



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية

قسم التصميم الميكانيكي

اختصاص هندسة أتمتة الإنتاج

استخدام مخرجات الشبكات العصبونية الصناعية في النمذجة بطريقة العناصر المنتهية
لحساب العمر التعبّي للفولاذ

USING [ANN] OUTPUT IN [FE] MODELING TO PREDICT FATIGUE LIFE OF STEEL

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم التصميم الميكانيكي اختصاص هندسة أتمتة الإنتاج

إعداد المهندسة: رشا محمد ناصر الكيالي

إشراف الدكتور المهندس: محمد بسام أبو حرب

العام الدراسي 2019/2018

تمّ إجراء جميع التعديلات اللازمة في هذه الأطروحة و تعدّ هذه النسخة معتمدة كنسخة
نهائية لأطروحة الماجستير للمهندسة رشا محمد ناصر الكيالي

	أ.د. محمد علي سلامة	1
	أ.م.د. عبد الوهاب وتار	2
	د. محمد بسام أبو حرب	3

شكر و تقدير

إلى من أضاء بعلمه عقل غيره

أو هدى بالجواب الصحيح حيرة سائليه

فأظهر بسماحته تواضع العلماء

وبرحابته سماحة العارفين

الدكتور المهندس: محمد بسام أبو حرب

إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى أبي الذي لم يبخل علي يوماً بشيء

وإلى أمي التي زودتني بالحنان والمحبة

أقول لهما: أنتما وهبتماني الحياة والأمل والنشأة على شغف

الاطلاع والمعرفة

وإلى إخوتي وأسرتي جميعاً

ثم إلى كل من علمني حرفاً فأصبح سناء برقه يضيء الطريق

أمامي

فهرس المحتويات

14	الملخص
16	1. الفصل الأول التعب.
17	مقدمة.
20	1.1 المحة تاريخية عن التعب.
20	1.1.1 بداية 1800.
21	1.1.2 بداية 1900.
22	1.1.3 منتصف 1900.
26	1.1.4 نهاية 1900.
27	1.2 دورات التحميل المتكررة.
28	1.2.1 الأشكال المختلفة لترددات الإجهاد.
28	1.2.1.1 دورة متناسقة.
22	1.2.1.2 دورة نبضية.
29	1.2.1.3 دورة إجهاد عشوائية.
29	1.3 طرق حساب العمر التعبي.
30	1.3.1 طريقة إجهاد - عدد دورات.
31	1.3.2 طريقة انفعال - عدد دورات.
32	1.3.3 طريقة ميكانيك التصدع المرن الخطي.
35	1.4 أنماط التحميل.
36	2. انهيار العناصر الهندسية.
38	2.1 الانهيار الميكانيكي.
39	2.1.1 الانهيار الناتج عن التصدع.
40	2.1.1.1 التصدع اللدن.
41	2.1.1.2 التصدع الهش.

43	2.1.1.3 التحول من الهش إلى التصدع اللدن.
43	2.1.1.4 العوامل المؤثرة على التصدع في المادة.
44	2.1.1.4.1 تركيز الإجهادات.
44	2.1.1.4.2 سرعة التحميل.
45	2.1.1.4.3 درجة الحرارة.
45	2.1.1.4.4 الصدمات الحرارية.
45	2.1.1.5 نظرية غريفت ومقاومة التصدع.
47	2.1.1.5.1 العوامل المؤثرة على مقاومة التصدع.
47	2.1.1.5.1.1 مركبات المادة.
48	2.1.1.5.1.2 المعالجة الحرارية.
48	2.1.1.5.1.3 ظروف التشغيل.
48	2.6 الانهيار الناتج عن التعب.
49	2.6.1 منع حدوث الانهيار التعب.
49	2.7 الانهيار الناتج عن الزحف.
51	2.8 الانهيار الناتج عن التآكل.
52	2.9 الانهيار الناتج عن الاحتكاك.
53	3. استخدام العناصر المنتهية في حساب العمر التعب.
54	مقدمة
54	3.1 عناصر نظام حساب العمر التعب.
58	3.2 الدراسات السابقة.
72	3.3 الدراسة العملية.
72	3.3.1 مراحل النمذجة.
83	4. استخدام الشبكات العصبونية الصناعية في حساب العمر التعب.

84	مقدمة
84	4.1 لمحة عامة عن الشبكات العصبونية.
89	4.1.1 خوارزميات تدريب الشبكة العصبونية الصناعية.
91	4.2 بعض الملاحظات في استخدام الشبكة العصبونية الصناعية.
94	4.3 الدراسات السابقة.
100	5. استخدام الشبكات العصبونية الصناعية و النمذجة بطريقة العناصر المنتهية في حساب العمر التعبى لل فولاذ.
101	مقدمة
102	5.1 الدراسات السابقة.
113	5.2 الدراسة العملية.
114	5.2.1 مراحل النمجة بطريقة الشبكة العصبونية الصناعية.
124	5.3 الخاتمة.
125	5.4 التوصيات و العمل المستقبلي.
127	المراجع.

فهرس الأشكال

الصفحة	الشكل
18	الشكل 1 الانهيار التعبى لعمود تدوير مرفقى.
18	الشكل 2 الانهيار التعبى لبرغى.
19	الشكل 3 أشكال سطوح التحطم التعبى الناتج فى قطع ملساء و محزوزة وذات مقاطع مستطيلية ودائرية محملة تحت شروط تحميل مختلفة.
27	الشكل 4 دورة إجهاد تعب.
28	الشكل 5 دورة إجهاد معكوسة كلياً.
29	الشكل 6 دورة إجهاد تكرارية.
29	الشكل 7 دورة إجهاد عشوائية.
31	الشكل 8 مخطط S-N لفولاذ UNSG41300.
33	الشكل 9 حلقة إجهاد - انفعال.
33	الشكل 10 مخطط لوغارىتمى يظهر ارتباط العمر التعبى بسعة الانفعال الحقيقى لفولاذ الدرفلة على الساخن SAE1020.
35	الشكل 11 منحنى انتشار التشقق بدلالة معامل كثافة الإجهاد.
36	الشكل 12 أنماط التحميل.
38	الشكل 13 تحطم ناقلة نطف بأسلوب الانهيار الهش عن طريق انتشار شقوق حول منتصفها.
41	الشكل 14 التصدع اللدن فى الألمنيوم و الفولاذ بعد اختبار الشد.

43	الشكل 15 منحني درجة حرارة التحول من التصدع الهش إلى التصدع اللدن.
46	الشكل 16 سلوك مقاومة التصدع : تأثير سماكة المادة.
49	الشكل 17 مخطط لمنحني S-N يظهر ازدياد العمر التعبي وذلك بانقاص الإجهادات.
50	الشكل 18 تمزق زحفي مغلق.
51	الشكل 19 معدل الانفعال (منحني الزحف) للمادة تحت تأثير اختبار الزحف.
55	الشكل 20 الطريقة التقليدية لعملية تحليل التعب
56	الشكل 21 طريقة أخرى للإجراءات التقليدية في حساب العمر التعبي.
57	الشكل 22 مخطط حساب العمر التعبي باستخدام العناصر المنتهية.
59	الشكل 23 العمر التعبي لجائز مشقوق.
61	الشكل 24 نموذج العناصر المنتهية مع شبكة و التشوه و الإجهادات الأساسية لحز القضيب.
62	الشكل 25 أبعاد المقطع العرضي لشبه المنحرف.
62	الشكل 26 نموذج خطاف هوك حقيقي.
63	الشكل 27 الشروط الحدية.
63	الشكل 28 الإجهاد المكافئ و التشوه الكلي للخطاف الحقيقي.
65	الشكل 29 العمر التعبي لحساس التعب المصنوع من الألمنيوم.

66	الشكل 30 العمر التعبي لحساس تعب مصنوع من الفولاذ الإنشائي.
67	الشكل 31 اجهاد Von-Misses المكافئ.
69	الشكل 32 نموذج إطار العجلة.
69	الشكل 33 التشوهات الكلية.
70	الشكل 34 الإجهاد المكافئ.
70	الشكل 35 مكان الإجهاد الأعظمي.
70	الشكل 36 العمر التعبي.
71	الشكل 37 مخطط بارامترات الدخل مع الخرج.
72	الشكل 38 مقطع جانبي للجائز يظهر فيه موقع الشق.
73	الشكل 39 واجهة اختيار المادة ضمن ANSYS Workbench.
74	الشكل 40 نموذج الجائز المرسوم ضمن ANSYS Workbench.
75	الشكل 41 الدراسة التقاربية.
75	الشكل 42 تطبيق المسند.
76	الشكل 43 تطبيق القوة.
77	الشكل 44 ضبط مؤثرات التعب.
78	الشكل 45 العمر التعبي لجائز بزاوية 15 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.
78	الشكل 46 العمر التعبي لجائز بزاوية 30 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.
79	الشكل 47 العمر التعبي لجائز بزاوية 45 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.

79	الشكل 48 العمر التعبى لجائز بزاوية 60 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.
80	الشكل 49 العمر التعبى لجائز بزاوية 75 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.
80	الشكل 50 العمر التعبى لجائز بزاوية 90 وعمق 25mm وعند القوة 10KN.
81	الشكل 51 مخطط العمر التعبى لزاوية 90 عند أعماق مختلفة.
81	الشكل 52 مقارنة بين مخطط العمر التعبى للزاويا 90 و 45.
87	الشكل 53 مخطط يصف ترتيب الشبكة العصبونية الصناعية.
95	الشكل 54 شبكة عصبونية مؤلفة من ثلاث طبقات والمستخدمه في هذه الدراسة.
98	الشكل 55 بنية الشبكة العصبونية الصناعية.
103	الشكل 56 شكل نموذج الصب.
104	الشكل 57 بنية الشبكة العصبونية الصناعية.
105	الشكل 58 الإزاحات القشرية بمختلف الاتجاهات.
106	الشكل 59 بنية الشبكة العصبونية الصناعية.
107	الشكل 60 نموذج العناصر المنتهية.
108	الشكل 61 نموذج الشبكة العصبونية الصناعية BP.
109	الشكل 62 النموذج وشبكة العناصر المنتهية ونتائج التحليل للصفحة المثلية.
111	الشكل 63 الإجهاد الأعظمى المكافئ المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.

111	الشكل 64 نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.
111	الشكل 65 الانفعال الأعظمي المكافئ المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.
111	الشكل 66 نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.
112	الشكل 67 التشوه بالاتجاه Z المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.
112	الشكل 68 نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.
114	الشكل 69 استدعاء الشبكة العصبونية الصناعية بإستخدام تعليمة nnstart.
115	الشكل 70 إدخال مصفوفات الدخل و الخرج.
115	الشكل 71 تحديد نسب البيانات.
116	الشكل 72 تحديد بنية الشبكة.
116	الشكل 73 اختيار خوارزمية التدريب.
117	الشكل 74 تدريب الشبكة.
117	الشكل 75 نموذج الشبكة المقترحة.
118	الشكل 76 مقدار الخطأ الوسطي.
119	الشكل 77 مخطط الإنحدار في مراحل التدريب و الاختبار و التحقق.
120	الشكل 78 مقدار الخطأ.
121	الشكل 79 مقدار الخطأ بن نتائج FEM و ANN
121	الشكل 80 مخطط إجهاد-عدد دورات محسوب بواسطة العناصر المنتهية والشبكات العصبونية الصناعية.

فهرس الجداول

الصفحة	الجدول
42	الجدول 2.1 الاختلاف بين التصدع الهش و التصدع اللدن.
47	الجدول 2.2 الاختلاف بين معامل كثافة الإجهاد ومقاومة التصدع.
63	الجدول 3.1 الخواص الميكانيكية للفولاذ AISI4340 150.
64	الجدول 3.2 مقارنة بين أفضل 3 نماذج.
64	الجدول 3.3 مقارنة بين النموذج الحقيقي لخطاف هوك والنموذج الأمثل رقم 3.
66	الجدول 3.4 مقارنة بين العمر التعبي لحساس تعب على شكل حرف U مصنوع من الفولاذ الإنشائي و الألمنيوم.
68	الجدول 3.5 نتائج العمر التعبي عند عدد من الدورات.
71	الجدول 3.6 النقاط التصميمية.
108	الجدول 5.1 بنية الشبكة العصبونية وتوابعها.
110	الجدول 5.2 الحالات الأربعة الجديدة المستخدمة للتحقق من فاعلية الشبكة.
110	الجدول 5.3 نتائج التحقق من فاعلية الشبكة.
120	الجدول 5.4 المقارنة بين نتائج FEM و ANN.
124	الجدول 5.5 البيانات المستخدمة في تدريب الشبكة.

