية .

يبين الشكل (9-5-a) مخطط $T-S$ للعملية البوليترابية في الضواغط من أجل $n < k$ (ضواغط ذات تبريد مائي) أما في الشكل (9-5-b) فتمثل العملية على مخطط $T-S$ للعملية البوليترابية من أجل الضواغط الطاردة والمحورية $n > k$.

نلاحظ من الأشكال أن عملية الانضغاط تتم بشكل خطي في كل الحالات من 1 إلى 2 وتتميز بازدياد الضغط مترافقاً مع تغير الانتروبي وارتفاع درجة حرارة الغاز ، ومن خلال ذلك يزداد انثالبي الغاز .



الشكل (a) (5-9) العمليات الترموديناميكية الحاصلة في الضواغط من أجل $n < k$



الشكل (b) (5-9) العمليات الترموديناميكية الحاصلة في الضواغط من أجل $n > k$

يجب أن نشير إلى أنه في العملية البوليترودية ($n < k$) فإن الخط (1-2) يعبر عن عملية الانضغاط الحاصلة في الجوف العامل (أسطوانة ، القنوات بين الريش ، ...) أما الخط (1-3) فيعبر عن التبريد الإيزوباري للغاز المضغوط $p = \text{const}$ وهذا الإجراء يتم في مبرد الضواغط وشبكة النقل بالأنابيب .

طبقاً لقانون انحفاظ الطاقة فإن العمل المصروف على عمليتي الانضغاط والدفع للغاز يكون مساوياً للحرارة الناتجة في عمليات الانضغاط والتبريد الإيزوباري (دون حساب الضياعات

الميكانيكية) . باستخدام المفهوم الأساسي للإنتروبي نجد : $ds = \frac{dQ}{T}$ ومن أجل العمليات

$$Q_{1-2} = \int_1^2 T ds \quad , \quad Q_{2-1} = \int_2^1 T ds \quad (1-2) \text{ و } (2-3)$$

وبالتالي فإن المساحات (1-2-5-6) و (2-3-4-5) تعبر عن كمية القدرة الممنوحة للغاز لتحقيق عمليتي الانضغاط والدفع ، حيث تعبر المساحة (1-2-5-6) عن كمية الحرارة الناتجة عن الغاز ونتيجة الاحتكاك أما المساحة (2-3-4-5) فتعبر عن العملية الكلية للضاغط ، وبالتالي تكون الطاقة الكلية المصروفة من قبل الضاغط (دون الأخذ بعين الاعتبار الطاقة المهدورة على الضياعات الحجمية والمكانية) تمثل بالمساحة (2-3-4-6)

9 - 4 - المردود في الضواغط Compressors Efficiencies :

بعلاقة مماثلة للعلاقة المستخدمة لحساب استطاعة المضخات تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$N = \frac{\rho Q E}{1000 \eta_o \eta_M} \quad (9-6)$$

حيث: $\rho [kg/m^3]$ كثافة الغاز ، $Q [m^3/s]$ التدفق الحجمي للغاز ،

$E [j/kg]$ الطاقة النوعية للعملية الانضغاطية ، η_o المردود الحجمي للضاغط ،

η_M المردود الميكانيكي للضاغط ويعبر عن الطاقة المبذولة للتغلب على الفاقد الناتج

عن الاحتكاك الميكانيكي بين الأجزاء الثابتة والمتحركة وفي ميكانيزم نقل الحركة.

نجد الإشارة إلى أن الضواغط الحجمية (المكبسية مثلا) ذات عمليات دورية تبعا للحركة الدورية للأجزاء المتحركة فيها.

يختلف مفهوم فعالية الضاغط عن مفهوم المردود الطاقوي والذي يمثل نسبة الطاقة المحملة للغاز إلى الطاقة المصروفة على إجراء العملية الانضغاطية ، وهو ما نبينه معادلة الطاقة لعملية الانضغاط التي تأخذ صيغتها النهائية بالاستفادة من مبدأ انحفاظ الطاقة الذي ينص على أن الطاقة المصروفة في عملية الانضغاط تساوي تغير الإنتالبي وتغير الطاقة الحركية و الضياعات في الوسط المحيط. أي أن هذه المعادلة يمكن أن نكتب بالصيغة :

$$E = C_p (T_2 - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \pm q \quad (9-7)$$

وعندما تكون $c_1 = c_2$ تكون الطاقة النوعية المحولة للغاز في العملية الانضغاطية:

$$E = q = C_p (T_2 - T_1)$$

حيث q كمية الحرارة المنتشرة في الوسط المحيط نتيجة لتبريد الضاغط ، وبالتالي فالمردود الطاقى لعملية الانضغاط η :

$$\eta = \frac{C_p (T_2 - T_1)}{C_p (T_2 - T_1) + q} \quad (9-8)$$

باعتبار أن العملية الفعلية في الضواغط هي عملية بوليتروبية ذات أس n ، وطاقتها النوعية E عندها نعبر عن المردود للعملية الأديباتية والعملية الإيزوترمية كالتالي :

$$\eta_{ad} = \frac{E_{ad}}{E} \quad (9-9)$$

$$\eta_{izo} = \frac{E_{izo}}{E} \quad (9-10)$$

حيث E_{izo}, E_{ad} الطاقة النوعية للعملية الأديباتية و الإيزوترمية على التوالي المحددين بالعلاقين التاليين :

$$E_{ad} = \frac{k}{k-1} R [T_{2ad} - T_1] \quad (9-11)$$

$$E_{izo} = - \int_1^2 p_1 v_1 \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (9-12)$$

يستخدم المردود الإيزوترمي للضواغط ذات التبريد المائي الفعال (الضواغط المكسية و الدورانية) أما للضواغط الطاردة المركزية والمحورية فيستخدم المردود الأديباتي لتقدير فعاليتها .
من العلاقات الهامة في التطبيقات العملية هي العلاقة التي تربط المردود الأديباتي النسبي مع القيم الترموديناميكية لعملية الكبح (الغرلة) والاستفادة من العلاقة (9-1) ومن معادلة الطاقة في حالة الإجراء الأديباتي التي تعطى بالشكل :

$$E_{ad} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (9-13)$$

نستطيع كتابة العلاقة الأخيرة بالشكل :

$$E_{ad} = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (9-14)$$

والعملية الفعلية المائدة هي العملية البوليتروبية وبالتالي نكتب العلاقة (7-9) ضمن شرط الكبح $q = 0$:

$$E = C_p (T_2^* - T_1^*) \quad (9-15)$$

ومن هاتين العلاقتين نجد المردود الأدبياتي :

$$\eta_{ad} = \frac{\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_2^*}{T_1^*} - 1} \quad (9-16)$$

لتقدير الضواغط المكبسية ذات المرحلة الوحيدة وذات التبريد المائي الفعال يستخدم المردود الإيزوترمي الذي ينتج من العلاقتين (9-12) و (9-10) :

$$\eta_{izo} = \frac{R \ln \frac{p_2}{p_1}}{C_p \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)} \quad (9-17)$$

في هذه الحالة ليس هناك جدوى من الحساب اعتمادا على بارامترات الكبح بسبب السرعات الصغيرة في بداية عملية الانضغاط ونهايتها .

9 - 5 - التبريد - مفهوم الانضغاط متعدد المراحل

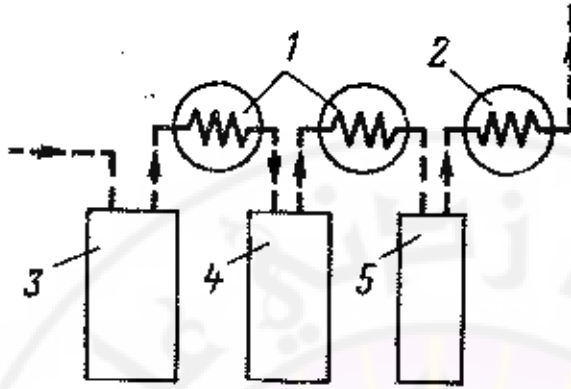
Cooling - Multistage Compression:

إن ضغط الغازات المستخدمة في الكثير من العمليات التكنولوجية يصل إلى قيم عالية جدا لا يمكن الحصول عليها باستخدام ضاغط ذي مرحلة واحدة وخاصة الضواغط الحجمية حيث ترتفع درجة حرارة الغاز بشكل كبير. وتصل إلى قيم تؤثر في أداء الضاغط ويصعب عندها تبريد الضاغط بالشكل اللازم . أما في الضواغط ذات الريش (الطاردة والمحورية) فإن معدن الريش ومئاتها لا يسمحان بالحصول على مثل هذه الضغوط بعملية انضغاط بمردود معقول. لذلك في مثل هذه الحالات تلجأ إلى :

أ - تأمين إمكانية تبريد عالية للغاز أثناء الانضغاط .

ب - إجراء الانضغاط في مراحل متعددة ومتتالية بحيث يتم تبريد الغاز بين المراحل المتتالية باستخدام مبردات .

يبين الشكل (6-9) مخططاً عاماً لضاغط ذي مراحل انضغاط متعددة حيث يتضح وجود المبردات بين المراحل التي تعمل على تخفيض درجة حرارة الغاز العامل .



الشكل (6-9) مخطط عام لضاغط ذو مراحل انضغاط متعددة

وتبريد الضواغط باستخدام إحدى الطرق التالية :

- 1 - تبريد الضواغط بالماء في أماكن معينة (التبريد الداخلي مثلاً) : وهذه الطريقة تحسن ظروف تزييت الضواغط المكثسية إضافة لما ذكر أعلاه عن توفير الطاقة .
- 2 - تبريد الغاز في مبردات متوضعة بين المراحل (التبريد القسري) : حيث تستخدم مبردات أنبوبية ذات مساحة سطوح تبريد كبيرة ، خاصة في الضواغط الطاردة المركزية .
- 3 - استخدام طريقة التبريد التجميحي (المركب) : وهي الطريقة الأكثر استخداماً وفعالية علماً أن تصنيعها معقد نوعاً ما .

4 - التبريد بواسطة حقن الماء المبرد في تيار الغاز قبل المرحلة الأولى للضاغط .
في صناعة الضواغط تصمم ضواغط معيارية بعدد محدد من المراحل تأخذ بالاعتبار الشروط المحيطة والتصميمية تبعاً لنوع ومكان عمل هذه الضواغط.

9-6 - المواصفات الديناميكية للضاغط ذات الريش - تحديد المواصفات

Dynamic Compressor Characteristics - Sealing Of Characteristics :

تعطى مواصفات (خواص) الآلة الضاغطة ذات الريش بمجموعة المنحنيات التي تمثل العلاقة بين الغاز و البارامترات الأخرى مثل : الضغط النهائي ، الاستطاعة ، المردود وذلك عند عدد دورات محدد لمحور الآلة .

كقاعدة نعد أن غزارة الألة هي تلك المقاسة عند فتحة السحب . يتم الحصول على هذه المواصفات (المنحنيات) باستخدام منصة تجارب وعند أعداد دورات مختلفة وتجرى التجارب باستخدام الهواء .

يجب الأخذ بالاعتبار أن ظروف عمل الضواغط تختلف عن تلك التي تمت فيها الاختبارات من حيث خواص الغازات ودرجات الحرارة وغيرها ، لذا فإن طريقة الحساب تعتمد الفرضيات التالية :

- 1 - نتيجة السرعات العالية للغاز في الضواغط فإن عدد رينولدز Re يكون كبيراً .
- 2 - عدد ماخ Ma يكون أقل من العدد الحرج ويظهر تأثيره عند الانتقال من طور لآخر .
- 3 - يبقى مخطط السرعة متشابهاً هندسياً خلال الأطوار المختلفة .
- 4 - يبقى مردود الضاغط η ثابتاً في الأطوار المختلفة .
- 5 - باستخدام التبريد اللاقشري للضاغط تكون عملية الانضغاط قريبة للإيزوترمية .
- 9 - 6 - 1 - تحديد المواصفات عند تغير سرعة الدوران :

إذا أعطيت المواصفات لضاغط عند عدد دورات n_a ، وكان المطلوب إنشاء مواصفات الضاغط عند عمله بعدد دورات n_b أكبر أو أصغر من n_a وذلك بالمحافظة على شروط البدء .

إن الغزارة الحجمية للضاغط تتحدد من معادلة الاستمرار ومن قيمة السرعة المطلقة للدالات القطرية والطاردة المركزية ومن السرعة المحورية للدالات المحورية ، حيث أن السرعة المطلقة تتناسب مع السرعة المحيطة استناداً لشروط التشابه الحركي وبالتالي فهي تتناسب مع عدد الدورات ، لذا عند درجات انضغاط غير كبيرة يمكن استخدام الصيغة الاعتيادية التالية :

$$Q_b = Q_a \frac{n_a}{n_b} \quad (9-18)$$

من معادلة التوازن للقدرة العملية الحاصلة في الضاغط ، والمرتبطة بالقدرة الميكانيكية المنقولة للريش مع طاقة التيار الغازي للضاغط ، حيث نجد في العملية الإيزوإنتروبية (الأديباتية) أن $n^2 = 1 - \frac{k-1}{k}$ حيث n عدد دورات محور الضاغط ، وبالتالي من أجل سرعتي دوران إحداهما معلومة والثانية n_b يجب تحديدها نستخدم العلاقة التالية :

$$\frac{\varepsilon_a^{\frac{k+1}{k}} - 1}{\varepsilon_b^{\frac{k+1}{k}} - 1} = \frac{n_a^2}{n_b^2} \quad (9-19)$$

وبالتالي درجة رفع الضغط (معامل الانضغاط) عند عدد دورات n_b :

$$\varepsilon_b = \left[1 + \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^2 \left(\varepsilon_a^{\frac{k+1}{k}} - 1 \right) \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (9-20)$$

أما لضواغط الهوائية فإن العلاقة السابقة تأخذ الشكل :

$$\varepsilon_b = \left[1 + \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^2 \left(\sqrt[3]{\varepsilon_a} - 1 \right) \right]^3 \quad (9-21)$$

عند حساب ε_b ومن أجل غزارات مختلفة بحسب الضغط p_b كالتالي : $p_b = p_1 \varepsilon_b$ وعندها تنشأ المواصفات لنظام التشغيل b .

تناسب الاستطاعة مع كثافة الغاز لذا فإن حساب الاستطاعة N_b من أجل نظام التشغيل b يتم بالصيغة التالية :

$$N_b = \frac{\rho_b}{\rho_a} \left(\frac{n_b}{n_a} \right)^3 N_a \quad (9-22)$$

9 - 6 - 2 - تحديد المواصفات عند تغير الخواص الفيزيائية للغاز :

تتعلق الخواص الفيزيائية للغاز تبعاً للمسألة المدروسة بكل من R ثابتة الغاز .

$k = \frac{C_p}{C_v}$ الأس الأدبياتي . ν اللزوجة الحركية . فإذا أعطيت بارامترات الغاز عند البدء :

درجة الحرارة T_{1a} ، الضغط p_{1a} ، العمل بسرعة دوران n_a من أجل غاز له الثوابت ν_a ، k_a ، R_a والمطلوب تحديد مواصفات عمل الضاغط عند ثبات عدد الدورات ولكن لغاز ثوابته ν_b ، k_b ، R_b وعند بارامترات بدائية p_{1b} ، T_{1b} .

في أغلب الجالات التطبيقية يمكن اعتبار أن $k_a = k_b = 1.41$ ويمكن إهمال تأثير اللزوجة الحركية عند إجراء الحسابات . من شرط تشابه مثلثات السرعة نجد أن معامل التدفق ثابت حيث

حيث : c السرعة المطلقة، u السرعة المحيطية ، أي $c_{1a} = c_{1b}$ وبالتالي $\frac{c_{1a}}{u_{1a}} = \frac{c_{1b}}{u_{1b}}$
 $Q_{1a} = Q_{1b}$

إن تغير ثوابت الغاز و البارامترات الابتدائية لا يؤثر في التدفق الحجمي للضاغط . بافتراض أن الطاقة النوعية للعملية الأديباتية الانضغاطية لا تتعلق بشروط البدء يمكن كتابة :

$$\frac{k}{k-1} R_a T_a \left(\varepsilon_a^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{k}{k-1} R_b T_b \left(\varepsilon_b^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

ومنه نجد :

$$\varepsilon_b = \left[1 + \frac{R_a T_{1a}}{R_b T_{1b}} \left(\varepsilon_a^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (9-23)$$

وبصيغة أبسط وباعتبار أن $k = 1,41$ ينتج :

$$\varepsilon_b = \left[1 + \frac{R_a T_{1a}}{R_b T_{1b}} \left(\sqrt[3]{\varepsilon_a} - 1 \right) \right]^3 \quad (9-24)$$

باختيار قيم p_a , Q_a للمواصفات المعطاة وتحديد $\varepsilon_a = \frac{p_a}{p_{1a}}$ وفق العلاقة (9-37) يتم

حساب $\varepsilon_b = \frac{p_b}{p_{1b}}$ ومنه يكون $p_b = \varepsilon_b p_{1b}$ ومن خلال قيمة p_b المحسوبة يتم بناء

مواصفات الضغط المطلوبة، أما مواصفات الاستطاعة فيتم بالطريقة السابقة نفسها .



الفصل العاشر

تصنيف الضواغط ومواصفاتها

Compressors Classification & Characteristics

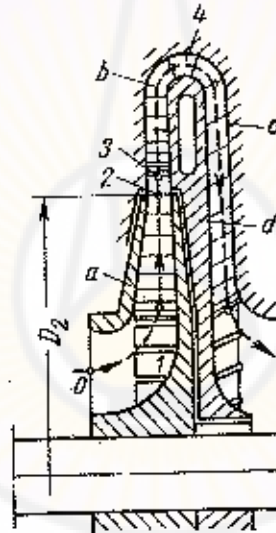
تمهيد :

تصنف الضواغط حسب مبدأ عملها إلى ضواغط ذات ريش وضواغط حجمية في هذا الفصل نستعرض أنواع هذه الضواغط ومواصفاتها الاستثنائية وطرق التحكم بأدائها وطرق اختيارها للعمل في منشآت محددة .

أولاً : الضواغط ذات الريش Dynamic Compressors

10 - 1 - الضواغط الطاردة المركزية Centrifugal Compressors :

10 - 1 - 1 - الضاغط الطارد المركزي المرحلي Centrifugal Compressors Stage :



الشكل (10-1) مخطط الضاغط الطارد المركزي المرحلي

يتألف الضاغط الطارد المركزي المرحلي من دولاب دائر a ، قناة تصريف (ناشرة) ، جهاز توجيه b ، وجهاز توجيه عكسي b' ، هذه الأجزاء مجتمعة تشكل ما يسمى مرحلة الضغط أو مرحلة الضاغط كما في الشكل (10-1) الدولاب الدائر وجهاز التوجيه العكسي مجزآن إلى حواجز c وهذه العناصر نفسها توجد في الضواغط متعددة المراحل . عند تحرك الغاز عبر أقنية المراحل فإن حالة الغاز ستتغير نتيجة لنقل الطاقة للتيار في الدولاب الدائر

ولاحتكاك الغازي ولتشكل الأعاصير والتبادل الحراري مع الوسط المحيط بالضاغط وبكتابة معادلة توازن الطاقة لتيار للجزء 2 - 1 حسب الشكل (1-10) طاقة الغاز في المقطع 1 عند

$$E_1 = \frac{c_1^2}{2} + C_p T_1 \quad ; \quad \text{الدخول في القناة بين الريش}$$

الطاقة المحوَّلة للغاز من قبل الريش العاملة حسب معادلة أويلر :

$$E = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}$$

طاقة الغاز في مقطع الخروج 2 :

$$E_2 = \frac{c_2^2}{2} + C_p T_2$$

فإذا كانت الطاقة المنقولة للوسط المحيط من الغاز المار عبر الدولاب الدائر معبرا عنها بكمية حرارة q ، عندها معادلة توازن القدرة :

$$E_1 + E - q = E_2$$

أو

$$\frac{c_1^2}{2} + C_p T_1 + (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) - q = \frac{c_2^2}{2} + C_p T_2$$

وبالتالي فإن درجة الحرارة النهائية للانضغاط في الدولاب :

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{2C_p} [c_1^2 - c_2^2 + 2(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})] - \frac{q}{C_p} \quad (10-1)$$

وبفرض أن العملية ايزوانتروبية (أديباتية) نجد :

$$T_{2ad} = T_1 + \frac{1}{2C_p} [c_1^2 - c_2^2 + 2(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})] \quad (10-2)$$

من أجل انضغاط ايزوانتروبي للغاز $\frac{T_{2a}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$ ومن العلاقتين الأخيرتين :

$$p_2 = p_1 \left\{ 1 + \frac{1}{2C_p T_1} [c_1^2 - c_2^2 + 2(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})] \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (10-3)$$

المعادلات (10-1) و (10-2) و (10-3) تربط الثوابت الترموديناميكية C_p , p , T

مع أبعاد وسرعة دوران وشكل ريش الدولاب الدائر للضاغط .

بسبب السرعات الكبيرة للغاز في الفتحات بين الريش تحصل ضياعات كبيرة ناتجة عن الاحتكاك و الأعاصير وبسبب تحول جزء من طاقة تيار الغاز إلى حرارة . وبذلك فعملية الانضغاط الحقيقية تكون أقرب إلى العملية البوليترودية $p v^n = \text{const}$ وبما أن انبعاث الحرارة من الغاز إلى الوسط المحيط صغير ففي هذه الحالة يمكن افتراض $q = 0$ وبالتالي :

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (10-4)$$

حيث $n = 1,5 \div 1,62$. في الحسابات العملية وباعتبار مراحل الضاغط المركزي وبدون تبريد فمري يستخدم مفهوم المردود الإيزوانتروبي ويحل المعادلتين (10-1) و (10-4) معا وشرط $q = 0$ وباستخدام المردود η_{ad} وخلال مراحل انضغاط ومن أجل عمليات بوليترودية وإيزوانتروبية نجد :

$$p_2 = p_1 \left\{ 1 + \frac{\eta_{ad}}{2C_p T_1} \left[c_1^2 - c_2^2 + 2(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \right] \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (10-5)$$

يقع المردود الإيزوانتروبي (الأديباتي) للضاغط الطاردة المركزية ضمن المجال $\eta_{ad} = 0,8 \div 0,9$. لا تنتقل طاقة تيار الغاز إلى الخارج في أجهزة التوجيه وإنما يتم تحول الطاقة الحركية إلى طاقة كامنة وبالعكس.

بفرض أن التبادل الحراري مع الوسط المحيط معدوم ، فإن معادلة توازن الطاقة للتيار في الجزء 3-4 (جهاز التوجيه) تكون :

$$C_p T_3 + \frac{c_3^2}{2} = C_p T_4 + \frac{c_4^2}{2} \quad (10-6)$$

ومنه :

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 + \frac{c_3^2}{2C_p T_3} \left(1 - \frac{c_4^2}{c_3^2} \right) \quad (10-7)$$

وعند النسبة العكسية $\frac{c_4}{c_3} = \frac{R_3}{R_4}$ التي تنتج من قانون كبلر $r \cdot c_u = \text{const}$ نجد أن :

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 + \frac{c_3^2}{2C_p T_3} \left(1 - \frac{R_4^2}{R_3^2} \right) \quad (10-8)$$

ويأخذ أن العملية بوليتروبية يكون :

$$P_4 = P_3 \left[1 + \frac{c_3^2}{2C_p T_3} \left(1 - \frac{R_4^2}{R_3^2} \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} \quad (10-9)$$

يتعلق الأس البوليتروبي بشروط التبريد ومن أجل التصميم الاعتيادية للضاغط ($n = 1,5$)

10 - 1 - 2 - استطاعة الضاغط الطاردة المركزي Centrifugal Compressor Power :

يستخدم المردود الإيزوانتروبي نحدد العمل الداخلي للمرحلة :

$$E = E_{ad} / \eta_{ad} \quad (10-10)$$

وعند حساب الاستطاعة عند محور الضاغط يجب اعتبار الطاقة المصروفة للتغلب على الاحتكاك الميكانيكي الحاصل عند المحامل و احتكاك الغاز مع سطوح الدوالب لذا يدخل مفهوم المردود الميكانيكي η_M :

$$\eta_M = E / E_K \quad (10-11)$$

من أجل التصميم الاعتيادية للضاغط ($\eta_M = 0,96 \div 0,98$)

إن التفسيرات الحاصلة في الضواغط الطاردة المركزية لا تتجاوز 1,5% من الغزارة الاسمية وبالتالي يمكن إهمال تأثيرها عند إجراء الحسابات .
بالأخذ بالاعتبار الضياعات الميكانيكية تكون الطاقة النوعية للضاغط :

$$E_K = \frac{E_{ad}}{\eta_{ad} \eta_M} \quad (10-12)$$

باعتبار التدفق الكتلي للضاغط $\dot{m} [kg/s]$ تكون استطاعة الضاغط لمرحلة واحدة :

$$N = \frac{\dot{m} E_{ad}}{1000 \eta_{ad} \eta_M} \quad (10-13)$$

وتكون استطاعة الضاغط متعدد المراحل مساوية لمجموع استطاعات المراحل .

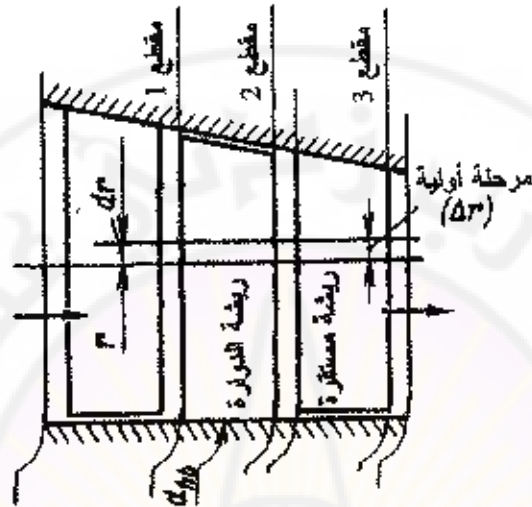
10 - 2 - 10 - الضواغط المحورية Axial - Flow Compressors

10 - 2 - 1 - مرحلة من الضاغط المحوري

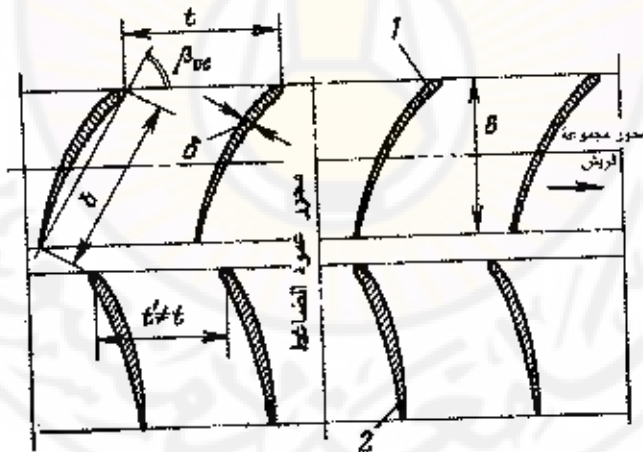
Stage Of Axial - Flow Compressors:

مفاهيم أساسية : يتكون الضاغط المحوري من عدة مراحل ضغط كما هو مبين في الشكل (10 - 2) وهو رسم توضيحي يبين أن كل مرحلة تتألف من ريش دوارة عاملة وريش توجيه ثابتة والتي تشكل سطوحا دائرية للبروفيل المشبكي للريش. تثبت الريش العاملة على أقراص مثبتة

على محور الدوران ، أما الريش الثابتة فتثبت على جسم الضاغط . تصمم المرحلة الأولى من الضاغط مع أو دون ريش توجيه أما المراحل التالية فتصمم بريش توجيه مهمتها قتل التيار وتخفيض ضياعات الطاقة عند الخروج من المرحلة السابقة . لدراسة مرحلة الضغط نأخذ مرحلة بمسافة قطرية صغيرة Δr سنبينها لاحقاً مرحلة عنصرية الأشكال (10-2) و (10-3) .



الشكل (10-2) مرحلة الضاغط المحوري



الشكل (10-3) مرحلة ضاغط محوري - شبكة الريش.

تتميز المرحلة العنصرية المدروسة بـ :

أ - لا تتغير مخططات السرعة ضمنها .

ب - نصف قطرها ثابت $r = const$.

ج - الطاقة المقدمة للغاز ضمنها ثابتة حيث $u_1 = u_2 = u$

$$L_T = u(c_{u2} - c_{u1}) = u \Delta c_u \quad (10-14)$$

وباستخدام معادلة الاستمرار والنسب الهندسية بين عناصر مخططات السرعة ، نجد :

$$L_T = u c_{u1} \left(\operatorname{ctg} \beta_1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right) \quad (10-15)$$

وبتقريب مقبول نفرض أن $\rho_1 = \rho_2$ فتصبح العلاقة الأخيرة :

$$L_T = u c_{u1} (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (10-16)$$

بفرض أن الجريان في الدوالب العامل من دون فواقد ، عندها تحدد الطاقة المنقولة للغاز بالعلاقات (10-15) و (10-16) حيث ترتفع طاقة الغاز ويتحدد بفرق الإنتالبي $(i_2^* - i_1^*)$ وبالتالي :

$$u c_{u1} (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) = i_2^* - i_1^* \quad (10-17)$$

... مردود المرحلة العنصرية : من معادلة طاقة التيار :

$$E_T = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + E_{pk} + \int_2^3 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_3^2 - c_2^2}{2} + E_{Ha} \quad (10-18)$$

حيث : $E_{pk} + E_{Ha} = E_{CT}$ تمثل ضياعات القفرة للمرحلة والمكونة من الضياعات في الأقفية العاملة وأجهزة التوجيه .
يمكن كتابة العلاقة الأخيرة بالصيغة :

$$E_T = \int_1^3 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_3^2 - c_1^2}{2} + E_{CT}$$

الطاقة الفعلية المحولة لتيار الغاز في مرحلة الضاغط :

$$E = E_T - E_{CT} = \int_1^3 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_3^2 - c_1^2}{2} \quad (10-19)$$

في علم الأيزوديناميك تعرف النسبة E/E_T بأنها المردود الداخلي η_i أي :

$$\eta_i = \frac{E}{E_T} = \frac{\int_1^3 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_3^2 - c_1^2}{2}}{\int_1^3 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_3^2 - c_1^2}{2} + E_{CT}} \quad (10-20)$$

أما إذا كانت العملية الحاصلة في الضاغط بوليتروبية فإن الطاقة النوعية الفعلية تحسب بالعلاقة:

$$E = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{c_3^2 - c_1^2}{2}$$

وفي هذه الحالة يحسب المردود الداخلي باستخدام العلاقة (20-10) و يسمى المردود الداخلي البوليتروبي η_{ip} .

في الضواغط المحورية يستخدم غالباً مفهوم المردود الداخلي الأديباتي وذلك بفرض أن العملية الحاصلة أديباتية ، عندها تأخذ العلاقة (20-10) الشكل :

$$\eta_{iad} = \frac{\left(\frac{p_3^*}{p_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_3^*}{T_1^*} - 1} \quad (10-21)$$

أو :

$$\eta_{iad} = \frac{i_{3a}^* - i_{1a}^*}{i_3^* - i_1^*} \quad (10-22)$$

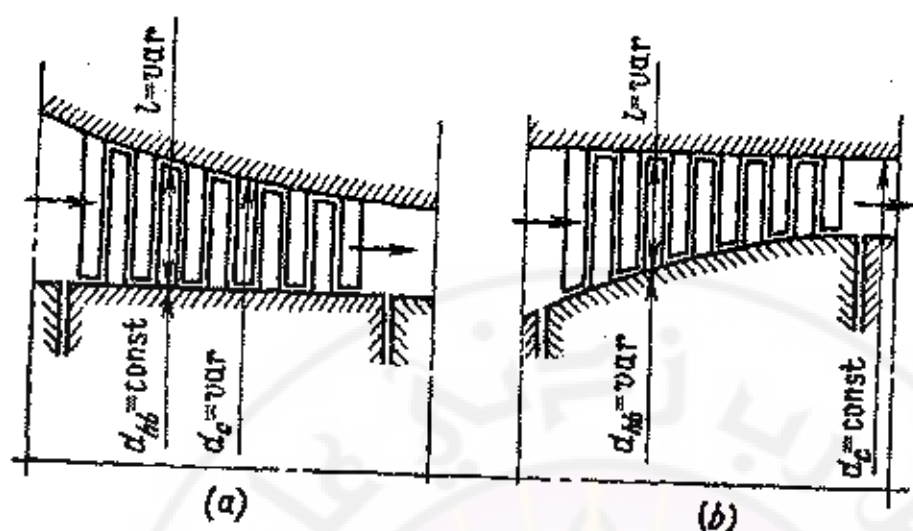
قيم $\eta_{ip} \cdot \eta_{iad}$ تختلف عن بعضها بمقدار لا يزيد عن 0,5% لذا يستخدم المردود الأديباتي η_{iad} في التطبيقات العملية .

ومن أجل ضواغط الهواء المحورية فإن نسبة الإنضغاط تقع ضمن المجال $\varepsilon = 1,1 \div 1,3$ وعندها تتراوح قيمة المردود الأديباتي ضمن المجال $\eta_{iad} = 0,85 \div 0,95$.

10 - 2 - الأشكال التصميمية للضواغط المحورية

Axial - Flow Compressor Design:

تصمم الضواغط المحورية عادة بعدة مراحل ، يتشكل الجوف الداخلي بين الريش المتحركة والريش الثابتة من جهة وسطوح جسم الضاغط من جهة ثانية .
وتبعاً لشكل المسطوح الداخلية لجسم الضاغط ولشكل المسطوح الخارجية للصرة ، يتم التمييز بين نوعين هندسيين أساسيين لشكل الجوف : الشكل (4-10)



الشكل (4-10) شكل جوف المضاط المحوري

$$d_{BT} = \text{const} , \quad d_K = \text{var} \quad (a)$$

$$d_{BT} = \text{var} , \quad d_K = \text{const} \quad (b) \quad (10-23)$$

في كلتا الحالتين تتناقص أطوال الريش العاملة والثابتة مع الاتجاه من المرحلة الأولى حتى المرحلة الأخيرة .

يؤدي تغير طول الريشة أحيانا إلى تغير حجم الغاز وذلك إذا بقيت السرعة المحورية ثابتة ، وفي بعض الحالات يتم خفض قيمة السرعة المحورية في المراحل الأخيرة للمضاط بهدف إنقاص ضياعات الطاقة .

- طول الريشة الأصغري في المراحل النهائية للمضاط 40 [mm] .

- تتغير قيمة نسبة الصرة $U = d_{BT} / d_K$ بسبب تغير طول الريشة باتجاه حركة الغاز .

- تتراوح نسبة الصرة للمراحل الأولى ضمن المجال $0.5 \div 0.8$ والمراحل الأخيرة $0.8 \div 0.9$.

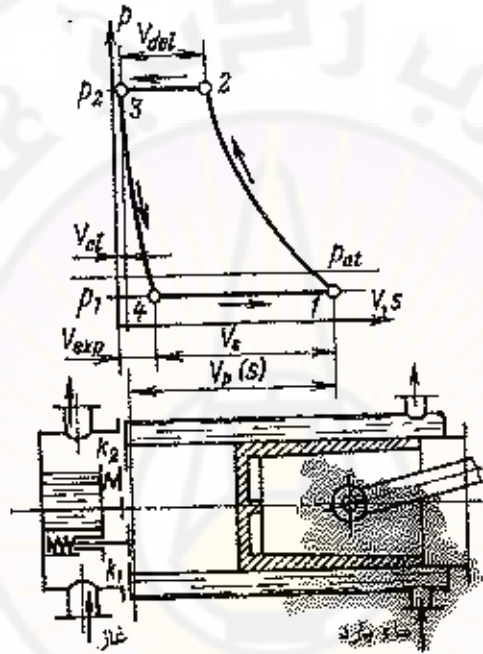
$$U_{out} = 0.7 \div 0.9$$

ثانياً : الضواغط الحجمية Positive – Displacement Compressors

3 - 10 - الضواغط المكبسية Reciprocating Compressors

1 - 3 - 10 - المخطط الرمزي للضاغط المكبسي Indicator Diagram

يبين الشكل (5-10) مخطط أداء الضاغط المكبسي الرمزي $p = f(V)$ ، باتباع تسلسل عمل الضاغط بمساعدة مخطط الأداء ، حيث : V - الحجم الذي يمسحه المكبس في الأسطوانة (ويتبع موضع المكبس) .



الشكل (5-10) مخطط ومؤشرات الأداء لضاغط مكبسي

عند حركة المكبس من أقصى اليمين باتجاه اليسار فإنه سيضغط الغاز الموجود في الأسطوانة، يغلق صمام السحب أثناء عملية الضغط بينما يفتح صمام الدفع ، طالما كان هناك فرق في الضغط داخل الأسطوانة وضغط الشبكة (ويتم التحكم بالضغط الذي يفتح عنده صمام الدفع من خلال التناوب المصمم عند صمام الدفع 1 . تمثل المنحني (2 - 1) في المخطط عملية رفع الضغط ، بينما يمثل المنحني (3 - 2) عملية الدفع . إذا كان الضغط السائد في الأسطوانة عند دفع الغاز هو p_2 ، عندها يكون حجم الغاز المضغوط والموافق لهذا الضغط هو V_p . ترتفع درجة حرارة الغاز أثناء عملية الضغط إذ إن ماء التبريد لا يمتص كامل الحرارة التي اكتسبها

الغاز خلال عملية الانضغاط ، وتوضح المعادلة (24-10) خط الانضغاط البوليتروبي الميّن في الإحداثيات $(p-V)$:

$$p \cdot V^n = \text{const} \quad (10-24)$$

يعد خط الدفع (3-2) ايزوباريا (نظرياً) :

$$p_2 = \text{const} \quad (10-25)$$

تجدر الإشارة إلى أن ضغط الغاز لا يبقى ثابتاً تماماً بفعل عطالة كتل الغاز وتأثير المكبس والصمام .

عندما يصل المكبس إلى أقصى اليسار فإنه لا يطرد كامل الغاز من الأسطوانة وإنما يبقى جزء من الغاز داخل الأسطوانة حجمه V_{res} والذي يسمى الحجم الميت (الفراغ الميت) .

عند بداية شوط المكبس باتجاه اليمين يغلق صمام الدفع ويتمدد الغاز المتبقي في الفراغ الميت وفق المنحني (4-3)، وتكون معادلة منحنى التمدد بعملية بوليتروبية بمؤشر np :

$$p \cdot V^{np} = \text{const} \quad (10-26)$$

يستمر تمدد الغاز حتى ينخفض ضغط الغاز داخل الأسطوانة إلى $p_1 > p_0$ ، حيث p_0 هو الضغط في الخزان الذي يسحب منه الضاغط الغاز .

نتيجة لفرق الضغط $p_0 - p_1$ يفتح صمام السحب ، يستمر المكبس بالتحرك وتتم عملية سحب الغاز إلى الاسطوانة ، ويبقى الضغط p_1 أقل من p_0 خلال عملية السحب التي تمثل عملية ايزوبارية يعبر عنها بالمنحني (1-4) .

المنحنيات أو الخطوط المغلقة التي تم الحصول عليها (1-2-3-4-1) تمثل المخطط الدليلي النظري للضاغط . (يختلف المخطط الدليلي الفعلي عن النظري قليلاً وبشكل أساسي في خطوط السحب والدفع) .

10 - 3 - 2 - عمليات انضغاط وتمدد الغاز في الضاغط المكبسي

Compression & Expansion Of Gas In Reciprocating Compressors :

عملية تتعلق بعملية الانضغاط والتمدد بالتبادل الحراري بين الغاز المضغوط والوسط المحيط وبشكل أساسي بدرجة كتامية الأسطوانة . (تتحدد درجة الكتامية من خلال التصميم وحالة الصمامات والمكبس والحلقات المستخدمة في الضاغط) .

تصنع الضواغط المكبسية عادة بتبريد مائي من خلال أسطوانة لها غطاء ، وهذا يحقق أن تكون عمليات الانضغاط والتمدد بوليتروبيتين نتيجة للتبادل الحراري الفعال وبمؤشر بوليتروبي $n = 1,35$ و $n = 1,2$ للغازات ثنائية الذرة .

تعد عملية الانضغاط أديباتية في الضواغط المكبسية ذات التبريد الهوائي أو التبريد المائي من أجل درجات الحرارة العالية. وتجدر الإشارة إلى أن الخطوط المعبرة عن عمليتي الانضغاط والتمدد ليست متشابهة بسبب اختلاف شروط التبادل الحراري وتأثير اللاكتامية في الأطوار المختلفة للعمليات الحاصلة.

10 - 3 - 3 - الاستطاعة والمربود Power & Efficiency :

يتم الحساب الدقيق لعملية دورة الضاغط حسب معادلات الغاز الحقيقي . إن حساب الضواغط التي يصل ضغطها النهائي إلى 10 [MPa] بالمعادلات الترموديناميكية للغاز المثالي يعطي نتائج قريبة من النتائج الفعلية . أما عند الضغوط العالية وخاصة في العمليات الكيميائية فإن اعتبار خواص الغازات الحقيقية عند حساب الضاغط يصبح ضروريا .
الإيضاحات التالية ستكون مبنية على نظرية ضاغط الغاز المثالي .

يتم حساب العمل المبذول على محور الضاغط بإهمال تأثير الفراغ الميت ، لذلك من أجل حساب استطاعة الضاغط تستخدم علاقة المردود الإيزوترمي النسبي حيث :

$$N = \frac{N_{izot}}{\eta_{izot} \eta_M} \quad (10-27)$$

حيث : η_M المردود الحجمي .

وباستخدام العلاقة $E_{izot} = p_1 \cdot u_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$ والعلاقة السابقة نجد أن :

$$N = \frac{M \cdot E_{izot}}{1000 \cdot \eta_{izot} \cdot \eta_M} = \frac{p_1 \cdot Q_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}}{1000 \cdot \eta_{izot} \cdot \eta_M} \quad (10-28)$$

من أجل الضواغط المكبسية فإن $\eta_M = 0,8 \div 0,93$ كما أن المردود الإيزوترمي يتعلق بفعالية التبريد ويكون محدود $\eta_{izot} = 0,65 \div 0,85$.

أما في الضواغط متعددة المراحل ويفرض أن عدد المراحل Z وأن عمل المراحل متساو فإن الاستطاعة الإيزوترمية للضاغط تحدد بالعلاقة :

$$N_{ic} = \frac{p_1 \cdot Q_1}{1000} \ln \frac{p_2}{p_1} \cdot Z \quad (10-29)$$

استطاعة الضاغط عند الشرط المشار إليه :

$$N_{ic} = \frac{p_1 \cdot Q_1}{1000 \cdot \eta_{ic} \cdot \eta_M} \ln \frac{p_2}{p_1} \cdot Z \quad (10-30)$$

أما إذا كان عمل المراحل غير متساوٍ فعندها تتحدد الاستطاعة على محور الضاغط كمجموع استطاعات المراحل المنفصلة .

10 - 3 - 4 - الفراغ الميت - التدفق Cylinder Clearance - Capacity :

تصمم أسطوانات الضواغط دائماً بفراغ ميت ، وهو ضروري لتجنب طرق المكبس بالغطاء عند اقترابه من التوضع النهائي .

يتم تحديد الفراغ الميت عادة من خلال نسبة إلى الحجم الكلي للأسطوانة ويسمى : الحجم النسبي للفراغ الميت

$$a = V_M / V_P \quad (10-31)$$

في الضواغط الحديثة أحادية المكبس وعند توضع الصمامات في غطاء الأسطوانة فإن $a = 0,025 \div 0,06$ أما في الضواغط متعددة المكابس والصمامات متوضعة على السطح الجانبي للأسطوانة فإن $a = 0,2$.

إن وجود الفراغ الميت يقود إلى استنتاج أن عملية السحب لا تبدأ في بداية الشوط العكسي للمكبس وإنما في نهاية عملية التمدد (النقطة (4)) على الشكل (6-10) وبالتالي فإن الحجم المسحوب V_s فعلياً أقل من الحجم العامل للأسطوانة .

المعامل الحجمي للضاغط يمثل نسبة الحجم المسحوب إلى الحجم العامل للأسطوانة :

$$\lambda_o = V_s / V_P \quad (10-32)$$

المعامل الحجمي يصف (يحدد) استخدام الحجم العامل من الأسطوانة .

لدينا المعادلة البوليتروبية لبداية عملية التمدد ونهايتها :

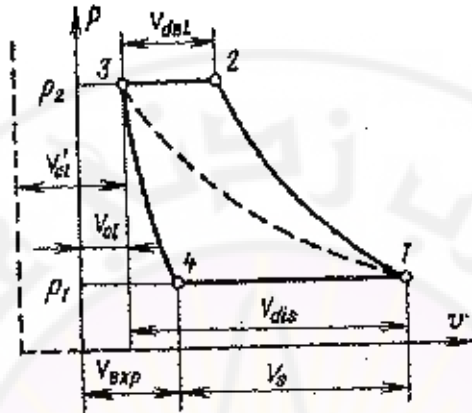
$$P_2 \cdot V_M^{n_P} = P_1 \cdot V_{EX}^{n_P}$$

حيث V_{EX} حجم التمدد . بالاستفادة من العلاقة (10-31) ينتج :

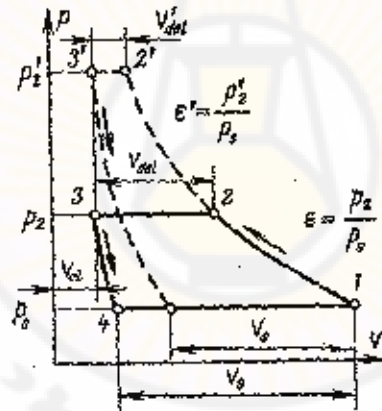
$$P_2 (a \cdot V_P)^{n_P} = P_1 \cdot V_{EX}^{n_P} ; V_{EX} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n_P} \cdot a \cdot V_P$$

$$V_{EX} = a \cdot V_P \cdot \varepsilon^{1/n_P}$$

حيث : ε درجة رفع الضغط .



الشكل (10-6) المخطط التليبي للضاغط بفراغ ميت



الشكل (10-7) تأثير درجة رفع الضغط ε على غزارة الضاغط

ومن المخطط المبين على الشكل (10-6) نجد أن :

$$V_s = V_P + V_M - V_{EX} = V_P + a \cdot V_P - a \cdot V_P \cdot \varepsilon^{1/n_P}$$

أي أن :

$$\lambda_o = \frac{V_P + a \cdot V_P - a \cdot V_P \cdot \varepsilon^{1/n_P}}{V_P} = 1 + a - a \cdot \varepsilon^{1/n_P}$$

أو :

$$\lambda_o = 1 - a \left(\varepsilon^{1/n_p} - 1 \right) \quad (10-33)$$

وبالتالي فإن حجم السحب يعطى بالعلاقة :

$$V_s = \lambda_o \cdot V_p = \left[1 - a \left(\varepsilon^{1/n_p} - 1 \right) \right] \cdot V_p \quad (10-34)$$

غير أن حجم الغاز الفعلي الذي يدفعه الضاغط ونتيجة للشروط السائدة قبل صمام السحب

سوف تكون أقل من الحجم المحسوب بالعلاقة (10-34) وهذا يعود لسببين :

الأول : تسخين الغاز أثناء السحب من السطوح الساخنة للمكبس والأسطوانة .

الثاني : غياب العزل الكامل للأسطوانة الضاغطة (تسريبات خلال الصمامات وتسريبات بين الجسم الداخلي للأسطوانة والمكبس) .

يعد السبب الأول ظرفاً حرارياً يعبر عنه بالمعامل الحراري λ_T . ويعبر عن السبب الثاني بالمعامل الحراري λ_K .

لذا فإن الحجم الفعلي الذي يسحبه الضاغط :

$$V_1 = \lambda_o \cdot \lambda_T \cdot \lambda_K \cdot V_p$$

أو باعتبار :

$$\lambda = \lambda_o \cdot \lambda_T \cdot \lambda_K \quad (10-35)$$

المسمى ثابت التدفق أو (معامل التدفق) وبالتالي :

$$V_1 = \left[1 - a \left(\varepsilon^{1/n_p} - 1 \right) \right] \cdot \lambda_T \cdot \lambda_K \cdot V_p \quad (10-36)$$

وبالتالي تكون غزارة الضاغط من أجل أسطوانة واحدة :

$$Q_1 = V_1 \cdot n = \left[1 - a \left(\varepsilon^{1/n_p} - 1 \right) \right] \cdot \lambda_T \cdot \lambda_K \cdot V_p \cdot n \quad (10-37)$$

حيث n عدد الأسواط الثابتة للمكبس في الدقيقة .

من المعادلة (10-37) نتضح أهم العوامل المؤثرة في غزارة الضاغط . القيمة الهامة هي

الحجم العامل للأسطوانة الذي يساوي جداء مساحة مقطع المكبس في طول شوطه :

$$V_p = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot S$$

إن حجم الفراغ الميت يؤثر في غزارة الضاغط سلباً بزيادة القيمة النسبية للفراغ الميت ، وتنعكس

الغزارة وفق العلاقة (10-37) عندما $\alpha \cdot \left(\varepsilon^{1/n_p} - 1 \right) = 1$ ، وهذا ما يوضحه الشكل

(10-6) حيث أنه بزيادة الحجم V_M إلى الحد الذي ينعكس فيها الحجم المضخوخ عندها

ستطبق خطوط الانضغاط والتمدد على بعضها ، والضاغط عندها لا يسحب ولا يدفع .

إن زيادة رفع الضغط عند قيمة معينة لـ V_M من شأنه أن ينقص الغزارة وهذا واضح من المعادلة (37-10) ومن المخطط ($p-V$) أيضا ، إن الفراغ الميت يؤثر بشدة في الغزارة كلما ازديت درجة رفع الضغط ، لذا فإن القيمة النسبية للفراغ الميت تختار أقل من الزيادة في درجة رفع ضغط الضاغط .

للضواغط الحالية :

$$\lambda_K = 0,95 \div 0,98 ; \lambda_O = 0,7 \div 0,9 , \lambda_T = 0,9 \div 0,95$$

10 - 3 - 5 - النماذج التصميمية للضواغط Compressor Type Designs :

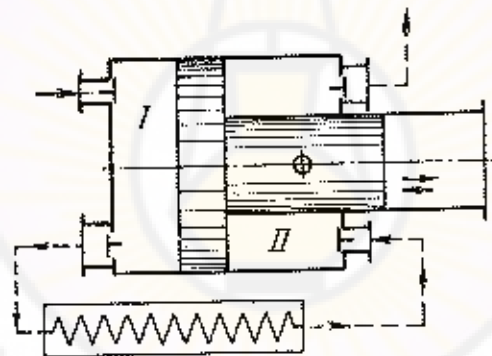
تتخذ الضواغط متعددة المراحل بأحد شكلين أساسيين :

أولا : بمكابس مختلفة الأقطار . وبعدد مراحل انضغاط في الأسطوانة الواحدة .

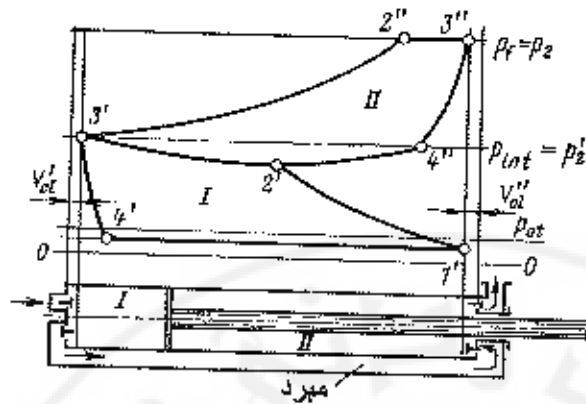
ثانيا : بانضغاط مرحلي في أسطوانات مختلفة . و فيما يلي بعض هذه التصميمات :

1- ضاغط ذو مرحلتين انضغاط ويمكس متغير الأقطار ويتأثر ثنائي الاتجاه :

في ضاغط من هذا النوع الشكل (8-10) مراحل الانضغاط تتوضع على جهتي المكبس متغير الأقطار .



ضاغط ثنائي المرحلة من النوع المستقيم ويمكس متغير الأقطار



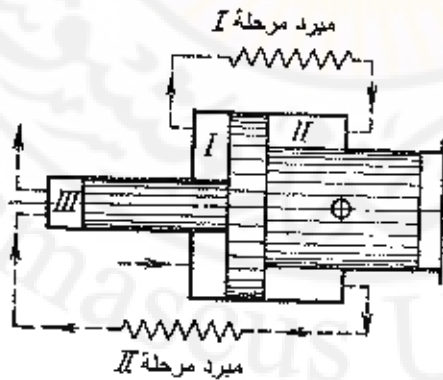
الشكل (9-10) ضاغط ثنائي المرحلة ويمكس متغير وتأثير باتجاه واحد

2 - ضاغط بمرحلتين ويمكس متغير وتأثير باتجاه واحد:

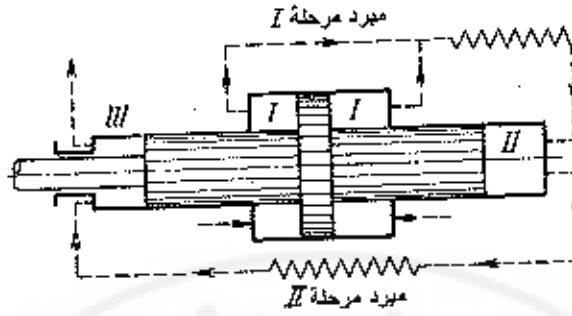
خاصية هذا النوع من الضواغط المبين على الشكل (9-10) أن توضع المرحلتين الأولى والثانية يكون في اتجاه واحد من المكبس ، وهذا يقود إلى أن عملية السحب والدفع تتم في كلتا المرحلتين وفي الوقت نفسه ، حيث أنه عند تحريك المكبس باتجاه اليمين تتم عملية التمدد والسحب أما عملية الانضغاط ويدفع الغاز فتتم في كلتا المرحلتين وفي الوقت نفسه. يستخدم مبرد مائي بين المرحلة الأولى والمرحلة الثانية كما يبين الشكل .

3 - ضاغط بثلاث مراحل مع مكبس متغير:

تتشكل مراحل الضاغط الشكل (10-10) كالآتي: بحيث تشكل كل مرحلتين متجاورتين ضاغطا ثنائي المرحلة ، تكون أعمال المراحل المنفصلة متساوية وهو مشروط لتحقيق الفعالية الطاقة.



الشكل (10-10) ضاغط ثلاثي المرحلة ويمكس متغير



الشكل (10-11) ضاغط ثلاثي المرحلة لكن المرحلة الأولى منفصلة

4- الضواغط متعددة المراحل ويمكابس مختلفة:

يعتمد المبدأ عموماً على استخدام عدة مراحل بمساعدة مكبس متغير الأقطار، حيث يمكن تصميم الضواغط بعدد كبير من المراحل وهذا ما يبينه الشكل (10-12) حيث يبين ضاغطاً بست مراحل.



الشكل (10-12) مخطط ضاغط بستة مراحل ويمكابس مختلفة

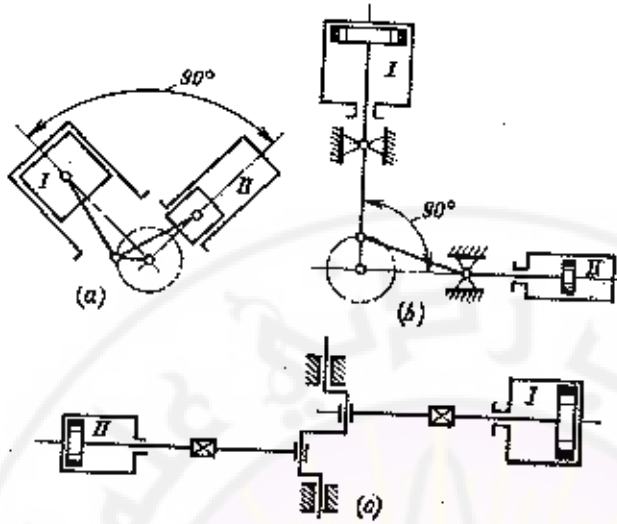
5- ضواغط بمراحل متعددة للضغط في أسطوانات منفصلة :

تصنع هذه الضواغط كما في الشكل (10-13) وذلك وفق المواصفات العالمية كالتالي :

أ- ضواغط على شكل حرف V تكون فيها محاور الأسطوانات متعامدة (تشكل زاوية 90°) ويرمز لها بالنوع V_v .

ب- ضواغط تتوضع فيها الأسطوانات بزاوية مستقيمة فيما بينها ويرمز لها بالنوع V_s .

ت- ضواغط تتوضع فيها الأسطوانات متعامدة مع بعضها بعضاً ويرمز لها بالنوع V_{90} .



الشكل (10-13) مخططات لضواغط ثنائية المرحلة في أسطوانات مختلفة

تتبع للمواصفات العالمية ينصح بهذه الأنواع من الضواغط وهي ذات اتصالات بسيطة ومرجحة في الاستخدام والاستثمار. لاسيما الضواغط ثنائية المرحلة.

- الضواغط ذات الأنواع V_r ، V_{π} والتي تكون محاور أسطواناتها متوضعة في ممسو عمودي يصنع موازنتها ديناميكيا حيث تتطلب قواعد ثقيلة وقوية وتجهيزات مكملية من أجل تركيبها وصيانتها.

- الضواغط من النوع V_M والمسماة بالعكسية تلقى انتشارا واسعا لسهولة موازنتها (الزاوية بين المحاور 180°) وتكون سرعة دوراتها أكبر بـ $(2.5 \div 3)$ مرات من الضواغط الأخرى وهذا النوع يتطلب ارتفاعات قليلة ومساحات كبيرة نسبيا لمكان التركيب .

10 - 3 - 6 - غزارة وضغط الضاغط المكبسي العامل على الشبكة

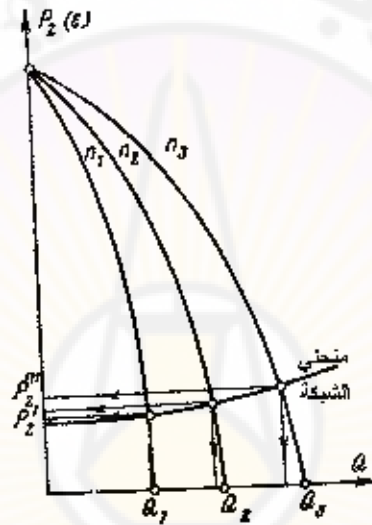
Capacity & Pressure Of Reciprocating Compressors Discharging into Pipe Line :

تحدد غزارة الضاغط المكبسي وحيد المرحلة (المكبس يتحرك باتجاه واحد) بالعلاقة (10-37) أما إذا كان مكبس الضاغط يتحرك باتجاهين ، عندها فتحدد غزارته كمجموع غزارات كل اتجاه على حدة وتكون الحجوم المعاملة مختلفة. أما غزارة الضاغط المكون من عدة أسطوانات فإن غزارته تساوي مجموع غزارات هذه الأسطوانات .

في كل الحالات فإن غزارة الضاغط المكبسي تتناسب مع عدد دورات محور الدوران. لذلك من أجل أعداد دورات مختلفة لمحور الدوران يعبر عن المنحنيات النظرية بخطوط موازية للمحور العمودي.

غير أنه إذا أعطي للضاغط القيم V_m و α فإن المراحل الأولى سوف تعمل بضغط متغير أي أن درجة رفع الضغط لها ستكون متغيرة وهو ما يبينه العلاقة (37-10).

لذا فإن تغير غزارة الضاغط سيكون أقل كلما كان ε أكبر. نتيجة لذلك: على إحداثيات $p-Q$ ومن أجل عدد دورات ثابت ستكون المنحنيات الفعلية مبنوعة عن المحور العمودي كما في الشكل (14-10)،



الشكل (14-10) مواصفات الضاغط المكبسي عند عدد دورات مختلفة ويعمل على الشبكة

يمكن الحصول على هذه المنحنيات من العلاقة (37-10) بتعويض قيم اختيارية لـ $\varepsilon = p_2 / p_1$ ، يبين الشكل (14-10) شكل هذه المنحنيات من أجل عدة سرعات دوران n_1, n_2, n_3 . تتحدد الغزارات الفعلية وضغط الضاغط من إحداثيات نقاط تقاطع منحنيات الضاغط مع منحنى الشبكة التي يعمل عليها الضاغط.

10-3-7 - تنظيم الغزارة في الضاغط المكبسي Capacity Regulation:

يمكن أن يتغير تدفق الغاز من شبكة الأنابيب تبعاً لشروط المستهلك، لذا يجب أن تتغير غزارة الضاغط للحفاظ على الغزارة اللازمة في الشبكة كما يجب الحفاظ على قيمة الضغط

المطلوب من المستثمر. يسمى هذا التنظيم للفرارة بالضبط عند ضغط ثابت ، فيما يلي الطرق

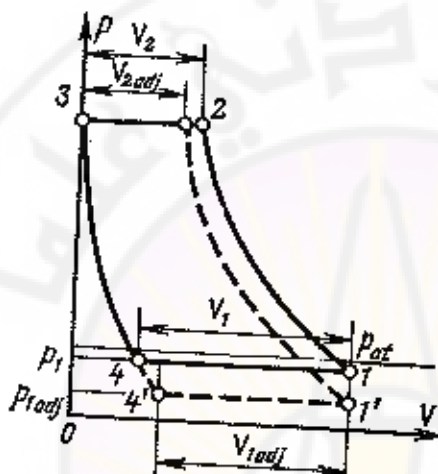
الرئيسية المتبعة لتنظيم غزارة ضاغط بمرحلة وحيدة:

1- تغيير عدد الدورات: واضح من العلاقة (37-10) أنه يمكن تغيير غزارة الضاغط عن

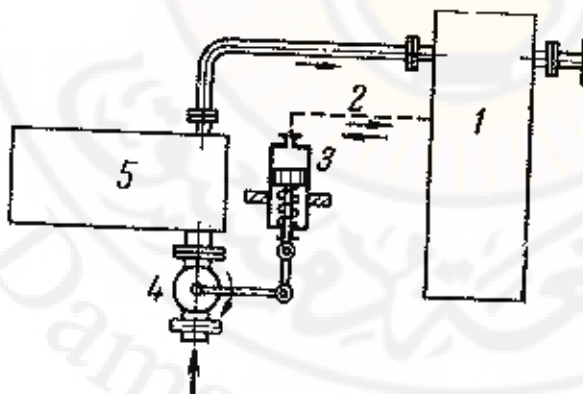
طريق تغيير عدد دورات محوره، وهي طريقة اقتصادية في الاستخدام ولكن يجب وصل محور

الضامط بمحرك ذي سرعة دوران متغيرة، تستخدم هذه الطريقة في حالات وصل الضامط مع

الآلة البخارية نظراً لسهولة التحكم بتغيير سرعة الدوران.



الشكل (10 - 15) ضبط غزارة الضاغط بواسطة الخنق عند جهة السحب



الشكل (16) - (14) مخطط النظام الأوتوماتيكي لتنظيم الغزارة عن طريق

الخلق عند جهة السحب

2- الخنق من جهة السحب للضاغط: إذا أضفنا مقاومة إضافية في جهة السحب للضاغط فإن غزارة الضاغط ستتناقص. بفرض أن المخطط (1-2-3-4) يمثل الحالة بدون مقاومة ضبط في أنبوب السحب ، الشكل (15-10) فإذا أدخلنا مقاومة ضبط خافضة لضغط السحب من p_1 إلى p_{1c} عندها تمثل عملية التمدد بالخط (3-4') وخط السحب (1'-4'). من المخطط يتضح أن الحجم المسحوب سيتناقص من V_1 إلى V_{1c} ، وأما حجم الدفع فسيبتغير تلقائيا من V_2 إلى V_{2c} أي أن غزارة الضاغط تتغير .

مخطط الضغط الأوتوماتيكي لهذا النوع مبين على الشكل (16-10). لأنه إذا تناقص التدفق من البالون (1) إلى الشبكة فإنه عند ضغط معين (5) فإن الضغط في البالون (1) سيزداد وسيضغط إلى الأنبوب (2) ثم إلى جوف أسطوانة المكبس (3) ، يتم بعدها التأثير في المكبس الذي يضغط النابض فيفتح حاجز الخنق. تتناقص غزارة الضاغط مقارنة مع التدفق من البالون ، ويفضل بساطة تصميم هذه الطريقة من التنظيم فهي تستخدم على نطاق واسع عند مراحل الانضغاط العالية ، ولكن المعامل الاقتصادي لهذه الطريقة ليس كبيراً.

3 - عصر صفيحة صمام السحب: تعتمد هذه الطريقة على فتح صمام السحب دوماً وبالتالي تعتمد عملية السحب والدفع ريثما يعود الضغط إلى وضعه الأصلي فيعود ويغلق صمام السحب وتتابع عمليات السحب والدفع من جديد .

4 - تغيير حجم الفراغ الميت: من العلاقة (37-10) نلاحظ أنه بثبات قيم n, m, V_p فإنه يمكن ضبط الغزارة بتغيير حجم الفراغ الميت كما هو مبين على مخطط (3-4) الشكل (7-10). عند حجم فراغ ميت V_{M0} سيكون حجم الغاز المسحوب V_1 ، وبزيادة حجم الفراغ الميت حتى $V_M < V_{MC}$ ، عندها سيأخذ التمدد البوليتروبي وضما جديداً بالنسبة لمحور الإحداثيات $0'$ ويعبر عنه بالوضع (3-4') ، وسيكون الحجم المسحوب من الغاز $V_1 > V_{1c}$ ، والحالة البوليتروبية الجديدة للغاز (2'-1) ستعبر عن الحجم المدفوع من الغاز $V_2 > V_{2c}$. يمكن زيادة حجم الفراغ الميت حتى تتطابق الخطوط البوليتروبية للتمدد والانضغاط والمعبر عنها بالخط (3-1) ، عندها فإن الضاغط لا يسحب ولا يضغط ويكون الصمامان في حالة إغلاق بينما يتم في الأسطوانة تمدد وانضغاط لكمية ثابتة من الغاز. هذه الطريقة لتنظيم الغزارة اقتصادية وتلقى انتشاراً خاصة في الضواغط ذات الاستطاعات الكبيرة

5 - طرق أخرى لتنظيم الغزارة: إضافة للطرق المذكورة أعلاه هناك طرق أخرى تستخدم خاصة في الضواغط التي تصل استطاعتها حتى $200[kW]$ وذلك بتحويل جزء من الغاز من منطقة

الدفع إلى منطقة السحب . ويتم أيضا وضع صمامات تنفيس أوتوماتيكية على الشبكة تسمح بخروج الغاز منها عند ضغط محدد معين . الطريقة الأولى اقتصادية ومستخدمة، أما الثانية فهي غير مستخدمة لأنها غير اقتصادية . تجدر الإشارة إلى أنه عند تنظيم غزارة الضواغط متعددة المراحل فمن الضروري ضبط غزارة كافة المراحل في آن معاً .

10 - 4 - الضواغط الدورانية Rotary Compressors

10 - 4 - 1 - مبدأ العمل - التدفق - Theory Of Operation :

تتسب الضواغط الدورانية للآلات الحجمية تبعاً لطريقة عملها وهي شبيهة بالمضخات الدورانية . الضواغط الصفائحية الدورانية هي الأكثر انتشاراً ومن الضواغط الدورانية أيضاً الضواغط الحلزونية .

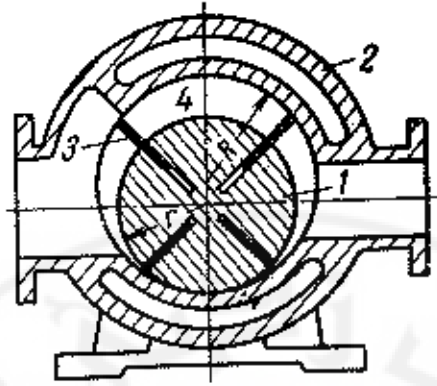
يبين الشكل (17-10) المخطط التصميمي للضاغط الصفائحي : عند دوران الدوارة (1) والمتوضعة بشكل لا مركزي في الجسم (2) ، تشكل الصفائح (3) فراغاً مغلقاً (4) وينقل الغاز من جوف السحب إلى جوف الدفع وعندها تتم عملية انضغاط الغاز . في مثل هذا النوع من الضواغط تتحرك الكتلة بشكل انسيابي ، ويمكن أن تدار الدوارة بسرعات عالية وتوصل مع المحرك الكهربائي بشكل مباشر . عند عمل الضواغط الصفائحية تولد حرارة عالية نتيجة الاحتكاك الميكانيكي، لذلك عند درجات عالية لرفع الضغط (أكبر من 1,5) يجب تبريد جسم الضاغط . يمكن استخدام الضواغط الصفائحية لسحب الغازات والأبخرة من الأماكن ذات الضغط الأقل من الضغط الجوي ، في مثل هذه الحالات يعتبر الضاغط كمضخة تخلخلية ، حيث يمكن أن يحقق هذا الضاغط تخلخلاً يصل حتى 95% .

تتعلق غزارة الضاغط الصفائحي بأبعاده الهندسية وسرعة الدوران . يفرض أن الصفائح قطرية يكون حجم الغاز المحصور بين صفيحتين حسب الشكل (18-10) هي $V = f \cdot L$ حيث f : المساحة الأعظمية للمقطع العرضي بين الصفيحتين ، L طول الصفيحة . بشكل تقريبي يمكن افتراض أن :

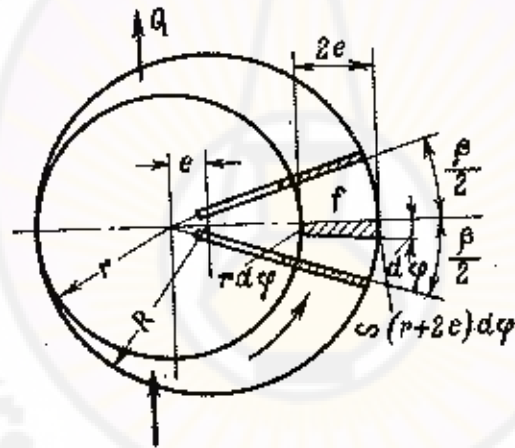
$$df = \frac{r d\varphi + (r + 2e) d\varphi}{2} \cdot 2.e = 2.e (r + e) d\varphi$$

ومنه :

$$f = \int_0^{\beta} 4.e.(r + e) d\varphi = 2e(r + e)\beta \quad (10-38)$$



الشكل (10-17) المخطط التصميمي للضاغط الصفائحي



الشكل (10-18) مخطط حساب غزارة الضاغط الصفائحي

وحيث أن $r + e = R$ ، $\beta = \frac{2\pi}{Z}$ ، عدد الصفائح ، يكون :

$$f = \frac{4\pi e R}{Z} \quad (10-39)$$

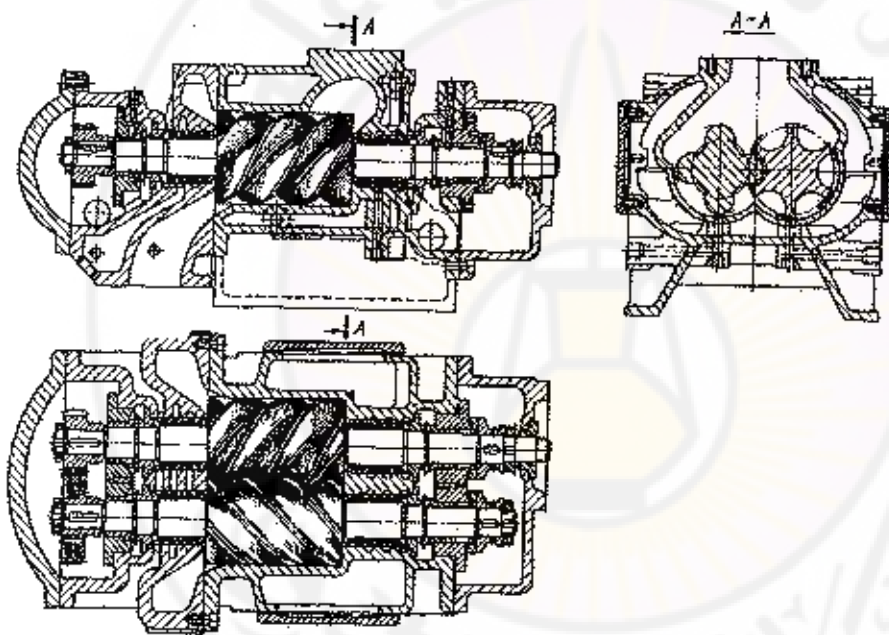
حجم الغاز تبعاً للشكل (10-18)

$$V = \frac{4 \pi e R}{Z} L \quad (10-40)$$

ومن أجل دورة واحدة لمحور الدوران فكل فراغ بين صفيحتين سيملاً بالغاز لمرة واحدة وبذلك تكون الغازة الفعلية للضاغط:

$$Q = V \cdot Z \cdot n \cdot \lambda_o = 4 \pi \cdot e \cdot r \cdot L \cdot n \cdot \lambda_o \quad (10-41)$$

حيث : λ_o معامل التدفق ويكون بحدود (0,5 : 0,8) يتعلق معامل التدفق بالتسريبات الداخلية للغاز عبر الفراغات القطرية والمحورية وبسماكة الصفائح وعددها .
يبين الشكل (10-19) طريقة عمل الضاغط الحلزوني بمستندين دوديين :



الشكل (10-19) الضاغط الحلزوني بمستندين دوديين

الأجزاء الرئيسية العاملة في الضاغط الحلزوني هي الحلزونات ذات البروفيل الخاص . تثبت الحلزونات بإحكام بحيث تكون أسنانها متداخلة ، وعند دوران الحلزونات وحصول التداخل بين الأسنان تتم عمليات السحب و الانضغاط والدفع .
تحدد غازة الضاغط الحلزوني بالعلاقة :

$$Q = (\Omega_1 Z_1 + \Omega_2 Z_2) \cdot L \cdot n \cdot \lambda_o$$

حيث : K_2, K_1 مساحات تجاويف الحزوين ، Z_2, Z_1 عدد أسنان الحزونات ، L طول الحزون ، n عدد الدورات ، λ_0 معامل التدفق .
تصمم الضواغط الحزونية بتبريد مائي لجسم الضاغط وتبريد داخلي ، كما أن الفراغات الداخلية (بين المستندات) تكون حوالي $0.4 \div 0.1 \text{ mm}$ وبالتالي ليس هناك احتكاك ميكانيكي بينها وليس هناك ضرورة للتزييت وليس هناك من خطر احتراق أبخرة الزيت نتيجة ارتفاع درجة حرارة الغاز المضغوط .

10 - 4 - 2 - الاستطاعة والمردود Power & Efficiency :

استطاعة مرحلة الضاغط الدوراني وتبريد مائي بحسب على اعتبار العملية الإيزوترمية :

$$N = \frac{N_{is}}{\eta_{is} \cdot \eta_M} = \frac{p_1 \cdot Q_1 \cdot L \cdot n \cdot \varepsilon}{1000 \cdot \eta_{is} \cdot \eta_M} \quad (10-42)$$

حيث : p_1 الضغط البدائي ، Q_1 الغازية عند شروط السحب ،
وللضواغط ذات التبريد الهوائي :

$$N = \frac{N_a}{1000 \cdot \eta_a \cdot \eta_M} \quad (10-43)$$

تحدد الاستطاعة الأديباتية N_a بتحدد من العلاقة :

$$N_a = \frac{K}{K-1} p_1 Q_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad (10-44)$$

جداء المراديد للضواغط الصنفائية يكسون عادة $0.5 \div 0.6$ $\eta_{is} \cdot \eta_M$ أما للضواغط الحزونية فيكون هذا الجداء أكبر نسبيا بسبب غياب الاحتكاك الميكانيكي.

10 - 4 - 3 - تنظيم غازية الضواغط الدورانية

Regulation of Flow Rotary Compressors:

من المعادلة التي تحدد غازية الضواغط الدورانية نلاحظ أن الغازية تتناسب مع عدد دورات محور الضاغط ، من هنا يعتمد تنظيم الغازية Q على التحكم بعدد دورات محور الضاغط n .
توصل الضواغط الصنفائية عادة مع محرك كهربائي مباشرة ، فإذا كان عدد دورات المحرك الكهربائي ثابتا فإن تنظيم الغازية يتطلب وصل محور الضاغط مع المحرك عن طريق علبة سرعة .

عدد دورات الضواغط الحثريّة تكون عالية جدا وتصل إلى $15000 [r.p.m]$ عندما يوصل الضاغط مع التوربين الغازي .وعملها تصمم وتنفذ ضواغط حثريّة ضخمة تعمل بسرعات دوران $3000 [r.p.m]$.
لكلا النوعين من الضواغط يتم تنظيم التدفق عن طريق الخنق عند جهة السحب للضاغط .



الفصل الحادي عشر

المراوح Fans

المراوح هي آلات ضخ (آلات جريان) تعمل على تحريك الهواء و الغازات الأخرى، وتستخدم بكثرة في مختلف المجالات الصناعية وفي شبكات التهوية والتدفئة والتكييف والتبريد، وفي تحريك الهواء النظيف و الغازات غير السامة بدرجة حرارة لا تزيد عن 180°C ، وكذلك تحريك مزيج من الهواء والغبار (معامل الإسمنت) بكمية لا تزيد عن 150 mg/m^3 ، ووفق متطلبات العملية التكنولوجية يمكن استخدامها في تحريك الأوساط الضارة مثل الفينيل بلاست وحبيبات الألمنيوم والهواء الممزوج بالشوائب الميكانيكية وغيرها إلى جانب استخدامها في طرد الدخان والهواء الفاسد من المطاعم ودور السينما والأماكن المزدحمة. ومن ناحية أخرى تستخدم المراوح في مولدات الطاقة الريحية (العنفات الريحية) لتوليد الطاقة وبلغ قطرها عشرات الأمتار، كما تستخدم في الطائرات وعدد كبير من الآلات والتجهيزات.

تتميز المراوح بخصائص تصميمية محددة نظراً لانخفاض كثافة الغازات وقلة لزوجتها وصغر قيمة الضغط الذي تولده هذه المراوح، منها عدم الحاجة إلى المتانة الميكانيكية الكبيرة للدوارة والهيكل وبقيّة عناصر التصميم.

11 - 1 تصنيف المراوح Fans Classification

تصنف المراوح وفق أسس ومبادئ مختلفة منها ما يتعلق بقيمة الضغط المتولد، أو حسب الاستعمال، أو حسب اتجاه التدفق، أو حسب وضع فتحة الخروج وكذلك وفق طريقة نقل الحركة.

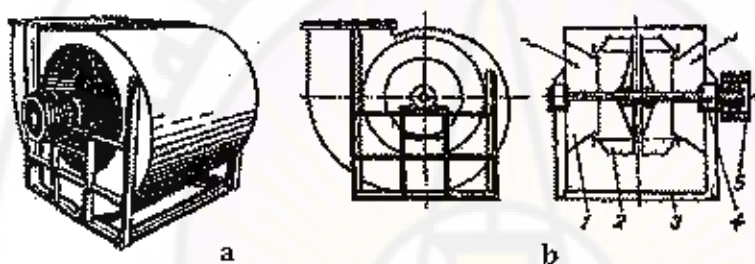
تنسب المراوح إلى آلات الجريان ذات الريش وتقسم تصميمياً إلى نوعين: مراوح طاردة ومراوح محورية.

11 - 1 - 1 المراوح الطاردة Centrifugal fans

يبقى مبدأ عمل المروحة الطاردة مشابهاً لمبدأ عمل المضخة الطاردة. يدخل الهواء إلى المروحة عبر فتحة الدخول (السحب) التي تتمتع دائماً بمقطع دائري ويخرج عبر فتحة الخروج (الدفع) التي تتمتع بمقطع مربع أو مستطيل، ويجب ألا يزيد الخلوص بين الدوارة وفتحة الدخول عن (1%) من قطر الدوارة، حيث تؤدي زيادته عن هذه القيمة إلى انخفاض وتيرة عمل

المروحة وتصبح شروط العمل سيئة بفعل الترسبات. تصنع هياكل المراوح من صفائح الفولاذ بواسطة اللحام أو التبايسيم.