الملخص:

يعد التعب العامل الرئيس لانهايار الشاحنات و السفن وأجنحة الطائرات والعنفات و المفاعلات النووية و جميع مكونات و عناصر الآلات التي تخضع لحمل دوري. لذا أصبح التعب في السنوات الأخيرة من مواضيع الأبحاث الرئيسة لما له من تأثير بالتطور التقني للصناعة . وأصبح من الضروري تطوير طرائق جديدة لحساب العمر التعبي للقطع وأجزاء الآلات بسرعة وفاعلية كبيرة عن طريق استخدام الإمكانيات الحاسوبية, و برامج النمذجة و المحاكاة التي تعطي تصوراً عن سلوك القطع تحت تأثير الأحمال الدورية, و تعطي حساب دقيق عن المدة الزمنية لمدى تحمل هذه القطع للحمل قبل حدوث الانهيار الكلي, وذلك دون اللجوء إلى الاختبارات العملية المكلفة التي تحتاج لوقت وجهد .

تمّ في هذه الدراسة عرض طريقة جديدة لحساب العمر التعبي عن طريق الربط بين العناصر المنتهية و الشبكات العصبونية الصناعية و ذلك من أجل الوصول إلى نموذج أفضل في حساب العمر التعبي وذلك بالاستفادة من مزايا الطريقتين و تم عرض فاعلية الربط بين الطريقتين عن طريق دراسة جائز فولاذي يحوي شقاً في المنتصف .

تمّ نمذجة جائز فولاذي يحوي شقاً في المنتصف و خاضع لحمل دوري نبضي ونفذت الدراسة على برنامج ANSYS Workbench حيث تمّ تغير كل من عمق الشق و زاوية الشق و استخدمت نتائج العناصر المنتهية في تدريب الشبكات العصبونية .

تمّ الوصول إلى نموذج شبكة عصبونية صناعية قادرة على حساب العمر التعبي مع فروقات صغيرة مقارنة مع نموذج العناصر المنتهية .

Abstract:

The fatigue has considered as the major factor to failure trucks, ships, aircraft suites, turbines, nuclear reactors and every machine components that have subjected to periodic load. So in the recent years the fatigue has become the mean research topics because it has an effect on technological development of industry. And it has become necessary to develop new methods to predict fatigue life for machine elements quickly and effectiveness by using computer cababilities, modeling and simulation software, which can give a perception of components behavior under the effect of periodic load, and give a precise predict about the period of time to the range of standing these components to the load before the failure, without need the real expensive tests, which need time and effort.

In this study, it has presented a new method to predict fatigue life by connected the finite element and artificial neural network, in order to find the optimal model for predicting fatigue life by using the advantages of two methods, by studying a notched cantilever beam.

The fatigue analysis of a notched cantilever beam is carried out using Ansys Workbench. The loading is assumed to be zero based. The effects of notch size and fatigue load are analyzed. And the results from finite element analysis are using to train artificial neural network.

The artificial neural network model is obtained, which can estimate fatigue life with low differences between finite element results.

الفصل الأول

التعب

مقدمة:

التعب هو الانهيار المفاجئ للعناصر الهندسية المعرضة لأحمال متكررة في أثناء التشغيل بعد العديد من دورات التحميل. ويعرف التعب أيضاً على أنه التشوه البنيوي المتدرج، والمركز الذي يحدث عندما تتعرض المادة إلى حمل دوري ومتكرر، وتكون قيم الإجهاد الأعظمي أقل من حد متانة الشد العادي، وقد يكون أيضاً أقل من حد إجهاد الخضوع للمادة.

وموضوع التعب ذو أهمية قصوى في المجال الهندسي، حيث يجب أن تتوفر في المنشآت الهندسية الشروط الثلاثة الآتية:

١- تؤدي عملها المطلوب.

٢- تؤدي عملها بتكاليف معتدلة.

٣- أن يكون لها مدة تشغيل مناسبة.

ويُراعى عند التصميم هما الشرطان الأولان، أما الشرط الثالث، وهو مدة التشغيل المناسبة فيراعى بطرق تقريبية. ويُعدّ التحميل المتكرر ذا أهمية كبيرة في المجالات الهندسية، إذ قد تتحمل المادة إجهاداً معيناً إذا كان التحميل ستاتيكيّاً، بينما تنهار المادة بتأثير الحمل نفسه إذا كان متكرراً. لذلك فإن الإجهاد الأقصى المتكرر الذي تتحمّله المادة من دون حدوث الانهيار هو أقل من الإجهاد الأقصى في حالة التحميل الإستاتيكي لمرة واحدة. وفي حالة الأحمال المتكررة تتوقف خواص مقاومة المادة على مقدار الإجهادات المتكررة، ونوعها وعلى عدد مرات تكرارها. والإجهادات المتكررة تؤدي إلى نتائج خطيرة في المواد المعرضة لها. وتمثل الكسور بسبب الإجهادات المتكررة حوالي ٩٠ % من أسباب الانهيار في أجزاء الآلات. وهذا النوع من الإجهادات يسبب الانهيار على الرغم من أنه أقل من إجهاد حد المرونة. لذلك فإنه لا يحدث في المادة قبل انهيارها الظواهر العادية نفسها التي تحدث في حالة التحميل الستاتيكي، مثل الخضوع أو التشكل اللدن، ويكون الكسر من النوع القصيف، بينما المادة أصلاً مادة معدنية مطيلة، ولذلك فإن الكسر يقع بصورة فجائية من دون إنذار.

يحدث التعب المتكرر أو الدوري في كثير من الحالات منها:

1- أسنان المسننات.

2- الضواغط: الأجهزة التي تستخدم في تشكيل المادة عند التصنيع.

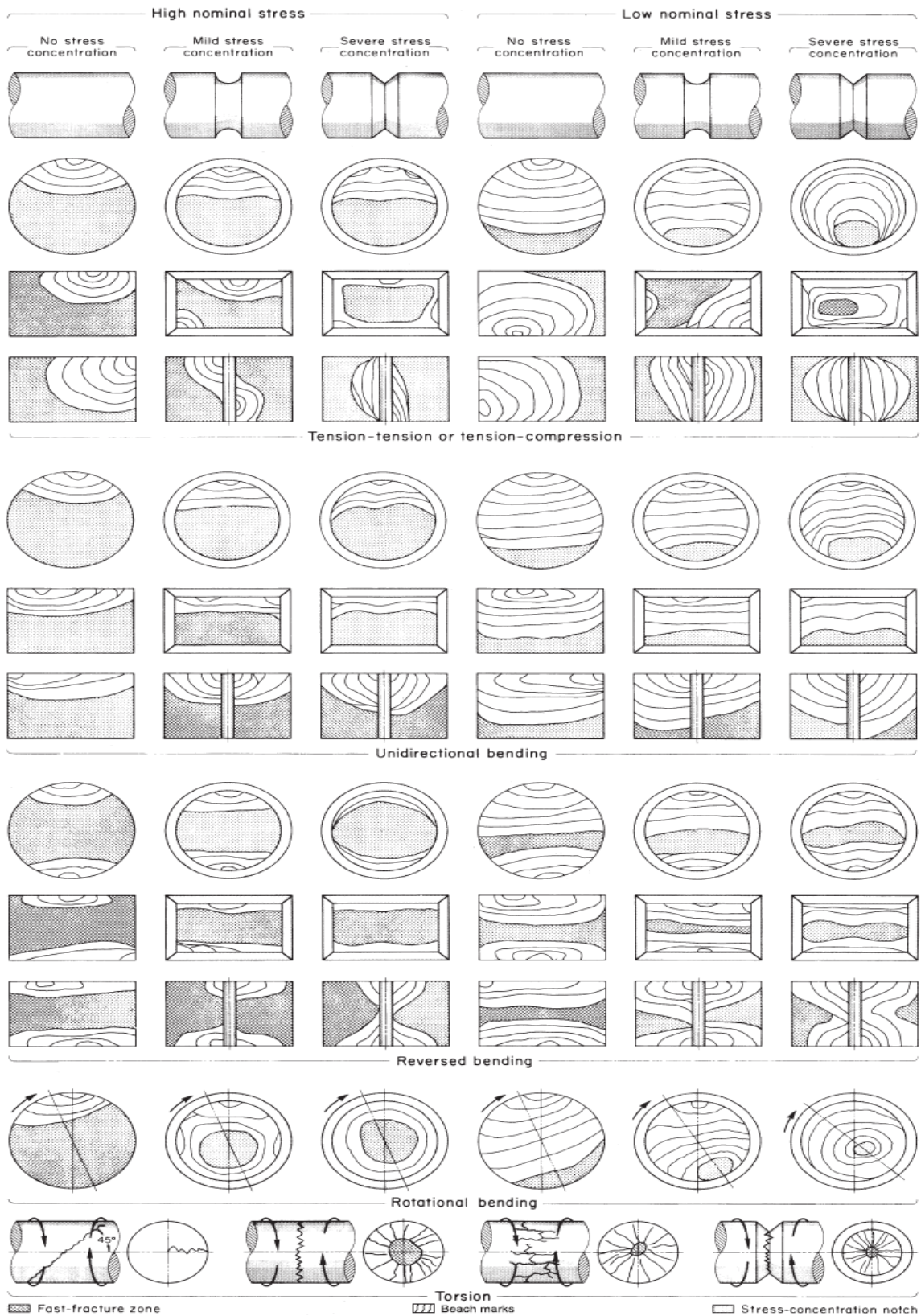
3-الطائرات: يتغير الإجهاد الحراري نتيجة تغير الحرارة بين الأرض والجو.



الشكل (1) الانهيار التعبى لعمود تدوير مرفقي.



الشكل (2) الانهيار التعبى لبرغي.



الشكل (3) أشكال سطوح التحطم التعبى الناتج في قطع ملساء ومحرزوة وذات مقاطع مستطيلة ودائرية محملة تحت شروط تحميل مختلفة .

1.1 الملحة تاريخية عن التعب:

1.1.1 بداية 1800:

تمّ طرح كلمة تعب في القرن التاسع عشر للتعبير عن الانهيارات الناتجة عن الإجهادات المتكررة والتي تكون هذه الإجهادات أقل من إجهاد الخضوع . يعد السبب الأساسي الأول لدراسة الانهيار الناتج عن الإجهادات المتكررة هو صناعة سكك الحديد في القرن التاسع عشر, حيث وجد أن محاور سكك الحديد تنهار بشكل منتظم عند الأكتاف.

قدم Wohler خلال الفترة في آب بين 1850 و 1860 مفهوم حد التعب ,ونفذ أول بحث مخبري منهجي لاختبار التعب تحت تأثير الإجهاد المتكرر. سمي Wohler "والد" اختبار التعب المنهجي. وقام برسم مخطط الإجهاد مقابل عدد مرات التحميل (S- N) و أظهر كيف يتناقص العمر التعبّي مع ساعات إجهاد مرتفعة و أنه تحت سعة إجهاد محددة لا تنهار عينات الاختبار. و أشار أن مجال الإجهاد أهم من الإجهاد الأعظم بالنسبة للتعب.

خلال الفترة بين 1870 و 1890 برهن باحثون مختلفون عمل Wohler, وقاموا بتوسيعته. بحث Gerber وآخرون تأثير الإجهاد الوسطي, واقترح Goodman نظرية مبسطة حول الإجهادات الوسطية. وأسماء هؤلاء الباحثين مازالت مرتبطة بمخططات تتضمن الإجهادات الوسطية والمتغيرة. أظهر Bauschinger عام 1886 أن متانة الخضوع في حالة الشد أو الضغط تتناقصت بعد تطبيق حمل بإشارة معاكسة وسبب ذلك حدوث تشوه غير مرن , وكان هذا أول اشارة إلى أن انعكاس وحيد في الانفعال غير المرن يمكن أن يغير في سلوك إجهاد-انفعال للمعادن . وكانت هذه النتائج هي السبب في فهم التحميل الخفيف والتحميل القاسي للمعادن.

1.1.2 بداية 1900:

في بداية القرن العشرين استخدم كلٌ من Ewing and Humfrey المجهر الضوئي لتعقب دراسة ميكانيزم التعب ، ولوحظ أن خطوط الانزلاق و قيود الانزلاق أدت إلى تشكيل الشقوق الميكروية. أظهر Basquin عام 1910 أنه يمكن تمثيل تغير الإجهاد مقابل عدد دورات الانهيار (S-N) في منطقة محدودة بعلاقة خطية لوغاريتمية $\log-\log$. هذه العلاقة رغم أنها عدلت من قبل آخرين بدأت تُستخدم لتمثيل سلوك التعب لعمر محدود.

في العام 1920 أسهم Gough ومساعدوه في فهم ميكانيزم التعب حيث ناقشوا تأثيرات دمج الانحناء والقتل (التعب متعدد المحاور) ، ونشر Gough عام 1924 كتاباً شاملاً عن تعب المعادن. نشر أيضاً Moore and Kommers عام 1927 أول كتاب أمريكي شامل عن تعب المعادن.

نشر Griffith عام 1920 نتائج حساباته النظرية والتجريبية على التصدع الهش باستخدام الزجاج. حيث وجد أن متانة الزجاج تعتمد على حجم الشقوق الميكروية. إذا كان S الإجهاد الاسمي عند التصدع و "a" هو مقياس الشق عند التصدع عندها تكون العلاقة $S\sqrt{a} = \text{constant}$. وبهذا العمل الكلاسيكي الرائد عن أهمية الشقوق يكون Griffith طور أسس ميكانيك التصدع ولذلك أصبح " الأب المبكر " لميكانيزم التصدع.