تنتج المراوح الطاردة حسب نماذج محددة، أي حسب مخطط تصميمي و إيروديناميكي واحد وترتبط نماذج المراوح على مجموعات بحيث يتميز كل نموذج وكل مجموعة برمز خاص ويرتبط التباين بين أبعاد مختلف المراوح برقم المروحة الذي يعين وفقاً للقطر الخارجي للدائرة، مثلاً: المروحة رقم (5) تملك دائرة قطرها الخارجي $5[cm]$ وتؤخذ باقي أبعاد المروحة بنسب مئوية من قطر الدائرة. إذا أردنا إنقاص قطر الدائرة للمروحة (إنقاص أبعاد مجموعة التهوية، أو زيادة غزارة التدفق مع الحفاظ على أبعاد المروحة) فإننا نستعمل مراوح طاردة ذات سحب من الجهتين.



الشكل (11-1) مراوح طاردة ذات سحب من الجهتين

a - منظر عام b - مقطع ومنظر جانبي .

1 - مدخل الهواء. 2 - دوار. 3 - الهيكل 4 - مضاجع 5 - طنبور.

تستعمل مثل هذه المراوح لتحريك الهواء والغازات بدرجة حرارة حتى $50^{\circ}C$ وكذلك لتحريك

الهواء والغازات الحاوية على الشوائب المعدنية بمعدل لا يزيد عن $150[mg/m^3]$

تصنف المراوح الطاردة وفق ما يلي:

أ - حسب طريقة الاستعمال :

1 - مراوح شبكات التهوية والاستعمالات العامة : وتقوم بتحريك الهواء التنظيف والغازات

غير السامة ، وتحريك مزيج من الهواء والغبار .

2 - مراوح متطلبات العملية التكنولوجية : وتستخدم في حالات تحريك الهواء المحمل

بالشوائب الميكانيكية وعند تحريك الأوساط الضارة ، مثل الفينيل بلاست والألمنيوم .

3 - مراوح طرد الدخان.

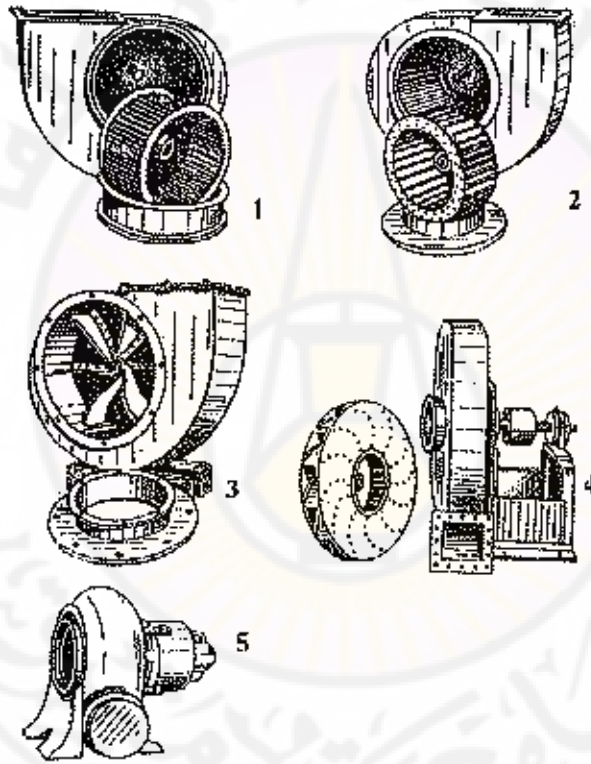
ب - حسب قيم الضغط المولد :

1 - مراوح الضغط المنخفض حتى $100 [kp/m^2]$

2 - مراوح الضغط المتوسط حتى $300 [kp/m^2]$

3 - مراوح الضغط المرتفع أكثر من $300 [kp/m^2]$

وهذه التصنيفات اصطلاحية فقط حيث يمكن لمراوح الضغط المنخفض زيادة عدد دوراتها وأن تولد ضغطا متوسطا . ويبين الشكل (2-11) هياكل ودورات المراوح الطاردة مصنفة وفق قيم الضغط المولد .



الشكل (2-11) هياكل ودورات المراوح الطاردة

1 - مروحة ضغط منخفض عدد ريشها 2 ، 24 ، 36 ، 48

2 - مروحة ضغط متوسط عدد ريشها 12 ، 24

3 - مروحة طرد الغبار عدد ريشها 6

4 - مروحة ضغط مرتفع

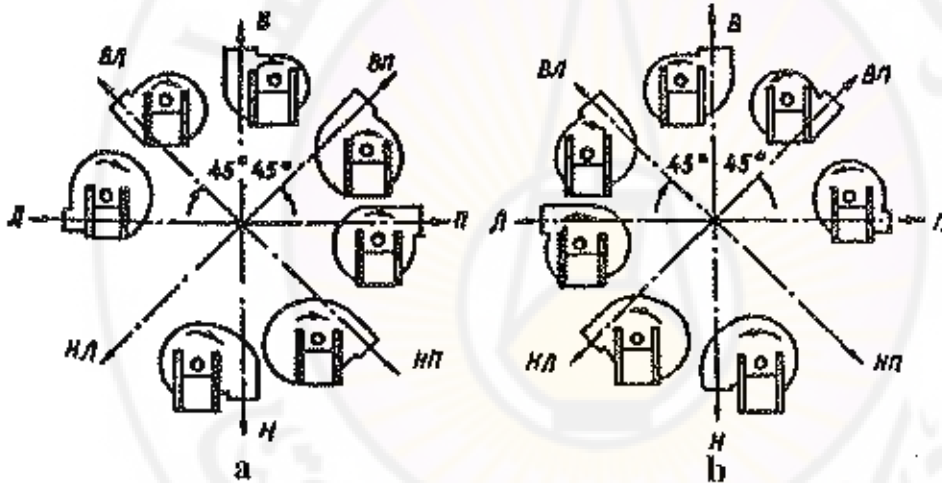
5 - مروحة ذات هيكل مصنع من الفوننت بطريقة السكب

ج - حسب وضع فتحة الدخول:

- 1 - الفتحة نحو الأعلى .
- 2 - الفتحة من الجهة اليمنى .
- 3 - الفتحة من الجهة اليسرى .
- 4 - الفتحة نحو الأسفل .

د - حسب اتجاه دوران الدوارة :

- 1 - دوران يميني : تدور الدوارة باتجاه دوران عقارب الساعة .
 - 2 - دوران يساري : تدور الدوارة بالاتجاه المعاكس لجهة دوران عقارب الساعة .
- وبين الشكل (3-11) الوضعيات المختلفة لهيكل المراوح الطاردة ذات الاستعمال العام .



الشكل (3 - 11) الوضعيات المختلفة لهيكل المراوح الطاردة ذات الاستعمال العام .

a - مراوح ذات دوران يميني .
b - مراوح ذات دوران يساري .

هـ - حسب طريقة نقل الحركة :

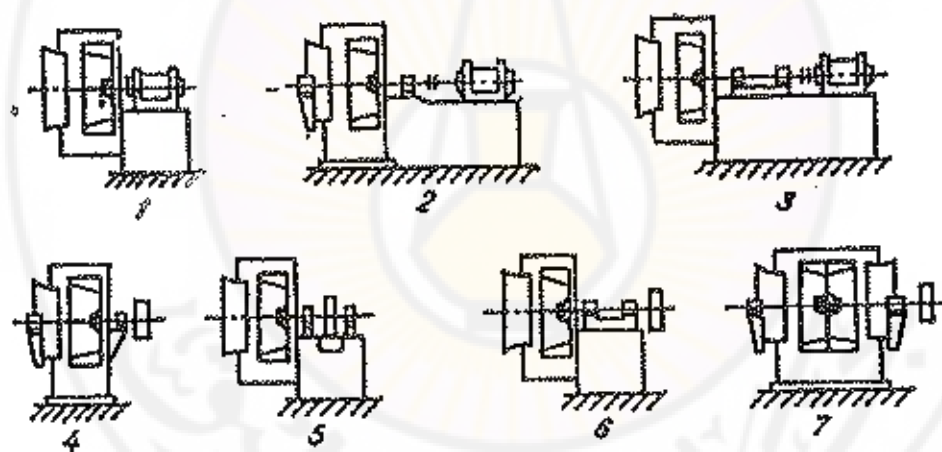
- 1 - الربط مباشر مع عمود المحرك .
- 2 - الربط غير مباشر ويتم عن طريق الأتشفطة .

وبين الشكل (4-11) المخططات التصميمية للمراوح الطاردة حيث تتمتع المراوح المصنعة وفق المخطط 1 بأحسن المميزات دون خلال أو ضجيج إضافة لكونها اقتصادية ، وتركب الدوارة

في هذه المراوح مباشرة على عمود المحرك الكهربائي لذا يبقى قطر الدوارة صغيرا ، أي أن التصميم المذكور يعود للمراوح الصغيرة .

توصل أعمدة المراوح ذوات الاستطاعات الكبيرة إلى محاور المحركات بواسطة قارنات المخططات (2, 3) ويركب الطنبور في الوسط بين المضاجع (المخطط 5) وعلى نهاية عمود الدوارة (المخططات 4, 6, 7) في حال نقل الحركة إلى الدوارة بواسطة الأقشطة . يصبح عمود المروحة أكثر هدوءا إذا ركبت الدوارة على العمود مابين مضجعين ، غير أن مثل هذا التركيب يجعل التصميم أكثر تعقيدا والتجميع أكثر صعوبة .

مع الإشارة إلى أن المراوح ذات الوصل المباشر مع المحركات الكهربائية تتمتع بمواصفات سيئة إلى جانب المواصفات الحسنة التي تمتلكها ومنها استحالة التحكم بعدد دورات هذه المراوح لأن المحركات غير التوافقية المستخدمة في شبكات التهيئة تتمتع بأعداد دورات مختلفة $750, 950, 1450, 2900 [r.p.m]$ ، أما في حالة الربط غير المباشر عن طريق الأقشطة فإن التحكم بعدد دورات الدوارة يتم عن طريق اختيار أقطار الطنبور القائد والطنبور المقاد .



الشكل (4 - 11) المخططات التصميمية للمراوح الطاردة

مع ملاحظة أن هياكل المراوح لا تحسب على المتانة وتتخذ سماكة جدران هذه الهياكل وفق تصورات المصمم ، مثلا :

تصنع هياكل المراوح ذات الاستعمال العام من الصفائح الفولاذية بسماكة $2 \div 5 [mm]$.

تنتج المراوح الطاردة المركزية بعدة أشكال ومواصفات متعددة ، وتتمتع بمزايا كثيرة منها إمكانية تركيبها في أي موضع ، وقابلة للتحكم بالسرعة ، والمحرك ذو حماية حرارية .

توجد المراوح الطاردة في عدة أشكال :

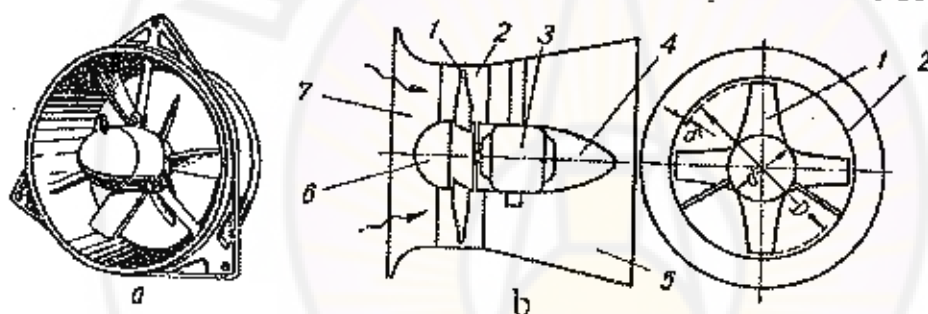
أ - ذات ريش منحنية نحو الأمام .

ب - ذات ريش منحنية نحو الخلف .

ج - ذات ريش مستقيمة (ذات سطح انسيابي - جناح) .

11 - 1 - 2 - المراوح المحورية Axial flow fans :

المراوح المحورية عبارة عن دوارة متوضعة داخل هيكل أسطواني، تركيب الدوارة في كثير من المراوح المحورية مباشرة على عمود المحرك الكهربائي الذي يركب داخل الهيكل الأسطواني في مجرى الهواء، ويبين الشكل (5 - 11) مروحة محورية عادية مكونة من قسمين أساسيين الدوارة والهيكل الأسطواني.



الشكل (5 - 11) مروحة محورية من النموذج البسيط

a - منظر عام b - مقطع ومنظر جانبي .

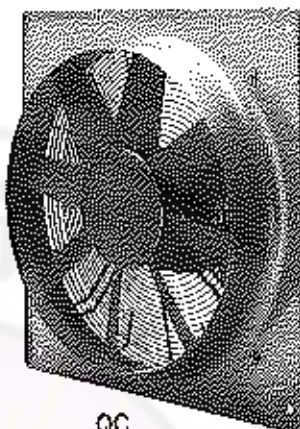
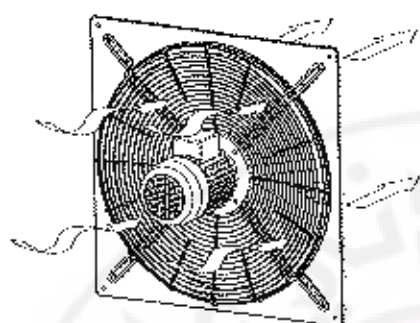
1 - الدوارة المحورية. 2 - الهيكل الأسطواني. 3 - محرك كهربائي. 4 - وصلة جريان لخروج الهواء .

5 - ناشرة. 6 - وصلة جريان لدخول الهواء. 7 - مجمع الدخول

يجري الهواء إلى فتحة الدخول عند دوران الدوارة فيمر بين الريش بشكل مواز لمحور الدوران ثم يخرج من الهيكل الأسطواني الذي يجب أن يكون متممًا بقطر داخلي يسمح بوجود أقل خلوص ممكن بينه وبين الدوارة. لا يجوز أن يتجاوز هذا الخلوص القيمة (1,5%) من طول الريشة أي

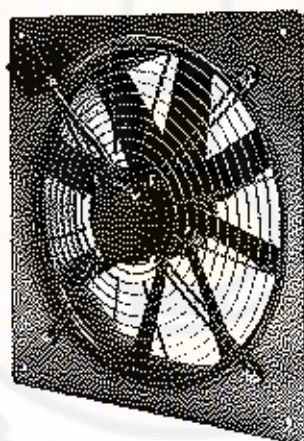
$$\delta \leq 0,015 \frac{D \cdot d}{2}$$

يعمل مجمع الدخول على إيجاد توزيع متساوٍ داخل حقل السرعات أما النافثة فتعمل على تحويل الضغط الديناميكي $(P_{d,w})$ إلى ضغط ستاتيكي (P_s) .
توجد المراوح المحورية في عدة أشكال منها:

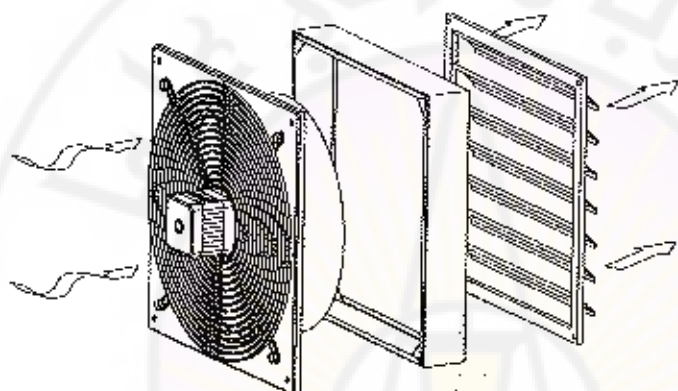
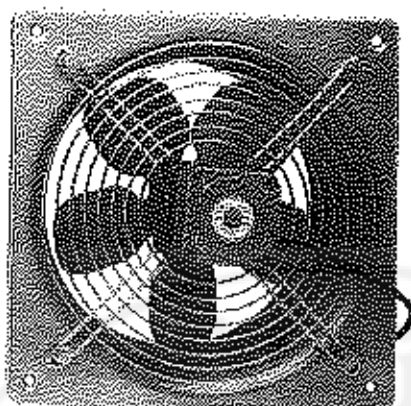


QC

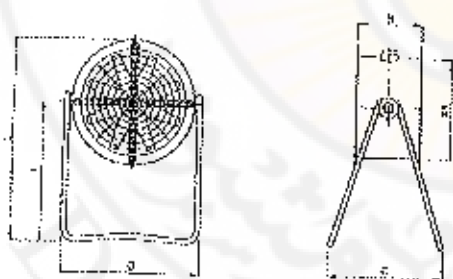
الشكل (6 - 11) مراوح محورية ذات هيكل مربع



الشكل (7 - 11) مراوح محورية ذات هيكل مدمج



الشكل (8-11) مراوح محورية لتوزيع الهواء المنخفض



Type / Size	DA	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	JJ	JK	JL	JM	JN	JO	JP	JQ	JR	JS	JT	JU	JV	JW	JX	JY	JZ	KA	KB	KC	KD	KE	KF	KG	KH	KI	KJ	KK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LL	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MM	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NM	NN	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QQ	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TT	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	XG	XH	XI	XJ	XK	XL	XM	XN	XO	XP	XQ	XR	XS	XT	XU	XV	XW	XX	XY	XZ	YA	YB	YC	YD	YE	YF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV	ZW	ZX	ZY	ZZ
CCP 354 F	352	320	650	580	770	540	21	1800	0.12	0.52	55.6	60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

Dimensions in mm / Dimensions in inch

الشكل (9-11) مراوح محورية قابلة للحمل

توجد أنواع أخرى من المراوح ، منها :

أ - المراوح الجدارية :

حيث يمكن التحكم بالسرعة ضمن المجال $0-100 [m/s]$ كما أنها مقاومة للأحوال الجوية ، ويعمل المحرك لفترة طويلة دون الحاجة للتزييت ، وهي مناسبة من أجل أماكن محددة .

ب - وحدات تبديل هواء المطابخ والأماكن العامة :

وتستخدم في نقل هواء درجة حرارته تصل حتى $120 [^{\circ}C]$ ، كما يمكن التحكم بسرعتها ، وتؤمن حماية حرارية وذات مستوى منخفض من الضجيج .

ج - وحدات التهوية السقفية :

وتتمتع بمستوى منخفض من الضجيج ، وذات تصريف شاقولي وقابل للتحكم ، وتستخدم في شبكات التهوية .

11 - 2 - مقارنة بين المراوح الطاردة والمراوح المحورية:

Comparing between the centrifugal fans and axial fans :

تولد المراوح الطاردة ضغوطا عالية أكبر من الضغوط التي تولدها المراوح المحورية، لذا يستحسن استعمال المراوح الطاردة في شبكات التهوية المعقدة وفي شبكات نقل المواد بالهواء وفي تجهيزات توليد البخار ولضخ الهواء وطرد الغازات وفي شبكات تكييف الهواء، غير أن المراوح الطاردة أضخم وأعلى من المراوح المحورية وتحتل مكانا أكبر من المكان الذي يمكن أن تحتله المراوح المحورية. تجعل المزايا التي تتمتع بها المراوح المحورية (التصميم البسيط، وصغر الحجم، والاقتصادية) استعمال هذه المراوح مناسبة عند إرسال كميات كبيرة من الهواء تحت ضغوط خفيفة، لذا يكثر استخدامها في شبكات السحب وطرد الهواء الفاسد.

تعطي المراوح المحورية ضجيجا أعلى من الضجيج الذي تعطيه المراوح الطاردة وتفسر هذه الظاهرة بأن: معامل الضغط في المراوح المحورية أقل مما هو عليه في المراوح الطاردة، مما يؤدي إلى ضرورة زيادة سرعة دوران المراوح المحورية لتوليد الضغط اللازم.

تولد المراوح الطاردة ذات الريش المنحنية نحو الأمام ضجيجا أعلى من الضجيج الذي تولده المراوح ذات الريش المنحنية نحو الخلف حتى لو كانت السرع المحيطية متساوية لأن سرعة طرد الهواء من الدوارة إلى الهيكل الحلزوني يتم بسرعات أعلى في حالة الريش المنحنية نحو الأمام.

عند تركيب المراوح في الأماكن السكنية وبغية تخفيف الضجيج الناتج عن عملها يجب ألا تزيد السرعة المحيطية للمراوح الطاردة عن $25-30 [m/s]$ ولا تزيد عن $30-35 [m/s]$ في

المراوح المحورية. ويسمح بزيادة السرعة النوعية للمراوح حتى $35 + 50 [m/s]$ عند استعمالها في المنشآت الصناعية وذلك وفقاً لشدة الضجيج الناتج عن وسائل الإنتاج. يسبب عمل جملة النقل والمضاجع وكذلك التوازن السيئ والتركيب الرديء ضجيجاً يسمى: الضجيج ذا المنشأ الميكانيكي وبغية التخفيف من حدة الضجيج نعمل إلى جعل عمود الدوران واحداً للمروحة والمحرك، ولإقلال من الضجيج تركيب كافة المراوح على قواعد خاصة تتركز على مخدات من المطاط أو من النوايس، ويتم وصل هذه المراوح مع الشبكة بواسطة وصلات مرنة من المطاط المبطن بالقماش.

11 - 3 - العدد النوعي للدورات (n_s) Specific speed

هو ذلك العدد من الدورات الذي تضخ عنده المروحة الهواء بغزارة $1 [m^3/s]$ بضغط مقداره $1 [kgf/m^2]$ ويعطى بالعلاقة:

$$n_s = \frac{\sqrt{L}}{p_0^{3/4}} \cdot n \quad (11-1)$$

حيث: $n [r.p.m]$: عدد الدورات في الدقيقة.

$L [m^3/s]$: الغزارة المضخوخة.

$p_0 [Pa]$: الضغط المنسوب إلى شروط العمل عند تحريك غاز وزنه النوعي

$$\gamma_0 = 1,2 [Kg/m^3]$$

وتصبح العلاقة في نظام الواحدات العالمية:

$$n_s = 57,5 \frac{\sqrt{L}}{p_0^{3/4}} \omega \quad (11-2)$$

حيث: ω سرعة الدوران مقدرة بـ $[rad/s]$.

الجدول (11-1) علاقة العدد النوعي للدورات n_s بنوع المروحة

نوع المروحة	$n_s [r.p.m]$
1 طاردة ذات ضغط عالي	10 ÷ 60
2 طاردة بضغط مرتفعة ومتوسطة ذات شفرات: - منحنية نحو الأمام. - منحنية نحو الخلف. - قطرية ذات طرفي سحب.	30 ÷ 60 50 ÷ 80 80 ÷ 120
3 محورية من أجل ضغوط عالية.	120 ÷ 200

من الجدول نلاحظ أن $n_s < 100$ للمراوح الطاردة و $n_s > 100$ للمراوح المحورية.

11-4 - الضغط الذي تولده المروحة The Pressure Of The Fan

يتكون الضغط الكلي الذي تولده المروحة من الضغط الستاتيكي (P_{st}) والضغط الديناميكي

(P_{dyn})

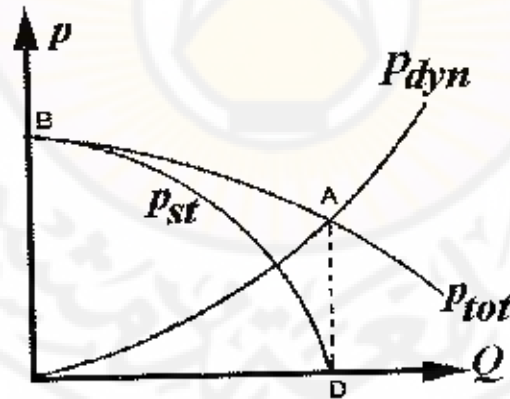
(11-3)

$$P_T = P_{st} + P_{dyn}$$

يبين الشكل (11-10) العلاقة بين الضغط المولد وغزارة المروحة: كما هو واضح من الشكل

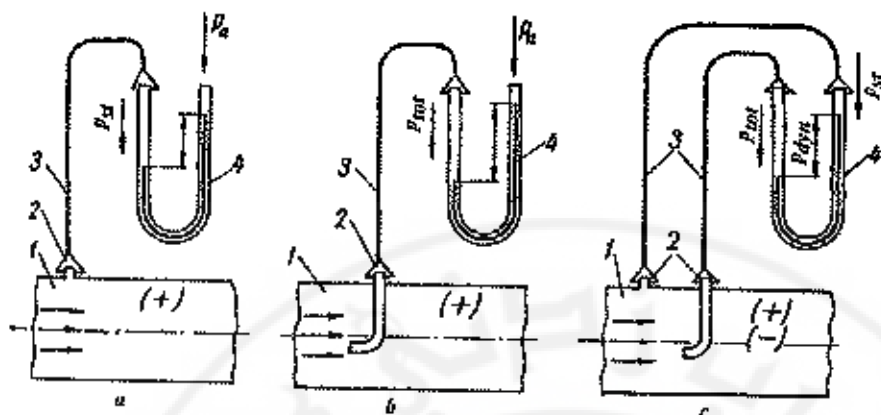
فإن النقطة B تمثل حالة العمل للخامل (فتحة الخروج مغلقة) $L = 0$ ، أما النقطة D

فتمثل شروط العمل الحر للمروحة وتوافق $P_{st} = 0$ ، $L = L_{max}$



الشكل (11-10) علاقة منحنيات الضغط الذي تولده المروحة بالغزارة

يقاس الضغط داخل مجاري التهوية بطرق مختلفة كما هو مبين بالشكل (11-11)



الشكل (11-11) قياس الضغط داخل مجرى التهوية .

- a - قياس الضغط الستاتيكي. b - قياس الضغط الكلي. c - قياس الضغط الديناميكي .
 1 - مجرى الهواء. 2 - وصلة خاصة. 3 - أنبوب مطاطي. 4 - ميكرومانومتر.

أ - قياس الضغط الستاتيكي (p_s): Static Pressure Measurement

ويعبر عن مقدار القدرة الكامنة لوحدة وزن السائل ويقاس في المكان المحدد عن طريق إحداث ثقب في جدار المجرى للمستقيم (تنظيف الفتحة جيداً وكسر الحواف الحادة) وتوصل مع مقياس ميكرومانومتر. على شكل U مملوء بسائل ملون حتى منسوب معين، حيث يتم قياس ضغط التخلخل أو الضغط الزائد حسب أوضاع تغير منسوب السائل الملون.

ب - قياس الضغط الكامل (p_T): Total Pressure Measurement

يقاس بواسطة أنبوب معكوف موضوع داخل المجرى وبمنته نحو الاتجاه المعاكس للجريان (أنبوية بيتوت).

ج - قياس الضغط الديناميكي (التحريكي) (p_{dyn}):

Dynamic Pressure Measurement

ويعبر عنه بالقدرة الحركية لكلو غرام واحد من الغاز ويمكن حسابه من العلاقة التالية:

$$p_{dyn} = p_T - p_s$$

ويعبر عنه أيضاً بدلالة سرعة التيار وفق المعادلة:

$$p_{dyn} = \frac{\rho v^2}{2} \quad [kp/m^2] \quad (11-4)$$

حيث: $v = \sqrt{\frac{2p_{dyn}}{\rho}} \quad [m/s]$ سرعة حركة الهواء داخل المجرى اعتمادا على قياس (p_{dyn})

وتمثل سرعة الهواء في مكان القياس وليست قيمة السرعة الوسطية في مقطع الجريان.
تحدد سرعة الهواء النظامي داخل المجرى بالعلاقة:

$$v_o = \sqrt{\frac{2.9,81 \cdot p_{dyn}}{1,2}} = 4,04 \sqrt{p_{dyn}} \quad [m/s] \quad (11-5)$$

وبما أن السرعة غير موزعة بانتظام في المقطع العرضي للجريان فإنه من الواجب قياسها في عدة نقاط لنتمكن من تحديد قيمة السرعة الوسطية عبر هذا المقطع.
يتحدد الضغط الكامل الناتج عن عمل المروحة في الشبكة بالعلاقة التالية:

$$p_c = \gamma \Delta Z + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \frac{\rho v^2}{2} \quad [Kgf/m^2] \quad (11-6)$$

حيث: Δp_1 فاقد الضغط في أنبوب السحب.

Δp_2 فاقد الضغط في أنبوب الدفع.

$\frac{\rho v^2}{2}$ الضغط اللازم لمنع التيار سرعة الخروج من المجرى.

ΔZ فرق الارتفاع الهندسي بين بداية أنبوب السحب ونهاية أنبوب الدفع.

11-5 - استطاعة ومردود المروحة

The Power And The Efficiency of the Fan:

تحدد الاستطاعة على عمود المروحة بالعلاقة التالية:

$$N_f = \frac{L \cdot P}{102 \eta_f} \quad [kW] \quad (11-7)$$

حيث: $L [m^3/s]$ غازية تدفق الهواء التنظيف من المروحة أو غازية تدفق الهواء المغير قليلا.

$P [kp/m^2]$ الضغط الكامل الذي تولده المروحة عند عملها على تحريك الهواء النظامي.

η_f المردود الكامل للمروحة (يؤخذ من النشرات الفنية).

تحدد استطاعة المحرك الكهربائي عند الموصل المباشر مع المروحة بالعلاقة:

$$N_m = K \cdot N_f = K \cdot \frac{L \cdot p}{102 \eta_T} \quad [KW] \quad (11-8)$$

حيث K عامل أمان يأخذ بالاعتبار الحمولات المفاجئة، أما في حالة الوصل غير المباشر فيجب إدخال مردود جملة نقل الحركة في حساب استطاعة المحرك الكهربائي. يتحدد المردود الكامل للمروحة بالعلاقة:

$$\eta_T = \eta_v \eta_h \eta_M \quad (11-9)$$

حيث η_M المردود الميكانيكي، η_h المردود الهيدروليكي، η_v المردود الحجمي. إذا عملت المروحة على تحريك هواء محمل بالشوائب الميكانيكية فإن غزارة التدفق لهذه المروحة تحسب بالعلاقة:

$$L' = 1,1 L [m^3 / h] \quad (11-10)$$

كما يحسب الضغط الكامل بالجملة التالية:

$$p_T' = 1,1 p_T (1 + k \mu) \quad [Kp / m^2]; [N / m^2] \quad (11-11)$$

حيث k معامل يتعلق بالشوائب المنقولة مع الهواء وله القيم التالية:

عند تحريك الغبار المعدني الخفيف $k = 1,2$

عند تحريك نشارة الخشب $k = 1,5 \div 2,5$ عند تحريك القطن $k = 1,4$

μ التركيز الوزني للمزيج و يساوي إلى نسبة وزن الشوائب الميكانيكية إلى وزن الهواء

الناقل لها.

أما إذا عملت المروحة على تحريك الهواء تحت شروط غير نظامية (درجة حرارة ضغط وزن نوعي) فإن الغزارة المتدفقة من هذه المروحة تعطى بالعلاقة:

$$L' = L \cdot \frac{273+t}{273+20} \cdot \frac{760}{p^*} \quad [m^3 / h] \quad (11-12)$$

كما يحسب الضغط الكامل بالعلاقة:

$$p' = p_0 \cdot \frac{273+t}{273+20} \cdot \frac{760}{p^*} \cdot \frac{\gamma}{\delta g} \quad [N / m^2] \quad (11-13)$$

حيث: t درجة حرارة الهواء أو الغاز ($^{\circ}C$)

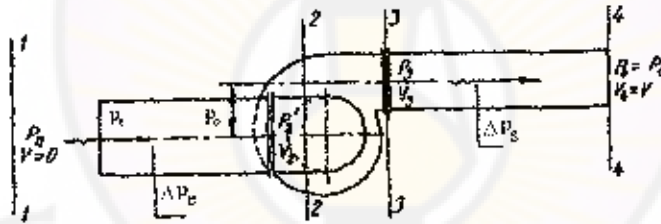
p^* الضغط المساند في مكان تثبيت المروحة ($mm Hg$)

γ الوزن النوعي للهواء أو الغاز عند $t = 20^{\circ}C$ ، $p = 760 mmHg$

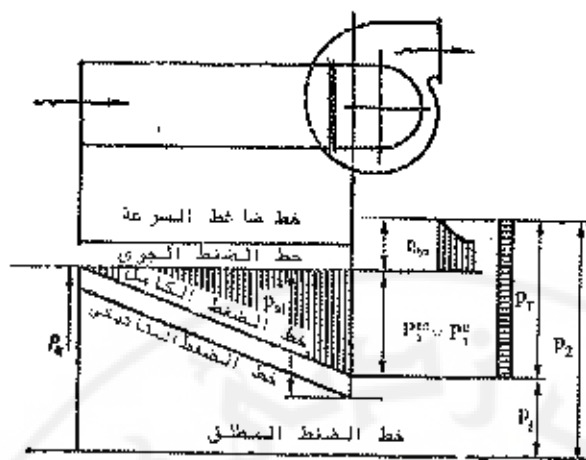
γ_g الوزن النوعي للهواء أو الغاز عند شروط العمل الفعلية (غير النظامية).
ملاحظة: تبقى علاقة الغزارة والضغط والاستطاعة بعدد الدورات كما هي عند المضخات.

11-6 - عمل المراوح في الشبكة Fans Mechanism In The Network

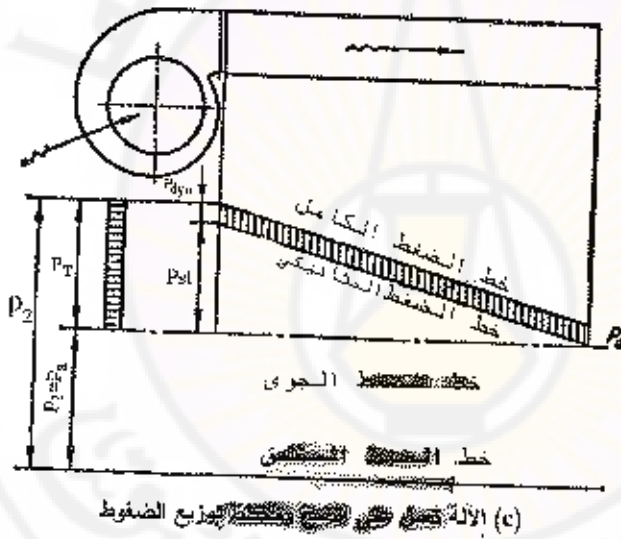
تتطلب دراسة عمل الآلات (المراوح) ذات الريش في الشبكة تحديد قيمة الضغط الكامل (p_r) اللازم لتحريك الهواء داخل الشبكة المفروضة، والغزارة (L) ، حيث تؤثر هذه البارامترات الأساسية في تصميم الآلة وعدد دورات الدوارة، غير أن البارامترات تتغير تحت شروط عمل الآلة (ضمن حدود معينة) التي يمكن أن تولد ضغوطاً وغزارات مختلفة وهي تعمل بعدد واحد للدورات تبعاً لشروط العمل والذي يتأثر بكون شبكة الأنابيب الموصولة مع آلة الضخ (بسيطة، معقدة) سواء في مجال السحب أو الضخ ويتضمن الشكل (11-12, a, b, c, d) دراسة الحالات المختلفة لعمل الآلة في الشبكة وتوزيع الضغوط. وهي: العمل على السحب، والعمل على الضخ، والعمل على السحب والضخ معاً.
ويبين الشكل (11-12) المخطط العام لشبكة تعمل على السحب والضخ والبارامترات الرئيسية المؤثرة فيها



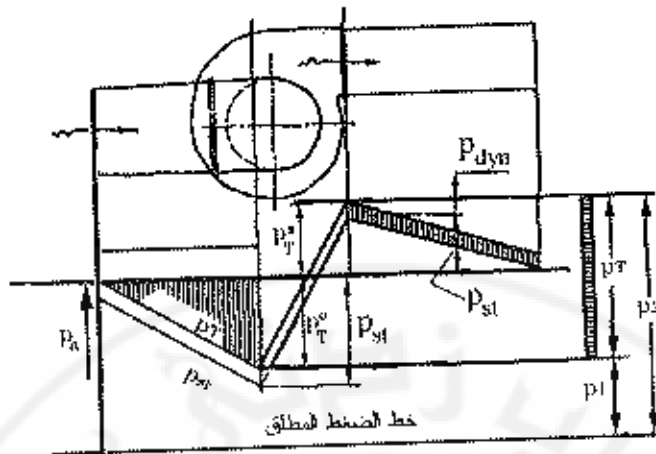
(a) المخطط العام لشبكة تعمل على السحب والضخ معاً



(b) الآلة تعمل على السحب ومخطط توزيع الضغوط



(c) الآلة تعمل على السحب ومخطط توزيع الضغوط



(d) الآلة تعمل على السحب والضغط معاً ومخطط توزيع الضغوط

الشكل (12-11) الحالات المختلفة لعمل الآلة في الشبكة

الضغط الكامل الذي تولده المروحة - مجموع القيم المطلقة للضغطين الكاملين في نهاية خط السحب وبداية خط الدفع، وهذا الضغط اللازم للتغلب على الفواقد في الشبكة وعند الدخول والخروج للشبكة.

الفرضيات:

نأخذ في الشبكة المدروسة أربعة مقاطع مميزة:

- المقطع (1-1) على مسافة كافية من فتحة السحب.
- المقطعان (2-2)، (3-3) يؤخذان مباشرة قبل المروحة وبعدها.
- المقطع (4-4) يؤخذ منطبقاً على مستوي فتحة خروج الهواء.

بتطبيق معادلة برنولي في مقطعين بحيث تكون قيمة الضغط الكامل في أحدها معلومة فإننا نستطيع تحديد الضغوط في المقطع وتحليل توزيع هذه الضغوط في شبكة التهوية.

بتطبيق برنولي بين المقطعين (1-1) و (2-2)، وبين المقطعين (2-2)، (3-3)، وكذلك بين المقطعين (3-3) و (4-4)، والأخذ بالاعتبار مجموع فواقد الضغط في شبكة السحب وفي شبكة الضغط وأن الضغط بعد المروحة أكبر من الضغط قبلها بمقدار الضغط الكامل. وبالتعويض والاختصار نوجد قيمة الضغط الكامل الذي تولده المروحة.

$$P_T = \Delta p_e + \Delta p_s + \frac{\rho v_s^2}{2} \quad (12-14)$$



حيث: p_T الضغط الكامل.

$\Delta p_s, \Delta p_e$ مجموع فواقد الضغط داخل تمديدات السحب وداخل تمديدات الضخ على التوالي.

v_g سرعة خروج الهواء من الشبكة.

p_s, p_e فاقد الضغط عند دخول الهواء إلى الشبكة وعند خروجه منها على التوالي.

p_0 قيمة المركبة الهيدروستاتيكية للضغط.

يمكن تفسير المعادلة السابقة بأن الضغط الكامل الذي تولده المروحة لازم للتغلب على:

- مقاومات شبكة السحب والضخ.

- توليد الضغط الديناميكي في مقطع الخروج للشبكة.

عندما تكون حركة السائل في الشبكة مستقرة فإن الهواء (الغاز) يجري داخلها تحت تأثير قوى محركة (الضغط الذي تولده المروحة) وقوى مقاومة (قوى ناتجة عن الاحتكاك ومقاومات محلية والضغط الستاتيكي)

$$p_R = p_e + \Delta p_e + p_s + \Delta p_s + p_0 [kp/m^2] ; [N/m^2] \quad (11-15)$$

كما يحدد فاقد الضغط بالعلاقة التالية:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (11-16)$$

حيث: λ معامل مقاومة الاحتكاك على طول الشبكة.

L طول القسم من الشبكة.

d قطر الشبكة.

$\sum \xi$ مجموع عوامل المقاومات المحلية.

مع ملاحظة أن الفاقد في خطوط الضخ غير محدود القيمة ويتعلق بخواص الشبكة أما قيمة الفاقد في جزء السحب فهو محدود ولا يمكن أن يكون أكبر من قيمة الضغط الجوي.

أ - الآلة تعمل على السحب:

إذا كانت المروحة غير مزودة بتمديدات للضخ، أو إذا كانت تمديدات الضخ قصيرة جداً، أي أنها أقصر بكثير من تمديدات السحب فإن الضغط الذي تولده المروحة يساوي:

$$p_T = p_e + \Delta p_e + \frac{\rho v^2}{2} [Kgf/m^2] ; [N/m^2] \quad (11-17)$$

حيث $v [m/s]$ سرعة الهواء على مخرج الآلة.

والضغط الذي تولده الآلة يذهب للتغلب على المقاومات في تمديدات السحب فقط. حتى يتمكن الهواء الخارجي من الدخول إلى المروحة عبر تمديدات السحب وفق الاتجاه المحدد بالسهم، تقوم المروحة بإحداث تخلخل عند المدخل إليها حيث يحدث انخفاض في قيمة الضغط مقداره p_T^e مساوية للفرق بين الضغط على بداية ونهاية تمديدات السحب:

$$p_T^{BC} = p_T^e = p_a - p_1$$

$$p_1 = p_a - p_T^e$$

ويطرد منها بضغط مطلق:

$$p_2 = p_a + p_{dyn} \quad (11-18)$$

والضغط الكامل الذي تولده المروحة:

$$p_T = p_2 - p_1 = p_T^e + p_{dyn} \quad (11-19)$$

ويناء على ما ذكر:

- تقوم المروحة باستقبال الهواء تحت ضغط مطلق p_1 .
 - تعمل على ضغطه بمقدار p_T^e ليصبح ضغطه الجوي p_a .
 - تتابع ضغطه حتى يصبح مساويا للضغط الديناميكي p_{dyn} اللازم لطرد الهواء.
- بذلك يكون للضغط الكامل p_T على جهة الضخ مساويا للضغط الديناميكي

$$p_T = p_{dyn} = \frac{\rho v^2}{2}$$

الضغط الديناميكي $\frac{\rho v^2}{2}$ موجب دائما أما الضغط الستاتيكي (p_{st}) فهو سالب في هذه الحالة. يبين الشكل (11-12-b) صورة توزيع الضغوط في تمديدات السحب و يتضح منها أن الضغوط أقل من الضغط الجوي.

ب - الآلة تعمل على الضخ:

إذا كانت المروحة غير مزودة بتمديدات للسحب أو إذا كانت تمديدات السحب أقصر بكثير من تمديدات الضخ فإن الضغط الكامل الذي تولده المروحة يساوي:

$$p_a = p_T = p_s + \Delta p_s + \frac{\rho v^2}{2} \quad [Kgf/m^2] ; [N/m^2]$$

والضغط الذي تولده المروحة يلزم لدفع الهواء وتحريكه داخل تمديدات الضخ:

- يدخل الهواء إلى المروحة بضغط مساوي للضغط الجوي $p_1 = p_a$.

- يطرد منه بضغط مقداره p_2 .

- الفرق بين القيم المطلقة لضغطي الضخ والسحب هو الضغط الفعلي الذي تولده المروحة:

$$p_T = p_2 - p_1 = p_a + p_{\text{eff}}$$

يبين الشكل (11-12, c) توزيع الضغط في تمديدات الضخ والتي تقع فوق خط الضغط الجوي.

ج - الآلة تعمل على السحب والضخ معاً:

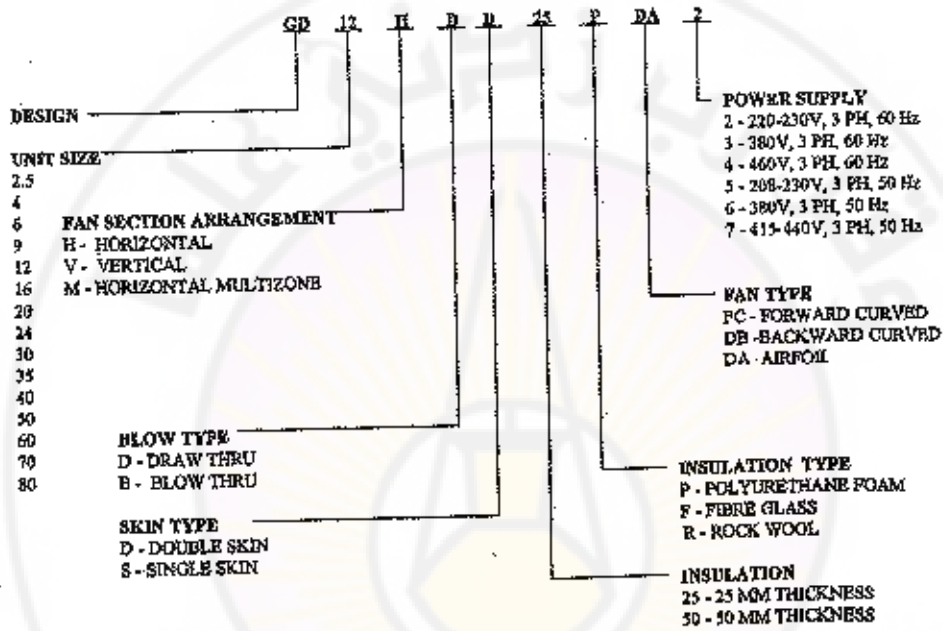
إذا كانت تمديدات السحب طويلة وتمديدات الضخ طويلة أيضاً فإن المروحة تعمل مسببة السحب والضخ معاً.

ويوضح الشكل (11-12, d) صورة توزيع الضغوط في هذه الشبكة والذي يمثل مجموع التوزيع في الحالتين السابقتين (حالة السحب وحالة الضخ) ونلاحظ تناقص الضغط الكامل والضغط المطلق دوماً باتجاه حركة الهواء سواء كانت هذه الحركة داخل تمديدات السحب أو تمديدات الضخ، ويزداد التخلخل داخل تمديدات السحب باتجاه حركة الهواء أما القيمة الموجبة للضغط الكامل فتتناقص باتجاه حركة الهواء داخل تمديدات الضخ، كما نلاحظ أن الضغط الكامل الذي تولده المروحة يساوي مجموع القيم المطلقة للضغطين الكاملين في نهاية خط السحب وفي بداية خط الدفع إن هذا الضغط لازم للتغلب على المقاومات داخل خطي السحب والضخ وعلى الفاقد الحاصل عند الدخول إلى الشبكة وعند الخروج منها. وللتغلب من قيمة الفوائد عند الدخول والخروج من الشبكة نقوم بتركيب النواشر عند الدخول إلى المروحة وعند الخروج منها.

تعد الحالات المدروسة لعمل المراوح مبسطة بعض الشيء لأننا افترضنا أن الشبكات متممة بمقاطع ثابتة على كامل طولها وموجودة في وضع أفقي من دون أن تكون لها فروع ثاقولية، ولأننا افترضنا أن الهواء الذي يجري بداخلها يتمتع بوزن نوعي مساو للوزن النوعي للهواء الخارجي المتأثر بالضغط الجوي، غير أن الظروف الفعلية للعمل تختلف عما سبق، ولكننا نأخذ ظروف العمل الفعلية عند تحديد الضغط المطلوب.

11 - 7 - اختيار المراوح Fans Selection:

مبدأ الاختيار: يتم اختيار المراوح اعتماداً على النشرات الفنية والتي تتضمن الجداول. المنحنيات والرسوم الخاصة بكل مروحة، كما تعتمد كل شركة منتجة رموزاً خاصة بها. يتم التعرف من خلالها على مواصفات المروحة، ولتوضيح مبدأ الاختيار نأخذ الرموز المعتمدة من شركة (Royal Temp) على سبيل المثال :



الشكل (11 - 13) نموذج للمصطلحات المستخدمة في اختيار المراوح

حيث:

- | | | |
|--------------------|-----------------------|------------------------|
| GD: التصميم | 12: الوحدة البعدية | H: ترتيب مقطع المروحة. |
| D: نوع النفريغ. | D: نوع السطح الخارجي. | 25: سماكة العزل. |
| P: نوع مادة العزل. | DA: نوع المروحة | 2: مصدر الطاقة. |

ويعتمد حالياً في اختيار المراوح على برامج حاسوبية متقدمة. كما تعتمد طريقة التصنيف و الاختيار على المعطيات المتوفرة بالجدول رقم (2 - 11)

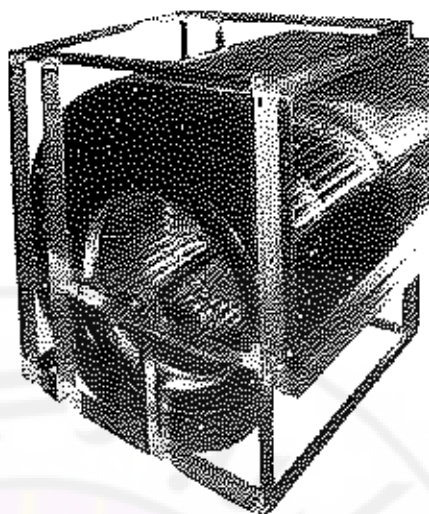
الجدول (2 - 11) تصنيف المراوح الطاردة وفق الاستخدام ووفق الضغط

نوع المروحة	الضغط	التطبيقات	ملاحظات
ريش منحنية نحو الأمام	منخفض	تكييف الهواء	سرعة متوسطة
ريش منحنية نحو الخلف	متوسط	تكييف الهواء + VAV	سرعة عالية
ريش مستقيمة	عالي	تكييف الهواء وتطبيقات صناعية VAV +	سرعة عالية وكفاءة عالية

تقوم الشركات المصنعة للمراوح ومنها شركة Nicotra بإنتاج أنواع كثيرة من مراوح تهوية طاردة مركزية ذات ريش منحنية نحو الأمام ثنائية الدخول ذات عرض مناسب وتسمح هذه المواصفات بإنقاص أبعاد المروحة وتسهم في تقليل مستوى الضجيج ويتم الحصول على هذه السلسلة من خلال تحديد القطر الاسمي للعنصر الدوار (Impeller) تحدد مواصفاتها اعتماداً على نرم القياس AMCA، وتتمتع هذه المراوح (Centrifugal fan) بأبعاد مناسبة وكفاءة عالية، وتنتج هذه المراوح ضمن (21) نوعاً من الأبعاد القياسية للتوربين وتتضمن هذه السلسلة ثلاثة أنواع أحادية وثنائية وثلاثية التوربين (Single, Twin and Triple Versions) كما هو مبين بالشكل (11-13). تقدم غزافتي $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ تحت ضغط إجمالي أعظمي يصل إلى 2400 [pa] التي تتعلق بارتفاع التركيب حيث تتركب أنواع ثنائية التوربين تكون بواسطة مضجعين أو ثلاثة مضاجع (Bearing) وهذه الأنواع مصنعة في الجدول.

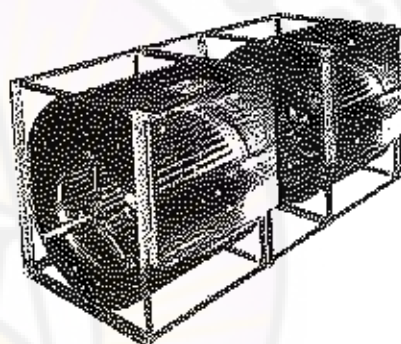
الجدول (13-2) احادي التوربين

Serie AT		
Version	From size	to size
S	7-7	18-18
SC (C)	7-7	18-18
AR	9-7	18-18
TIC	20-15	30-28



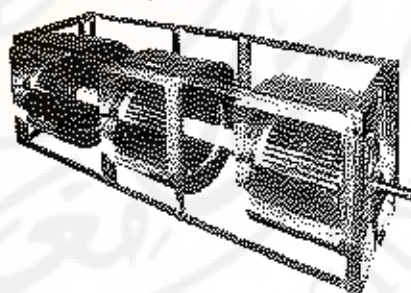
الجدول (13-3) ثنائي التوربين (Twin)

Serie AT		
Version	From size	to size
G2L	7-7	18-18
SC2	7-7	18-18
G2C	9-7	30-28
G2c-C2	20-15	30-28



الجدول (13-4) ثنائي التوربين (Triple)

Serie AT		
Version	From size	to size
G3C	12-9	30-28
G3C-C2	20-15	30-28



الشكل (11-13) نماذج من مراوح Nicotra الطاردة المركزية.

طرق الاختيار:

تمثل منحنيات الأداء للمراوح AT على المخطط (14 - 11) وتتضمن:
الضغط الكلي Total pressure ، غزارة التدفق Air Volume ، الضغط الديناميكي Velocity pressure ، سرعة دوران التوربين R.P.M of the Impeller ، شدة الضجيج Sound power level ، سرعة خروج الهواء Air Outlet velocity .
ويحسب المردود الكلي والمتعلق بالقدرة المنقولة عند محور التوربين η_{at} من العلاقة:

$$\eta_{at} = \eta_{rB} \frac{W_r}{(W_r + W_b)} \quad (11 - 20)$$

حيث تؤخذ قيمة η_{rB} من المخطط وتمثل المردود الكلي للمروحة (التوربين)
كما تؤخذ قيمة W_r : الاستطاعة المأخوذة عند نواة التوربين مقدرة بـ [Kw].
كما تؤخذ قيمة W_b : الاستطاعة المبددة عند المضاجع مقدرة بـ [w].

وتمثل W_{tot} : الاستطاعة الكلية المأخوذة عن المحور [Kw].

$$W_{tot} = W_r + W_b \quad (11 - 21)$$

اختيار المحرك الكهربائي المناسب للمروحة:

بدلالة الاستطاعة الكلية المأخوذة عند محور التوربين:

$$W_{tot} = (W_r + W_b) \quad (11 - 22)$$

واستطاعة التوربين (المروحة):

$$W_{mot} \geq W_{tot} \cdot K_w \quad (11 - 23)$$

حيث: W_{mot} : استطاعة المحرك الكهربائي K_w : معامل اختيار المحرك.

من أجل أنواع المراوح A1 يكون لدينا: $K_w = 1,25$ عندما: $W_{tot} < 0,75 [kW]$

$K_w = 1,20$ عندما: $0,75 [kW] \leq W_{tot} < 10 [KW]$

$K_w = 1,15$ عندما: $W_{tot} \geq 10 [KW]$

يمكننا تخفيض معامل الأمان وكذلك أن نحدد بدقة نقطة العمل (التشغيل) للمروحة وأن تصيب بدقة الاستطاعة المفقودة بواسطة مجموعة النقل.

يمكننا طلب محرك عالي باستطاعة $7,5 [KW]$ يُستخدم مقلعاً نجمياً ثلاثي الزوايا (Y/A).

أو جهاز إقلاع تدريجي. وذلك يكون ضرورياً من أجل مأخذ التيار للمحرك ولضجيج الصادر

عن عملية التشغيل لتحديد المشاكل الميكانيكية التي تؤثر في عمل التوربين.

إضافة للمخطط (14-11) مخطط أحادي التوربين توجد نماذج أخرى من المخططات تستخدم للغاية نفسها ضمن خيارات محددة كما هو مبين بالشكل (15-11).

نماذج Comefri:

كما تنتج شركة Comefri الإيطالية مراوح طرد الهواء طراز (TL1, TLZ) المطابقة للثورمات والسندرات العالمية وهي من النوع التابذي، ذات شفرات منحنية إلى الأمام متوازنة سكونياً وحركياً ومن النوع الهادئ قليل الضجيج عند التشغيل، والمحمي ضد العوامل الجوية، ومصنوعة من الصاج المغلفن ولا تتأثر بالصدأ، والمحور مصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث يتم تدويرها بواسطة بكرات وقشط على شكل حرف V قابلة للعيار عن طريق محرك كهربائي صناعة إيطالية ماركة SIX ثلاثي الطور يعمل بجهد $380[V]$ وتردد $50 [Hz]$ مناسب من النوع المقبول تماماً والمصمم للعمل بظروف شبه استوائية وبطاقة تزيد 20% عن استطاعة المروحة، وتركب المروحة على محور محمول على رولمانات مشحمة مدى الحياة مع مضاجع محكمة الإغلاق تركيب المروحة والمحرك ضمن صندوق من الصاج المغلفن بمساحة 1,25 [mm].

وتبين المنحنيات المميزة كيفية اختيار البارامترات الخاصة بهذه المراوح.

PRESTAZIONI / PERFORMANCES

$$P_v = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/Sec)} \times P_L \text{ (mm H}_2\text{O)}}{102 \times \eta (\%)} = \text{(KW)}$$

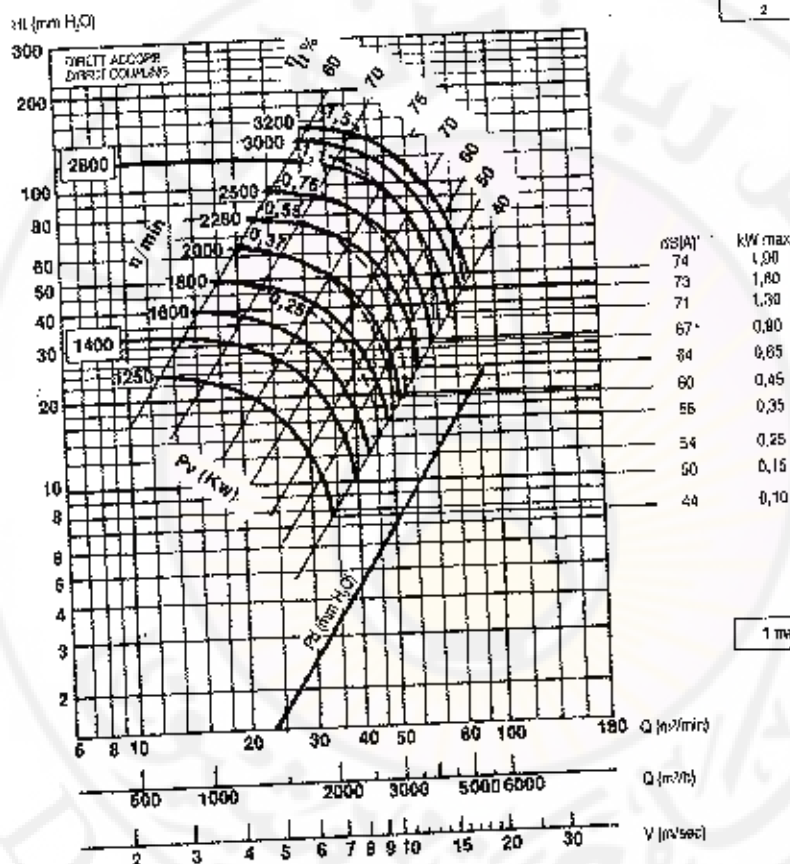
$$P_m = (P_v + 20\% \text{ min.}) = \text{(KW)}$$

P_v = Potenza assorbita all'asse del ventilatore
Absorbed power at the fan shaft

P_m = Potenza del motore installato
Motor power

Limite massimo degli isoterma della temperatura dell'aria Maximum (Q m. H ₂ O) según la temperatura		
Temperatura / Temperature	cp m.	Assorbimento / Absorption
0 - 90°C	2200	standard
90 - 200°C	2450	maximal
200 - 300°C	2750	exceed

Direct coupling / Direct coupling	
Paq Polpa	Pm (KW)
4	0,25
2	1,50



1 mm H₂O = 9,81 Pa

الشكل (15 - 11) مخطط أداء مروحة طاردة مركزية ذات ريش منحنية للخلف نموذج (PR31)

11 - 8 - استعمال المنحنيات المميزة في اختيار المراوح:

Specific Curves Using For Fan Selection

تستعمل المنحنيات المميزة الكاملة وغير الكاملة في الحياة العملية عند إجراء التجارب فقط، لأن استعمالها عند اختيار الآلات يشكل نوعاً من الصعوبة، لذا نلجأ إلى استعمال أنواع أخرى من المنحنيات منها:

أ - المنحنيات المميزة الفردية.

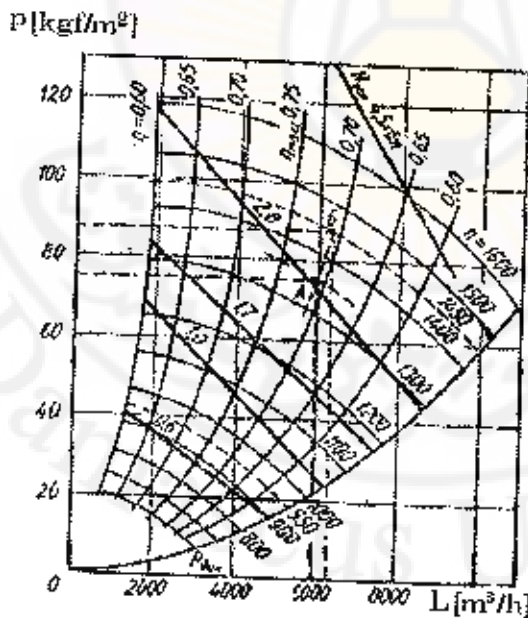
ب - المنحنيات المميزة المتداخلة.

ج - المنحنيات المميزة العامة.

د - المنحنيات المميزة الفردية:

تنشأ المنحنيات المميزة الفردية (16 - 11) لكل نموذج من الآلات ذات الريش عند العمل بأعداد مختلفة للدورات، ومن السهل جداً استعمال هذه المنحنيات عند اختيار الآلات وخلال تحليل عملها، ونلجأ في بعض الأحيان إلى تحميل منحنيات الاستطاعة الخاصة بمجموعة المحركات الكهربائية على الشكل نفسه الذي يتضمن المنحنيات المميزة الفردية لذا نكون غير مضطرين للقيام بحساب الاستطاعة اللازمة واختيار المحرك اللازم بدلالة العلاقة:

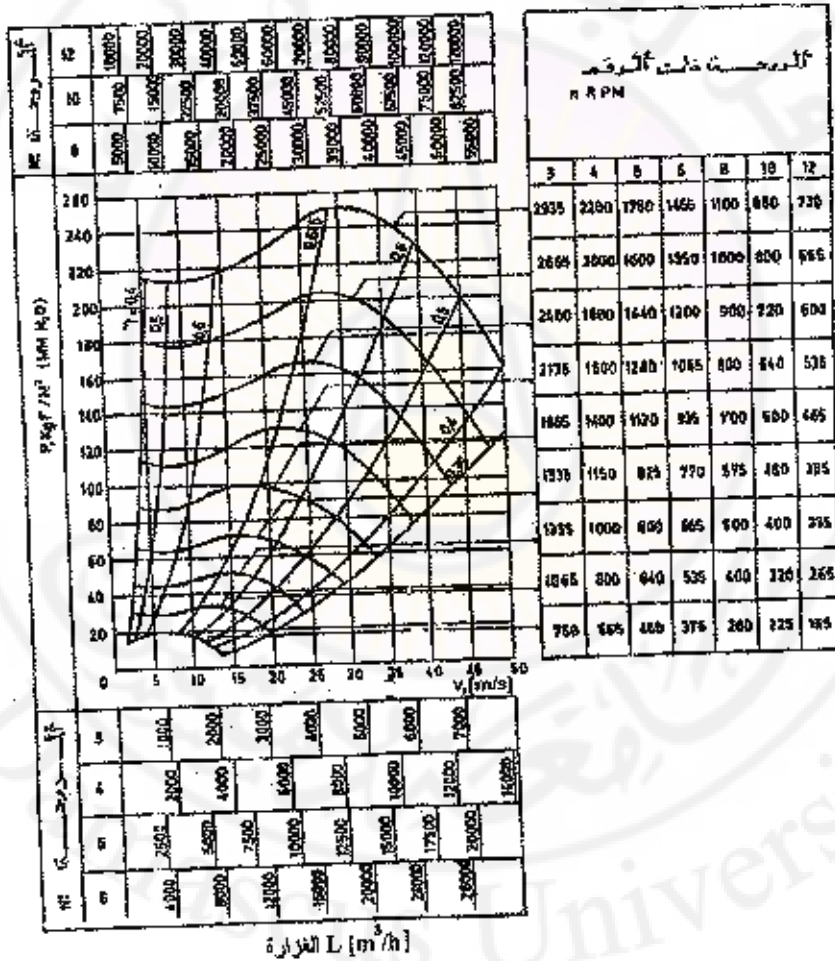
$$N = \frac{L.P.}{102\eta} [kW]$$



الشكل (16 - 11) المنحنيات المميزة الفردية .

ب - المنحنيات المميزة المتداخلة:

إذا أردنا اختيار الآلات باستخدام المنحنيات المميزة الفردية الشكل (11-16) فإننا نضطر إلى استعمال كمية من هذه المنحنيات لأن كلاً منها يخص نموذجاً واحداً فقط من بين نماذج هذه الآلات، ولهذا السبب يتم اللجوء إلى استخدام المنحنيات المميزة المتداخلة والعامّة. تتشأ المنحنيات المميزة المتداخلة لمجمل مجموعة الآلات الصادرة عن نموذج واحد الشكل (11-17) أي لتلك الآلات التي تختلف عن بعضها بعضاً بالأبعاد فقط، فباستعمال هذه المنحنيات المتداخلة نستطيع تحديد رقم الآلة وعدد دوراتها ومرئودها الاقتصادي مباشرة انطلاقاً من قيم (L, P) المفروطين.



الشكل (11-17) المنحنيات المميزة المتداخلة

ج - المنحنيات المميزة العامة:

تعد المنحنيات المميزة العامة واحدة من أنواع المنحنيات المتداخلة وتختلف عن المنحنيات المميزة الفردية بكون خطوطها البيانية منشأة بسرعات محيطية U_2 ثابتة، وليس بأعداد ثابتة للدورات، وتكون سرعات الهواء عبر فتحات الخروج محمولة على محور السينات بدلاً من أن تكون الغزارة (L) هي المحملة على هذا المحور. نورد على الشكل (18-11) منحنيات مميزة عامة مزودة بجدول خاص عائد لمراوح متوسطة الضغط.

طريقة الاختبار:

1- نحدد وبشكل تقريبي سرعة الخروج الأولية (v') انطلاقاً من الضغط الكامل P_0 شريطة أن يكون التحديد في مجال المردود الأعظمي.

$$2- \text{ حساب مساحة فتح الخروج الأولية } (F') \text{ حيث: } F' = \frac{L}{3600 \cdot v'} [m^2]$$

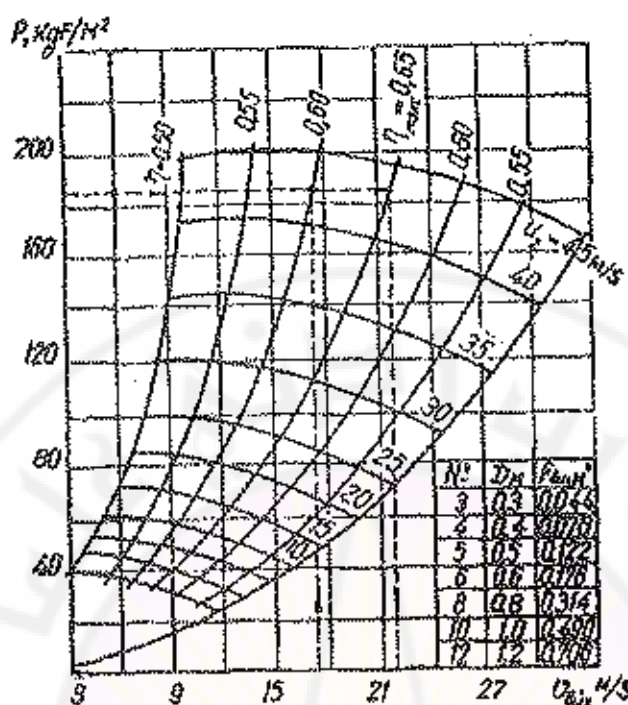
3- تحديد المساحة الحقيقية لفتحة الخروج (F) بدلالة الجدول.

$$4- \text{ تحديد السرعة الفعلية } (v) \text{ بدلالة } v = \frac{L}{3600 \cdot F}$$

5- تحديد η , U_2 بدلالة قيمة الضغط P_0 وسرعة الخروج v الفعلية.

$$6- \text{ حساب عدد دورات المروحة بالجملة التالية: } n = \frac{60 U_2}{\pi \cdot D}$$

$$7- \text{ تحديد الاستطاعة اللازمة للمروحة باستعمال العلاقة: } N = \frac{L \cdot p}{102 \eta_r} [kW]$$



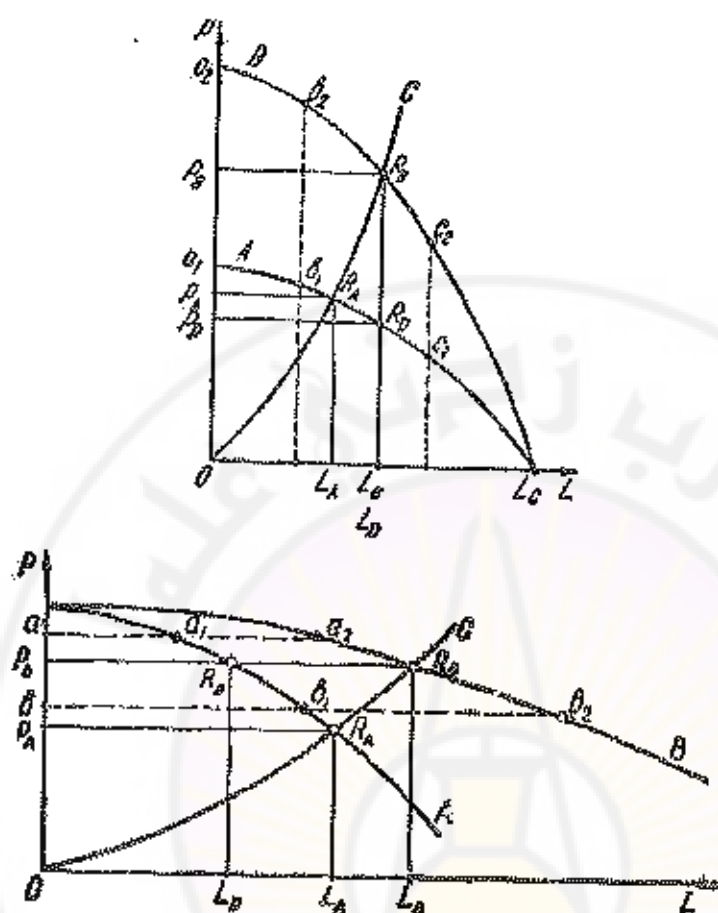
الشكل (18 - 11) المنحنيات المميزة العامة

11 - 9 - العمل المشترك للمراوح في الشبكة:

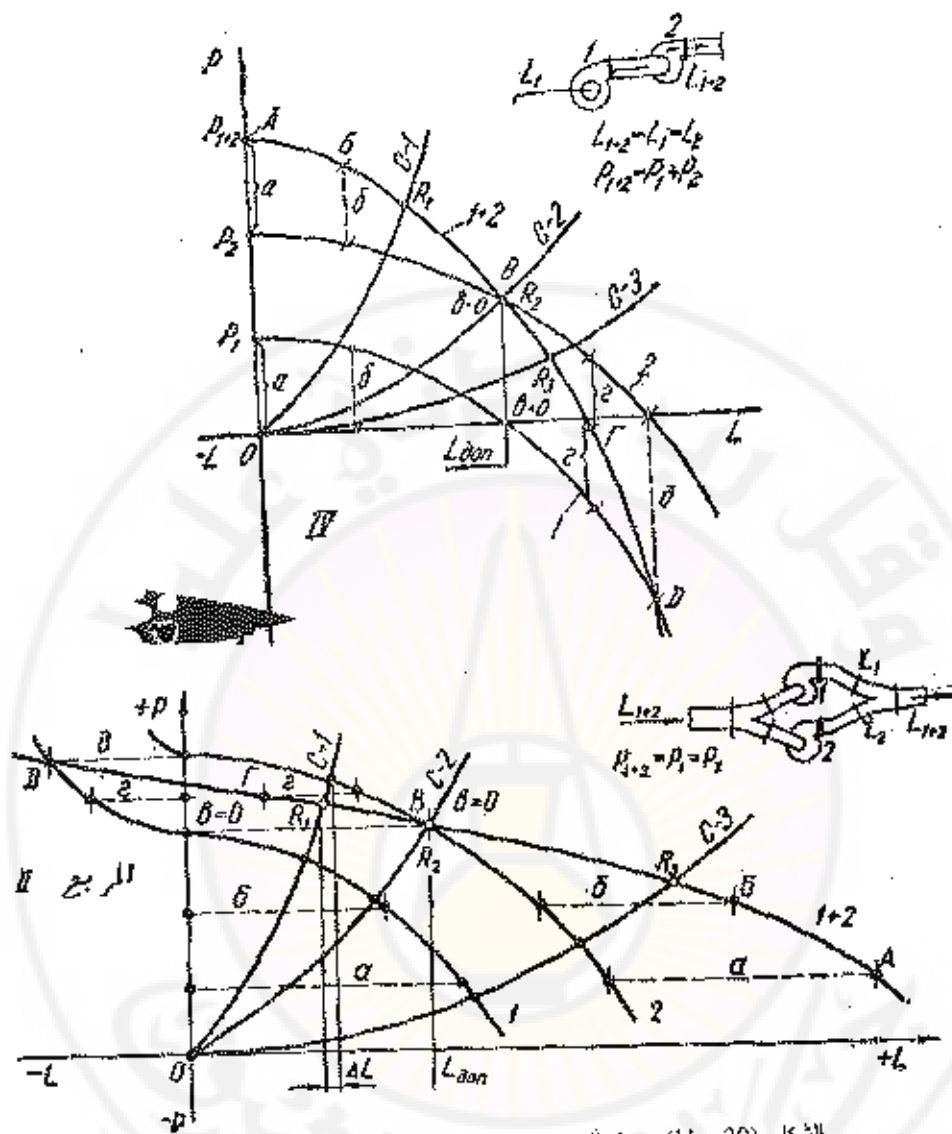
Parallel and series connection of fans

نقدم على إشراك أكثر من مروحة في العمل في الحالات التالية:

- 1- الآلة الواحدة غير قادرة على إعطاء الغزارة المطلوبة حتى ولو أخذناها بأكبر قطر الدائرة وأكبر عدد للدورات.
- 2- الآلة الواحدة غير قادرة على توليد الضغط المطلوب (غزارة الآلة المركبة على الشبكة غير ثابتة ومتزاوجة بين حدود كبيرة الاختلاف).
- أما في الحالات الأخرى: فيستحسن عدم إشراك أكثر من آلة في العمل على الشبكة لأن هذا الحل غير اقتصادي بالنسبة لرأس المال الموظف أو بالنسبة لتكاليف الاستثمار.
- يستخدم الربط على التفرع لأثنين أو أكثر (بهدف زيادة الغزارة).
- كما يستخدم الربط على التسلسل لأثنين أو أكثر (بهدف زيادة الضاغط).
- ويفضل دوماً عند الربط المشترك اختيار الآلات المتشابهة.



الشكل (19-11) وصل اللّون متشابهتين على التمثيل وعلى التفرع



الشكل (20 - 11) وصل التين غير متشابهتين على التماس وعلى التفرع



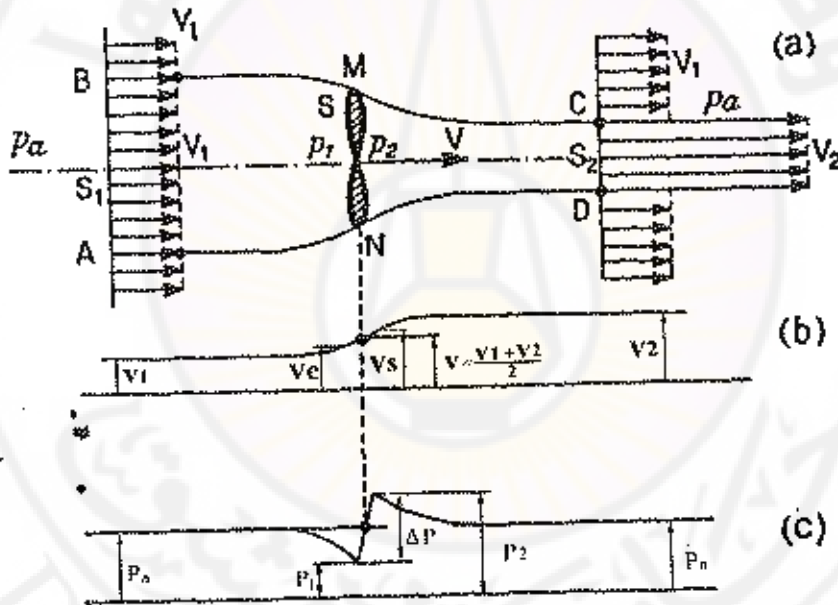
الفصل الثاني عشر

السلوك الأيروديناميكي للمراوح ومولدات الطاقة الريحية

Fans And Wind Turbines Aerodynamic Behavior

12 - 1 - نظرية المروحة: Propeller Fan Theory

تعمل المروحة من خلال بذل قدرة ميكانيكية دورانية على زيادة كمية الحركة للهواء مما يؤدي إلى توليد قوى وعزوم تؤدي عملاً محدداً كما هو الحال في مراوح الطائرات والحوامات ومراوح العنفات الهوائية وفرش البواخر إلى جانب المراوح التقليدية (طاردة، محورية). إن تصميم المراوح المستخدمة في الطائرات وفي فرش البواخر لا يعتمد فقط على أسس نظرية المراوح كتطبيق مباشر على كمية الحرارة ولكنه يعتمد أيضاً على قواعد وأسس أخرى، وسنقدم فكرة مبسطة عن استعمال كمية الحركة في التحليل النظري لحركة الهواء المحيط بها.



الشكل (12 - 1) مخطط الجريان حول مروحة

يبين الشكل (12-1) مخطط الجريان حول المروحة ومخطط توزيع السرعات ومخطط توزيع الضغط قبل المروحة وخالها وبعدها ، من الشكل نلاحظ أن سرعة الهواء أمام المروحة وبعيدا عنها (V_1) وكذلك السرعة خلف المروحة وبعيدا عنها أيضا هي (V_1). إن دراسة الجريان حول المروحة يصلح أيضا من أجل مروحة متحركة بسرعة (V_1) في هواء ساكن والاختلاف بين

الحالتين هو أن جملة المحاور الإحداثية في حالة المروحة الساكنة تكون ملازمة للمروحة، بينما تكون هذه الجملة ملازمة للهواء الساكن في الحالة الثانية.

نقسم الدراسة التحليلية إلى أربع مناطق:

- المنطقة الأولى (AB): أمام المروحة ويعبدا عنها حيث يسود الضغط الجوي P_0 وسرعة الهواء (v_1) ومساحة مقطع الدخول S_1 .

- المنطقة الثانية (MN): أمام المروحة مباشرة حيث ينخفض الضغط $(P_1 < P_0)$ ومساحة الهواء $v_1 > v_2$ عند مقطع المروحة (S).

- المنطقة الثالثة (MN): بعد المروحة مباشرة حيث يسود الضغط P_2 أكبر من الضغط الجوي وتصبح سرعة الهواء بعد المروحة مباشرة v_2 أكبر من سرعة الهواء قبل المروحة ويعبر

عن السرعة عند مقطع المروحة بالقيمة $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$ وفرق الضغط $\Delta P = P_2 - P_1$.

- المنطقة الرابعة (CD): يعود الضغط إلى قيمته الأولية P_0 وتكون سرعة الهواء خلفها مباشرة v_2 ثم تعود لتصبح على مسافة بعيدة منها (v_1) .

وحيث أن دراسة الجريان بشكل دقيق وتام بشكل صعبة كبيرة فقد تم الاعتماد على التبسيط الرياضي للكثير من الفرضيات وأهمها:

- استبدال الريش المتعددة للمروحة العملية بقرص ذي عدد لانتهائي من الريش له نفس قطر المروحة (يعمل هذا القرص على زيادة كمية الحركة الخطية للجريان دون إكسابه أية حركة دورانية).

- افتراض انتظام السرعة والضغط أمام القرص وخلفه مباشرة (جزيئات المائع تتعرض لتغيرات متساوية في الضغط والسرعة عند مرورها بالقرص المفروض).

... إهمال سماكة القرص واعتبار المستوى (MN) مستويا واحدا للجريان قبل المروحة وبعدها مباشرة بحيث تكون سرعة عبور الهواء للمقطع متساوية استناداً لمعادلة الاستمرار للجريان الدائم.

استناداً للفرضيات المعتمدة فإن التحليل النظري التالي ينطبق على الجريان عبر المروحة وتعطى معادلة كمية الحركة الخطية وفق اتجاه محور المروحة بالعلاقة التالية:

$$F = \rho Q(v_2 - v_1) \quad (12-1)$$

حيث: F القوة الخارجية المؤثرة في المائع ضمن حجم المراقبة والنتيجة عن تغير كمية الحركة للتيار بين المستويين (AB) و (CD). يعطي رد فعل الجريان على المروحة قوة جر $(F \dots)$ مساوية للقوة (F') بالقيمة ومعاكسة لها بالاتجاه.

بإهمال قوى الاحتكاك في جميع مناطق الجريان فإن القوة F' متعادل قوى الضغط على طرفي القرص بسبب عدم وجود اختلاف في سرعة التيار قبل القرص وبعده مباشرة. ومنه نجد أن:

$$(P_2 - P_1)A = \rho Q(v_2 - v_1) = q(v_2 - v_1) \quad (12-2)$$

حيث A مساحة القرص.