طور Palmgren عام 1924 نموذج تحطم تراكمي لساعات تحميل مختلفة ، وأسس لاستخدام B_{10} العمر التعبى المعتمد على التشتت الاحصائي في تصميم المحامل الكروية. نفذ McAdam عام 1920 دراسات واسعة للتآكل التعبى والتي أظهرت تراجعاً مهماً في مقاومة التعب في محاليل مياه مختلفة. وكانت هذه التراجعات واضحة في الفولاذ عالي المتانة.

قدم Haigh بين العام 1929-1930 شرحاً منطقياً للاختلاف في استجابة الفولاذ عالي المتانة و الفولاذ متوسط المتانة على التعب وذلك عند وجود حروز. حيث استخدم مفاهيم تحليل الانفعال عند رأس الحز و الإجهادات المتبقية والتي طورت لاحقاً من قبل آخرين.

خلال العام 1930 تمّ إنجاز تقدم عملي مهم عن طريق إدخال التقسية باستخدام الكرات الفولاذية في صناعة وسائل النقل. وأصبح الانهيار التعبّي للنوابض والمحاور، والذي كان من المشاكل الشائعة، نادراً فيما بعد.

أوضح Almen بشكل صحيح التطور الكبير لإجهادات الضغط المتبقية الناتجة في الطبقات السطحية للأجزاء المقساء و عزز استخدام التقسية والعمليات التكنولوجية الأخرى التي تنتج إجهادات متبقية مفيدة. و أظهر Horger أنه يمكن أن تمنع الدفلة السطحية نمو الشقوق.

قدم Neuber عام 1937 تأثيرات ميل الاجهاد على الحزوز، وأظهر أن متوسط الإجهاد ضمن حجم صغير والمطبق على جذر الحز أهم من الإجهاد الموجود على رأس الحز.

أكد Gassner عام 1939 أهمية الاختبارات المتغيرة السعة، وعزز استخدام أجهزة الاختبار ثمانية الخطوات لمحاكاة الأحمال الحقيقية. وأصبحت الاختبارات شائعة عندما أصبحت أنظمة الاختبار الإلكتروهيوليكية ذات الحلقة المغلقة متوفرة، وذلك في نهاية الخمسينيات و بداية الستينيات.

1.1.3 منتصف 1900:

خلال الحرب العالمية الثانية أصبح شائعاً استخدام إجهادات ضغط متبقية في تصميم محركات الطائرات و العربات المدرعة. أدت التحطّات الهشة في الوصلات اللحامية لسفن النقل إلى تحرك جهود كبيرة و التفكير الجدي في العيوب التي تشكل الشقوق وتأثير تركّز الإجهادات. بدأت العديد من هذه التصدعات الهشة في الزوايا المفتوحة أو الزوايا المقطوعة والوصلات اللحامية، وكانت الحلول لتفادي التصدعات بهذه المناطق بتدوير الزوايا و تقويتها، وإضافة موقوفات لتثبيت الشقوق و مراعاة خواص المواد.

صاغ Miner عام 1945 معياراً للتحطم التعبّي التراكمي الخطي والمقترح من قبل Palmgren في عام 1924. يعرف هذا المعيار الآن بقاعدة Palmgren-Miner للتحطم

الخطي. وتستخدم هذه القاعدة بشكل واسع في التصميم التعبي وبالرغم من عيوب هذه القاعدة إلا أنها تعد أداة مهمة في حسابات العمر التعبي.

شكلت الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM) لجنة E09 للتعب في عام 1946 وكان Peterson أول رئيس لها حيث قامت هذه اللجنة بوضع ستاندرات لاختبار التعب والأبحاث. أكد Peterson أن عامل شق التعب K هو تابع لعامل تركيز الإجهادات النظري K_t ، وللشكل الهندسي للقطعة أو الحز ، و للإجهاد الأعظمي على الشد. نشر Peterson كتاباً موسعاً عن عوامل تركيز الإجهادات عام 1953 وقدم نسخة موسعة منه عام 1974.

بدأت طائرة الكومت و هي أول طائرة ركاب نفائثة العمل في أيار عام 1952 بعد أكثر من 300 ساعة اختبار طيران وبعد أربعة أيام من الفحص تحطمت واحدة من هذه الطائرات فوق البحر المتوسط في كانون الثاني عام 1953 و بعد تجميع أجزاء حطام الطائرة وإجراء تحقيق موسع واختبارات على أجزاء الطائرة استنتج أن السبب الرئيس للحادث هو التحطم التعبي لحجرة الطائرة. حيث تبين أن الشقوق الصغيرة تشكلت بالأساس في الزوايا المفتوحة لهيكل الطائرة. بعد ذلك تحطمت طائرة أخرى من طائرات الكومت .

قام قسم الاختبار في أيلول عام 1953 بضغط حجرة الطائرة 18000 مرة حتى الضغط 57Kpa و قاموا بإعادة هذا الاختبار 30 فترة اضافية عند قيم ضغط تتراوح بين 70 إلى 110Kpa و كانت قيمة الإجهاد التصميمي 40% من قيمة حد المتانة على الشد لخليطة الألمنيوم عند الضغط 57Kpa . وضعت كل الطائرات الكومت من هذا النوع خارج الخدمة وتم التركيز الإهتمام على تصميم جسم الطائرة على التعب. بعد فترة قصيرة من ذلك تم التركيز في تصميم الطائرات على طريقة الانهيار - الأمن fail-safe أكثر من طريقة العمر - الأمن safe-life في الولايات المتحدة الأمريكية وأخذ ذلك حيث حيز كبير أيضاً في الصيانة والفحص.

تضمن الإسهام الأساسي في مجال تطبيق حمولات التعب في عام 1950 إدخال أنظمة اختبار سيرفو هيدروليك ذات حلقة مغلقة والذي سمح بإجراء محاكاة أفضل للحمل على العينات و الأجزاء وكل النظام الميكانيكي. فتح أيضاً المجهر الإلكتروني آفاقاً جديدة لفهم أفضل لميكانيزم التعب.

قدم Irwin عامل كثافة الإجهاد K_I والذي عُدَّ كأساس لميكانيك التشقق المرن الخطي (LEFM) و لحسابات عمر نمو الشق التعبي. ابتكر Irwin مصطلح "ميكانيك التشقق" وبسبب إسهامته الهامة في هذا الموضوع عُدَّ أنه "الأب الحديث لميكانيك التشقق".

أعطى توزيع Weibull بارامترين وثلاثة بارامترات للتوزيع الإحصائي لتحليل واختبار العمر التعبى الإحتمالي.

في بداية الستينيات أصبح سلوك التعب الناتج من عدد منخفض من دورات التحميل وبانفعال متحكم به مع علاقة Manson-Coffin التي تربط سعة الانفعال اللدن بالعمر التعبى من الإنجازات البارزة، حيث أنجزت هذه الأفكار من قبل Topper and Morrow، وتطوير كل من قاعدة Neuber وحساب التدفق المطري من قبل Matsuishi and Endo في 1968 الأسس في تحليل التعب الانفعالي في الحز .

تُعَدُّ اللجنة الخاصة لمجموعة ASTM لاختبار التشقق للفولاذ عالي المتانة في بداية الستينيات هي نقطة البداية لتشكيل لجنة E-24ASTM لاختبار التشقق في عام 1964. أسهمت هذه اللجنة بشكل ملحوظ في مجال ميكانيك التشقق ونمو شقوق التعب وقد دمجت هذه اللجنة مع لجنة ASTM E-09 في عام 1993 لتشكيل لجنة E-08 للتعب والتشقق.

أظهر Paris في بداية الستينيات معدل نمو الشق التعبى (da/dN) الذي يمكن أن يكون أفضل وصف لمجال عامل كثافة الإجهاد ΔK_I . في نهاية الستينيات نُسب التحطم الكارثي لطائرات F-111 للتشقق الهش، وذلك بسبب وجود عيوب سابقة. وضعت هذه الانهيارات بالإضافة لمشاكل التعب في سلاح الجو الأمريكي الأساس لاستخدام مفهوم ميكانيك التشقق

في برنامج تطوير قاذفات القنابل B-1 في عام 1970. تضمن هذا البرنامج اعتبار عمر نمو الشق التعب كأساس لكشف الحجم الأولي للشق.

أكد Schijves في بداية الستينيات على ضرورة اختبار الطائرات على نمو الشق التعب عند ساعات متغيرة مع التأكيد على أهمية زيادة حمل الشد، وذلك في حال وجود شقوق والذي يسبب تأخراً هاماً في نمو الشق التعب.

في عام 1967 انهار جسر Point Pleasant Bridge في غرب فرجينيا من دون أي انذار، و أظهرت التحقيقات الموسعة عن الانهيار أن سبب الشق التصدعي في منتصف القضيب هو نمو العيوب إلى الحجم الحرج . حيث أن العيب الأولي هو نتيجة التعب و الشقوق الناتجة عن التآكل الإجهادي و/أو تآكل التعب.

أثبت Elber في عام 1970 أهمية الشق المغلق في نمو الشق التعب، و طور نموذجاً كمياً يُظهر فيه أنه يتم التحكم بنمو الشق التعب بواسطة مجال عامل كثافة الإجهاد الفعال أكثر من مجال عامل كثافة الإجهاد المطبق. يستخدم نموذج الشق التعب المغلق بشكل شائع في الحسابات الحالية في نمو الشق التعب.

أثبت Paris في 1970 أنه يمكن الحصول على عتبة عامل كثافة الإجهاد والتي لا يحدث عندها نمو للشق التعب. و خلال السبعينيات تضافرت العديد من الجهود العالمية لصياغة العديد من ستاندرات لمجال أحمال الطائرات والمنشآت البحرية والمركبات الأرضية. استخدمت هذه الستاندرات من قبل العديد من المهندسين في تطبيقات متنوعة.

1.1.4 نهاية 1900:

بحث العديد من الباحثين خلال فترة الثمانينيات والتسعينيات في المسائل المعقدة للتعب متعدد المحاور ضمن الطور وخارج الطور. واقترحت طريقة السطح الحرج من قبل Brown and Miner والتي أثارت فلسفة جديدة تتعلق بهذه المسائل ووطورت أيضاً العديد من النماذج الإضافية لسطح الحرج.

لوحظت مشكلة الشق الصغير خلال تلك الفترة وحاول العديد من الباحثين فهم السلوك. تعتبر مشكلة الشق الصغير معقدة ومهمة بسبب أن هذه الشقوق تنمو بسرعة أكثر من الشقوق الطويلة والمستندة على نفس القوة الدافعة. وازداد التركيز في هذه الفترة على تعب المواد الإلكترونية بالإضافة إلى إجراء أبحاث هامة في التعب الثيرموميكانيك. بدأت المواد المركبة ذات الأساس البروليميري , المعدني, و السيراميكي بالتطور لتدخل في مختلف الصناعات. واستخدمت المواد المركبة ذات الأساس المعدني والبوليميري في صناعة المركبات الفضائية لكنها دخلت أيضاً إلى صناعات أخرى. خلال تلك الفترة صممت العديد من مكونات الطائرة الغالية والمعقدة باستخدام مفهوم تصميم العمر - الأمان والذي بدأ هذا المفهوم بالتقاعد بشكل روتيني مع إمكانية استخدام طرق أمان إضافية . حيث من وجهة نظر التعب يقصد بإلغاء مفهوم العمر - الأمان استخدام تطبيقات الفحص بالاختبارات الاتلافية وميكانيك التصدع في تصميم الطائرة.

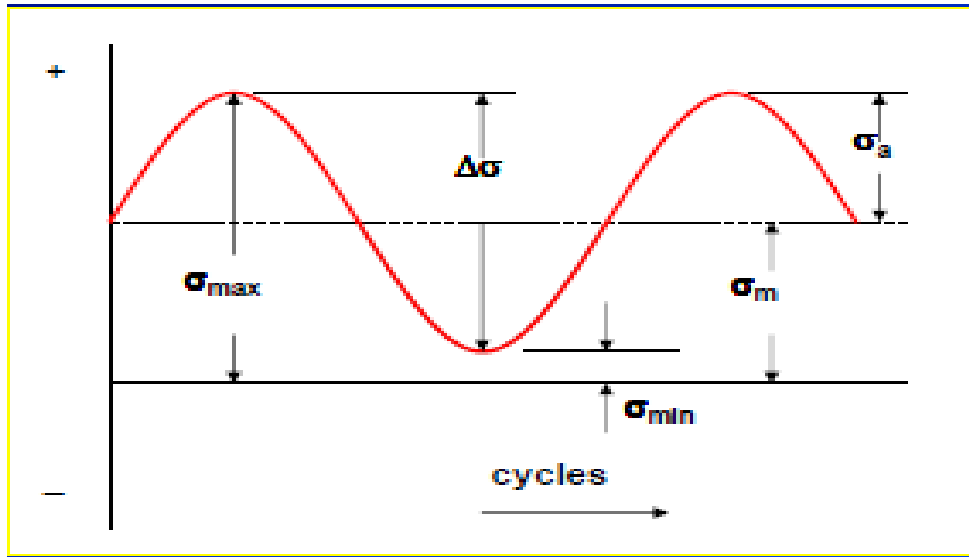
خلق الحادث القاتل للطائرة Aloha Boeing 737 في عام 1988 اهتماماً كبيراً حول التحطم متعدد الموقع (MSD), وضرورة تطوير الصيانة وطرق الفحص الاتلافية حيث يعد كلا من التآكل والتعب التآكلي و الفحص غير الكافي من المسببات الأساسية لمشكلة التحطم المتعدد الموقع (MSD) والموجود في أشكال مختلفة للطائرات. باشرت أبحاث موسعة لفهم هذه المشكلة بشكل أفضل وذلك للحد منها وحلها.