بفرض أن (v_e) هي السرعة المفروضة عند القرص (قبل القرص مباشرة) فإن العلاقة الأخيرة تصبح:

$$(P_2 - P_1)A = \rho v_e A(v_2 - v_1) \quad (12-3)$$

$$(P_2 - P_1) = \rho v_e (v_2 - v_1) = \rho v (v_2 - v_1) \quad (12-4)$$

حيث $v_e = v_s = v$ سرعة عبور التيار للقرص.

بتطبيق برنولي على الجريان بين المقطعين (AB) و (MN) وكذلك بين (MN) و (CD) نجد أن:

$$P_a + \rho \frac{v_1^2}{2} = P_1 + \rho \frac{v_e^2}{2} \quad (12-5)$$

$$P_2 + \rho \frac{v_s^2}{2} = P_a + \rho \frac{v_2^2}{2} \quad (12-6)$$

وبملاحظة أن $v_e = v_s$ وفق ما ورد في فرضية القرص وأن الضغط في المقطع (AB) و (CD) هو الضغط الجوي السائد وأن الجريان بالفرض غير قابل للانضغاط وعديم الاحتكاك وبجمع العلاقتين الأخيرتين طرفاً لطرف نجد:

$$AP \dots (P_2 - P_1) = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (12-7)$$

وبالأخذ بعين الاعتبار العلاقة:

$$(P_2 - P_1) = \rho v_e (v_2 - v_1) \quad (12-8)$$

$$\frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) = \rho v_e (v_2 - v_1) \Rightarrow \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) = v (v_2 - v_1) \quad (12-9)$$

$$(v_2 - v_1) \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \right) = V (v_2 - v_1) \Rightarrow V = \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \right) \quad (12-10)$$

بمعنى أن السرعة v عبر القرص هي المتوسط الحسابي للسرعتين بعيداً عنه قبله وبعده، وبمعبر آخر فإن زيادة السرعة من V_1 إلى V_2 تتم على مرحلتين متساويتين إحداهما قبل القرص والأخرى بعده، وتعرف هذه النتيجة بنظرية فرويد (Froude) في دراسة المراوح وبعد من الأسس الأولية الهامة فيها.

إذا كانت المروحة هي المتحركة في الهواء الساكن: فإن التحليل السابق يدل على أن المروحة ستقدم في الهواء بسرعة V_1 وتكون سرعة الهواء خلفها $(v_2 - v_1)$. يقوم تيار الهواء العابر لمقطع المروحة عند سرعة V بتقديم عمل مقداره:

$$P_w = Fv = \rho Q (v_2 - v_1) v \quad (12-11)$$

$$P = \rho Q (v_2 - v_1) \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (12-12)$$

أما القدرة المبذولة لإنجاز هذا العمل فتزيد عنه بمقدار القدرة الحركية الضائعة مع التيار بعد القرص وبعيداً عنه أي:

$$P = \frac{\rho Q}{2} (v_2 - v_1)^2 \quad (12-13)$$

والمردود الحسابي للنظرية للمروحة يساوي:

$$\eta = \frac{\rho Q (v_2 - v_1) v_1}{\rho Q (v_2 - v_1) v_1 + \frac{\rho Q}{2} (v_2 - v_1)^2} = \frac{2}{1 + \frac{v_2}{v_1}} \quad (12-14)$$

ويتبين من هذه العلاقة التي استندت إلى هذه الفرضيات أنها إكمالاً للافتراضات والحركات الدوامية خلف المروحة، أن المردود الحسابي للمراوح لا يمكن أن يكون $\eta = 1$ لأن ذلك يتطلب أن يكون $v_1 = v_2$ وهذا يعني عدم تغير كمية الحركة وبالتالي عدم وجود قوة مفيدة.

يزداد المردود كلما كان الفرق بين v_2 و v_1 صغيراً، إلا أن اختيار قيمة صغيرة للحد $(v_2 - v_1)$ يتطلب زيادة معدل التدفق ρQ للحصول على قوة جر معينة، كما أن زيادة معدل التدفق يجب أن تتم عن طريق زيادة مقطع الجريان أي زيادة قطر المروحة وهذا يؤدي إلى ظهور صعوبات أخرى كتأثير القوة النابذة والتصميم الميكانيكي لأذرع المراوح تكون مطلوبة لتحديد قطر المراوح.

وهذه العلاقة لا تعتمد على الشكل العام للقرص المفروض ولا على أبعاده. لذا يمكن تطبيق هذه النتيجة على أي مجموعة متحركة تتضمن توليد قوة دفع نتيجة لزيادة كمية الحركة للمائع المحيط بهذه المجموعة. كما أن مردود هذه المجموعة (مراوح طائرات أو حوامات أو فراش سفينة أو دولايب طاحونة الهواء) يمكن زيادته إذا زدنا كمية حركة المائع عن طريق زيادة معدل التدفق الكتلي للمائع وليس عن طريق زيادة سرعته، بل إن المردود يكون أفضل إذا كانت الزيادة في السرعة طفيفة وكتلة المائع كبيرة، لذا فإن فرقاً كبيراً في السرعة $(v_2 - v_1)$ نتيجة مرور المائع عبر المروحة سيعطي مردوداً ضئيلاً حيث تكون سرعات التقدم v_1 منخفضة. لهذا السبب يكون مردود المحركات النفاثة ضئيلاً عند السرعات المنخفضة للطيران.

من المتبع عادة التعبير عن قوة الجر في المرواح بمقدار لا واحد (لا يعدي) يعرف باسم أمثال الدفع:

$$C_F = \frac{F}{\rho \frac{v^2}{2} A} \quad (12-15)$$

حيث: F قوة الدفع على المروحة.

v سرعة تقدم المروحة في الهواء الساكن.

A مساحة دائرة المروحة.

وبالتالي يكون المردود النظري للمرواح بدلالة أمثال الدفع C_F كما يلي:

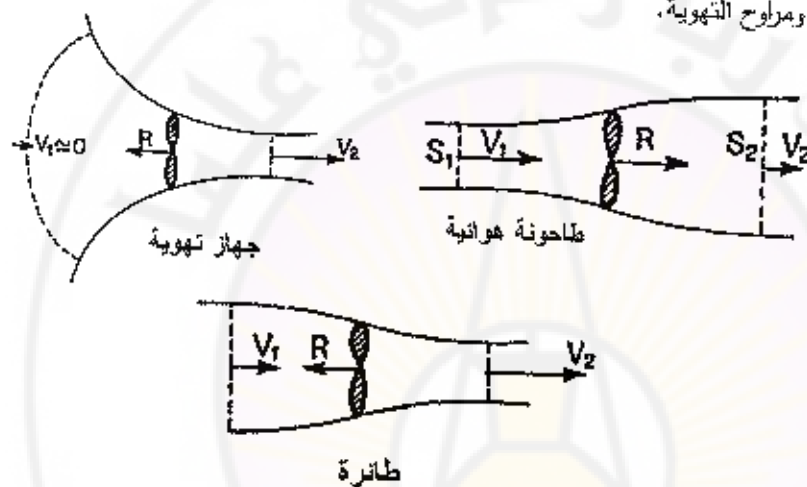
$$\eta = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_F}} \quad (12-16)$$

يبلغ المردود الحقيقي لمراوح الطائرات عادة حوالي 85% من المردود النظري وينقص المردود عادة كلما ازدادت سرعة الطائرة نتيجة لانضغاط الهواء بنسب عالية عند تلك السرعات 650 km/h . أما قيمة مردود فراش السفن فتكون أقل منها في الطائرات نظراً للأبعاد الهندسية المحدودة لفراش السفن ولتأثير جسم السفينة على التيار أمام الفراش.

من جهة أخرى عندما تكون الطائرة في حالة السكون كحالة الإقلاع مثلاً، فإن سرعة التقدم v_1 تكون معدومة وبالتالي ينعدم المردود. وينطبق ذلك على مردود مراوح الحوامات (*Helicopters*) عندما تكون الحوامات بحالة سكون. وإن زيادة قطر المروحة في الحوامات (قيمة كبيرة المسطح A) ينتج نقصاً في القدرة اللازمة لحمولة معينة، على أن زيادة القطر فوق حدود معينة يزيد من الوزن الذاتي لها ومن الإجهادات الناجمة عن القوى النابذة.

طواحين الهواء المعروفة هي أجهزة مماثلة للمراوح من حيث المبدأ والفارق بين مراوح الطائرات وطواحين الهواء هو أن مروحة الطاحونة تعطي عزماً دورانياً مستفيدة من قدرة الرياح بينما يحدث العكس في مراوح الطائرات لذا فإن نموذج الجريان في مراوح طواحين الهواء هو معكوس الجريان، أي أن الجريان بعد المروحة يتباعد وتنخفض سرعته والعلاقات الواردة في تحليل الجريان في المراوح محققة هنا أيضاً.

إن الطريقة العملية المتبعة في تصميم المراوح تعتمد على نظرية الجناح (*Aerofoil Theory*) وبرامج منطوقة. وتبين الأشكال التالية الجريانات عند عبورها لمراوح الطائرات ومولدات الطاقة الريحية ومراوح التهوية.



الشكل (2 - 2) الجريان حول نماذج مختلفة

12 - 2 - الحساب الأيروديناميكي للمراوح الطاردة

Centrifugal Fans Aerodynamic Counting

لحساب أية آلة يجب أن تتوفر لدينا المغطيات التالية: الغزارة L ، الضغط p ، كثافة

السائل، وعدد الدورات. n .

يتحدد قطر فتحة الدخول في الناشرة الحلزونية (الهيكل) والقطر الداخلي للدائرة في المراوح الطاردة بغض النظر عن الضغط الذي تولده هذه المروحة.

نبين فيما يلي الحساب المبسط للمروحة الطاردة:

1 - نأخذ عادة قطر فتحة الدخول D_0 في الناشرة الحلزونية (في الهيكل) مساويا للقطر الداخلي للدائرة $D_0 = D_1$

2 - يحدد أفضل قطر داخلي للدائرة بالجملة التالية:

$$D_1 = K \sqrt{\frac{L}{n}} [m] \quad (12-17)$$

حيث k عامل تتحدد قيمة العددية من الجدول (12-1) حسب قيمة الزاوية β_1

الجدول (12-1)

β_1^0	105	115	135	145	155
k	4,6	3,96	3,74	3,65	3,96

نلاحظ من الجملة (12-17) ومن الجدول (12-1) أن أصغر وأفضل قطر داخلي للدائرة يناسب زاوية التصميم التالية: $\beta_1 = 135^\circ$ علاوة على ذلك يزداد قطر الدائرة إذا انخفض عدد الدورات وإذا بقيت نفس الغزارة لذا تنخفض سرعة دخول السائل إلى الناشرة الحلزونية وإلى ريش الدائرة. تزداد قيمة مردود المروحة وتكبر أبعادها عند انخفاض عدد الدورات لأن ذلك يقلل من قيمة الفاقد في الدائرة وداخل الناشر الحلزونية

3- يحدد عرض الدائرة عند مدخلها بالجملة التالية:

$$b_1 = k \frac{D_1}{4} [M] \quad (12-18)$$

حيث k : معامل يأخذ بعين الاعتبار انقطاع التيار لدى دورانه للدخول إلى الدائرة كما يأخذ بعين الاعتبار تضيق مقطع هذا التيار عند دخول السائل في الدائرة لأن هذا التضيق يتعلق بسمكة الريشة يؤخذ هذا المعامل في الحدود التالية:

$k: 1,2 \div 2,5$ إذا كانت الريشة منحنية نحو الأمام

1,25 ÷ 1,05 إذا كانت الريش منحنية نحو الخلف أو مستقيمة

تزداد قيمة b_1 من الحد الأدنى باتجاه الحد الأعلى كلما كبرت النسبة D_1/D_2 حيث D_2 القطر الخارجي للدائرة.

تصنع الدائرة في المرواح الطاردة بعرض ثابت عند المدخل وعند المخرج $b_1 = b_2$ وينادراً ما تصنع على شكل نصف مخروط $b_1 > b_2$ أما في المضخات ذات الريش المنحنية نحو الخلف فتصنع الدورات على شكل نصف مخروط علماً بأن مثل هذا التصنيع معقد جداً ينخفض فاقد الضغط على دوران التيار وتزداد فاعلية الناشرة وترتفع قيمة المردود عندما تكون مصنعة على شكل نصف مخروط.

4- نحدد سرعة دخول الهواء (الغاز) إلى المروحة بالجملة التالية:

$$c = \frac{4L}{\pi D_0^2} [m/s] \quad (12-19)$$

5- نحدد السرعة المحيطة عند المدخل إلى الدائرة بالجملة التالية:

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} [m/s] \quad (12-20)$$

6- نحدد السرعة النسبية عند المدخل إلى الدائرة بالجملة التالية:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2 - 2c_1 u_1 \cos \alpha_1} [m/s] \quad (12-21)$$

وعند انعدام الفتل للتيار على المدخل $\alpha_1 = 0$ تصبح السرعة النسبية مساوية لما يلي:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2} [m/s] \quad (12-22)$$

نحدد زاوية التيار الهاجم β_a بالجملة التالية:

$$B_a = 180^\circ - \arcsin \frac{c_1}{w_1} \quad (12-23)$$

7- نحدد زاوية تثبيت الريش عند المدخل إلى الدائرة بالجملة التالية:

$$\beta_1 = \beta_a + \alpha \quad (12-24)$$

حيث: α زاوية الهجوم (الفرق بين زاوية تثبيت الريشة عند المدخل وبين زاوية التيار الهاجم) تؤخذ الزاوية α مساوية لما يلي: $\alpha = 5 + 15^\circ$. وتؤخذ الزاوية β_1 في الحدود التالية:

$\beta_1 (105 \div 155)$ ويفضل أن تأخذ القيمة $(\beta_1 = 135)$.

8- نختار القطر الخارجي D_2 وزاوية الخروج β_2 وعدد الريش z .

9- تحدد السرعة المحيطة عند المخرج من الدوارة بالجملة التالية:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} [m/s] \quad (12-25)$$

10- نحدد سرعة التيار عند المخرج من الدوارة بالمعادلة:

$$Cu_2 = u_2 + w_2 \cdot \cos \beta_2 \quad (12-26)$$

بغض النظر عن تأثير العدد المحدد للريش

في البداية نعد أن $w_2 = w_1$ أما إذا أخذنا بعين الاعتبار تأثير العدد المحدد للريش فإن سرعة القتل للتيار هي أقل مما هي عليه في المعادلة $Cu_2 = u_2 + w_2 \cdot \cos \beta_2$ أي أن:

$$Cu'_2 = (0,70 + 0,95) \cdot Cu_2 \quad (12-27)$$

تؤخذ القيمة الدنيا (0,70) مناسبة للعدد الأصغر من الريش

11- يحدد معامل القتل عند المخرج من الدوارة بالجملة التالية:

$$\varphi_2 = C \frac{Cu_2}{u_2} \quad (12-28)$$

12- يحدد الضغط النظري الذي تولده الدوارة بالمعادلة:

$$p_T = \rho \cdot (u_2^2 \cdot \varphi_2 - u_1^2 \cdot \varphi_1) \quad (12-29)$$

ونظراً لعدم تزويد المراوح في الحالات العادية بأجهزة لقتل التيار قبل دخوله في الدوارة $\varphi_1 = 0$ فإن الضغط النظري يصبح مساوياً لما يلي:

$$p_T = \rho u_2^2 \varphi_2 [kgf/m^2] \quad , [N/m^2] \quad (12-30)$$

13- نحدد فاقد الضغط ΔP_p داخل الدوارة بالمعادلة:

$$\Delta P_p = \sum \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (12-31)$$

حيث $w_1 = w_2$ ، $L = 2 [m^3/s]$

14- نحدد أبعاد الهيكل الحلزوني وفاقد الضغط ΔP_k داخل هذا الهيكل بواسطة المعادلة:

$$\Delta P_k = \frac{\rho}{2} [Cr_1^2 + (Cu_2 - Ca)^2 + \sum \xi Ca^2] \quad (12-32)$$

يشكل إجمالي الفاقد الهيدروليكي في الآلة الطاردة المنتجة بشكل جماعي نسبة من الضغط النظري p_1 مساوية لما يلي: $\sum \Delta p = (0,10 + 0,30) \cdot p_1$ $\sum \xi = 0,3$ مجموع معاملات المقاومات المحلية. $Ca = 0,5 u_2$ السرعة الوسطى الثابتة في النافذة.

15- إذا اختلف الضغط الفعلي p_d المفروض عن القيمة الحاصلة $(p_r - \Sigma \Delta p)$ يجب تغيير قيم D_0, β_2, z المفترضة واعتماد قيم أخرى لها وإعادة حساب $\Delta p_p, \Delta p_s$ ومن مقارنة $(p_r - \Sigma \Delta p)$ مع قيمة p_d المفروضة في الشروط الأولية.

16- يحدد المردود الهيدروليكي للمروحة بالمعادلة التالية:

$$\eta_H = \frac{p_r - \Sigma \Delta p}{p_r} = \frac{p_d}{p_r} \quad (12-33)$$

17- تحدد الاستطاعة المستهلكة من قبل المروحة بالمعادلة التالية:

$$N = \frac{L \cdot P_d}{102 \cdot \eta_h \cdot \eta_M \cdot \eta_v} = \frac{L \cdot P_d}{102 \cdot \eta_r} \quad [kW] \quad (12-34)$$

حيث: η_H المردود الهيدروليكي للمروحة ويأخذ بعين الاعتبار الفواقد الداخلية الحاصلة في هذه المروحة

η_M المردود الميكانيكي للمروحة ويأخذ بعين الاعتبار فاقد الاستطاعة في المضاجع والقطع المتحركة ويؤخذ عادة في حدود 0,90 - 0,95

η_v المردود الحجمي للمروحة ويأخذ بعين الاعتبار تسريبات السائل

η_r المردود الكامل للمروحة

تتمتع المراوح الطاردة الحديثة بمردود كامل مساوٍ للقيم التالية: 0,65 ÷ 0,70 عندما تكون الريش منحنية نحو الأمام.

0,70 ÷ 0,75 عندما تكون الريش مستقيمة. 0,85 ÷ 0,75 وأكثر عندما تكون الريش منحنية نحو الخلف.

الأبعاد الأساسية للمراوح الطاردة وفق المعادلات المستنبطة من التجارب

تتمتع المروحة الطاردة بشكل عام بتصميم بسيط نسبياً إذ إنه من الممكن تصنيع مثل هذه

المروحة في أية ورشة في حال عدم توفرها كمنتج من المصنع

نورد فيما يلي حساب مروحة ذات ريش منحنية نحو الأمام وعرض ثابت للدوارة وعدد نوعي

للدورات في الحدود $n_s = 40 \div 80$ وفقاً لمعطيات المعهد المركزي للايروهيدرديناميك.

لحساب مثل هذه المروحة يجب أن تتوفر لدينا المعطيات التالية: الغزارة $L [m^3/s]$ ، الضغط

$p_0 [kgf/m^2]$ ، عدد الدورات $n [r.p.m]$ ، كثافة السائل $\rho [kgf.s^2/m^4]$

ينفذ الحساب حسب الترتيب التالي :

1- نحدد العدد النوعي للدورات بالجملة:

$$n_s = \frac{\sqrt{L}}{p_d^{3/4}} \cdot n \quad (12-35)$$

2- نأخذ قطر فتحة الدخول D_0 في الناشرة الحلزونية مساوياً للقطر الداخلي للدائرة D_1

3- نحدد القطر الداخلي للدائرة D_1 بالجملة التالية

$$D_1 = 3,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{n}} [m]$$

4- نحدد القطر الخارجي للدائرة بالجملة التالية:

$$D_2 = D_1 \cdot \frac{80}{n_s} [m]$$

5- نحدد عرض الدائرة على الشكل التالي:

$$b = (0,3 + 0,6) D_2 [m]$$

6- نحدد عرض الناشرة الحلزونية ذات المقطع قائم الزوايا وفتحة الخروج على شكل مربع بالجملة التالية:

$$B = 0,885 D_1 [m]$$

7- نحدد المسافة لبداية استقامة الناشر الحلزونية والطول لضلع المربع الإنشائي على الشكل التالي:

$$K = 0,5 D_2 \quad , \quad a = 0,125 D_2$$

8- نحدد عدد الريش بالجملة التالية:

$$z = \pi \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1}$$

نأخذ عدداً كاملاً قابلاً للقسمة على 4 أو على 6

9- نؤخذ الزاوية في الحدود التالية:

$$\beta_1 = (105 + 155^\circ)$$

ويفضل أن تؤخذ مساوية للقيمة التالية: $\beta_1 = 135^\circ$

الزاوية الأصغر تناسب الدورات ذات العدد النوعي الأكبر للدورات



10- تؤخذ زاوية الخروج β_2 في الحدود التالية:

$$\beta_2 = (20 + 45^\circ)$$

11- يمكن اعتماد قيمة المردود العام في المروحة المحسوبة بهذه الطريقة مساوية لما يلي:

$$\eta = 0,6$$

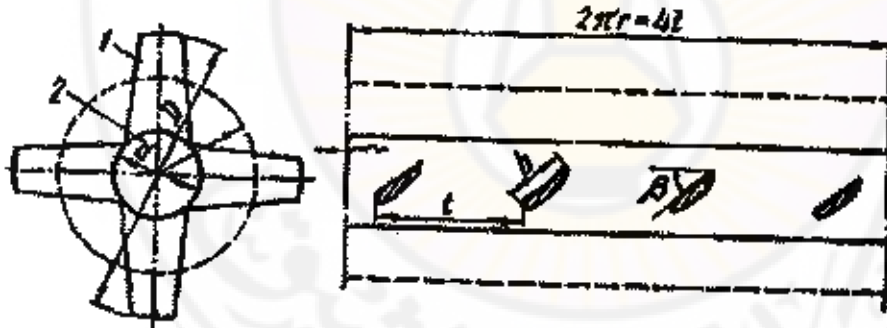
12- تحسب الاستطاعة المستهلكة من قبل هذه المروحة بالجملة

$$N = \frac{L.P}{102.\eta_t} \quad [kW]$$

12 - 3 - الحساب الأيروديناميكي للمراوح المحورية:

Axial Fans Aerodynamic Counting:

لا تتعلق أبعاد الهيكل عند المراوح المحورية بشكل الريش ولا بزاوية تثبيت هذه الريش لذا نقوم بحساب أبعاد الدوارة فقط، لا تشكل الريش في المروحة المحورية أقتية فيما بينها بشكل واضح وملحوس لذا يمكن دراسة عمل هذه الريش على أنه عمل جناح حامل معزول أما التأثير المتبادل بين ريشة وأخرى فيجب بواسطة عامل تصحيح مناسب



الشكل (3-12) الدوارة لمروحة محورية وشبك البروفيلات

1- الريشة، 2- باقة (عمود التثبيت)

لدراسة عمل ريش الدوارة المحورية نستعمل ما يسمى بشبك البروفيلات الشكل (3-12) الذي نحصل عليه عن طريق نشر السطح الأسطواناني ذي نصف القطر حتى يصبح مستويا بذلك تبدو

$$l = \frac{2\pi r}{Z} \quad \text{الريش معزولة عن بعضها بخطوة مساوية لما يلي:}$$

حيث Z عدد الريش

تتخفض قيمة t بانخفاض قيمة r فيصبح شبك البروفيلات كثيفا $\frac{b}{t}$ حيث b عرض الريشة
لقد بين العالم جوكوفسكي أن قوة الرفع المنسوبة إلى وحدة الطول من جناح معزول تتحدد
بالجملة التالية:

$$P = \frac{\gamma}{g} w_{\infty} \Gamma_s \quad (12-38)$$

حيث: γ : الثقل النوعي للسائل g : تسارع قوة الثقل w_{∞} : سرعة التيار في اللانهاية

Γ_s : الجولان على البروفيل

تحدد قيمة الجولان Γ_s بالجملة التالية:

$$\Gamma_s = \int w dl \cos \alpha \quad (12-39)$$

حيث dl طول عنصر البروفيل ويمكن جعل قوة الرفع P ممثلة بالجملة التالية:

$$F_A = C_y \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\gamma}{2g} w^2 \quad (12-40)$$

حيث: F_A : قوة الرفع الناتجة عن عمل عنصر من الريشة محصور بين أسطوانتين تتمتعان
بمحور الألة

C_y : معامل قوة الرفع وهو يتعلق بزاوية الهجوم b : عرض عنصر الريشة
المدروسة

dr : الطول القطري لعنصر الريشة w : سرعة التيار

لا يغير التيار اتجاهه عند جريانه على جناح معزول وتمتع بطول غير محدود (لانهاية) غير
أن هذا التيار ينحرف عن اتجاهه عند جريانه على شبك البروفيلات.

كما بين العالم جوكوفسكي أن تأثير التيار المنحرف على البروفيل في الشبك يمكن أن يستبدل
بتأثير تيار متوسط الاتجاه (اتجاه مكافئ) على بروفيل معزول

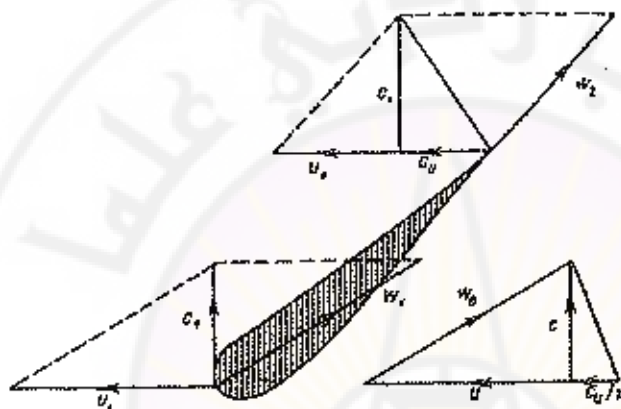
لندرس مثلثات السرعات خلال دوران عنصر من الريشة شكل (4-12) السرعة المطلقة لدخول
التيار هي C_1 تتجه هذه السرعة عموديا على مستوى الدوران إذا لم يخضع التيار لأي قتل قبل
دخوله إلى الآلة بذلك يمكن تحليل هذه السرعة إلى مركبتين الأولى دورانية أو انقالية والثانية
نسبية بحيث يكون لدينا التعادل التالي:

$$w_1 = \sqrt{C_1^2 + u_1^2} \quad (12-41)$$

تبقى السرعة الخطية الدورانية ثابتة $u_2 = u_1 = u$ لأن نصف القطر واحد في مقدمة الريشة وفي ذيلها غير أن ظهور سرعة الفتل Cu بسبب انحراف السرعة النسبية والسرعة المطلقة نحو اتجاه الدوران تبقى المركبة الناعمية لهذه السرعة المطلقة مساوية للسرعة بسبب الاستمرار في الجريان.

يتضح من الشكل (4-12) أن:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + (u - Cu)^2} \quad (12-42)$$



الشكل (4-12) مثلثات السرعة خلال دوران عنصر من الريشة .

غير أن العالم ن. ي. جوكوفسكي كان قد برهن على أن السرعة النسبية للتيار المستقيم والمكافئ تساوي القيمة التالية:

$$w_0 = \frac{w_1 + w_2}{2} \quad \text{أو القيمة التالية حسب الشكل (4-12):}$$

$$w_0 = \sqrt{C^2 + \left(u - \frac{Cu}{2}\right)^2} \quad (12-43)$$

بذلك تصبح قوة الرفع مساوية لما يلي:

$$F_d = C_d b \Delta r \frac{\gamma}{2g} w_0^2 = C_v b \Delta r \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{w_1 + w_2}{2} \right)^2 \quad (12-44)$$

تحدد الزاوية θ الخاصة بتثبيت الريشة بجمع زاوية الورد بالنسبة للسرعة w_0 أي الزاوية β مع زاوية الهجوم α أي أن:

$$\theta = \beta + \alpha = \arctg \frac{C}{U - \frac{Cu}{2}} + \alpha \quad (12-45)$$

يمكن تحليل القوة S التي تبين التأثير المتبادل بين الريشة والتهار الهاجم عليها الى مركبتين: واحدة مساوية لقوة الرفع F_A وعمودية على اتجاه السرعة w_0 وأخرى Q مساوية لقوة المقاومة الرأسية وموازية لاتجاه السرعة w_0 .

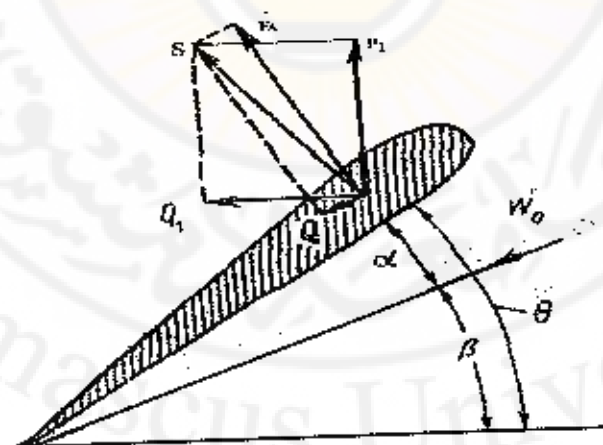
لقد جرت العادة على أخذ هاتين المركبتين بعين الاعتبار عند تحديد قيمة معامل قوة الرفع C_A وقيمة معامل المقاومة الرأسية C_x لمختلف البروفيلات عن طريق التجارب تحدد قيمة كل من المعاملين C_x , C_y بدلالة زاوية الهجوم α .
بذلك نحصل على ما يلي:

$$F_A = C_A \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\gamma}{2g} w_0^2 \quad (12-46)$$

$$Q = C_x \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\gamma}{2g} w_0^2 \quad (12-47)$$

ويمكن اعتماد قيمة كل من المعاملين على الشكل التالي: $C_A = 0,5 \div 0,75$, $C_x = 0,01 \div 0,02$

إذا كانت البروفيلات جيدة وإذا كانت زوايا الهجوم مختارة بشكل صحيح وعند دراسة عمل الدوارات المحورية يستحسن تحليل القوة S إلى مركبتين Q و P_1 وفق اتجاه السرعة الخطية الدورانية ووفق اتجاه محور دوران المروحة انظر الشكل (5-12).



الشكل (5-12) تحليل القوى المؤثرة على الريشة

حيث: S: قوة تمثل التأثير المتبادل بين الريشة والتيار الهاجم عليها.

θ : زاوية تثبيت الريشة.

β : زاوية الورد.

α : زاوية الهجوم.

P: قوة الرفع (عمودية على اتجاه w_0).

Q: قوة المقاومة الرأسية (موازية لاتجاه السرعة w_0).

Q_1 : قوة المقاومة عند دوران الدوارة.

P_1 : قوة السحب المؤثرة في العنصر المدروس من الريشة.

تمثل القوة Q_1 قوة المقاومة ضد دوران الدوارة و بالرجوع إلى الشكل (5-12) يمكن كتابة ما يلي:

$$P_1 = P \cos \beta - Q \sin \beta \quad (12-48)$$

يتضح من هذا التعادل أن الحد الثاني في القسم الأيمن صغيراً جداً لأن قيمة C_x أقل بـ (40-60) مرة من قيمة C_A بالنسبة للبروفيلات الجيدة ولأن $\sin \beta$ أقل بكثير من الواحد لذا يمكن إهمال هذا الحد واعتبار القوة مساوية لما يلي:

$$P_1 = C_A \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\gamma}{2g} w_0^2 \cos \beta \quad (12-49)$$

(ندخل في الحسابات النهائية تصحيحاً مناسباً يعوض قيمة الحد الثاني المهملة).

يرسم عنصر الريشة الموجودة على نصف القطر r مساحة ΔF مساوية لما يلي:

$$\Delta F = \frac{2\pi r dr}{Z} \quad (12-50)$$

حيث Z : عدد ريش الدوارة.

بذلك يمكن تحديد الضغط المؤثر في وحدة السطح على الشكل التالي:

$$P = \frac{P_1}{\Delta F} = \frac{C_A b dr \cdot \frac{\gamma}{2g} w_0^2 \cos \beta \cdot Z}{2\pi r dr} \quad (12-51)$$

تسمح هذه الجملة بتحديد عرض الريشة b:

$$b = \frac{P \cdot 4\pi \cdot g}{C_A \delta w_0^2 \cos \beta \cdot Z} \quad (12-52)$$

حيث: P الضغط الكامل للألة الذي لا يتضمن الضغط الديناميكي الناتج عن السرعة المماسية .
يستحسن أن نختار عدد الريش Z بحيث لا تزيد كثافة هذه الريش عن الواحد عند محيط عمود التثبيت:

$$\frac{b}{t} = 0,6 \div 0,8 \quad (12-53)$$

حيث: $t = \frac{2\pi r}{Z}$ الخطوة Z : عدد الريش b : عرض الريشة.

نبدأ الحساب عادة بعنصر الريشة الموجودة فتابع هذا الحساب بالنسبة للمقاطع الأقرب إلى عمود الدوران وللحيلولة دون جريان السائل في الاتجاه القطري تصميم ريش الدوارة المحورية بحيث يبقى الجولان Γ_s ثابتاً في أي مكان من طول هذه الريش وهذا يعني أن يتوفر لدينا التعادل التالي:

$$\Gamma_s = 2\pi r.C_u \quad r.C_u = \text{const} \quad (12-54)$$

تتمتع الدورات المحورية المحسوبة بهذه الطريقة بريش عرضها ينقص وزاوية تثبيتها تصغر كلما ابتعدنا عن عمود التثبيت واقتربنا من نهاية هذه الريش.

يؤخذ عدد الريش لهذه الدورات في المجال $(2^\circ - 12^\circ)$ ويتخذ زوايا التثبيت في المجال $(30^\circ - 10^\circ)$ أما قطر عمود الدوران في مكان تثبيت الريش فيؤخذ مساوياً إلى $(40-70)\%$ من القطر الخارجي للدوارة.

نأخذ قطر العمود في مكان التثبيت أكبر من هذه القيمة عندما يكون معامل الضغط كبيراً جداً في هذه الآلات المحورية.

ندخل في الحسابات التصحيحات اللازمة التي تأخذ بعين الاعتبار التأثير المتبادل بين الريش والخلوص بين الريش والهيكل.

من جهة ثانية يمكن الاكتفاء بالحساب الأيروديناميكي التالي:

إذا كانت السرعة الزاوية هي w فإن شبك البروفيلات يدور بسرعة محيطية هي: $u = r.w$.
يدخل الهواء إلى شبك البروفيلات بسرعة مطلقة C_1 تحت زاوية α_1 ويخرج من هذا الشبك بسرعة C_2 تحت زاوية α_2 أما السرعات النسبية للهواء داخل الشبك فتتغير من w_1 تحت زاوية β_1 إلى w_2 تحت زاوية β_2 .

يعمل شبك البروفيلات الدائر على توليد تيار الهواء داخل هذا الشبك وعلى زيادة ضغط هذا الهواء.

يحدد الضغط النظري الذي تولده الدوارة بمعادلة فويلر :

$$P_T = \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2) + \frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2) + \frac{\rho}{2}(c_2^2 - c_1^2) \quad (12-55)$$

نجد أن الحد الأول في هذه المعادلة $\rho/2(u_2^2 - u_1^2)$ يساوي الصفر لأن السرعة المحيطة على السطح الأسطوانى تبقى ثابتة بذلك تصبح معادلة الضغط النظري على الشكل التالي:

$$P_T = \frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2) + \frac{\rho}{2}(c_2^2 - c_1^2) = \rho u(c_{u2} - cu_2) \quad (12-56)$$

الضغط الممتائيكى في هذه المعادلة هو :

$$P_u = \frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2) \quad [\text{N/m}^2] \text{ أو } [\text{Kgf/m}^2] \quad (12-57)$$

يحدد الضغط الفعلي الذي تولده المروحة المحورية بالجملة التالية:

$$P_n = (0,75 \div 0,85) P_T \quad [\text{Kgf/m}^2]$$

حيث $(0,75 \div 0,85)$ معامل يأخذ بعين الاعتبار الفاقد الناتج عن دخول الهواء إلى الدوارة، الفاقد في الدوارة والفاقد الناتج عن خروج الهواء من هذه الدوارة وغيرها. تصنع المراوح المحورية في الوقت الحاضر مزودة بريش قابلة للدوران حول محاور تثبيتها وسهلة التبديل ومتعددة المراحل أيضاً.

يمكن حساب قطر الدوارة للمروحة المحورية بشكل تقريبي بالجملة التالية:

$$D = 1,3 \sqrt{\frac{L}{v}} \quad [\text{m}] \quad (12-58)$$

حيث: L: غزارة المروحة.

v: سرعة الهواء في الدوارة تؤخذ بحدود $8 \div 10 \text{ [m/s]}$ تحسب السرعة المحيطة

على الدوارة بالجملة التالية:

$$u = 2,8 \varphi \sqrt{P_0} \quad [\text{m/s}] \quad (12-59)$$

حيث: φ عامل الدوران ويتعلق بشكل الريشة وقيمته:

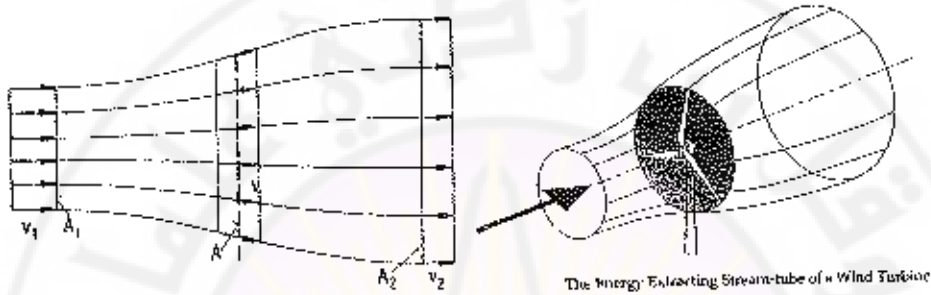
$\varphi = 2,8 \div 3,5$ بالنسبة للريش السطحية ، $\varphi = 2,2 \div 2,8$ بالنسبة للريش المنحنية ،

P_0 الضغط الذي تولده المروحة

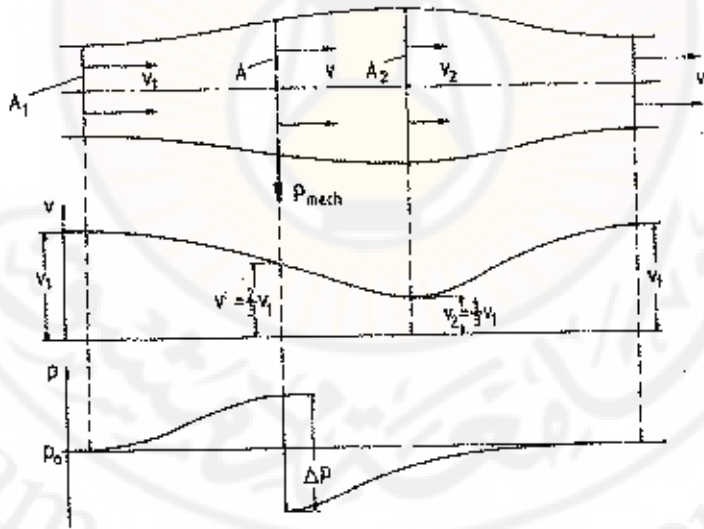
12-4 - السلوك الأيروديناميكي عبر عنفة ريحية:

Aerodynamic Behavior Through Wind Turbines

طور العالم بيتز *Betz* طريقة تستند إلى فرضية رانكين لمروحة مثالية وتعين بدلالة معادلة برنولي وقانون الدفع الخطي وتساعد في حساب الاستطاعة العظمى التي يمكن استخلاصها من عنفة ريحية مثالية من الطاقة الريحية المتاحة في موقع ما. وتبين الأشكال والمخططات التالية، الأسس المتبعة في الحساب كما هو مبين في الشكل (6-12) :



الشكل (6-12) الجريان حول عنفة ريحية .



الشكل (7-12) تغيرات السرعة والضغط عند عبور التيار لعنفة ريحية .

الفرضيات:

- عدد ريش العنفة لانهائي وبسماكات صغيرة جداً.
- إهمال دوران التيار النافوري العابر للعنفة وكذلك مجموع الفوائد المتولدة عن الاحتكاك والمزج.
- حدوث تناقص فجائي للضغط ΔP في مستوي العنفة يتوزع بانتظام على كامل المساحة الفعالة.

- قيمة P_0 (الضغط غير المشوش) وعلى مسافة كافية قبل العنفة وبعدها يكون متساوياً، بينما تتناقص السرعة من v_1 بعيداً قبل العنفة إلى v_2 بعيداً خلف العنفة.

بفرض وجود عنفة ريشية يعبر خلالها تيار هوائي فإن العنفة تقوم بكبح السرعة من v_1 قبلها إلى v_2 بعدها الشكل (6-12) والشكل (7-12)، وهذا يفترض توسع مقطع التيار الهوائي من A_1 إلى A_2 وبتطبيق معادلة الاستمرار:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (12-60)$$

في مستوي العنفة تختلف سرعة جريان التيار الهوائي عند العنفة عن كل من v_1 و v_2 وتكون موزعة بانتظام على مقطع العنفة A . بتطبيق قانون الدفع الخطي باتجاه الجريان يمكننا حساب القوة المطلوبة لكبح السرعة من v_1 إلى v_2 واستناداً لنظرية فرود (Froude theory) فإن السرعة التي تخترق مستوي العنفة تساوي للمتوسط الحسابي للسرعة قبل وبعد العنفة:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

والثانية بعد العنفة مباشرة:

$$P_a + \rho \frac{v_1^2}{2} = P + \rho \frac{v^2}{2} \quad (12-61)$$

وبصورة مماثلة تأخذ نقطتين من خط تيار تماماً بعد العنفة والثانية بعيداً خلف العنفة:

$$P_a + \rho \frac{v_2^2}{2} = P + \rho \frac{v^2}{2} + \Delta P \quad (12-62)$$

ومنه نجد فرق الضغط في مستوي العنفة:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad (12-63)$$

مما سبق تلاحظ ما يلي:

يسود قبل العنفة مباشرة ضغط زائد، وخلفها ضغط ناقص ويحدث في مستوي العنفة تغير في مقدار الضغط مقداره ΔP وبملاحظة أن $v_1 > v_2$ يكون $w = v_1 - v_2$ حيث w السرعة التي يفقدتها التيار الهوائي خلف العنفة بفعل كبح الجريان. بتعويض v_2 في علاقة فرق الضغط نجد:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho [v_1^2 - (v_1 - v)^2] \quad (12-64)$$

تحسب الاستطاعة المتوفرة في الرياح بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (12-65)$$

تناسب الاستطاعة مع مكعب السرعة وبالتالي فإن أي تغير ضئيل في السرعة عند العنفة سيؤدي إلى تغير كبير في الاستطاعة المتوفرة في الريح. بينما تحسب الاستطاعة المستخلصة من الرياح P_N من فرق سرعتي الرياح قبل العنفة وبعدها:

$$P_N = \frac{1}{2} m^* (v_1^2 - v_2^2) \quad (12-66)$$

حيث m^* التدفق الكتلي ومقداره:

$$m^* = \rho v_1 A = \rho v A = \rho v_2 A \quad (12-67)$$

حيث A المساحة التي تعبرها الرياح بالسرعة v .
ووفق مبدأ مصونية الكتلة نجد أن:

$$m^* = \rho v A = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) = \rho v_1 A = \rho v_2 A \quad (12-68)$$

بالتعويض نجد:

$$P_N = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (12-69)$$

إن نسبة الاستطاعة المستخلصة من الرياح P_N إلى الاستطاعة المتوفرة في الرياح P تسمى معامل الاستطاعة:

$$C_p = \frac{P_N}{P} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \quad (12-70)$$

لإيجاد معامل الاستطاعة الأعظمي $C_{p,max}$ نشق العلاقة السابقة بالنسبة إلى (λ) ونعدم

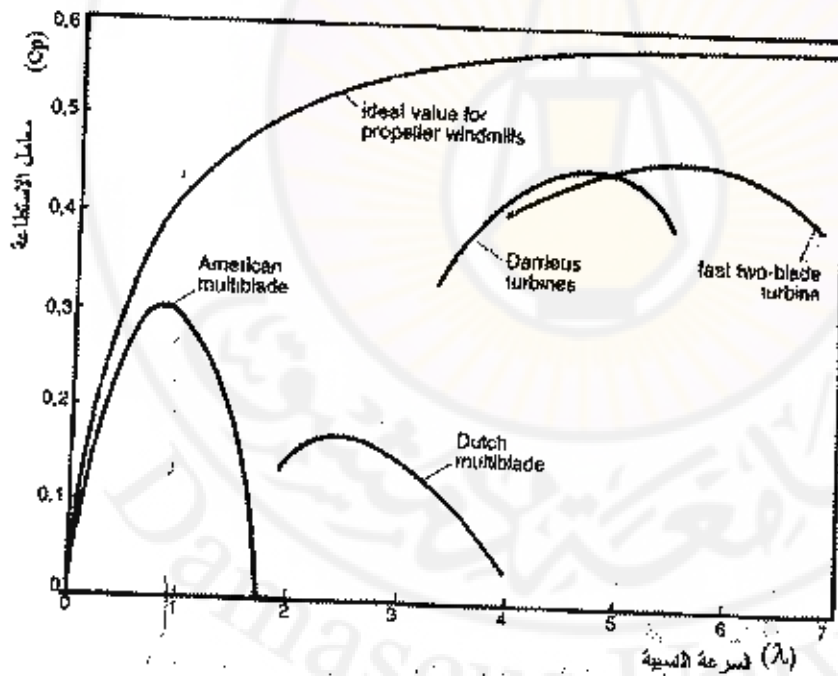
$$\text{المشتق، حيث } \lambda = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{d\left[\frac{1}{2}(1+\lambda)(1-\lambda^2)\right]}{d\lambda} = -\frac{3}{2}\lambda^2 - \lambda + \frac{1}{2} = 0 \quad (12-71)$$

ومنه نجد أن $C_p = C_{p,max}$ عندما تكون قيمة $\lambda = \frac{1}{3}$ أي يجب أن تكون السرعة خلف العنفة ثلث سرعة الريح قبلها ولإيجاد قيمة $C_{p,max}$:

$$C_{p,max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left[1 - \left(\frac{1}{9}\right)\right] = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (12-72)$$

تم تحديد معامل الاستطاعة الأعظمي من قبل العالم *Betz* ويعني فيزيائيا أنه لا يمكن استخلاص أكثر من 59,3% من استطاعة الريح المتوفرة الشكل (8-12)، وتم تحسين معامل الاستطاعة عن طريق الدراسة الايروديناميكية للجريان حول ريش العنفة الريحية.



الشكل (8-12) مخطط يبين العلاقة بين معامل الاستطاعة (C_p) والسرعة النسبية (λ) لأنواع مختلفة من العنفات الريحية:

12 - 5 - الأنفاق الهوائية Wind Tunnels

تلعب الأنفاق الهوائية دوراً مهماً في التعرف على السلوك الأيروديناميكي للأجسام المختلفة (مولدات طاقة ريشية ، مراوح ، سيارات ، قطارات ، طائرات عادية ، طائرات مقاتلة ، مركبات فضائية ، مناطيد هوائية ...). وتجري هذه الاختبارات في الأنفاق الهوائية على نماذج اختبار مصنعة وفق نظرية التشابه والنمذجة ، وبمقاييس مختلفة ، ويتم الاعتماد على نتائج هذه الاختبارات في تصنيع النموذج الأصلي ، ولا يكاد يخلو مركز بحثي أو جامعي أو مؤسسة صناعية كبرى من وجود مثل هذه الأنفاق بما يلي احتياجاتها التصميمية والاختبارية ويأتي في مقدمة هذه المراكز البحثية وكالات الفضاء العالمية (NASA) .

تشيد الأنفاق الهوائية بأشكال وأبعاد مختلفة ، ويكون بعضها كبير الحجم للغاية بحيث يمكن اختبار طائرة بحجمها الطبيعي ، (إلا أن معظم الأنفاق الهوائية تكون ذات أبعاد أصغر من النموذج الأصلي .

12 - 5 - 1 - تصنيف الأنفاق الهوائية Wind Tunnels Classification :

تصنف الأنفاق الهوائية وفقاً لثلاثة معايير :

أولاً : سرعة التيار داخل حجرة الاختبار :

تعد سرعة التيار من أهم البارامترات التي تحدد نوع النفق الهوائي ومواصفاته ، ووفق هذا المعيار تصنف الأنفاق الهوائية إلى عدة أنواع منها :

1 - الأنفاق الهوائية ذات السرعات المنخفضة Low Speed Wind Tunnels :

تستخدم للاختبارات التي تتطلب أن يكون فيها عدد ماخ Ma منخفضاً جداً بحدود 0,3 مع سرع في مقطع الاختبار تصل إلى $[m/s] 80 \div 110$ وفق نماذج الاختبارات في هذا النوع من الأنفاق : الطائرات ، القطارات ، السيارات ، مولدات الطاقة الريحية ، المباني

يبين الشكل (9-12) نموذجاً اختبارياً لطائرة مقاتلة مثبتة على منصة داخل حجرة اختبار قطرها $[m] 3,6$ ضمن نفق هوائي مغلق تبلغ السرعة العظمى فيه $[m/s] 90$ ، ومعدل الاضطراب

$Turbulence Level$ فيه يبلغ % 0,25 ، ويحقق مسند الاختبار البارامترات التالية :

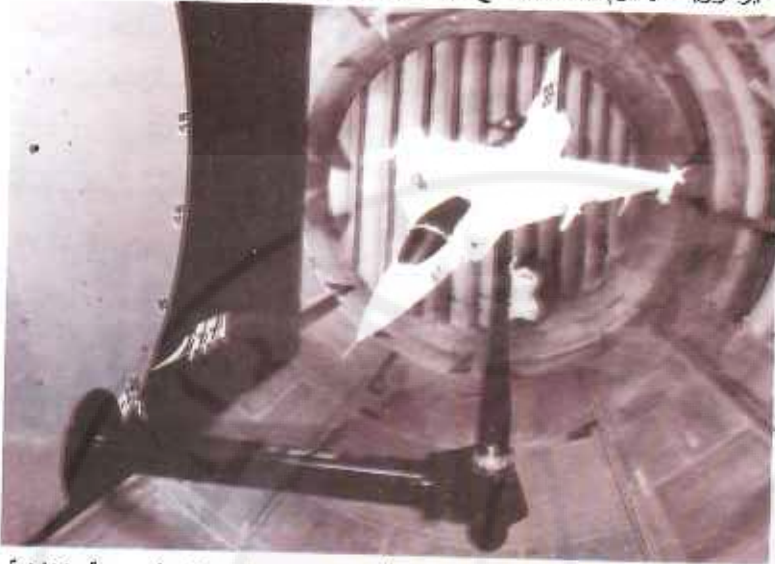
- زاوية الهجوم الأعظمية $minimum\ angle\ of\ attack$: $\pm 180^\circ$

- زاوية الدوران الأعظمية $minimum\ Roll\ angel$: $\pm 180^\circ$

- التردد الأعظمي $maximum\ frequency$: 4117

- ميل الارتفاع الراسي : 10°

- السرعة التصميمية . $360 [r.p.m]$
- تغير زاوية الهجوم باستمرار مع تغير سرعة الهواء في النفق .



الشكل (9 - 12) نموذج اختبري لطائرة مقاتلة ضمن نفق هوائي مغلق ذو سرعة منخفضة
Low Speed Wind Tunnel [1]

ويبين الشكل (10 - 12) نموذج اختبار لطائرة نقل مع مسابير القياس



الشكل (10 - 12) نموذج اختبري لطائرة نقل

2 - الأنفاق الهوائية دون الصوتية *Sous - Sonic Wind Tunnels* :
وتكون سرعة الهواء في حجرة الاختبار ضمن المجال $[m/s] 80 \div 300$ وعدد ماخ $(0,24 \div 0,9)$.

3 - الأنفاق الهوائية حول الصوتية *TranSonic Wind Tunnels* :
قادرة على تأمين سرع قريبة من سرعة الصوت وتستخدم لاختبار الطائرات الصغيرة مثل طائرات النقل والطائرات الشراعية، ويكون عدد ماخ بحدود $(0,9 \div 1,2)$

4 - الأنفاق الهوائية فوق الصوتية *SuperSonic Wind Tunnels* :
تؤمن سرع فوق صوتية من أجل $Ma > 5$ ، ويمكن تأمين ذلك بتصميم مناسب لفوهة متقاربة متباعدة ويستخدم هذا النوع لاختبارات الطائرات المقابلة .

5 - الأنفاق الهوائية الفطر صوتية *HyperSonic Wind Tunnels* :
السرعة الفطر صوتية هنا هي السرعة التي تتجاوز خمسة أمثال سرعة الصوت ، $Ma = (5 \div 15)$ ، ويدار النفق بشكل متقطع مع نسب ضغط عالية جدا في البداية .

6 - الأنفاق الهوائية هائلة السرعة *Hotshot Wind Tunnels* :
تصمم هذه الأنفاق لتعمل عند أعداد ماخ عالية جدا تصل إلى $Ma = 27$ ، وتستخدم لاختبار الصواريخ والمركبات الفضائية ، تدار بشكل متقطع مثل الأنفاق ذات السرعات العالية وتمتلك وقت تشغيل أقل (ثانية واحدة أو أقل) .

ثانياً : مقطع الاختبار *Test Section* :

يعد مقطع الاختبار (حجرة الاختبار) العنصر الأهم بين مكونات النفق لأنه يؤمن جميع المواصفات التصميمية اللازمة لتصنيع النموذج وتصنف الأنفاق الهوائية وفق هذا المعيار إلى:

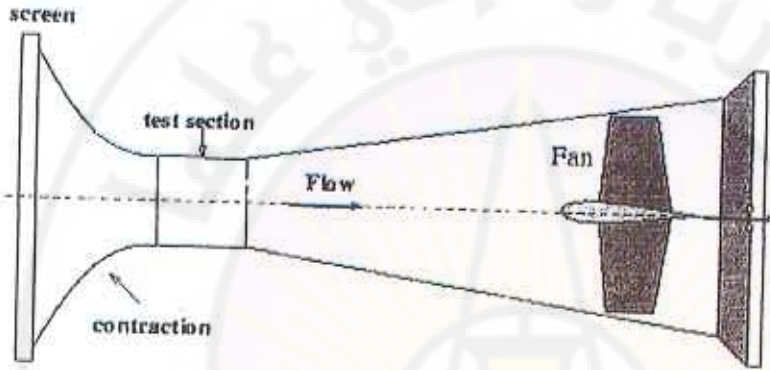
- مقطع الاختبار المغلق .
- مقطع الاختبار المفتوح .
- مقطع الاختبار الدائري .
- مقطع الاختبار المربع .
- مقطع الاختبار المستطيل .

ثالثاً : دائرة العودة Return Circuit :

وتلعب دوراً مهماً في تحديد الشكل العام للنفق الهوائي ويوجد نوعان رئيسيان وفق هذا المعيار هما :

1 - نفق هوائي مفتوح Open-Return Wind Tunnels :

يدخل التيار النفق الهوائي عبر التضيق *Contraction* ويغادر عبر النافذة ، ويبين الشكل (11-12) أحد نماذج هذا النفق والذي يستخدم عادة من أجل سرعات منخفضة ويمتاز ببساطة التصميم وانخفاض التكلفة ، ولكن مردود الطاقة منخفض نسبياً .



الشكل (11-12) مخطط نفق هوائي مفتوح

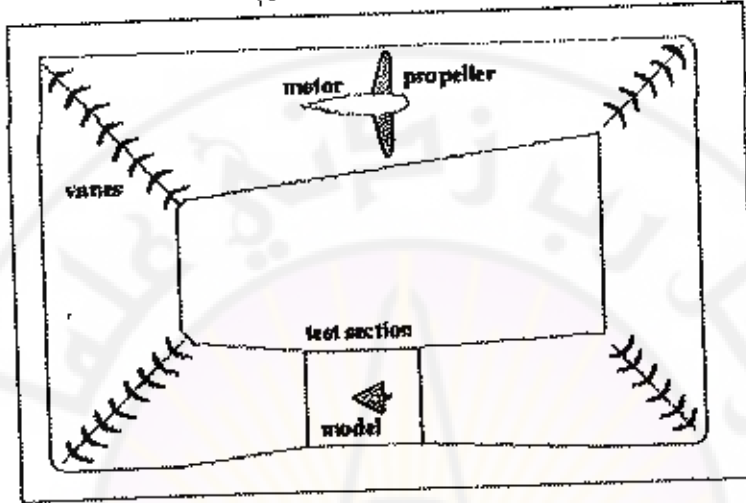
كما يبين الشكل (12-12) صورة النفق الهوائي المفتوح الموجود في مخبر ميكانيك الموائع في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق .



الشكل (12-12) النفق الهوائي المفتوح في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق .

2 - نفق هوائي مغلق: Closed Wind Tunnels :

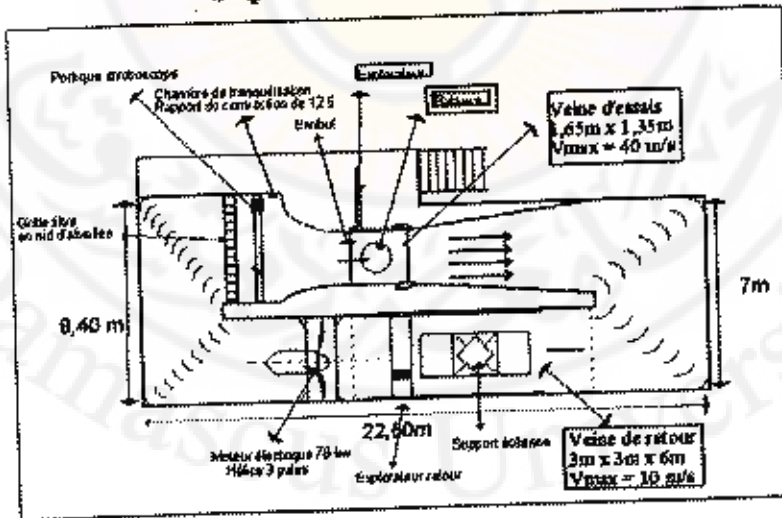
ويمتاز هذا النفق بأنه ذو دارة مغلقة كما هو مبين في الشكل (13-13) حيث يدور الهواء خلال أنبوب راجع مصمم خصيصا وفق نوع النفق ، والميزة الرئيسية لهذا النوع إمكانية الوصول إلى أفضل مردود ، لكنه أكبر تكلفة وأعقد من حيث التصميم .



الشكل (13-13) مخطط نفق هوائي مغلق

2 - Closed - Return Low Speed Wind Tunnel

ويبين الشكل (12-14) مواصفات النفق الهوائي المغلق المستخدم في (E.N.S.A.M. de Paris) ويعد من أهم الأنفاق الهوائية في فرنسا.



الشكل (12-14) نفق هوائي مغلق مستخدم في (E.N.S.A.M. de Paris)

إضافة لما ذكر من تصنيفات وفق الأسس المذكورة أعلاه هناك بعض الأنواع من الأنفاق المصنفة وفق مواصفات خاصة مثل:

- النفق الهوائي المضغوط .
- النفق الهوائي المنخفض الضياعات .
- النفق الهوائي الجليدي .
- النفق الهوائي بمقياس كامل .
- النفق الهوائي الدخاني .
- النفق الهوائي ذاتي الحركة .
- النفق الهوائي الانفلاتي .
- النفق الهوائي التحريضي .

12- 5- 2 - مكونات النفق الهوائي Wind Tunnel Components :

يتوفر في معظم الأنفاق الهوائية المفتوحة والمغلقة عدد من العناصر أهمها :

المقطع المتضيق *Contraction Section* ، الناشرة (المقطع المتوسع) *Diffuser* ، المروحة *Fan* ، شفرات تعديل الجريان *Flow Straiteming Vanes* ، مدخل الهواء *Air Intake* ، غرفة الاختبار *Test Chamber* ، شفرات التحكم بالجريان *Flow Control Vanes* ، مجموعة من الزوايا *Corners* ، برج العادم *Exhaust Tower* ، شبك *Grid* ، حواجز *Screens* ، خلايا النحل *Honeycomb* ، غرفة التحكم والمراقبة *Tunnel Control Room* .

1 - المقطع المتضيق :

يوجد قبل حجرة الاختبار ، وتقوم هذه الفوهة بتسريع دخول الهواء إلى منطقة الاختبار وصولاً إلى السرعة المطلوبة ، ويسهم التصميم المناسب للتضيق في إعطاء تدفق ثابت وتوزيع منتظم للسرعة عبر منطقة الاختبار ، كما أن مقطع جدران التضيق يؤثر بشكل كبير على انتظام توزيع السرعة ، ويراعى عند تصميم النفق الهوائي منخفض السرعة جعل التضيق قصيراً قدر الإمكان بحيث يحقق أفضل أداء .

2 - الناشرة :

ومهمتها إعطاء سرعة التيار بعد خروجه من غرفة الاختبار ، والسبب الأهم لانخفاض مردود الناشر هو الضياعات الكبيرة في الطاقة أثناء تحول القدرة الحركية إلى ضغط ، ولتصميم الناشر

تأثير كبير على كفاءة النفق بالكامل ويجب أن يراعى فيه تجنب انفصال التيار، ومن العوامل المؤثرة في أداء الناشر :

- نسبة التوسع . *rate of expansion*
- شكل المقطع العرضي . *Cross - Section Shape*
- مستوى الاضطراب . *Turbulence Level*
- تأثير الطبقة الحدية . *Boundary Layer Effect*
- تأثير شكل الجدران . *Effect Of Wall Shape*

3 - المروحة :

مهمتها توليد تيار هوائي بسرعات معينة تتناسب مع النموذج المختبر وشروط الاختبار ، وتؤمن انتظاما في السرعة ودوران كامل للتيار في النفق المغلق ويتم اختيار هذه المراوح استنادا إلى نشرات الفنية .

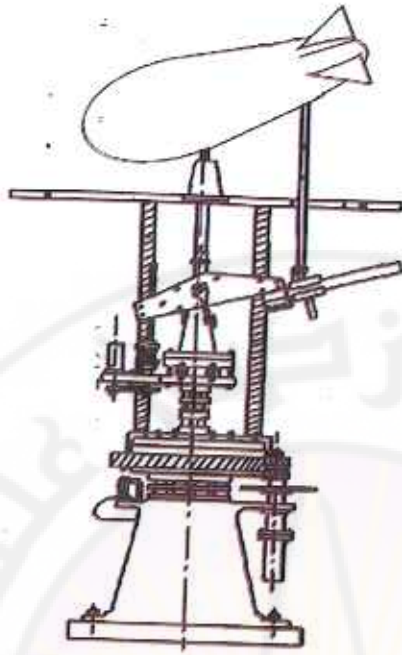
4 - مقطع الاختبار (حجرة الاختبار) :

تحتوي الأنفاق الهوائية على جزء هام هو حجرة الاختبار يتم تثبيت النموذج المراد اختباره بداخلها على منصة اختبار مزودة بمجموعة من الحساسات المثبتة على النموذج والمتصلة مع غرفة التحكم والقياس والتي تزودنا بجميع القوى و العزوم المؤثرة في النموذج من خلال برامج حاسوبية تعطي جميع القراءات المطلوبة ، وتقوم بتحليل جميع القياسات - تغذى هذه الحجرة بتيار هوائي منتظم يغذى بواسطة مراوح كبيرة مع إمكانية استخدام وسائل أخرى مثل أوعية الهواء المضغوط ، تعتمد أبعاد مقطع غرفة الاختبار من حيث الحجم والشكل على نوع النموذج المراد اختباره ، ويوجد بشكل عام نوعان لمقطع الاختبار :

... مقطع اختبار مغلق : وله عدة أشكال كالدائري والإهليلجي والمربع والمستطيل والمثلث

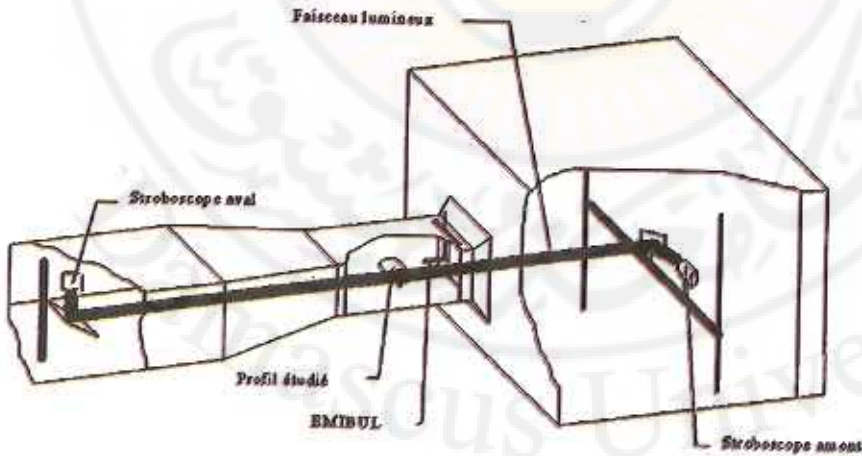
- مقطع اختبار مفتوح .

يبين الشكل (15-12) منصة الاختبار لمنطاد هوائي يعمل بالطاقة الشمسية وطاقة الرياح ومخصص لعبور المحيط الأطلسي تم اختباره في المدرسة الوطنية العليا للهندسة في باريس.



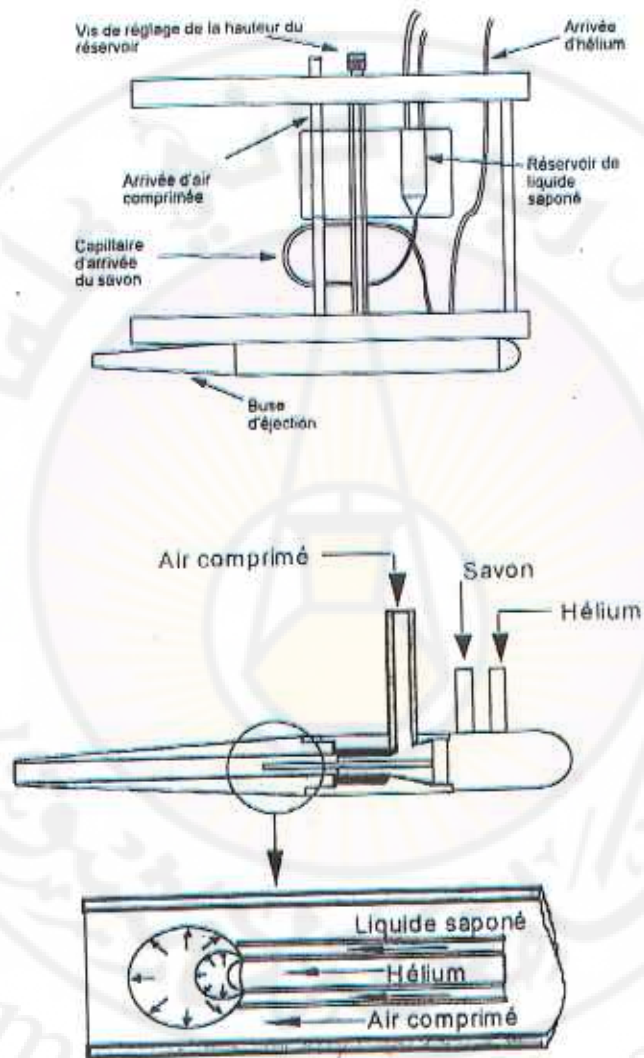
الشكل (12-15) نموذج منطاد هوائي مثبت على منصة اختبار .

ومن النفاثات المستخدمة في الأنفاق الهوائية أنظمة القياس بالليزر وتربية الجريان ، ويبين الشكل (12-16) نظام قياس واختبار بروفيل جناح حامل داخل نفق هوائي مفتوح باستخدام أشعة الليزر .



الشكل (12-16) نظام القياس بالليزر داخل نفق هوائي .

كما يبين الشكل (12-17) بعض النظم المستخدمة في تربية الجريان باستخدام الصابون والهيليوم والهواء المضغوط .



الشكل (12-17) أحد أنظمة تربية الجريان المستخدم في الأنفاق الهوائية .



الفصل الثالث عشر

المحطات الكهرومائية

Hydroelectric Plants

13 - 1 - تمهيد: Introduction

تم الاستفادة من طاقة المياه في سورية منذ العصر الروماني، ومن المؤشرات على ذلك نواير حماء المركبة على نهر العاصي إلى جانب استخدام الطواحين المائية في طحن الحبوب، كما تم استخدام العنفات الهوائية في رفع المياه من الآبار قبل توفر المحركات الكهربائية وقد ركب العدد الأكبر من العنفات الهوائية في منطقة القلمون والتي تبعد حوالي (100) كم شمال مدينة دمشق.

تعد سورية أول بلد عربي استخدم المحطات المائية الصغيرة لتوليد الطاقة الكهربائية منذ عام 1906م، حيث تم تشييد محطة توليد كهرومائية في التكية على نهر بردى وتتكون من (4) وحدات استطاعة الواحدة منها [250 KVA] وتم توسعتها في عام (1929) م بإضافة وحدة أخرى استطاعتها [500 KVA]، والمجموعات الأربع الأولى في التكية قامت بإمداد مدينة دمشق بالكهرباء خلال الحرب العالمية الأولى وبقيت بالخدمة إلى أن ظهر البترول حيث توقفت في عام 1958.

تنشأ محطات التوليد عادة داخل جسم السد أو بالقرب منه، هذا بالإضافة إلى الشلالات الطبيعية التي تستخدم مباشرة لتوليد الكهرباء كما هو الحال في شلالات نياجرا بين كندا والولايات المتحدة، بالإضافة للكثير من المحطات الكهرومائية التي تتوزع في أمريكا الجنوبية وكندا وآسيا، وتأتي الصين في مقدمة بلدان العالم من حيث إنشاء السدود العملاقة. ويعد سد هوفر (Hoover) من أضخم السدود في العالم، ويوجد بين مقاطعتي نيفادا وأريزونا طوله (379) م وارتفاعه (221) م وبإمكانه احتواء (31) تريليون ليتر من الماء، بدأ بناء سد هوفر عام 1931 لمدة (3) سنوات بأكثر من (16000) عامل، وبفضل هذا السد يمكن التحكم في نهر كولورادو وتأمين مخزون مائي جيد بالإضافة إلى كونه مصدر كهرباء رخيص.

ومن المنشآت المائية المتميزة في الوطن العربي سد الفرات في سورية والذي يضم مجموعة توليد كهرومائية استطاعتها [880 MW] إضافة لسد تشرين وسد البعث، والسد العالي المقام على نهر النيل في مصر باستطاعة مقدارها [1800 MW]، وسد مروى المقام على الشلال الرابع على نهر

النيل في السودان الذي وضع قيد الاستثمار في مطلع عام 2009 م بطاقة إنتاجية بلغت 1250 [MW] والذي وضع تصاميمه مصمم السد العالي.

13 - 2 - الوضع الطاقى في سورية: Energy Situation in Syria

تزايد الطلب على الطاقة في سورية في السنوات الماضية، حيث بلغ [mote] 6 في عام 1980 م، ووصل إلى [mote] 9.5 في عام 1990 م، وحوالي [mote] 13.5 في عام 1997 م، وبلغ المعدل الوسطي لنسبة التزايد (النمو) حوالي 4.7%، في وقت يتزامن فيه مع التناقص في مخزون الطاقة التقليدية، وتشير التوقعات إلى أن الطلب على مصادر الطاقة في سورية سيبلغ حوالي [mote] 22 في عام 2010، تسهم فيه المصادر المائية بنسبة تعادل [mote] 0.75 فقط، وانطلاقاً من محدودية مصادر الطاقة التقليدية في سورية والذي يتوقع تضوئها خلال وقت قريب، فإن السياسات الحكومية تتركز حول البحث عن مصادر جديدة للطاقة ذات كفاءة جيدة منها (التوليد الهيدروكهربائي، الطاقة الشمسية، طاقة الرياح...) لتشجيع مصادر وزارة الكهرباء بأن الطاقات المتجددة ستساهم لغاية (2010) م بنحو 10% من إجمالي الطاقة المستهلكة بما فيها المحطات الكهرومائية الكبيرة والصغيرة والتي تساهم بنحو 5-6% من إجمالي الطلب على الطاقة، حيث أن هذه الطاقة اقتصادية وصديقة للبيئة، وإن إنشاء المحطات الصغيرة والكبيرة يساعد في التوسع بمساحات الأراضي المزروعة وتأمين الطاقة الرخيصة.

وبين الجدول (1-13) الوضع الطاقى في عام 1996 والتوقعات المستقبلية لعام 2010م.

جدول (1-13) توقعات استهلاك الطاقة في سورية

Energy Consumption and forecast (thousand toe)

	1996	2010
Total Energy Consumption * إجمالي الطاقة المستهلكة	12500	22500
1- التوليد الكهربائي Electricity Generation	4700	10000
- بترول	14400	3000
- غاز طبيعي	2360	6000
- هيدروكهربائي	900	1000
2- توزيع استهلاك البترول من التقطير Distillate Oil	4500	6500
- قطاع الزراعة	700	
- قطاع الصناعة	600	
- قطاع النقل	1400	
- قطاع التجارة والسكن	1800	
3- استهلاك البنزين Gasoline Consumption	900	1500
4- استهلاك الغاز المسيل Liquid Gas Consumption	500	700
5- استهلاك الكيروسين Kerosene Consumption	300	450
6- استهلاك الزيوت الثقيلة في الصناعة Heavy Fuel Oil Consumption	800	1000
7- استهلاك الغاز الطبيعي في السماد Natural Gas Consumption in Fertilization Industry	220	900
8- مصادر أخرى للطاقة Other Energy Resources	500	350
9- طاقات متجددة Renewable Energy	-	1100

المصدر: وزارة الكهرباء

كما يشير الجدول (2-13) إلى إسهامات الطاقات المتجددة في التوليد الكهربائي على الصعيد العالمي:

الجدول (2 - 13) التوليد الكهربائي من مصادر الطاقة المتجددة.

Large hydro > 10 MW محطات كبيرة	86%
Small hydro > 10 MW محطات صغيرة	8.3%
Wind and Solar رياح وطاقة شمسية	0.7%
Geothermal طاقة الحرارة الجوفية	1.6%
Biomass الكتلة الحيوية	3.4%

13 - 3 - المميزات الفنية لاستثمار المحطات الكهرومائية:

The Technical Specifications Of Investigating The Hydro - Electric Power Stations :

تمتاز طاقة المياه عن مصادر الطاقة الأخرى (الفحم والبتروول والغاز...) بخواص تكنولوجية واقتصادية تتمتع بها المحطة الكهرومائية بالمقارنة مع المحطة الحرارية أهمها:

- 1- طاقة المياه: متجددة لا تنضب.
- 2- تخفيف الطلب على المحروقات.
- 3- تجنب إصدار الانبعاثات الغازية (يسهم سد مروى في السودان على سبيل المثال في تجنب إصدار 300 مليون طن من CO_2).
- 4- كلفة الكيلو. واط ساعي من الكهرباء المنتجة أقل بنحو (5-8) مرات من المستحصل عليها من المحطات الحرارية (كلفة إنتاج $1[KW]$ تعادل 100\$) وهذا يعني أن استطاعة $1[KW]$ تنتج سنوياً حوالي $2500-4500[KWh]$ وهذا الرقم منخفض مقارنة بالمحطات البخارية وغيرها التي تستعمل الوقود التقليدي.
- 5- يتطلب استثمار المحطة الكهرومائية عناصر أقل من (5-20) مرة من عدد العناصر اللازمة لاستثمار المحطة الحرارية من أجل إنتاج كمية متساوية من الطاقة.
- 6- تتصف المحطات الكهرومائية بالقيادة المرنة حيث يتطلب إقلاع المحطة وعملها بشكل منتظم نحو $(1-1/2)$ دقيقة.
- 7- يبلغ استهلاك الطاقة الكهرومائية للاحتياجات الخاصة في المحطة (0.3-0.5%)، بينما يرتفع هذا الرقم إلى (8-10%) في المحطات الحرارية من الإنتاج الإجمالي للمحطة.
- 8- تمتاز بارتفاع ثابت المردود بالمقارنة مع المحطات الحرارية والتي تبلغ ضياعات الطاقة فيها ما يعادل 1.5 من الطاقة المتولدة في المحطة.
- 9- استثمارها أكثر أماناً من المحطة الحرارية.

- 10- الاستفادة منها في أغراض توليد الكهرباء والري والصرف واستصلاح الأراضي وحركة البواخر. وبناء أحواض الأسماك.
- 11- تبلغ تكاليف المحطة الكهرومائية (المنفعة والمولدة) نسبة لا تتعدى 15% من التكلفة الإجمالية.
- 12- بفضل التكاليف الحديثة انخفض الزمن الذي يستغرقه بناء المحطة من (7-8) سنوات إلى مدة (3-4) سنوات.
- وبين الجدول (3-13) معامل الانبعاثات الغازية في محطات توليد الطاقة المختلفة وفق نوع الوقود المستخدم.

الجدول (3-13) معامل الانبعاثات الغازية في محطات الطاقة

نوع الوقود Fuel type	CO ₂ emission factor (Kg/Gj)	CH ₄ emission factor (Kg/Gj)	N ₂ O emission factor (Kg/Gj)
فحم Coal	94.6	0.0020	0.0030
غاز طبيعي Natural Gas	56.1	0.0030	0.0010
بنترول Oil	77.4	0.0030	0.0020
ديزل Diesel	74.1	0.0020	0.0020
البروبان Propane	63.1	0.0010	0.0010
الكتلة الحيوية (الأخشاب) Biomass (wood)	0	0.0320	0.0040
طاقات متجددة Renewable Energy [محطات مائية كبيرة، محطات مائية صغيرة، طاقة الرياح، طاقة شمسية، طاقة الحرارة الجوفية....]	0	0	0

المصدر: RET Screen Small Hydro Project Model

13 - 4 - المحطات الكهرومائية في سورية: Hydroelectric plants in Syria

تتشكل المصادر المائية في سورية من المياه السطحية التي تتمثل في الأنهار دائمة الجريان سواء المشتركة منها مثل (الفرات، دجلة، العاصي، عفرين، اليرموك، وقويق والكبير الجنوبي) أو الداخلية (الخابور والبلخ والسن). وكذلك الأنهار غير دائمة الجريان التي تنتشر في المنطقة والتي تجري المياه فيها لمدة لا تزيد عن (4) أشهر في السنة مثل (بردى، الأعوج....) إضافة للمياه الجوفية.

ويبين الجدول (4 - 13) بعض السدود المقامة على نهر الفرات ومواقعها في سورية وتركيا والعراق.

الجدول (4 - 13) بعض السدود المقامة على نهر الفرات ومواقعها

العراق	سوريا			تركيا				
	حديثة	المنظمي	الطبعة	تشرين	أتاتورك	قرة قاي	كبيان	
-	26,8	26,8	26,8	26,8	26,2	23,5	19,4	الوارد السنوي مليار م ³
3,56	11,3	0,09	11,6	1,3	49	9,54	30,6	السعة التخزينية مليار م ³
-	650	27	604	-	817	268	675	سطح الخزان كيلوم ²
-	-	75	800	420	2400	1800	1240	القدرة الكهربائية ميجاوات

* ومن الجدير بالاهتمام بأن سد أتاتورك هو أكبر السدود التركية ويعد رابع أكبر سد في العالم من حيث الحجم والسعة التخزينية.

وقد قدرت الموارد المائية التقليدية والعامة في سورية حسب (المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة 1997، والمجلس الأعلى للعلوم 1997, 2000) كما يلي:

- الموارد المائية السطحية 16375 مليون م³.
- الموارد المائية الجوفية 5075 مليون م³.
- المياه العادمة 1278 مليون م³.

تتوزع هذه الموارد في سبعة أحواض مائية رئيسية وتقام عليها مجموعة من المشاريع المائية التي تتوزع بين محطات كهرومائية كبيرة ومحطات كهرومائية صغيرة ومدود تخزين ومحطات مشتركة توليد وتخزين (عكوسة) إضافة لمجموعة من المشاريع المستقبلية.

الجدول (5 - 13) الأحواض المائية في سورية: مواصفاتها والسدود المقامة عليها

الحوض	المساحة (كم ²)	السدود المنقذة	التخزين (م.م)
الساحل	5049	18	543,950
الفرات و حلب	51238	3	1607,000
العاصي	21624	40	750,730
نجلة و الخابور	21129	12	1014,340
يردى و الأعوج	8630	6	8,280
اليرموك	6724	41	205,100
البادية	70786	37	70,025
المجموع	185180	157	18665,425

أولاً - حوض الفرات وحلب: Euphrates Basin

ويقام عليه مجموعة من المحطات الكهرومائية الكبيرة منها:

أ- محطة سد الفرات الكهرومائية (الثورة): Thawra hydro-electric power plant

وهذا أضخم سد في سورية تم بدء العمل فيه عام 1966، وتم تحويل مجرى النهر عام 1973، وتم الانتهاء من العمل فيه عام 1978.

وتشكل المحطة الكهرومائية جزءاً من السد وهي من النوع المندمج مع المفيض، ركب فيه (8) عتبات نموذج كابلان Kaplan Turbine تبلغ استطاعة الواحدة منها [110 MW] واستطاعة المحطة الإجمالية [880 MW]، طول السد (4500) م، وعرضه من القاعدة (512) م، وعند القمة (19) م وارتفاعه (60) م عند المنسوب (308) م فوق سطح البحر، حجم جسم السد [41 million m³] يحجز خلفه بحيرة الأسد، طولها (80) كم وعرضها الوسطي (8) كم وحجمها (14.1) مليار م³، ومساحتها (640) ألف هكتار، وتولد طاقة كهربائية بحدود (2.5) مليار كيلووات ساعي سنوياً.

ب- محطة سد البعث الكهرومائية: Bath hydro-electric power plant

من المشاريع اللاحقة لسد الفرات ويبعد عنه مسافة (27) كم ويقع بين مدينتي الثورة والرفقة، ويقوم بتنظيم الجريان الممر من محطة الثورة الكهرومائية وتقليل تذبذب مستوى الماء في النهر في حال التصاريح العادية، كما يقوم بالاستفادة من المياه المخزنة لتوليد ما يقارب (375) مليون كيلوواط ساعي سنوياً.

طول السد (3069) م، والمنسوب عند القمة (259.2) م، الأعمال الترابية بحدود (6) مليون م³، وتقدر الأعمال الخرسانية بنحو (183.1) ألف م³.

ج- محطة سد تشرين الكهرومائية: Tishreen hydro-electric power plant

يقع هذا السد على بعد (110) كم شمال شرق مدينة حلب على نهر الساجور، أحد روافد نهر الفرات قرب منطقة (يوسف باشا) ويبعد السد مسافة (7) كم تقريباً من الحدود السورية - التركية. يهدف هذا المشروع إلى زيادة الطاقة الكهرومائية بحدود (1,600) مليار وستمئة مليون كيلوواط ساعي سنوياً، وإستطاعة المحطة بحدود [500 MW] والأعمال الترابية (4800) ألف م³، والأعمال البيتونية (630) ألف م³ وهياكل معدنية (8000) طن.

طول السد (690) م وارتفاعه (20) م عند المنسوب الأعلى (476) م فرق سطح البحر وعرضه عند القاعدة يتراوح ما بين (60-140) م، وعرضه عند القمة (4) م طاقته التصريفية الأعظمية (500) م³ بالثانية، وبحيرة السد تخزن خلفها نحو (10) مليون م³ من المياه تكفي لإرواء حوالي (1000) هكتار من الأراضي المجاورة الواقعة خلف السد خلال فترة الصيف. وللسد فرعان سفليان يصرفان ما بين (15-20) م³ بالثانية من المياه بما يوازي حجم ضاغط التخزين في البحيرة، ويتم التحكم بهذه المقرغات يدوياً أو ألياً (كهربيائياً).

ثانياً - حوض العاصي Orontes Basin:

يقام عليه مجموعة من المحطات الكهرومائية الصغيرة منها:

أ - محطة الفجر Al-Fajr Hydropower plant

ب - محطة سد الرستن Al-Rastan Hydropower plant

ج - محطة سد محردة (شيزر) Shaizar Hydropower plant

د - محطة سد 17 نيسان 17th of April Hydropower plant

ثالثاً - حوض الخابور Al-Khaboor Basin:

ونقام عليه مجموعة من السدود التجريبية والمحطات الصغيرة لتوليد الطاقة الكهربائية منها:

أ - محطة سد السابع من نيسان 7th of April dam

ب- محطة سد الثامن من آذار 8th of March dam

ج- محطة سد الخابور الكبير Al-Khaboor dam

رابعاً - حوض البادية السورية Syrian Desert Basin:

وأقيم فيه سد وادي أبيض لتخزين المياه وتأمين مياه الشرب.

خامساً - الحوض الساحلي Coastal Basin:

ويعد من الأحواض الواعدة في القطر وتبين الدراسات التي تم القيام بها ما بين الحدود التركية والحدود اللبنانية والتي تعادل (5000) كم² بأن كمية المياه الضائعة سنوياً والتي تصب في البحر تقدر بـ (2) بليون متر مكعب ، وتشير هذه الدراسات إلى إمكانية تركيب (32) محطة توليد صغيرة بطاقة إجمالية تقدر بحوالي [330 MW] تولد سنوياً [590 million KWh] مع إمكانية تخزين تعادل [1.486 billion m³] ، كما تشير التوقعات المستقبلية إلى إمكانية تركيب محطتي ضخ عكوسة (قلوية) تقوم باستخلاص المياه من منطقة باتياس وخوض العاصي مع إمكانية توليد [560 MW] عن طريق الضخ والاسترجاع من المناطق المرتفعة.

ومن السدود التخزينية المنفذة في الحوض الساحلي:

أ - سد (16) تشرين 16th Tishreen dam

ب- سد الثورة على نهر الصنوبر Al-Thawra dam

سادساً - حوض بردى والأعوج Barada and Al-A'waj basin:

تم استثمار حوض بردى من خلال إقامة (3) محطات كهرومائية صغيرة على مجرى النهر منها:

أ- محطة التوليد الكهرومائية في التكية Al-Tikeyyeh Hydroelectric power plant

ب- محطة التوليد الكهرومائية في الهامة Al-Hameh Hydroelectric power plant

ج- محطة التوليد الكهرومائية في سوق وادي بردى Souk Wadi Barada Hydroelectric power plant

ويضم حوض الأعوج: نهر الأعوج الذي ينبع من سهول (مغر المير - بيت جن) إضافة لنهر بيت جن والطماشية ونل السيوف.

ومن المشاريع المستقبلية للاستفادة من حوض الأعوج إقامة مشروع (سد بحيران) في جبل الشيخ للاستفادة من مياه نهر بحيران ومياه الأمطار والثلوج، ويقع هذا السد في الوادي الواقع ما بين قرى (عين الشعرة، بقعسم، عرنة، الريمة، بيتما) ويهدف الدراسة لإنشاء سد تخزيني ومجموعات توليد كهرومائية، حيث يتوقع أن يصل التوليد السنوي لحوالي 18 million [KWh]، إضافة لاستخدامه لأغراض الري ومياه الشرب.

سابعاً - حوض اليرموك Al-Yarmook Basin:

وأقيم عليه مجموعة من السدود التخزينية منها:

أ - سد كودنه.

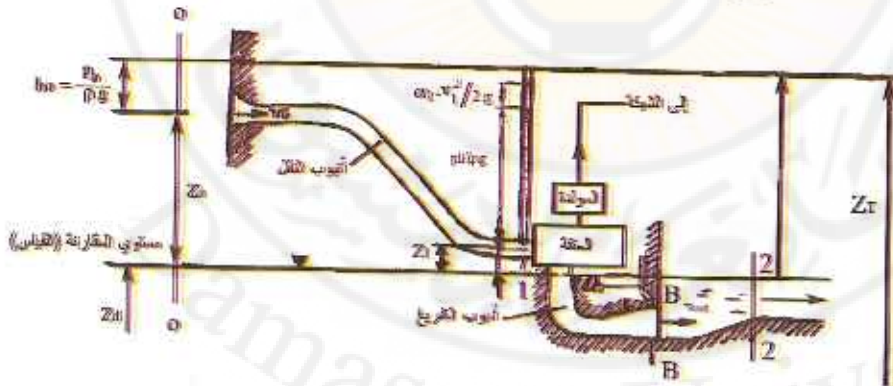
ب - سد سحم الجولان.

ج - سد درعا الشرقي.

إضافة إلى سد الوحدة بالاستفادة من مياه نهر اليرموك المتدفقة في نهر الأردن والذي يقع على الحدود السورية الأردنية المشتركة، منبع النهر يقع في الأراضي السورية وطوله (17) كم، والمعدل السنوي للمياه العابرة حوالي 220[million m³] مع إمكانية توليد استطاعة إجمالية تعادل 20[MW]، والمعدل السنوي للطاقة المنتجة تصل إلى 120[million KWh].

كما يضم هذا الحوض عشرات السدود التخزينية المقامة في جبل العرب ومحافظة درعا ومحافظة القنيطرة.

13 - 5 - الأسس والمبادئ الفيزيائية: Physical Principles



الشكل (13-1) مخطط عمل المحطة الكهرومائية.

13- 5- 1 مبدأ عمل المحطة الكهرومائية: Hydroelectric plants Principle

ينتقل الماء من المستوى العلوي للسد إلى المستوى السفلي بواسطة أنابيب النقل مروراً بالعنفة ويعطي الماء قدرته الهيدروليكية الكامنة بعد تحريرها وتحولها إلى قدرة ميكانيكية تقوم بتدوير محور العنفة المتصل بقلب المولدة، وتحول المولدة هذه القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية تنتقل إلى المستهلك بواسطة شبكات نقل القدرة.

يبين الشكل (1- 13) المخطط المبذني لعمل العنفة في محطة الطاقة الهيدروليكية. حيث يتدفق الماء من المنسوب العلوي عبر قناة النقل ليصل إلى العنفة (المقطع 1-1) ماراً عبرها وخارجاً من أنبوب تفريغ العنفة (المقطع B-B) إلى المستوى السفلي. يسمى الفرق بين المنسوبين (العلوي والسفلي) الضاغط الستاتيكي للمحطة H_{st} :

$$H_{st} = Z_c - Z_d \quad (13-1)$$

13- 5- 2 ضاغط العنفة Turbine Head

يمثل الفرق بين قيمة الطاقة النوعية عند مدخل العنفة e_{int} وقيمتها عند مخرج العنفة e_{exit} :

$$H = e_{int} - e_{exit} \quad (13-2)$$

حسب العلاقة:

$$e_{int} = \frac{p_i}{\rho g} + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \quad (13-3)$$

حيث: v_1 السرعة الوسطية في المقطع (1-1).

ولإيجاد $\frac{p_1}{\rho g}$ نطبق معادلة برنولي بين المستويين (0-0) و (1-1) معتبرين مستوى الماء في

الخزان السفلي مبدأ القياس:

$$\frac{p_0}{\rho g} + Z_0 + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_{loss} \quad (13-4)$$

$$h_0 = \frac{p_0}{\rho g} \quad \text{حيث:}$$

h_{loss} : الضياعات الهيدروليكية في قناة الجريان (الطولية والمكانية).

بفرض أن: $H_{st} = h_0 + Z_0$ يتحدد ارتفاع الضغط البيزومتري من المعادلة:

$$\frac{p_1}{\rho g} = H_{st} - Z_1 + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - h_{loss} \quad (13-5)$$

إذا اعتبرنا أن مقطع الخروج من العنفة هو (2-2)، عندها تكون طاقة الخروج نسبة لمستوي الماء السفلي $e_{exit} = e_2 - \frac{\alpha_{d1} \cdot v_{d1}^2}{2g}$ حسب المعادلة (13-2) يكون ضاغط العنفة:

$$H = H_{st} - h_{loss} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} - \frac{\alpha_{d1} v_{d1}^2}{2g} \quad (13-6)$$

وهو الضاغط الصافي للعنفة، أما الضاغط القائم فيمثل فرق الطاقة النوعية بين المستويين العلوي والسفلي $H' = e_0 - e_2$ وطالما أن الفرق في ضواغط السرعة صغير فإنه يمكن إهماله وبالتالي تصبح علاقة ضاغط العنفة:

$$H = H_{st} - h_{loss} \quad (13-7)$$

نستخدم هذه العلاقة بشكل واسع في الحسابات مع التأكيد أن h_{loss} هي الضياعات الهيدروليكية الكلية من المستوى العلوي حتى المستوى السفلي مروراً بالعنفة.

3-5-13 - استطاعة العنفة Turbine Capacity

حسب المعادلة (13-2) فإن الضاغط يمثل مقدار تناقص الطاقة النوعية للماء عند مروره خلال العنفة، بما أن التدفق الخارج من العنفة $Q [m^3/s]$ والتدفق الوزني $\rho g Q$ عندها الطاقة المهدورة للسائل أثناء مروره عبر العنفة خلال ثانية واحدة $1[s]$ أو بتعبير آخر: الاستطاعة الممنوحة للعنفة عند مرور السائل تساوي:

$$N_1 = \rho g Q H \quad (13-8)$$

غير أن هذه الاستطاعة لا تنتقل كاملة إلى محور الدوران أي لا يستفاد منها كاملة ويعبر عن ضياعات الاستطاعة هذه بما يسمى مردود العنفة:

$$\eta = N/N_1 \quad (13-9)$$

حيث N : الاستطاعة المفيدة عند محور الدوران.

N_1 : الاستطاعة الممنوحة للعنفة.

استناداً لـ (13-8) و (13-9) تكون الاستطاعة المفيدة للعنفة:

$$N = \rho g Q H \eta \quad [W] \quad (13-10)$$

غالباً تعمل العنفة على الماء النظيف ذو الكثافة $\rho = 1000 \cdot [kg/m^3]$ كما أن

$g = 9,81 \cdot [m/s^2]$ وبالتحويل إلى $[KW]$ ينتج:

$$N = 9,81 Q H \eta \quad [KW] \quad (13-11)$$

حيث: $Q [m^3/s]$ و $H [m]$ ، تستخدم هذه الصيغة بشكل واسع عند تصميم المحطات الهيدروليكية وحساب العنفة.

يصل مريدود العنفة إلى قيم عالية بحدود $(0,95 \div 0,94)$ ومن أجل شروط الحمولة الأعظمية يكون بحدود $(0,93 \div 0,88)$.

13 - 6 - الوصف التقني: Technical description

يعد توصيف مكونات المحطة من المتطلبات الفنية لتوليد الطاقة عبر مرور التيار المسائل في محطة طاقة كهرومائية مركبة على مجرى نهر صغير.

ومتطلبات هذا التمثيل التخطيطي: المنسوب العلوي للمياه (Head Water) والسد (Dam)، وأنبوب النقل وصولاً للتوربين، وكذلك من مخرج التوربين وحتى مسرب الماء السفلي وغرفة الطاقة التي تحتوي العناصر الميكانيكية والكهربائية، إن العناصر الرئيسية في توليد الطاقة تتضمن التوربين الذي يقوم بتحويل طاقة المياه إلى طاقة ميكانيكية وكذلك المولدة (Generator) التي تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية وبالتالي يمكن ربطها مع الشبكة للاستخدام، وفي حال الاختلاف ما بين سرعة التوربين وسرعة العنفة أو في حال عدم وجودها على محور واحد، يمكن إدخال مجموعة نقل حركة عبارة عن حزام ناقل في المجموعات الصغيرة.

13 - 7 - نماذج البناء والتصنيف: Categorization and Construction types

يمكن تصنيف محطات توليد الطاقة الكهرومائية وفق ثلاث مجموعات (ذات ارتفاعات منخفضة - ذات ارتفاعات متوسطة - ذات ارتفاعات عالية) إضافة لمحطات التوليد المقامة على الأنهار الصغيرة ومحطات الطاقة مع وجود خزانات مائية (المحطات القلوبة - العكوسة).

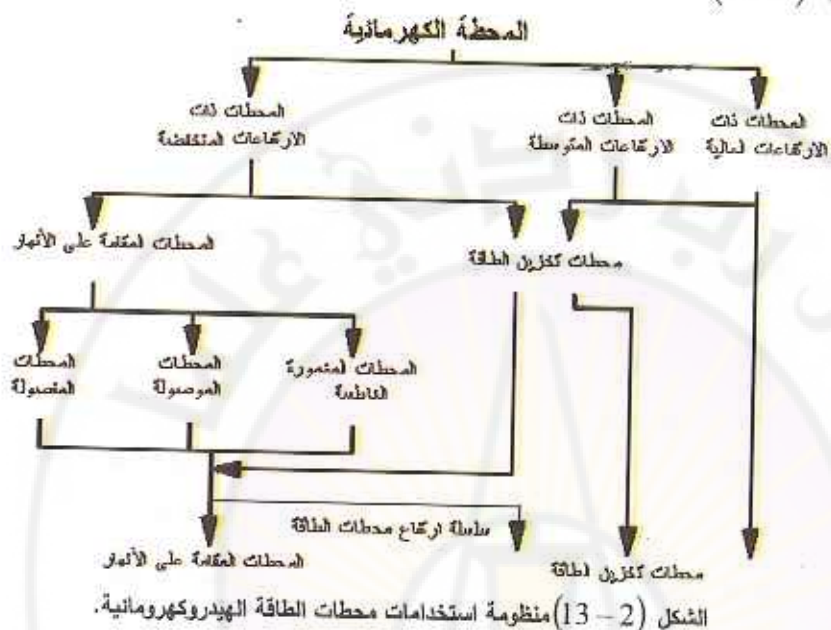
إن الاختلاف بين الأنماط المختلفة ليس واضحاً تماماً من الناحية العملية حيث أن هناك أنواعاً تكون مزيجاً بين أكثر من نوع إضافة إلى أن النماذج الصغيرة تستخدم بشكل متكرر دون تحديدها بنوع وبشكل محدد.

في ألمانيا على سبيل المثال، يستعمل في الغالب (IMW) في محطات الطاقة الكهرومائية الكبيرة والصغيرة، وفي روسيا تستخدم محطات طاقة أقل من (10 MW)، وفي سويسرا أقل من (300 KW) تصنف على أنها محطات طاقة صغيرة.

تستخدم المحطات الصغيرة من أجل الأنهار الصغيرة والخزانات المائية (العكوسة) حيث تقدم طاقة كهربائية منخفضة.

محطات الطاقة الصغيرة تشدد على إنتاج الطاقة الميكانيكية والطاقة الكهربائية، والمثال على ذلك الطواحين المائية المتعددة الدواليب، والمحطات تحتوي أكثر من توربين وتركيب على مجرى

الأنهار، إضافة لمحطات صغيرة جداً تستعمل عادة في قيادة الآلات الميكانيكية إضافة لمحطات الطاقة الصغيرة التقليدية، وهي لا تختلف كثيراً عن المحطات الكبيرة، وتسمى بالمحطات الهجينة (Auxiliary Plants)، وأمثلة على تلك المحطات المستخدمة في التزويد بالمياه يعبر عنها الشكل (2-13)



تتراوح سعة المحطات الكهربائية المولدة من طاقة المياه من عدة مئات من (الكيلو وات) إلى أكثر من (10000) ميغاوات ويمكن تصنيف المحطات لعدة معايير منها:

- معيار ارتفاع الماء المؤثر.
 - معيار السعة (الطاقة الكهربائية المنتجة).
 - معيار أنواع التوربينات المستخدمة.
 - معيار موقع السد والخزان ونوعهما.
- وهذه التصنيفات ليست منفصلة عن بعضها بعضاً، والارتفاع والطاقة الكهربائية المنتجة هما اللذان يحددان نوع المحطة وخطوات تركيبها.

ويمكن تصنيف المواقع ومنشآت التركيب إلى ارتفاع (منخفض - متوسط - عالي)، حيث يقوم السد أو الخزان الواطئ بتوفير ارتفاع الماء المطلوب واحتواء مكونات المحطة مع وجود فتحات لمرور السفن أو الأسماك المهاجرة، وهذا النوع من محطات توليد الطاقة لا يحتوي على طاقة خزن ويعتمد على تيار النهر، ويمكن أن يتعرض لمشاكل استمرارية توفير الطاقة عند اختلاف

مواسم السنة أو تغير الظروف الجوية، وتستخدم حالياً أنواع من العنفات في المواقع المنخفضة الارتفاع، إن الكمية الكبيرة المارة خلال الموقع المنخفض تعني أن كل المعدات والأعمال المدنية المتعلقة بها ستكون كبيرة جداً وبالتالي ستكون الكلفة عالية.

أما محطات الارتفاع المتوسط والارتفاع المنخفض فهما محطتان ضخمتان جداً ومنصوبتان في منطقة ضيقة في مجرى نهر في واد، وخزان الماء الكبير يكون خلف السد وهو مصمم لتزويد خزان كافٍ لتزويد المحطة بالمياه في الظروف الجافة جداً إذ يمكن لخزان صغير أن يقوم بتشغيل محطة توليد منصوبة بعد المد بصورة مستمرة، إن كمية الماء الجارية في محطة ذات ارتفاع عالٍ تكون أقل من كميته في محطة قليلة الارتفاع تولد نفس الطاقة الكهربائية. ولهذا فإن العنفة والمولد وهيكليهما تكون أقل حجماً، ولكن الممار الطويل للماء يزيد من التكلفة، كما أن الهيكل يجب أن يقاوم الضغط العالي المسلط من الماء والذي يعادل (100) ضغط جوي عند ارتفاع (1000) متر.

حتى الآن لم يتم تقدير السعة الكهربائية التي يمكن أن تنتجها المحطات الصغيرة في العالم على الرغم من وجود دراسات كثيرة حول هذا الموضوع، ولكن يمكن القول إن المحطات الصغيرة يمكن أن تنتج طاقة تتراوح بين (10-20%) من سعة المحطات الكبيرة. والإنتاجية الحالية تقدر بـ (25GW) وتنتوزع المحطات الصغيرة بين أكثر من (70) بلداً في العالم حيث تبلغ النسبة (1%)، بينما في الصين لوحدها (50%).

وبين الجدول (6-13) التصنيف العالمي للمحطات الكهرومائية.

الجدول (6-13) تصنيف المحطات الكهرومائية Classification of hydropower

1	محطات كبيرة	Large-hydro	> 100 [MW]
2	محطات متوسطة	Medium-hydro	15-100 [MW]
3	محطات صغيرة	Small-hydro	1-15 [MW]
4	محطات صغيرة جداً	Mini-hydro	Abov 100 [KW]
5	محطات Micro	Micro-hydro	5-100 [KW]
6	محطات Pico	Pico-hydro	300-5 [KW]

13 - 7 - 1 - عنفات ذات رد فعل: Reaction Turbine

تقوم بتحويل الطاقة الكامنة في الماء إلى طاقة ضغط تنتقل إلى ريش العنفة مما يؤدي إلى تدويرها وتقع ضمن هذه المجموعة (عنفة فرنسيس Francis - عنفة كابلان Kaplan وعنفات سترافلو Straflo-turbie والعنفة الأنبوبية Tubular أو عنفة الترس المخروطي -Bevel gear) حالياً الطاقة الأعظمية المتولدة من الطاقة بواسطة عنفة كابلان هي (500 MW per unit)، ومن أجل عنفة فرنسيس (1000 MW Per unit).

13 - 7 - 2 - عنفات ذات فعل - دفعية: Impulse turbine أو Action turbine

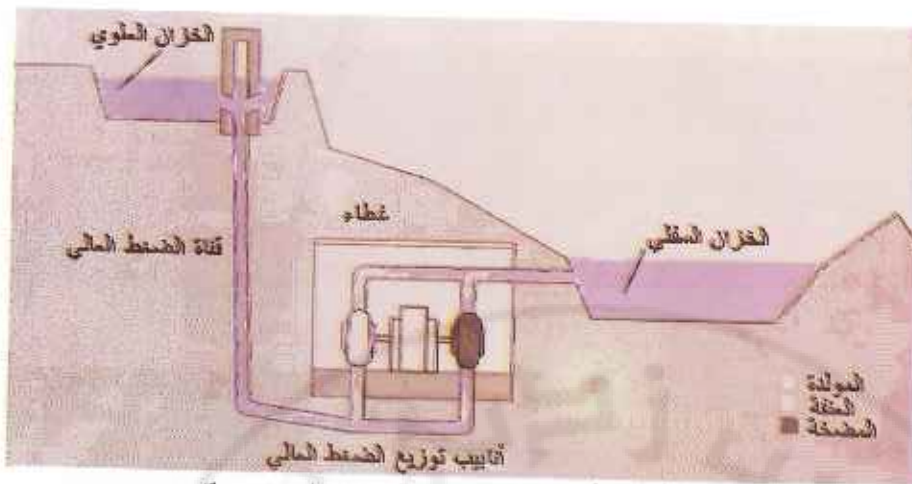
وفي هذا النوع يتم تحويل الطاقة الكامنة وطاقة الضغط إلى طاقة حركية (سرعة) بالكامل تحول لاحقاً إلى الدوالب الذي يقوم بتحويلها إلى طاقة ميكانيكية ويكون للضغط قبل الدوالب وبعده نفس القيمة . لأن الضغط الجوي هو المماند، وتشمل هذه المجموعة عنفة بلتون Pelton turbine وعنفة الجريان العكسي Cross-flow turbine وعنفة الانفتاح (عنفة Turgo) والطاقة الأعظمية المتولدة من عنفة بلتون حالياً بحدود (500 MW Per Unit).

13 - 7 - 3 - المحطات الثانوية (المساعدة): Auxiliary Plants

تستخدم بغرض الإمداد بمياه الشرب واستخدامها في تزايد مستمر حيث تقوم بضخ المياه إلى أعالي الجبال عند وجود فائض بالمياه وحاجة للطاقة، بحيث يستفاد من هذه المياه كطاقة كهربائية عند الحاجة لها، وتدعى هذه الأنواع بالمحطات القلوية أو محطات الضخ المعاكس. كما هو مبين بالشكلين (3-13) (4-13) .



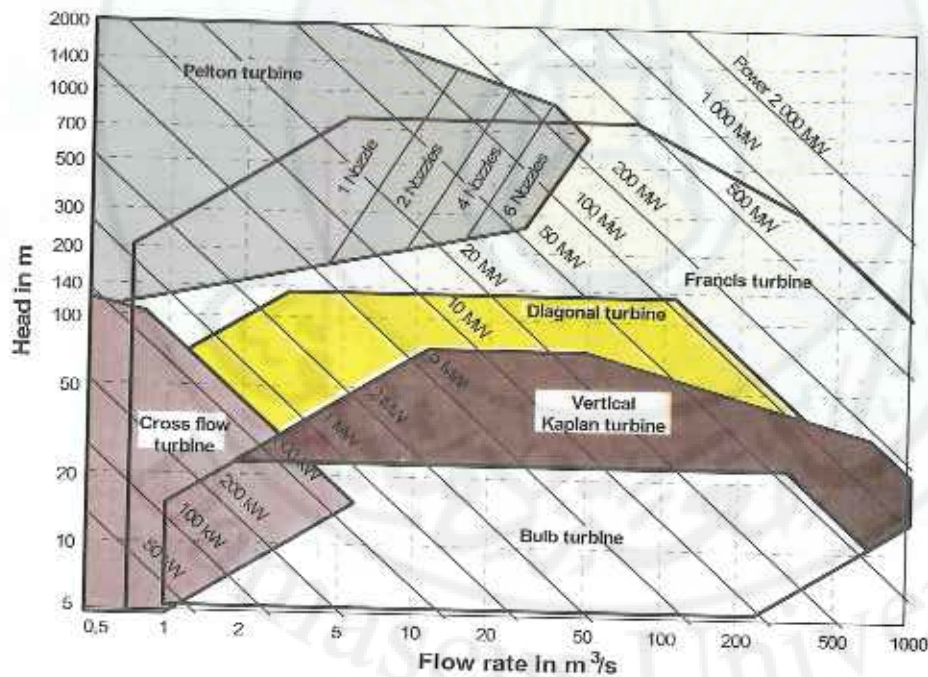
الشكل (3-13) نموذج لمحطة قلاوية.



الشكل (4-13) محطات الضخ والتخزين (القلوية - العكوسة).

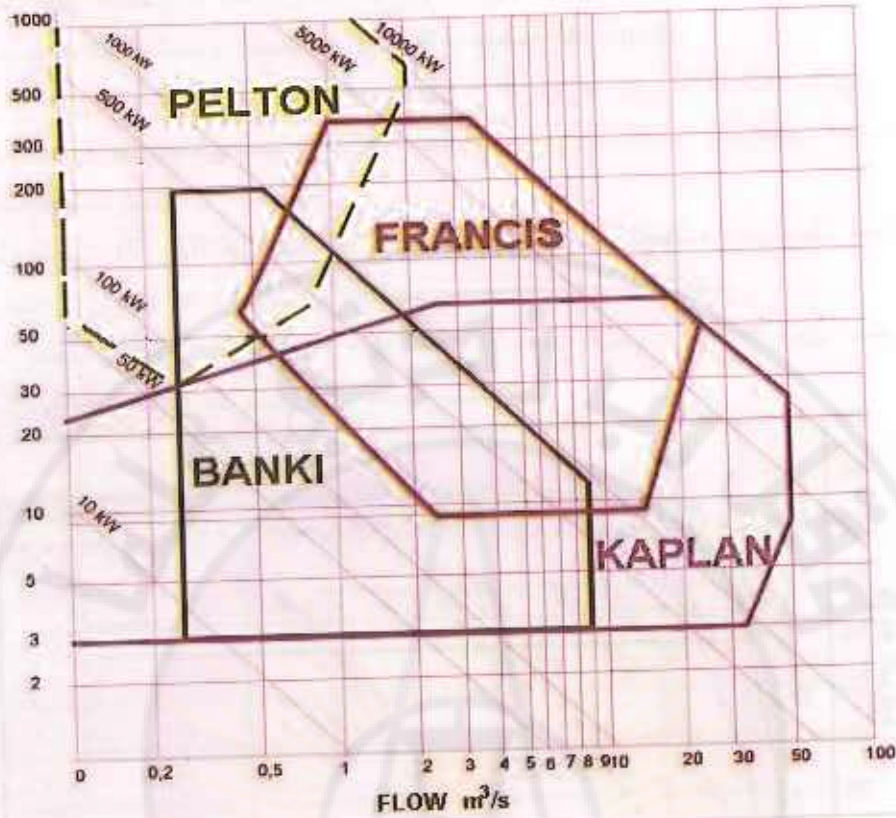
13-8 - طرق اختيار العنفات : How To Select Turbine

والشكل (5-13) يبين الأنواع المختلفة للعنفات وطرق اختيارها بدلالة معدل الغزارة Flow rate والضاغط Head وتصنف هذه المجموعات بحسب الارتفاعات وفق ما يلي:



الشكل (5-13) الأنواع المختلفة للعنفات وطرق اختيارها

NET HEAD (m)



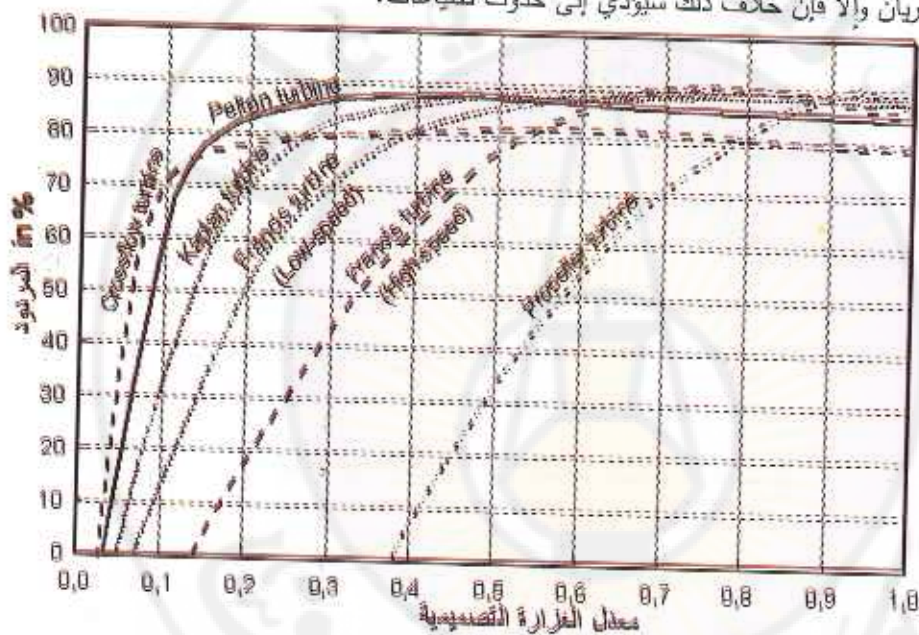
الشكل (6 - 13) أنواع العنفات المستخدمة في المحطات الصغيرة وطرق اختيارها.

الجدول (7 - 13) ترتيب العنفات وفق قيم الضاغط.

نوع العنفة	الضاغط [m]
عنفة بلتون Pelton Turbines	(600-2000m)
عنفة Cross-Flow	(1-200m)
عنفة فرنسيس Francis	(30-700m)
عنفة كابلان Kaplan ذات المحور الشاقولي	(10-60m)
عنفة كابلان Kaplan ذات المحور الأفقي	(2-20m)

من أجل الاستطاعات الصغيرة، تستعمل عنفة بلتون عند (50m) وعنفة فرانسيس عند (6m) وفي محطات الطاقة الصغيرة القديمة يكون الارتفاع منخفضاً بحدود (2m).
اعتماداً على نوع التوربين وحجمه (أبعاده) يتراوح المردود ما بين (93-85%) والذي يتم الحصول عليه عند تصميم محدد للتصريف والضاغط وعلى هذا الأساس يتم اختيار العنفات المناسبة للمنشأة المائية.

ويمثل الشكل (7-13) القيم المختلفة لكفاءة الأنواع الرئيسية من العنفات، وعلى سبيل المثال فإن عنفة بلتون تملك كفاءة جيدة عندما تعمل عند نسبة (20%) من التصريف. بينما العنفات الدفعية Propeller Turbines يجب ألا تشغل أقل من (70-80%) من تصميم الجريان وإلا فإن خلاف ذلك سيؤدي إلى حدوث ضياعات.



الشكل (7-13) منحني الكفاءة لأنواع مختلفة من العنفات.

13 - 9 - مكونات المحطة الكهرومائية :

The Component Of The Hydro - Electric Power Stations :

تتغير محطة الطاقة الهيدروكهربية بحسب أبعادها وتتكون في العادة من: السد Dam وبحيرة السد Reservoir والنوابات وحاجز ومصفاة Screen وصمام توقف سريع الفعل وقناة الدخول Intak وستبت الأنابيب Pipe hanger وأنبوب النقل Penstock والحلزون Spiral Casing والموجه Guide والموزع Wicket gates وحجرة العنفة Turbine room ودولاب العنفة

Turbine وأنبوب التصريف و(المسرب السفلي) Draft tube إضافة للمولدة والمحولة ولوحات القيادة والتحكم ومجموعات النقل الميكانيكية وخطوط الربط مع الشبكة الكهربائية.

13 - 9 - 1 - السد: Weir or Barry, Dam

السد حاجز اصطناعي يقام لحجز الماء في المجاري المائية، وبشكل عام يسمى بحيرة اصطناعية تتجمع فيها مياه الأنهار والفيضانات والسيول. ولهذه السدود وظيفتان أساسيتان هما: تأمين ارتفاع سقوط مناسب للعنفه (ضياغط) وحجز مياه التخزين.

وتصنف السدود بحسب الدور الوظيفي إلى سدود تخزينية وسدود رفع منسوب الماء. أما من حيث شكل التصميم فتصنف إلى: سدود ثقيلة وسدود قوسية وسدود مدعمة.

وتصنف السدود بحسب المواد المستعملة في الإنشاء إلى: سدود ترابية - سدود ترابية ركامية - سدود ركامية - سدود حجرية مع المونة - سدود بيتونية - سدود بيتونية مسلحة - سدود خشبية - سدود فولاذية.

وهناك مجموعة من القوى المؤثرة في السد يجب أخذها بالاعتبار عند الدراسة ومنها: الوزن الذاتي للسد وقوى الضغوط المائية (الضغط المائي الهيدروستاتيكي والضغط المائي الديناميكي) إضافة لقوى الضغط الناتجة عن الأمواج وقوى الزلازل وقوى الضغوط الناتجة عن المواد المحمولة والمترسبة أمام السد، وقوى الضغط الناتجة عن وجود الجليد أمام السد، وكذلك ضغط الماء أسفل قاعدة السد ويسمى بضغط الرفع.

ويبين الجدول (13-8) موصفات بعض السدود المقامة في العالم.

الجدول (13-8)

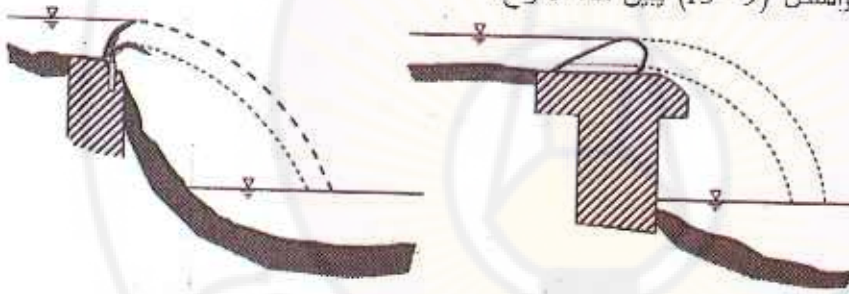
اسم السد	البلد	ارتفاع السد (متر)	سعة التخزين بليون متر مكعب
كلن كانيون (Glen Canyon)	أمريكا	220	33
هوفر (Hoover) -	أمريكا	220	38
كاريبا (Kariba)	زامبيا وزمبابوي	130	160
اوروفيل (Oroville)	أمريكا	240	4
واراكامبا (Warragamba)	أستراليا	140	2

كما يبين الشكل (13-8) سد هوفر المقام في ولاية أريزونا في الولايات المتحدة الأمريكية والذي يشكل بذية عملاقة ترتفع (221) متر فوق الصخور السوداء لنهر كولورادو.



الشكل (8 - 13) سد هوفر.

كما يمكن الاستفادة من الهدارات (Weir) والحواجز (barrage) ومساقط الأنهار في توليد الطاقة والشكل (9 - 13) يبين هذه الأنواع.



الشكل (9 - 13) نماذج من الهدارات والشلالات المستخدمة في التوليد.

13 - 9 - 2 - بحيرة السد - الخزان: Reservoir

تشكل المياه المحتجزة خلف السدود بحيرة اصطناعية يستفاد منها في تخزين المياه ومنع الفيضانات بالإضافة إلى عمليات الري وتنمية الثروة السمكية وتلطيف مناخ المنطقة والنقل النهري وتنشيط عمليات السياحة وتصحيح المجاري النهرية. وبشكل سد الفرات على سبيل المثال بحيرة اصطناعية طولها (80) كيلومتراً ويبلغ متوسط عرضها (8) كيلومتر ومساحتها (630) كيلومتر مربع وسعتها حوالي (11.9) مليار متر مكعب. وفي المناطق الجبلية في أوروبا (جبال الألب الأوربية) يعتمد على تخزين المياه والاستفادة منها في عمليات الضخ والتوليد.

13 - 9 - 3 - بوابات السد: The intake of dam

وتقع في مقدمة السد وتربط بين ارتفاع التخزين headwater والعنفة Turbine من خلال أنابيب النقل Penstock وتصمم البوابات بحيث تفتح كلياً أو جزئياً بشكل يسمح بتحقيق الضغوط المطلوب للتوليد وتكون هذه البوابات قابلة للحريك مع نظام تحكم يرتبط مع أنابيب الدخول Intake ويقوم بتنظيم الضغط.

13 - 9 - 4 - بوابات الدخول: Intake

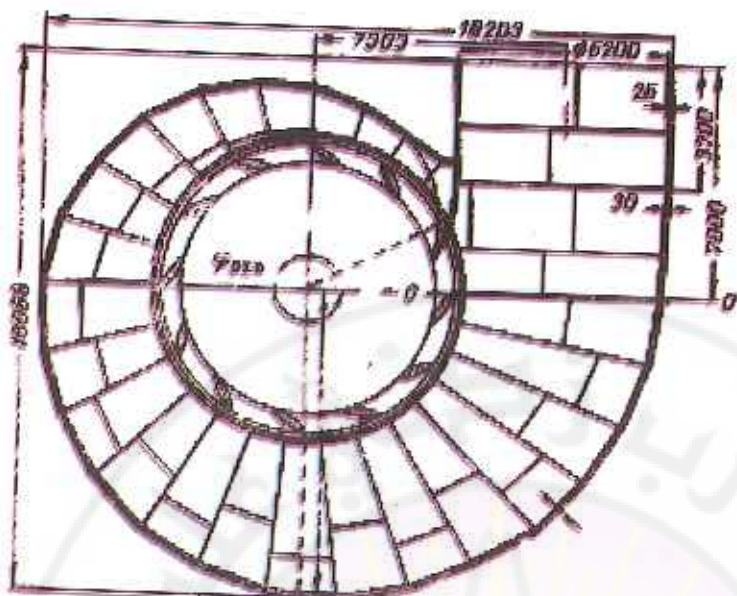
وظيفةها الربط بين ارتفاع الماء المتجمع خلف السد والبوابة وقناة ضبط الجريان Penstock من جهة وبين العنفة من جهة أخرى.

13 - 9 - 5 - أنابيب النقل (قناة ضبط الجريان): Penstock

هي عبارة عن صلة الوصل بين بوابات السد والحزون ويتم عبرها تحويل القدرة الكامنة في المياه بعد تحريرها إلى قدرة حركية تقوم بتدوير دولاب العنفة وكذلك محور دوران المولدة بهدف إنتاج الطاقة الكهربائية وربطها مع الشبكة. إن طول أنبوب النقل Penstock يتعلق بنوع المحطة وأبعادها، حيث يكون قطر الدوالب مختلفاً مما يؤدي إلى تغير التكلفة.

13 - 9 - 6 - الحزون: Spiral casing

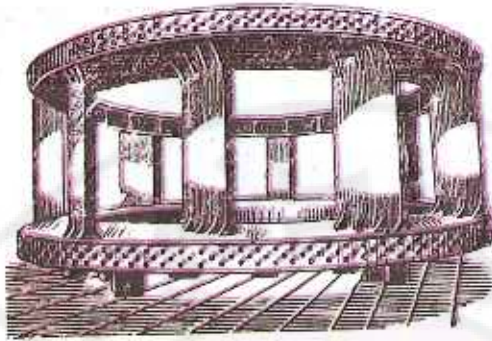
يعد الحزون همزة الوصل بين الأنابيب الناقلة ودولاب العنفة حيث يسمح بتمرير الماء الواصل باتجاه الموجه ثم الموزع، فالدولاب العامل. ولا بد للحزون أن يحقق تغذية منتظمة للموجه والموزع على مدى مقطعه العرضي ويتطلب أن تكون الضباعات فيه أصغرية وأن تكون قياساته اقتصادية، ويتعلق تصميم الحزون بقيمة الارتفاع، وبشكل الأنابيب الناقلة، واختيار شكل الحزون وقياساته أهمية بالغة عند تصميم جسم السدود ويتم ذلك على أساس الدراسات الهيدروليكية. ويبين الشكل (10-13) حزوناً مصنعاً من الصفائح كما يبين الشكل (11-13) صورة الحزون والموجه عند التركيب في أحد السدود.



الشكل (10-13) نموذج حلزون (مصنع من الصفائح).

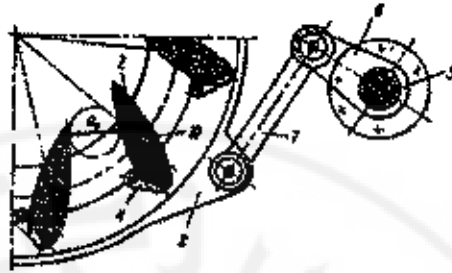
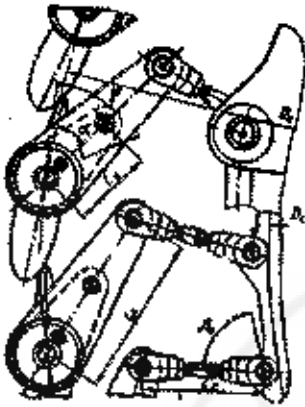


الشكل (11-13) صورة الحلزون والموجه



الشكل (12 - 13) موج مصنع بطريقة الصب.

وتكمن وظيفته في حمل ثقل الأجزاء الثابتة والمتحركة المكونة لمجمع القدرة في المحطة الكهرومائية (العنفه والمحور - المولدة - المضاجع وكافة الأثقال المتعلقة بذلك) وإعطاء هذه الحمولة لجسم المنشأة المصنوعة من الإسمنت. ويقوم كذلك بحمل القوى المحورية الهيدروليكية للماء عند التأثير على أجنحة دولاب العنفه، وبما أن أعمدة الموجه مصنوعة على شكل أجنحة فهي تقوم مبدئياً بتوجيه الجريان وفق زاوية معينة قبل مروره في الموزع. يصنع الموجه عادة من أعمدة على شكل أجنحة منفردة تلحم فيما بعد مع إطار علوي وآخر سفلي أو تصنع كقطعة واحدة بطريقة الصب.



الشكل (13-13) طريقة عمل الموزع.

ويقوم بالمهام التالية: تغيير قيمة سرعة الجريان واتجاهها في المجال بين أجنحة الموزع ودولاب العنفة كما يقوم بتغيير الاستطاعة المطلوبة من العنفة عن طريق التحكم بغزارة التدفق، وكذلك قيامه بإيقاف الجريان.

9 - 9 - 13 حجرة دولاب العنفة: Turbine room

يدور دولاب العنفة في مجرى دائري المقطع يسمى بحجرة دولاب العنفة، وتصاميم هذه الحجرة متنوعة ويمكن أن تكون مفتوحة أو مغلقة.

13 - 9 - 10 دولاب العنفة: Turbine

يندفع الماء بعد الموزع ليرتطم بأجنحة دولاب العنفة الذي يدور ضمن حجراته وتثبت العنفة من خلال مضجعين رئيسين علوي وسفلي توفر للدولاب استناداً وثباتاً مطلقاً. ويسببين فيما يلي المواصفات الفنية وآلية عمل الأنواع المختلفة من العنفات ذات الفعل والعنفات ذات رد الفعل والمستخدمة في المحطات الكبيرة والمحطات الصغيرة ومحطات المد والجزر.

أولاً: المواصفات الفنية للعنفات ذات رد الفعل: Reaction Turbine

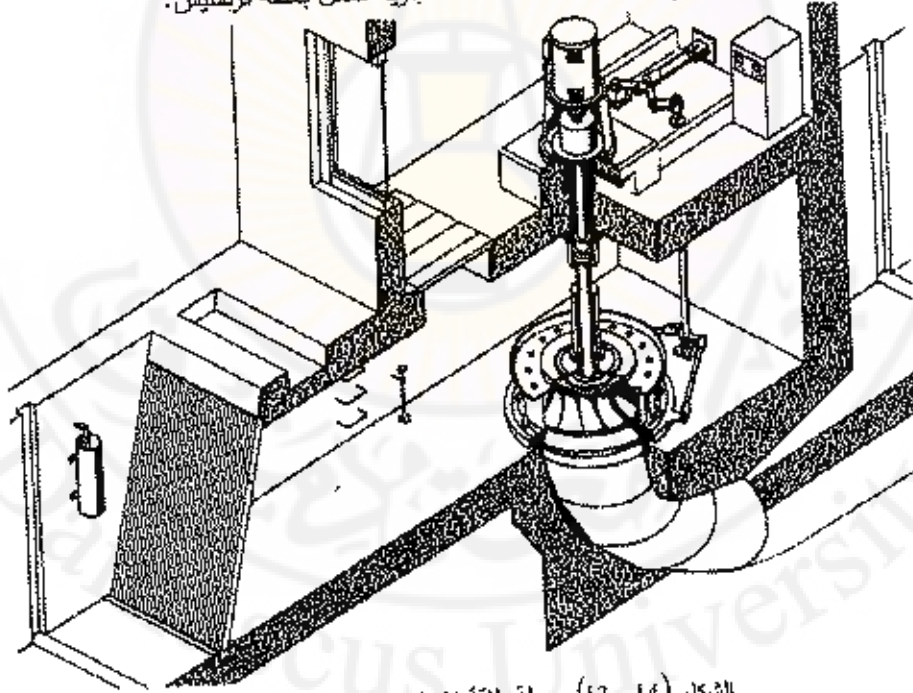
1- عنفة فرانسيس Francis Turbine :

تستعمل عندما تكون قيمتا الضاغط والغزارة متوسطتين، وتركب بوضعية عمودية إذا كانت استطاعتهما كبيرة، وبوضعية أفقية في حالة الاستطاعات المتوسطة والصغيرة.

ويتألف دولاب العنفة من قرصين دائريين يتصلان ببعضهما مع بعض بواسطة مجموعة من الصفائح المنحنية تسمى ريش دولاب العنفة، وعند مرور الماء في الأفنية المحصورة بين هذه الريش فإنه يتعرض لتغير في سرعته (شدة ومنحنى) وبالتالي تتعرض هذه الريش إلى قوة رد فعل تؤثر فيها مولدة قوة تقوم بتدوير العنفة وبالتالي المولد الكهربائي الموصول معه.

وهناك نوعان رئيسيان من عنفات فرنسيس هما: النوع ذو المسيل المغلق Closed type وفي هذا النوع ينتقل الماء إلى العنفة خلال أنبوب التشغيل حيث تكون نهايته مربوطة بالغلاف الحلزوني للعنفة وهذا الغلاف يوجه الماء إلى ريش التوجيه بالتساوي، ويمكن لهذا النوع أن يكون أفقياً حيث يستخدم عند الارتفاعات المتوسطة والعالية أو عمودياً ويستخدم للارتفاعات المتوسطة والمنخفضة والنوع الآخر يسمى ذو المسيل المكشوف Open flum type حيث توجد فيه غرفة بيتونية بدلاً من الغلاف الحلزوني وهذا النوع يستخدم لارتفاعات منخفضة، أما المركبات الأساسية لعنفة فرنسيس فهي: أنبوب التشغيل Penstok والغلاف الحلزوني Spiral Casing وآلية التوجيه Guid mechanism والمروحة والمحور الرئيسي للعنفة، وأنبوب التصريف - السحب Draft tube.

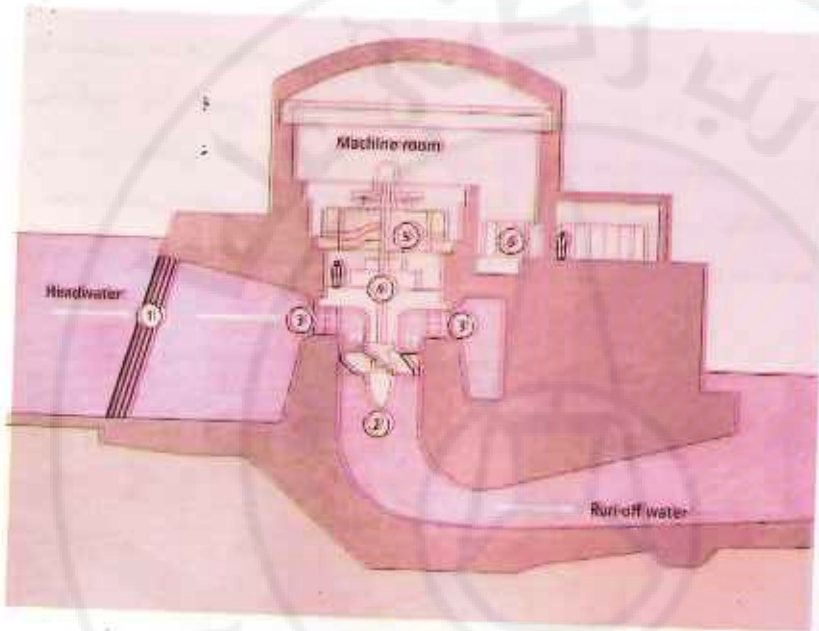
وبين الشكل (13-14) نموذجاً لمحطة طاقة اختبارية تعمل بعنفة فرنسيس.



الشكل (13-14) محطة طاقة اختبارية تعمل بعنفة فرنسيس

2- عنفة كابلان: Kaplan Turbine

تستعمل عندما يكون الضاغط المتوفر صغيراً وغزارة التدفق كبيرة، الشكل (13-15) ويتألف دولابها من جسم مركزي يدور حول محور عمودي في غالبية الحالات، ويثبت عليه عدد من الجنيحات (4-6 جنيحات) قابلة للحركة أيضاً حول محور عمودي على جسم العنفة، وتتحرك الجنيحات بشكل متناسق مع ريش التوجيه لتأمين عمل العنفة بمردود مرتفع ولها عدة أشكال منها: ذات الأجنحة الثابتة وذات الأجنحة المتحركة، وثنائية الجناح.



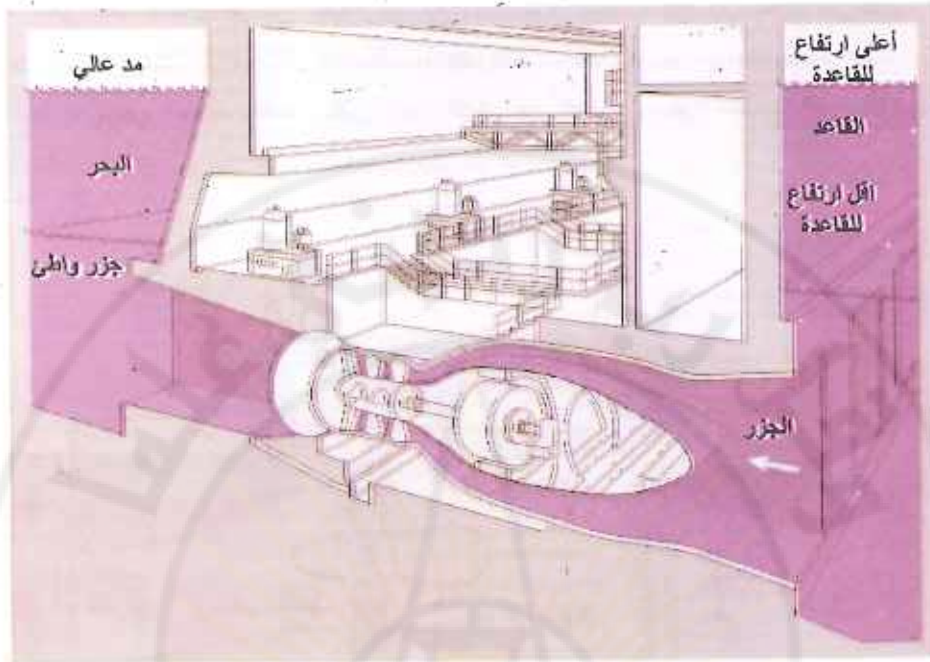
- 1- Screen حاجز شبكي 2- Turbine العنفة 3- Guide blade ريش التوجيه
4- Shaft المحور 5- Generator المولدة 6- Switch room (حجرة المفاتيح الكهربائية)
الشكل (13 - 15) عنفة كابلان

ويضم هذا النوع من العنفات ذات رد الفعل نماذج أخرى منها:

- العنفة البصلية: Bulb Turbine

وهي وحدات ذات جريان محوري أي أن نوع الجريان في العنفة يكون موازياً لخط مركز الآلة الذي يكون أفقياً أو مائلاً قليلاً نحو الخلف ويوجد نوعان من المجموعة البصلية منها Large Bulb وتستخدم عموماً في استغلال قدرة الأنهر وطاقة المد والجزر بينما تستعمل

Microstations عند مساقط المياه الصغيرة، ويبيّن الشكل (13-16) مخطط التوليد في محطة مد وجزر تستعمل العنف البصلية.



الشكل (13-16) محطة مد وجزر

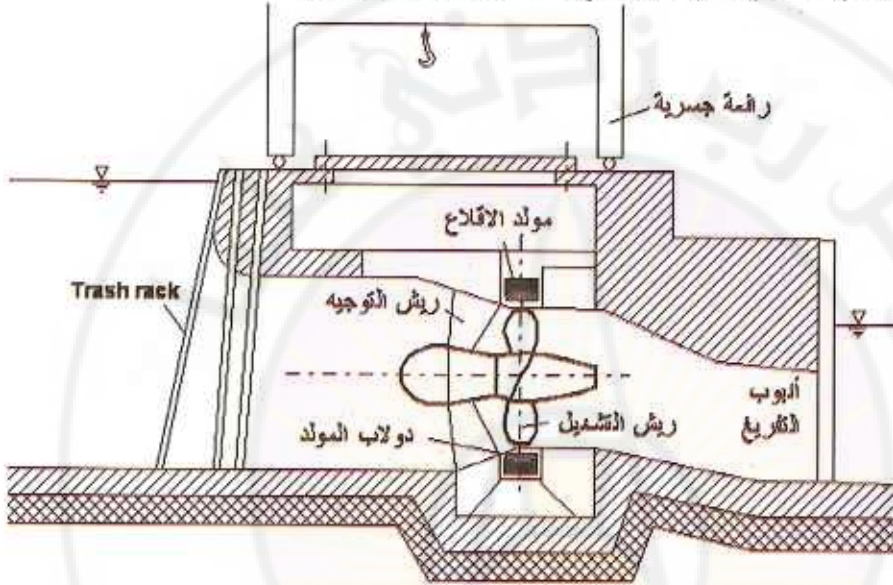
ففي محطة لارانس (La Rance) في غرب فرنسا استخدمت منظومة بصلية الشكل يكون التوربين والمولد محفوظين في مجرى التيار في منطقة فسيحة على شكل بصلة الشكل (13-17) ، وفي هذه الحالة سيكون الجريان حول البصلة الكبيرة مع وجود وسيلة للوصول إلى المولد (في حالة الصيانة) تتضمن قطع سريان مجرى الماء.



الشكل (13-17) عنفة (توربين) على شكل بصلة

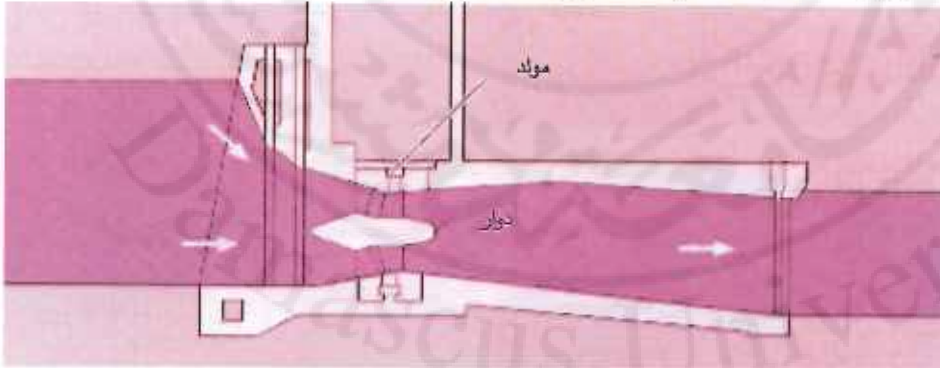
- عنفة سترافلو: Straflo Turbine -

تمتاز عنفة سترافلو بجريان خطي (مستقيم) وهي مهيأة لتصميم عنفة كابلان وطريقة تشغيله، وهي ذات مشاكل أقل من العنفة البصلية حيث تتوفر إمكانية الوصول للمولد في حال الصيانة وقد استخدمت في محطة (Annapolis Royal) وذلك بنصب المولدة بصورة دائرية حول الحافة، والجزء المعرض للتيار يكون الجزء الدوار من العنفة. ويظهر التصميم من خلال الشكل (13-18) والذي يبين جميع عناصر ومكونات هذا النوع.



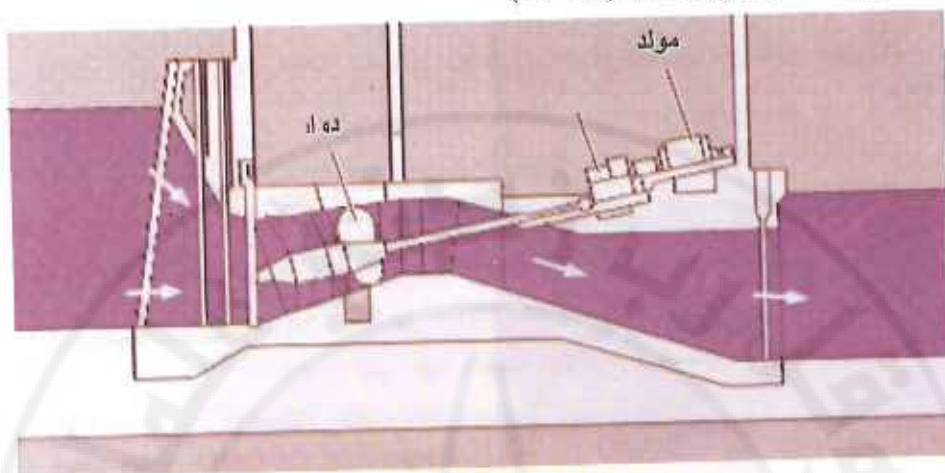
الشكل (13-18) محطة قدرة مركبة على مجرى نهر تستخدم Straflo Turbine.

كما يبين الشكل (13-19) عنفة سترافلو تستخدم في محطات المد والجزر ومثبتة داخل إطار.



الشكل (13-19) عنفة سترافلو داخل إطار.

- العنفة الأنبوبية (Tubular) أو عنفة الترس المخروطي Bevel-gear
وفيها يكون الجزء الدوار (شفرة التوربين) موضوعاً بزاوية يتم فيها نقل قدرة الدوران إلى مولد
خارجي كما هو مبين بالشكل (20 - 13)



الشكل (20 - 13) عنفة أنبوبية (الترس المخروطي)

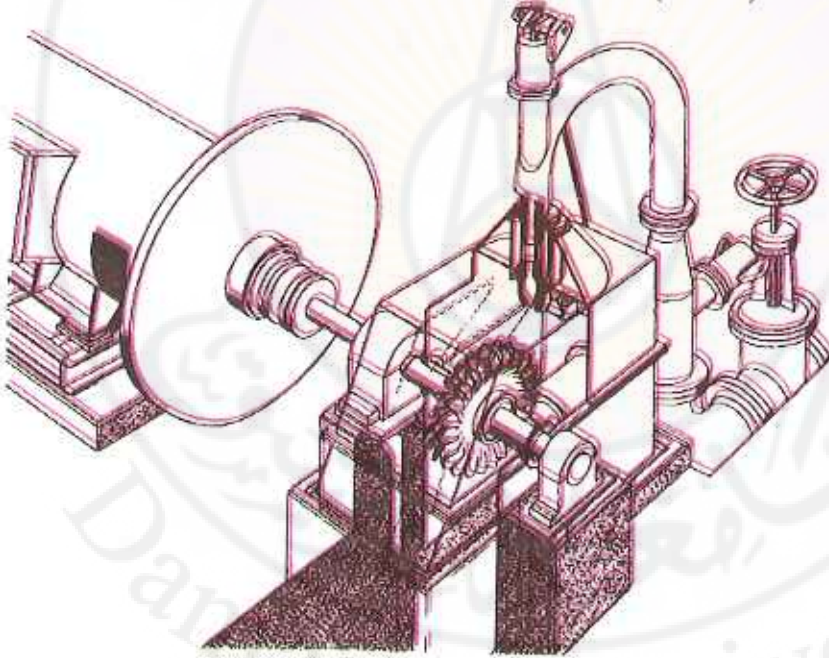
وسرعة دوران العنفة تكون قليلة عادة (50-100) دورة بالدقيقة. ولهذا فإن مشاكل الاحتكاك
تقل مقارنة بما يحدث في المحطات المائية ذات الارتفاع العالي. وتستخدم هذه العنفة لزيادة
السرعة وهي غالباً من نوع المسننات التداورية مع مولد يدور بسرعة عالية يقل حجمه وتقل
تكلفته بالتالي، كما أن استخدام سلسلة مسننات ذات مرحلتين تعطي طاقة أكبر ولكن تقلل
الكفاءة.

ونظراً لأن كمية من الماء تمر في وقت قصير فإن نصب أعداد كبيرة من العنفات مطلوب في
الحواجر الضخمة، فمثلاً المقترح في محطة حاجز سيفيرن (Severn) تركيب (216) توربيناً كل
منها ذو سعة مقدارها 40[MW] وتولد طاقة مقدارها 8640[MW] أي لها القدرة على توليد ما
مقداره 17[TWh/y] سنوياً. وفي محطات التوليد بواسطة المد والجزر تستخدم هذه السعة الكبيرة
لمدة ثلاث إلى ست ساعات لكل دورة مد وجزر. ومن الممكن التوليد خلال عمليتي المد والجزر
في عملية باتجاهين بحيث يمكن أن تنتج طاقة ثابتة تقريباً باستخدام عنفة عكسية غاطسة وهذا
النوع من العنفات معقد ومكلف.

ثانياً: الموصفات الفنية للعنفات ذات الفعل: Action Turbine

1- عنفة بلتون: Pelton Turbine

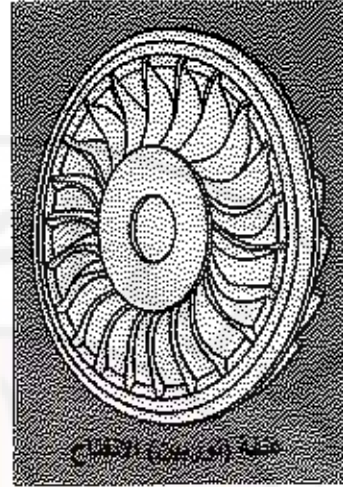
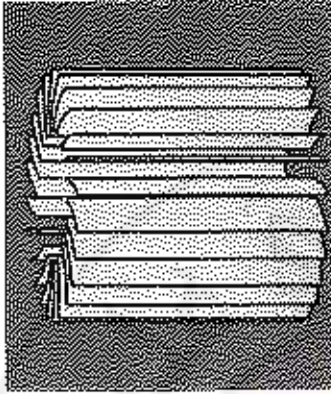
تستعمل هذه العنفة للارتفاعات الشاهقة التي تزيد عن (450) متراً من أجل تغذية صغيرة. يتألف دولاب بلتون (عنفة دفعية) من مجموعة من الدلاء (المغارف) مركبة بانتظام على إطار دائري صلب مثبت على محور. ويتألف هذا الدولاب. العامل من إطار فولاذي يركب عليه (36-15 مغرفة)، وتتكون المغرفة من سطحين منحنيين مشطوريين بحافة حادة، ويركب الدولاب بشكل ينطبق فيه اتجاه محور النافورة مع الحافة الحادة ونتيجة لتغير اتجاه التيار وسرعته ينشأ ضغط على الجناح ويتشكل عزم الدولاب العامل. ومن مزايا هذه العنفة أن دولابها العامل يدور في وسط هوائي ويمكن أن تتركب بوضعية أفقية أو عمودية أما الأجزاء الرئيسية للتوربين Pelton Turbine Main Components فهي آلية التوجيه والأفداح والمروحة Buckets and Runner والغلاف Casing والكابح الهيدروليكي Hydraulic Brake. ويبين الشكل (21-13) نموذجاً اختبارياً لعنفة بلتون.



الشكل (21-13) نموذج اختباري لعنفة بلتون

ويضم هذا النوع من العنفات ذات الفعل نماذج أخرى منها:

- عنفات الانفتاح والانفتاح العكسي: (Turgo and Cross-flow Turbine)



الشكل (22 - 13) عنفة الانفتاح Turgo وعنفة التيار العكسي Cross-flow.

عنفة الانفتاح: (Turgo Turbine)

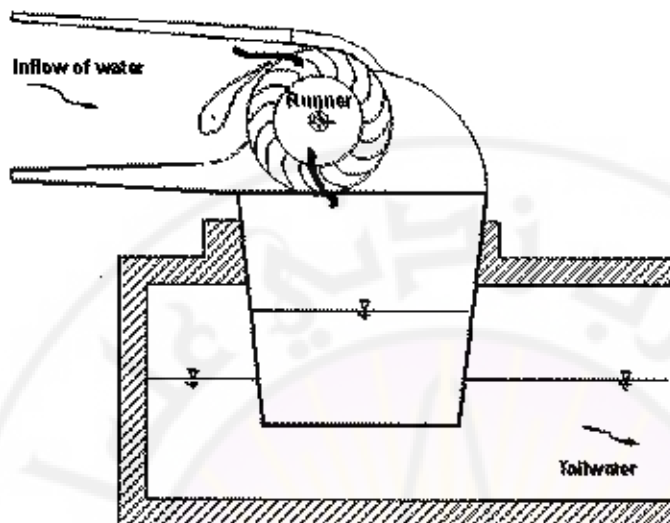
هي إحدى العنفات المختلفة عن دولاب بلتون وقد تم تطويرها عام 1920 بتبديل الأكواب المزدوجة بأكواب فردي قليل العمق مع دخول الماء من اتجاه وخروجه من الاتجاه الآخر. ويدخل الماء كنافورة على الأكواب بالتعاقب. وبعد هذا التوربين توربيناً دافعاً، وهو يشبه عنفة بلتون إذ إن أعلى كفاءة يصل إليها هي عندما تكون سرعته نصف سرعة الماء، إلا أن قابليته باستخدام كميات من الماء تكون أكبر من دولاب بلتون لنفس القطر. وهذا يعطيه بعض المزايا لإمكانية توليد الطاقة عن الارتفاعات المتوسطة.

عنفة التيار العكسي: Cross-flow Turbine

إن عنفة التيار العكسي، هو نوع آخر من العنفات الدافعة، ففيه يدخل الماء في صفيحة مستوية بدلاً من النافورة المدورة ويذهب إلى الشفرات ماراً خلال العنفة ملاقياً الشفرات بدلاً من عنفة فرنسيس، في المحطات الصغيرة التي تكون سعتها أقل من [100 KW].

وبممتاز هذا النوع بأن وصول الماء إلى العنفة يتم بعد مروره على ريش التوجيه Guide vane من الخارج باتجاه الداخل وبعدها نحو الخارج أيضاً وعبورها القسم الداخلي للدولاب. وهذا النوع مماثل لعنفة بلتون ولكن تستعمل من أجل تغيرات عالية في الغزارة عند ضاغط منخفض ويتمتع

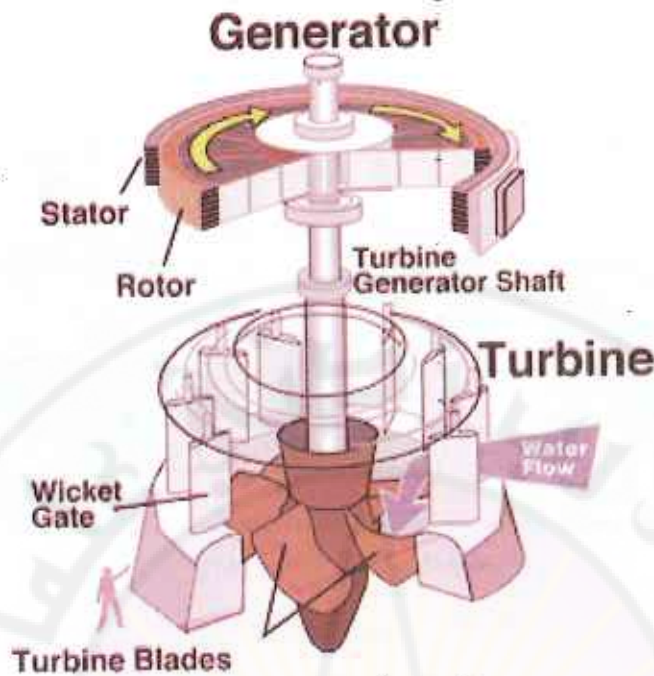
بالبساطة والقوة ورخص الثمن، وهو معد للاستعمال في محطات الطاقة الصغيرة. ويبين الشكل (13-23) مبدأ عمل عتلة التيار المعاكس Cross-flow Turbine.



الشكل (13-23) مبدأ عمل عتلة التيار المعاكس Cross-flow Turbine.

13-9-11 - عمود الربط ونقل الحركة: Shaft Coupling and Transmission

ترتبط العتلة والمولدة بشكل مباشر أو غير مباشر من خلال مجموعة نقل الحركة عن طريق المستندات أو السيور ويفضل أن تتم بعملية الربط المباشر لأنها تحسن الكفاءة وتقلل المفاوئد.



الشكل (24 - 13) طريقة ربط العنفة بالمولدة.

13 - 9 - 12- المولدة والمحولة: Generator and Transformer

تُحول المولدة Generator الطاقة الميكانيكية من العنفة أو من عمود نقل الحركة إلى طاقة كهربائية وتستخدم لذلك العنفات المتزامنة وغير المتزامنة. يكون المردود النظامي للمولدات المستخدمة في محطات الطاقة الكهرومائية بحدود (90-95%) وفي المحطات الكبيرة بحدود (95-99%).

ومهمة المحولة Transformer هو التحكم بقيمة جهد (فولطية) التيار الكهربائي Voltage الخارج وجعله متوافقاً مع الجهد (الفولطية) الموجودة في الشبكة الكهربائية.

13 - 9 - 13- حجرة الطاقة: Power house

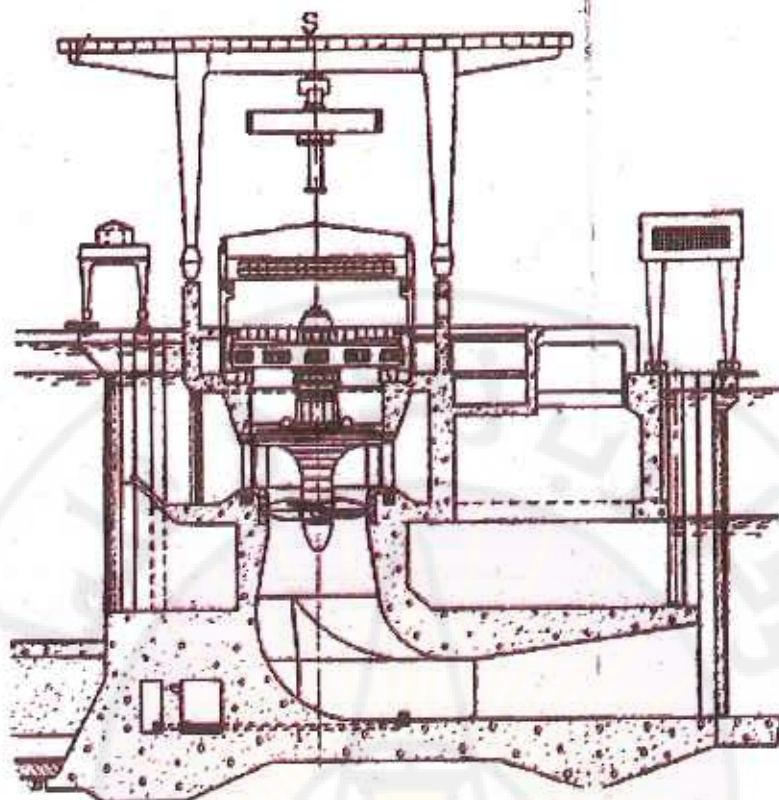
وتعد الجزء الهام من محطة توليد الكهرومائية وتشتمل على : العنفة ومجموعات النقل والمولدات، وأنظمة التحكم والقيادة ومجموعة الأنابيب والصمامات. ويبين الشكل (25 - 13) حجرة الطاقة في إحدى المحطات الكهرومائية.



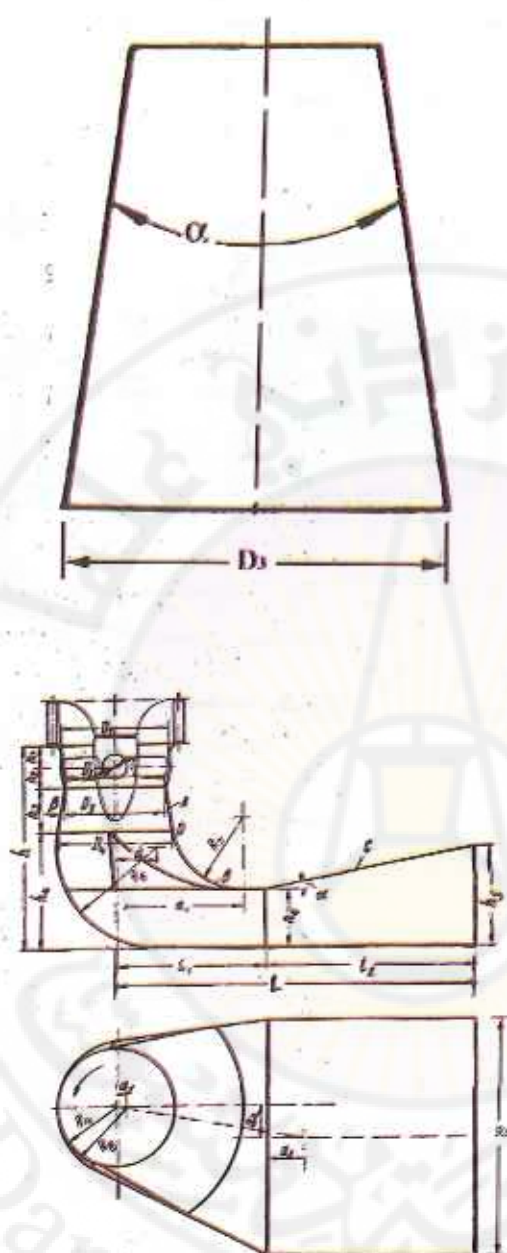
الشكل (13-25) حجرة الطاقة في إحدى المحطات الكهرومائية.

13 - 9 - 14 - أنبوب التفريغ السفلي: Out flow and Tailrace

وينقل الماء من الدولاب العامل إلى المستوى السفلي في المحطة الكهرومائية، ولأنبوب التفريغ تأثير مباشر على طاقة المحطة وبخاصة في المحطات ذات الارتفاعات العالية. ويوجد الأنابيب بعدة أشكال (مستقيم - مخروطي مستقيم - معكوف). وتكون الضياعات أصغر في أنبوب التفريغ المخروطي المستقيم وتركب مثل هذه الأنابيب على العنفات الصغيرة نسبياً أو على العنفات ذات المحور الأفقي، ولأجل العنفات الشاقولية الضخمة تستخدم أنابيب تفريغ معكوفة، لأن الأنابيب الشاقولية ستضطرنا إلى حفریات عميقة ومكلفة تحت العنفة. يختار مقطع الخروج في كل أنبوب انطلاقاً من قيمة ضياعات القدرة المسموحة. ويبين الشكل (13-26) أنبوب تفريغ معكوفاً و مستخدماً في محطة كهرومائية.

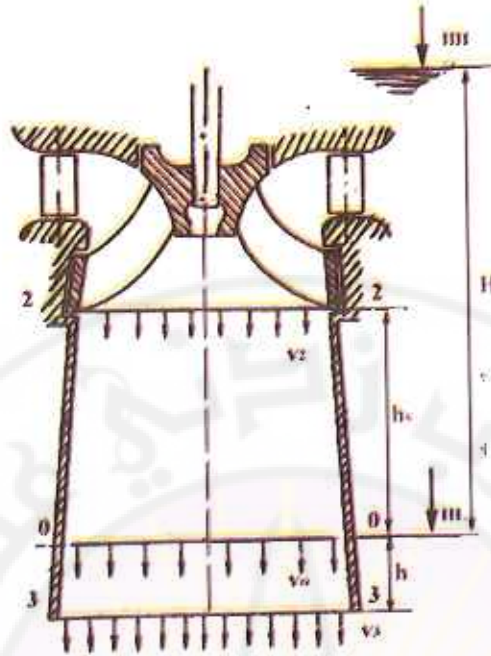


الشكل (26-13) أنبوب تفريغ في محطة كهرومائية.
كما يبين الشكل (27-13) نماذج من أنابيب التفريغ المستخدمة في المحطات الكهرومائية.



الشكل (27-13) أنبوب تفريغ مخروطي وأنبوب تفريغ معكوف.

ولتوضيح أهمية وجود أنبوب التفريغ نبين الحالات التالية كما هو موضح بالشكل (28-13) مع إجراء مقارنة بين الأنواع المختلفة لهذه الأتابيب وتأثير كل منها في أداء المحطة.



الشكل (13-28)

1- عدم وجود أنبوب تفريغ

يندفع الجريان بعد خروجه من العنفة إلى الجو الخارجي بسرعة (v_2) وتحت ضاغط (H) يمثل المسافة بين مقطع الخروج من العنفة والمنسوب السفلي للجريان، وفي هذه الحالة لا يمكن تحويل الطاقة الحركية الخارجة مع الجريان وسيكون الارتفاع المستفاد منه (الحمولة المفيدة):

$$H_f = H - \frac{V_2^2}{2g} - h_s - \frac{p_2}{\gamma} - h_{02} \quad (13-12)$$

حيث p_2 الضغط تحت العنفة مباشرة.

h الضياعات المنسوبة إلى الخروج.

h_s الارتفاع الستاتيكي.