أيضاً بين 1980 و 1990 طرأت تغيرات مهمة في مصطلحات التعب ,حيث يعود ذلك إلى استخدام تقنيات حاسوبية متقدمة. وهذا يتضمن وجود برامج لنماذج مختلفة لحساب العمر التعبي ,وقدرة متقدمة في محاكاة الأحمال الحقيقية في المخبر.

يتضمن دمج تقنيات CAE في دراسة التعب اجراء المحاكاة الديناميكية، والتحليل بطريقة العناصر المنتهية، و ايجاد نماذج لحساب العمر التعبي وهذا كله خلق فكرة اختبار متانة الأجزاء الميكانيكية باستخدام البرامج الحاسوبية و أصبح زيادة النماذج الرقمية مع تقليل من عدد الإختبارات هو هدف القرن الواحد و العشرين[18] .

1.2 دورات التحميل المتكررة:

الحمل المتكرر: هو الحمل الذي يسبب إجهاداً يتكرر عدد من الدورات و تتبدل قيمته بين حد أعظمي وحدّ أصغري ويكون هذا التبدل إما منتظماً أو عشوائياً .
يوضح الشكل (4) تسميات بارامترات الإجهاد في حمل التعب.



الشكل (4) دورة إجهاد التعب.

الإجهاد الأعظم σ_{max}

الإجهاد الأصغري σ_{min}

مجال الإجهاد $\Delta\sigma$ or $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ (range of stress)

سعة الإجهاد الترددي $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (amplitude component)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ (mean stress)}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \text{ (stress ratio) أو تدعى معامل اللاتناسق}$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \text{ (amplitude stress ratio) معامل سعة الإجهاد}$$

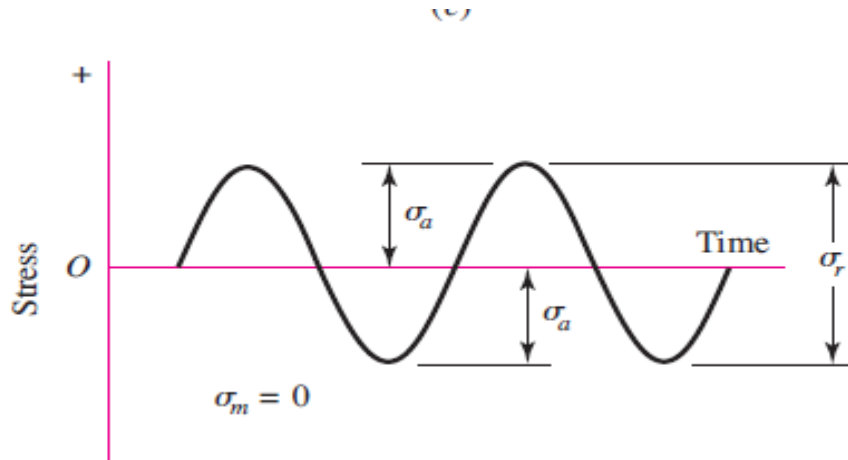
1.2.1 الأشكال المختلفة لترددات الأجهاد:

1.2.1.1 دورة متناسقة: وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى في الشد إلى قيمة قصوى في

الضغط [20]

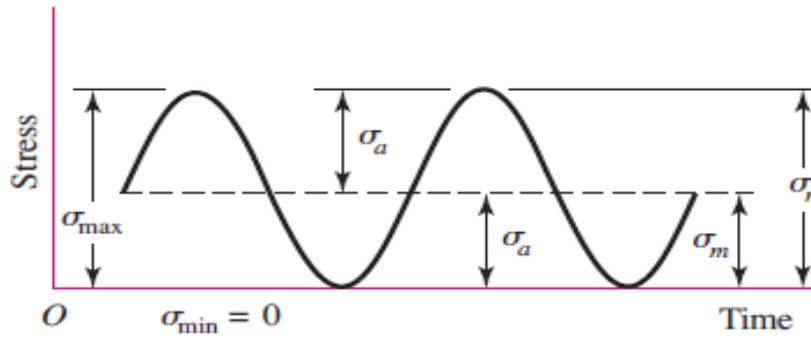
$$\sigma_{max} = -\sigma_{min}$$

$$\sigma_m = 0$$



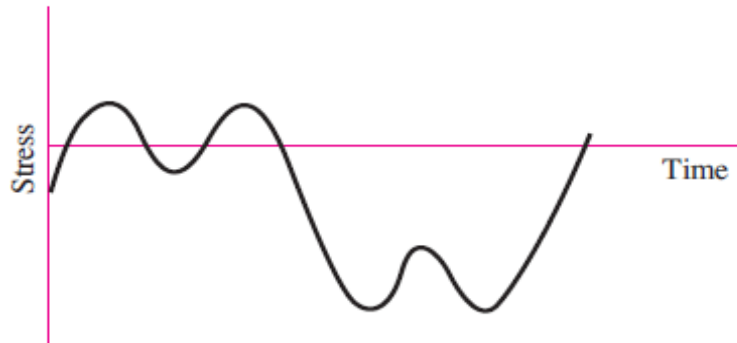
الشكل (5) دورة متناسقة.

1.2.1.2 دورة نبضية: وفيها يكون قيمة الإجهاد الأصغري مساوياً للصفر $\sigma_{\min}=0$ [20]



الشكل (6) دورة إجهاد نبضية.

1.2.1.3 دورة إجهاد عشوائية:



الشكل (7) دورة إجهاد عشوائية.

1.3 طرق حساب العمر التعب:

يوجد ثلاث طرق رئيسة مستخدمة في حساب العمر التعب وتصميمه وتحليله وهي: طريقة إجهاد-عدد دورات، و طريقة انفعال-عدد دورات و طريقة ميكانيك التصدع المرن الخطي . تحاول هذه الطرق حساب العمر عن طريق معرفة عدد دورات الإنهيار N وذلك لمستوى محدد من التحميل. يصنف العمر بشكل عام لعدد الدورات المحصورة $1 \leq N \leq 10^3$ كتعب منخفض عدد الدورات بينما يعد التعب المرتفع عدد الدورات عندما تكون $N \geq 10^3$.

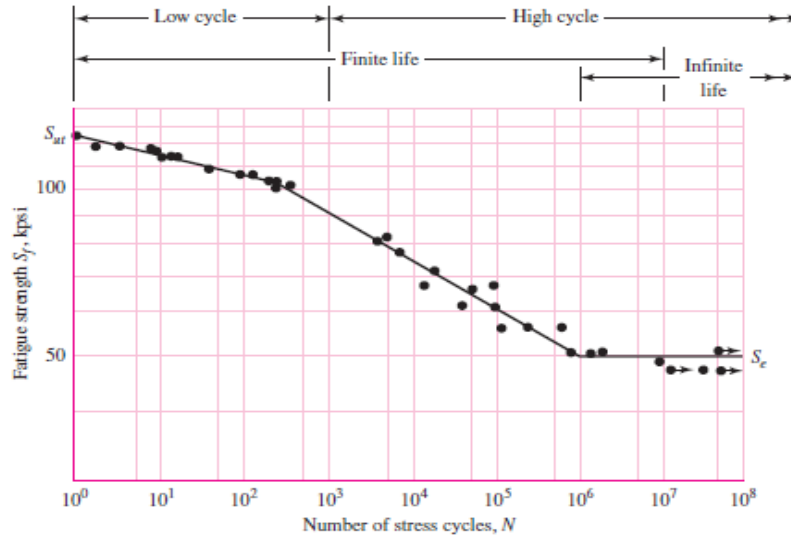
تعد طريقة إجهاد-عدد دورات ، والتي تعتمد على مستويات الإجهاد فقط ، أقل الطرق دقةً وخصوصاً بالنسبة لتطبيقات دورات التحميل ذات العدد المنخفض. لكنها هي أكثر الطرق التقليدية ، وذلك بسبب سهولة تطبيقها على نطاق واسع في تطبيقات التصميم ، ولها أيضاً تجارب كثيرة ، ولأنها تمثل تطبيقات التعب عند عدد دورات مرتفع بشكل كاف.

تتضمن طريقة انفعال-عدد دورات تحليل تفصيلي أكثر للتشوهات اللدنة عند المناطق الموضعية حيث يتم استخدام الإجهادات والانفعالات لحساب العمر التعب. هذه الطريقة بشكل خاص مثالية لتطبيقات التعب عند عدد منخفض من دورات التحميل. عند تطبيق هذه الطريقة يجب اضافة العديد من المفاهيم ، وسوف تخرج أيضاً بعض الشكوك في النتائج ، لهذا السبب سوف تناقش هذه الطريقة فقط لأهميتها في فهم طبيعة التعب.

تفترض طريقة ميكانيك التصدع المرن الخطي أن الشق يظهر ويتم الكشف عنه مباشرة. ومن ثم توظف هذه الطريقة لحساب نمو الشق مع مراعاة كثافة الإجهاد. تعد هذه الطريقة عملية عند تطبيقها على البنى الإنشائية الكبيرة التي سوف يتم حسابها على الحاسب و في برامج الفحص والتفتيش الدورية [20].

1.3.1- طريقة إجهاد-عدد دورات Stress-Life :

لمعرفة متانة المواد تحت تأثير أحمال التعب ، تخضع العينات لقوى متكررة أو متغيرة عند ساعات محددة ، بينما يتم حساب عدد دورات التحميل أو انعكاسات الإجهاد اللازم لانتهاء العينة. لمعرفة متانة المواد يتم إجراء عدد كافٍ من الاختبارات ، وذلك بسبب الطبيعة الإحصائية للتعب. فمثلاً من أجل اختبار الانحناء الدوراني يطبق حمل انحناء ثابت ويتم تسجيل عدد الدورات اللازمة لحدوث الانهيار. يتم إجراء الاختبار الأول عند إجهاد أقل من حد المتانة الأعظم للمادة ومن ثم يجرى الاختبار الثاني عند إجهاد أقل من المستخدم في الاختبار الأول . تستمر هذه العملية وترسم النتائج والتي تعرف بمخطط S-N. يمكن رسم هذا المخطط على ورق لوغاريتمي أو نصف لوغاريتمي. وفي حالة المعادن الحديدية والخلائط يصبح المخطط أفقياً بعد إجهاد المادة لعدد محدد من الدورات يعرف هذا بحد الصمود [20].



الشكل (8) مخطط S-N لفولاذ UNSG41300 .

يعرف المحور y لهذا المخطط بمتانة التعب S_f بينما المحور x يعرف بعدد الدورات N . يمكن رسم مخطط S-N إما لعينات اختبار أو لعناصر ميكانيكية حقيقية وحتى عندما تكون مادة عينات الاختبار هي نفسها مادة العناصر الميكانيكية فإنه سوف يحدث اختلاف بين المخططين.

عند اختبار الفولاذ يحدث تغير في المخطط ووراء هذا التغير لا يحدث انهيار مهما بلغ عدد الدورات يعرف هذا التغير بحد الصمود S_e أو حد التعب.

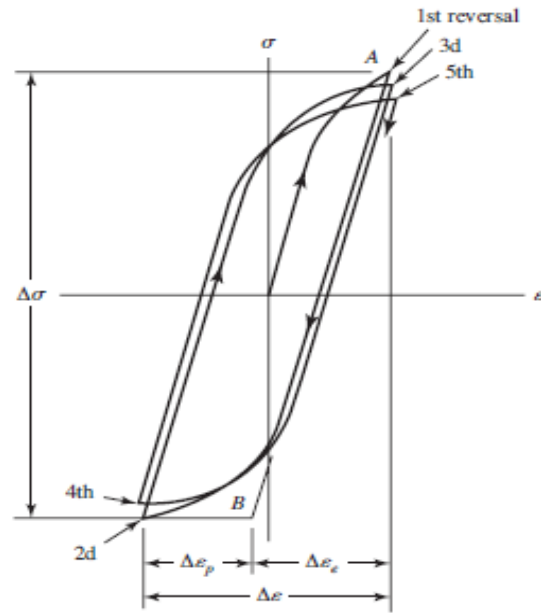
1.3.2 طريقة انفعال-عدد دورات Strain-Life :

تدعى أفضل طريقة تقدم شرحاً لطبيعة الانهيار التعبى بطريقة انفعال-عدد دورات. تستخدم هذه الطريقة لحساب متانة التعب , لكن عند استخدامها من الضروري إضافة العديد المفاهيم , و سوف تكون النتائج التي تم الحصول عليها مشكوكاً بسبب وجود ثوابت ومتغيرات كثيرة , لهذا السبب يتم عرض هذه الطريقة فقط بسبب أهميتها في فهم طبيعة التعب.