وبفرض أن $p_2 = 0$ في حالتنا هذه فإن مجمل ضياعات الحمولة يساوي:

$$H - H_f = \frac{V_2^2}{2g} + h_s + h_{02} \quad (13-13)$$

2- عنفة مزودة بأنبوب تفريغ أسطوانى دائري المقطع

يُندفع الجريان إلى أنبوب التفريغ (v_2) ويحافظ عليها، ولإيجاد قيمة الضغط تحت العنفة نطبق معادلة برنولي على نقطتين من خط تيار، الأولى على المقطع (2-2) والثانية على المقطع (3-3) بفرض أن مستوي المقارنة (0-0):

$$\frac{p_2}{\gamma} + h_s = \frac{p_3}{\gamma} + h \quad (13-14)$$

مع ملاحظة أن (p_3) يختلف عن (p_0) بمقدار الارتفاع (h):

$$\frac{p_3}{\gamma} = h \quad (13-15)$$

بالتعويض في العلاقة السابقة نجد:

$$\frac{p_2}{\gamma} = - h_s \quad (13-16)$$

وهذا يعني أن أنبوب التفريغ الأسطوانى يولد تخلخلًا في أسفل العنفة مقداره (h_s).
وبتطبيق علاقة الحمولة المفيدة والتبديل نجد:

$$H_f = H - \frac{V_2^2}{2g} - h_s - \frac{p_2}{\gamma} - h_{02} = H - \frac{V_2^2}{2g} - h_{02} \quad (13-17)$$

وهذا يعني أننا لم نخسر الارتفاع الستاتيكي (h_s) في هذه الحالة، وقد تم تحويل هذا الارتفاع ضمن أنبوب التفريغ إلى تخلخل قيمته (h_s). واستناداً إلى ذلك فإن استخدام أنبوب التفريغ يمكننا من تثبيت العنفة على ارتفاع (h_s) عن المستوى السفلي دون أي فقدان في الحمولة.

3- عنفة مزودة بأنبوب تفريغ مخروطي

يدخل الماء إلى الأنبوب بسرعة (v_2) ويساعد الشكل المخروطي للأنبوب على تخفيف سرعة الجريان على امتداد طول الأنبوب وتكون سرعة الجريان عند الخروج من أنبوب التفريغ (v_3).
وبتطبيق معادلة برنولي على نقطتين من خط تيار الأولى على المقطع (2-2) والثانية على المقطع (3-3) نوجد الضغط تحت العنفة:

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_s = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + h \quad (13-18)$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \left(\frac{V_3^2 - V_2^2}{2g} \right) + \left(\frac{p_3}{\gamma} - h \right) - h_s \quad (13-19)$$

وبما أن الضغط في المستوى (3-3) يختلف عن الضغط الجوي p_a بمقدار h يكون لدينا:

$$\frac{p_3}{\gamma} = h \quad (13-20)$$

عندها: $\frac{p_2}{\gamma} = \left(\frac{V_3^2 - V_2^2}{2g} \right) - h_s$ وبما أن $V_2 > V_3$ يكون لدينا:

$$\frac{p_2}{\gamma} = \left(\frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \right) - h_s \quad (13-21)$$

ويفرض أن $\left(\frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \right) = h_{s1}$ حيث h_{s1} حمولة فرق السرعتين أثناء الدخول والخروج من أنبوب التفريغ:

$$\frac{p_2}{\gamma} = h_{s1} - h_s \quad (13-22)$$

تبين العلاقة أن أنبوب التفريغ المخروطي الشكل يحدث تكلخلاً تحت العنفة أكبر من التكلخل المستاتيكي (h_s) بمقدار (h_{s1}) ، وكلما صغرت السرعة (V_3) ازدادت قيمة (h_{s1}) وبالتالي يكبر التكلخل تحت العنفة ويمكن تصغير قيمة (V_3) بزيادة مساحة مقطع الخروج من أنبوب التفريغ الأمر الذي يؤدي إلى زيادة ضياعات الاحتكاك.

بدلالة معادلة الارتفاع المفيد في حال استخدام أنبوب تفريغ مخروطي وبعد التعويض $\left(\frac{p_2}{\gamma} \right)$ من المعادلة السابقة نجد:

$$H_f = H - \frac{V_2^2}{2g} - h_s - \frac{p_2}{\gamma} - h_{03} \quad (13-23)$$

وبما أن $\frac{p_2}{\gamma} = \left(\frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \right) - h_{s1}$ بالتبديل نجد:

$$H - \frac{V_2^2}{2g} - h_{03} = H_f = H - \frac{V_2^2}{2g} - h_s + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g} + h_{s1} - h_{03} \quad (13-24)$$

بمقارنة علاقة الحمولة المفيدة في هذه الحالة مع العلاقة حالة وجود أنبوب تفريغ أسطوانتي حيث

أننا نخسر $\left[\frac{V_2^2}{2g} \right]$ بينما نخسر $\left[\frac{V_3^2}{2g} \right]$ في حالة الأنبوب المخروطي، وواضح أن:

$$\left[\frac{V_2^2}{2g} > \frac{V_3^2}{2g} \right]$$

ونتيجة لتحليل عمل أنبوب التفريغ المخروطي نجد ما يلي:

1- إمكانية تركيب العنفة فوق المبنى السفلي للمجرى دون أن نخسر من حمولة سقوط الماء.

2- تحويل جزء من حمولة السرعة (h_v) عند خروج الجريان من العنفة (مع الأخذ بعين الاعتبار شروط التكيف).

ومما سبق نخلص إلى ما يلي:

1- يقلل أنبوب التفريغ المخروطي من ضياعات الحمولة. وتتم زيادة مقطع الخروج في أنبوب التفريغ إنما بزيادة زاوية المخروط أو الطول.

2- يجب ألا تتجاوز زاوية المخروط القيمة $(\alpha = 10 + 18^\circ)$ لأن ذلك سيؤدي إلى انفصال التيار عن سطح الأنبوب وبالتالي زيادة إضافية للضياعات.

3- تكون الضياعات الهيدروليكية أصغر في أنبوب التفريغ المخروطي المستقيم وتركيب مثل هذه الأنابيب على العنفات الصغيرة نسبياً، أو على العنفات ذات المحور الأفقي.

4- لأجل العنفات الشاقولية الضخمة تستخدم أنابيب تفريغ معقوفة، لأن الأنابيب الشاقولية ستضطرنا إلى حفريات عميقة ومكلفة تحت العنفة.

5- يختار مقطع الخروج في كل أنبوب انطلاقاً من قيمة ضياعات القدرة المسموح بها.

6- تسمى النسبة بين الجزء المستفاد منه من الطاقة الحركية الخارجة مع الجريان إلى

قيمة الطاقة الحركية للجريان أثناء الخروج بثابت مردود أنبوب التفريغ:

$$\eta_s = \frac{\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} - h_w}{\frac{V_2^2}{2g}} \quad (13-25)$$

حيث η_s ثابت مردود أنبوب التفريغ.

في الضياعات الهيدروإليكية.

وتحدد القيم المثالية لأنسوب التفريغ تجريبياً وتعدل (0,75+0,85) في حالة أنبوب التفريغ المخروطي المستقيم، وفي الأنابيب المعقوفة تكون قيمته (0,5+0,75).

13- 9 - 15 - المعايير ونظام الربط مع الشبكة: Regulation

وتعتمد على نظام تشغيل محطة الطاقة الكهرومائية ويمكن التعرف على عدد من أنظمة التحكم يتطلب نظام العزل Isolated عادة معايير التردد Frequency ومعايير تغير التردد مع حمولة الشبكة، وبشكل متزامن فإن معرفة منسوب الارتفاع Head Water والغزارة Flow غير ممكن في هذه الحالة.

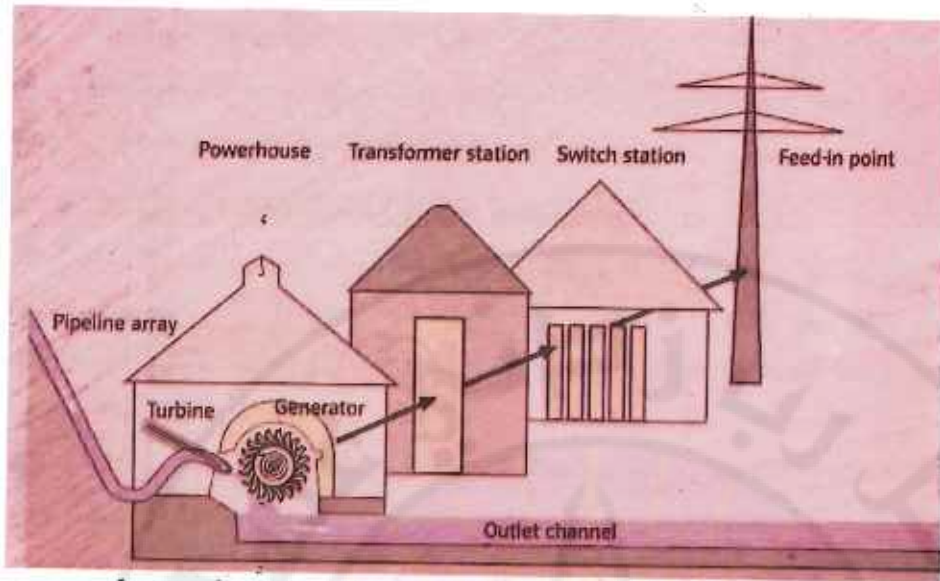
من أجل التشغيل الداخلي للشبكة الكهربائية فإن معايير منسوب الماء والغزارة يكون مشتركاً. إن العنفة والمولدة تدور عادة عند سرعة دوران ثابتة بشكل خطي مع تردد الشبكة.

تعمل محطات الطاقة الكهرومائية على تأمين الربط مع الشبكة العامة لتأمين احتياجات السكان ومع قليل من الاستثناء في بعض المحطات لتأمين القيادة الميكانيكية بشكل مباشر أو لإمداد الصناعات الصغيرة والأعمال الخاصة وتأمين احتياجاتها من الكهرباء.

تتطلب عمليات العزل (الفصل) تأمين التناسب بين الطلب والاستهلاك من الطاقة الكهربائية.

ويتشابه محطات الطاقة الصغيرة والكبيرة من حيث عمليات الفصل والربط مع الشبكة (Isolated and Grid operation) ويتطلب ذلك اختياراً للمولدات التزامنية وغير التزامنية التي تغذي الشبكة بتيار متناوب عند فولتية منخفضة.

تستخدم محطات الطاقة الصغيرة عادة في إمداد التجمعات السكانية البعيدة بالطاقة الكهربائية. وحالياً فإن المولدات التزامنية تعد أساسية لعمليات العزل وبشكل كامل مع معايير الفولتية وبشكل متناسب مع نوعية الطاقة الفعالة. يتعلق التردد بسرعة العنفة ويكون الحفظ أساسياً عند مستوى ثابت للمجال الكهرومغناطيسي أو لمعايير التردد الإلكتروني.



الشكل (14-29) محطة طاقة مع عنفة بلتون Pelton Turbine مبربوطة مع الشبكة.

13 - 10 - الضياعات في العنفة The Loses In The Turbin

تتألف الضياعات الكلية في العنفة من ثلاثة مكونات هي: الضياعات الهيدروليكية و الضياعات الميكانيكية و الضياعات الحجمية.

- الضياعات الهيدروليكية: وتمثل ضياعات الجريان نتيجة تدفق الماء عبر العنفة وتقسم إلى:

أ - ضياعات نتيجة احتكاك السائل بالجدران الصلبة h_f .

ب - ضياعات إعصارية h_k كالضياعات عند الدخول إلى الريش و الضياعات الجولانية عند الخروج من الدولاب العامل.

- الضياعات الميكانيكية: تنتج عن احتكاك محور دولاب العنفة أثناء الدوران (الضياعات في المحامل والجلب نتيجة الاحتكاك). تتحدد الاستطاعة الضائعة بالاحتكاك بالعلاقة:

$$N_D = P n^3 D^5 \quad (13-26)$$

حيث P معامل يتعلق بالشكل والتصميم ويعكس تأثير الفراغات.

- الضياعات الحجمية: الناتجة عن الضياعات الداخلية للماء داخل العنفة نتيجة انتقاله من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض عند مدخل الدولاب.

يمكن تحديد كل نوع من هذه الضياعات كصيغة متعلقة بالضاغط، فإذا كانت الاستطاعة المصروفة على الضياعات الهيدروليكية N_h تتحدد بالصيغة $N_h = 9,81 Q h_h$ عندها:

$$h_b = N_n / (9.81 \cdot Q) \quad (13-27)$$

حيث Q التدفق الكامل الداخل إلى العنفة.

وبشكل مشابه يمكن تحديد الضياعات الميكانيكية h_M وهنا تلعب الضياعات النسبية (المنسوبة إلى ضماط العنفة) دورا رئيسا مثلا: $1 - \eta_h = h_h / H$ ومن هنا تكون قيمة المردود الهيدروليكي:

$$\eta_h = 1 - \frac{h_h}{H} \quad (13-28)$$

يمكن تقسيم الضياعات الهيدروليكية حسب موقع حدوثها إلى: ضياعات في الدوالب العامل h_n و ضياعات في أنبوب السحب h_s و ضياعات عند الخروج h_{out} :

$$h_h = h_n + h_s + h_{out} \quad (13-29)$$

وبالتالي يعبر عن الضياعات الميكانيكية h_M والمردود الميكانيكي η_M كالتالي:

$$\left. \begin{aligned} h_M &= N_M / (9.81 Q) \\ \eta_M &= 1 - h_M / H \end{aligned} \right\} \quad (13-30)$$

حيث: N_M الاستطاعة المصروفة على الضياعات الميكانيكية.
يمكن تحديد الضياعات الحجمية من العلاقة:

$$N_O = 9.81 q H = 9.81 Q h_O$$

حيث: N_O الاستطاعة الموافقة للضياعات الحجمية.

q الضياعات الحجمية (التدفق العائد).

ومن هنا نجد أن:

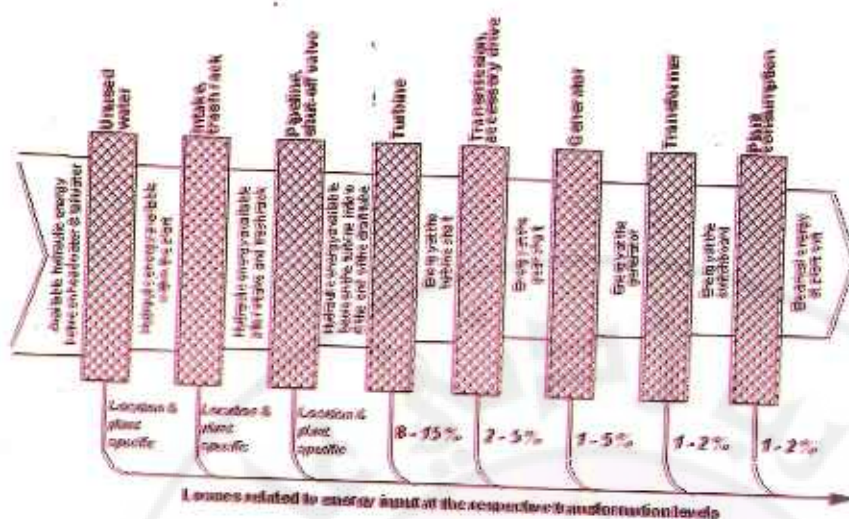
$$\left. \begin{aligned} h_O &= q H / Q \\ \eta_O &= 1 - h_O / H \end{aligned} \right\} \quad (13-31)$$

وبالتالي يتحدد المردود الكلي بالعلاقة:

$$\eta = 1 - \frac{1}{H} (h_n + h_s + h_{out} + h_M + h_O) \quad (13-32)$$

حيث أنه لا يمكن الاستفادة الكاملة من الطاقة المحمولة بسبب وجود المفاهيم والنتيجة تكون انخفاض منسوب الطاقة للمحطة عند الخرج حيث تتوافر الطاقة ما بين المنسوب العلوي للماء ومستوى التصريف.

وبين الشكل (30-13) نسبة المفاهيم داخل المحطة.



الشكل (30 - 13) انسياب الطاقة في محطة كهرومائية مقامة على مجرى نهر

تحدث المفاوئد داخل المحطة بشكل رئيسي عند أنابيب الدخول والحواجز والبوابات وفي القنوات والأنابيب، وأنابيب النقل وصمامات الضخ والإغلاق، وضمن واحد أو أكثر من العنفات وكذلك مجموعة أو أكثر من مجموعة النقل وواحد أو أكثر من المولدات.

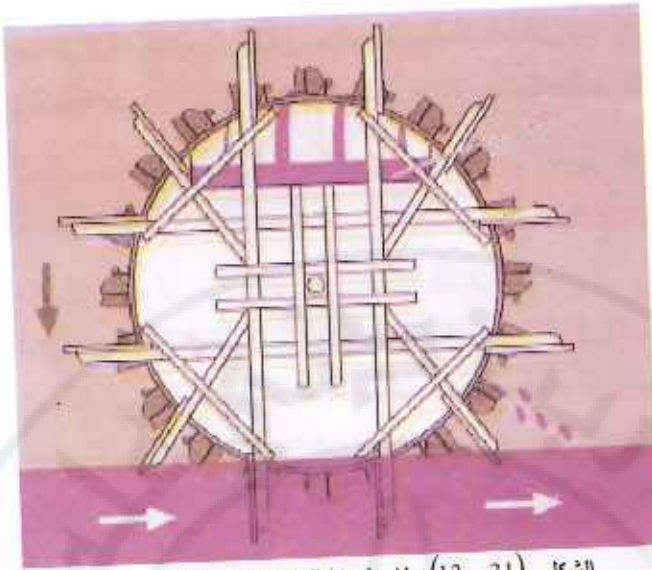
إضافة إلى ذلك فإن المفاوئد يعبر عنها بطاقة كامنة ذات صلة بالسد. إن طاقة الضياعات في الجزء الهيدروليكي تكون في مواضع متعددة.

11 - 13 - المحطات الكهرومائية الصغيرة المقامة على الأنهار

Run of river small power station

عرف الإنسان منذ القدم استخدام سرعة جريان المياه كأقدم مصادر الطاقة المستخلصة من المياه، ولا أحد يعرف متى تم اختراع الدولاب المائي (Water Mill) ولكن منظومات الري كانت موجودة قبل أكثر من (5000) عام.

عرف الإنسان جهازاً اسمه نوركا (Norica) استخدم قبل ميلاد السيد المسيح في مناطق كثيرة من العالم ومن ضمنها البلدان العربية، كان يقوم برفع الماء من الأنهار إلى خزانات ومنظومة قنوات.



الشكل (31 - 13) دولاب نوركا المائي (Norica)

وفي الفترة ما بين 1650 و 1800 ميلادية أجريت عدة بحوث علمية لتحسين أداء دولاب المياه، وقد ظهرت عدة تصاميم لدواليب ذات قدرة تتراوح بين (1-60 HP) للدواليب الكبيرة، وقد تم الاستنتاج بأنه للحصول على أعلى كفاءة يجب على الماء الوصول إلى الشفرات (Blades) ومغادرتها بنعومة وأن يعطي كل طاقته الحركية لها.

ومنذ نهاية القرن التاسع عشر استخدمت ثلاثة أنواع من الدواليب هي:

- الدولاب الممير بالدفع السفلي.
- الدولاب الممير بالدفع العلوي.
- الدولاب الممير بالدفع الأمامي.

وفي عام 1832 اخترع مهندس فرنسي شاب اسمه (بونواه فورتني رون) دولاباً مائياً ذا كفاءة عالية فكان أول عنفة مائية، وقد بينت الاختبارات بأن هذه العنفات استطاعت تحويل حوالي 80% من طاقة الماء إلى طاقة ميكانيكية، وتمت تجربة أول نموذج من هذه العنفات عام 1837، ولم تتوقف التحسينات المدخلة عليه.

وبعد عدة سنوات استطاع المهندس الأمريكي جيمس فرانسيس (James Francis) إنجاز تجارب كثيرة على عنفات (توربينات) ذات جريان دائري داخلي، وبعد نصف قرن من التطور -

وقبل أن يكتشف فرداي أن الكهرباء يمكن تحويلها إلى محطات كهربائية رئيسية - ادعى غودا لمنغ (Goda Lming) في عام 1881 إمكانية تجهيز مناطق مختلفة بالكهرباء من دولاب مائي. وشهدت هذه المحطات الصغيرة نمواً متزايداً في الكثير من البلدان منها الولايات المتحدة والصين وفرنسا والهند وألمانيا وكذلك سورية التي عرفت أول عتفة مائية منذ العام 1906.

يرجع الاهتمام الحالي بهذه المحطات الصغيرة إلى عدة أسباب منها:

- 1 - الاهتمام الاستراتيجي بتوفير الطاقة الكهربائية للشبكات المركزية والشبكات المعزولة وللأجهزة الطاقية البعيدة (خارج الشبكات) أي منصلة مباشرة بالتطبيق المراد تغذيته.
- 2 - القابلية المحدودة لبناء محطات كبيرة السعة في بعض الدول ومن المسائل ذات الاهتمام في هذه الأيام هو أن المحطات ذات قدرة $50 [Mw]$ والتي تنتج قدرة كافية لتغذية مدينة متوسطة الحجم تسمى بالمحطات الصغيرة.
- 3 - تقدم العلوم الإلكترونية الذي قلل من كلفة السيطرة على المحطات ومكن من قيادتها وتشغيلها عن بعد (SCADA System) المناسبين للشبكة الرئيسية.

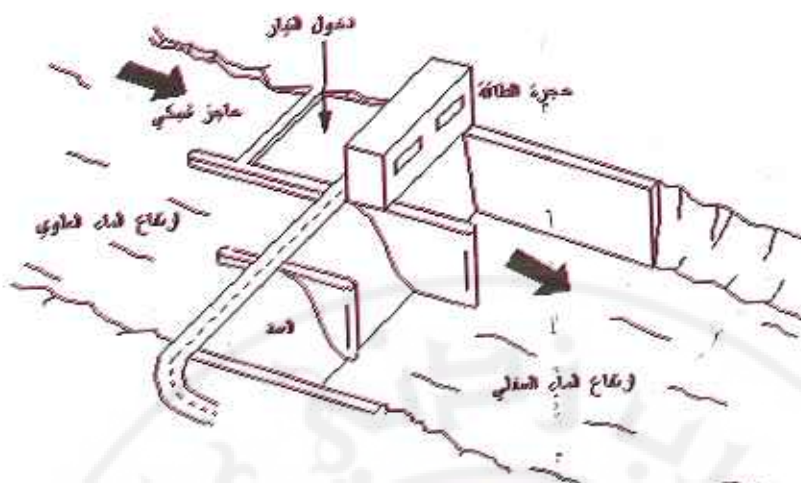
ويوجد أكثر من 70 بلداً من مختلف أنحاء العالم خطط لإنشاء محطات صغيرة، فنصف إنتاج الصين من الطاقة ناتج عن محطات صغيرة.

وهناك سببان يحولان دون توسع استخدام المحطات الصغيرة، الأول هو رغبة معظم الدول ومعظم شركات الكهرباء في بناء محطات كبيرة والثاني هو مسألة التمويل المادي. ولضمان تقدم ملموس في نصب المحطات الصغيرة فإنه يتوجب القيام ببعض التغييرات منها:

- أ - تقليل التكلفة بواسطة تطوير تكنولوجيا هذه المحطات والتخفيض من كلفة منظوماتها.
- ب - تغيير عناصر التمويل المادي أو تغيير بعض السياسات الحكومية للتمويل لتصبح بنسبة فائدة قليلة.

ج - قيام الحكومات بتمويل إنشاء منظومات المحطات الصغيرة.

ويعتمد إنشاء محطات الطاقة المقامة على مجرى الأنهار على التصميمات المختلفة للسدود وحجرة التوربين، واستقرار تربة مجرى التربة، وإدارة الفيضانات والملاحة النهرية، يمثل الشكل (32-13) نموذجاً لمحطة طاقة مقامة على مجرى النهر.



الشكل (32-13) نموذج لمحطة طاقة نهرية

من أجل الأنواع المختلفة لهذه الترتيب من محطات الطاقة سواء غرفة الطاقة Power house والسد Dam تكون ممكنة في مجرى النهر.

13-11-1 تصنيف المحطات الكهرومائية الصغيرة:

يختلف تصنيف المحطات الكهرومائية الصغيرة من حيث أنها تصنف من حيث:
1 - سعة التوليد وهناك اختلاف بين بلد لآخر والجدول (9-13) يبين التصنيفات المختلفة لعدة بلدان.

جدول (9-13)

Country البلد	Micro [KW] ميكرو	Mini [KW] صغير جداً	Small [MW] صغير
الولايات المتحدة	< 100	100-1000	1-30
الصين	-	< 500	0.5-25
فرنسا	5-5000	-	-
الهند	< 1000	101-1000	1-15

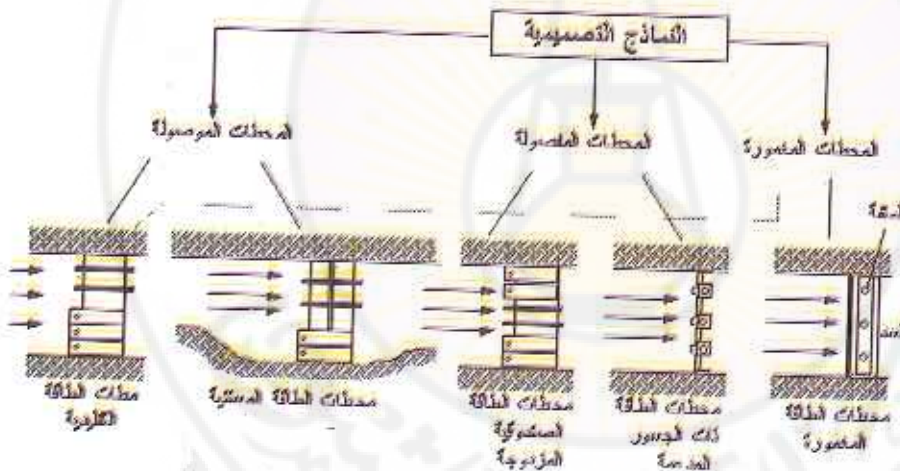
2 - التدفق وقطر التوربينه والجدول (10-13) يبين هذه التصنيفات:

الجدول (10-13)

التصنيف	التدفق $[m^3/s]$	قطر ريشة التوربينه $[M]$
Micro ميكرو	< 0.4	< 0.3
Mini صغير جداً	$0.4-12.8$	$0.3-0.8$
Small صغير	> 12.9	> 0.8

من حيث المبدأ ووفق المخطط الصندوقي يوجد الكثير من تصاميم هذه النماذج منها ثنائية الصندوق Twin block ومتعددة الصندوق multiple block، وتوجد تصاميم أفضل ولكن الاختلاف بينهما يتعلق بمكان السد وغرفة الطاقة.

ولتوضيح ذلك يمكن العودة للشكل (33-13) الذي يبين التصميمات المختلفة لمحطات الطاقة المقامة على الأنهر.



الشكل (33-13) التصميمات المختلفة لمحطات الطاقة المقامة على الأنهر

- نماذج التصميمات الصندوقية التقليدية Conventional block design

يلاحظ في المخطط الصندوقي بأن المحاور الطولية لمجموعة الطاقة والسد تكون متعامدة مع مجرى النهر، هذا التصميم يكون ممكناً فقط في حالة الفيضان العالي.

- محطات الطاقة المستنبة Indented Power Station

تكون حجرة الطاقة موضوعة بجانب مجرى النهر، وهذا النوع يتطلب أن يكون مجرى التيار ضيقاً جداً عند المد ليستعمل كامل عرض النهر عند الفيضان.

- محطات الطاقة الصنوبرية المزدوجة Twin block Power Station

تكون حجرة الطاقة موزعة باتجاه جهتي النهر، بهدف توليد الطاقة بشكل منفصل.

- محطات الطاقة ذات الجسور المدعمة Power Station in Bridge Pier

في هذه المحطة تكون المنشأة الميكانيكية وغرفة الطاقة متطابقتان مع دعائم ومساند وبوابات السدود، وهذه التصميمات تتمتع بصفات تسامحية للجران وتصاميم ثابتة.

- محطات الطاقة المغمورة Submersible Power Station

يحقق هذا التصميم متطلبات أقل من غرف الطاقة والسد حيث تكون عند قيمها الصغرى.

يمكن إنشاء الكثير من محطات الطاقة على النهر فتشكل بذلك سلسلة من محطات الطاقة والهدف من ذلك هو تحسين الأداء وإنتاج الطاقة.

13 - 11 - 2 - محاسن استخدام المحطات الكهرومائية الصغيرة ومساوئها:

The Advantages And Disadvantages Of Using Small Hydro - Electric Power Stations

أ - المحاسن:

- المرونة والوثوقية في التشغيل.

- الإقلاع السريع.

- لا تحتاج الأعمال المدنية المتقدمة في المحطة إلى منشآت معقدة وإن كلفة حجرة الطاقة غير مكلفة.

- مدة التنفيذ لا تتجاوز السنتين.

- العمر الافتراضي لمشاريع المحطات الكهرومائية الصغيرة طويل ولا يتأثر بأسعار الوقود حيث أنه يستخدم كمصدر متجدد ونظيف ورخيص وبذلك يمكن اعتبار أن مردوده المالي جيد.

- يؤمن إنشاء المحطات في المناطق النائية والمعزولة فرص عمل للقاطنين وتصبح الفرص الاقتصادية جيدة باستخدام مواد أولية محلية.

- يؤمن استخدام واستثمار المحطات الكهرومائية الصغيرة في المناطق المعزولة طاقة كهربائية بوثوقية جيدة عند وجود نظام تخزين.
- تحتاج لعدد قليل من العاملين ويمكن لبعض المحطات أن تعمل عن بعد وفق نظام (SCADA System).
- يمكن الاعتماد على هذه التكنولوجيا نظراً لمتنوع العنقافات بمرايد 90% وخطوط نقل للقدرة تكون قصيرة وأخرى للمستهلكين من مواقع التوليد، إضافة إلى أن الأجزاء المطلوبة للمحطة متوفرة ويمكن الحصول عليها.

ب - المساوي:

- نظراً لعدم وجود سدود تخزينية كبيرة أمام معظم المحطات الصغيرة فإن التدفق يكون غير منتظم مما يجعل استطاعة الخرج متغيرة.
- لا تعد مشاريع المحطات الصغيرة ذات مردود مالي سريع لأنها تحتاج إلى زمن أطول لاسترداد كامل رأس المال المستثمر في المشروع.
- يؤخذ عليها من قبل جماعات حماية البيئة أنها تسبب مشاكل للثروة السمكية والتنوع الحيوي.
- يؤدي تدفق المياه في منطقة التوربين إلى ارتفاع درجة الحرارة الأمر الذي قد يؤدي إلى إمكانية موت بعض الكائنات النهرية التي لا تعيش بمثل درجات الحرارة هذه.

13- 11 - 3 نماذج من المحطات الكهرومائية الصغيرة في سورية:

1 - محطة التكية:

أقيمت على نهر بردى منذ عام 1906م مكونة من أربع وحدات استطاعة كل منها [250KVA]، وتم توسيعها في عام 1929م بإضافة وحدة أخرى لتبلغ استطاعتها [500KVA].

يبلغ ارتفاع سد التكية حوالي [24m]، مصمم على أساس معدل جريان [9m³/S]، قامت المجموعات الأربع الأولى بإمداد مدينة دمشق بالكهرباء خلال الحرب العالمية الأولى، وبقيت في الخدمة لغاية عام 1958.

2 - محطة الهامة:

تم تشييد محطة التوليد في الهامة على مجرى نهر بردى في عام 1938 ووضعت في الاستخدام بمجموعة واحدة استطاعتها [1350KVA]، استمرت بالخدمة لغاية عام 1988، أسهمت محطة

التكية ومحطة الهامة بغطية حوالي 83% من الطاقة التي تحتاجها مدينة دمشق، وأسهم توليد الطاقة من مصادر مائية بحوالي 40% من إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة في دمشق عام 1950.

3 - محطة سوق وادي بردى:

تم إنشاء محطة كهرومائية في سوق وادي بردى في مجرى النهر عند سد التكية والتي تضم مجموعتين استطاعة كل واحدة منها 4000 [KW] ووضعت بالاستخدام عام 1958 ولا تزال تعمل وبلغ إنتاجها في نهاية عام 1997م حوالي 860 [million KWh].

4 - محطة الفجر:

في عام 1932 تم إنشاء محطة الفجر لتوليد الطاقة على نهر العاصي، وتتكون من مجموعتين استطاعة كل منهما 750 [HP]، تنقل الطاقة إلى مدينتي حمص وحماة بخطوط نقل طولها 50 [Km]، وفي عام 1945، تم توسيع هذه المحطة بإضافة وحدة جديدة استطاعتها 750 [HP]، وفي عام 1948م تم إضافة وحدة جديدة استطاعتها 1600 [HP]، وبذلك وصلت طاقة توليد هذه المحطة لغاية عام 1991م حوالي 150 [million KWh].

5 - محطة الرستن:

في عام 1962 تم وضع محطة الرستن المشيدة على نهر العاصي بين مدينتي حمص وحماة في الاستخدام، وتتكون المحطة من مجموعتين استطاعة كل منها 4.5 [MW]، وتنتج وسطياً حوالي 6 [million KWh]، وتبلغ في بعض السنوات الغزيرة حوالي 9 [million KWh]، وهي مرتبطة مع الشبكة على خطوط نقل 66 [KV]، وبشكل عام تعمل فقط أربعة أشهر في السنة.

6 - محطة محردة (شيزر):

في عام 1971 تم البدء بتشغيل محطة محردة، والمقامة على نهر العاصي في موقع يبعد 28 [Km] عن مدينة حماة، وهي محطة توليد صغيرة تتكون من مجموعتين، استطاعة المجموعة الأولى 4.25 [MVA]، مع ثوربين كابلان، واستطاعة المجموعة الثانية 0.178 [million KWh]، وما زالت تعمل بشكل فصلي.

7 - محطة عفرين:

المحطة مركبة على نهر عفرين الذي يبلغ طوله في الأراضي السورية حوالي (149) كم، والكمية الكلية السنوية 225-280 [million m³] يتم توليد الطاقة الكهربائية من محطة تتكون من

مجموعتين استطاعة كل منهما $5[MW]$ والمعدل السنوي للطاقة المنتجة $40[million KWh]$.

8 - محطة السباع من نيسان (سد الحسكة الغربي):

تم إنشاء هذه المحطة في محافظة الحسكة عام 1997م، وتتكون من وحدتين لتوليد الطاقة وكان الإنتاج في حينها (3.3) مليون كيلو وات ساعي، والمحطة مصممة لاستخدام مياه السد خلال فترة عدم الري من تشرين الثاني ولغاية حزيران وخلال بقية الأشهر فإن المحطة لا تعمل.

9 - محطة سد الخابور الكبير:

استطاعة المحطة $10.5[MW]$ وسعة التخزين $66[million m^3]$.

إضافة للسدود الأخرى التي يمكن استثمارها في توليد الطاقة الكهربائية مثل:

سد الثامن من آذار، سد 16 تشرين، سد الثورة على نهر الصنوبر، كما يمكن اعتماد نظام المحطات العلوية (العكوسة) لضخ وتوليد الطاقة عند توافر الشروط المناسبة.

الفصل الرابع عشر

أسس نظرية عمل العنفات المائية والتحكم بأدائها

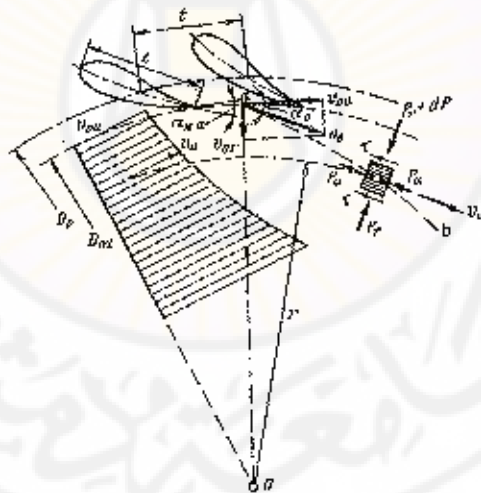
Basics of Turbine Work Theory & Performance Control

14 - 1 - التآزر التناسلي عن جهاز التوجيه في العنق في الرد فعلية:

The resulted flow from the reaction turbine

في جميع العنقات الرء فعلية يتشكل التيار القادم إلى الدولاب العامل عن طريق جهاز التوجيه (الموزع) وهو عبارة عن برو فيل شبكي دائري (ريش) كما هو مبين بالشكل (1-16) وبالشكل (10-16) لاحقاً في فصل تصميم العنقات المائية.

للمؤشرات المحددة لهذا الشبك الدائري هي: شكل البروفيل وكثافة الشبك (عدد الريش). يكون شكل الريشة متماثلاً كما هو مبين بالشكل (11-16) لاحقاً، عندها يكون خط محور الريشة مستقيماً، ويكون غير متماثل عندما يكون هذا المحور منحنيًا وكما هو مبين على الشكل (1-14) فإن المسافة بين بروفيين متجاورين تبعاً للمحاور هي (t) وتسمى خطوة الشبك، وطول الوتر (L) هو طول البروفيل وتمثل النسبة (L/t) مؤشر كثافة الشبك.



السؤال (14 · 1) اختيار الناس من قبل جهاز التوجيه (الموزع)



الشكل (2- 14) الجولان داخل التيار

بما أن ريش جهاز التوجيه يجب أن تحقق الإغلاق الكامل للعنفة الشكل (11b-16) لذا فإن مؤشر كثافة الشبك يجب أن يكون أكبر من الواحد دائماً $L/t > 1$ (عادة يكون حوالي 1,1) وبهذا الشكل فإن جهاز التوجيه هو شبك كثيف، يكون اتجاه سرعة السائل v_0 قريباً لاتجاه نهايات الخروج للريش عند مخرجه ومن أجل قطر D_{02} يكون $\alpha_0 = \alpha_{H_{2O}}$ الشكل (1-14). من أجل جهاز التوجيه القطري المستخدم في العنفات الرد فعلية، الشعاع v_0 هو عبارة عن مجموع حدين:

$$v_0 = v_{0r} + v_{0u} \quad \text{حيث } v_{0r} \text{ المركبة القطرية. و } v_{0u} \text{ المركبة المحيطية (التماسية).}$$

بمعرفة تدفق العنفة Q وأبعاد جهاز التوجيه تحدد المركبة القطرية للسرعة بالعلاقة:

$$v_{0u} = \frac{Q}{\pi D_0 b_0} \quad (14-1)$$

الزاوية بين v_0 و v_{0u} نرمز لها بالرمز α_0 عندها:

$$v_0 = v_{0r} / \sin \alpha_0 \quad (14-1-a)$$

تحدد المركبة المحيطية بالعلاقة:

$$v_{0u} = v_0 \cos \alpha_0 \quad (14-1-b)$$

يشير وجود المركبة المحيطية إلى أن التيار خلف جهاز التوجيه مفتول بالنسبة للمحور O . ويتحدد قتل التيار كما هو معلوم بالجولان Γ ، الذي يُعطى بالحالة العامة بالصيغة:

$$\Gamma = \int_S \mathbf{v} \cos(\mathbf{v} d\mathbf{s}) d\mathbf{s} \quad (14-2)$$

حيث S منحنٍ مغلق (أخذ داخل التيار) كما هو مبين بالشكل (14-2).
 $\alpha = \mathbf{v} d\mathbf{s}$ الزاوية ما بين اتجاه السرعة $\mathbf{v}$ و $d\mathbf{s}$ ومن الصيغة السابقة نجد أن الجولان يقاس بوحدة $[m^2/s]$ ومن أجل التيار الأوسط خلف جهاز التوجيه عند قطر خروج D_{02} يتحدد الجولان بالعلاقة:

$$\Gamma_0 = \pi D_{02} v_0 \cos \alpha_0 \quad (14-2-a)$$

من هنا نجد أن جهاز التوجيه يشكل جولان التيار I_0 . يتحرك السائل بشكل حر في الفراغ ما بين نهايات ريش التوجيه وحافة الدخول لريش الدولاب العامل، وشكل مسارات الجزيئات كما المنحني (ab) على الشكل (14-1). من المهم هنا البحث عن تغيرات السرعة لذا نأخذ من هذه المسارات كتلة عنصرية m نصف قطرها r . وباستخدام قانون عزم كمية الحركة (المعروف في الميكانيك): من أجل كتلة سائلة محددة فإن مشتق عزم كمية الحركة بالنسبة للزمن يساوي مجموع عزوم كافة القوى الخارجية المؤثرة في هذه الكتلة (بالنسبة لمحور ما) ويعبر عن هذا القانون بالصيغة:

$$\frac{d(m v_0 r)_0}{dt} = \sum M_0 \quad (14-3)$$

حيث m كتلة السائل للحجم العنصري.

v_0 المركبة المحيطة للسرعة.

r نصف القطر.

$\sum M_0$ مجموع عزوم القوى الخارجية المؤثرة في الكتلة m بالنسبة للمحور O .
 اعتماداً على الشكل (14-1) تمثل القوى الخارجية، الضغوط التي تملك اتجاهات قطرية p_r و $p_r + dp$ والتي لا تشكل عزماً بالنسبة للمحور O والضغوط على السطوح الجانبية للكتلة m هي p_0 (للتيار الأوسط) وهي متساوية ولا تعطي عزماً بالنسبة للمحور O . تبقى فقط الإجهادات المماسية τ الناتجة عن احتكاك السائل ويمكن إهمالها لصغرها، وبالتالي يمكن القول أن $\sum M_0 = 0$ عند الحركة الحرة للسائل، أي:

$$\frac{d(m v_0 r)_0}{dt} = 0 \Rightarrow (m v_0 r) = \text{const}$$

ومن هنا نستنتج علاقة هامة:

$$v_{\alpha} r = \text{const} \quad (14-4)$$

والتي تحدد شروط الحركة الحرة للسائل والمسماة قانون ثبات عزم السرعة.

تشير العلاقة السابقة (14-4) إلى أن مركبة السرعة المحيطية تزداد تبعاً لنصف القطر r :

$$v_{\alpha} = v_{0\alpha} \frac{0.5 D_{0\alpha}}{r}$$

هذا يعني أن بروفيل $v_{\alpha}(r)$ بعد قطعاً زائداً الشكل (14-1) وباعتبار أن $\Gamma = 2 \pi r v_{\alpha}$

ومن العلاقة السابقة (14-4) نستنتج شرط ثبات الجولان عند الحركة الحرة للسائل:

$$\Gamma = \Gamma_0 = \text{const} \quad (14-4-a)$$

وبالتالي: يبقى الجولان الناتج عن جهاز التوجيه ثابتاً لا يتغير في المجال بين جهاز التوجيه والدولاب العامل للعنفة.

14-2 - حركة التيار في الدولاب العامل للعنفات الرد فعلية The current motion of the reaction turbine

يتم تحويل طاقة السائل إلى طاقة ميكانيكية على محور الدولاب العامل نتيجة لتأثير التيار مع ريش الدولاب الذي يمكن اعتباره بروفيلاً شبيكياً مداراً.

عند دراسة حركة السائل في الدولاب الدائر ندرس هذه الحركة كحركة مركبة، مؤلفة من حركتين: نسبية وانتقالية.

الحركة النسبية: هي الحركة التي يسجلها مشاهد موجود على الدولاب الدائر ويدور معه. (يمكن تركيب جهاز تصوير يدور مع الدولاب لتسجيل هذه الحركة).

الحركة الانتقالية: تحدد حركة نفس الدولاب العامل وريشه، وفي العنفات دواماً حركة دورانية. يشكل مجموع الحركتين الانتقالية والنسبية ما يسمى الحركة المطلقة، فإذا رمزنا لشعاع السرعة النسبية بـ w وشعاع السرعة الانتقالية بـ u وشعاع السرعة المطلقة بـ v عندها يكون:

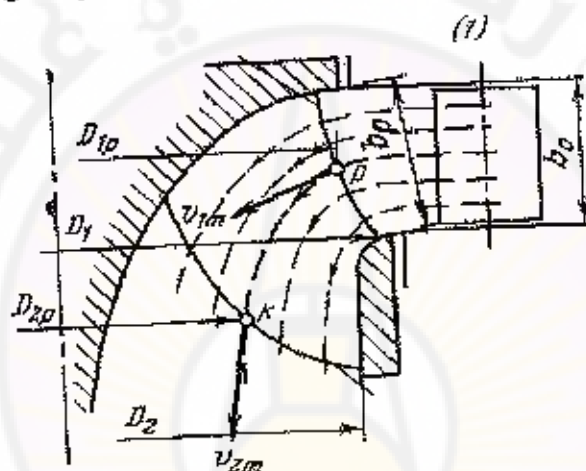
$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w} \quad (14-5)$$

من هنا نجد أن العلاقة بين (w, u, v) تشكل مثلث السرعات.

إن دراسة بنية العنفة تشير إلى وجود أشكال مختلفة للدواليب العاملة تبعاً لأنواع العنفات. لذا فإنه من الضروري وضع مبادئ عامة لتحديد المواصفات الهندسية لمختلف الدواليب العاملة، والتي تسمح بإنشاء متوازي أضلاع السرعات.

لندرس الحالة الأكثر عمومية: الدولاب العامل للعتفة القطرية - المحورية (عتفة فرنسيس):
المقطع النصفى للعتفة القطرية - المحورية، يبين الشكل (3-14) حواف الدخول للريش التي
نرمز لها بالدالة (1) ونقاط حواف الخروج للريش ونرمز لها بالدالة (2). ينقسم التيار الخارج
من جهاز التوجيه إلى عدة طبقات متساوية بالمساحة والارتفاع ويوضح الشكل أيضاً مسار كل
طبقة في الدولاب.

نحصل على خطوط منحنية (المنقطة)، عدا ذلك سطوح دوران كل من هذه الخطوط هو سطح
للتيار، أي أن السطح الذي لا يتقاطع في المسائل المنحرك (الحركة تعد طبقة الشكل). وبهذا
الشكل الخطوط المنحنية على المستوى المنصف هي عبارة عن مقاطع سطوح التيار.



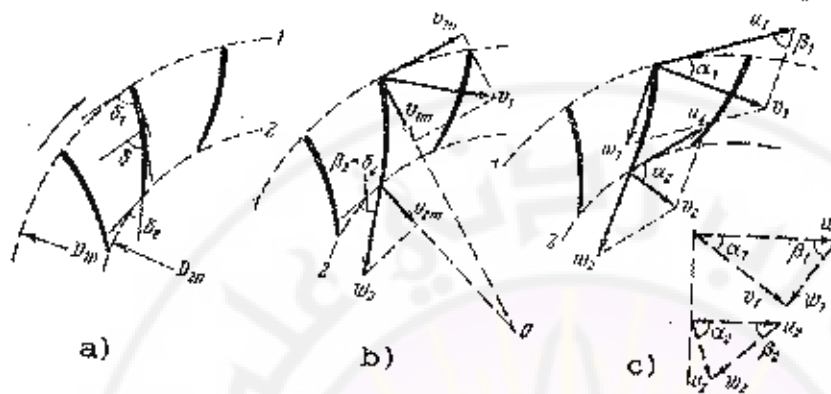
الشكل (3-14) التيار المنصف في العتفة القطرية - المحورية

لتمثيل صورة التيار الحاصل في الدولاب العامل بشكل واضح يجب دراسة الجريان في كافة
السطوح المنصفة للتيار. ولكن بهدف التسهيل يمكن اختيار أحدها (المنحني الأكثر وصفاً مثلاً
المنحني الأوسط PK).

لنفرض أن المنحني PK يمثل سطح التيار الأوسط في مقطع ريش الدولاب العامل وهو يأخذ
شكلاً فراغياً ماء لتسهيل إنشاء هذه المقاطع نحولها إلى مستوية ونحافظ فعلياً على القيمة الفعلية
للزوايا. استخدام هذه الطريقة (المذكورة أعلاه سيكون أوضح عند دراسة الحالة الخاصة القادمة).

يبين الشكل (4-4-a) مقطع الدولاب العامل للعتفة القطرية - المحورية هنا
(D_{2p} , D_{1p}) الأقطار الحسابية عند المدخل (1) وعند المخرج (2) لحواف ريش الدولاب (هذه

الأقطار أصغر من الأقطار الاسمية عند الدخول D_1 والخروج D_2 كما هو واضح من الشكل (14-3). يتحدد اتجاه ريش الدولاب العاملة في تلك النقطة عبر الزاوية δ بين المماس على الخط الوسطي والمماس على الريش المأخوذة في اتجاه معاكس لدوران الدولاب.



الشكل (14-4) متوازي أضلاع ومثلثات السرعة في الدولاب العامل للعنفة القطرية-المحورية

تُعطي شروط عمل العنفة (نظام العمل) من خلال بارامترين اثنين هما: التدفق Q وعدد دورات الدولاب العامل n وعند معرفة أبعاد الدولاب اندلتر يمكن تحديد مركبات متوازي أضلاع السرعات.

تُعطي السرعة الانتقالية المحيطية بالعلاقة:

$$u = \frac{\pi D n}{60} \quad (14-6)$$

مسقط شعاع السرعة المطلقة على المستوى المنصف - المركبة القطرية v_m على الشكل (14-3) بينت (v_{2m}, v_{1m}) ويمكن إيجادها تقريبياً بالعلاقة:

$$v_m = Q / F_1 \quad (14-7)$$

حيث F_1 المساحة الإجمالية للتيار في الدولاب وتكون عمودية على سطح التيار.

المركبات الأخرى الضرورية تؤخذ تبعاً لعلاقة المقطع المدروس.

مثلاً عند مقطع الدخول للدولاب العامل (I) (في العنفة القطرية - المحورية) $F_1 = \pi D_{ip} b_p$ حيث b_p ارتفاع فتحة الدخول للدولاب. وتبعاً للمعادلة السابقة:

$$v_{1m} = \frac{Q}{\pi D_{ip} b_p} \quad (14-8)$$

المركبة المحيطية v_{10} تتعلق بشروط خروج التيار من جهاز التوجيه وحسب العلاقة (14-4) نجد أن:

$$v_{10} = v_{00} \frac{D_{02}}{D_{1p}} \quad (14-9)$$

السرعة المطلقة عند الدولاب العامل هي عبارة عن مجموع شعاعي الشكل (14-4-b):

$$v_1 = v_{1m} + v_{10} \quad (14-10)$$

$$u_1 = \frac{\pi D_{1p} n}{60} \quad \text{نحدد } u_1 \text{ عند المدخل؛} \quad (14-6)$$

ننشئ متوازي أضلاع السرعة ونحدد w الشكل (14-4-c).

شكل متوازي أضلاع السرعة عند المدخل يتعلق بالزاوية α_1 بين u_1 و v_1 والزاوية β_1 بين u_1 و w_1 غالباً بدلاً من متوازي أضلاع السرعة ينشأ مثلث السرعة.

$$u_2 = \frac{\pi D_{2p} n}{60} \quad \text{و} \quad v_{2m} = Q / F_2 \quad (2) \quad \text{في مقطع الخروج للدولاب العامل}$$

عدا ذلك وبما أن شبك ريش الدولاب العامل كثيف للغاية فيمكن تقريباً اعتبار أن السرعة النسبية مماسة للريشة دوماً أي:

وتبعاً لهذا الشرط وحسب الشكل (14-4-c):

$$w_2 = v_{2m} / \sin \delta_2 \quad (14-12)$$

بمعرفة u_2 و w_2 حسب العلاقة (14-5)، ننشئ متوازي الأضلاع كما هو مبين في الشكل

(14-4-c) ونوجد v_2 . يتحدد شكل متوازي أضلاع السرعة عند الخروج بالزاوية α_2 و β_2 (مثلث السرعة مبين بشكل منقطع).

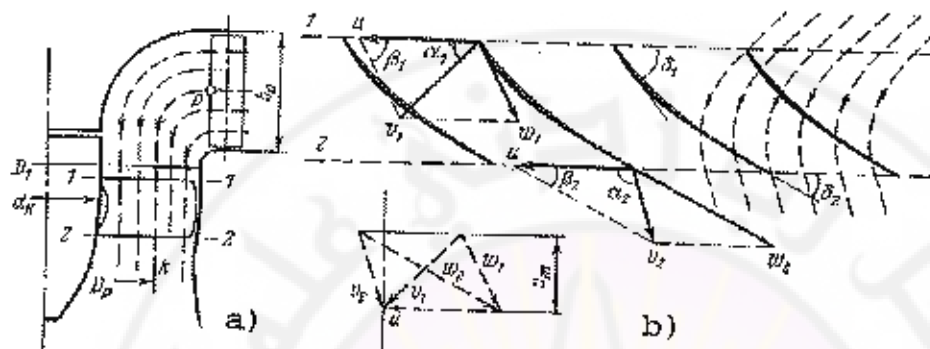
لا يقتصر إنشاء مثلثات السرعة على مقاطع الدخول والخروج فقط وإنما يمكن أيضاً إنشاء مثلث السرعة للمقاطع الوسطى، هذه المثلثات تحدد الأشعة المناسبة v_1 وتبعاً لها يمكن توضيح مسارات الحركة المطلقة للسائل في الدولاب العامل.

يجب الانتباه إلى استنتاج هام جداً وهو أن شكل مسار الحركة المطلقة لا يتعلق بقيمة السرعة v وإنما يتحدد باتجاهها فقط. تكون مسطوح التيار في الدولاب العامل اللعنقات المحورية قريبة من الأسطوانية الشكل (14-5-a) أي أن $D_{ip} = D_{2p} = D_p$ أما القطر الحسابي فيمكن إيجاده من العلاقة:

$$D_p = \sqrt{0.5(D_1^2 + d_K^2)} \quad (14-13)$$

شكل المقطع الأسطواني لمقطع الدولاب المبين على الشكل (5-14) أما الخصوصية فتتحدد في الآتي:

$$v_{1m} = v_{2m} = v_m = \frac{4Q}{\pi(D_f^2 - d_K^2)} \quad , \quad u_1 = u_2 = u = \frac{\pi D_p n}{60}$$



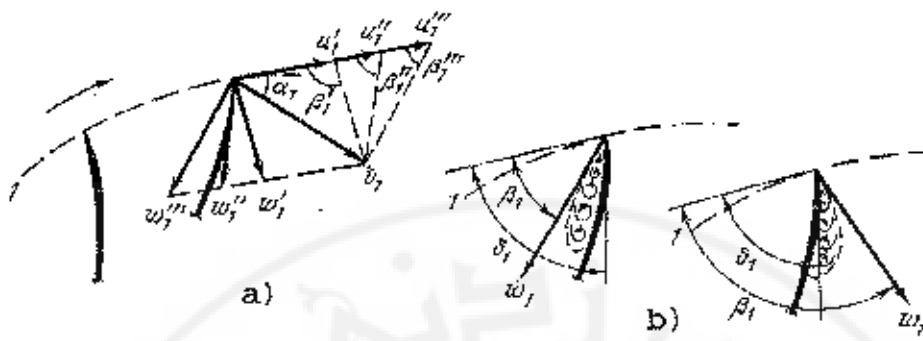
الشكل (5-14) التيار في العنفة المحورية

السرعة عند حافة الدخول (1) تتحدد كمجموع شعاعي: $\vec{v}_1 = \vec{v}_{1m} + \vec{v}_{1u}$ عدا ذلك يتم تحديد v_{1u} من (9-14) وتتساوى السرعة المطلقة v_2 تبعاً للعلاقين السابقين (11-14) و (12-14) فإن متوازي أضلاع السرعة الناتج مبين في الشكل (5-14b) مثلثات السرعة عند الدخول والخروج على المخطط نفسه وبما أنهما يمكن أن نفس القيمة u ونفس الارتفاع v_m ، يبين في الشكل من جهة اليمين مسارات الحركة المطلقة للسائل في الدولاب العامل.

14-3 - نظام عمل العنفة The mechanism of the turbine

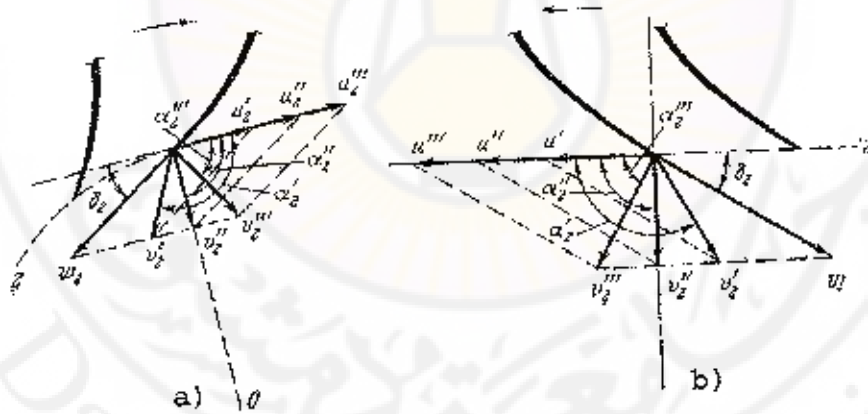
إن طريقة إنشاء متوازي أضلاع السرعة الفقرة (14-2) تبين أنه من أجل الدولاب العامل نفسه وعند ثبات فتحات جهاز التوجيه ($\alpha_0 = \text{const}$) فإن شكل متوازي أضلاع السرعة المحدد بالزوايا (β, α) يتعلق بعدد الدورات n والتدفق Q .

ليبين كيف تؤثر هذه البارامترات في الجريان نفرض أن التدفق Q ثابت والمتغير هو عدد الدورات n ، عند ذلك وعند حواف الدخول لريش الدولاب العامل (1) فإن v_1 ستبقى ثابتة وتبعاً للعلاقة (10-14) فإن v_2 لا تتعلق بعدد الدورات n . وبالتالي فإن (w_1, u_1) سوف تتغير وكما هو مبين على الشكل (6-14a).



الشكل (6-14) الجريان عند حواف الدخول إلى ريش الدوالات العامل.

نجد من الشكل أن شعاع السرعة النسبية w_1 يغير اتجاهه، فعند سرعات دورانية صغيرة ينحرف باتجاه ناحية الدوران $\delta_1 > \beta_1'$ ، أما عند سرعات دورانية كبيرة (عكس الاتجاه المفروض) $\delta_1 < \beta_1''$ ، وعندما $\delta_1 = \beta_1$ فإن جميع المسائل عند حافة الدخول للريشة يتم تحت زاوية كما هو مبين على الشكل (6-14-b)، مترافق مع تشكل منطقة أعاصير، تؤدي إلى ضياعات إضافية للطاقة.



الشكل (7-14) الجريان عند نهايات الخروج من ريش الدوالات العامل

أكثر الحالات قبولاً هي النظام المسمى نظام الدخول الاعتيادي (بدون صدم هيدروليكي - طرق) وذلك عندما $\delta_1 = \beta_1$.

عند نهايات الخروج (2) تتعلق السرعة النسبية w_2 فقط بالتدفق Q والزاوية α_2 حسب العلاقة (14-12) ولا تتعلق بعدد الدورات n . ولكن u_2 تتناسب مع n لذا حسب (5-14) فإن السرعة المطلقة v_2 سوف تتعلق بـ n . يمكن ملاحظة هذه العلاقة من خلال متوازي أضلاع السرعة عند حواف الخروج من الدولاب العامل في العنفة القطرية - المحورية الشكل (a-7-14) والمحورية (b-7-14). وهي تشير إلى أنه عند زيادة n فإن الزاوية تتناقص ويدور الشعاع v_2 باتجاه الدوران وعندها يمكن ملاحظة ما يلي:

1- على الرغم من ثبات التدفق Q فإن قيمة شعاع السرعة v_2 تتعلق بـ n وتتناسب القيمة الدنيا لقيمتها المطلقة مع شرط توضع الشعاع v_2 في المستوى المنصف (متجه إلى مركز الدوران أو موازي لمحور الدوران) أي عندما تكون $\alpha_2 = 90^\circ$.

2- في الحالة العامة يملك التيار خلف الدولاب العامل صفة دورانية (الجولان $\Gamma_2 \neq 0$)، وعدا ذلك ($\alpha_2 < 90^\circ$)، عندها يكون اتجاه التيار متوافقاً مع اتجاه دوران الدولاب، أما إذا كانت ($\alpha_2 > 90^\circ$) عندها يدور التيار في الاتجاه المعاكس. عندما تكون $\alpha_2 = 90^\circ$ فقط فإن الجولان $\Gamma_2 = 0$. ونظام العمل الموافق لهذه الحالة ($\alpha_2 = 90^\circ$) أن تكون v_2 أصغرية ويسمى هذا النظام بنظام العمل الطبيعي (الاعتيادي)

بما أن الضياعات عند مخرج الدولاب تتناسب مع v_2 ، لذا فإن نظام عمل العنفة القريب من نظام الخروج الطبيعي يوافق أقل الضياعات وبالتالي فإنه يعد النظام الأكثر قبولاً. النظام الذي يتحقق عنده وينفس الوقت شرط الدخول الاعتيادي (بدون طرق) والخروج الطبيعي يتوافق مع أقل ضياعات ممكنة وبالتالي فهو يوافق أعلى قيمة لمردود عمل العنفة ويسمى نظام العمل المثالي.

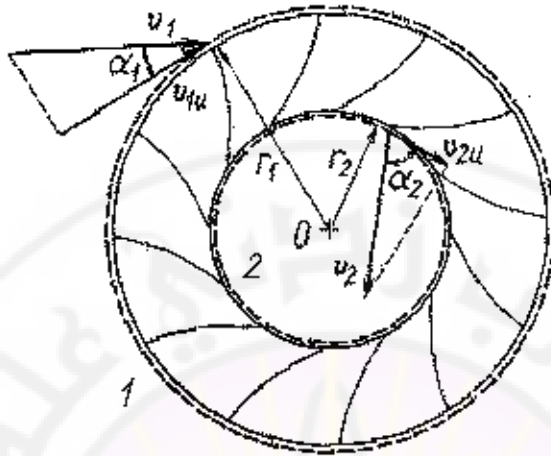
14-4 - معادلة الطاقة الأساسية للعنفة (معادلة أويلر)

The fundamental power of the turbine (Euler's Formula):

لتحديد المؤشرات الطاقية في الدولاب العامل نستخدم قانون عزم كمية الحركة في الصيغة (3-14) نحدد سطوح تحكم (1 و 2) تتضمن ريش الدولاب العامل الشكل (8-14) حسب مقطع الدولاب العامل المبين على الشكل (4-14).

من أجل تيار مستقر مركزي داخل المجال المحدد فإن $(v_u r)$ لا تتغير بتغير الزمن وبالتالي فإن $d(v_u r)$ سيكون مساوياً للفرق $(v_{1u} r_1 - v_{2u} r_2)$ عند سطوح التحكم أما كتلة السائل المار عبر الدولاب العامل خلال الزمن dt نتحدد بالعلاقة: $m = \rho \cdot Q \cdot dt$ من أجل هذه الشروط فإن قانون عزم كمية الحركة يأخذ الصيغة التالية:

$$\rho \cdot Q \cdot (v_{2n} r_2 - v_{1n} r_1) = \sum M_0$$



الشكل (8-14) السرعة عند مدخل ومخرج ريش الدولاب العامل

يحدد مجموع عزوم القوى الخارجية المؤثر في عنصر حجمي محدد من السائل بالنسبة لمحور الدوران $\sum M_0$ بما يلي:

- عزوم قوى الضغط على السطوح (1 و 2) تساوي الصفر (معزومة).
- قوى الثقالة لا تعطي عزوماً (تتقاطع مع المحور O).
- قوى الاحتكاك عند السطوح المحددة وقوى الضغط والاحتكاك للسائل على الريش تعطي عزوماً بالنسبة لمحور الدوران ولكن عزوم قوى الاحتكاك عند السطوح صغير لدرجة يمكن إهمالها.
- يبقى العزم المؤثر في السائل من جهة ريش الدولاب العامل M ، ويكون العزم المطلوب للدولاب الدائر الناتج عن تأثير السائل في الريش مساوياً M حيث:

$$r_2 = D_{2p} / 2 \quad , \quad r_1 = D_{1p} / 2$$

حسب العلاقة (14-14) وتحليل قيم (v_{2n}, v_{1n}) نجد:

$$M = \rho Q (0,5 D_{1p} v_1 \cos \alpha_1 - 0,5 D_{2p} v_2 \cos \alpha_2) \quad (14-15)$$

باستخدام صيغ الجولان الوسطي حسب العلاقة (2-14):

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= (\pi D_{1p} v_1 \cos \alpha_1) \\ \Gamma_2 &= (\pi D_{2p} v_2 \cos \alpha_2) \end{aligned} \quad (14-16)$$

يمكن التعبير عن عزم الدولاب العامل من خلال فرق الجولانات الوسطية عند المدخل والمخرج:

$$M = \frac{\rho}{2\pi} Q (\Gamma_1 - \Gamma_2) \quad (14-17)$$

تشير هذه الصيغة بوضوح إلى أنه يتشكل عزم القتل على الدولاب العامل فقط في الحالة التي

تعمل فيها ريش الدولاب على تغيير جولان التيار.

تؤخذ إشارة Γ موجبة إذا كانت v_{H1} متوافقة مع اتجاه السرعة المحيطة u .

بمعرفة قيم العزم وإعطاء سرعة دورانية للدولاب العامل يمكن تحديد الاستطاعة الناتجة عنه:

$$N_{PK} = M \cdot \omega \quad \text{حيث } N_{PK} [N \cdot m], \quad \omega [1/s] \text{ السرعة الدورانية, } N_{PK} [Watt].$$

في الوقت نفسه يمكن استنتاج استطاعة العنفة من العلاقة (10-14) فنجد أن:

$$M \cdot \omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{H1} \quad (14-18)$$

حيث H ضاغط العنفة، η_{H1} المردود الهيدروليكي.

بالتعويض في هذه العلاقة بقيمة العزم حسب العلاقة (15-14) وباعتبار أن قيم السرعات

المحيطة $u_1 = 0,5 D_{p2} \omega$ ، $u_2 = 0,5 D_{p2} \omega$ نجد:

$$H \eta_{H1} = \frac{1}{g} (u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2) \quad (14-19)$$

باستخدام الصيغة (17-14) نستنتج:

$$H \eta_{H1} = \frac{\omega}{2\pi g} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \quad (14-20)$$

الصيغتان (19-14) و (20-14) تمثلان المعادلة الأساسية للعنفات أو معادلة أولر.

يمثل الجزء اليساري من المعادلة $H \eta_{H1}$ الطاقة (مقدرة بالجول) التي يحصل عليها الدولاب من

سائل وزنه $1 [N]$ عند مروره عبر منظومة ريش الدولاب العامل، بينما يحوي الجزء الأيمن من

هذه المعادلة البارامترات الحركية للتيار عند الدخول إلى الدولاب وعند الخروج منه

من معادلة أولر في الصيغة (20-14) يمكن استنتاج ما يلي:

1- إن النظام الأمثل لعمل العنفة يتحقق عندما يكون نظام العمل قريباً لشروط الخروج الطبيعي

أي عندما يكون الجولان $1' = 0$ أو صغيراً، $\Gamma_1 = \Gamma_0$ الجولان الناتج عن جهاز التوجيه ومن

هنا يمكن تحديد قيمة Γ_0 المطلوبة حسب علاقته بـ $(H$ و $\omega)$.

2- أثناء مرور الماء عبر الدولاب العامل للعنفة فإن جولان التيار يجب أن يتناقص. وبالتالي

ينشئ الدولاب العامل جولاناً ناتجاً عن جهاز التوجيه.

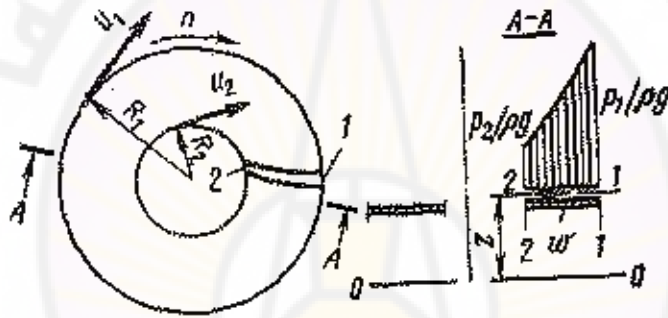
طريقة ثانية لاستنتاج معادلة أويلر:

تسمح هذه الطريقة بمعرفة آلية تشكل الطاقة في الدوالب العامل للعنفه، يعتمد الاستنتاج هنا على معادلة برنولي. وفي هذه الحالة تستخدم معادلة برنولي من أجل الحركة النسبية.

ليكن لدينا قرص يدور بعدد دورات n [r.p.m] الشكل (9-14) مثبت عليه أنبوب (2-1) يتحرك داخل الأنبوب سائل من (1) باتجاه (2) بسرعة W (نسبة للأنبوب). في هذه الحالة تأخذ معادلة برنولي الشكل التالي نسبة لمستوي القياس (0-0):

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (14-21)$$

حيث h_{1-2} ضباغات الطاقة في الجزء (2-1).
السرعات المحيطية (الانتقالية) u_2, u_1 .



الشكل (9-14) توضيح لمعادلة برنولي من أجل الحركة النسبية

هناك خاصية يجب أخذها بالاعتبار وهي أن الطاقة النوعية للسائل عند حركته على كامل طول الأنبوب تتناقص أو تزداد تبعاً لتغير السرعات المحيطية u_2, u_1 . هذه الخاصية تستخدم في الدوالب العامل للعنفه وفي الأهمية بين الريش، لذا نجد من المعادلة:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 - \frac{p_2}{\rho g} - z_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_{1-2} \quad (14-21-a)$$

الطاقة النوعية للسائل عند مدخل الدوالب العامل: $e_1 = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g}$ وهذه الطاقة عند

مخرج الدوالب هي: $e_2 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$ و الفرق الطاقات النوعية:

$$e_1 - e_2 = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 - \frac{p_2}{\rho g} - z_2 - \frac{v_2^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g} = H_{PK}$$

باستبدال العلاقة داخل الأقواس وحسب (a - 21 - 14) نجد:

$$H_{PK} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

نكتب: $H_{PK} \cdot h_{1-2} = H \eta_H$ ومنه نستنتج معادلة أولر:

$$\eta_H = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (14-22)$$

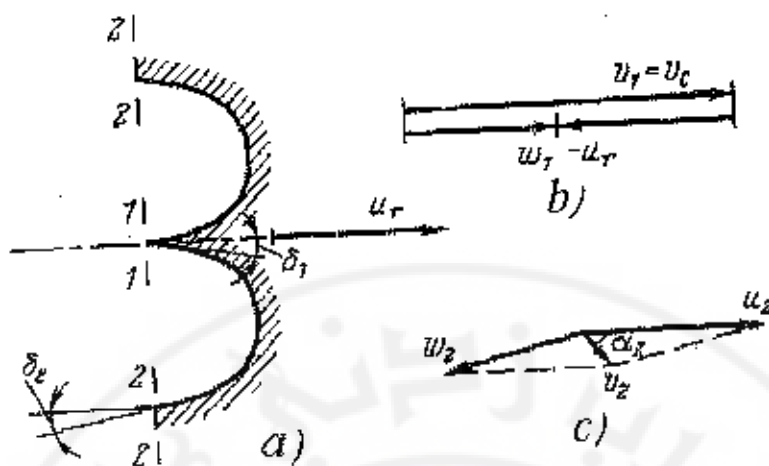
التي تبين بشكل واضح العلاقة الخطية لـ $H \eta_H$ مع مثلثات السرعة عند الدخول والخروج من الدولاب العامل، وتوضح هذه العلاقة ارتباط ضاغط العنف بشكل الدولاب العامل.

في العنفات المحورية $u_1 = u_2$ وبالتالي فإن $H \eta_H$ يتحدد فقط من خلال السرعات المطلقة والنسبية والتي لا يمكن أن تكون كبيرة جداً لأن القوائد ستكون أيضاً كبيرة جداً ومن هنا يتم تحديد استخدام العنفات المحورية وفقاً للضاغط، ومع زيادة H تنتقل إلى العنفات القطرية والقطرية - المحورية والتي تؤثر فيها السرعات المحيطية u_1, u_2 عدا ذلك كلما كبر H ازداد دور هذا العامل ويمكن تفسير ذلك بأن النسبة D_1/D_2 تزداد في العنفات ذات الضغط العالي.

14 - 5 - خواص دورة العمل في العنفات المغرفية:

The characteristics of the mechanism of Pelton turbine

تتميز العنفات المغرفية عن الرد فعلية أن الدولاب العامل يدور في الهواء ويستفيد فقط من الطاقة الحركية للسائل كما أن الماء يؤثر فقط في جزء من الريش في وقت واحد، يحدد هذان العاملان بعض خواص دورة عمل العنفات المغرفية. من أجل كافة عمل الفتححات فإن اتجاه وقمة سرعة التيار v_c تبقى ثابتة (الثابت ρ يتغير ببطء شديد) السرعة عند حافة دخول الريشة (I) الشكل (10 - 14) تساوي تقريباً سرعة التيار: $v_f = v_c$



الشكل (14-10) حركة التيار في الدولاب العامل للعنفة المغرفية

أما السرعة المحيطية (الانقالية) لنفس مقطع الريشة فتكون على مسافة (r) من محور الدوران:

$$u_1 = u_2 = u_r = 2 \pi r n / 60$$

 من خلال ذلك نجد أن متوازي أضلاع السرعة $w_1 = v_1 - u_1$ عند حافة دخول الريش يمثل بخط مستقيم الشكل (14-10-b) وتتوافق w_1 مع اتجاه التيار. وبالتالي عند الاقتراب من شرط الدخول بدون صدمات فإن زاوية حافة الدخول δ_1 الشكل (14-10-a) يجب أن تكون أصغرية (سكين).

أما متوازي أضلاع السرعة عند حافة الخروج فيحدد على اعتبار أن السرعة النسبية تتغير ببطء ويمكن اعتبار أن $w_1 = w_2$ أما اتجاهها فيتوافق مع δ_2 وعندها نحصل على الشكل (14-10-c): $v_2 = w_2 + u_2$ وبما أن الزاوية δ_2 صغيرة فإن متوازي الأضلاع سيكون ممدوداً، وبغض النظر عن قيم السرعات w_2 و u_2 فإن السرعة v_2 تبقى غير كبيرة. ويتوافق مع الشكل (14-7) من السهل الاقتناع أن تغير عدد الدورات n رغم ثبات Q و w يؤدي إلى تغير الزاوية α_2 والسرعة v_2 . علماً أن القيمة الدنيا لـ v_2 تتناسب مع الزاوية $\alpha_2 = 90^\circ$ (وهو شرط الخروج الطبيعي).

تبين حركة تيار السائل أن الدولاب العامل للعنفة المغرفية يغير عزم سرعة السائل نسبة إلى محور الدوران وبالتالي ولتحديد عزم الدولاب الدائر يمكن استخدام العلاقة (14-14) في

السباق نفسه يمكن الحصول على معادلة أولر بالصيغة (14-19) و (14-22). مع الملاحظة: لا يمكن هنا استخدام تحديد الجولان أي لا يمكن استخدام الصيغة (14-20). تسمح العلاقة (14-22) بالوصول إلى نتيجة جيدة إذا أخذنا بعين الاعتبار أن السرعة المحيطية عند الدخول والخروج ($w_2 = w_1$) أما السرعة النسبية ونتيجة للحركة عند سطح الريشة والاحتكاك فإنها تتناقص بعض الشيء ($w_1 > w_2$) لذا من (14-22) نجد:

$$H \eta_H = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

بدلالة العلاقة $v_c = \varphi \sqrt{2gH}$ وقبول الشروط:

$$\frac{v_1^2}{2g} = \varphi^2 H \quad \text{و} \quad v_1 = v_c \quad \text{نجد:}$$

$$\eta_H = \varphi^2 - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2gH} - \frac{v_2^2}{2gH} \quad (14-23)$$

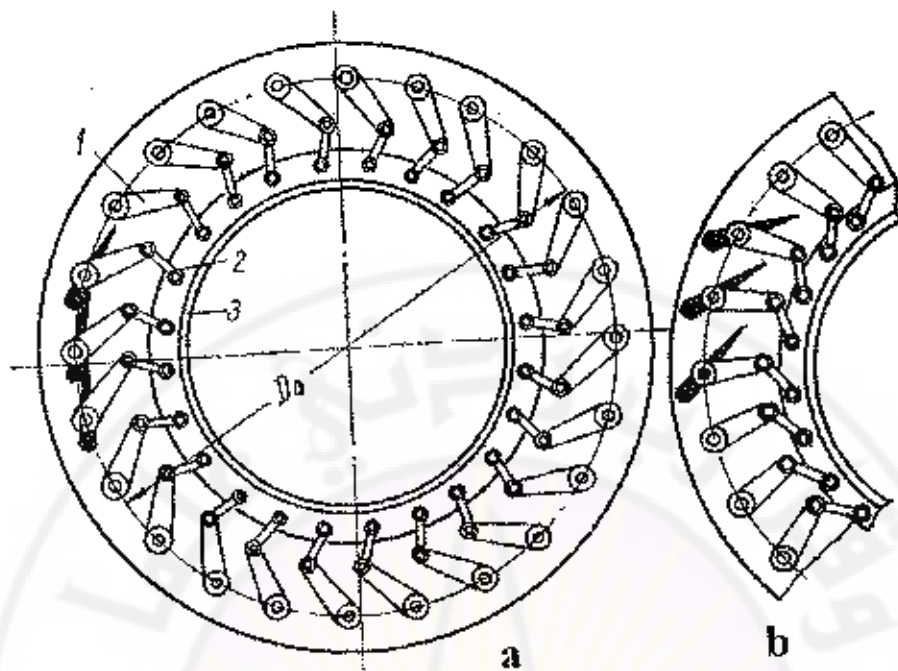
تشير العلاقة (14-23) إلى أن المردود الهيدروليكي يتألف من ثلاثة مكونات: الضياعات في النفثة والضياعات عند الريشة و الضياعات عند الخروج التي يعبر عنها بـ $\frac{v_2^2}{2gH}$. لذا يشترط تأمين سطوح ناعمة للريش وإنقاص v_2 بهدف تحسين المردود الطاقى العنفات المغرقية.

14 - 6 - أنظمة التحكم والقيادة Control systems:

14 - 6 - 1 - ميكانيزم تنظيم استطاعة العنفات:

The mechanism of controlling the turbine capacity

يجب أن يؤمن ميكانيزم النقل وضعية واحدة لكافة ريش التوجيه (نفس القيمة لـ a_0 عند أي من الفتحات من $a_0 = 0$ وحتى $a_0 = a_{max}$). أكثر ميكانيزمات نقل ريش التوجيه استخداماً هو الميكانيزم المبين على الشكل (11-14). على الجهة العلوية لريش التوجيه تتوضع أذرع مصممة فرق غطاء العنفة توصل هذه الأذرع مع حلقة التنظيم (3) بواسطة آلية الذراع والمرفق (2). تعد هذه العناصر الثلاثة نواة ميكانيزم النقل الأساسي.



الشكل (14-11) مخطط ميكانيزم توصيل ريش التوجيه

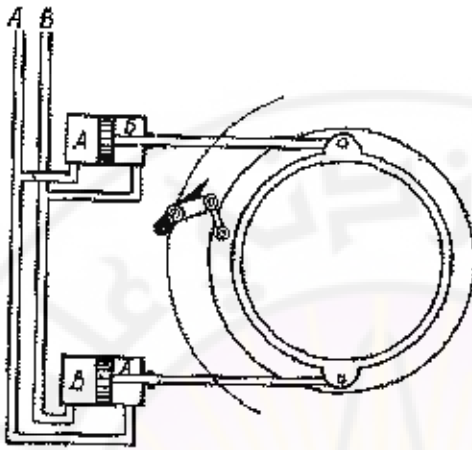
يبين الشكل (14-11-a) الميكانيزم في وضعية الإغلاق التام، أما إذا فتلت حلقة التنظيم عكس عقارب الساعة فعندها ستدور كافة الأذرع بالزاوية نفسها ومعها ريش التوجيه وتصبح العنفة بوضعية الفتح، يبين الشكل (14-11-b) وضع عناصر الميكانيزم في حالة الفتح التام. إذا لتغيير استطاعة العنفة لا بد من تدوير حلقة التنظيم.

14 - 6 - 2 - المحرك الموازر - محرك التشغيل (السيرفو موتور) لجهاز التوجيه
:Servo-motor

مخصص لتحريك حلقة التنظيم وتغيير فتحات ريش التوجيه من أجل تنظيم استطاعة العنفة.

يجب أن يكون المحرك الموازر (السيرفو موتور) قادراً على توليد الجهد المطلوب اللازم تطبيقه للتغلب على الحمولات الكبيرة الناتجة عن تأثير التيار وريش التوجيه في آلية النقل كما يجب أن يحقق السيرفو موتور التغيير الدقيق والسهل لفتحة جهاز التوجيه في العنفة، يتم تحقيق هذه الخواص في السيرفو موتور الهيدروليكي بمساعدة الزيت المضغوط بضغط عالٍ وتستخدم هذه الأنواع في كل حالات تنظيم العنفات المضخمة.

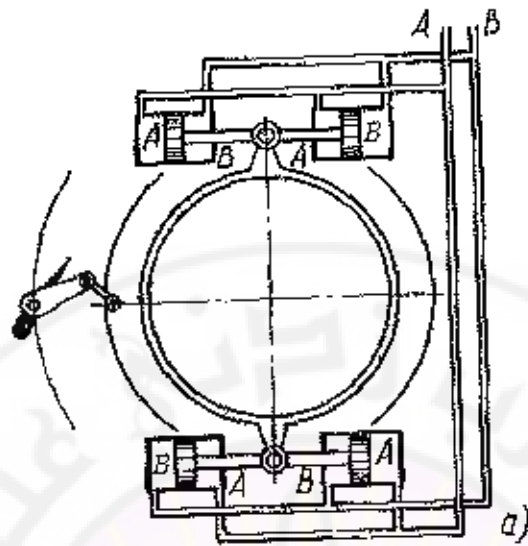
يبين الشكل (13- 14) مخطط محرك موازر لجهاز توجيه العنفة وهو من الأنواع واسعة الانتشار، ويبين محركي سيرفو يتألف كل منهما من أسطوانة ومكبس موصول بذراع مع حلقة التنظيم.



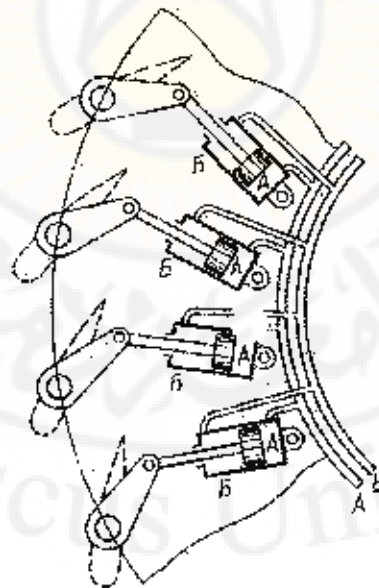
الشكل (12- 14) مخطط توصيل جهاز التوجيه مع المحرك الموازر بأسطوانتين

يعمل هذا السيرفو وفق مبدأ العمل التالي: يدخل الأنبوب A إلى الجوف A من الأسطوانة بينما يدخل الأنبوب B إلى الجوف B، يدفع زيت بضغط عالي في الأنبوب A بينما يوصل الأنبوب B من اليسار فيبدأ المكبس وذراع السيرفو بالحركة التي تؤدي لتدوير حلقة التنظيم باتجاه عقارب الساعة وبالتالي إغلاق العنفة، وبشكل عكسي فإذا دفع الزيت ذو الضغط العالي في الأنبوب B وكان الأنبوب A موصولاً إلى اليسار عندها ستدور حلقة التنظيم بالاتجاه المعاكس فاتحة العنفة.

تستخدم غالباً محركات موازنة رباعية تتوضع على غطاء العنفة وهي تسمح بإنفاص قطر السيرفو واختصار طول ذراع التحكم مثل هذا النوع مبين على الشكل (13- 14)



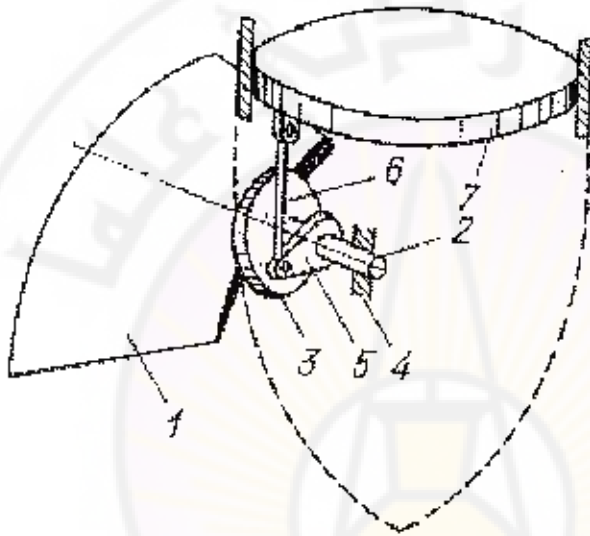
الشكل (13 - 14) مخطط توصيل جهاز التوجيه مع السيرفو بأسطوانتين (a . b) ذو شكل قوس من أجل العنقافات القطرية - المحورية المضخمة يستعمل لكل ريشة توجيه سيرفو موتور مستقل الشكل (14 - 14) وهذا يسمح بتجنب التنظيم الثقيل للحلقة، إلا أن عدد المحركات هنا يساوي عدد ريش التوجيه (20 ÷ 24) الذي يعقد نظام الضغط.



الشكل (14 - 14) مخطط توصيل ريش التوجيه بمحركات سيرفو مستقلة

14 - 6 - 3 - آلية تدوير ريش الدولاب العامل في العنققات ذات الريش الدورانية:

يجب أن تؤمن آلية توصيل الريش تغيير الزاوية و التوضع الدقيق للريش في المجال المطلوب عادة ($30 \div 40^\circ$) مثلاً من $\varphi = -15^\circ$ وحتى $\varphi = +20^\circ$ عند الشوط الواحد، يجب أن يكون نظام توصيل الريش قادراً على تحمل الإجهادات الكبيرة الناتجة عن ضغط الماء والقوى الطاردة المركزية وقوى الاحتكاك عند سطوح الاستناد وأن تتوزع بدقة على جسم الدولاب الدائر، حيث تسهل إمكانية ضبطها.



الشكل (14 - 15) مخطط توصيل مبدئي لميكانيزم توصيل ريشة الدولاب العامل لعنقة ذات ريش دورانية

يبين الشكل (14 - 15) مخططاً مبدئياً لنظام آلية التوصيل، حيث يثبت المقعد (2) الذي يملك نقطتي ارتكاز على الجسم (3) و (4) إلى قلنسوة الريشة (1)، على المقعد (2) تحمل البعثة (5) الموصولة بالذراع (6) الموصول بدوره إلى مكبس السيرفو للدولاب العامل. تتم إزاحة المكبس (7) بواسطة الذراع (6) مما يؤدي لدوران المقعد (2) وبالتالي الريشة (1)، حركة شوط المكبس للأسفل تؤدي لزيادة زاوية توضع الريشة. يتم انتقال مكبس السيرفو والحفاظ عليه في الموضع السفلي من خلال الضغط العالي للزيت المضغوط والذي يدفع عبر نظام ضبط العنقة.

14 - 6 - 4 - تنظيم عمل العنفات :Regulating turbines motion

خلال استثمار العنفات المائية تنجز عمليات مختلفة تجعل من الضروري تغيير فتحات ريش التوجيه من أجل تنظيم استطاعة العنفة وكذلك عند عمليات الإقلاع والتوقف . تنفذ هذه العمليات بمساعدة منظومة تعبير آلية للعنفة . والتي تحافظ على عدد دورات ثابتة من أجل نظام عمل محدد وتساعد على التوزيع الأمثل للاستطاعة بين العنفات العاملة وتعطي إمكانية الإيقاف السريع للعنفة في حالات الطوارئ .

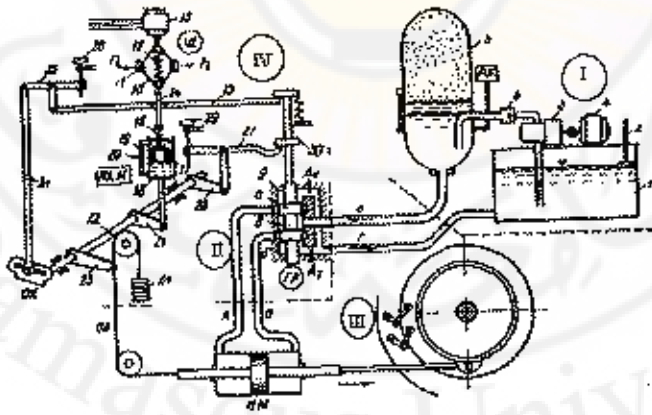
14 - 6 - 4 - 1 - التنظيم الآلي لعنفة فرنسيس :

The automatical regulation of Francis turbine

ويتكون هذا النظام كما هو مبين بالشكل (14-16) من ثلاث مجموعات من العناصر

- منظومة ضغط الزيت (I) : التي يؤمن إعطاء الزيت المضغوط .
- المنظم (II) : الموزع الرئيسي لجهاز التوجيه .
- آلية التنفيذ والمحرك الموازر واسطوانة القوى (III) : وتتكون من ميكانيزم التنفيذ المرتبط مع حلقة التعبير للعنفة وتسمى جهاز التوجيه مع السيرفو .
- جهاز التنظيم الآلي لعدد الدورات (IV) .

هذه المجموعة ترتبط فيما بينها بواسطة مجموعة أنابيب فير تبط (I) مع (II) عبر الأنابيب a و b بينما يرتبط (II) مع (III) عبر الأنابيب A و B تعمل هذه المنظومة بكمية زيت ثابتة .



الشكل (14-16) المخطط الأساسي للتنظيم الآلي لعنفة فرنسيس

جهاز ضغط الزيت (I) :

يتألف من خزان (1) مملوء بالزيت بواسطة خزان التزويد (2) ، مضخات حجمية (3) (الولبية أو مسننية) ، موصولة إلى محرك كهربائي (4) ، و حجرة استقبال الزيت المضغوط أي خزان الزيت المضغوط (5) (زيت - هواء) يكون ثلثا حجمها مملوءين بهواء مضغوط و الثلث الباقي مملوءاً بالزيت .

عند عمل منظومة التحكم يتحرك الزيت المضغوط الموجود في الأنبوب δ بفعل المدخنة إلى الموزع و منه عبر الأنبوب يصب في الخزان (1) . تشغل المضخات الحجمية عندما يصبح الضغط في المدخنة أقل بمقدار $[MPa] (0,2 - 0,3)$ من الضغط الأصغري $[MPa] 2,5$ أو $[MPa] 4$ و ذلك بواسطة منظم ضغط PH عندما يصل الضغط إلى القيمة المحددة يرسل منظم الضغط إشارة لإيقاف المضخة . يغلق الصمام العكسي (صمام عدم الرجوع) (6) و يحرر المضخة من ضغط الزيت .

المنظم (II) وآلية التنفيذ (III):

يحتوي المنظم بداخله عناصر التوجيه و التوزيع و التنظيم . العنصر الأساسي لتوزيع الزيت تحت الضغط هو الموزع الرئيسي و الذي يتألف من مكبس $plunger$ (8) وأسطوانة (9) يتحرك المكبس بداخلها .

و يصنع في جسم الأسطوانة قناتين ارتفاعهما أقل من ارتفاع حلقات التوزيع للمكبس . ينقل الزيت إلى منتصف الموزع عبر الأنبوب B تحت ضغط جهاز ضغط الزيت ، الفراغان العلوي و السفلي للموزع يرتبطان مع جهاز ضغط الزيت عبر الأنبوب a و ترتبط القناتان في جسم الموزع الرئيسي (II) بالأنابيب A و B المربوطة بدورها إلى آلية التنفيذ (أسطوانة القوى - سيرفوموتور) .

عندما يكون الموزع في الوضعية الوسطية تكون القنوات مغلقة بفعل المكبس (8) و الضغط في الأنبوب A وكما في الفراغات الموافقة لأسطوانة القوى . إذا ارتفع المكبس عن الوضعية الوسطية فإن الزيت المضغوط في الأنبوب B سيصل إلى الفراغ الموافق من أسطوانة القوى عبر الأنبوب A . الأنبوب B و الفراغ الموافق لأسطوانة القوى ترتبط مع الأنبوب Γ و من خلاله يصب الزيت في الخزان (1) لجهاز ضغط الزيت بفعل فرق الضغط الناشئ فإن مكبس أسطوانة القوى سيتحرك إلى اليمين و يدير حلقة التحكم (التنظيم) باتجاه عقارب الساعة وبالتالي يتم إغلاق جهاز التوجيه وبشكل عكسي إذا دفع الزيت ذو الضغط العالي في الأنبوب

الأخر عندها تدور حلقة التحكم (التنظيم) بعكس عقارب الساعة (الاتجاه المعاكس) وتقوم بفتح العنفة و بقدر ما يكون شوط حركة المكبس أكبر ستكون حركة المكبس أسرع و كذلك سيكون فتح العنفة أسرع .

سرعة حركة مكبس أسطوانة القوى تقيد بمسارب ، عند الإغلاق بـ A_3 و عند الفتح بـ A_0 .

جهاز التنظيم الآلي لعدد الدورات (IV) :

تتألف من عنصر حساس و منظومة نقل و ميكانيزم و عناصر توجيه .

يتبع العنصر الحساس بشكل مستمر عدد دورات المنوبة ، في المنظم الهيدروميكانيكي يستخدم نواس طارد مركزي كعنصر حساس و الذي يتكون من ذراع فولاذي (10) مع أوزان (11) مثبتة إليها و نابض (12) . عدد دورات النواس متناسبة بشكل كبير جداً مع عدد دورات العنفة و يرتبط كهربائياً مع محرك نواس (13) و مولد نواس مربوط مع المنوبة . مع زيادة عدد الدورات تزداد القوة الطاردة للنواس F_i تبعد الأوزان و ينضغط النابض (12) نتيجة لذلك فتتحرك العتلة (14) . و بالتالي كل عدد دورات للنواس يوافق وضعية محددة تماماً للعتلة (14) . تنقل حركة العتلة (14) إلى الموزع الرئيسي عبر العتلة (15) التي يثبت أحد طرفيها بينما يضغط الطرف الآخر على المكبس (8) بواسطة النابض .

تمثل مجموعة النواس والعتلة (15) والمكبس (8) الجهاز الرئيسي لتنظيم عدد الدورات . وهي تعمل على النحو التالي :

من أجل عدد دورات محدد للمنوبة و النواس n_0 (وضعية المجموعة مبينة على الشكل (14-16)) يكون الموزع الرئيسي في وضع وسطي و مكبس أسطوانة القوى ساكن ، عند نقصان استطاعة المولدة تصبح استطاعة العنفة أكبر الأمر الذي يؤدي إلى زيادة عدد الدورات ، يستقبل هذا التغيير في اللحظة نفسها من قبل النواس و ترتفع العتلة (14) إلى الأعلى وتنتقل هذه الحركة إلى المكبس (8) بالاتجاه نفسه عبر العتلة (15) ، و يتحرك مكبس أسطوانة القوى نحو اليمين ويفتح جهاز التحكم . إذا ازدادت استطاعة المولدة ، نقص عدد الدورات وتحركت العتلة (14) نحو الأسفل وهذا يتوافق مع حركة المكبس بالاتجاه نفسه (8) وتفتح أسطوانة القوى العنفة .

للنظام الموصوف سيطرة رئيسية تتمثل بعدم استقراره ، أي أنه من أجل استطاعة ثابتة فإن كل منظومة التعبير تقوم باهتزازات غير متخامدة . يظهر تأثير ذلك أنه قبل التنظيم فإن مكبس

أسطوانة القوى سيكون في حالة اهتزاز مستمر حول وضعيته الوسطية. بالتخلص من عدم الاستقرار تتم إضافة عنصر خاص لتأمين الاستقرار يسمى الوصلة العكسية ، الذي يؤدي لتخامد الاهتزازات الذاتية للمنظومة .

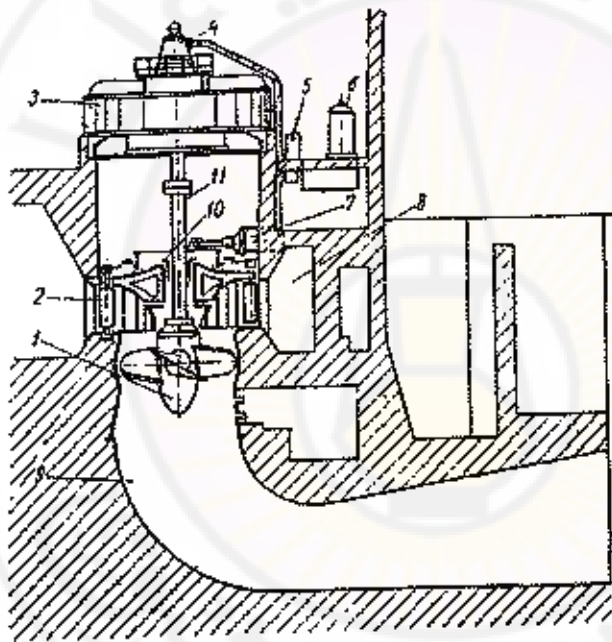
يعلق المكبس (17) إلى العتلة (14) بشكل حر بواسطة النابض (16) ، يوضع المكبس داخل الأسطوانة المملوءة بالزيت (18) ، الفراغان العلوي والسفلي متصلان بالأنبوب (19) حيث يتوضع عليه عنصر تنظيم (20) ، ذراع المكبس (18) يتصل بشكل متفصل مع الصفيحة المنحنية (21) المثبتة على عمود الرابطة العكسية (22) . عبر الصفيحة المنحنية (23) وعبر الرابطة العكسية OB (المرنة أو الصلبة) يتصل هذا العمود بذراع مكبس أسطوانة القوى ، تؤمن الأتقال (24) انحناء مستمر للرابطة العكسية المرنة OB وبالتالي عند حركة مكبس القوى يدور العمود (22) .

عند ثبات الفتحة a_0 لا يظهر أي تأثير على عمل المنظومة ولكن عندما يتحرك مكبس أسطوانة القوى ويغير الفتحة a_0 بين شفرات موجه العنفة يؤثر ميكانيكياً دوماً باتجاه معاكس لتأثير النواس .

عندما تتناقص استطاعة المولد ، يزداد عدد الدورات ويتحرك العتلة (14) ويتحرك معها المكبس (8) باتجاه الأعلى . ويتحرك مكبس أسطوانة القوى باتجاه اليمين محققاً شوط الإغلاق . تدوير الرابطة العكسية العمود (22) باتجاه عقارب الساعة وتتحرك الأسطوانة (18) باتجاه الأسفل وتقل معها المكبس (17) ، نتيجة لذلك ينضغط النابض (16) ويسحب العتلة (14) ، و يسحب معه المكبس (8) من منظومة الموزع الرئيسي لجهاز التوجيه حيث يتحرك باتجاه الأسفل نتيجة تأخير حركة المكبس (17) بالنسبة للأسطوانة (18) ينخفض الضغط تحت المكبس ويندفق الزيت عبر الأنبوب (19) من الفراغ العلوي إلى السفلي . يعود المكبس (17) تدريجياً إلى وضعية الخروج والتي يتابع عندها مكبس أسطوانة القوى حركته البطيئة باتجاه الإغلاق ، وتنخفض عدد دورات المنوبة ويدون تنظيم مسبق ستصل بصعوبة إلى نظام عمل جيد مستقر .

The automatical regulation of Kaplan turbine

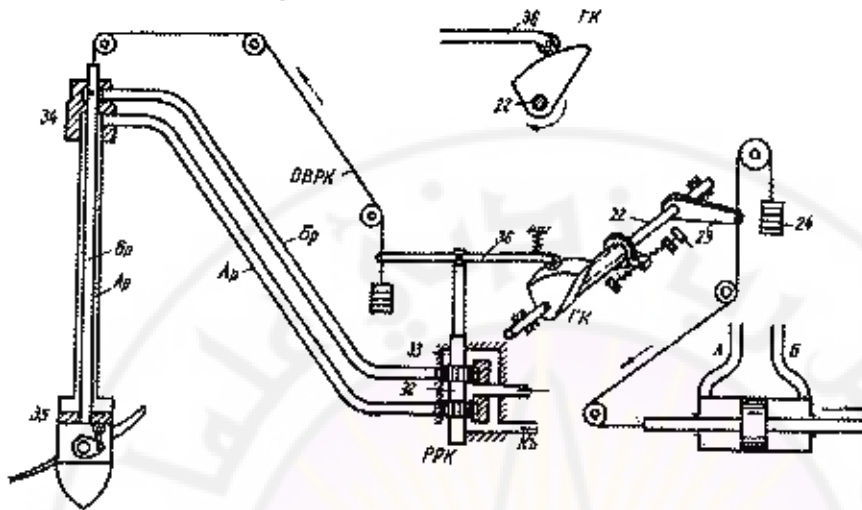
يبين الشكل (14-17) تصميم عنفة محورية ممتعة برش قابلة للدوران ومن مزايا هذه العنفة تمتع جهاز التوجيه برش قابلة للدوران حول محاور تثبيتها ، مما يسمح لبرش جهاز التوجيه بأن تتحكم بكمية الماء التي تعبر هذه الدوارة بدءاً من الصفر وحتى القيمة العظمى وبالتالي يمكن التحكم باستطاعة العنفة عن طريق التغيير في غزارة التدفق عبر جهاز التوجيه ، ويساعد مثل هذا التصميم لجهاز التوجيه على ورود الماء إلى الدوارة بشكل منتظم من جميع جهات دائرة جهاز التوجيه .



- 1 - الدوارة .
- 2 - جهاز التوجيه .
- 3 - المنوبة .
- 4 - حجرة استقبال الزيت .
- 5 - حلقة تثبيت .
- 6 - مجموعة ضخم .
- 7 - انقطاع .
- 8 - القناة الحزونية .
- 9 - قناة تصريف .
- 10 - مضجع .
- 11 - عمود .

الشكل (14-17) مخطط عنفة ذات برش قابلة للدوران

يتم التحكم بدوران برش جهاز التحكم عن طريق نظام هيدروليكي يتصل ميكانيكياً مع هذه البرش كما هو مبين على الشكل (14-18) :



الشكل (14-18) مخطط مبسط للتحكم بعمل عنفة ذات ريش قابلة للدوران

ويستخدم في هذه الحالة جهاز تخيير وتوجيه وقيادة مماثل للجهاز المبين في الشكل (14-16) مضافا إليه جهاز لتغيير ريش الدولاب العامل الذي يمكن بمساعدته تحقيق العلاقة المشتركة $\varphi = f_e(a_0)$ أوتوماتيكيا .

يجب أن يدور المخطط الأساسي لتنظيم ريش الدولاب العامل المبين على الشكل (14-18) كمكمل للمخطط الكامل المعطى بالشكل (14-16) . عنصر توزيع الزيت المضغوط هو الموزع للدولاب العامل (IV) ، ويشابه الموزع الرئيسي لجهاز التوجيه (II) ، وجهاز التحكم الهيدروليكي عبارة عن أسطوانة ومكبس يتحرك داخل أسطوانة تحت تأثير ضغط الزيت فيحرك معه إطارا معدنيا يعمل على تدوير ريش جهاز التوجيه ، تمتلك الدوارة (I) للعنفة بضع ريش (4-7) تركيب في جسم الدوارة عن طريق نهاياتها الأسطوانية حيث يركب أيضا داخل جسم الدوارة الميكانيزم الخاص بتدوير الريش .

ينقل الزيت المضغوط إلى الفراغ في الجزء الأوسط منه ويرتبط فراغ العلوي والسفلي بأنبوب يرتبط من جانبه بالخرزان . يرتبط موزع الدولاب العامل بالأنابيب A_p ، σ_p اللذين يأخذان الزيت إلى حجرة استقبال الزيت المضغوط (34) الموجودة فوق المولدة . يرسل الزيت خلال الأنبوب

A_p في الفراغ فوق مكبس ميكانيزم التنفيذ للدولاب العامل (35) وعبر الأنبوب σ_p المرتبط بشكل صلب مع المكبس (35) يرسل الزيت إلى الفراغ الواقع تحته .

المكبس (32) معلق إلى العتلة (36) ، أحد الطرفين مرتبط بالرابطة العكسية للدولاب العامل $OBPK$ وعلى الطرف الثاني توجد أسطوانة تضغط بواسطة نابض على كامة المجمع ΓK ، ترتبط الكامة مع عمود الرابطة العكسية (22) وتدور معه . (بروفيل الكامة مبين على الشكل)

في وضعية التوازن المنظومة يجب أن يوجد (IV) في وضعية وسطية دوماً ، كما هو مبين في الشكل (14 - 18) .

إذا تحرك ميكانيزم التنفيذ لجهاز التوجيه باتجاه الإغلاق فإن هذا سيؤدي إلى دوران العمود (22) باتجاه عقارب الساعة وتدور معه الكامة ΓK الأمر الذي سيؤدي إلى تحريك العتلة (36) إلى الأسفل وإلى الأسفل أيضاً سيتحرك المكبس (32) وسينقل الزيت المضغوط من (I) إلى الأنبوب A_p بينما يتصل الأنبوب σ_p مع جهاز ضغط الزيت (I) . بتأثير الزيت المضغوط يتحرك المكبس (35) إلى الأسفل ويدور ريش الدولاب العامل باتجاه الإغلاق (يقلل الزاوية φ) .

عند حركة المكبس يتحرك أيضاً الأنبوب σ_p ومعه الرابطة العكسية للدولاب العامل التي ترفع نهاية العتلة (36) ونتيجة لذلك يعود المكبس (32) إلى الوضعية الوسطية . وبالتالي فإن كل وضعية لميكانيزم التنفيذ لجهاز التوجيه توافق بشكل دقيق وضعية محددة لميكانيزم التنفيذ للدولاب العامل . يخضع شكل بروفيل الكامة ΓK لمتطلبات العلاقة الثنائية .

من الضروري تأمين إمكانية تغيير العلاقة الثنائية بالتوافق مع تغير السقوط ، لهذه الغاية تكون الكامة المستخدمة فراغية أي يكون بروفيل مقطع سطح الكامة العمودي على محورها متغيراً على طولها . وبالتالي إذا أزيحت الكامة ΓK على طول العمود (22) فإن منحنى العلاقة الثنائية يتغير وتتم إزاحة الكامة بواسطة لولب وتؤتمت هذه الإزاحة كتاباً للسقوط بواسطة أجهزة تعمل على قياس السقوط .

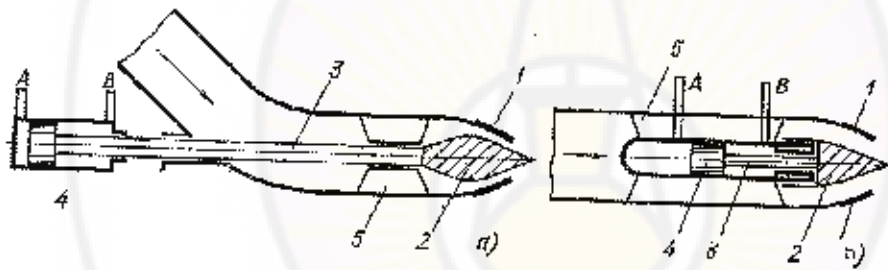
يتم التوفيق بين نظام عمل العتلة والحمولة الخارجية عن طريق المنظم الذي يملك جهاز نواس بتأثر بدقة عالية بأي تغير يطرأ على عدد دورات العتلة.

يتلقى المنظم من التوائس نبضات ضعيفة تقاس بالغرامات فيعمل على تضخيم هذه النبضات لتصبح مساوية لمئات الأطنان في بعض الحالات وذلك من أجل تدوير ريش جهاز التوجيه وريش الدوارة على الزوايا الضئيلة المناسبة .

15 - 6 - 4 - 3 - التنظيم الآلي لعنفة بيلتون:

The automatic regulation of Pelton turbine

يُتحقق تنظيم التدفق والاستطاعة في العنفات المغرفية من خلال إزاحة الإبر التي تعمل على تغيير مساحة مقطع دخول الجريان إلى الفوهة. سابقا، وكقاعدة استخدم مخطط التوصيل المبين على الشكل (14-19-a)، تثبت الإبرة (2) إلى نهاية ذراع طويل (3) موصول مع مكبس السيرفو الهيدروليكي (4). من أجل أفقية ومركزية إزاحة الإبرة يوجد المسند (5) وهو على شكل حلقة، هذه البنية تتطلب تصميم وتركيب أنبوب مفتول أمام الفوهة (1)، إلا أنه ونتيجة لنشوء الجريانات الثنائية الدورانية تنخفض كثافة التيار المار عبر الفوهة مما يؤدي إلى انخفاض مؤشر العنفة الطاقية.

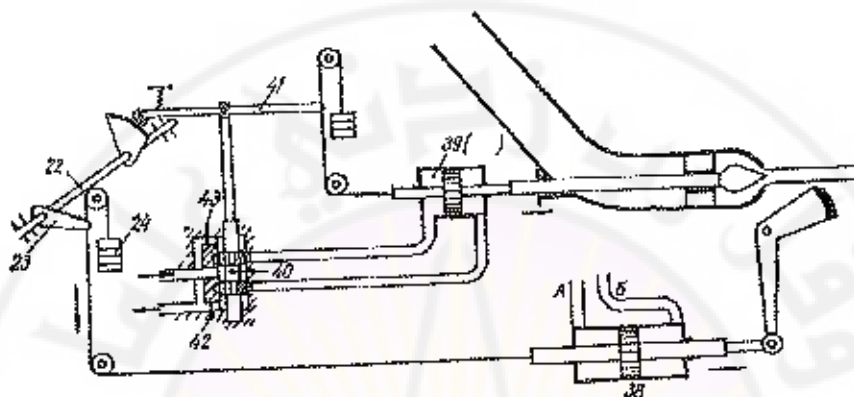


الشكل (14-19) مخطط وصل إبرة التنظيم في العنفة المغرفية.

يبين الشكل (14-19-b) مبدأ الفوهة المستقيمة التي انتشر استخدامها في السنوات الأخيرة (أ)، حيث تثبت الإبرة (2) إلى ذراع قصير (3) يتصل بدوره مع المكبس (4)، ينفذ السيرفو على شكل كبسولة مثبتة إلى مركز الأنبوب بواسطة الأضلاع (5). يعمل مثل هذا النظام كالتالي: إذا دفع الزيت تحت ضغط كبير في الأنبوب A والأنبوب B موصول من اليسار ونتيجة لحصول هبوط في الضغط عند المكبس فإن الإبرة تتحرك مغلق الفوهة وبالتالي تنخفض قيمة التدفق، وعلى العكس إذا دفع الزيت إلى الأنبوب B والأنبوب A موصول من اليسار عندها سوف تتحرك الإبرة باتجاه الفتح. هذه هي العناصر الأساسية للنظام ومن المهم في ذلك

النظام وجود آلية تعمل على تثبيت مكان الإبرة في الوضع المطلوب ولهذا يستخدم نظام الربط العكسي وأيضاً نظام ترتيب إزاحة إير العنفة كلها.

وبين الشكل (20 - 14) المخطط الأساسي للتنظيم الآلي لعنفة بلتون الذي يعتمد الأسس نفسها المثبتة في التحكم بعنفتي فرانسيس وكابلان مع وجود بعض التمايز عنهما



الشكل (20 - 14) المخطط الأساسي للتنظيم الآلي لعنفة بلتون



الفصل الخامس عشر

تصاميم العنفات المائية ذات الفعل

Designing Of Action Turbine Components

العنفات المخرقية Pelton Turbine

15 - 1 - التوصيف الفني لعنفة بلتون :

The Technical Specification Of Pelton Turbine :

وهي من العنفات ذات الضغوط العالي، تستخدم من أجل ضغوط أكبر من $(400 \div 600 \text{ [m]})$. يبين الشكل (1-15) مخطط العنفة المخرقية.

العناصر الأساسية: النفثة (6) ويدخلها إبرة متحركة (4) يصل إليها الماء عبر أنبوب النقل (5)، والدولاب العامل (8)، المثبت على المحور (1). تركيب النفثة والدولاب العامل أعلى من مستوي الماء أي أن الدولاب يدور في الهواء.

تقذف تيارات الماء تحت تأثير الضغوط (II) من الفوهة (النفثة) بسرعة v_c تحسب بالعلاقة:

$$v_c = \phi \sqrt{2gH} \quad (15-1)$$

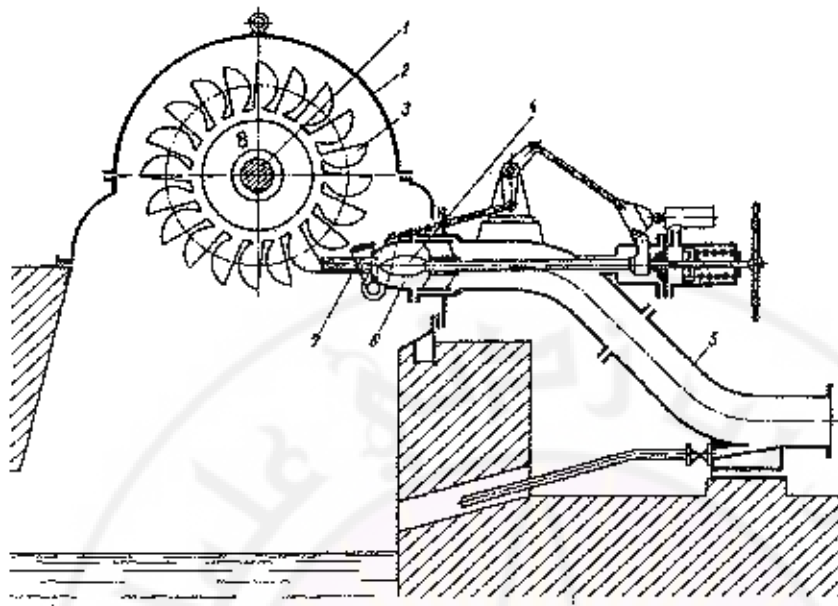
حيث $\phi = 0,98 \div 0,99$ ثابت السرعة.

إذا اعتبرنا الضغوط التي تستخدم عندها العنفات المخرقية نجد أن السرعة v_c كبيرة جداً أي أن:

$$\begin{aligned} H &= 600 \text{ [m]} \Rightarrow v_c = 105 \text{ [m/s]} \\ H &= 1500 \text{ [m]} \Rightarrow v_c = 165 \text{ [m/s]} \end{aligned}$$

عند الارتفاع من النفثة يكون قطر التيار d_c المتضيق أقل من قطر النفثة d_0 نتيجة لمعامل انضغاط التيار.

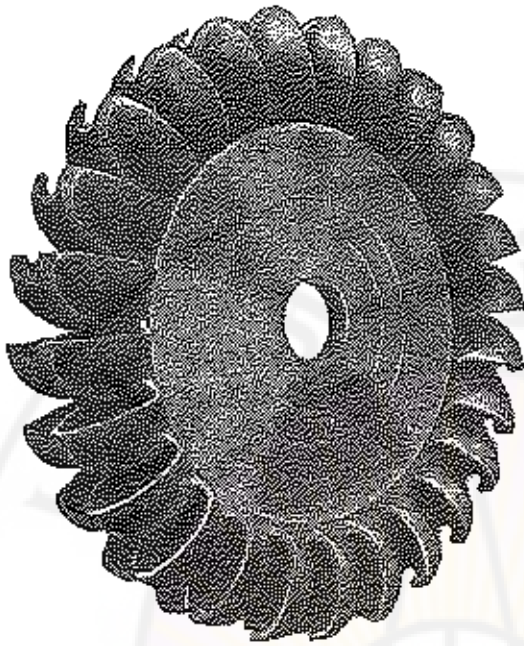
يتكون الدولاب العامل (8) من قرص وریش عامل (3) تشبه شكل المخرقة (من هنا جاءت تسمية المخرقية). العدد الكلي للريش $(12 \div 40)$ ريشة، تصنع كل ريشة على شكل سطحين منحنيين مقسومين بما يسمى السكين ويركب الدولاب العامل بحيث تكون السكين منطبقة على اتجاه محور التيار.



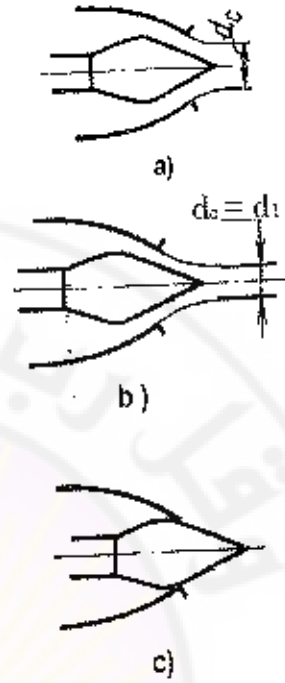
الشكل (1-15) مخطط عنفة بلتون

عند اصطدام تيار الماء بالريشة فإنه ينقسم إلى قسمين متساويين بفعل السكين، ينساب كل قسم على أحد السطحين المنحنيين، نتيجة لتغير قيمة واتجاه سرعة الماء يتشكل ضغط (قوة) على الريشة، تولد عزمًا يجبر الدولاب الدائر والمحور على الدوران. بما أن الماء يصطدم بالريش بسرعة كبيرة فإن ذلك يقتضي دقة عالية ومثانة في تصنيع العنفة لا سيما الريش وسطوحها. تضبط استطاعة العنفة المغرفية عن طريق تغيير التدفق، ويتم الوصول إلى ذلك عن طريق استخدام إبرة (قالة)، عندما تتحرك الإبرة باتجاه داخل النفثة عندها يعبر السائل كامل مقطع الفوهة الشكل (15-2-a) وبالتالي يكون التدفق أعظمياً، أما عندما تتحرك الإبرة باتجاه الفوهة عندها يقل مقطع الخروج وبالتالي يقل قطر التيار مما يؤدي إلى نقصان التدفق (15-2-b)، وعندما تغلق الإبرة الفوهة بالكامل عندها ينعدم التدفق (15-2-c).

يبين الشكل (15-3) الشكل الخارجي للدولاب العامل للعنفة المغرفية. تستند كافة عناصر العنفة المغرفية وتثبت على جسم العنفة، ولمنع الماء من التطاير بعد اصطدامه بالريش يركب غطاء (قميص) 2. يتعلق الشكل التصميمي للعنفات المغرفية بدرجة كبيرة بالعدد الكلي للنفثات أي عدد التيارات المؤثرة. إذ تؤدي زيادة عدد التيارات إلى زيادة استطاعة التوربين مع الحفاظ على قطر الدولاب العامل نفسه.

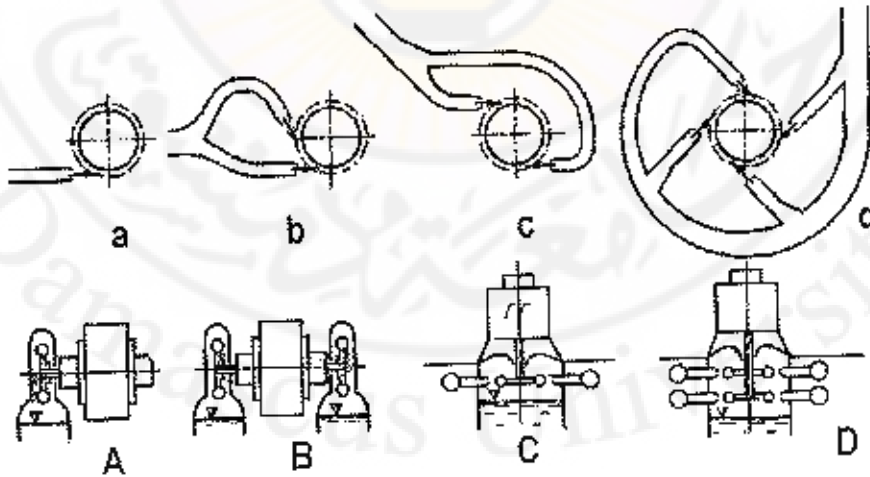


الشكل (15-3) الدولاب العامل للعنفة المغرفية



الشكل (15-2) ضبط التدفق بواسطة الإبرة

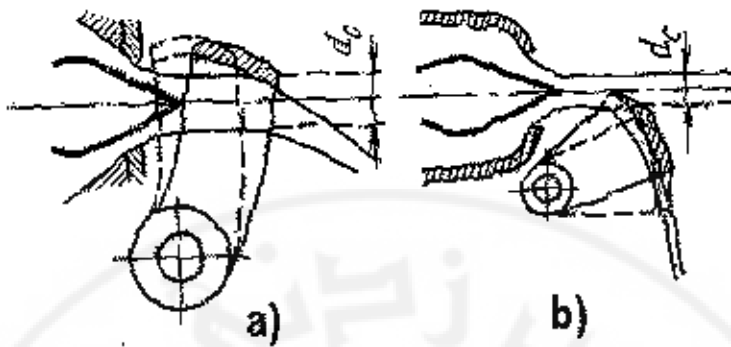
يبين الشكل (15-4) أكثر الأشكال التصميمية للعنفات المغرفية انتشاراً.



الشكل (15-4) الأشكال التصميمية للعنفة المغرفية

تقسم كافة العنقات إلى مجموعتين حسب توضع محاورها: الأفقية والعمودية حيث يتم دفع تيارات مختلفة على الدولاب العامل، في العنقات الأفقية يستخدم مخطط بتيار واحد (a) أو بتيارين (b) والذي يتطلب شكلاً خاصاً لأقنية إيصال المياه إلى الدولاب. أما في العنقات العمودية فنستخدم الأقنية شبه الحلزونية ويمكن أن تكون هناك قناتان (c) أو أربع (d)، أو ست قنوات وأحياناً أكثر من ذلك.

يمكن أن تحتوي العنقة على دولاب عامل واحد أو دولابين وذلك يستخدم كثيراً في المنشآت الأفقية (A, B) أما في المنشآت العمودية فغالباً تستخدم عنقات بدولاب عامل واحد (c) وهذا لا يلغي إمكانية استخدام دولابين (d). يصطدم بناء العنقة المغرفية بصعوبات عدة أحدها هو تصميم الدولاب العامل، ويشكل أدق طريقة تثبيت الريش والطريق الأسهل هو تحضير كل ريشة على حدة ومن ثم تركيبها على القرص (مع صرة الدولاب) غير أن الريش في العنقات المغرفية تعمل تحت شروط صعبة، خلافاً للعنقات الرد فعلية إذ لا تتغير الحمولة التي تتلقاها ريش الدولاب العامل من التيار أثناء العمل، أما في العنقات المغرفية فتحمل الريش جهداً أعظمياً نتيجة ضغط المياه وعندما ينقسم التيار في هذه الحالة تتناقص الحمولة، إذ تعمل الريش في ظروف حادة لتغير الحمولة مما يخضع المعدن لظاهرة التعب التي تخلق متاعب تصميمية. تثبت الريش بطرق كثيرة إما باللحام أو بالبراغي أو غيرها. يصل الماء إلى العنقة المغرفية عن طريق قناة توصيل طويلة حيث يجب الأخذ بنظر الاعتبار الحمولة الإضافية الناتجة عن موجات الصدمة التي تنشأ نتيجة الإغلاق السريع للفوهة أو إنقاص التدفق. يمكن تخفيف الاستطاعة في العنقات المغرفية أحياناً دون إغلاق الفوهة أي دون تخفيض التدفق، ومن أجل ذلك يجب إزالة التيار عن الفوهة ويتم ذلك باستخدام ما يسمى العاكس (الموجه) - المبين على الشكل (15-5) يعمل الموجه على حرف التيار بشكل كلي أو جزئي ويحقق هذا الهدف إما على شكل انحراف للتيار الشكل (15-5-a) أو على شكل مجزئ للتيار الشكل (15-5-b) و يتوضع عندها خلف الفوهة مباشرة.



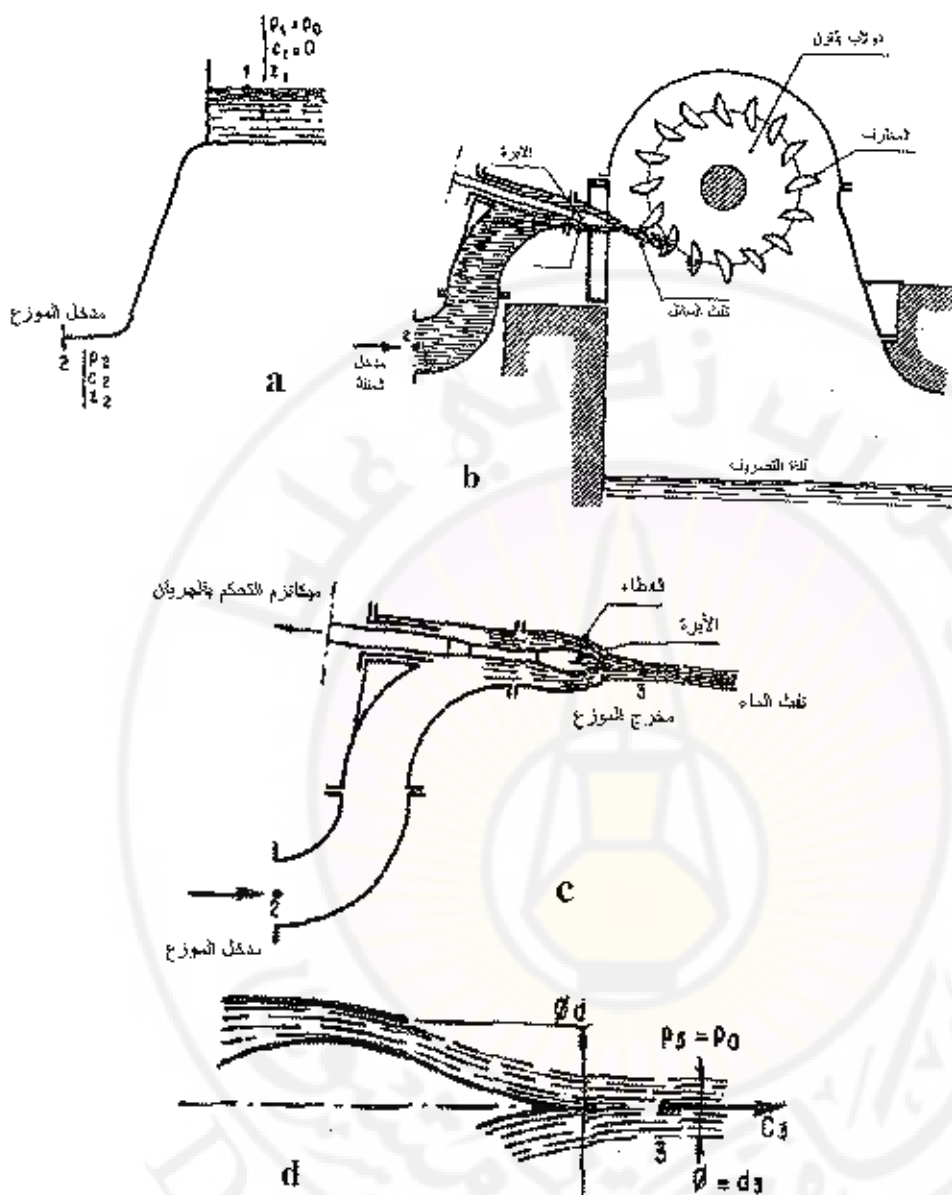
الشكل (5-15) عمل المعاكس (الموجه)

يعمل نظام التحكم على الشكل التالي: عندما يتطلب تخفيض استطاعة العنفة بسرعة ينخفض التواتر ويتحرك الموجه خلال $[3 \div 2]$ ، مما يؤدي لتخفيض الاستطاعة مع الحفاظ على تدفق ثابت وفي الوقت نفسه ينخفض التواتر عند إبرة الإغلاق حيث تتحرك ببطء وينخفض معها التدفق تدريجياً وهذا ما يمنع حدوث الطرق الهيدروليكي حيث يستغرق زمن شوط الإغلاق للإبرة من $[20 \div 40]$ s.

15-2 - آلية عمل العناصر التصميمية لعنفة بلتون :

The Mechanism Of Pelton Turbine Components :

يصل السائل إلى عنفة بلتون من خزان السد (1) حيث تسود الشروط التالية: (Z_1, C_1) $(P_1 = P_0)$ مروراً بأنبوب النقل أو بالموزع (2) حيث البارامترات التالية (Z_2, C_2, P_2) وصولاً إلى النافثة حيث يتحرك بداخلها إبرة تحدد غزارة وسرعة ومقطع النفث (3) وفق البارامترات التالية (Z_3, C_3, P_3, P_u) ، ثم يقذف السائل باتجاه المغارف المركبة على محيط الدوالات العامل حيث يصطدم بحد المغرفة عند النقطة (3) وينشطر إلى قسمين متناظرين مرتداً بشكل معاكس وشاركاً المغرفة عند النقطة (4) وفق مثلثات السرعة الميمنة بالشكل. ثم يتجمع السائل الخارج من الدوالات العامل والذي يدور في وسط هوائي ضمن الغطاء أو المغلف باتجاه قناة التصريف (S)، ويوضح الشكل (6-15) البنية التصميمية الأساسية لعنفة بلتون و البارامترات الأساسية اعتباراً من الخزان ولغاية مخرج الموزع.



الشكل (6-15) البارامترات الأساسية لعنق بليون (النقاط التصميمية)

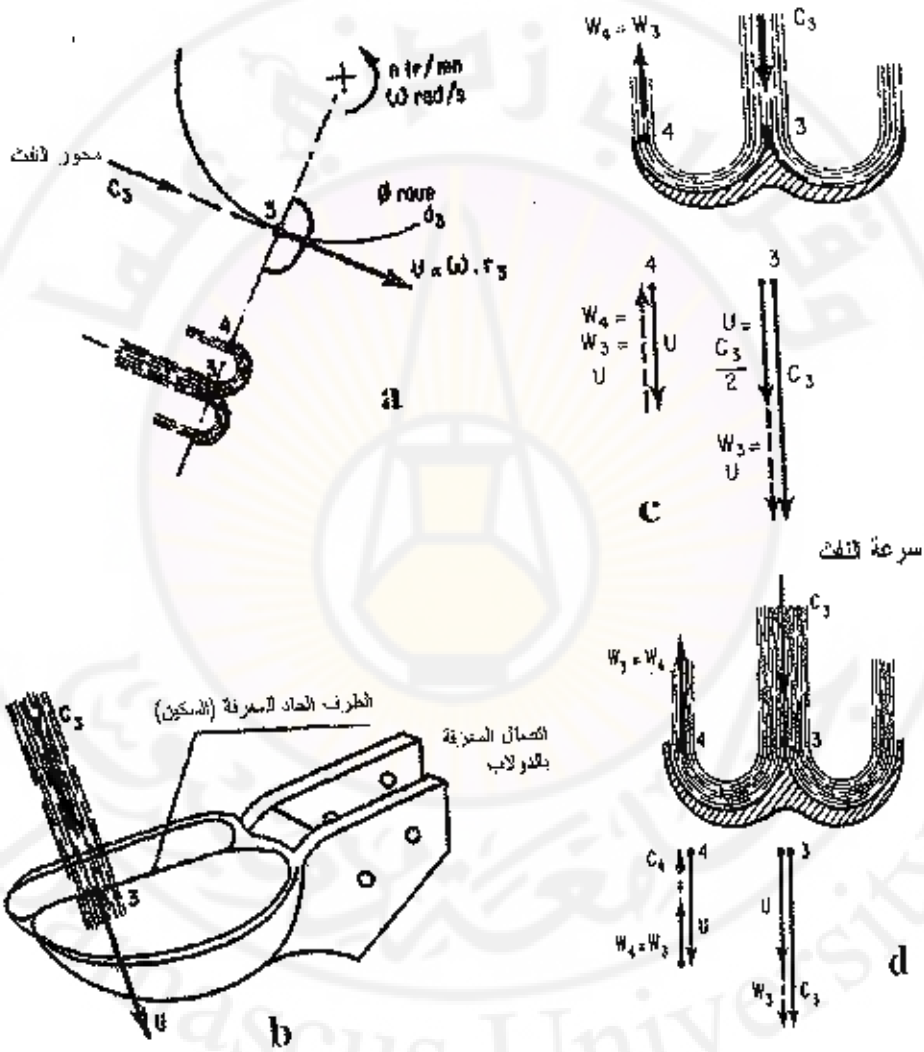
ويبين الشكل (7-15) الشكل العام للمغرفة ومثلثات السرعة عند الاصطدام بالطرف الحاد للمغرفة (3) وعند خروجه منها (4) ومن أجل دولاب عامل يدور بسرعة n [tr/min] ونصف قطر لـ غاية الطرف الحاد للمغرفة هو (r_3) يكون لدينا: $U = \omega r_3$ السرعة المحيطية، w_3 السرعة النسبية.

$C_3 = U + w_3$ السرعة المطلقة.

وعند النقطة (4) تبقى (U) نفسها من حيث القيمة والاتجاه.

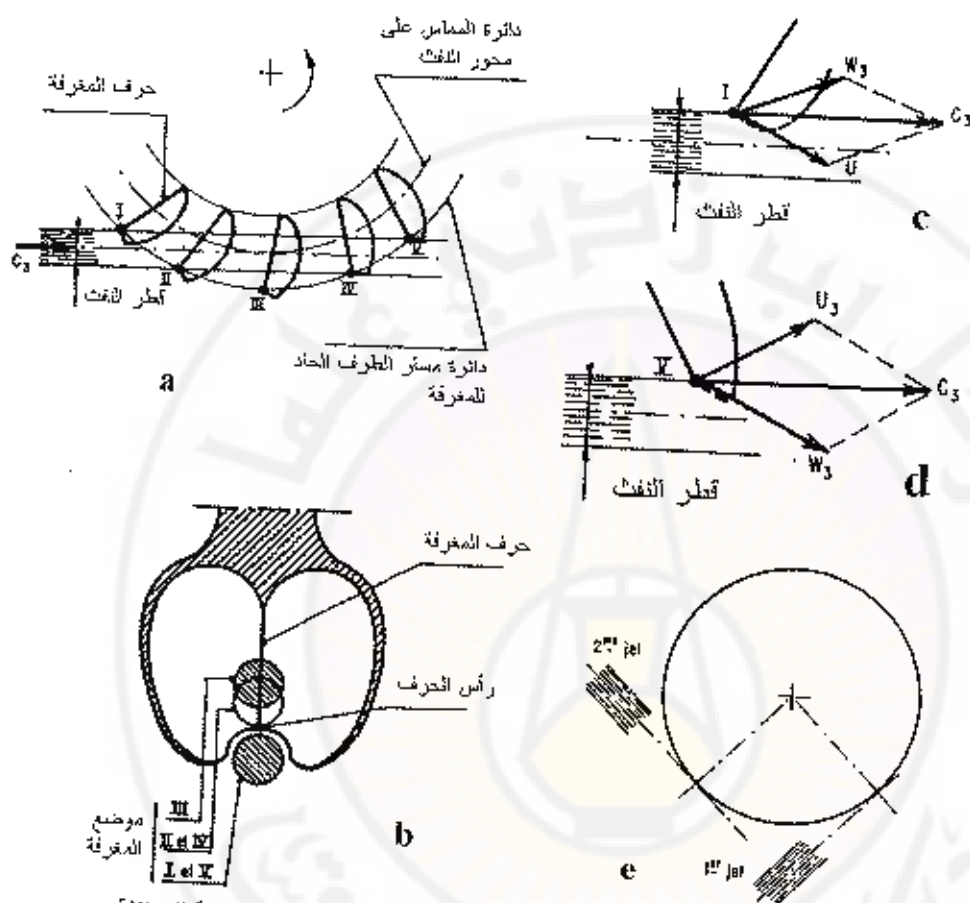
وكذلك ($w_4 = w_3$) ولكن معاكسة في الاتجاه وتكون (U) و w_4 محمولة على الاتجاه نفسه حيث:

$C_{4u} = C_4$ ، $C_4 = U - w_3$ ، $C_4 = U - w_4$ وإشارته سالبة لأنها تعاكس اتجاه (U).



الشكل (7 - 15) الشكل العام للمعرفة ومثلثات السرعة لعنفة بلتون

كما يبين الشكل (8-15) العلاقة ما بين المغرفة والدولاب العامل في وضعيات الحركة المختلفة.



الشكل (8-15) العلاقة ما بين المغرفة والدولاب العامل في وضعيات الحركة المختلفة

15 - 3 - تصميم مكونات عنفة بلتون :

Designing The Pilton Turbine Components :

تتطلب العملية التصميمية لمكونات عنفة بلتون استناداً للأسس والمفاهيم النظرية وآلية

العمل لتحديد العناصر التصميمية التالية:

1- الاستطاعة الميكانيكية للتوربين المأخوذة عند الدولاب P_T .

2- الاستطاعة الفعلية المأخوذة عند المولدة P_G .

3- أقطار النفث (d_c, d_0) .

4- السرعة النوعية (N_s) وتحديد عدد المناهث (i) .

5- متوسط قطر دولاب بلتون D_1 .

6- سرعة تشغيل التوربين (N) .

7- اختيار السرعة ونسبة النفث (m) .

8- الأبعاد الأساسية للقدح.

9- عدد الأقداح (Z) (المغارف).

1- الاستطاعة الميكانيكية للتوربين المأخوذة عند الدولاب (الاستطاعة النظرية) P_T :

تُحسب القدرة المتوفرة من الماء لسمت (ارتفاع) صافي معين ومعدل تصريف (غزارة، تدفق) للماء، كما يلي مع عدم الأخذ بعين الاعتبار الضياعات الحاصلة في التوربين:

$$P_T = \gamma \cdot Q \cdot H \text{ [kW]} \quad (15-2)$$

حيث: $\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$ الوزن النوعي للماء.

$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$ معدل تصريف الماء

$H \text{ [m]}$ السمت الصافي عند مدخل التوربين

2 - الاستطاعة المجهزة عند محور المولدة (الاستطاعة الفعلية) P_G :

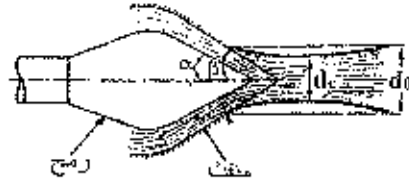
$$(15-3)$$

$$P_G = P_T \cdot \eta_T$$

حيث η_T الكفاءة الكلية للتوربين وتؤخذ قيمتها التقديرية من الجدول التالي:

$\eta_t, \%$	90	89	88	85
$P_u \text{ [Kw]}$	100.000	10.000	1000	100

3 - أقطار النفث (d_c , d_0) :



الشكل (9 - 15) الرمح والمنفت والنفث

d_c [m] : أقل قطر للنفث، ($d_m \neq d_c$).

d_0 [m] : قطر النفث في الخروج.

2α : زاوية الرمح.

2β : زاوية المنفت.

V_1 [m/s] : سرعة النفث محسوبة في أصغر مقطع تقلص.

Q [m³/s] : التصريف خلال النفث (بحدود 3 m³/s).

- سرعة المنفت (V_1) محسوبة في أصغر مقطع تقلص. $V_1 = \varphi \sqrt{2gH}$.

حيث: $\varphi = K_{v1}$: معامل السرعة (تتغير قيمته ما بين 0,98 ÷ 0,99). H (m) : السمات الصافي.

ويمكن إيجاد (d_c) بدلالة معادلة التصريف (التدفق) Q خلال النفث:

$$Q = \frac{\pi}{4} d_c^2 \cdot V_1 \quad (15-4)$$

← أقل قطر للنفث الحر (d_c) أو (d_m):

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \varphi \sqrt{2gH}}} \quad (15-5)$$

بالتعويض بمتوسط القيم لـ $\varphi = 0,985$ نجد تجريبياً وبالتقريب:

$$d_m = d_{c_{\min}} = 0,5415 \sqrt{\frac{Q}{H}} \quad (15-6)$$

← قطر النفث عند الخروج (d_0) يكون دائماً أكبر من d_c ويعادل تجريبياً:

$$d_0 = 1,25 d_c \quad (15-7)$$

ويمكن إيجاده كما يلي:

$$V_o = \varphi \sqrt{2gH} \quad , \quad \text{حيث أن: } Q = a_o \cdot V_o \quad (15-8)$$

a_o : مساحة المقطع

$$a_0 = \frac{Q}{\phi \sqrt{2gH}} \quad (15-9)$$

قيمة (a_0) يمكن الحصول عليها من العلاقة التجريبية التالية:

$$a_0 = A \cdot S - B \cdot S^2 \quad (15-10)$$

حيث: A, B ثوابت لمنفتح محدد.

$$S \text{ أقصى انفعال للرمح. } a_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$$

$$B = \frac{\pi(\beta - \alpha)(\sin \beta - \sin \alpha) \cdot \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} \quad , \quad A = 2\pi r_0 \sin \alpha - \frac{\beta - \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (15-11)$$

هذه القيم تحسب بدلالة الزوايا ($\alpha = 25^\circ, \beta = 42^\circ$) للتوربينات ذات الصنع الأوروبي. في إنكلترا الزوايا ($\alpha = 22\frac{1}{2}^\circ, \beta = 28\frac{1}{2}^\circ$).

4- السرعة النوعية (N_s):

السرعة النوعية مفهوم فيزيائي يربط بين قياسات الآلة والاستطاعة المتولدة عنها (من الواضح أنه يمكننا الحصول على نفس استطاعة الآلة بقياسات مختلفة إذا غيرنا سرعة حركتها. تحسب السرعة النوعية للمنفتح الواحد من العلاقة:

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P_t}}{H^{5/4}} \quad (15-12)$$

حيث: N [r.p.m] سرعة التشغيل الاعتيادية.

P_t [Kw] القدرة الخارجة من التوربين (الفعلية).

H [m] السممت الصافي (المؤثر).

عند إعطاء كمية لا بعدية K_s بدلاً من N_s يكون:

$$K_s = \frac{Q \cdot N^2}{V^3} \quad (15-13)$$

(عامل لا بعدي يستخدم لتصنيف التوربينات الحديثة).

V (m/s): سرعة الماء.

الجدول (15-2) قيم السرعة النوعية N_s والمعامل اللا بعدي K_s للتوربينات

نوع التوربين	نوع المروحة	السرعة النوعية N_s	K_s
بلتون	بطيئة	8.5-17	0.098-0.39
	اعتيادية	17-24	0.39-0.76
	سريعة	24-30	0.76-1.2
فرنسيس	بطيئة	50-100	3.5-14
	اعتيادية	100-150	14-31.5
	سريعة	150-250	31.5-88
كابلان		250-900	88-980

بفرض أن $\eta_i = 90\%$ وأن: $N_{smax} = 28$ (أي مقارنة لثلاثين للنفث الواحد) عندها تكون القيمة الكلية المكافئة لـ N_s عندها يكون $K_s \approx 1$ إذا كان هناك دولاب واحد ومنفتحين:

$$N_s = \frac{N\sqrt{2P_i}}{H^{3/4}} \quad (15-14)$$

لغرض زيادة السرعة النوعية أكثر من 35 يجب استخدام توربين بلتون متعدد المنافث:

$$N_s = \frac{N\sqrt{j.P_i}}{H^{3/4}} \quad (15-15)$$

حيث: j عدد المنافث.

أكبر عدد من المنافث تستعمل في التوربين هو (6) في التركيب الرأسي و (2) في التركيب الأفقي.

- تكون النوافث المتعددة أساسية عندما تكون ($N_s > 35$) ولكن ذلك يجعل السيطرة على التوربين معقدة ومكلفة.

- كلما ازدادت السرعة الدورانية للألة ، صغرت قياسات الألة.

- يمكن الحصول على N_s للنفثة من خلال قدرتها على استيعاب وتزوير تدفقات عالية.

- العنفات المحورية أكثر العنفات سرعة تليها العنفات القطرية المحورية فالمغرفية.

$$K_s = \frac{N_s^2}{767} \quad \text{للبرهان على العلاقة:}$$

تستخدم الفرضيات التالية:

$$\eta_i = 0.9, p_i = \gamma.Q.H.\eta_i, N_s = \frac{N\sqrt{P_i}}{H^{3/4}}, K_s = \frac{Q.N^2}{V^3} \quad (15-16)$$

5- متوسط القطر لدولاب بلتون $[D_1]$:

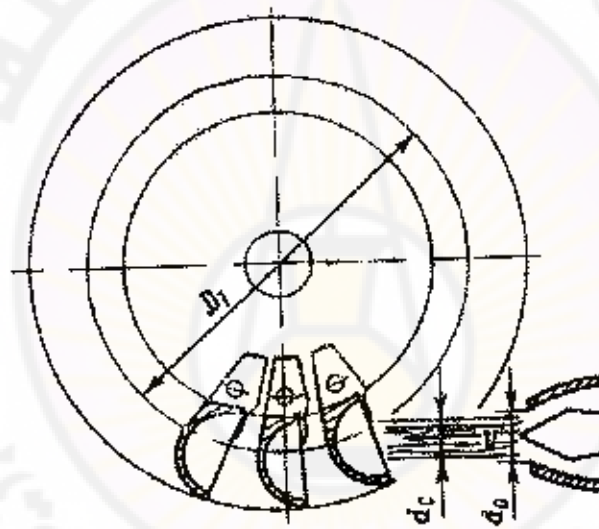
ليكن متوسط القطر (قطر دائرة الخطوة) لدولاب بلتون هو (D_1) والسرعة N (r.p.m) والسمت الصافي هو H (m). السرعة المحيطية للقدح الواحد هي:

$$U_1 = K_{u1} \sqrt{2gH} \Rightarrow K_{u1} = \frac{U_1}{\sqrt{2gH}} \quad (15-17)$$

حيث: K_{u1} معامل السرعة.

U السرعة المحيطية (الخطية) للقدح في معدل أقطارها .

$\sqrt{2gH}$ سرعة الانطلاق النظرية للماء تحت السمت المؤثر في التوربين.



الشكل (10 - 15) متوسط القطر لمروحة بلتون

بما أن السرعة المحيطية للدولاب:

$$U_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} \text{ [m/s]} \quad (15-18)$$

وباعتبار أن خط النفث يكون دوماً مماساً لدائرة خطوط الدولاب المبين بالقطر D_1 عند أخفض نقطة منه وبالمساواة ما بين العلاقتين (15-17) و (15-18) نجد أن:

$$K_{u1} \sqrt{2gH} = \frac{\pi D_1 N}{60} \quad (15-19)$$

$$D_1 = \frac{60K_{u1}\sqrt{2gH}}{\pi \cdot N} [m] \quad (15-20)$$

عادة تؤخذ قيمة K_{u1} بصورة تقريبية نسبة إلى الكفاءة القصوى ويكون مجال اختيارها ما بين (0,44 ÷ 0,46) وباعتبار أن $K_{u1} = 0,45$ وبعد التبديل والاختصار تصبح العلاقة (15-20) بالشكل التالي:

$$D_1 = \frac{84,5K_{u1}\sqrt{H}}{N} = 84,5 \times 0,45 \frac{\sqrt{H}}{N} = 36,6 \frac{\sqrt{H}}{N} [m] \quad (15-21)$$

6 - سرعة تشغيل التوربين N (r.p.m):

تعتمد على طبيعة الوحدة المسافة

إذا ربط مولد كهربائي مع التوربين مباشرة، فإن (N) يمكن إيجادها بالعلاقة التالية:

$$f = \frac{P \cdot N}{60} \quad (15-22)$$

حيث f : ذبذبة المولد بوحدات [دورة / دقيقة] P : عدد أزواج الأقطاب.

- إذا كانت $f = 50$ [r.p.m] كما هو موجود في كثير من البلدان فإن السرعة (N) تكون:

$$N = \frac{3000}{P} \quad (15-23)$$

- إن كلفة المولد ذي السرعة العالية تكون قليلة (يكون من الأفضل تجارياً اختيار سرعة عالية كلما أمكن ذلك).

- عموماً بالنسبة لتوربين بلتون تكون السرعة (500، 375، 300 أو 250) دورة/دقيقة اعتماداً على حجم الوحدة.

7- اختيار السرعة ونسبة النفث (m) في توربين بلتون:

لظروف معينة فإن توربينات بلتون تمتلك مدى واسعاً من السرعة. وهناك سرعة محددة تعطي الكفاءة القصوى كما هو ملاحظ من الجدول (3-15).

الجدول (3-15)

نسبة النفث	m	6.5	7.5	10	20
السرعة النوعية	N_s	30	27.5	20	8.5
المرئود	η_h	0.82	0.86	0.89	0.9

* إذا زادت سرعة التوربين يحدث ما يلي :

- 1- تزداد السرعة النوعية ومحاسن ذلك؛
- إن حجم التوربين سيصبح أصغر وبذلك يصبح أقل كلفة.
- يصغر قطر النفث، وهذا يزيد من نسبة النفث، ويزيد من كفاءة التوربين (الجدول).
- إن الجانب السلبي الوحيد لارتفاع السرعة النوعية هو الاختياج إلى عدة نوافث وهذا يعقد عملية السيطرة ويجعلها عالية التكاليف.
- 2- تزداد سرعة المولد المربوط مباشرة: وهذا يتطلب عدداً قليلاً من أزواج الأقطاب، وبذلك يكون المولد قليل الكلفة.
- 3- المعدن المستخدم للمكانن عالية السرعة (التوربينات والمولد)، سيكون مكلفاً، إذ إن السرع العالية تحدث إجهادات في الأجزاء الدوارة.
- كل النقاط الموضحة تؤخذ بالحسبان وتراعى عند اختيار السرعة الصحيحة.

$$m = \frac{D_t}{d_c} \quad \frac{\text{معدل قطر الدولاب}}{\text{أقل قطر للنفث}} \quad (15-24)$$

نسبة النفث m عامل مهم لتوربين بلتون ويؤثر في مواصفاته، يستخدم عموماً بدلاً من N_s في اختيار تصميم توربين بلتون.

العلاقة بين (N_s, m) :
المعطيات:

$$N = \frac{60K_{u1} \sqrt{2gH}}{\pi D_t} \quad [\text{r.p.m}] \quad \text{سرعة تشغيل التوربين}$$

$$N_s = \frac{N \sqrt{P_t}}{H^{5/4}} \quad \text{السرعة النوعية}$$

$$P_t = \gamma Q I \eta_t \quad [\text{Kw}] \quad \text{الاستطاعة الفعلية المأخوذة عند محور المولدة}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} d_c^2 \phi \sqrt{2gH} \quad [m^3 / s] \quad \text{غزارة التدفق}$$

بأخذ: $K_{u1} = 0,45$, $\phi = 0,984$ وبالتبديل والإصلاح نجد:

$$N_s = \frac{220 \sqrt{\eta_t}}{m} \quad (15-25)$$

في التوربينات الحديثة تتراوح قيمة نسبة النفث (m) من (10) إلى (30) اعتماداً على السرعة النوعية وكفاءة التوربين.

أقل قيمة لنسبة النفث (m) هي (10)، وإن القيمة الصغيرة لـ (m) تعني أصغر قطر للدولاب (D₁)، في حين يبقى قطر النفث (d_e) ثابتاً، وهذا يعني تقارب المسافة بين الأقداح مما يقلل كفاءة التوربين.

في حال ارتفاع قيمة (m) سيصبح الدولاب ضيقاً، وستقل الكفاءة مع هذا الترتيب أيضاً.

8- الأبعاد الرئيسية للقذح:

$$L = (2.3 + 2.8) d_e \text{ الطول}$$

$$B = (2.8 - 3.2) d_e \text{ العرض}$$

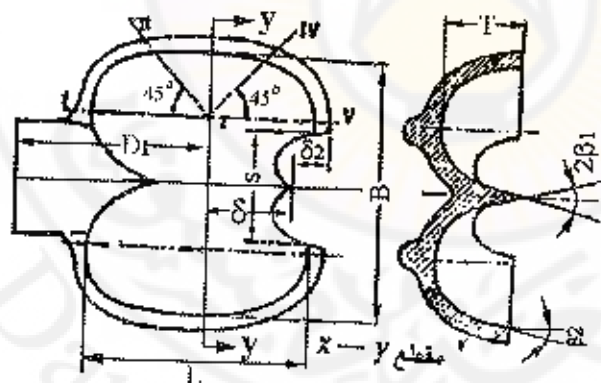
$$T = (0.6 - 0.9) d_e \text{ العمق}$$

$$\beta_1 = 5^\circ \text{ --- } 8^\circ \text{ زاوية الدخول}$$

$$\beta_2 = 10^\circ \text{ --- } 20^\circ \text{ زاوية الخروج في المركز}$$

عرض القذح (B) يعتبر بعد القذح الرئيسي

إذا كان عرض القذح صغيراً جداً فإن ماء النفث سوف لا ينحرف بنعومة وهذا سيؤدي إلى تبديد كثير في الطاقة بسبب الاضطراب في القذح.



الشكل (11 - 15) تركيب ريشة بلتون وأبعادها

- إذا كان العرض كبيراً جداً فإن السطح الذي يجري عليه الماء سيكون كبيراً جداً مما يحدث ارتفاعاً في الاحتكاك.

9- عدد الأقداح (المغارف) (Z) :

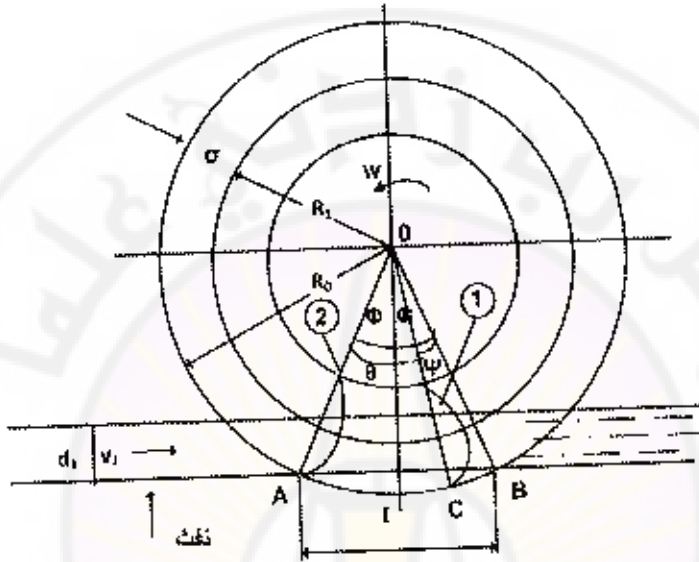
اقترح د. تايجن Taygun العلاقة التجريبية التالية لإيجاد عدد الأقداح

$$(15-26)$$

$$Z = 0,5m + 15$$

هذه المعادلة تحمل قيم (m = 6 - 35)

* تحديد أقل عدد من الأقداح:



الشكل (12-15) حساب أقل عدد من الأقداح (المغارف)

R_0 أقصى نصف قطر للدولاب

R_1 معدل نصف قطر للدولاب

d_c قطر النفث

$\delta = R_0 - R_1$ نصف طول القذح.

$t_1 = \frac{l_c}{v}$ الزمن المستغرق من قبل جزيئة ماء النفث لقطع المسافة الأفقية (I).

$t_2 = \frac{\Psi}{\omega}$ الزمن المستغرق من قبل القذح النفث لتحريك المسافة الزاوية Ψ , $\omega = \frac{U_1}{R_1}$

$$\theta^0 = 2\phi - \Psi$$

t_2 تساوي تقريبا أو أقل من t_1

1 = 2 $R_0 \cdot \sin \theta$ (1)، (2): أقداح.

U_1 : السرعة المماسية لمركز القذح.

$\varnothing$: المسافة الزاوية لـ A, B من خط العمود المركزي للدولاب.

θ : الخطوة الزاوية (الفصل الزاوي بين قذحين).

لتكن (X) هي أقل عدد من الأقداح، فإن الفصل الزاوي بين قذحين (الخطوة الزاوية):

$$\frac{2\pi}{Z} \text{ rad} = 360^\circ \Rightarrow x = \frac{2\pi}{\theta \text{ rad}} = \frac{360}{\theta^\circ} \quad (15-27)$$

حيث: x أقل عدد من الأقداح

إن قيم $\varnothing, \psi$ تعتمد على $\varnothing, m, K_{\psi}$

K_{ψ} : تعتمد على (m). $\varnothing$: تعتمد على (d_0) والتي هي دالة على (m)

وعليه: فإن أقل عدد من الأقداح يعتمد على (m)

الفصل السادس عشر

تصاميم العنفات المائية ذات رد الفعل

The Designing Of Reaction Turbine Components

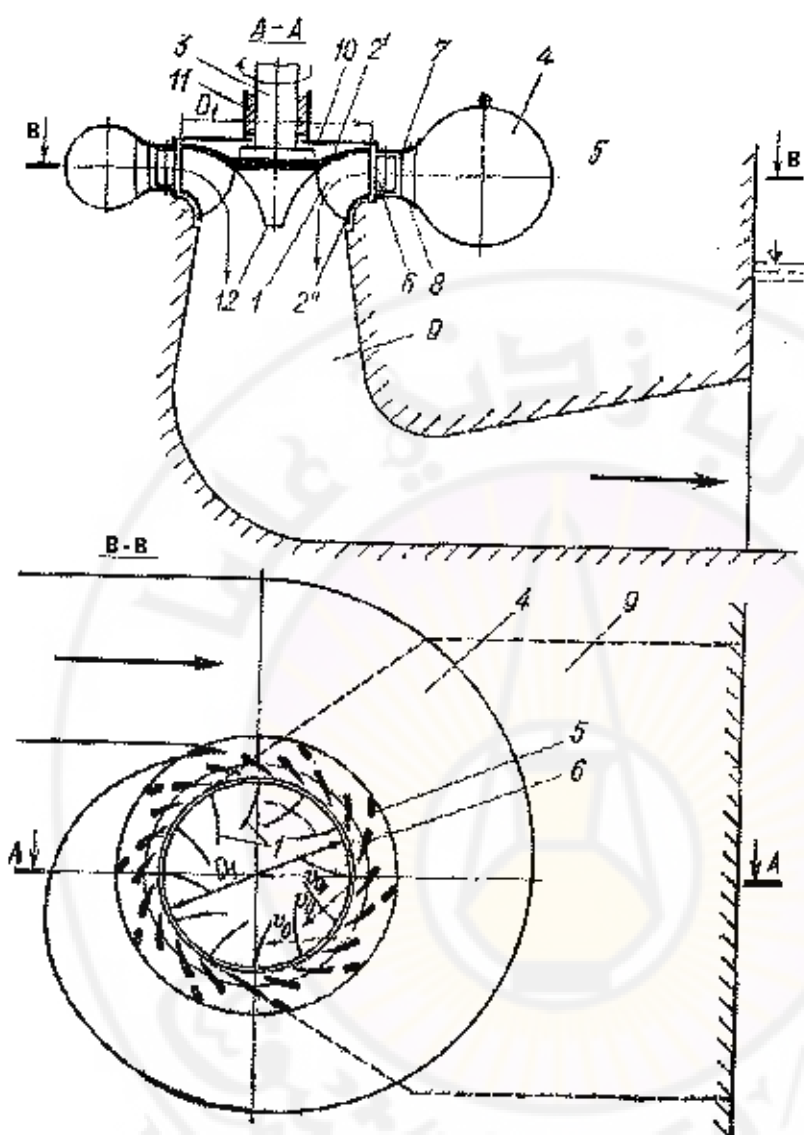
أولاً: 16- 1 - تصميم العنفات القطرية المحورية (عنفة فرنسيس) :

Designing Of Francis Turbine :

16- 1- 1 - التوصيف الفني لعنفة فرنسيس:

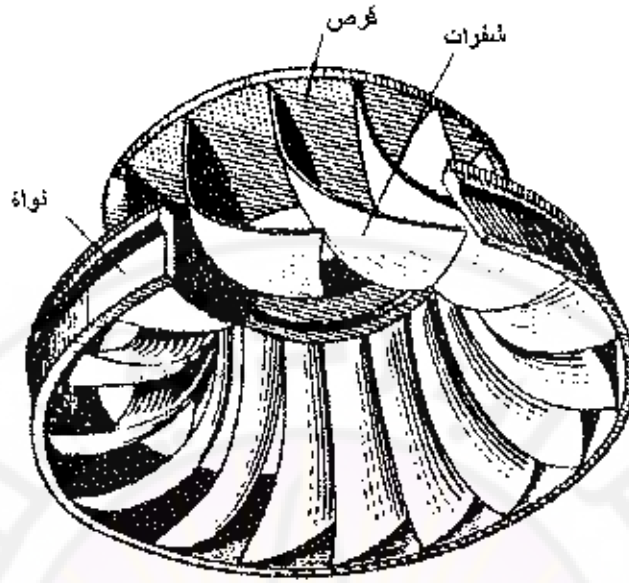
The Technical Description Of Francis Turbine :

يتألف الدولاب الدائر لهذه العنفة من $(20 \div 12)$ ريشة (1) تتشكل بروفيلاً شبكياً دائرياً، يوصل الدولاب الدائر مع قلنسوة محور الدوران (3). بهدف تحسين شروط خروج الماء من الألفية بين الريش يزود المحور الدائر بموجه (12). يمثل الدولاب الدائر ومحور الدوران الجزء الدوار من العنفة، كما يعد قطر الدولاب عند الدخول بين الريش D_1 بارامتراً مميزاً لقياس العنفة. يسمى هذا النوع من العنفات بالقطرية - المحورية لأن الماء يدخل إلى الدولاب العامل بالاتجاه القطري ويخرج منه بالاتجاه المحوري كما هو مبين في المقطع (A - A) الشكل (1-16). يتم إيواء الماء للدولاب العامل عبر الحجرة الحلزونية للعنفة (4) عبر المثبت (5) وجهاز التوجيه (6). تصنع حجرة العنفة من الفولاذ، ولتحسين درجة تحمل سطوح (الجدران) الحجرة لقيم الضغوط الداخلية الكبيرة يصنع المقطع بشكل دائري. تخصص دعائم الموجه (5) لنقل الحمولة من دائرة الارتكاز العلوية إلى السفلية وبهذا الشكل الوظيفة الأساسية للموجه هي تأمين صلابة المنشأة، ويهدف تقليل الضياعات الهيدروليكية فإن دعائم الموجه تصنع بشكل انسيابي مع اتجاه التيار. يتكون جهاز التوجيه من $(24 \div 20)$ ريشة (6) ووظيفة ريش الموزع تشكيل السرعة الموجهة أمام مدخل الدولاب العامل (فتل التيار) الشكل (1-16) مقطع B-B وكذلك تنظيم تدفق العنفة واستطاعتها عن طريق فتل الريش وتغير الفتحة α_0 . يتم تصريف الماء من الدولاب الدائر بمساعدة أنبوب السحب (9) وهو على شكل ناقصة تعمل على تخفيض السرعة تدريجياً وبالتالي تخفيض القدرة الحركية للتيار عند الخروج من العنفة.