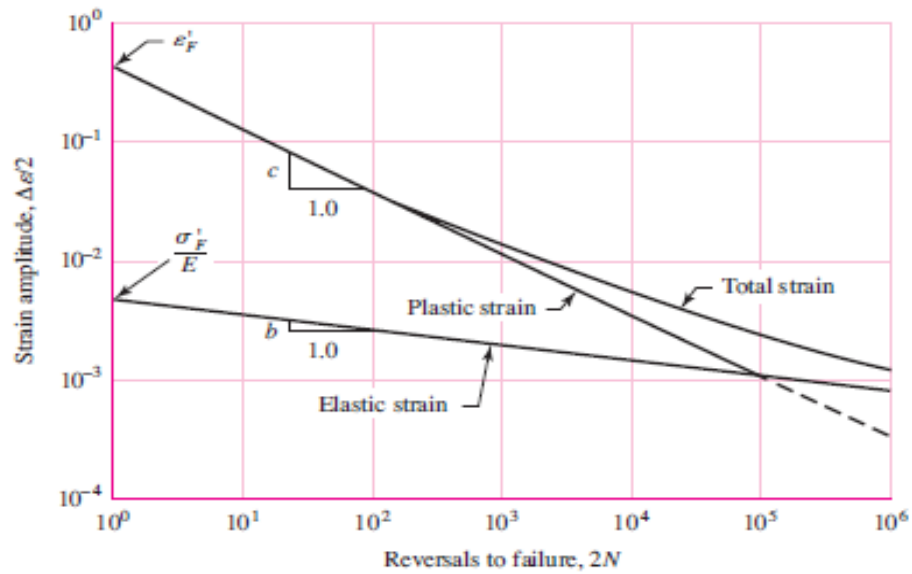
يبدأ الانهيار التعبى في مناطق الإنقطاعات , مثل الحزوز , الشقوق أو بعض مناطق تركيز الإجهادات , و عندما يتجاوز الإجهاد في مناطق الإنقطاعات حد المرونة يحدث الإنفعال اللدن. إذا حدث التصدع التعبى , فإنه لا بد من وجود دورات انفعال لدنة , لذلك من الضروري البحث في سلوك المواد الخاضعة لدورات تشوه.

تحقق Bairstow عام 1910 بالتجربة من نظرية Bauschinger حيث يمكن أن تتغير حدود المرونة للحديد والفولاذ إما أعلى أو أقل باختلاف دورات الإجهاد. بشكل عام حدود المرونة للفولاذ المطاوع تزداد عندما تحمل بدورات اجهاد متناسقة , بينما يتناقص حد المرونة لفولاذ التشكيل على البارد.

بحث R. W. Landgraf بسلوك التعب للدورات ذات العدد المنخفض لأنواع فولاذ مرتفعة المتانة , وصنع من خلال أبحاثه العديد من مخططات دورات اجهاد-انفعال . يظهر الشكل (9) الشكل العام لهذه المخططات وذلك لأول بضع دورات , و لدورات انفعال متحكم به. في هذه الحالة تتناقص المتانة مع تكرار الإجهاد كإثبات على حقيقة أنه تحدث انعكاسات الإجهاد عند مستويات الإجهاد صغيرة. يمكن لبعض المواد أن تزيد متانتها بدلاً من أن تتناقص بسبب دورات الإجهاد المتناسقة [20].



الشكل (9) حلقة إجهاد-انفعال.



الشكل (10) مخطط لوغاريتمي يظهر ارتباط العمر التعبي بسعة الانفعال الحقيقي لفولاذ الدرفلة على الساخن SAE1020.

*شرح للرموز:

معامل ليونة التعب ϵ_f (Fatigue ductility coefficient) هو الانفعال الحقيقي الذي يسبب التصدع في أول دورة إجهاد وهو النقطة التي تبدأ عنده خط الانفعال اللدن في الشكل (10)

معامل متانة التعب α_f (Fatigue strength coefficient) هو الإجهاد الحقيقي الذي يسبب التصدع في أول دورة إجهاد.

أس ليونة التعب c (Fatigue ductility exponent) هو ميل خط الانفعال اللدن في الشكل (10) وهو القوة التي يجب أن يرتفع عندها عدد الدورات $2N$ لتصبح متناسبة من سعة الانفعال اللدن الحقيقي.

أس متانة التعب b (Fatigue strength exponent) وهو ميل خط الانفعال المرن و هو القوة التي يجب عندها أن يرتفع عدد الدورات $2N$ لتصبح متناسبة مع سعة الإجهاد الحقيقي. من الشكل (9) الانفعال الكلي هو مجموع الانفعال المرن واللدن ,لذلك سعة الانفعال الكلي هي نصف مجال الانفعال الكلي.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2}$$

معادلة خط الانفعال اللدن هي:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon_f (2N)^c \quad (1)$$

معادلة خط الانفعال المرن هي:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b \quad (2)$$

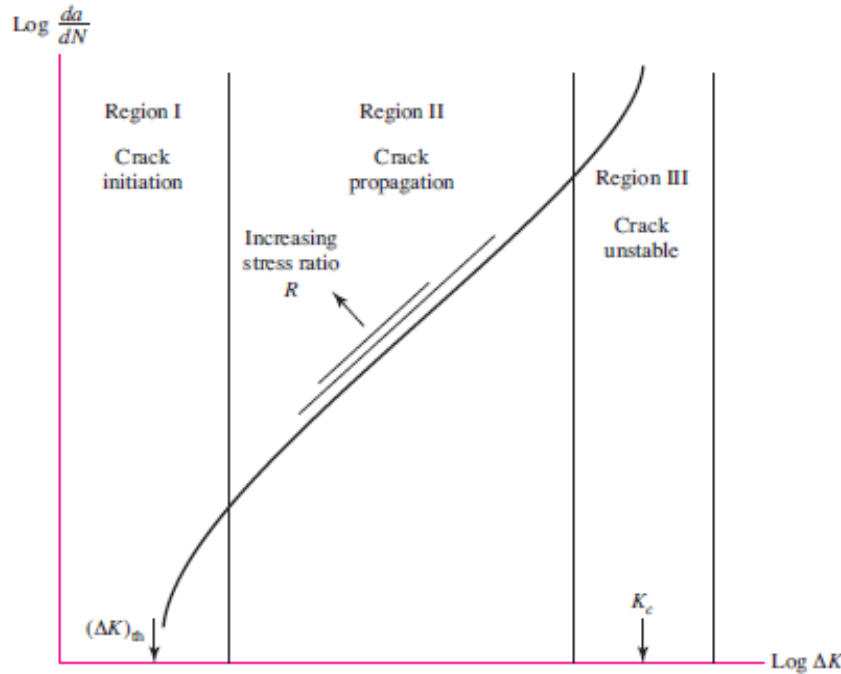
لذلك نجد ان معادلة سعة الانفعال الكلي هي:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b + \epsilon_f (2N)^c \quad (3)$$

وهي علاقة Manson-Coffin بين العمر التعبي والانفعال الكلي [20].

1.3.3 طريقة ميكانيك التصدع المرن الخطي LFM:

يشار إلى الطور الأول للتشقق التعبى بالمرحلة الأولى للتعب، حيث تنزلق البلورات التي تمتد خلال العديد من الحبيبات المتجاورة، والشوائب و سطوح العيوب التي يفترض أن تؤدي دوراً في التشقق التعبى وبسبب أن معظم هذه الشوائب والعيوب غير مرئية، لذلك يمكن القول إنه تتضمن المرحلة الأولى العديد من الحبيبات. يدعى الطور الثاني الذي يمتد فيها الشق بالمرحلة الثانية للتعب. ويحدث في هذه المرحلة تقدم للشق (تشكل منطقة شق جديدة) ويمكن ملاحظته بالمجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني، ويكون نمو الشق منتظماً. يحدث خلال المرحلة الثالثة للتعب التصدع النهائي بالرغم من أن التعب غير موجود في هذه المرحلة. عندما يكون الشق طويلاً بما فيه الكفاية بحيث $K_I = K_{IC}$ من أجل سعة الإجهاد المدروس عندها يكون K_{IC} هو كثافة الإجهاد الحرج للمعادن غير المتحطمة، ومن ثم يحدث وبشكل مفاجئ انهيار كارثي للمقطع المتبقي في حمل الشد العالي. ترتبط المرحلة الثالثة للتعب مع تسارع نمو الشق ومن ثم التصدع [20].



الشكل (11) منحنى انتشار التشقق بدلالة معامل كثافة الإجهاد.

1.4 أنماط التحميل:

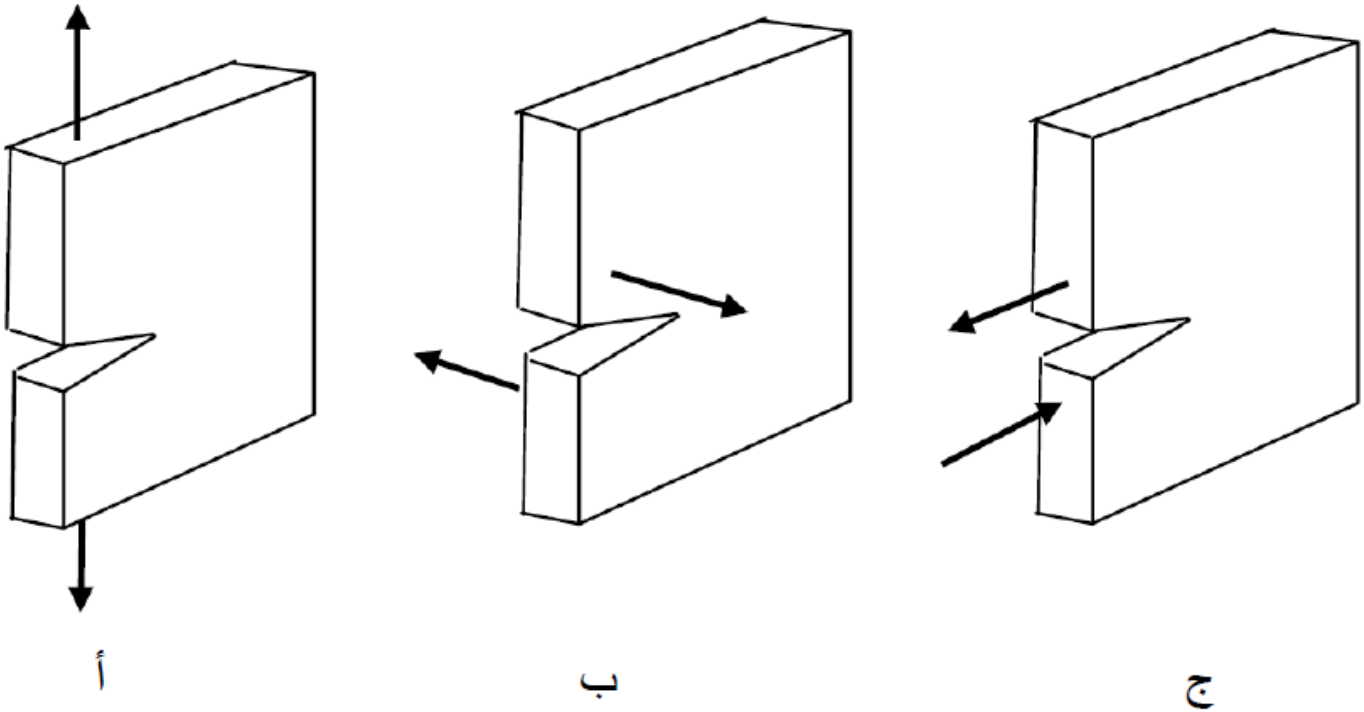
يوجد لدينا ثلاثة أنماط من التحميل وهي ظاهرة في الشكل (12):

- النمط الأول (opening or tensile mode): الشد بالاتجاه النازم على مستوي الشق .

- النمط الثاني (sliding or in-plane shear): القص في مستوي الشق .

- النمط الثالث (tearing or anti-plane shear): القص في مستوي عامودي على مستوي

الشق .



الشكل (12) أنماط التحميل أ) النمط الأول ب) النمط الثاني ج) النمط الثالث.

الفصل الثاني

انهيار العناصر الهندسية

انهيار العناصر الهندسية

لا تصل المواد الهندسية عند اختبارها ضمن المخبر إلى القيمة النظرية للانفعال , لذلك فإن أداء هذه المواد ضمن الخدمة لا يكون كما هو متوقع من المادة , وعليه فإن على المهندسين مراعاة ذلك عند تصميم الأجزاء والقطع الهندسية وذلك للتقليل من احتمال انهيار هذه القطع. لكن, يعتمد مستوى أداء الأجزاء والقطع الهندسية ضمن الخدمة على عوامل عدة, منها خواص المواد, الحمل أو نظام الإجهاد, البيئة والصيانة. تعود أسباب تحطم الأجزاء الهندسية و انهيارها إلى خلل في التصميم, و الاختيار الخاطئ للمواد, و عيوب التصنيع, و تجاوز حدود التصميم, و زيادة التحميل و عدم كفاية الصيانة...إلخ. لذلك يجب على المهندسين التوقع والتخطيط لمنع حدوث الانهيار المحتمل بشكل مسبق. يظهر الشكل(13) انهياراً مفاجئاً لناقلة نفط تحطمت بأسلوب التصدع الهش عن طريق انتشار شقوق في منتصف الناقلة.



الشكل (13) تحطم ناقله نفط بأسلوب الانهيار الهش عن طريق انتشار شقوق حول منتصفها.

2.1 الانهيار الميكانيكي:

الأسباب العادية للانهيار الميكانيكي في القطع أو الأنظمة الهندسية ,هي:

*سوء استخدام.

*أخطاء التجميع.

*عيوب التصنيع.

* عدم كفاية الصيانة أو صيانة غير صحيحة.

*أخطاء التصميم أو خلل في التصميم.

*معالجة حرارية غير مناسبة.

*حالات تشغيل مفاجئة.

*عدم مراعاة شروط الجودة.

*عدم الحماية من الظروف البيئية بشكل كافٍ.

*فجوات الصب.

يتطلب تصميم القطع والأجزاء الهندسية تقليل احتمالية انهيار هذه القطع. إن انهيار المعادن هو موضوع معقد , لذلك لايمكن التعامل معه فقط من وجهة نظر التحطم أو ظواهر أخرى مرتبطة. لذلك من الضروري فهم الأشكال المختلفة للانهيار الميكانيكي ,مثل التصدع , و التعب , و الزحف , و التآكل, و الإحتكاك إلخ.

تتضمن الأشكال المختلفة للانهيار الميكانيكي:

*الانهيار الناتج عن التصدع الناتج من زيادة التحميل الستاتيكي, حيث التصدع يبدأ إما هشاً أو لدناً.

*التواء الأعمدة بسبب زيادة حمل الضغط.

*الخضوع تحت تأثير التحميل الستاتيكي والذي يؤدي إلى اختلال أو زيادة تحميل على الأجزاء الهندسية الأخرى.

*الانهيار الناتج من حمل الصدم أو الصدمة الحرارية.

*الانهيار الناتج من التصدع التعبي.

*انهيار الزحف الناتج من معدل انفعال منخفض عند درجة حرارة مرتفعة.

*الانهيار الناتج من تأثيرات مشتركة للإجهاد والتآكل.

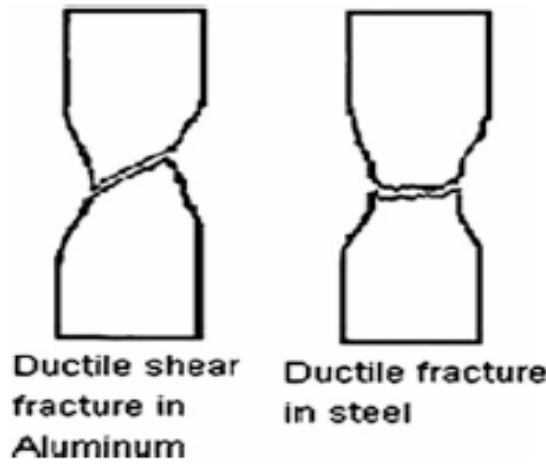
*الانهيار الناتج عن الإحتكاك الزائد.

2.1.1-الانهيار الناتج عن التصدع:

يمكن التعبير عن التصدع بطرق مختلفة , بالإعتماد على سلوك المادة تحت تأثير الإجهاد بالإضافة إلى ميكانيزم التصدع حيث يصنف التصدع إلى تصدع هش وآخر لدن , وذلك اعتماداً فيما إذا كان يوجد تشوه لدن للمادة قبل حدوث الإنهيار الفجائي. و لنقدم وصفاً موجزاً لكلا النوعين من التصدع , فيما يلي:

2.1.1.1التصدع اللدن:

يتميز التصدع اللدن بتمزق في المعدن و حدوث تشوه لدن , و تكون المقاطع التي حدث فيها التصدع ذا لون رمادي وليفية. يساعد على حدوث التصدع اللدن زيادة التحميل على العناصر الهندسية أو وجود انقطاعات كبيرة. يحدث هذا النوع من التصدع نتيجة لوجود خطأ في التصميم, الإختيار الخاطئ للمادة, استخدام تقنيات تصنيع خاطئة أو طرق معالجة خاطئة يظهر الشكل (14) ميزات التصدع اللدن. يحدث للمعادن اللدنة تشوه لدن واضح قبل حدوث التصدع , ويكون شكل مقطع التصدع اللدن مخروطياً أو فنجانياً له فجوات.



الشكل (14) التصدع اللدن في الألمنيوم والفولاذ بعد اختبار الشد.

تصبح الفجوات الموجودة متطاولة نتيجة خضوعها لقوى قص جانبية أو إذا كان الشق من النمط المفتوح. تظهر أنماط التصدع على سطح مقطع التصدع (فجوات، شقوق، أو شقوق على محاذاة حدود الحبيبات) ومن الممكن أن تظهر الأنماط الثلاثة على سطح مقطع التصدع.

2.1.1.2 التصدع الهش:

يتميز التصدع الهش بانتشار الشقوق بسرعة مع تحرير منخفض للطاقة و من بدون حدوث تشوه لدن. يحدث للمعادن الهشة تشوه لدن صغير أو لا يحدث أي تشوه قبل التصدع. تكون سطوح التصدع ذات بريق و سطوحاً مسطحة أو سطوحاً ذات نمط شيفرون ، و تنتج عيوب المواد من الزوايا الحادة أو الحزوز في العناصر الهندسية ، ومن شقوق التعب إلخ. يظهر التصدع الهش إما بشكل (trans granular) أي شق منتشرة ضمن الحبيبات أو شق منتشر على محاذاة حدود الحبيبات (inter granular) وهذا يعتمد على حدود الحبيبات فيما اذا كانت قوية أو ضعيفة بالمقارنة مع الحبيبات الداخلية يحدث هذا النوع من التصدع في المواد غير المعدنية مثل الزجاج ، والأسمنت ، والبلاستيك الحراري. ويحدث في المعادن التصدع الهش بشكل أساسي عندما تحتوي البنية المجهرية للمعادن على مكعبات من نوع BCC و HCP.

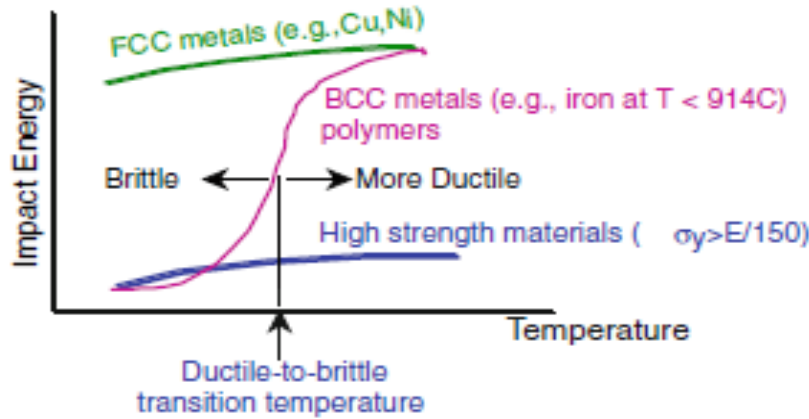
تتمو الشقوق في المواد البوليميرية بشكل مبدئي عن طريق نمو الفراغات على طول منتصف اتجاه النمو لتلتئم بعدها هذه الفراغات مشكلة شقاً يليه نمو فراغات فوق رأس الشق .يظهر سطح هذه المنطقة من التصدع على شكل منطقة خشنة. قبل خضوع المادة والتصاق بعضها ببعض من المحتمل جداً أن تأخذ المادة مظهراً غير واضح ويكون ذلك نتيجة الفراغات صغيرة الموجودة ضمن المادة. تُعدُّ المواد السيراميكية من المواد الهشة سواء كانت زجاجية أو بلورية. و يظهر التصدع في المواد السيراميك على شكل منطقة منعكسة حول الشق الأساسي , وتكون هذه المنطقة بمحاذاة منطقة غير واضحة تحتوي على عدد كبير من الشقوق الميكروية. تمتد المنطقة المنعكسة في بعض الحالات لتشمل السطح كله. يظهر الجدول (2.1) الاختلافات بين التصدع الهش والتصدع اللدن.

التصدع اللدن	التصدع الهش	
التشوه اللدن	واسع	قليل
انتشار التصدع	بطيء	سريع
الشق	مستقر	غير مستقر
اشارات التحذير	قريبة من حدوث التصدع	لايوجد
شكل التصدع	فنجاني ومخروطي	على شكل حرف V أو نمط شيفرون
طاقة الانفعال	عالية	قليلة

الجدول (2.1) الاختلاف بين التصدع الهش والتصدع اللدن.

2.1.1.3 التحول من التصدع الهش إلى التصدع اللدن:

تعد درجة الحرارة التي تعمل ضمنها الأجزاء والعناصر الهندسية من أهم العوامل التي تؤثر في طبيعة التصدع , ويظهر التحول الحاد من التصدع الهش إلى التصدع اللدن في مكعبات المواد المعدنية المتمركزة حجمياً ووجهياً , كما يظهر في الشكل (15)



الشكل (15) منحنى درجة حرارة التحول من لتصدع الهش إلى التصدع اللدن.

2.1.1.4 العوامل المؤثرة على التصدع في المادة:

إن العوامل الرئيسية المؤثرة على التصدع في المادة ,هي:

*تركز الإجهادات.

*سرعة التحميل.

*الحرارة.

*الصدمة الحرارية.

2.1.1.4.1 تركيز الإجهادات:

إحدى الطرق المستخدمة من أجل كسر قطعة صغيرة من المادة هي أحداث حز صغير على سطح المادة ، ومن ثم تطبيق القوة. يمكن أن يحدث وجود حز أو أي تغير مفاجئ في سطح قطعة المادة تغيراً كبيراً في الإجهاد الذي يحدث عنده التصدع. يسبب وجود حز أو تغير مفاجئ في المقطع ما يطلق عليه تركيز إجهادات. يعيق تركيز الإجهادات التوزيع الطبيعي للإجهاد ، وينتج مولدات مساعدة محلية للإجهاد. تعتمد كمية زيادة تركيز الإجهاد على عمق الحز أو التغير في المقطع و نصف قطر رأس الحز. وكلما ازداد عمق الحز ازدادت كمية تركيز الإجهادات ، وكلما قل نصف قطر رأس الحز ازدادت كمية تركيز الإجهادات. وتدعى هذه الزيادة في تركيز الإجهادات بمعامل تركيز الإجهاد.

تملك الشقوق في المواد الهشة رأساً نقطياً ونصف قطر صغير ، وهذا النوع من الشقوق ينتج تركيزاً كبيراً في الإجهادات عند رأس الشق. إحدى الطرق المستخدمة لإعاقة تقدم هذا النوع من الشقوق هو حفر ثقب عند نهاية الشق لزيادة نصف قطر رأسها وبالتالي التقليل من تركيز الإجهادات. أما الشقوق في المواد اللدنة فإنها لا تؤدي إلى انهيار المادة كما في المواد الهشة وذلك لأن تركيز الإجهاد في نهاية الشق يؤدي إلى حدوث تشوه لدن وبالتالي يزداد نصف قطر رأس الحز ، وتكون النتيجة بالتالي تقليل تركيز الإجهادات.

2.1.1.4.2 سرعة التحميل:

من العوامل الأخرى التي ممكن أن تؤثر في تصدع المادة هو سرعة التحميل ، حيث تؤدي الضربة المفاجئة على المادة إلى تصدع المادة ، بينما تطبيق الإجهاد نفسه بسرعة أقل يمكن ألا يؤدي إلى تصدعها. ويؤدي تطبيق معدل عالٍ للإجهاد إلى عدم وجود وقت كافٍ لحدوث التشوه اللدن للمادة تحت الظروف الطبيعية ، وفي هذه الحالة تسلك المادة اللدنة سلوك الحالة الهشة.

2.1.1.4.3 درجة الحرارة:

تؤثر درجة حرارة المادة على سلوكها عند تطبيق الإجهاد . يصبح العديد من المعادن والتي تكون لدنة في درجات الحرارة العالية هشاً عند درجات الحرارة المنخفضة . فعلى سبيل المثال يسلك الفولاذ سلوك المواد اللدنة عند درجات الحرارة التي هي أعلى من 0 بينما عند درجات حرارة أقل يصبح الفولاذ هشاً. تعد درجة حرارة التحول من التصدع الهش إلى التصدع اللدن مهمة لتحديد سلوك المادة في الخدمة . تتأثر درجة حرارة التحول في الفولاذ بعناصر الخلطة في الفولاذ , حيث يقلل المنغنيز والنيكيل درجة حرارة التحول , لذلك من أجل العمل في درجات الحرارة المنخفضة يفضل استخدام خليطة فولاذ بهذه العناصر. أما الكربون , و النتروجين والفوسفور , فهذه العناصر تزيد درجة حرارة التحول من التصدع اللدن إلى الهش لخليطة الفولاذ.