الشكل (1-16) مخطط العنفة القطرية المحورية (عنفة فرنسيس)

يعد الغطاء (10) عنصراً بالغ الأهمية في العنفات القطرية - المحورية حيث تثبت إليه حلقة توجيه العنفة (11) ومحاور ريش الموزع (6) وميكانيزم إدارتها. يستقبل غطاء العنفة حمولة هيدروليكية عالية لذلك يجب أن يتمتع بمثانة وقساوة عاليتين. يبين الشكل (2-16) الشكل الخارجي للدولاب العامل للعنفة القطرية - المحورية.



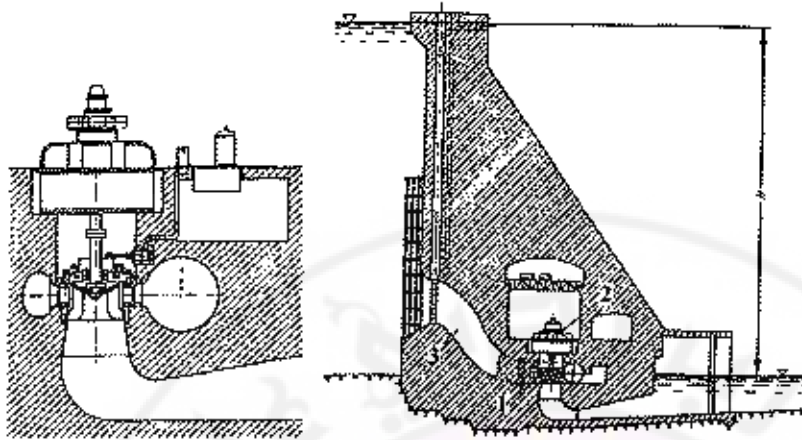
الشكل (2-16) الدولاب العامل للعنفة القطرية - المحورية

16 - 1 - 2 - آلية عمل العناصر التصميمية لعنفة فرنسيس:

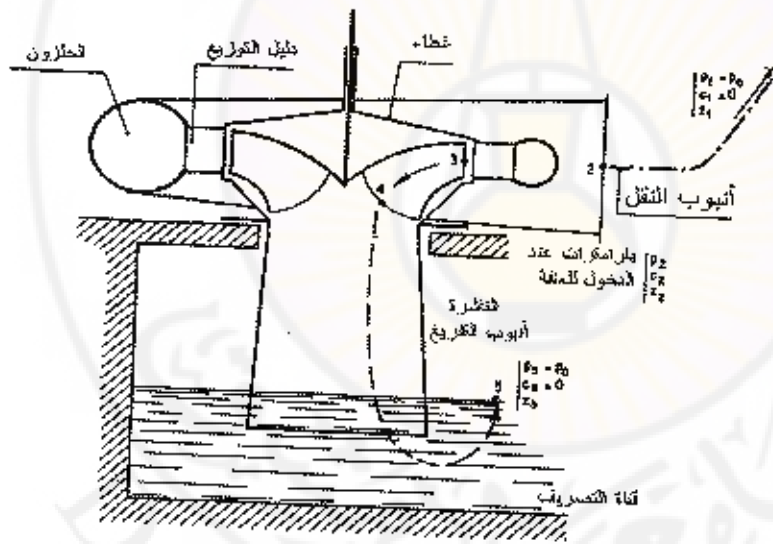
The Mechanisms Of Francis Turbine Components :

تختلف العنفة (القطرية - المحورية) عن العنفة ذات الريش القابلة للدوران بتمتع دواراتها بعدد أكبر من الريش موصولة مع بعضها بعضاً بواسطة إطار، وبغير قابلة للدوران و يصل مردود مثل هذه العنفات إلى قيمته العظمى فقط عند نظام محدد للعمل، فإذا ما تغير هذا النظام للعمل انخفض وبحدة مردود هذه العنفات. تكون مجموعة التحكم بهذه العنفات أبسط مما هي عليه لدى العنفات ذات الريش القابلة للدوران لأن الريش في هذه العنفات لا تدور حول محاورها ولأن ميكانيزم تدوير هذه الريش غير موجود. ويبين الشكل (3-17) مخطط عنفة (قطرية - محورية) متوضعة في جسم السد.

ويبين الشكل (4-16) النقاط الهامة في العملية التصميمية لعنفة فرنسيس. حيث يصل الماء إلى العنفة من خزان السد (1) مروراً بأنبوب النقل (2) ثم الحلزون والموجه والموزع وصولاً للنقطة (3) نقطة الدخول إلى الريشة والنقطة (4) نقطة الخروج منها ثم يتجه السائل عبر أنبوب التفريغ باتجاه النقطة (5) المستوى السفلي للماء (منسوب مجرى النهر).

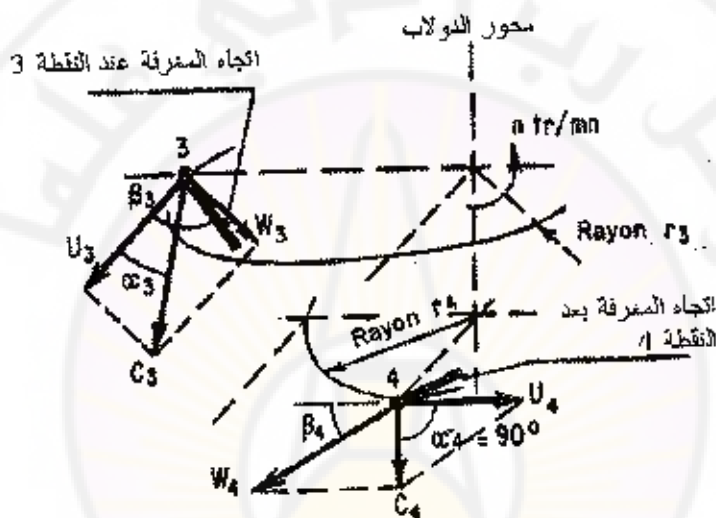
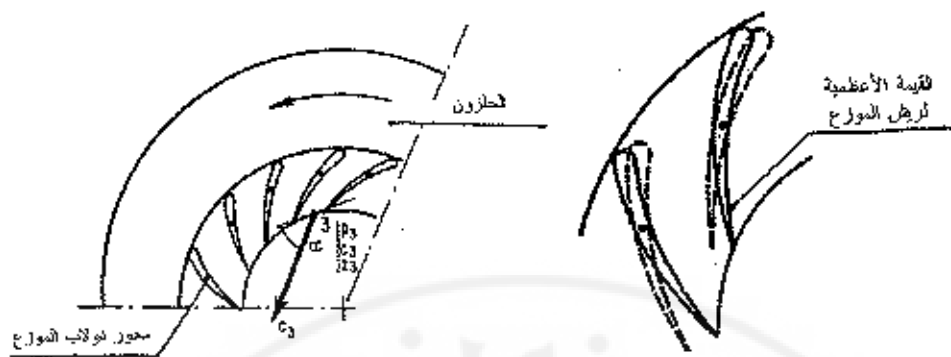


الشكل (3-16) مقطع في بناء محطة كهرومائية تستخدم عتقة فرنسيس متوضعة في جسم السد تعمل تحت تأثير ضاغط متوسط ($H=80-100M$). 1- العتقة، 2- المنوية، 3- أنبوب النقل،



الشكل (4-16) النقاط التصميمية لعتقة فرنسيس

كما يبين الشكل (5-16) آلية عمل جهاز التوجيه ومثلثات السرعة عند الدخول وعند الخروج من ريشة العتقة وكذلك النقاط التصميمية في أنبوب التفريغ (التصريف).



الشكل (5 - 16) آلية عمل جهاز التوجيه ومثلثات السرعة لعنفة فرنسيس

16 - 3 - تصميم مكونات عنفة فرنسيس :

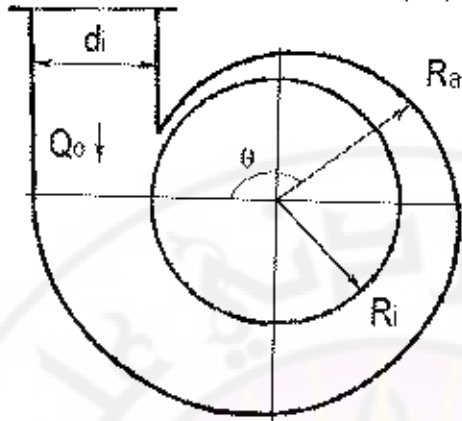
Designing The Francis Turbine Components:

تعتمد العملية التصميمية لمكونات عنفة فرنسيس على الأسس والمفاهيم النظرية وآلية العمل، ومتطلبات العناصر التصميمية هي:

- 1- تحديد الغزارة Q_0 بدلالة قطر المدخل (d_i) وسرعة الدخول (V_i).
- 2- تحديد القطر D_0 .
- 3- عمق (ارتفاع) ريشة التوجيه (B_0) وطولها (L_0).
- 4- عدد ريش التوجيه (Z_0).
- 5- قطر المدخل (D_1).

6- القطر الخارجي (D_2).

7- نصف قطر منحنى اللتاج (R_1).



الشكل (6 - 16) الغلاف الحلزوني

1- الغلاف الحلزوني:

إن المنحنى الخارجي للغلاف الحلزوني يشكل حلزون أرخميدس.

إذا كان قطر المدخل (d_i) والسرعة (V_i) فإن كمية الماء الجاري (Q_0) لكل ثانية

$$Q_0 = V_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \quad \text{وحيث أن:}$$

$$V_i = K_v \sqrt{2gH} - \text{أقصى قيمة للسرعة } V_i \text{ حوالي } 10 \text{ [m/s].}$$

- قطر المدخل d_i يجب أن يكون أقل أو ربما يساوي قطر أنبوب التشغيل

$$R_o = R_i + \frac{\theta}{2\pi} \cdot d_i \quad \text{- عند أي زاوية } \theta \text{ يكون نصف القطر. وكمية الماء}$$

$$Q = \frac{\theta}{2\pi} \cdot Q_0$$

وبصورة عامة: يستعمل الحلزون الكامل لتوربين ذي سمت عالي.

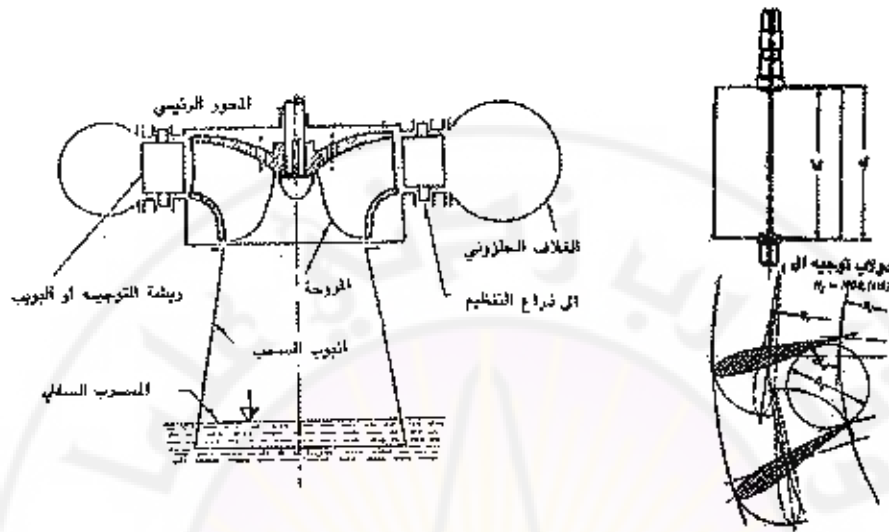
يستعمل نصف الحلزون في المنشآت ذات السمت المنخفض.

الجدول (16-1)

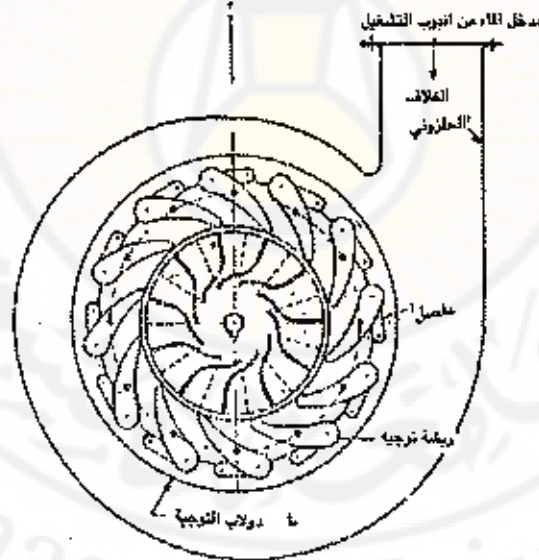
K_v	0.2	0.15
H (m)	25	500
N_s	عالي	منخفض

2- ريش التوجيه:

تملك ريش التوجيه مقطعاً ذا جسم انسيابي لكي يكون الجريان ذا شكل انسيابي.



الشكل (7 - 16) ريش التوزيع



الشكل (8 ... 16) عنفة فرنسيس مع آلية حركة ريش التوجيه

1 - القطر $[D_0]$:

هو القطر المقاس لغاية المسافة المدببة لريشة التوجيه، وبذلك فإن السرعة المماسية تكون:

$$U_0 = \frac{\pi D_0 N}{60}$$

هنا U_0 : سرعة افتراضية بغرض تسهيل حساب D_0 ، وفي الحقيقة فإن ريش التوجيه تكون ثابتة. بما أن: $U_0 = K_{U_0} \sqrt{2gH}$ ، حيث: $(K_{U_0} = 0,7 \div 1,34)$ يزداد مع ازدياد السرعة النوعية.

بالتعويض نجد:

$$D_0 = \frac{60 K_{U_0} \sqrt{2gH}}{\pi N} \quad (17-1)$$

2 - العمق أو ارتفاع الموزع $[B_0]$:

ليكن عمق ريشة التوجيه هو (B_0) . لذلك إذا كانت السرعة نصف القطرية عند المخرج هي v_{m0} ، بإهمال سمك المسافة المدببة فإن: مساحة مقطع الانسياب يساوي $\pi \cdot D_0 \cdot B_0$ والتصرف $Q = \pi \cdot D_0 \cdot B_0 \cdot v_{m0} = \pi \cdot D_0 \cdot B_0 \cdot K_{v_{m0}} \sqrt{2gH}$ حيث أن $K_{v_{m0}}$ يزداد من $(0,35 \div 0,15)$ مع زيادة السرعة النوعية، (راجع الشكل (9-16) الذي يبين الثوابت المختلفة لتوربين فرنسيس مقابل السرعة النوعية). من المعادلة السابقة وبالإصلاح نجد أن:

$$B_0 = \frac{Q}{\pi \cdot D_0 \cdot K_{v_{m0}} \sqrt{2gH}} \quad (16-2)$$

3 - طول ريشة التوجيه L_0 :

$$L_0 = 0,3 D_0 \quad (16-3)$$

4 - عدد ريش الموزع Z_0 :

إن عدد ريش الموزع (الموجه) Z_0 يعتمد على القطر D_0 ويتغير بصورة عامة من $(8 \div 24)$. إن ريش الموزع يجب أن تكون بعدد زوجي، وبذلك فإن دولايب التوجيه يمكن تقسيمه زوجياً في حالة الإنتاج والنقل عندما يكون كبيراً جداً.

$$Z_0 = 0,02 D_0 \quad (16-4)$$

الجدول التالي يبين عدد ريش التوجيه Z_0 لتوربين فرنسيس مقابل قيم مختلفة لـ D_0 ، وقد ذكرت مجموعتين في الجدول (2-16): المجموعة الأولى لها سرعة نوعية أقل من (200) والأخرى أكبر من (200).

الجدول (2-16) قيم عملية لـ D_0 مقابل Z_0

N_s	$Z_0=8$	10	12	14	16	18	20	24
<200	D_0 قيم (mm)	250	400	600	800	1000	1250	>1700
	من --- to --- 250	400	600	800	1000	1250	1700	--
>200	من ---	300	450	750	1050	1350	1700	>2100
	to --- 300	450	750	1050	1350	1700	2100	

5- قطر المدخل D_1 :

يستمر قطر المدخل لغاية نهاية التاج، وفي بعض الأحيان يقاس قطر المدخل لغاية مركز حافة ريشة المروحة، وفي كل الحالات فإن:

$$U_1 = \frac{\pi D_1 N}{60}, \quad U_1 = K_{U_1} \sqrt{2gH} \quad (16-5)$$

حيث K_{U_1} تغير من (0,62 ÷ 0,82) ويزداد مع السرعة النوعية:

$$D_1 = \frac{60 K_{U_1} \sqrt{2gH}}{\pi N} \quad (16-6)$$

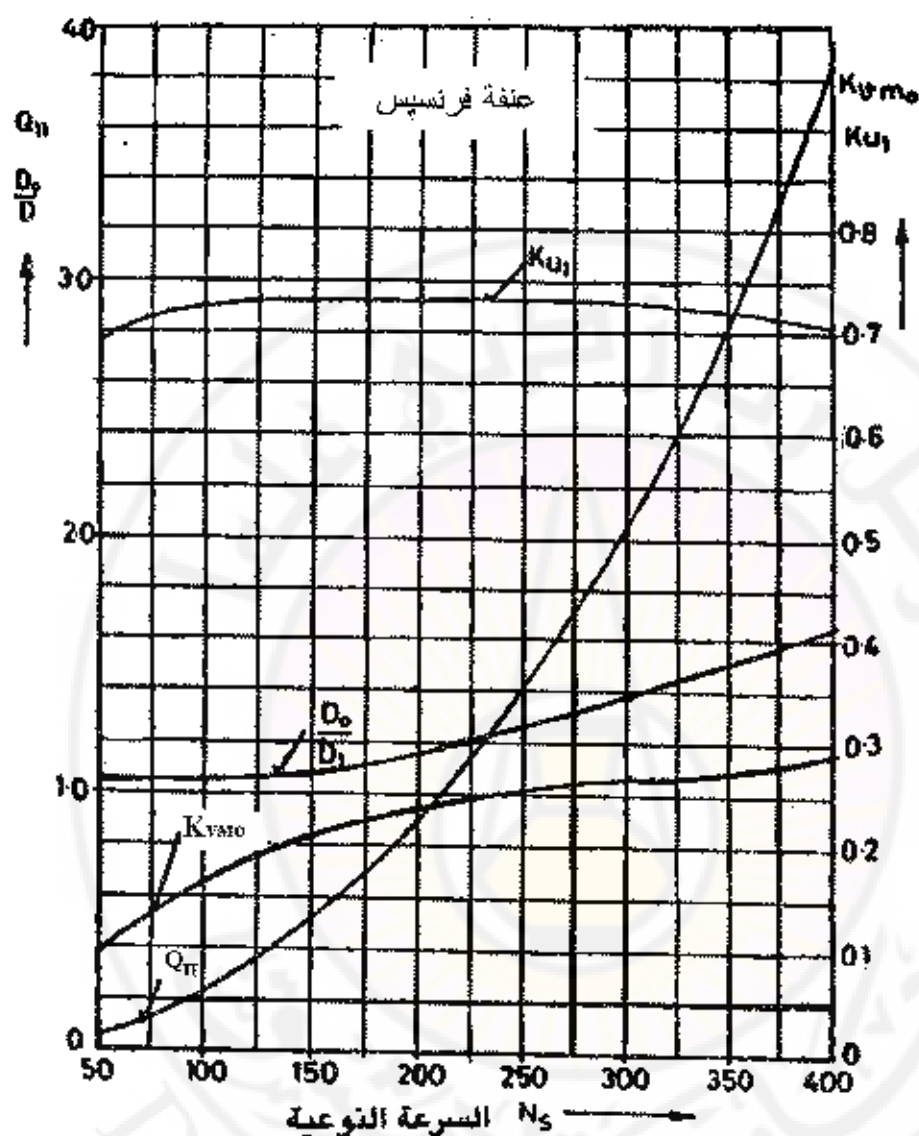
6- القطر الخارجي (D_2) :

$$D_2 = \frac{D_1}{2} \quad (16-7)$$

7- نصف قطر منحنى التاج (R_f) :

$$R_f = \frac{D_1}{2} \quad (16-8)$$

يتغير سمك ريشة المروحة من (25mm ÷ 5 mm) ويعتمد على D_0 .



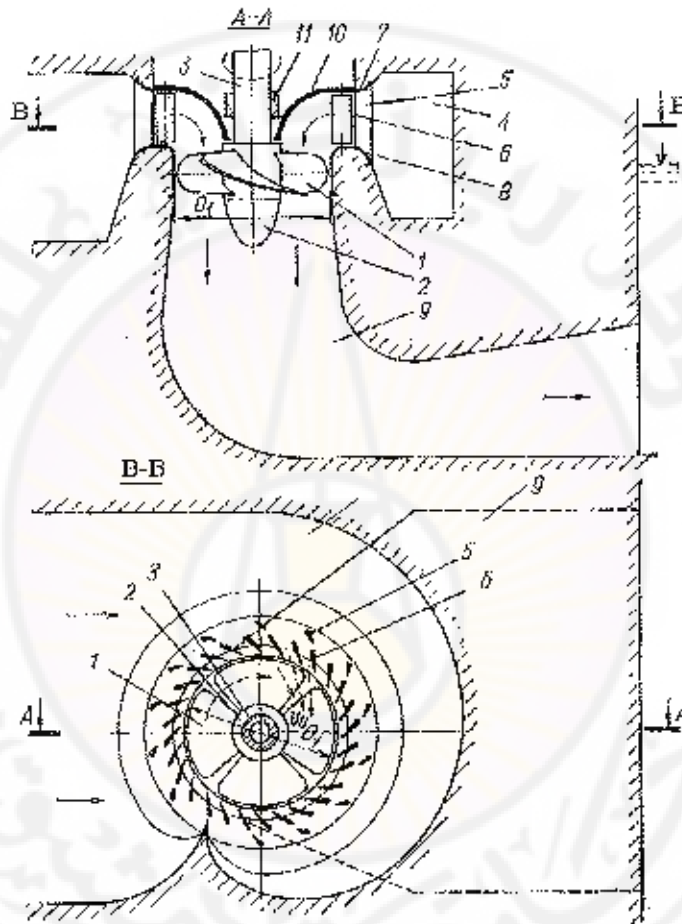
الشكل (9 - 16) ثوابت حنفة فرنسيس مقابل السرعة النوعية.

ثانيا: 16 - 2 - تصميم العنفات المحورية (عنفة كابلان)

Designing Of Kaplan Turbine

16 - 2 - 1 - التوصيف الفني لعنفة كابلان:

The Technical Description Of Kaplan Turbine :



الشكل (16-10) مخطط العنفة المحورية

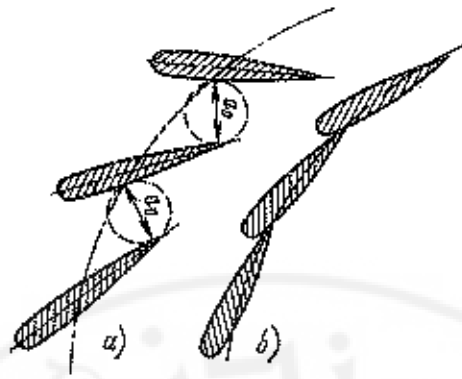
تستخدم هذه العنفات من أجل ضواغط منخفضة (ذات ضواغط منخفض) بحدود من $[m] 3 : 1$ وحتى $|m| 60 \div 70$ ، يبين الشكل (10-16) مخطط العنفة المحورية. يتألف الدولاب العامل في العنفة المحورية من: ريش الدولاب (1) المثبتة على الجسم (2) الموصول بدوره مع المحور (3). يتراوح عدد الريش في الدولاب من (4) إلى (8) ريش، عدد الريش الأكبر يوافق الضواغط الأعلى. نلاحظ في هذا النوع من العنفات طريقتين لتثبيت الريش: في الطريقة الأولى تكون الريش مثبتة بزاوية ميل محددة ثابتة لا تتغير. وتدعى العنفة في هذه الحالة بالمروحية، أما في الحالة العامة فإن الريش تصنع وتثبت بحيث تكون قابلة للدوران أي أن زاوية ميلها تتغير تبعاً لشروط العمل (الحمولة والضواغط) يسمى هذا النوع من العنفات بالعنفات ذات الريش الدوارة ويتميز هذا النوع بأنه ذو مؤشرات طاقة أعلى من مؤشرات العنفات المروحية كما أنه أكثر تعقيداً.

يمثل المحور والدولاب العامل الجزء الدوار للعنفة ويعد قطر الدولاب D_1 بارامتراً مميزاً لقياس العنفة.

يسمى هذا النوع من العنفات بالمحورية لأن الماء يدخل إلى الدولاب الدائر ويخرج منه موازياً لمحور الدوران كما هو مبين في المقطع $A-A$ ، يدخل الماء إلى الدولاب الدائر من خلال الحجرة 4 وعبر جهاز التوجيه 6.

تصنع حجرة العنفة غالباً من الإسمنت ويكون مقطعها بشكل معين منحرف. ولكن ومن أجل ضواغط عالية أكبر من $[m] 50$ تستخدم حجرات فولاذية بمقطع دائري.

يتألف الجهاز الموجه من (24 ÷ 32) ريشة (6) تشكل بروفيلاً شبكياً دائرياً يعمل على قتل التيار قبل دخوله إلى ريش الدولاب، يظهر هذا القتل من خلال شعاع السرعة v_0 عند المخرج من جهاز التوجيه والموجه تحت زاوية معينة تبعاً لنصف قطر العنفة الشكل (10-16) المقطع (B-B).



الشكل (11 - 16) تنظيم تدفق العنفة عن طريق جهاز التوجيه

إضافة لذلك فإن ريش جهاز التوجيه تستخدم لتنظيم استطاعة العنفة، لذلك فإن كل ريشة يمكن إدارتها على محور، أو من خلال دوران متزامن لكل الريش، بزاوية ما تتغير من α_0 وحتى قيمة أعظمية مما يؤدي لتغير استطاعة وتدفق العنفة الشكل (11 - 16 - a) والشكل (11 - 16 - b). يتم تصريف الماء من الدولاب العامل بمساعدة قناة التصريف (9) الشكل (10 - 16) وتكون على شكل ناشرة تعمل على تأمين هبوط تدريجي للسرعة حتى يصل الماء إلى المستوي السفلي، يسمح هبوط السرعة بتقليل الطاقة الحركية للتيار بعد الخروج من العنفة مما يؤدي إلى زيادة قيمة المردود. تصنع قناة التصريف للعنفات الضخمة من الإسمنت المسلح دائماً. يعد الغطاء (10) عنصراً تصميمياً هاماً في العنفات المحورية إذ إنه يتحمل جزءاً من ضغط الماء، وتثبت إليه محاور ريش جهاز التوجيه (6) كما يثبت كرسي التحميل (11) على الغطاء أيضاً.

يتكون جزء توصيل الماء إلى العنفة من حجرة العنفة والمثبت وجهاز التوجيه. تجدر الإشارة هنا إلى أن بنية هذه العناصر هي غالباً نفسها تقريباً في كافة العنفات الرد فعلية. المثبت في العنفة هو عبارة عن عدد من الأعمدة ذات شكل انسيابي باتجاه الجريان، يثبت كل واحد من هذه الأعمدة إلى الغطاء المسلح العلوي بواسطة خطاف أو توصل هذه الأعمدة بحلقة فولاذية بواسطة أحزمة من الأعلى والأسفل بهدف تحقيق المتانة والصلابة. تستخدم الأعمدة المنفصلة عند الضواغط الصغيرة والأقطار الكبيرة للعنفة، أما المثبت مع الأحزمة فيستخدم عند الضواغط الكبيرة جداً وحتماً عندما تصنع حجرة العنفة من الفولاذ.

يتألف جهاز التوجيه من ريش موجهة مثبتة في الحلقة السفلية للعنفة بواسطة محور يؤمن إمكانية الدوران.

16 - 2 - 1 - 1 - البارامترات المحددة لجهاز التوجيه هي:

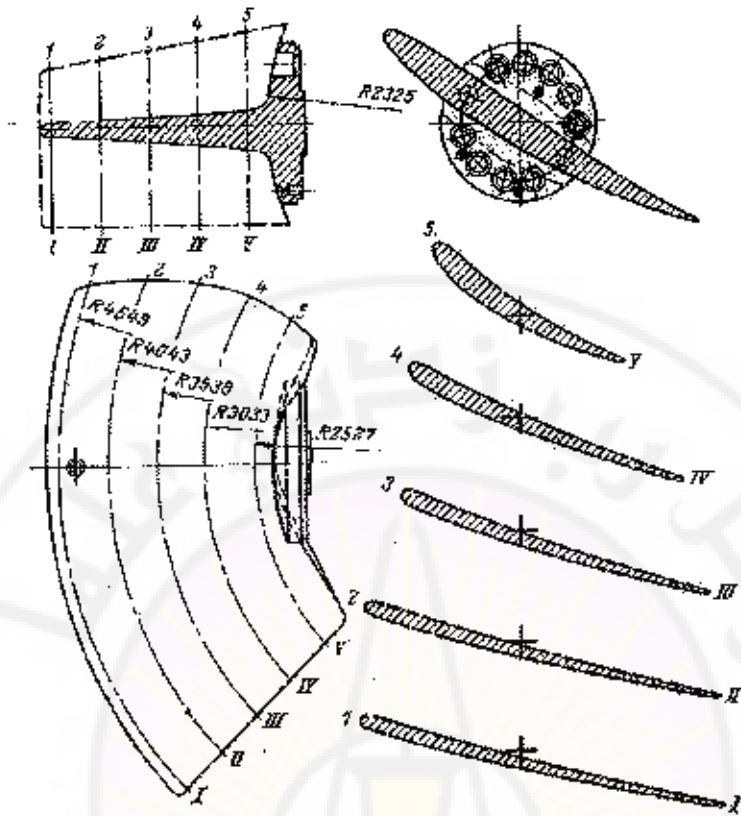
1- عدد ريش التوجيه المثبتة: في العنفة المحورية وعند الضواغط الصغيرة عددها يساوي 32 ريشة، أما في الضواغط الكبيرة جداً فعددها 24 وأحياناً 20.

2- ارتفاع جهاز التوجيه b_0 ، غالباً تستخدم قيم لا واحدة (منسوبة للقطر) والتي تصنف نوعية العنفة على الأكثر. الارتفاع النسبي: $\bar{b}_0 = b_0 / D_1$ حيث D_1 : قطر العنفة. في العنفات المحورية b_0 يكون $0,45 \div 0,35$ والقيم الأصغر توافق الضواغط الكبيرة.

3- القطر باتجاه محور دوران ريش التوجيه D_0 ، القطر النسبي لجهاز التوجيه: $\bar{D}_0 = D_0 / D_1$

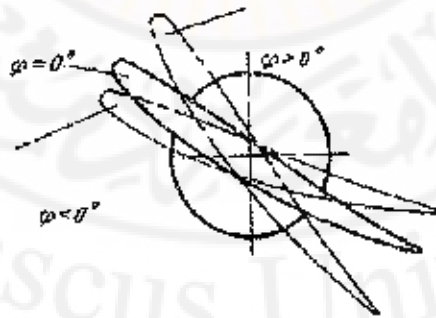
16 - 2 - 1 - 2 - الدولاب الدائر (العامل):

يتألف الدولاب العامل للعنفة من الريش والجسم الذي تثبت عليه، ويتم تثبيت الدولاب العامل بواسطة البراغي مع الصفيحة المسفلية إلى محور الدوران، وعند طرف الخروج يثبت الموجه بواسطة الجلبة للإقلال من الضياعات الحاصلة عند خروج الماء من الدولاب. تتألف ريشة الدولاب الدائر للعنفة المحورية من الريشة والفلنشة، وللريشة سماكة نمسية وسطح منحني وعندها ينشأ التبادل في القوى مع تيار المسائل المار عبر الدولاب العامل، إذا فهي التي تعمل على تحويل الطاقة الهيدروليكية إلى طاقة حركية دورانية للدولاب العامل والمحور المرتبط به. وظيفة الفلنشة تثبيت الريشة إلى المقعد، وبمساعدها تثبت الريشة إلى الجلبة.



الشكل (12 - 16) ريشة الدولاب العامل للنفقة المحورية

يبين الشكل (12-16) مقطعاً أسطوانياً للريش حيث يوضح شكلها، المقاطع القريبة من القاذبة أكثر سماكة من المقاطع البعيدة عنها. ويحدد هذا الشكل كشرط هيدروليكي لانسايابية الريش ومثانتها، الحمولة التي تقع على الريشة كبيرة جداً وتكون موزعة على كامل السطح.



الشكل (13 - 16) دوران ريش الحفة المحورية

يبين الشكل (13-16) الدولاب العامل ذا الريش القابلة للدوران أي أن الريش قابلة للدوران حول محورها وبالتالي يمكن تغيير زاوية تثبيتها. في مثل هذا النوع من العنفات فإن الحسابات تبدأ باعتبار أن زاوية تثبيت الريشة α تكون معدومة، كما أن هذه الزاوية يمكن أن تأخذ قيمة موجبة أو سالبة ($\alpha > 0$ ، $\alpha < 0$) تبعاً لطبيعة عمل العنفة (الحمولات المطبقة). تغير قيمة زاوية التثبيت كتاباً لفتحة جهاز التوجيه والضغوط المؤثر، أي: $\alpha = f(\alpha_0, H)$ ، تغير هذه الزاوية بحيث تؤمن مردوداً أعظماً في كل ظروف العمل وبالتالي فإن:

العنفات ذات الريش القابلة للدوران تملك تحكماً ثانياً في الاستطاعة الأول عن طريق تغيير فتحة جهاز التوجيه والثاني عن طريق تغيير زاوية تثبيت الريش للدولاب العامل.

يعطي هذا مجالاً واسعاً لاستخدام هذا النوع من العنفات، في بعض الأحيان تستخدم العنفات المحورية ذات الريش المثابتة وتسمى العنفات المروحية، وهي أبسط وأرخص ولها عامل واحد لتنظيم الاستطاعة (جهاز التوجيه) لكن المؤثرات الطاقية لها منخفضة نسبياً. تستخدم العنفات المحورية في مجال واسع لارتفاعات (الضغوط)، ومن الطبيعي أنه عندما يتغير الضغوط فإن ذلك يعني تغير شكل الدولاب العامل وأبعاده وعدد الريش وكذلك قطر الجسم.

16 - 2 - 1 - 3 - حجرة الدولاب العامل:

تصنع من خليطة فولاذية عالية القساوة ومثبتة بالجسم البيتوني للمحطة ويفسر هذا لأن جدران الحجرة تتلقى أكبر حمولة من ضغط الماء أثناء عمل العنفة. ومن أجل العنفات ذات الريش الدورانية فإن الفراغات بين نهايات ريش الدولاب العامل وحجرة الدولاب تلعب دوراً مهماً إذ إنه كلما صغرت هذه الفراغات كان المردود أكبر، وبشكل عام تؤخذ هذه الفراغات بحدود $\delta = 0,001 D_1$ من أجل قطر $9,5 [m]$ فإن الفراغ سيكون حوالي $1 [cm]$.

للمحافظة على قيمة ثابتة لهذا الفراغ أثناء تغيير زاوية تثبيت الريش فإن حجرة الدولاب العامل يجب أن تكون كروية الشكل، ولكن هنا تظهر صعوبات عند تركيب الدولاب العامل في مكانه المناسب لذا فإن الجزء العلوي من حجرة الدولاب يصنع بشكل أسطواني.

16 - 2 - 1 - 4 - غطاء العنفة:

وهو يغطي الفراغ فوق الدولاب الدائر. ويستخدم لتوزيع استناد المقاعد العلوية لريش التوجيه ولارتكاز حلقة الضبط وفي الغطاء يتوضع كرسي التحميل للعنفة، لذلك ولتأمين استقرار وأمان في عمل العنفة فإن الغطاء يجب أن يتمتع ليس بالمتانة فقط بل بالصلابة أيضاً. كما

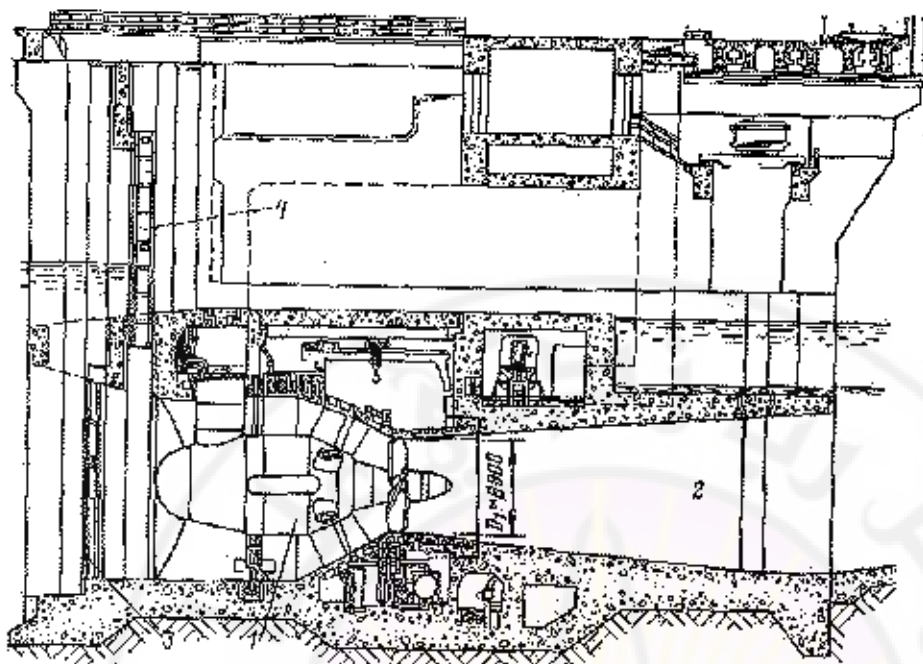
تستخدم العنفات المحورية الأفقية بشكل واسع في المنشآت المغسورة، حيث يكون المولد فيها متوضعا في وعاء فولاذي والماء ينساب خارجه.

يبين الشكل (14-16) إحدى المنشآت التي تستخدم عنفة من هذا النوع.

1- كبسولة المنشأة (العنف والمولد) capsule 2- أنبوبة التفريغ. 3- شبك. 4- بوابات لأفنية الماء عند استخدام المنشأة الكبسولية فإن التيار يتحرك قليلا على كامل طول المسار، كما أن الحركة المستقيمة المحورية اللادورانية في أنبوب التصريف تمثل أهمية خاصة؛ هذا يؤدي إلى انخفاض الضياعات الهيدروليكية ورفع قيمة مربود العنف وخاصة عند التدفقات الكبيرة. وبالتالي فإن القدرة التي تولدها هذه العنفات أكبر من القدرة التي تولدها العنفات العمودية والتي لها نفس الأبعاد بمقدار $(20 \div 35 \%)$.

المشكلة الأساسية في المنشآت الأفقية هو تأمين العمل الأفضل للزولمانات (المحامل) حيث تقع عليها أكبر حمولة قطرية. لذلك يتم العمل على تقريب مركز ثقل الدوالب العامل باتجاه المحامل. في بعض المنشآت الكبسولية يتم تركيب مسرع بين محوري العنف والمولد يقوم برفع تردد دوران الدوار في المولد بحدود $(5 \div 10)$ مرات مقارنة مع تردد العنف وهذا يسمح بإنقاص أبعاد المولد وقطر الكبسولة، غير أن المسرع نفسه معقد للغاية وهو مستغني لا محوري ويستخدم عند الاستطاعة الصغيرة (حيث يسقط الماء على شكل شلال من $4 \div 5 [m]$) وفي جمهورية ألمانيا على نهر موزيل ركبت محطة كبسولية باستطاعة $3,5 \div 4,6 [MW]$ تدويرها عنفة قطرها

$$D_1 = 4,6 \div 4,8 [m] \text{ ومسرع دوران بين } \frac{87}{750} \div \frac{67}{750} \text{ (r.p.m)}$$



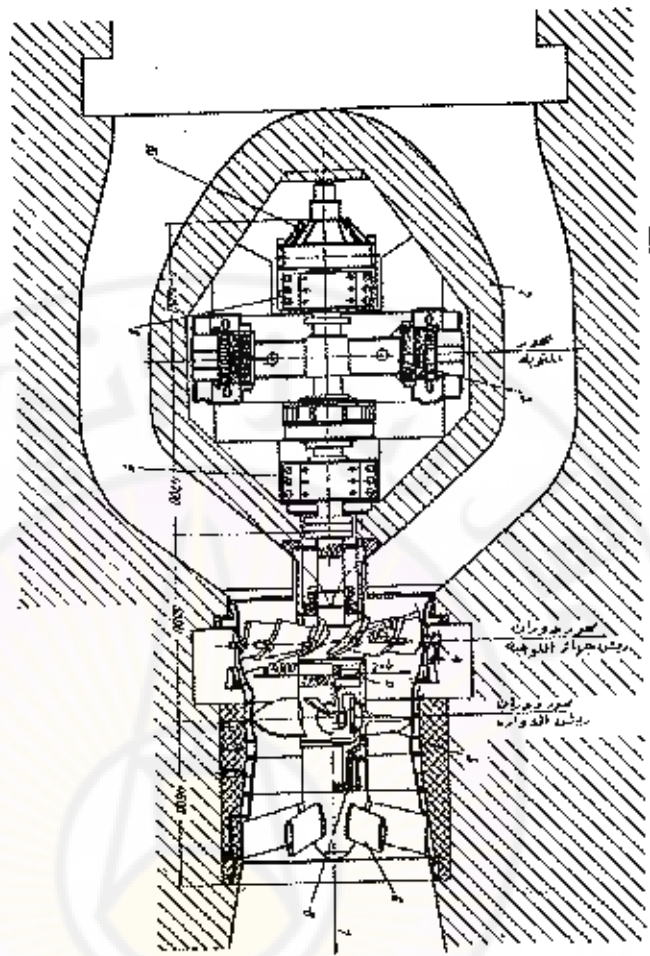
الشكل (14-16) محطة كهرومائية ذات عتفة محورية أفقية

نضطر خلال مراحل زمنية معينة إلى ضخ الماء من الخزان السفلي باتجاه الخزان العلوي بغية استعمال هذا الماء في تدوير العتفة خلال أزمدة أخرى. من الممكن أن تقوم العتفة نفسها بعملية الضخ هذه أي أن العتفة تقوم بدور المضخة والمنوبة بدور المحرك الكهربائي تتمتع العتفات المائية التي تدور بفعل المد والجزر بتصاميم خاصة تستهلك هذه العتفات قدرة المد والجزر للبحار، تتميز العتفات الكهرومائية التي تستفيد من المد والجزر للبحار بالتناوب الدوري بين الخزان العلوي والخزان السفلي.

يزداد استعمال العتفات الأفقية ذات الريش القابلة للدوران في السنوات الأخيرة وتركب هذه العتفات في المحطات الكهرومائية كما تستعمل لتوليد الكهرباء تحت تأثير المد والجزر.

ويبين الشكل (15-16) واحدة من هذه العتفات الأفقية المركبة في المحطة الكهرومائية (كامسك).

- 1- قناتين جانبيتين
- 2- حجرة بيتونية
- 3- المنوبة
- 4- جهاز التوجيه المحوري
- 5- دوائر العنفة
- 6- ستاتور الخروج
- 7- قناة تصريف
- 8- مضجع عمود العنفة
- 9- مضاجع
- 10- حجرة استقبال الزيت
- 11- سرفوموتور (الاسطوانة والمكبس)

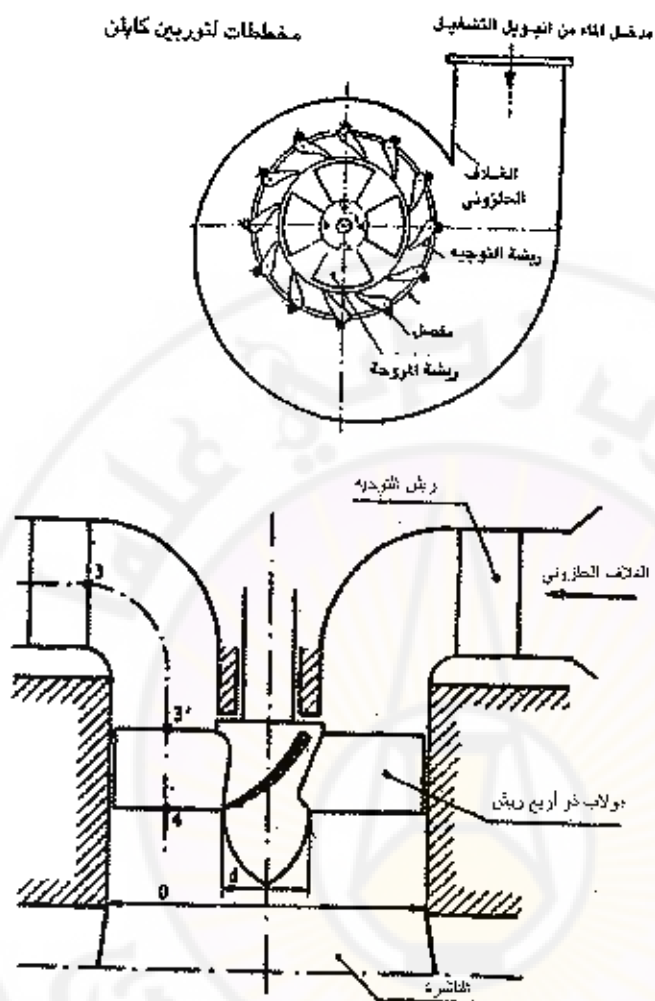


الشكل (15 - 16) مخطط عنفة أفقية (محطة كامسك)

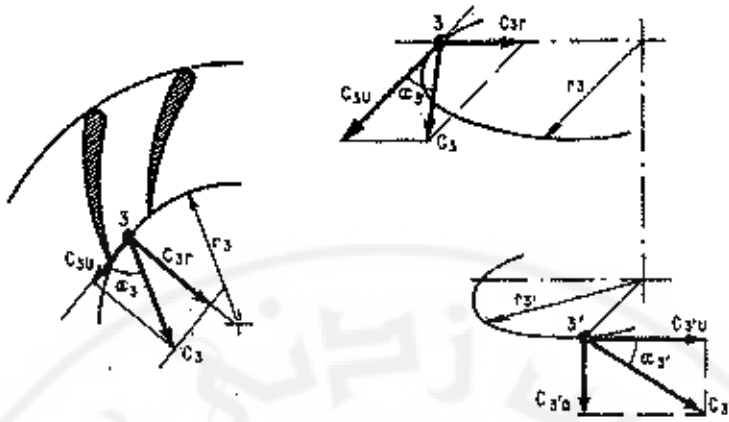
16 - 2 - 2 آلية عمل العناصر التصميمية لعنفة كابلان:

The Mechanisms Of Kaplan Turbine Components:

تبين الشكل (16-16) آلية العمل عند النقاط المختلفة من عمل العنفة عند الدخول وعند الخروج من الريشة. كما يبين الشكل (16-17) مثلثات السرعة لعنفة كابلان



الشكل (16-16) آلية العمل عند النقاط المختلفة لعتلة كابلان



الشكل (17 - 16) مثلثات السرعة لعنفة كابلان

16 - 2 - 3 تصميم مكونات عنفة كابلان:

Designing The Kaplan Turbine Components:

تعتمد العملية التصميمية لمكونات عنفة بكتون على الأسمس والمفاهيم النظرية وألية العمل،

و متطلبات العملية التصميمية هي:

1- عدد ريش جهاز التوجيه Z_0

2- قطر دولاب التوجيه D_0 .

3- قطر محور المروحة d_1 .

4- الخطوة (t) .

5- معدل الجريان Q .

6- الكفاءة الكلية للتوربين (η_t) .

1- ريش التوجيه لعنفة كابلان:

يمكن إيجاد عدد ريش التوجيه Z_0 من الجدول التالي وهي معطاة لأقطار مختلفة لدولاب

التوجيه D_0 بوحدات [mm] ويمكن حساب قيمة قطر دولاب التوجيه (D_0) من المعادلة التالية:

$$D_0 = \frac{60 K_{02} \sqrt{2gH}}{\pi \cdot N} \quad (16-9)$$

3- قيم عملية η_0, η_H لتوربين كابلان:

الجدول (4-16)

N_s	K_s	η_H	η_0
250	96	0.91	0.965
900	98	0.95	0.985

4- معدل الجريان خلال مروحة كابلان:

تحدد Q كمية الماء المناسبة في الثانية من العلاقة:

$$A = K \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_s^2) \quad (16-12)$$

حيث K النسبة المئوية لمساحة الجريان الصافي ويمكن الحصول عليها من استنتاج المساحة المشغولة بالريش.

الفطر الخارجي للمروحة D_1 :

$$D_1 = D_2 \quad (16-13)$$

$$V_{m1} = K_{V_{m1}} \sqrt{2gH} \quad (16-14)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} K K_{V_{m1}} \sqrt{2g} (D_1^2 - d_s^2) \sqrt{H} \quad (16-15)$$

$$Q = Q_{11}^* (D_1^2 - d_s^2) \sqrt{H} \quad (16-16)$$

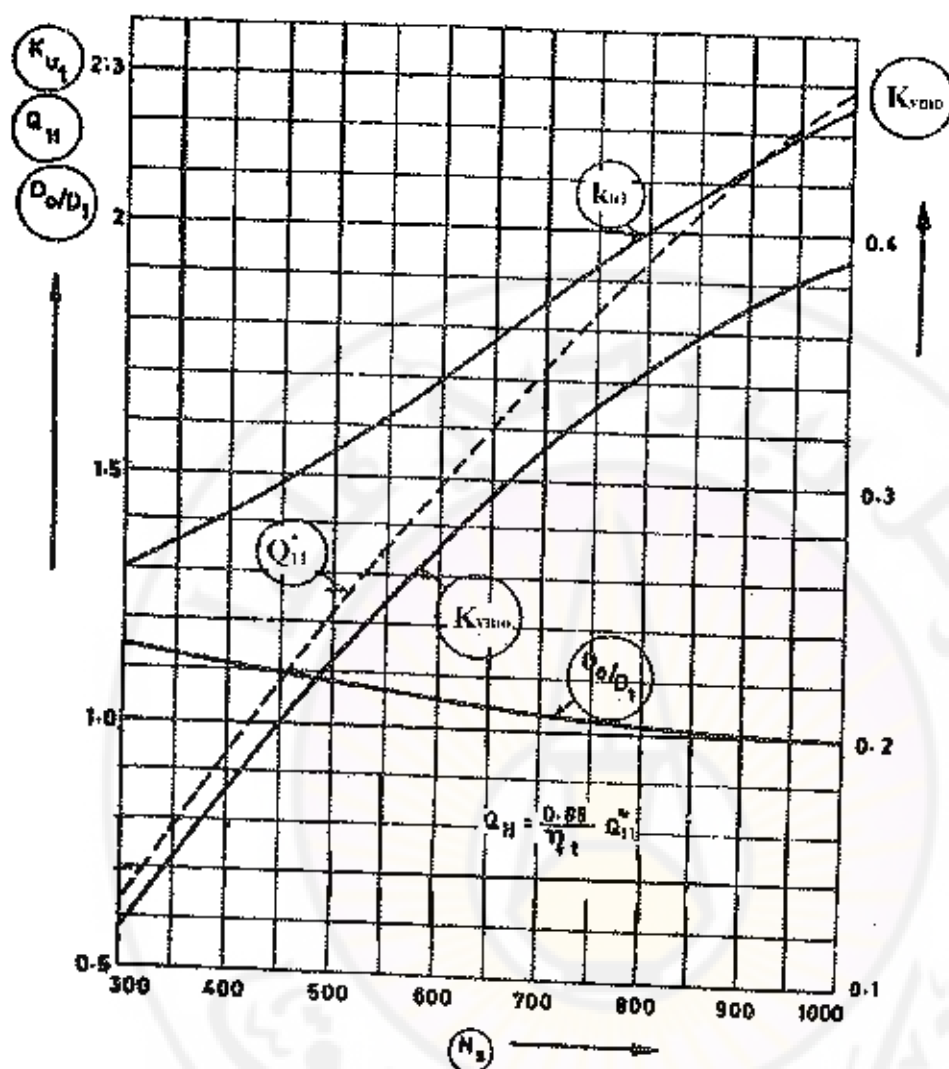
$$Q_{11}^* = \frac{\pi}{4} K K_{V_{m1}} \sqrt{2g} \quad (16-17)$$

حيث Q_{11}^* معامل ثابت بالنسبة للتوربينات المتشابهة هندسياً ويطلق عليه (الجريان النوعي). وإن قيمته تتغير من $(0,6 + 2,175)$ بالاعتماد على قيم (N_s) .

5- الكفاءة الكلية للتوربين: $\eta_t = \frac{P_G}{P_I}$

$$N_s = \frac{N \sqrt{P_I}}{H^{5/4}} \quad K_{V_{m1}} \text{ نسبة الجريان, } K_{U1} \text{ نسبة السرعة, } V_{m1} \text{ سرعة الجريان.}$$

يبين المخطط (16-19) ثوابت عتقة كابلان مقابل السرعة النوعية



الشكل (16 - 19) ثوابت عنفة كابلان مقابل السرعة النوعية.

الفصل السابع عشر

العنفات: اختيارها والمخاطر التي تتعرض لها

Turbine: Selection & Dangers Affecting their Work

17-1 - تشابه العنفات وقوانين تشابه أنظمة عملها: Turbines Similarity

يحدد نوع العنفة بشكل بنائها التصميمي (الهندسي)، أو بمعنى آخر فإن كافة العنفات من النوع نفسه تمتلك شكلاً تصميمياً واحداً، ويجب الإشارة إلى أن قياس العنفة لا يؤثر في تحديد شكلها.

تبعاً لذلك نقول عن عنفتين من النوع نفسه ولهما قياسات مختلفة وتحققان الشروط التالية:

1 - كافة الزوايا المتقابلة لهما متساوية أي:

$$\delta_{11} = \delta_{12} \quad , \quad \delta_{21} = \delta_{22} \quad , \quad \delta_{31} = \delta_{32} \quad (17-1)$$

2 - نسبة كافة الأبعاد المتقابلة ثابتة:

$$\frac{D_{11}}{D_{12}} = \frac{D_{21}}{D_{22}} = \frac{b_{01}}{b_{02}} = \dots \quad (17-2)$$

ستكون أنظمة العنفات ذات النوع الواحد متشابهة وذلك إذا حافظنا على التشابه الهندسي لمثلثات السرعة في النقاط المتقابلة. وبالتالي عند تشابه أنظمة العمل:

1 - اتجاهات كافة السرعات المتقابلة يجب أن تكون واحدة أي كافة الزوايا المناسبة متساوية:

$$\alpha_{11} = \alpha_{12} \quad , \quad \beta_{11} = \beta_{12} \quad , \quad \dots \quad (17-3)$$

ارتباطاً بهذه الخاصية تسمى الأنظمة المتشابهة بالمتساوية الأضلاع.

2 - نسبة كافة السرعات في النقاط المتقابلة تمتلك قيمة ثابتة:

$$\frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{u_{11}}{u_{12}} = \frac{w_{11}}{w_{12}} = \text{const} \quad (17-4)$$

بعد هذه الإيضاحات ستحدد طبيعة العلاقات بين بارامترات العنفات ذات النوع الواحد ضمن شروط تشابه أنظمة عملها.

ليكن لدينا عنفتان من نفس النوع تختلفان بالأبعاد D_1, D_2 والضواغط H_1, H_2 . زوايا تثبيت ريش التوجيه وريش الدوالب العامل متساوية: $\varphi_1 = \varphi_2$ و $\alpha_{01} = \alpha_{02}$ ، ما هي نسبة

عدد دورات n_1, n_2 والتدفقات Q_1, Q_2 و الاستطاعات N_1, N_2 ليكون نظاماً العمل متشابهين؟

باستخدام نسب التشابه الهندسي (17-1) و (17-2) والحركي (17-3) و (17-4) وباستفادة من (14-6):

$$\frac{u_{11}}{u_{12}} = \frac{\pi D_1 n_1}{\pi D_2 n_2} = \frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} \quad (17-5)$$

وحسب (14-8) نجد: $\frac{v_{1m1}}{v_{1m2}} = \frac{Q_1}{\pi D_1 b_{01}} = \frac{\pi D_2 b_{02}}{Q_2}$ حسب العلاقة (17-2)

وباعتبار $\frac{D_1}{D_2} = \frac{b_{01}}{b_{02}}$ نجد أن:

$$\frac{v_{1m1}}{v_{1m2}} = \frac{Q_1 D_2^2}{Q_2 D_1^2} \quad (17-6)$$

وتبعاً للعلاقة (17-4) عند ثبات الأنظمة $\frac{u_{11}}{u_{12}} = \frac{v_{1m1}}{v_{1m2}}$ نحصل للمساواة التالية:

$$\frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} = \frac{Q_1 D_2^2}{Q_2 D_1^2} \Rightarrow \frac{Q_1}{n_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{n_2 D_2^3}$$

ويمكن تعميم هذه النتيجة بحيث يكون شرط التشابه الحركي لثبات نظام عمل العنفة:

$$\frac{Q}{n D^3} = const \quad (17-7)$$

الآن وباستخدام النسب المماثلة وبالأخذ بعين الاعتبار أن العنفات تعمل عند ضغوط مختلفة H_1, H_2 وبإدخال المرددة الهيدروليكية η_{H1} و η_{H2} نكتب معادلة أويلر بالصيغة (14-19) لكل عنفة على حدة:

$$g H_1 \eta_{H1} = (u_{11} v_{11} \cos \alpha_{11} - u_{21} v_{21} \cos \alpha_{21}) \quad (17-8)$$

$$g H_2 \eta_{H2} = (u_{12} v_{12} \cos \alpha_{12} - u_{22} v_{22} \cos \alpha_{22}) \quad (17-8-a)$$

ومن شرط التشابه (17-3) و (17-4) ومن الصيغة (17-5) نجد أن:

$$\alpha_{11} = \alpha_{12}, \alpha_{21} = \alpha_{22}, \frac{u_{11}}{u_{12}} = \frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{u_{21}}{u_{22}} = \frac{v_{21}}{v_{22}} = \frac{D_1 n_1}{D_2 n_2}$$

$$\cos \alpha_{11} = \cos \alpha_{12}, \cos \alpha_{21} = \cos \alpha_{22}$$

وبالتالي:

العلاقات بالقسم الأيمن من العلاقة (17-8) :
 $u_{12} = u_{21} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1}$; $v_{12} = v_{21} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1}$; $u_{21} = u_{11} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1}$; $v_{22} = v_{21} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1}$
 هذه

$$g H_2 \eta_{H2} = \left[\frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \right]^2 (u_{11} v_{11} \cos \alpha_{11} - u_{21} v_{21} \cos \alpha_{21}) \quad (17-8-b)$$

نقسم العلاقة (17-8) على (17-8-b) نحصل على:

$$\frac{H_1 \eta_{H1}}{H_2 \eta_{H2}} = \left[\frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} \right]^2$$

من هنا نجد نسبة عدد الدورات:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \sqrt{\frac{\eta_{H1}}{\eta_{H2}}} \quad (17-9)$$

بتعويض النتائج $\left[\frac{n_1}{n_2} \right]$ بشرط التشابه الحركي (17-7) :

$$\frac{Q_1}{n_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{n_2 D_2^3}$$

نحصل على نسبة التدفقات:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^2 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \sqrt{\frac{\eta_{H1}}{\eta_{H2}}} \quad (17-10)$$

وبعد ذلك من السهل إيجاد نسب الاستطاعات من العلاقة: $N = 9,81 Q H \eta$ فنجد أن:

$$N_2 = 9,81 Q_2 H_2 \eta_2 \text{ ، } N_1 = 9,81 Q_1 H_1 \eta_1 \text{ وباستخدام (17-10) نجد:}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^2 \frac{H_1}{H_2} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \frac{\eta_1}{\eta_2} \sqrt{\frac{\eta_{H1}}{\eta_{H2}}} \quad (17-10-a)$$

تسمى الصيغ (17-9) و (17-10) و (17-10-a) قوانين التشابه. وتستخدم بشكل واسع، وبما أن المردود الهيدروليكي η_H يتغير بشكل ضئيل إذا ومن أجل التبسيط أحياناً نقبل

$$\frac{\eta_{H1}}{\eta_{H2}} = 1 \text{ أن}$$

17 - 2 - بارامترات التحويل للعنفات: Parameters For Transfer Turbines

يمكن أن تصنع العنفات بمقاييس مختلفة وتعمل ضمن مجال واسع للضواغط وعدد الدورات والتدفقات والاستطاعات وبالتالي لوصف عنفة من نوع ما من الضروري إيجاد أي من المؤشرات التي تُحوَّل إلى العام (الأصل) الذي يعمل عند الشروط القياسية الأساسية من ضاغط وقطر محدد. تعطى عادة مؤشرات العنف المحددة من أجل ضاغط $H = 1 [mW]$ وقطر $D = 1 [m]$. تسمى هذه البارامترات بالتحويلية (الواحدية) ويرمز لها بـ n'_1 عدد الدورات التحويلي و Q'_1 التدفق التحويلي. وباستخدام صيغ الحساب (9-17) و (10-17) ومن دون اعتبار تغير المردود للعنفة عند البارامترات المعطاة (D, H, n) نحصل على:

$$\frac{n'_1}{n} = \frac{D}{1} \sqrt{\frac{1}{H}} \quad \text{أو:}$$

$$n'_1 = \frac{n D}{\sqrt{H}} \quad (17-11)$$

ومن الصيغ السابقة يمكن الحصول على: $\frac{Q'_1}{Q} = \left[\frac{1}{D} \right]^2 \sqrt{\frac{1}{H}}$ ومن هنا:

$$Q'_1 = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (17-12)$$

تبقى قيم بارامترات التحويل (Q'_1 و n'_1) لأنظمة الجريان المتشابهة ثابتة دون تغيير لذا يتم تحديد قيم هذه البارامترات من النموذج التجريبي.

بمساعدة العلاقات (11-17) و (12-17) يصبح تحديد عدد الدورات n والتدفق Q للعنفة العاملة سهلاً وذلك تبعاً لقيم ضاغط العنف H وقطرها D :

$$n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D} \quad (17-13)$$

$$Q = Q'_1 D^2 \sqrt{H} \quad (17-14)$$

يلقى استخدام بارامترات التحويل هذه تطبيقاً في كل أنحاء العالم.

17 - 3 - العدد النوعي لدورات العنف (n_s): Specific Speed Of Turbine Turns

يعرف العدد النوعي لدورات العنف بأنه عدد دورات عنفة مشابهة لها أبعاد محددة تعطي استطاعة $1 [hp]$ من أجل ضاغط $H = 1 [mW]$ ، فإذا اعتبرنا أن عدد دورات العنف n معلوم وأن الضاغط H والاستطاعة N معلومان أيضاً فيمكن حساب العدد النوعي للدورات لهذه العنف كالتالي:

$$\frac{n_s}{n} = \frac{D}{D_s} \sqrt{\frac{1}{H}} \quad (17-15)$$

حيث، D_s قطر العنفة التي تعمل بالعدد النوعي للدورات n_s أي استطاعتها $N_s = 1 [\text{hp}]$.
حسب العلاقة (17-10-a) ويغض النظر عن تغيرات المردود الحاصلة:

$$\frac{1}{N_s} = \left[\frac{D_s}{D} \right]^2 \frac{1}{H} \sqrt{\frac{1}{H}} \quad (17-16)$$

بتربيع المعادلة (17-15):

$$\left[\frac{n_s}{n} \right]^2 = \left[\frac{D}{D_s} \right]^2 \frac{1}{H} \quad (17-17)$$

بضرب المعادلتين (17-15) و (17-16) نجد أن:

$$\left[\frac{n_s}{n} \right]^2 \frac{1}{N_s} = \frac{1}{H^2} \sqrt{\frac{1}{H}} \quad (17-18)$$

من هذا نحصل على صيغة لتحديد ثابت العدد النوعي للدورات:

$$n_s = \frac{n}{H} \sqrt{\frac{N_s}{\sqrt{H}}} \quad (17-19)$$

ملاحظة: إذا أعطيت الاستطاعة ب $[\text{kW}]$ عندها $N_s = 1.36 [\text{kW}]$
و بالتالي يمكن إيجاد العلاقة بين n_s وبارامترات التحويل n'_1 و Q'_1 مع اعتبار أن المردود يبقى ثابتاً:

$$n_s = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D H} \sqrt{\frac{1.36 \cdot 9.81 \cdot Q'_1 \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \cdot H \cdot \eta}{\sqrt{H}}} \quad (17-20)$$

$$\text{أو} \quad n_s = 3.65 \cdot n'_1 \cdot \sqrt{Q'_1 \cdot \eta}$$

يحدد العدد النوعي للدورات (n_s) عادة للعنفات الكبيرة ذوات الاستطاعات العالية، ويمثل هذا العدد قيمة تشابهية تصف خواص العنفة وشكل الدولاب العامل، كما هو مبين في الجدول (17-1):

الجدول (1 - 17)

العتفة	(n_s)
محورية ذات ريش قابلة للدوران.	450 ÷ 1200
وترية ذات ريش قابلة للدوران.	300 ÷ 500
قطرية - محورية	80 ÷ 400
مغرفية.	10 ÷ 50

كلما كان (n_s) أصغر عملت العتفة بهدوء واستقرار أكبر.

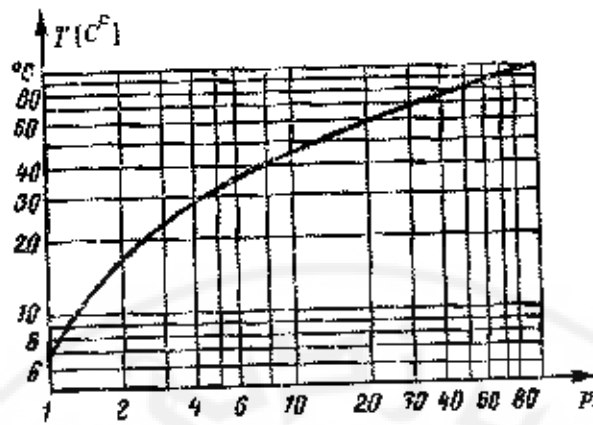
17 - 4 - التكيف في العتفات المائية Cavitation In Water Turbines

17 - 4 - 1 - ظاهرة التكيف: Cavitations Phenomenon

تدُل دراسة شروط عمل العتفة وأنبوب السحب على حدوث انخفاض في الضغط أثناء عمل الدوالب الدائر وفي الوقت نفسه يحصل هبوط إضافي للضغط على الوجه الخلفي للريشة تبينه دراسة الجريان الحاصل بين ريش العتفة. إذا من الممكن أن يصبح الضغط صغيراً جداً (تخلخل عميق) في بعض أجزاء العتفة، مما يؤسس لنشوء ظاهرة التكيف.

تعد قوة تحمل السائل على الانفجار أحد أهم العوامل المحددة لحركته عند تشكل الضغط المنخفض، مثلاً: تمل التجارب أن الماء النقي (الذي لا يحتوي شوائب صلبة أو مواد منحلة قابلة للتبخّر) يتحمل تمديداً يصل إلى $[0.2 \div 0.3] \text{ MPa}$ أما في الظروف الخاصة فيكون بحدود $[10 \div 25] \text{ MPa}$ وتكون القابلية النظرية للماء على الانفجار أكبر من هذه القيمة وتحدد قيمة قوة تحمل الماء العادي على الانفجار من خلال ضغط الأبخرة المشبعة p_v الذي تتعلق قيمته بدرجة حرارة الماء الشكل (1 - 17).

يوضح هذا الشكل أن الماء المناسب عبر تقنية التوصيل يحتوي على كميات كبيرة من الأجسام الصلبة والغازية الصغيرة جداً والتي تشكل نقاط ضعف وتسهم في نشوء نوى التكيف. عندما ينخفض الضغط في نقطة ما من السائل إلى قيمة مساوية أو أقل من قيمة ضغط الأبخرة المشبعة فإن الماء يبدأ بالتفليان متحولاً إلى بخار بشكل سريع وتشكل انفجارات مكانية مستمرة (طرق أو نقر) بعد حصول عملية الطرق فإن عملية الانخفاض في الضغط لا تستمر، وهكذا يتشكل حجم كبير للطرق بسرعة كبيرة، وعندما تحدث زيادة في الضغط يحصل تكاثف مفاجئ للبخار ويسمع ما يشبه التصفيق.



الشكل (17-1). علاقة ضغط الماء المشبع بدرجة الحرارة

ضغط الأبخرة المشبعة للماء عند درجة الحرارة 100°C يساوي الضغط الجوي كما هو موضح في الشكل (17-1) وعلى ارتفاع 2200 [m] فوق سطح البحر تصل قيمة الضغط الجوي إلى 80 [kPa] ، لذا فإن الماء يغلي عند درجة حرارة 93°C وإذا انخفض الضغط المطلق إلى 2 [kPa] عندها يغلي الماء عند درجة حرارة أقل من 20°C .

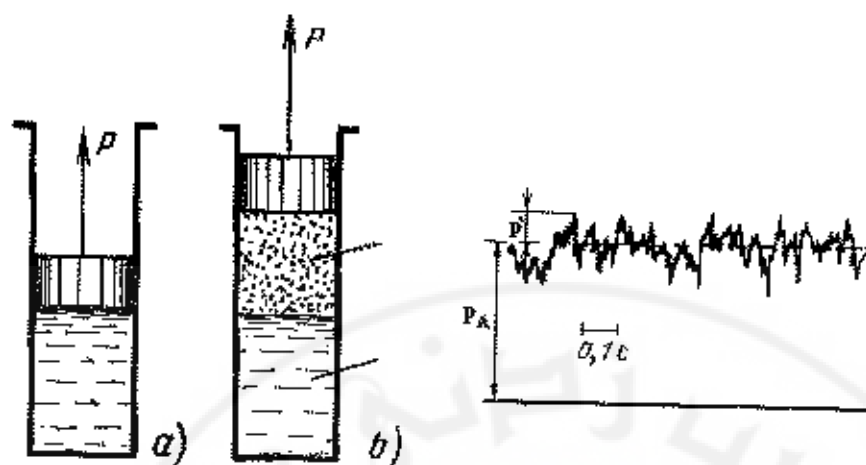
ليبيان شروط تشكل انفجار الماء نستفيد من التجربة البسيطة التالية:

أسطوانة مملوءة بالماء تماماً ومزودة بمكبس (الماء ملاصق لسطح المكبس ولا توجد أية ذرات هواء) الشكل (17-2-a)، نسحب المكبس للأعلى بقوة F ، في البداية ستكون هناك مقاومة ولن نلاحظ أي انتقال للمكبس حتى تصبح القوة F أكبر من $K_{cc} = A(p_a - p_v)$ حيث: p_a الضغط الجوي، A مساحة مقطع المكبس، K_{cc} القوة الحرجة) عندها يبدأ المكبس بالصعود ويتشكل تجويف (فراغ) بين المكبس والسائل مملوء ببخار الماء - بشكل أساسي - ضغطه p_v الشكل (17-2-b)، بهذا الشكل وبمقدار ثابت المكبس وعدم حركته للأعلى والأسفل يحصل طرق (نقر) بضغط هو p_v ، ويمثل الانفجار السكوني (الستاتيكي) للسائل. تحدث هذه الظاهرة في الجريانات المضطربة بشكل مختلف، إذ إن الخاصية الأساسية للتيار المضطرب هي تذبذب قيم السرعة والضغط في كل نقطة، وبالتالي فالضغط في أية نقطة من نقاط التيار المضطرب يتحدد بمركبتين:

$$P = p_a + p' \quad (17-21)$$

حيث p_a القيمة الوسطية للضغط المطلق مع مرور الزمن.

p' المركبة التذبذبية. يبين الشكل (17-3) تغير الضغط الفجائي.



الشكل (2 - 17) الانفجار الستاتيكي للماء

الشكل (3 - 17) تذبذب الضغط

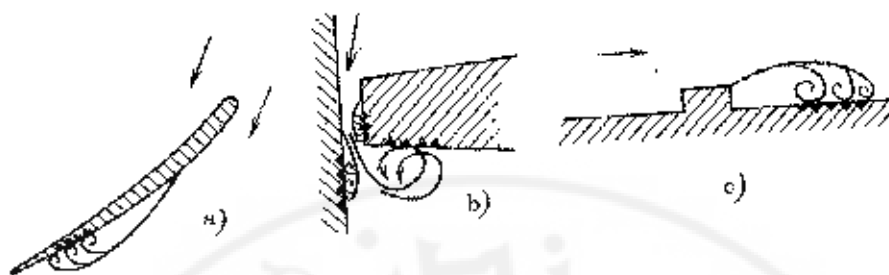
يفرض أن الضغط الوسطي p_A ينخفض ويقترب من ضغط الأبخرة المشبعة، عندها وطالما أن $p_A > p_v$ ففي فواصل زمنية منفصلة سيصل الضغط P لقيمة p_v ويتشكل الطرق المكاني، وكلما ازداد انخفاض p_A ازداد عدد مرات الطرق أي سيحدث التصفيق. إن تشكل الانفجارات في التيار المضطرب للسائل سيؤدي إلى حدوث ما يسمى التكهف. يظهر التيار التكهفي التأثيرات الآتية على الآلة الهيدروليكية:

- 1 - زيادة الضياعات الهيدروليكية مما يؤدي إلى انخفاض المردود ونقصان التدفق.
- 2 - ظهور ضجيج مرتفع وإهتزازات عالية.
- 3 - تشكل النخر التكهفي (نخر المسطوح).

17 - 4 - 2 - النخر التكهفي Cavitation Erosion:

يحدث نتيجة التأثير الميكانيكي للتيار التكهفي بشكل رئيسي، والذي يظهر بشكل طرقات على المسطوح الملاصقة للسائل أو بجوارها، وتتحصر هذه الخاصية أن تردد الضربات عالي جدا مما يؤدي إلى حدوث التعب في المعدن ويحدث التحطم على شكل لطخات وتحطم البلورات ويصبح سطح المعدن خشنا بدلا من أن يكون أملس. تكون شدة التحطم عالية أحيانا ويمكن أن تصل إلى عمق $10 \div 40 \text{ [mm]}$ في السنة، مما يتطلب إجراء إصلاحات خاصة منها تغيير الأجزاء العاملة الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع تكاليف الاستثمار، كما أن النخر في الريش والأجزاء الملاصقة للتيار يؤدي إلى انخفاض المردود وبالتالي ضياع في المردود الكلي للمحطة.

تظهر بعض الظواهر الكيميائية والكهربائية عند حدوث التكيف تساعد في زيادة شدة النخر التكيفي ومازال أثر هذه العوامل وآليات حدوثها غير محددة بشكل كامل حتى الآن.



الشكل (4 - 17) أنواع وأشكال التكيف في الآلات الهيدروليكية

يمثل الشكل (4 - 17) أنواع التكيف وأشكاله في الآلات الهيدروليكية. وهي:

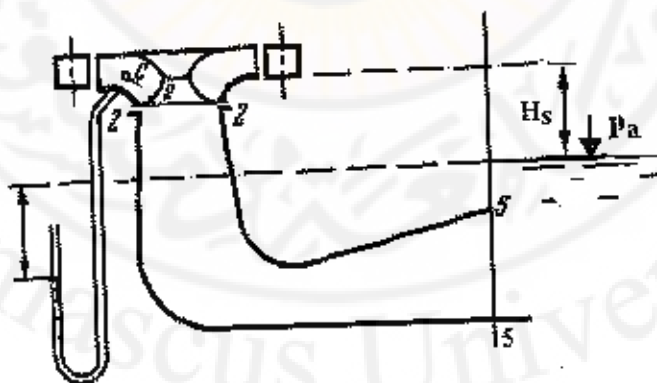
- أ - التكيف الدرفيلي وينشأ عند حركة الريش في المجال الأكثر انخفاضاً للضغط.
 - ب - التكيف الشقي (الفراغي) عند جريان السائل بهبوط ضغط كبير عبر الفتحات (بين ريش الدولاب العامل وجسم العنفة مثلاً).
 - ج - التكيف الموضعي (المكاني) الناتج عن الجريان غير المستمر، الفتوات،
- عموماً فإن التكيف الدرفيلي هو الأكثر حدوثاً في الآلات الهيدروليكية.

17 - 4 - 3 - ثابت التكيف وارتفاع السحب المسموح به: **Cavitation Factor**

باستخدام شرط غياب التكيف أي أن ضغط الماء سيكون أكبر من ضغط الأبخرة المشبعة في كل النقاط المعرضة للتكيف، أي:

(17 - 22)

$$p > p_v$$



الشكل (5 - 17) تحديد ثابت التكيف

ويفرض أن الضغط في نقطة ما C هو ضغط أصغري p_c ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$p_c = p_2 - \Delta p_{c-2} \quad (17-23)$$

حيث p_2 الضغط أسفل الدوالب العامل في المقطع (2-2) والمحدد بالعلاقة:

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - \left(H_s + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} - \Delta h_c \right) \quad (17-24)$$

Δp_{c-2} انخفاض الضغط الإضافي في النقطة C والمحدد بالعلاقة:

$$\frac{\Delta p_{c-2}}{\rho g} = k_{c-2} \frac{v_c^2}{2g} \quad (17-25)$$

حيث k_{c-2} ثابت التحويل وهو ذو قيمة ثابتة.

باستخدام العلاقتين (17-24) و (17-25) يمكن كتابة:

$$\frac{p_c}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \left(\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} - \Delta h_c + k_{c-2} \frac{v_c^2}{2g} \right) \quad (17-26)$$

تحدد الضياعات في أنبوب الدحב بالعلاقة:

$$\Delta h_c = \xi_c \frac{v_2^2}{2g} \quad (17-27)$$

كما أنه يمكن التعبير عن السرعة في أية نقطة بالعلاقة:

$$v_i = k_i \frac{Q}{A} = k_i \cdot \frac{Q'_i D^2 \sqrt{H}}{a_i \pi D^2} = \frac{4 k_i}{\pi a_i} Q'_i \sqrt{H} \quad (17-28)$$

باعتبار العلاقتين (17-27) و (17-28) فإن العلاقة (17-26) تأخذ الشكل:

$$\frac{p_c}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \left(-\frac{\alpha_2 k_2^2}{a_2^2} - \frac{\alpha_3 k_3^2}{a_3^2} - \xi_c \frac{k_2^2}{a_2^2} + k_{c-2} \frac{k_c^2}{a_c^2} \right) \cdot \frac{1}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 (Q'_i)^2 H \quad (17-29)$$

باستخدام الرمز σ :

$$\sigma = \left(-\frac{\alpha_2 k_2^2}{a_2^2} - \frac{\alpha_3 k_3^2}{a_3^2} - \xi_c \frac{k_2^2}{a_2^2} + k_{c-2} \frac{k_c^2}{a_c^2} \right) \cdot \frac{1}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 (Q'_i)^2 \quad (17-30)$$

تصبح العلاقة (17-29) من الشكل:

$$\frac{p_c}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \sigma H \quad (17-31)$$

حيث: σ ثابت التكيف، ومحافظ على قيمة ثابتة وكذلك القيم k_i , a_i ، وغزارة التحويل Q_i' ومحافظ جميعها على قيم ثابتة.