2.1.1.4.4 الصدمات الحرارية:

عند صب الماء الساخن في كأس زجاجي بارد , فإن ذلك يسبب تشقق الزجاج , وهذا يعرف بالصدمة الحرارية. تميل طبقات الزجاج الملامسة للماء الساخن إلى التمدد , لكن يمنعها من ذلك طبقات الزجاج الخارجية الباردة , هذه الطبقات لا تسخن بسرعة , وذلك بسبب الناقلية الحرارية السيئة للزجاج , ونتيجة لذلك يتم التحكم بالإجهادات التي تسبب بشكل كبير انهيار الزجاج الهش.

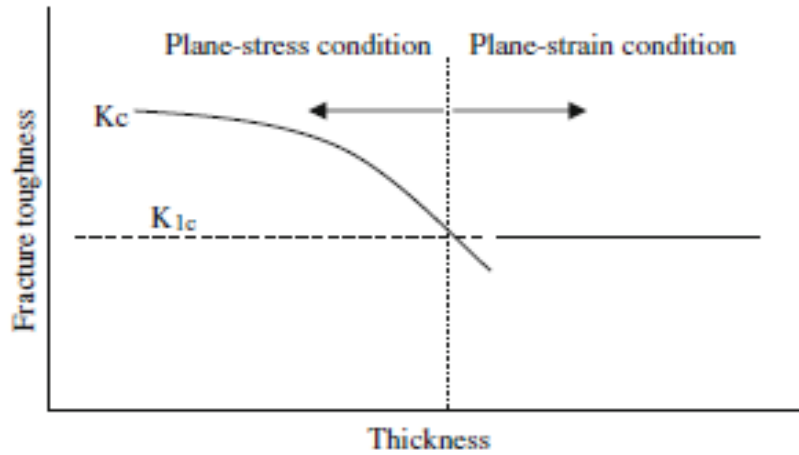
2.1.1.5 نظرية شق غريفت ومقاومة التصدع:

قدم غريفت عام 1920 نظرية تنص على أن كل المواد تحتوي على شقوق صغيرة , لكن هذا الشق لن ينتشر حتى الوصول إلى قيمة محددة للإجهاد وتعتمد هذه القيمة للإجهاد على طول الشق. يعد أي عيب موجود (كيميائي, عدم تجانس, شقوق انخلاعات و الإجهادات المتبقية) كشق غريفت بمعنى يسبب عدم التجانس في بنية المادة حدوث تركيز للإجهادات والذي يمكن أن يتطور إلى الانهيار عند قيمة محددة للإجهاد. يمكن تعريف مقاومة التصدع على أنها قياس قدرة المادة على مقاومة التصدع بمعنى قياس قدرة المادة على مقاومة انتشار الشقوق.

معامل كثافة الإجهاد (SIF) هو طريقة أخرى لإيجاد مقاومة المادة اعتماداً على كثافة الإجهاد عند رأس الشق وقيمة هذا العامل هي القيمة اللازمة لانتشار الشق.

إن عامل تركيز الإجهاد K_I (من أجل نموذج التحميل I) هو نسبة الإجهاد الأعظمي في المنطقة المجاورة للحز، أو الشق أو التغير في المقطع إلى الإجهاد المطبق عن بعد. يستخدم عامل تركيز الإجهاد K_I لتحديد مقاومة التصدع لمعظم المواد ، وهو قياس لتركيز الإجهادات على مقدمة الشق تحت تأثير بعض الإعتبارات.

يحدث التصدع الخطير عندما تصل قيمة معامل كثافة الإجهاد SIF إلى القيمة الحرجة والتي ترمز ب K_c . إن العلاقة بين K_I و K_c شبيهة بالعلاقة بين متانة الخضوع ومتانة الشد مع الفرق أن قيمة K_c أكبر من قيمة K_I , لذلك يُعدّ K_c هو القيمة العظمى الذي يمكن أن تتحملها المادة دون حدوث تصدع نهائي , و يعتمد K_c على كل من نوع المادة و ثخانتها. كلما قلت قيمة المعامل K_c قلت صلابة المادة. إن معامل كثافة الإجهاد الحرج K_c هو تابع للمادة و ثخانة اللوح المصنوع من هذه المادة حيث ينتج معامل الثخانة من شكل انتشار الشق ويتأثر انتشار الشق بمقدار ثخانة الصفيحة. يظهر الشكل (16) تأثير الثخانة على قيمة معامل كثافة الإجهاد الحرج.



الشكل (16) سلوك مقاومة التصدع : تأثير سماكة المادة.

في السماكات الكبيرة، تكون مساحة الجزء المتصدع الذي تعرض للقص صغيرة ، وتبدأ معظم التصدعات سطحية و بالزوايا اليمنى لقوى الشد. تدعى هذه القيمة الحدية الصغرى لمعامل

كثافة الإجهاد بمقاومة التصدع للانفعال السطحي وترمز بالرمز K_{1c} , وهذا المعامل له علاقة فقط بخواص المادة. تستخدم هذه القيمة بشكل شائع في التصميم , لكن من أجل الصفائح الرقيقة تصبح قيمة معامل كثافة الإجهاد الحرج صغيرة وبالتالي يستخدم معامل أمان. حيث تعني القيمة الصغيرة K_{1c} مقاومة قليلة للمادة المفروضة. يظهر الجدول (2.2) الاختلاف بين معامل كثافة الإجهاد (SIF) ومقاومة التصدع (FT).

معامل كثافة الإجهاد	مقاومة التصدع
*معامل كثافة الإجهاد هو طريقة أخرى للتعبير عن صلابة المادة , وهو يعبر عن معامل كثافة الإجهاد عند رأس الشق اللازم لانتشار لشق.	*تعرف مقاومة التصدع على أنها قياس لمقاومة المادة للتصدع.
*تتهار المادة عند الإجهاد الأعظم.	*كلما ازدادت سماكة المادة , فإن مقاومة التصدع تتناقص حتى تصل لقيمة ثابتة.
*يستخدم معامل كثافة K الإجهاد للتعبير عن متانة التصدع لمعظم المواد , وهو عبارة عن قياس لمقدار تركيز الإجهادات عند رأس الشق تحت تأثير بعض الاعتبارات	*مقاومة التصدع هو قياس لقدرة المادة على مقاومة انتشار الشقوق.
*في المواد التي تحتوي على عيوب فإنه بمجرد تطبيق الإجهاد سوف ينتشر الشق.	*تعتمد مقاومة التصدع على الشكل الهندسي للمادة وخواصها.

الجدول (2.2) الاختلاف بين معامل كثافة الإجهاد ومقاومة التصدع.

2.1.1.5.1 العوامل المؤثرة على مقاومة التصدع:

إن العوامل المؤثرة على مقاومة التصدع هي:

2.1.1.5.1.1 مركبات المادة:

تمتلك العناصر المختلفة للخليطة مقاومات مختلفة للتصدع. فعلى سبيل المثال تمتلك العديد من خلائط الألمنيوم قيماً منخفضة لمقاومة الانفعال السطحية بالمقارنة مع الفولاذ. يوجد ضمن كل

خليطة معدنية بعض العناصر التي تعمل على تقليل الصلابة بشكل ملحوظ ,على سبيل المثال: الفوسفور و الكبريت في الفولاذ.

1.5.1.2 المعالجة الحرارية:

تؤثر المعالجة الحرارية بشكل ملحوظ على مقاومة التصدع للمادة , فعلى سبيل المثال تتأثر مقاومة الفولاذ عن طريق التغير في درجة حرارة سقاية الفولاذ.

1.5.1.3 ظروف التشغيل:

تؤثر ظروف التشغيل مثل الحرارة , التآكل و الاهتزاز على مقاومة التصدع.

2.1.6 الانهيار الناتج عن التعب:

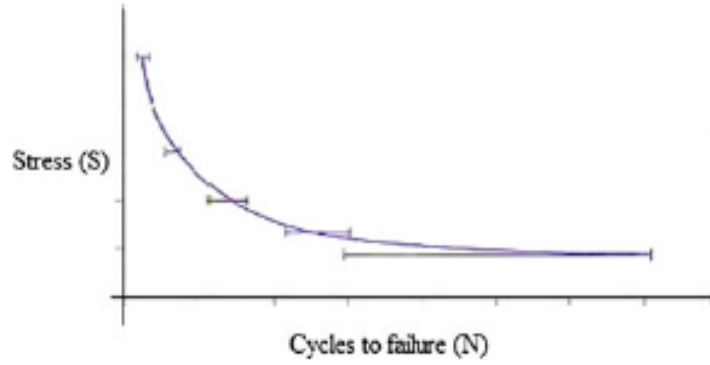
يحدث تعب المعادن بسبب دورات تحميل متكررة , و هو عبارة عن انتشار محلي للتحطم الناتج عن تغير الإجهادات و الانفعالات في المادة. تبدأ الشقوق التعبية في المعادن , وتنتشر في المنطقة التي يكون فيها الانفعال أخطر ما يمكن . يظهر الشكل (17) منحنى S-N لمتانة التعب في المعدن.

تتألف عملية التعب من ثلاث مراحل:

*تشكل شقوق ابتدائية.

*نمو مستمر للشقوق خلال القطعة.

*حدوث تصدع مفاجئ في المقطع العرضي.



الشكل (17) مخطط لمنحني S-N يظهر ازدياد العمر التعبي وذلك بإنقاص الإجهادات.

2.1.1.6.1 منع حدوث الانهيار التعبي:

الطريقة الأكثر فاعلية في تحسين الأداء التعبي هي عن طريق تحسين التصميم . خطوات التصميم التالية هي فاعلة في التحكم أو منع حدوث الإنهيار التعبي:

*التقليل من ازدياد الإجهادات أو إزالتها عن طريق تبسيط شكل القطعة أو العنصر الهندسي.

*تجنب السطوح الحادة الممزقة الناتجة عن التثقيب, و الختم, و القص أو عمليات أخرى.

*منع تطور انقطاعات السطوح خلال عمليات التشغيل.

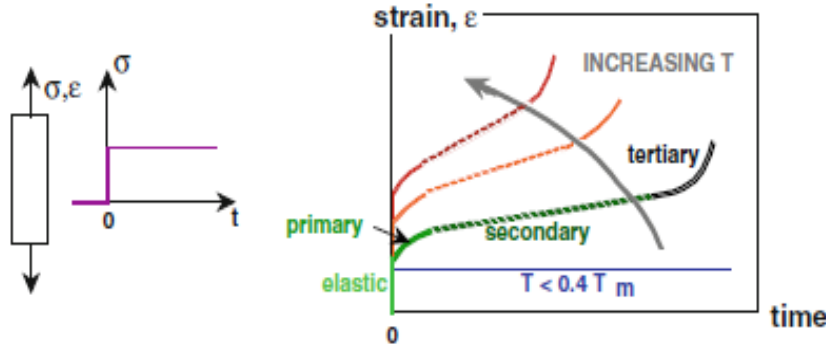
*التقليل من إجهادات الشد المتبقية الناتجة من التصنيع.

*تطوير اجراءات التصنيع و التثبيت.

2.7 الانهيار الناتج عن الزحف:

يحدث الزحف تحت تأثير حمل محدد عند درجة حرارة عالية تكون فوق 40% من درجة حرارة انصهار المادة. و بعض الأمثلة عن العناصر الهندسية التي تتعرض لظاهرة الزحف هي المراحل ,المحركات التوربينية التي تعمل بواسطة الغاز والأفران. إن فهم سلوك المادة عند درجات الحرارة العالية مفيد في عميلة تقييم انهيار العناصر الهندسية الناتج عن الزحف.

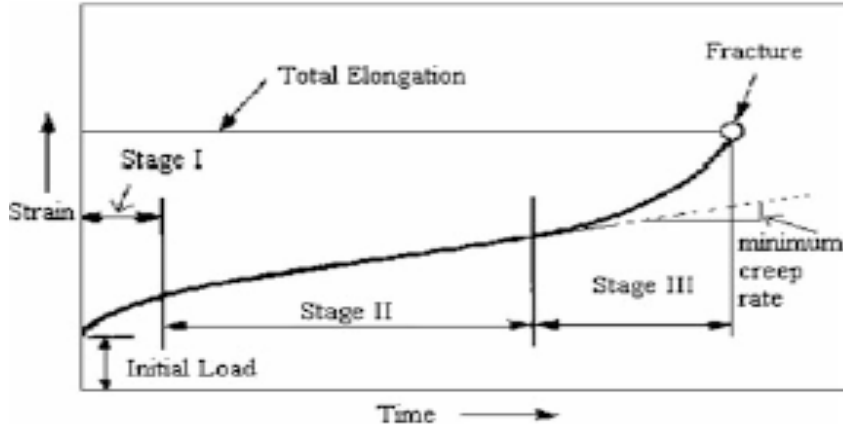
تكون الانهيارات الناتجة عن الزحف سهلة التعرف عليها وذلك بسبب التشوهات التي تحدث. يظهر الشكل (18) تمزقاً زحفياً .