بمعرفة قيم p_c يمكن التعبير عن شرط غياب التكيف حسب (17-22):

$$\frac{p_v}{\rho g} < \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \sigma H \quad (17-22)$$

ومن هنا يتحدد ارتفاع السحب المسموح به بالعلاقة:

$$H_s < \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} - \sigma H \quad (17-23)$$

تحدد العلاقة (17-23) ارتفاع السحب الذي يضمن عدم حدوث تكيف في العنفة.

تحدد قيمة الضغط الجوي في مكان يرتفع عن سطح البحر بالعلاقة: $\frac{p_a}{\rho g} = 10,3 - \frac{\nabla}{900}$

حيث: ∇ ارتفاع مستوى الماء في الحوض السفلي للعنفة عن سطح البحر. كما أنه يمكن

اعتبار أن $\frac{p_v}{\rho g} = 0,3 [m]$ للماء البارد الشكل (17-1) وبالتالي فإن العلاقة (17-23)

تأخذ الشكل النهائي التالي:

$$H_s = 10 - \frac{\nabla}{900} - \sigma_T H \quad (17-24)$$

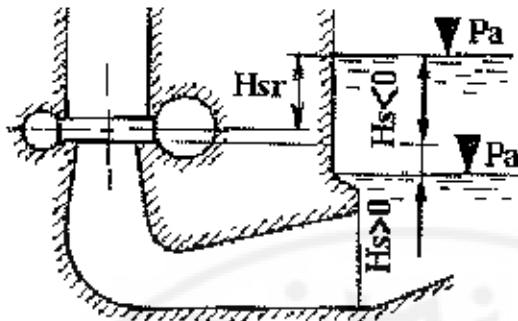
حيث σ_T معامل تكيف العنفة الحسابي.

العلاقة (17-24) هي العلاقة الأكثر استخداماً لتحديد ارتفاع السحب تبعاً لمكان تركيب

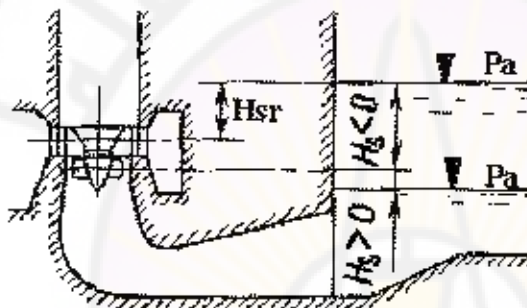
العنفة، أما علاقة σ مع σ_T فتحدد كالتالي:

$$\sigma_T = k_0 \sigma \quad (17-25)$$

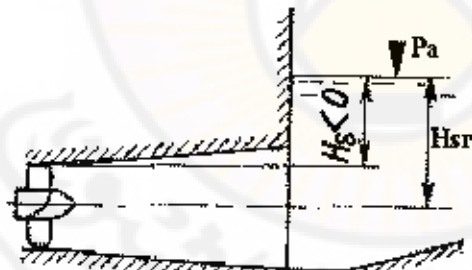
حيث k_0 ثابت الاحتياط ويؤخذ عادة (1,1 ÷ 1,2).



(a) عنفة شاقولية قطرية - محورية



(b) عنفة شاقولية محورية



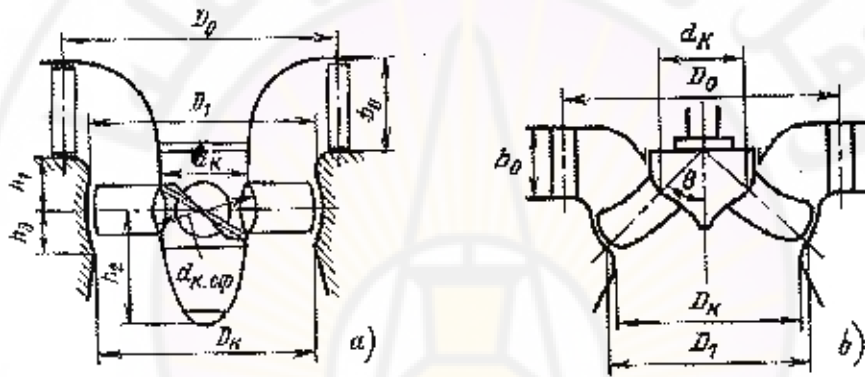
(c) عنفة أفقية محورية

الشكل (6-17) تحديد ارتفاع السحب H_s للعنفات

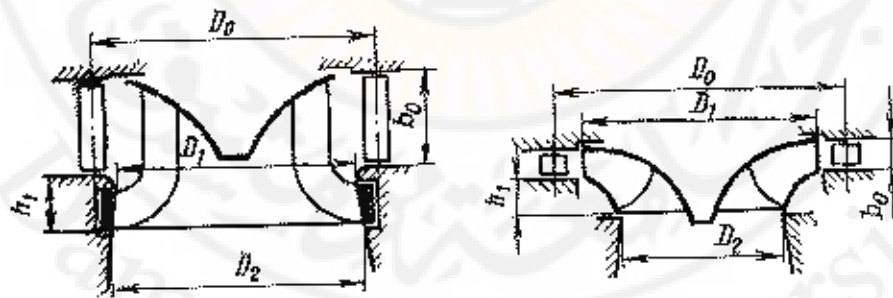
يتم استخدام العلاقة (34-17) لتحديد ارتفاع السحب لكافة العنفات المبينة على الشكل (6-17)،

ويتم تحديد H_s حسب نوع العنفة كالتالي:

- 1 - في العنفات الشاقولية القطرية - المحورية بدءاً من الذهنية السفلية لجهاز التوجيه.
 - 2 - في العنفات الشاقولية المحورية بدءاً من محور دوران ريش الدولاب العامل.
 - 3 - في العنفات الأفقية بدءاً من أعلى نقطة للدولاب العامل.
- أما حسب المواصفات القياسية العالمية فإن ارتفاع السحب المحدد H_{sr} للعنفات الشاقولية يحسب بدءاً من الخط المتوسط لجهاز التوجيه ويحدد للعنفات الوترية والقطرية المحورية كما في الشكل ومن العلاقة $H_{sr} = H_s + 0,5 b_0$ أما للعنفات المحورية والمحورية ذات الريش القابلة للدوران تؤخذ من العلاقة: $H_{sr} = H_s + 0,5 b_0 + h_1$ ولأجل العنفات الأفقية يحسب H_{sr} بدءاً من محور دوران الدولاب العامل: $H_{sr} = H_s - 0,5 D_1$.



الشكل (7) 17) الأبعاد الأساسية للعنفة المحورية a والعنفة الوترية b

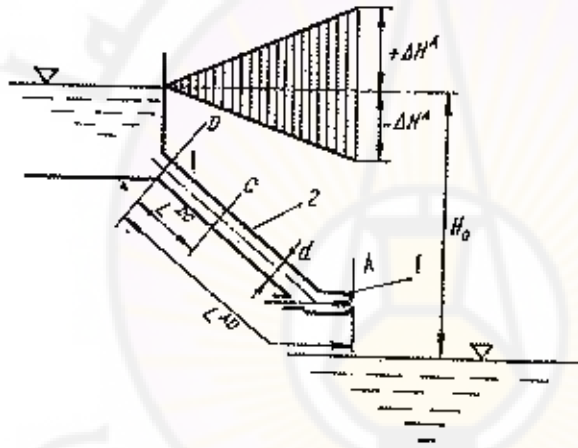


الشكل (8) 17) الأبعاد الأساسية للعنفة القطرية المحورية (فرنسيس)

تجدر الإشارة إلى أن قيمة H_s المحسوبة بالعلاقة (33-17) لا تتعلق بأبعاد العنفة بينما تتغير H_{sr} بتغير القطر D_1 .

17 - 5 - المطرقة المائية (الهيدروليكية) Water Hammer

تتوافق أنظمة العمل غير المستقرة (التنظيم ، الإيقاف الطارئ للعنفه و غيرها) بتغيير نظام السرعة في المنظومة () إذا أخذنا منظومة عمل كالمبينة في الشكل (9 - 17) كمثال والتي تتألف من عنفة بلتون (1) و أنبوب الضاغط (النقل) (2) ، حيث يؤدي تغيير نظام السرعة في المثال المذكور و كذلك في كل الأنظمة الأخرى إلى إمكانية حدوث المطرقة المائية . يمكن أن تنشأ المطرقة المائية من كل عنصر يغير نظام السرعة في المنظومة و يحمل جهاز التوجيه اسم عنصر التعبير ، و تحت هذا العنوان العريض عناصر التعبير (التنظيم) - لا يفهم فقط جهاز التوجيه للأشكال المختلفة للعنفات ، إنما أيضا الريش العاملة في عنفة كابلان و أدوات الإغلاق أمام العنفات و محددات الضغط و غيرها .



الشكل (9 - 17) المطرقة الهيدروليكية في منظومة عمل عنفة بلتون

إذا فرضنا ، أن التدفق يتغير من $Q = Q_H$ إلى $Q = Q_K$ بشكل خطي خلال الزمن من t حتى T يمكن أن نكتب

$$Q = Q_H - \frac{Q_H - Q_K}{T} \cdot t \quad (17-36)$$

حيث Q_H و Q_K التدفقات الابتدائية و النهائية على التوالي .

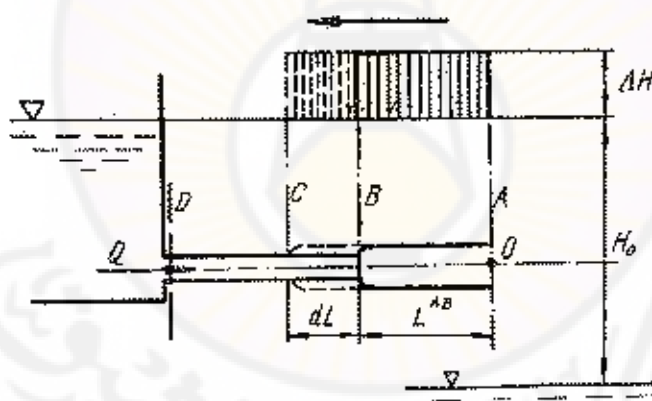
في الشروط المثالية أي عندما لا تؤخذ بعين الاعتبار مرونة الشبكة و انضغاطية المائع و

باستخدام المعادلة الأساسية في التحريك $F = m \frac{dc}{dt}$ ينتج :

$$H^A - H_0 = \Delta H^A = \frac{L^{AB} (Q_H - Q_K)}{g T S} \quad (17-37)$$

تظهر هذه المعادلة أنه عند إغلاق جهاز التوجيه (عنصر التعبير) - المقطع A أي عند تقليل الغزارة ($Q_H > Q_K$) يصبح الضغط أعلى مما كان عليه في حالة العمل المستقر ($\Delta H^A > 0$) و تتولد مطرفة هيدروليكية موجبة ، أما في حالة الفتح ($Q_H < Q_K$) فينقص الضغط إلى قيمة أقل من الضغط المستقر. ($\Delta H^A < 0$) و تنتج مطرفة هيدروليكية سالبة.

نلاحظ من المعادلة السابقة أن زيادة الضغط تتناسب طرديا مع طول أنبوب الضاغط L^{AB} و مع تغيير التدفق و تتناسب عكسا مع زمن تغيير التدفق زمن الإغلاق T_S أو زمن الفتح T_0 و أيضا عكسا مع المقطع العرضي S. عندما يكون زمن الإغلاق $T_S = 0$ ينتهي ضغط المطرفة إلى اللانهاية ($\Delta H^A \rightarrow \infty$) في الواقع زيادة ضغط المطرفة له قيمة حدية عظمى تتعلق بمرونة المنظومة (E_{CT}) و انضغاطية المائع (E_B)



الشكل (17-10) توليد و انتشار موجة الطرق

يبين الشكل (17-10) أنبوب تغذية (ضاغط) ركب عليه في المقطع A أداة تعبير ، إذا أغلق عنصر التحكم خلال زمن $T_S = 0$ سيتوقف الجريان مباشرة ($C^A = 0$) و بالتالي ($Q^A = 0$) نتيجة لذلك فإن قوى العطالة ستولد زيادة في الضغط مقدارها ΔH . ضغط المطرفة ΔH سيولد تشوها مرنا في جدران الأنابيب و انضغاطا للسائل . نتيجة لهذه التشوهات

المرنة بنسبة حجم إضافي بدلاً من السائل أي أن السرعة لن تساوي الصفر في اللحظة نفسها على طول الأنبوب.

في المقطع B الذي يبعد مسافة L^{AB} عن نهاية الأنبوب سينعدم التدفق و سيزداد الضغط بمقدار ΔH بعد أن يمر عبر هذا المقطع كمية السائل الضرورية لملء الحجم الإضافي الناشئ في المجال AB و بالتالي زيادة الضغط ΔH الناشئة في المقطع A و نقصان التدفق Q في الأنبوب ، ينتقل كلاهما عبر الأنبوب إلى الأعلى على شكل موجة مرنة أي أن ΔH ينتشر من عنصر التعبير إلى بداية الأنبوب ، و ظاهرة مماثلة تحدث عند الفتح المفاجئ لعنصر التحكم ، و التي تترافق بانخفاض للضغط أمامه.

التشوهات المرنة للأنبوب وانضغاطية السائل هي قيم صغيرة ، لذلك فإن قيم سرعة انتشار ضغط الطرق كبيرة جداً (كبيرة بمقدار صغر تشوه الأنبوب والسائل) .

تحدد المطرقة الهيدروليكية لنظام عمل حقيقي بالعلاقات :

$$H - H_0 = \phi\left(t - \frac{L}{a}\right) + f\left(t + \frac{L}{a}\right) \quad (17-38)$$

$$C - C_0 = -\frac{g}{a}\phi\left(t - \frac{L}{a}\right) + \frac{g}{a}f\left(t + \frac{L}{a}\right) \quad (17-39)$$

حيث : H و H_0 : الضغوط من أجل نظام عمل مستقر وغير مستقر .

C و C_0 : السرعات من أجل نظام عمل مستقر وغير مستقر .

$\phi\left(t - \frac{L}{a}\right)$ و $f\left(t + \frac{L}{a}\right)$: التتابع الموجية .

L : طول أنبوب التغذية .

a : سرعة انتشار موجة الطرق .

g : تسارع الجاذبية الأرضية .

استخرجت هذه المعادلات من قبل جوكوفسكي بعد سلسلة من الافتراضات والتبسيطات . يؤسس

تحليل هذه المعادلات للاستنتاجات التالية :

1 - عند حساب مرونة المنظومة (E_{cr}) وانضغاطية السائل (E_R) يحدد ضغط المطرقة

$\Delta H = H - H_0$ وتغير السرعة $\Delta C = C - C_0$ من التتابع : $\phi\left(t + \frac{L}{a}\right)$ و

$\phi\left(t - \frac{L}{a}\right)$ والتي لها مقياس ΔH وبالتالي كل واحد منهما موجة تغير للضغط .

- 2 - كل واحد من هذه التوزيع له قيمة ثابتة من أجل شروط محددة ، أي $\phi(t) = \text{const}$ يعني : أن تغير الضغط في الأنبوب يتحرك من المقطع A إلى المقطع D بسرعة a ويسمى موجة مستقيمة ، $f(t) = \text{const}$ تظهر أن تغير الضغط يتحرك من المقطع D إلى المقطع A بسرعة a ويسمى موجة مرتدة (منعكسة) .
- 3 - تحدد سرعة ضغط المطرقة بالعلاقة :

$$a = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{d}{\delta} \frac{E_H}{E_{CT}}}} \quad (17-40)$$

عند نظام عمل غير مستقر تقطع موجة الطرق المستقيمة $\phi(t)$ المسافة من المقطع A إلى المقطع D خلال زمن L/a ، في المقطع D حيث الخزان يحوي السائل المعرض سطحه للضغط الجوي ، تتولد موجة مرتدة $f(t)$ تمثل رد فعل على زيادة الضغط وتعود إلى المقطع A خلال زمن L/a وبالتالي فإن زمن الذهاب والعودة لموجة الطرق هو $t = 2L/a$ ويسمى طور المطرقة الهيدروليكية .

عندما يحدث إغلاق أداة التحكم خلال زمن $T_S = 0$ تؤثر في المنظومة فقط موجة واحدة أي أنه لا توجد موجة مرتدة و $C^A = 0$ عندها :

$$-C_0 = -\frac{g}{a} \phi\left(t - \frac{L}{a}\right) \quad , \quad H^A - H_0 = \phi\left(t - \frac{L}{a}\right)$$

ومنه ينتج :

$$\Delta H^A = H^A - H_0 = \frac{a C_0}{g} \quad (17-41)$$

تبين المعادلة (17-41) أنه من أجل منظومة وسائل حقيقيين لا يصبح تغير الضغط لا نهائياً كما هو في المعادلة (17-37) بل له قيمة حدية عظيمة تدعى المطرقة الهيدروليكية اللحظية ، الشكل (a-17-11) .

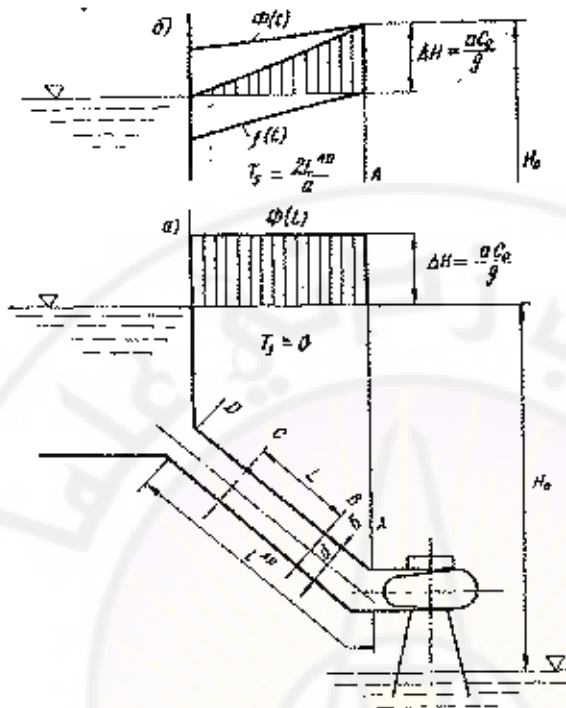
عندما يكون زمن إغلاق عنصر التحكم $T_S \leq t = 2L/a$ ينتج مطرقة هيدروليكية مباشرة .

$$\Delta H^A = \phi\left(t - \frac{L}{a}\right) \quad \text{الشكل (b-17-11) ويكون ضغط المطرقة في المقطع } A \text{ هو :}$$

الموجة المرتدة ستصل إلى المقطع A بعد وقت $t = 2L/a$ ولكن $T_S < t$ أي أن الموجة

$$\Delta H^A = \frac{a C_0}{g} \quad \text{وبالتالي في المقطع } A \text{ :}$$

$$\Delta H^A = \frac{a c_0}{g}$$



الشكل (11 - 17) المطرقة الهيدروليكية في العنق ذات رد الفعل .
a - لحظي b - مباشر .

لتحديد تابع الموجة المرتدة يجب أن يطبق قانون انعكاس الموجة المستقيمة في مقطع الأنبوب D الشكل (12-17) . في المقطع A ولذا تغيير لحظي للسرعة C نشأ نتيجة موجة لزيادة الضغط ΔH الذي يصل إلى المقطع D بعد فترة زمنية L/a ، من جانب الأنبوب يؤثر ضغط $\gamma (H + \Delta H)$ ومن جانب الخزان الضغط γH ، لا يمكنه موازنة الفارق $\gamma \Delta H$ وبالتالي يزداد الضغط في الخزان إلى $\gamma (H + \Delta H)$ ويصبح في الأنبوب γH ، الضغط الأكبر في الخزان بحرض ضغطاً في أنبوب التغذية أي تظهر موجة مرتدة ، مما عرض أعلاه ينتج أن الموجة المرتدة مساوية للموجة المستقيمة وبإشارة سالبة ، والفارق الزمني $t = 2L/a$ أي :

$$f^A(t) = \phi^A \left(t - \frac{2L}{a} \right) \quad (17-42)$$

$$h_i^B - h_{i+\frac{L}{a}}^C = 2\mu \left(v_i^B - v_{i+\frac{L}{a}}^C \right) \quad (17-43-a)$$

$$h_i^C - h_{i+\frac{L}{a}}^B = -2\mu \left(v_i^C - v_{i+\frac{L}{a}}^B \right) \quad (17-44-a)$$

حيث :

$$2\mu = \frac{a \cdot c_0}{g \cdot H_0} \quad (17-45)$$

وتصف مقاطع أنبوب التغذية ،
عندما يظهر الضغط الأعظمي في الطور الأول ينتج مطرقة الطور الأول الشكل
(17-13-a) والذي يحدد بالعلاقة:

$$\Delta h_i^A = \pm \frac{2\sigma}{1+b(\mu q_H \mp \sigma)} \quad (17-46)$$

عندما يظهر الضغط الأعظمي في الطور الأخير ينتج طرق هيدروليكي متأخر الشكل
(17-13-b) والذي يحدد بالعلاقة :

$$\Delta h_m^A = \pm \frac{\sigma}{1 \pm b \sigma} \quad (17-47)$$

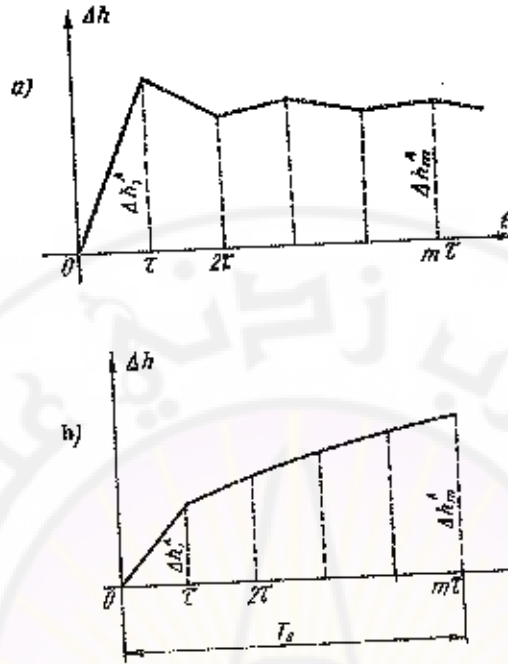
الإشارات العلوية تصلح عند الإغلاق T_s والسفلية عند الفتح T_0 ،
المعاملات σ و b تميز الأنبوب و العنفة على التوالي وتحدد بالعلاقات التالية :

$$\sigma = \frac{L Q_0}{g H_0 S} \frac{1}{T_s} = \frac{T_i}{T_s} \quad (17-48)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta h > 0 &\Rightarrow b = 0,7 - \frac{n_s}{1000} \\ \Delta h < 0 &\Rightarrow b = 1,1 - \frac{n_s}{600} \end{aligned} \right\} \quad (17-49)$$

يحدد نوع المطرقة الهيدروليكية من المعيار :

$$(17-50) \quad b \mu q_H < 0,5 \quad \text{طرق الطور الأول} \quad - \quad b \mu q_H > 0,5 \quad \text{طرق متأخر}$$



الشكل (13-17) أنواع المطرقة الهيدروليكية

a ... طرق الطور الأول b - طرق متأخر

عندما يكون $\mu q_H = 0,5$ يكون طرق الطور الأول مساويا للطرق المتأخر أي $\Delta h_1^d = \Delta h_m^d$ عندما يكون $\mu = \sigma$ نحصل على مطرقة هيدروليكية مباشرة . يكون انتشار ضغط الطرق على طول أبواب التغذية خطيا .

عند إغلاق عنصر التحكم يزداد الضغط أمام الدواليب العامل بسبب المطرقة الهيدروليكية بغض النظر عن انخفاض التدفق وبالتالي تزداد الاستطاعة والعزم الدوراني ، وهذا يسبب تزايداً أكبر لعدد الدورات .

تأثير المطرقة الهيدروليكية هو تأثير عكسي لفعل عنصر التحكم .

لأنابيب التغذية التي لها $\frac{T_s}{t} > 5$ يحدد الزمن التقريبي لإغلاق العنفة بالعلاقة :

$$(17-51)$$

$$T_s \geq 5T_l$$

ومن أجل $\frac{T_s}{t} < 5$ من العلاقة :

$$(17-52)$$

$$T_s = (4 \div 3)T_l$$

17 - 6 - المنحنيات المميزة للعنفات: Specific Curves Of Turbine

عند تصميم المحطة الكهرومائية، وأثناء اختيار أنواع العنفات وتحديد بارامتراتها الأساسية، أبعادها، عدد الدورات، المردود، مستوى التركيب، وعوامل أخرى مثل شروط الاستثمار يجب امتلاك كامل المعطيات عن خصائص العنفات، هذه المعطيات توضع على شكل مواصفات (مميزات) محددة كامل المؤشرات الضرورية للعنفة ومن أجل مختلف ظروف عملها أي لمختلف الأنظمة التي ستعمل عليها العنفة.

من دراسة جريان الماء في العنفة، نجد أن عمل العنفة يتحدد بمؤشرين:

1 - المؤشر الجغرافي: يتم من خلاله تحديد نوع العنفة والأبعاد (القطر D_1) وجهاز التوجيه المكشوف أو الإبر a_0 (للعنفات ذات الريش القابلة للدوران) زاوية توضع ريش الدولاب العامل φ .

2 - المؤشر الحركي: الذي يحدد نظام عمل العنفة ويحوي متحولين مستقلين (Q, n) حسب

$$\frac{Q}{n D^3} = \text{const} \quad \text{العلاقة:}$$

وإذا عبرنا عن شرط تشابه الجريانات حسب العلاقة (9-17) نجد:

$$\frac{n D}{\sqrt{H} \eta_h} = \text{const} \quad (17-53)$$

وبالتالي من أجل قطر D معلوم ومردود η متغير فإن البارامترات H, n هي التي ستحدد نظام عمل العنفة. كما نعلم فإن الضاغط يعطى و أما التدفق فيحسب. وبهذا الشكل يمكن للتعبير عن كامل مؤشرات عمل العنفة من خلال علاقات التابعة التالية:

$$\left. \begin{aligned} Q &= f_Q (D, a_0, H, n) \\ N &= f_N (D, a_0, H, n) \\ \eta &= f_\eta (D, a_0, H, n) \end{aligned} \right\} \quad (17-54)$$

وسيكون هناك بارامتر إضافي للعنفات ذات الريش القابلة للدوران وهو زاوية تثبيت ريش الدولاب

العامل φ مثلاً:

$$\eta = f_\eta (D, a_0, \varphi, H, n) \quad (17-55)$$

تسمى العلاقات (17-54) و (17-55) مميزات (خواص) العنفات.

إن إنشاء منحنيات تعبر عن أربعة منحولات سيكون صعباً للغاية، لذا سيتم تحويل جزء من هذه المنحولات إلى بارامترات ثابتة ولأجل ذلك تستخدم طريقتان للبيان المميزات: المميزات العامة والمميزات الخطية.

المميزات العامة: لها بارامتران محددان ويعبر هذه البارامترات عن العلاقة بين المؤشر المعطى والمنحولين المستقلين.

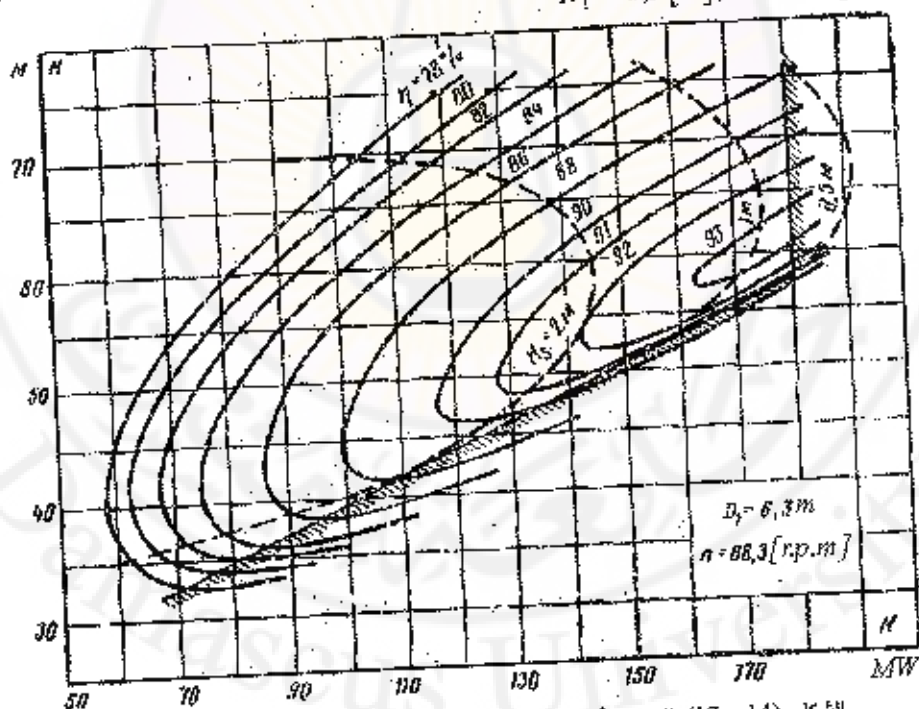
توجد بعض أشكال المواصفات العامة، عدا عن ذلك فإن التسمية تعطى تبعاً للمنحولات، مثلاً: مواصفة الضاغط - الاستطاعة تنشأ في الإحداثيات N و H للعتفة من خلال اعتبار القطر D وعدد الدورات n كبارامترات ثابتة وتسمى المواصفة الاستثمارية حيث أنه في شروط الاستثمار الطبيعية للعتفة فإن عدد دوراتها يجب أن يبقى ثابتاً، والتعبير العام لهذه المواصفة:

$$D_1 = \text{const}; n = \text{const}$$

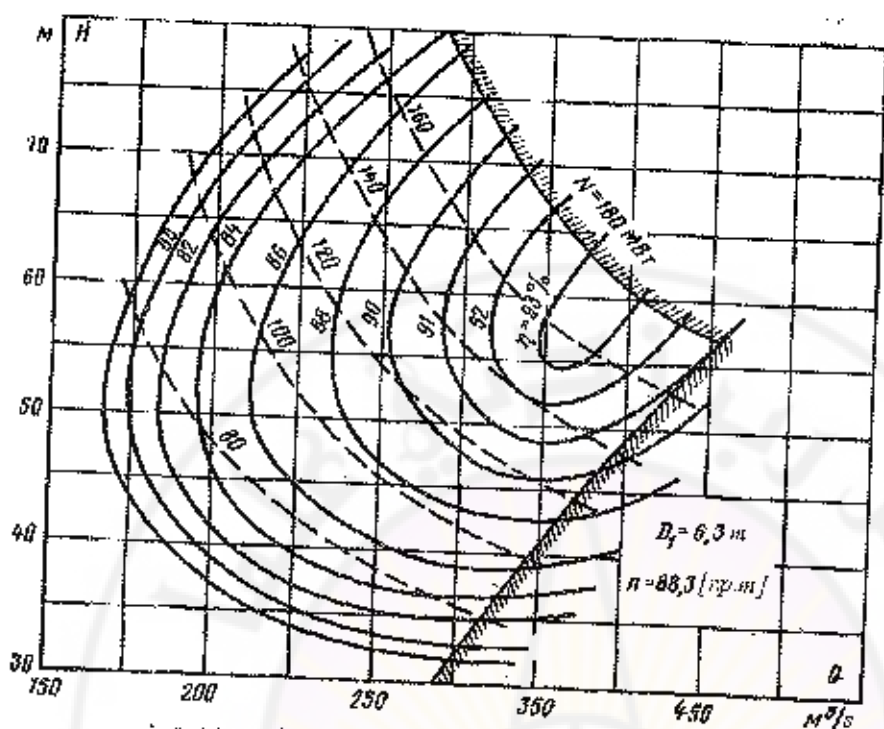
$$\eta = f_{\eta}(N, H), \quad H_s = f_{H_s}(N, H)$$

هذه المواصفة مبيّنة على الشكل (14-17) لعتفة محورية فيها

$$D_1 = 6,3 [m]; n = 88,3 [r.p.m]$$



الشكل (14-17) المواصفة الاستثمارية للعتفة من خلال معرفة الضاغط والاستطاعة



الشكل (15-17) المواصفة الاستثمارية للعنفة بدلالة الضاغط والتدفق

وبهذا الشكل يمكن تحديد قيم هذه المؤشرات من أجل أي ظرف لعمل العنفة، مثلاً: من أجل

$$H_s = 1,8 [m] \text{ و } \eta = 91,5 \% \text{ فإنه } N = 150 [MWatt] \text{ و } H = 60 [m]$$

يمكن إنشاء مواصفة استثمارية للعنفة من خلال قيم الضاغط والتدفق حيث

$D_f = \text{const} ; n = \text{const}$ كما في الشكل (15-17) وهنا المعطيات هي المرئود η

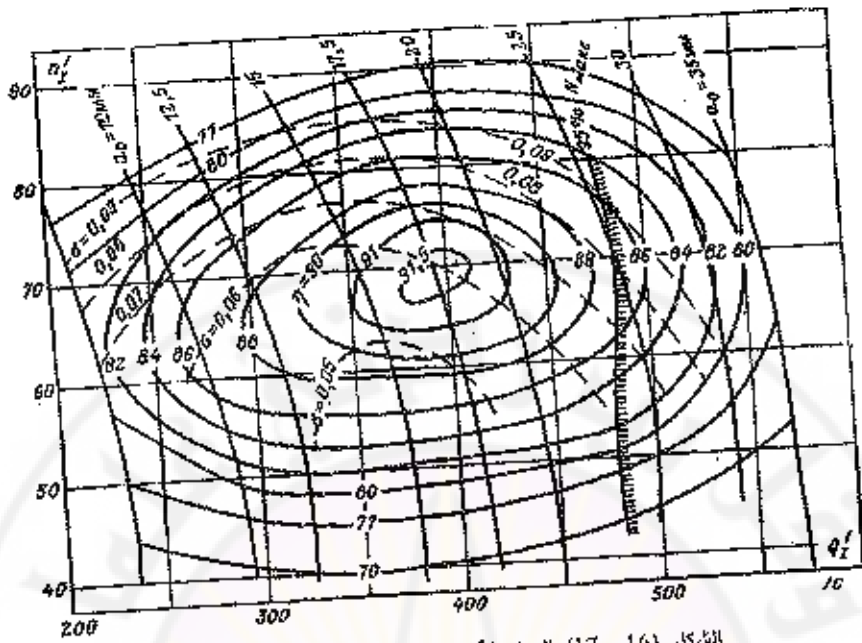
والاستطاعة N .

المواصفة الكاملة: كمؤشر لخواص العنفات المدروسة تستخدم المواصفة الدورانية - التدفقية

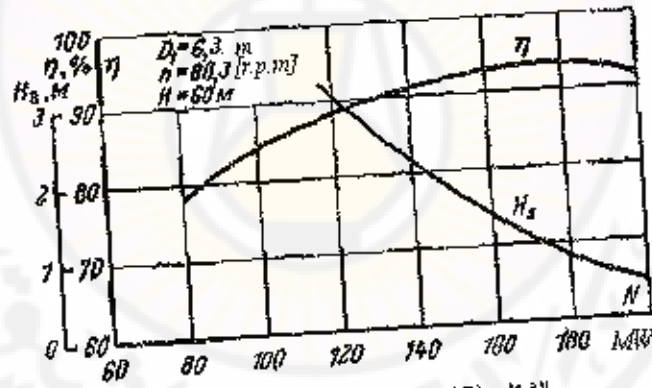
والتي تنشأ من أجل ثبات قيمة D_f و H طالما أن هذه المواصفة تحدد المواصفات العامة لذلك

النوع من العنفات حيث يتم إنشاؤها في بارامترات التحويل من أجل $D_f = 1 [m]$

و $H = 1 [m]$ يبين الشكل (16-17) شكل هذه المواصفة للعنفة الفظرية - المحورية.



الشكل (16 - 17) المواصفة الكاملة للنفقة القطرية المحورية



الشكل (17-17) مواصفة الاستطاعة الخطية

تعطى المواصفة الكاملة تبعاً لنتائج النموذج المجرب مع كامل المؤشرات المبينة $(\eta, \sigma, a_0, \dots)$ والتي تشير إلى النموذج. وبالعلاقة ذلك فإنه يشار دائماً إلى قطر النموذج. النقطة الهامة لهذه المواصفة هي نظام العمل المثالي والذي يوافق قيمة أعظمية للمردود. على المواصفة يشار أيضاً إلى الخط المعبر عن احتياطي الاستطاعة $(95\% N_{max})$. توضح المواصفة الكاملة خواص النوع المدروس من العنفات بشكل كامل وباستخدام العلاقات:

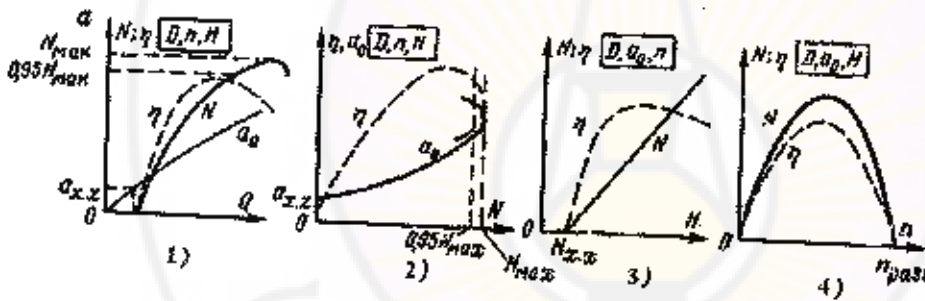
أخرى للبارامترات المعطاة ونوع العنفة المحدد،
 المواصفة الخطية: تنشأ كنسبة لمتحول وحيد ويتم اعتبار البارامترات الثلاثة الباقية ثوابتاً. مثلاً:

مواصفة الاستطاعة الخطية والتي تمثل مؤشراً للعنفة يكون:
 $D_1 = \text{const} ; n = \text{const} ; H = \text{const}$ من أجل $\eta = f_n(N)$ والشكل (17-17) يبين
 هذه المواصفة بالمقابل يمكن إنشاء مواصفات خطية أخرى:

الدورانية $N = f_n(n)$ من أجل $D_1 = \text{const} ; a_0 = \text{const} ; H = \text{const}$

الضاغطة $N = f_N(H)$ من أجل $D_1 = \text{const} ; n = \text{const} ; a_0 = \text{const}$

تعد كل مواصفة خطية مجالا من المواصفة الاستثمارية، والمواصفات الخطية لا تسلط الضوء
 كاملاً على خواص العنفات كالمواصفة الكاملة، لكنها أسهل وأوضح، لذلك تستخدم غالباً لمقارنة
 خواص العنفات المختلفة الأشكال والأنواع الشكل (17-18).



الشكل (17-18) المواصفات الخطية للعنفات

المراجع

أولاً: المراجع باللغة العربية :

- 1- ابراهيم دامرجي - الآلات المائية - جامعة حلب ، كلية الهندسة الميكانيكية 1996.
- 2- جاديش لال - المكامن الهيدروليكية بضمنها سيطرة المواسع - ترجمة جعفر مهدي حسن - الكلية الهندسية العسكرية بغداد.
- 3- جمال العباس ، أحمد حميد - آلات حرارية ، العنفات الغازية - جامعة دمشق ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية 2003.
- 4- روبرت ل. دوجرني ، جوزف ب. فرانزيفي - ميكانيكا المواسع وتطبيقاتها - دار مكجروهل للنشر ،
- 5- كميل بوراس - المنشآت المائية (1 و 2) - جامعة تشرين ، كلية الهندسة المدنية 1992.
- 6- ميخائيل جورج وكيل - المنشآت المائية (2) المدود - جامعة حلب ، كلية الهندسة المدنية ، 1993.
- 7- وائل معل - الهيدروليك (1) - جامعة دمشق ، كلية الهندسة المدنية - الطبعة الثانية 2002.
- 8- يحيى رستم - الآلات الهيدروليكية - جامعة دمشق ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية 1983.

ثانياً: المراجع باللغة الانكليزية :

- 1- A.K. Upadhyay, hydraulic and pneumatics - S.K. Kataria & Sons 2009
- 2- A. Nourbakhsh, A. B. Jaumotte, CH. Hirsch, H. B. Parizi - turbopumps and pumping systems - Springer - verlag Berlin Heidelberg 2008
- 3- Daved A. Spera - wind turbine technology - New York - Asme pres 1994.
- 4- D. S. Kumar, fluid mechanics and fluid power engineering - S.K. Kataria & sons - seventh edition 2008.

- 5- Erich Haw -- wind turbine [fundamentals, technologies, applications, economics] second edition - Springer 2005
- 6- Igor. J. Karassik, Joseph. P. Messina, Paul Cooper, Charles C. Heald - pump hand book, third edition - McGraw-Hill 2001
- 7- K. Holzenberger, K. Jung - centrifugal pump - Lexicon-F. R. Germany 1990.
- 8- KSB - handbook - pumps - Frankenthal (Platz) - Germany 1968.
- 9- Marks standard handbook for mechanical engineers - tenth edition McGraw-Hill
- 10- R. S. Khurmi - hydraulic, fluid mechanics and fluid mechanics nineteenth edition 2000.
- 11- S. K. Som, G. Biswas, introduction to fluid mechanics and fluid mechanics, second edition Tata McGraw-Hill Newdelhi 2004
- 12- Sufian Al-Alao, Nidal Karmousheh - sustainable energy in the Arab States - small hydropower systems in the Syrian Arab Republic, training workshop on small hydropower - Damascus 6-10 june 1999.
- 13- V. M. Cherkassky - pumps, fans, compressors - Mir publisher - Moscow 1980.

ثالثاً: المراجع باللغة الفرنسية :

- 1- Candel - Mecanique des fluides , 2 edition , Dunod , 1995
- 2- D. Desjarding , M . Touzet - introduction à la dynamique des milieu continus , Dunod , 1999
- 3- F. Massouh - Ondes De Pression Dans Les Conduites Elastiques et Visco -- Elastiques Comportment Des Section Circulaires et Elliptiques , These de Doctorat D'Etat , Paris IV , 1984
- 4- L.L.Ryhming - Dynanique des fluides , 2 edition , Presses Polytechnique Ramandes , 1991
- 5- J. Estienne Calcul et Construction de Barrage , Tome 2, Edition 1976 (Ecole Nationale Superieure) .
- 6- M. Rictord - une introduction a la dynamique des fluides , Masson , 1997
- 7- P. Chassaing - Turbulence en Mecanique des fluides , Ce'padue's - E'dition , Coll . Polytech , 2000
- 8- R. Comolet - Mécanique experimental des fluides , Tome 1 , Masson , Fance , 1981

- 9- R. Comolet - Mécanique experimental des fluides , Tome 2,
Masson , France , 1983
- 10- R. Comolet - Mécanique experimental des fluides , Tome 3 ,
Masson , France , 1983

رابعاً: المراجع باللغة الروسية :

- 1- И. И. ИЛЬИНЫХ - ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ - МОСКВА
- ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ -1988.
- 2- В. И. ОБРЗКОВА -ГИДРОЭНЕРГЕТИКА - МОСКВА -
ЭНЕРГООЗДАТ -1981
- 3- ГРИГОРИИ КРИВЧЕНКО - ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ
МАШИНЫ ТУРБИНЫ И НАСОСЫ. МОСКВА -
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ -1983.
- 4- КРИВЧЕНКО Г. И. АВТОМАТИЧЕСКОЕ
РЕГУЛИРОВАНИЕ ГИДРОТУРБИН -М. ЭНЕРГИЯ - 1964
- 5- МИХАЙЛОВ А. И. , МАЛЮЩЕНКОВ В.В. , ЛАПСТАНЬЕ
НАСОСЫ , М. МАШИНОСТРОЕНИЕ 1977.
- 6- ПОЛЯКОВ В. В. , СКВОРЦОВ Л. С. , НАСОСЫ И
ВЕНТЕЛЯТОРЫ , М. СТРОЙИЗДАТ 1990.
- 7- ЧЕРКАСКИЙ В. М. , НАСОСЫ И ВЕНТЕЛЯТОРЫ И
КОМПРЕССОРЫ , МОСКВА -ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ -1984
- 8- КИРИЛОВ И. И. ТЕОРИЯ ТУРБОМШИН , М.
МАШИНОСТРОЕНИЕ 1972.
- 9- МИХАЙЛОВ А. К. , ВОРШИЛОВ В. П. , КОМПРЕССОРНЫ
МАШИНЫ , МОСКВА -ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ -1989

خامساً: المراجع باللغة البلقارية :

- 1- Г.ГРОЗЕВ , С.СТОЯНОВ , Г.ГУЖИУЛОВ , ХИДРО И
ПНЕВМО МАШИНИ И ЗАДВИЖВАНЯ , ИЗДАТЕЛСТВО
ТЕХНИКА -СОФИЯ 1990.
- 2- Г.ГРОЗЕВ , М. ЛАЗАРОВ , В. ОРЕТЕНОВ ,
ХИДРАВЛИЧНИ МАШИНИ , ИЗДАТЕЛСТВО ТЕХНИКА
- СОФИЯ 1994.
- 3- ПАНТЕЛЕЙ П. РАДУЛОВ , ХИДРАВЛИЧНИ МАШИНИ И
СЪОРЪЖЕНИЯ , ДЪРЖАВНО ИЗДАТЕЛСТВО ТЕХНИКА
-СОФИЯ 1976.

- 4- Г.ГРОЗЕВ , ХИДРО И ПНЕВМО ТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛСТВО НА ТЕХНИЧЕСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ -
СОФИЯ 1998.
- 5- Г.ГРОЗЕВ , В. ОРЕТЕНОВ , М. ЛАЗАРОВ , РЪКОВОДСТВО
ЗА КУРСОВО ПРОЕКТИРАНЕ НА ХИДРАВЛИЧНИ
ТУРБОМАШИНИ , ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ -
СОФИЯ 1993.



فهرس الرموز المستخدمة:

الكثافة	ρ		
الوزن النوعي	γ		
اللزوجة التحريكية نسبة المقاومة	μ		
الرفع الريشة	F_A, P_X, P	قوة الرفع	
اللزوجة الحركية	ν		
إجهاد القص	τ		
الضغط	p		
ضغط التكيف	p_v		
تسارع الجاذبية الأرضية	g		
قوة الثقالة	F_G		
الضغط الجوي	p_a		
مساحة سطح، سطح مقطع	r, A		
قوة ضغط السائل على الجدار	F_p		
مركز الضغط، العزم المؤثر على السائل	M		
مركز النقل	S		
عزم عطالة السطح حول محور مار من مركز السطح	I_s		
حجم	V		
استطاعة المضخة	N_p		
استطاعة المحرك	N_m		
الاستطاعة الواردة إلى المحرك الكهربائي	N_e		
المردود الحجمي	η_0		
الاستطاعة النظرية	N_T		
القدرة	E		
الكتلة	m		
قوة الرفع	F_A, P_X, P		
قوة ضغط السائل الناظمية	F_n		
القوة المماسية	F_r		
فواقد احتكاك	Δh_f		
فواقد مكانية	Δh_k		
السرعة غير المشوشة	w_∞		
التدفق الحجمي	Q		
الجولان	Γ		
عرض الجناح الحامل	b		
معامل الرفع	C_a, C_x		
قوة المقاومة	F_w, P_y, Q		
معامل الاحتكاك (المقاومة)	C_w, C_y		
زاوية التباطؤ، سماكة جدار الأنبوب، نصف طول القذح، خلوص	δ		
غزارة المروحة	I_r		
المردود الميكانيكي	η_m		
مردود المحرك الكهربائي	η_e		
الاستطاعة الخارجة من المحرك الكهربائي	N_{B}, N_S		
المردود الهيدروليكي	η_H		
المردود الكلي المحطة	η_{ys}, η_T		

العزم النظري	M_T	المردود الكلي للمحطة	η_y, η_T
عرض الريشة	b	التدفق النسبي	q
السرعة المحيطية	u	معامل العزم	C_m
السرعة النسبية	w	عامل أمان	k
السرعة المطلقة	c	مردود جملة نقل الحركة	η_π
مسقط السرعة المطلقة على مسار السرعة المحيطية	c_u	معامل تصميم يأخذ بعين الاعتبار سماكة الريشة	μ_j
مسقط السرعة المطلقة على العمود على مسار السرعة المحيطية	c_r	مقدار تيارات السائل داخل المضخة، الضياعات الحجمية، كمية الحرارة النوعية	q
عامل فتل التيار، زاوية تثبيت الريشة	φ	معامل الاستهلاك السنوي للمنظومة	k_y
عامل الضغط، زاوية	ψ	زاوية الهجوم	α
زاوية الريشة، زاوية الورود	β	الارتفاع التكيفي للسحب	h_k
التفقات الاستثمارية السنوية للألات	k_I	الارتفاع الهندسي للسحب	h_v
نفقات استهلاك الطاقة في المنشأة	k_P	ارتفاع تثبيت المضخة	h_H
عامل سرعة التآكل من الأنابيب	δ_k	ارتفاع السحب الموجب الصافي	$NPSH$
إجهاد الشد المسموح به	σ_z	معامل التكيف، ثابت التكيف	σ, σ_n
خطوة الريشة	t	عمل القوة، قوة	P, W
العمل في معادلة الطاقة	L أو E	الطاقة النوعية المتحولة إلى حرارة	ΔL
عرض الشبك	B	نسبة المقاومة - الرفع للريشة	μ
ارتفاع التخلخل	H_{vac}	نسبة وزن التشغيل	$u = m_s / m_{mot}$
تدفق سائل التشغيل	G_{mot}	الزيادة النسبية في الضغط	Δh
تدفق السائل المسحوب	G_s	طول السوط	S
معامل السرعة للقوامة	φ_1	معامل عدم انتظام التيار	$n = \pi = Q_{max} / Q_{dep}$
معامل السرعة لحجرة المزج	φ_2	طول مقطع الريشة	b

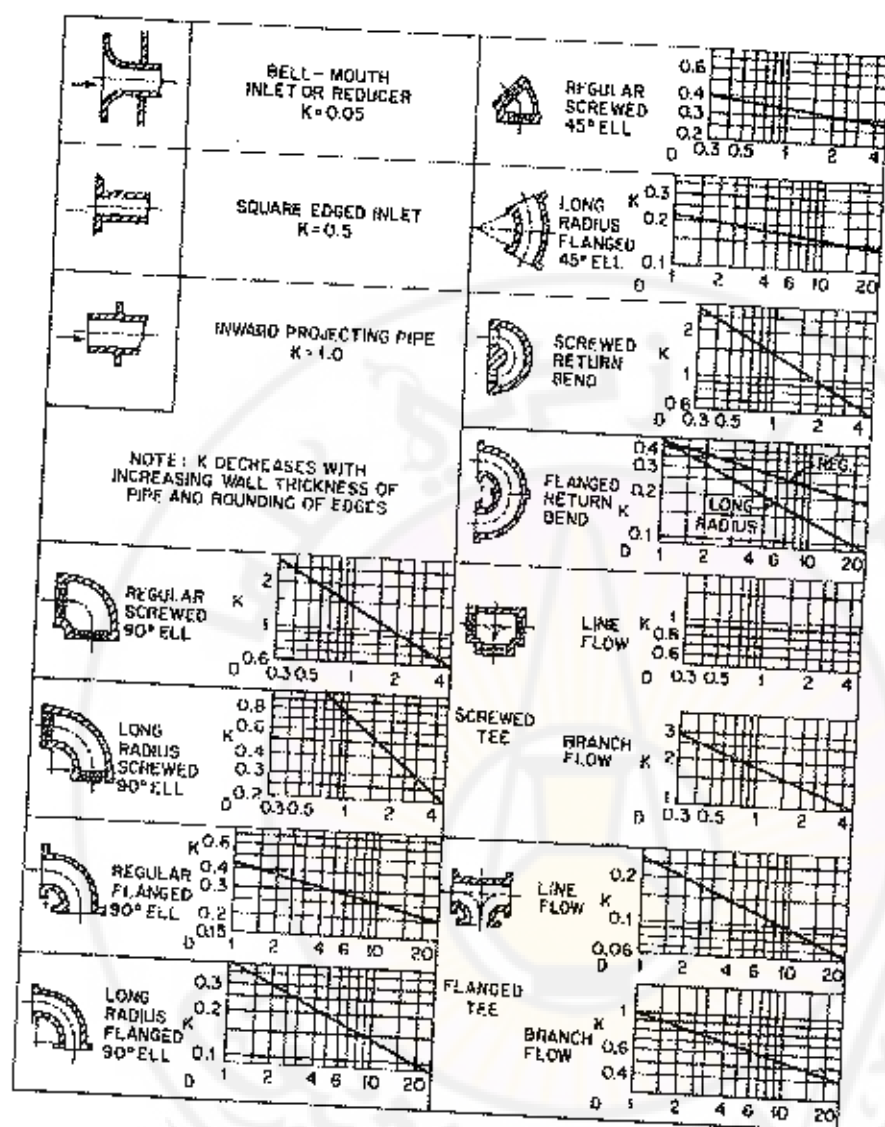
ϵ	نسبة الانضغاط	i	الانتاليبي
V	الحجم النوعي	η	المردود الطاقي لعملية الانضغاط
k	الأس الأديباتي	η_{ind}	المردود الميكانيكي الأديباتي
n	الأس البوليتروبي	Z	عدد مراحل الانضغاط
s	الانتروبي	m	التدفق الكتلي للضاغط
Q	كمية الحرارة	P_N	الاستطاعة المستخلصة من الرياح
L	الغزارة المضغوطة	n	عدد الدورات في الدقيقة
p^*	الضغط السائد في مكان تثبيت المروحة	w_r	الاستطاعة المأخوذة عند نواة التوربين مقطرة بـ [kW]
w_b	الاستطاعة المبذورة عند مضاجع المروحة	W_{TOT}	الاستطاعة الكلية المأخوذة عند المحور مقطرة بـ [kW]
C_T	أمثال الدفع لقوة الجر في المراوح	P	قوة الرفع
C_p	معامل الاستطاعة	Γ_s	الجولان على البروفيل
P_a	القدرة المتوفرة	K_s	عامل لا بعدي
P_{fr}	القدرة الفعلية	f	ذبذبة المولد [r.p.m.]
J_s	الغزارة المضغوطة	N	سرعة تشغيل التوربين [r.p.m.]
η_{th}	المردود الكلي للمروحة	N_r	الاستطاعة على عمود المروحة
W_r	الاستطاعة المأخوذة عند نواة التوربين	N_m	استطاعة المحرك الكهربائي للمروحة
K_v, K_{vu}, ϕ	معامل السرعة	$\Delta p_s ; \Delta p_s$	مجموع فواقد الضغط داخل تمديدات السحب وداخل تمديدات الضخ
P_o	الضغط المنسوب إلى شروط العمل	N_s, n_s	العند النوعي للدورات (السرعة النوعية)
W_{tot}	الاستطاعة الكلية المأخوذة عند المحور	$p_s ; p_o$	فائق الضغط عند دخول الهواء إلى الشبكة وعند خروجه منها
P_{st}	الضغط الستاتيكي	p	الضغط الكامل في الشبكة

الاستطاعة المبددة عند المضاجع	W_{μ}	الضغط الديناميكي	P_{dyn}
سرعة خروج الهواء من الشبكة	v_s	الضغط الكلي	P_T
سرعة تقدم المروحة في الهواء الساكن	V	القوة الخارجية المؤثرة على المائع ضمن حجم المراقبة (قوة الدخول على المروحة)	F
الخطوة بين ريشتين متعاقبتين	t	العمل الذي تقدمه المروحة	P_W
الضباغات الهيدروليكية في قناة الجريان	h_{loss}	القدرة المبذولة لاجاز عمل المروحة	P
زاوية تثبيت الريشة	θ	أمثال قوة الدفع	C_T
قوة المقاومة الراسية	ϕ	مساحة دائرة المروحة	A
قوة المقاومة عند دوران الدوارة	ϕ_1	خط فتحة الدخول	D_o
قوة السحب	P_1	أفضل قطر داخلي للمروحة	D_i
الاستطاعة المستخلصة من الرياح	P_N	زاوية التصميم	β_1
التدفق الكلي	m^*	عرض الدوارة	b_1
المساحة التي تعبرها الرياح	A	سرعة دخول الهواء للمروحة	c
معامل الاستطاعة (معامل بيتز)	C_p	معامل قفل التيار	φ
عدد الريش، عدد الاقداح	Z	عرض الناشرة الحلزونية	B
صياغات نتيجة احتكاك السائل بالجدران	h_r	الضغط الستاتيكي للمحطة، الارتفاع الستاتيكي - ارتفاع السحب	$H_{st}, H_s, \Delta h_s$
ضباغات إعصارية	h_k	القدرة النوعية عند مدخل العنفة	e_{int}
الاستطاعة الضائعة بالاحتكاك	N_D	القدرة النوعية عند مخرج العنفة	e_{exit}
الضباغات الميكانيكية	h_M	الجولان على البروفيل	F_s
الحمولة المفيدة (الارتفاع المستفاد منه)	H_f	الاستطاعة المفيدة للعنفة عند مرور السائل	N_1
الصباغات في الدوالب العامل	h_a	الاستطاعة المفيدة للعنفة	N
الضباغات في أنبوب السحب	h_s	الضباغات الهيدروليكية	h_w
الضباغات عند الخروج	h_{out}	المردود الميكانيكي	η_M

سرعة السائل، سرعة الهواء النظامي	V_o	عمق ريشة التوجيه (ارتفاع الموجه)	B_o
المركبة المحيطية للسرعة	V_u	المساحة الإجمالية للتيار في الدولاب	F_i
كتلة السائل للحجم العنصري	m	ارتفاع فتحة الدخول للدولاب	b_n
ثابت السرعة	ϕ	القطر الحسابي	D_p
سرعة خروج التيار من فوهة النفث	V_e	طول وعرض وعمق القذح (المعروفة)	T, B, L
زاوية الرمح	2α	السرعة المحيطية للقذح (المعروفة)	u_l
مقطع التيار المتضيق	d_c	معامل السرعة	K_{v1}
قطر النافث	d_o	ذبذبة المولد	t
الاستطاعة الميكانيكية للتوربين	P_r	عدد أزواج الأقطاب	p
استطاعة المولدة	P_o	زاوية الدخول	B_1
زاوية المنفث	2β	زاوية الخروج	B_2
عدد المنافث	i	معدل نصف قطر الدولاب	R_l
متوسط قطر دولاب بلتون، قطر المدخل	D_l	الزمن المستغرق من قبل القذح لتحريك المسافة الزاوية $w = \frac{u_l}{R_l}$	t_2
سرعة تشغيل التوربين	N	نصف طول القذح	δ
نسبة النفث	m	اقصر قطر للدولاب العامل	R_o
سرعة النفث محسوبة في اصغر مقطع	V_1	الخطوة الزاوية (الفصل الزاوي بين قذحين)	θ
المسافة الزاوية لـ B, A اعتبارا من خط العمود المركزي للدولاب	ϕ	الفتحة الأعظمية لريش جهاز التوجيه	a_o
مجموع عزوم القوى الخارجية	$\sum M_o$	الخطوة	t
طول ريشة التوجيه	I_n	قطر دولاب التوجيه	D_o
عدد ريش جهاز التوجيه	Z_n	معامل الجريان النوعي	Q_{11}
القطر الخارجي	D_2	نسبة الجريان	K_{vml}

نسبة السرعة	K_{ul}	نصف قطر منحنى	R_l
سرعة الجريان	V_{ml}	معامل السرعة	K_{100}
انضغاطية المائع	E_B	معامل تكهف العنفة الحسابي	σ_r
الضغوط من أجل نظام عمل مستقر وغير مستقر	H_0 , H	قطر العنفة التي تحمل بالعدد النوعي n_s	D_s
السرعات من أجل نظام عمل مستقر وغير مستقر	C_0 , C	التدفقات الابتدائية والنهائية على التوالي	Q_H , Q_K
طول أنبوب التغذية	L	الضياعات في أنبوب السحب	Δh_c
سرعة انتشار موجة الطرق (سرعة ضغط المطرقة)	a	الضغط أسفل الدولاب العامل	P_2
ضغط المطرقة في المقطع A	ΔH^A	ثابت الاحتياط	k_p
الضغط النسبي	h	مرونة المنظومة	E_{cr}





معامل الفقد الميكانيكي K لبعض أنواع الوصلات
Resistance coefficients for K for valves and fittings

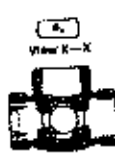
PLUG VALVES AND COCKS

Straight-Way

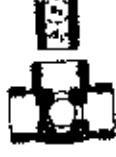


$$\text{If: } \beta = 1, \\ K_2 = 18 f_r$$

3-Way



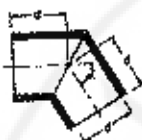
$$\text{If: } \beta = 1, \\ K_1 = 30 f_r$$



$$\text{If: } \beta = 1, \\ K_3 = 90 f_r$$

If: $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 6}$

MITRE BENDS



α	K
0°	2 f _r
15°	4 f _r
30°	8 f _r
45°	15 f _r
60°	25 f _r
75°	40 f _r
90°	60 f _r

90° PIPE BENDS AND FLANGED OR BUTT-WELDING 90° ELBOWS



r/d	K	r/d	K
1	30 f _r	8	24 f _r
1.5	14 f _r	10	30 f _r
2	12 f _r	12	34 f _r
3	13 f _r	14	38 f _r
4	14 f _r	16	42 f _r
5	17 f _r	20	50 f _r

The resistance coefficient, K_b , for pipe bends other than 90° may be determined as follows:

$$K_b = (n - 1) \left(0.15 + f_r \frac{r}{d} + 0.5 K \right) + K$$

n = number of 90° bends

K = resistance coefficient for one 90° bend (see table)

CLOSE PATTERN RETURN BENDS



$$K = 30 f_r$$

STANDARD ELBOWS

90°



$$K = 30 f_r$$

45°



$$K = 16 f_r$$

STANDARD TEE



Flow thru run, $\dots K = 30 f_r$

Flow thru branch, $\dots K = 60 f_r$

PIPE ENTRANCE

Lowest Projecting



$$K = 0.78$$

Flush



For K , see table

r/d	K
0.00*	0.5
0.02	0.28
0.04	0.24
0.06	0.13
0.10	0.09
0.15 & up	0.04

*Sharp-edged

PIPE EXIT

Projecting



$$K = 1.0$$

Sharp-Edged



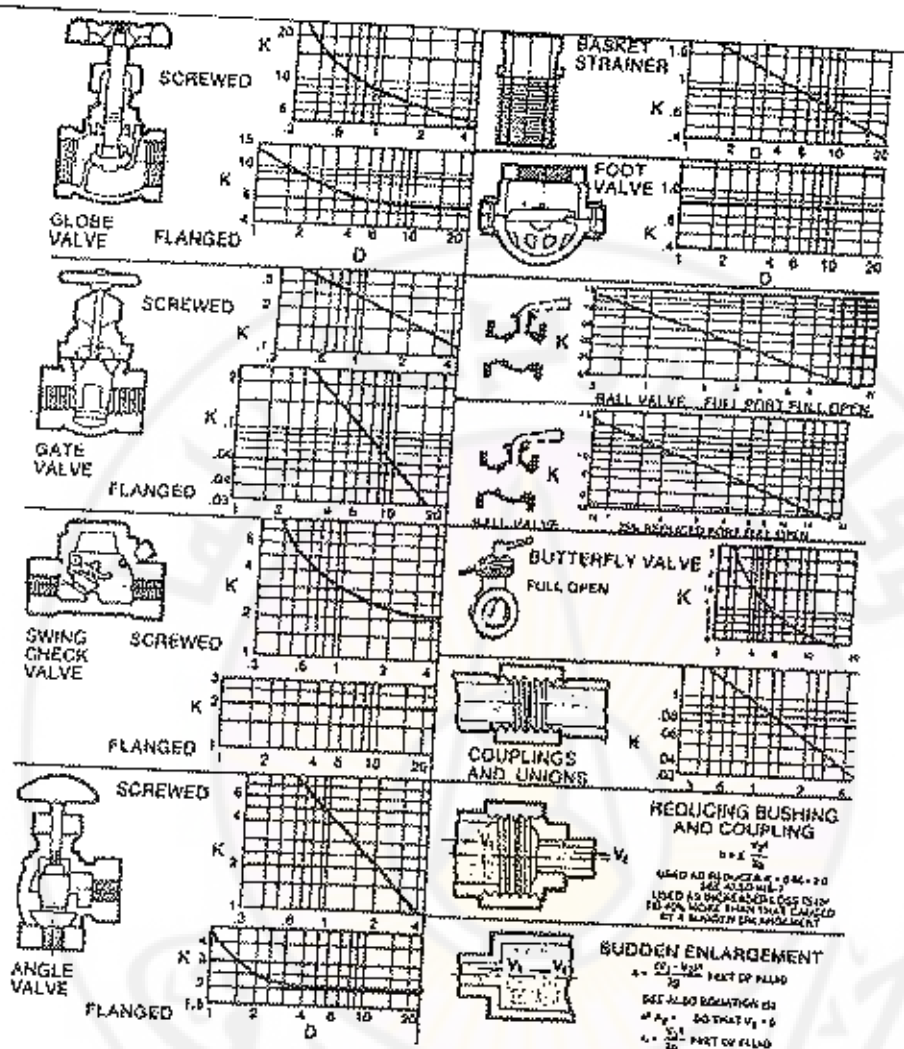
$$K = 1.0$$

Rounded



$$K = 1.0$$

معامل الفقد الميكانيكي K لبعض أنواع الوصلات



معامل الفقد المكاني K لبعض أنواع الصمامات

GATE VALVES Wedge Disc, Double Disc, or Plug Type



If: $\beta = 1, \theta = 0 \dots K_1 = 8 \text{ ft}$
 $\beta < 1$ and $\theta < 45^\circ \dots K_1 = \text{Formula 5}$
 $\beta < 1$ and $45^\circ < \theta < 150^\circ \dots K_1 = \text{Formula 6}$

SWING CHECK VALVES



$K = 100 \text{ ft}$

Minimum pipe velocity
(fps) for full disc lift
 $= 35 \sqrt{V}$

$K = 50 \text{ ft}$

Minimum pipe velocity
(fps) for full disc lift
 $= 48 \sqrt{V}$

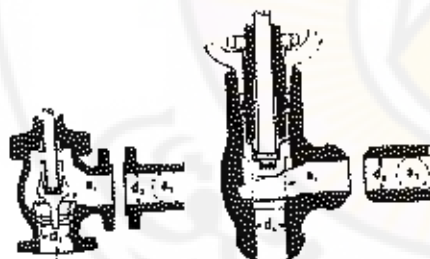
GLOBE AND ANGLE VALVES



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 340 \text{ ft}$



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 55 \text{ ft}$



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 150 \text{ ft}$ If: $\beta = 1 \dots K_1 = 55 \text{ ft}$

All globe and angle valves,
whether reduced seat or chortled.
If: $\beta < 1 \dots K_1 = \text{Formula 7}$

LIFT CHECK VALVES



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 600 \text{ ft}$

$\beta < 1 \dots K_1 = \text{Formula 7}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 40 \sqrt{V}$



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 55 \text{ ft}$

$\beta < 1 \dots K_1 = \text{Formula 7}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 140 \sqrt{V}$

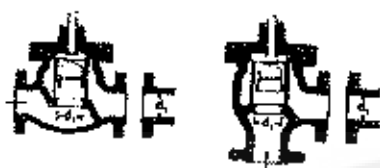
FLTING DISC CHECK VALVES



	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 15^\circ$
Sizes 2 to 8" ... $K =$	40 ft	120 ft
Sizes 10 to 14" ... $K =$	30 ft	90 ft
Sizes 16 to 48" ... $K =$	20 ft	60 ft
Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift =	$80 \sqrt{V}$	$30 \sqrt{V}$

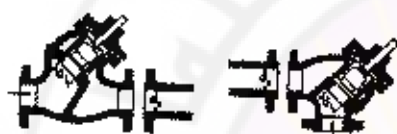
معامل الفقد المكاني K لبعض أنواع الصمامات

STOP-CHECK VALVES (Globe and Angle Types)



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 400 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
 If: $\beta = 1 \dots K_1 = 200 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 35 \beta \sqrt{V}$ $= 25 \beta \sqrt{V}$



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 300 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
 If: $\beta = 1 \dots K_1 = 350 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 60 \beta \sqrt{V}$



If: $\beta = 1 \dots K_1 = 55 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$
 If: $\beta = 1 \dots K_1 = 55 \text{ ft}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Formula 7}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 140 \beta \sqrt{V}$

FOOT VALVES WITH STRAINER

Poppet Disc



$K = 420 \text{ ft}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 15 \sqrt{V}$

Hinged Disc



$K = 75 \text{ ft}$

Minimum pipe velocity (fps) for full disc lift
 $= 15 \sqrt{V}$

BALL VALVES



If: $\beta = 1, \theta = 0 \dots K_1 = 3 \text{ ft}$
 $\beta < 1 \text{ and } \theta < 45^\circ \dots K_2 = \text{Formula 4}$
 $\beta < 1 \text{ and } 45^\circ < \theta < 180^\circ \dots K_2 = \text{Formula 6}$

BUTTERFLY VALVES



Sizes 2 to 8" $K = 45 \text{ ft}$
 Sizes 10 to 14" $K = 75 \text{ ft}$
 Sizes 16 to 24" $K = 95 \text{ ft}$

In USCS units, $V = \frac{\text{gpm}}{(\text{pipe ID in inches})^2} \times 0.408 = \frac{60}{2.067^2} \times 0.408 = 5.73 \text{ ft}$
 $VD'' = 5.73 \times 2.067 = 11.8 \text{ ft/s} \times \text{in}$

In SI units $V = \frac{\text{m}^3/\text{h}}{(\text{pipe ID in cm})^2} \times 3.54 = \frac{13.6}{5.26^2} \times 3.54 = 1.75 \text{ m/s}$

معامل الفقد المكاني K لبعض أنواع الصمامات

Nominal Size	1/8"	1/4"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"	6"	8-10"	12-16"	18-24"
Friction Factor (f)	.027	.025	.023	.022	.021	.019	.018	.017	.016	.015	.014	.013	.012			

معامل الاحتكاك لأنابيب من الفولاذ التجاري النظيف من أجل جريانات مضطربة

FORMULAS FOR CALCULATING "K" FACTORS FOR VALVES AND FITTINGS WITH REDUCED PORT

• Formula 1

$$K_1 = \frac{0.8 \sin \frac{\theta}{2} (1 - \beta^4)}{\beta^5} = \frac{K_2}{\beta^4}$$

• Formula 2

$$K_2 = \frac{0.5 (1 - \beta^4) \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\beta^5} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

• Formula 3

$$K_3 = \frac{2.6 \sin \frac{\theta}{2} (1 - \beta^4)^2}{\beta^5} = \frac{K_4}{\beta^4}$$

• Formula 4

$$K_4 = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^5} = \frac{K_5}{\beta^4}$$

• Formula 5

$$K_5 = \frac{K_1}{\beta^4} = \text{Formula 1} + \text{Formula 3}$$

$$K_6 = \frac{K_1 + \sin \frac{\theta}{2} [0.8 (1 - \beta^4) + 2.6 (1 - \beta^4)^2]}{\beta^5}$$

• Formula 6

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \text{Formula 2} = \text{Formula 4}$$

$$K_3 = \frac{K_1 + 0.5 \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}} (1 - \beta^4) + (1 - \beta^4)^2}{\beta^5}$$

• Formula 7

$$K_3 = \frac{K_1}{\beta^4} + \beta (\text{Formula 1} + \text{Formula 4}) \text{ when } \theta = 180^\circ$$

$$K_3 = \frac{K_1 + \beta [0.5 (1 - \beta^4) + (1 - \beta^4)^2]}{\beta^4}$$

NOTES:

$$\beta = \frac{d_1}{d_2}$$

$$\beta^2 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{a_1}{a_2}$$

Subscript 1 defines dimensions and coefficients with reference to the smaller diameter.
Subscript 2 refers to the larger diameter.

SUDDEN AND GRADUAL CONTRACTION

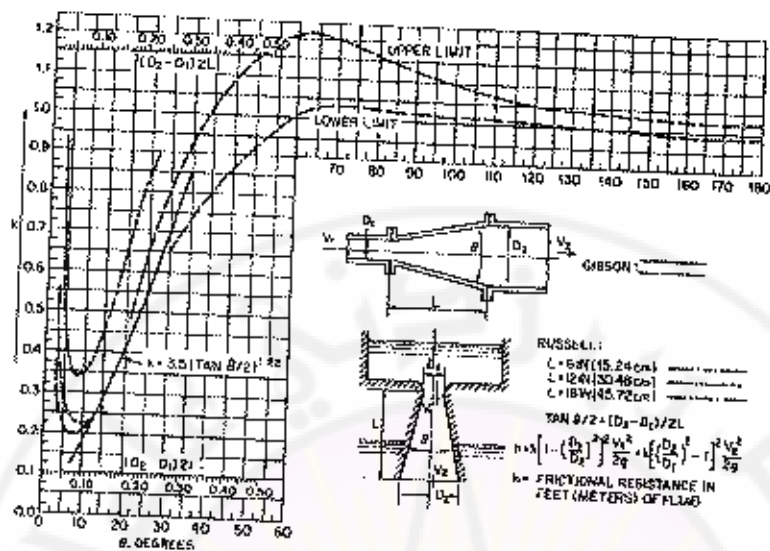


If: $\theta = 45^\circ \dots \dots \dots K_1 = \text{Formula 1}$
 $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots \dots K_2 = \text{Formula 2}$

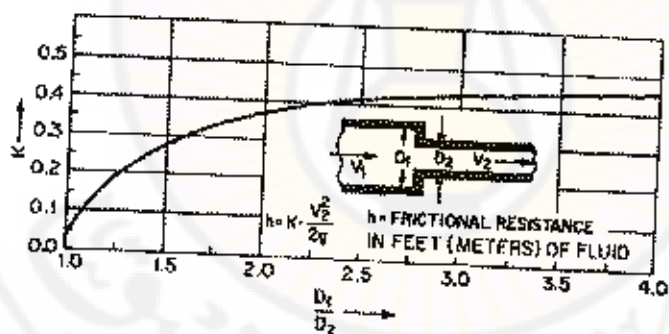
SUDDEN AND GRADUAL ENLARGEMENT



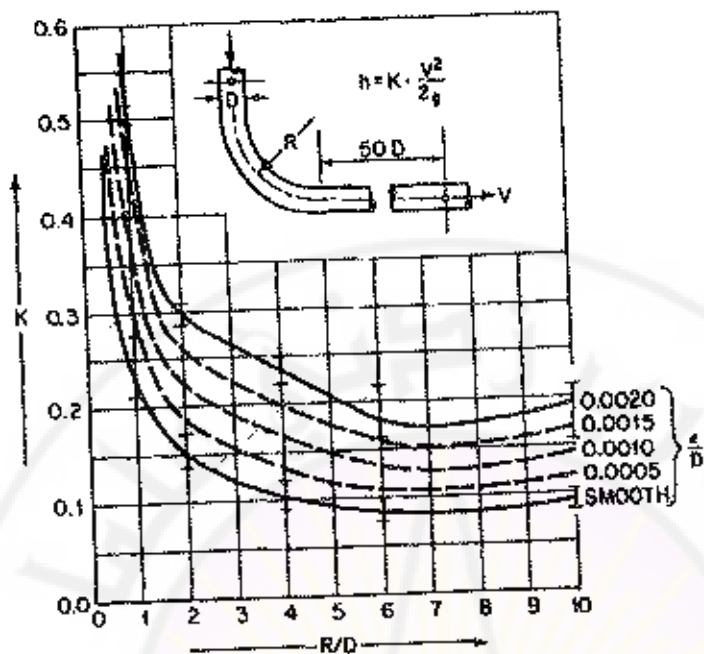
If: $\theta = 45^\circ \dots \dots \dots K_3 = \text{Formula 3}$
 $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots \dots K_4 = \text{Formula 4}$



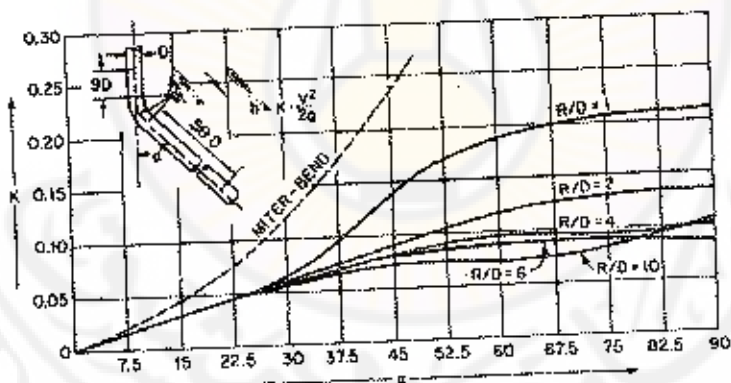
معامل الفقد المكاني لانتزعة أو فوطة $(D \text{ in } [ft] \text{ or } [m]; v \text{ in } [ft/s], [m/s])$



معامل الفقد المكاني لانقاصه ذات تغير فجائي للمقطع



معامل الفقد المكاني لكوع قوسي قائم الزاوية



معامل الفقد المكاني لكوع ناعم السطح مشكل بزواوية α ومن أجل $Re \approx 2,25 \cdot 10^3$

	$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.042$ $K_r = 0.052$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.130$ $K_r = 0.165$		$K_s = 0.236$ $K_r = 0.320$		$K_s = 0.471$ $K_r = 0.584$		$K_s = 1.129$ $K_r = 1.265$
	$K_s = 0.112$ $K_r = 0.204$		$K_s = 0.150$ $K_r = 0.268$		$K_s = 0.143$ $K_r = 0.227$		$K_s = 0.108$ $K_r = 0.236$		$K_s = 0.188$ $K_r = 0.320$		$K_s = 0.202$ $K_r = 0.323$		$K_s = 0.400$ $K_r = 0.534$		$K_s = 0.400$ $K_r = 0.601$
	$K_s = 0.507$ $K_r = 0.510$		$K_s = 0.333$ $K_r = 0.377$		$K_s = 0.269$ $K_r = 0.320$		$K_s = 0.183$ $K_r = 0.252$		$K_s = 0.117$ $K_r = 0.272$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$
	$K_s = 0.333$ $K_r = 0.377$		$K_s = 0.269$ $K_r = 0.320$		$K_s = 0.183$ $K_r = 0.252$		$K_s = 0.117$ $K_r = 0.272$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.008$ $K_r = 0.012$
	$K_s = 0.269$ $K_r = 0.320$		$K_s = 0.183$ $K_r = 0.252$		$K_s = 0.117$ $K_r = 0.272$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.008$ $K_r = 0.012$		$K_s = 0.004$ $K_r = 0.006$
	$K_s = 0.183$ $K_r = 0.252$		$K_s = 0.117$ $K_r = 0.272$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.008$ $K_r = 0.012$		$K_s = 0.004$ $K_r = 0.006$		$K_s = 0.002$ $K_r = 0.003$
	$K_s = 0.117$ $K_r = 0.272$		$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.008$ $K_r = 0.012$		$K_s = 0.004$ $K_r = 0.006$		$K_s = 0.002$ $K_r = 0.003$		$K_s = 0.001$ $K_r = 0.001$
	$K_s = 0.065$ $K_r = 0.154$		$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$		$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$		$K_s = 0.008$ $K_r = 0.012$		$K_s = 0.004$ $K_r = 0.006$		$K_s = 0.002$ $K_r = 0.003$		$K_s = 0.001$ $K_r = 0.001$		$K_s = 0.000$ $K_r = 0.000$

معامل فقد السكاني لبعض أنواع الأبراج حيث: K_s من أجل السطوح المنساء K_r من أجل السطوح الخشنة

المدققون العلميون

أ. د. م. جمال العباس

أ. د. م. حسين تينة

د. م. نبيل كشكية

المدقق اللغوي

د. حمود يونس

حقوق الطبع والنشر محفوظة لمديرية المطبوعات

Damascus University Press
Mechanical & Electrical
Engineering Faculty



FLOW MACHINES

Dr. Farid Abou-Hamed

Dr. Ali Khalouf

Dr. Assem Kaddah

Dr. Hekmat Al-Ahmad

Damascus University