الشكل (18) تمزق زحف.

يمكن أن يكون الانهيار الناتج عن الزحف إما هشاً أو لدناً، ويمكن أن تكون الشقوق إما موجودة ضمن الحبيبات أو على حدود الحبيبات ، و إذا تم إجراء اختبار الزحف عند درجة حرارة ثابتة وحمل ثابت فإنه يمكن أن تختبر العناصر الهندسية التحطم أو الانهيار عند درجات حرارة مختلفة وظروف تحميل مختلفة.

في اختبار الزحف يتم تطبيق حمل ثابت على عينة شد وإبقاؤها عند درجة حرارة ثابتة ، ومن ثم يقاس الانفعال بعد فترة من الزمن . إن ميل المنحني الذي يظهر في الشكل (19) هو معدل الانفعال في الاختبار خلال المرحلة الثانية أو هو معدل الزحف للمواد. الزحف الأولي (المعروف بالمرحلة الأولى) هو فترة يتناقص معدل الزحف ، وهو مرحلة مؤقتة وخلال هذه الفترة تأخذ التشوهات مكانها وتزداد مقاومة الزحف حتى المرحلة الثانية. المرحلة الثانية للزحف هي فترة يكون فيها معدل لزحف ثابتاً تقريباً ويشار إلى المرحلة الثانية على أنها حالة زحف ثابتة. أما المرحلة الثالثة للزحف ، فإنها تحدث عندما يصبح هناك تناقص في مساحة المقطع العرضي ، وينتج هذا التناقص من الالتصاق أو من تشكل فراغ دخلي. يؤدي ازدياد الزحف بشكل متسلسل إلى انهيار زحف أو إجهاد تمزق.



الشكل (19) معدل الانفعال (منحني الزحف) للمادة تحت تأثير اختبار الزحف.

2.8 الانهيار الناتج عن التآكل:

يحدث التآكل في المواد المعدنية بأشكال مختلفة تختلف في مظهرها و يعد الانهيار الناتج عن التآكل أمناً بشكل أساسي واقتصادي. يوجد في المواد المعدنية أشكال مختلفة من التآكل منها التآكل بشكل عام، التآكل الغلفاني، التآكل الذي يحدث فجوات، التآكل بين الحبيبات و التآكل الإجهادي إلخ. ويمكن التحكم بالتآكل باستخدام الطلاء الغلفاني ، و مثبتطات التآكل، و اختيار المواد، و طبقات حماية و مراقبة بعض قواعد التصميم.

يحدث التآكل بشكل كيميائي على تلف المادة ، وتكون نتائج التآكل تدهور المادة وخواصها. وهذا يمكن أن يؤدي إلى انهيار العناصر الهندسية. هناك العديد من العوامل التي يجب أن تؤخذ بالحسبان خلال تحليل الانهيار وذلك لتحديد تأثير التآكل في الانهيار ومن هذه العوامل:

*نوع التآكل.

*معدل التآكل.

*حجم التآكل.

*التفاعل بين التآكل وميكنزمات الانهيار الأخرى.

بما أن التآكل هو عملية عادية وطبيعية إلا أنه من النادر الحد منه , لكن يمكن التقليل منه أو التحكم به عن طريق الاختيار الصحيح للمادة , التصميم , طبقات التغطية وأحياناً عن طريق تغيير البيئة. أستخدم العديد من طبقات التغطية المعدنية و غير معدنية لحماية الأجزاء المعدنية من التآكل

2.9 الانهيار الناتج عن الاحتكاك:

يعرف الاحتكاك على أنه تلف السطوح الصلبة , وذلك بسبب إزالة أو إزاحة المادة نتيجة الأعمال الميكانيكية كاحتكاك المواد الصلبة , و السائلة أو الغازية. يسبب الاحتكاك ضرراً كبيراً للسطوح وهذا الضرر يكون عادة بشكل تدريجي. أنواع التعب ,هي: احتكاك الجليخ ,و الاحتكاك التآكلي , التعب السطحي إلخ . الميزة الرئيسة في الانهيار الاحتكاكي هي:

- إزالة المادة وتناقص الأبعاد كعامل ميكانيكي.
- يأخذ الاحتكاك مكاناً كنتيجة للتشوه اللدن , وانفصال للمواد خلال فترة من الزمن [6].

الفصل الثالث

استخدام العناصر المنتهية في

حساب العمر التعبي

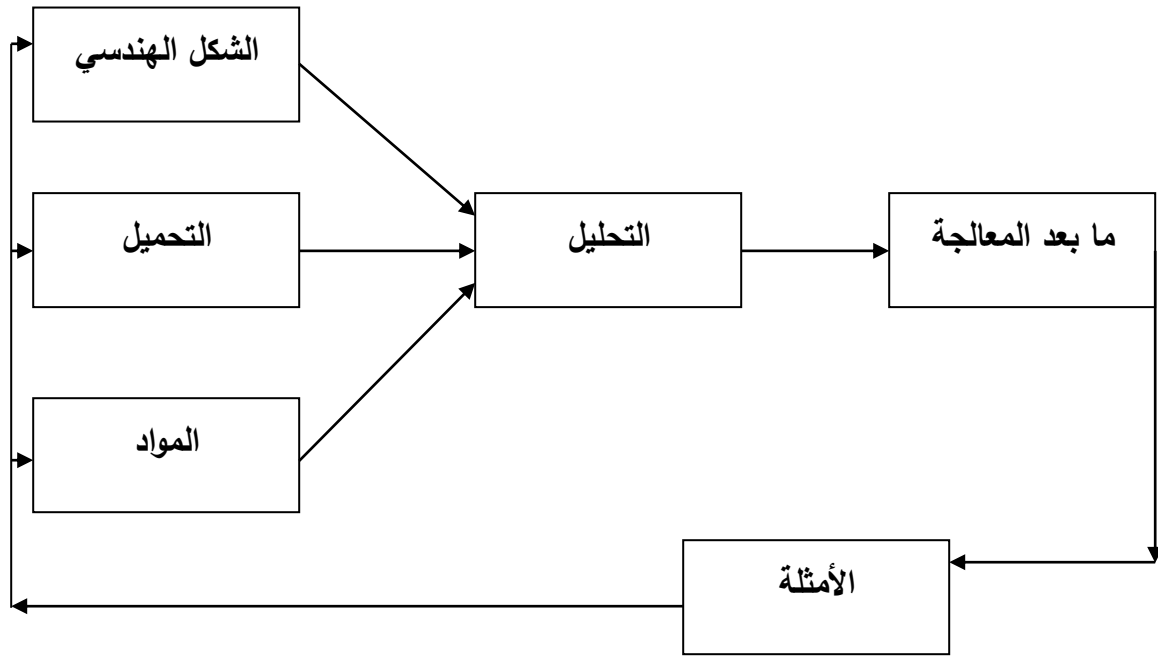
مقدمة:

يتضمن التعب بداية الشق و نموه حتى يصل إلى المقاس الحرج, و أحياناً يحدث هذا على مرحلتين أو أكثر. وفي المعادن البلورية تحدث عملية بداية ظهور الشق , بسبب انزلاق سطوح البلورات , ويتم التحكم بهذه العملية عن طريق إجهادات القص المتغيرة عبر الزمن. لذلك يبدأ الانهيار التعبى بدقة في منطقة ظهور الشق , وهو يعتمد أيضاً على نظام التحميل . تعد مدة تأثير الإجهادات والانفعالات على المنطقة التي يبدأ فيها الشق بالظهور عاملاً مهماً أما التوزيع العام للإجهادات و الانفعالات ضمن القطعة فيعدُ عاملاً ثانوياً . ولهذا السبب يعد تحليل العناصر المنتهية مهماً في هذه الحالة حيث باستخدام تحليل العناصر المنتهية يمكن اختيار أي مكان ضمن النموذج , وتركيز الإهتمام عليه وباستخدام القدرة الفعلية لتقنية العناصر المنتهية يمكن إدخال التأثيرات الديناميكية.

ركزت معظم دراسات التعب على المعادن المعروفة سابقاً . أما السلوك غير الخطي الذي يظهر في المواد اللدنة والبوليميرات عند الإجهادات المنخفضة فيعدُ من المواضيع الصعبة, وتطبيقات العناصر المنتهية على هذه المواد هو من أكثر مواضيع الأبحاث الجديدة. وأيضاً تسبب التأثيرات الحرارية- الميكانيكية بعض المشاكل. لذا حالياً فإن الوظيفة الأساسية لبرامج العناصر المنتهية التجارية هي الحصول على الإجهادات من التحليل الحراري لتستخدم الحرارة بشكل مستقل للحصول على العمر التعبى. والتأثيرات الأخرى التي لا يمكن دمجها بسهولة مثل: الزحف الحراري, و تغير خواص المواد, والأكسدة/التآكل هي من مواضيع برامج البحث.

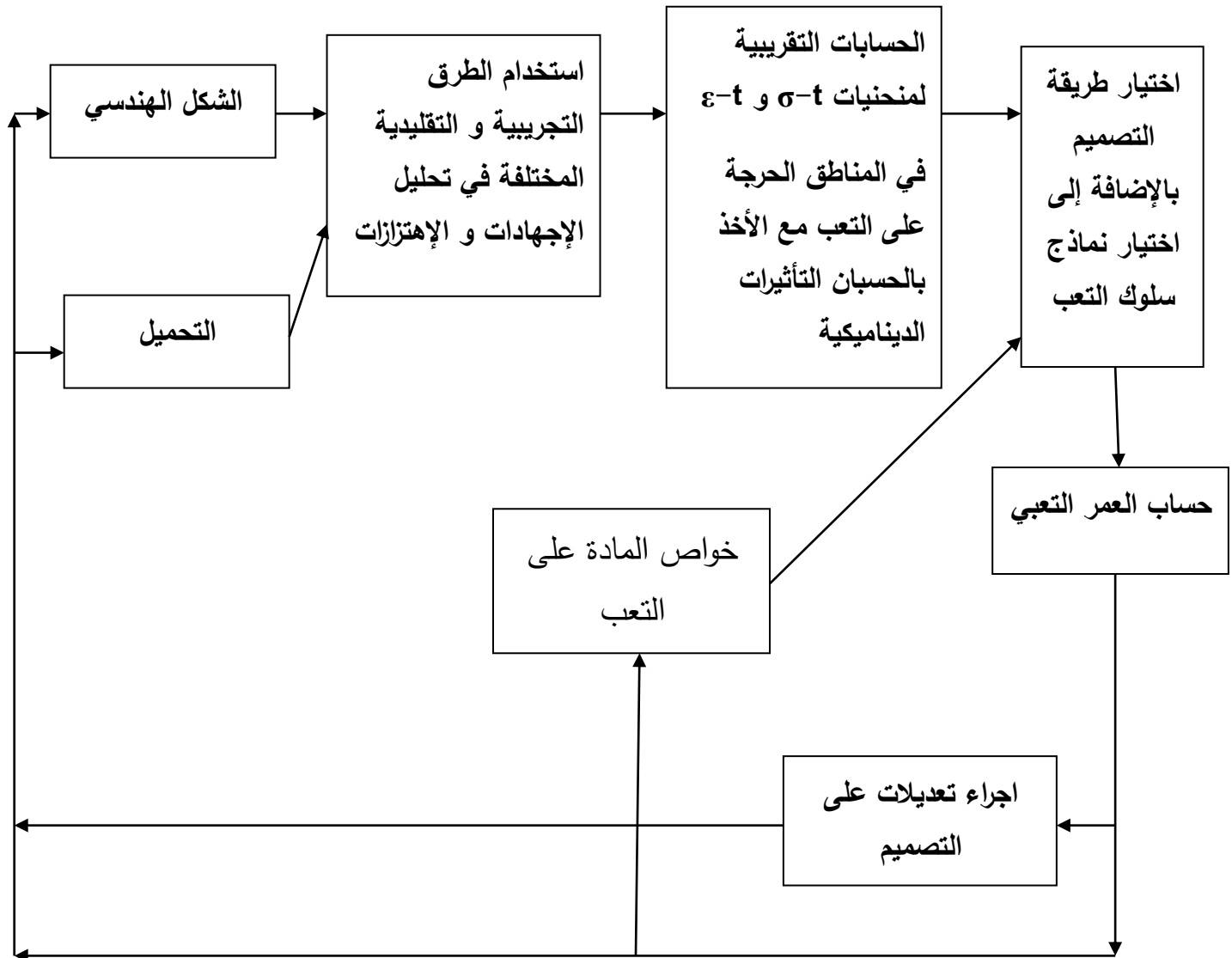
3.1-عناصر نظام حساب العمر التعبى:

تتم عملية تحليل التعب للعديد من السنوات , كما يظهر في الشكل (20). حيث يوجد في هذا التحليل ثلاثة بارامترات للدخل , وهي: الشكل الهندسي, و المواد, والتحميل.



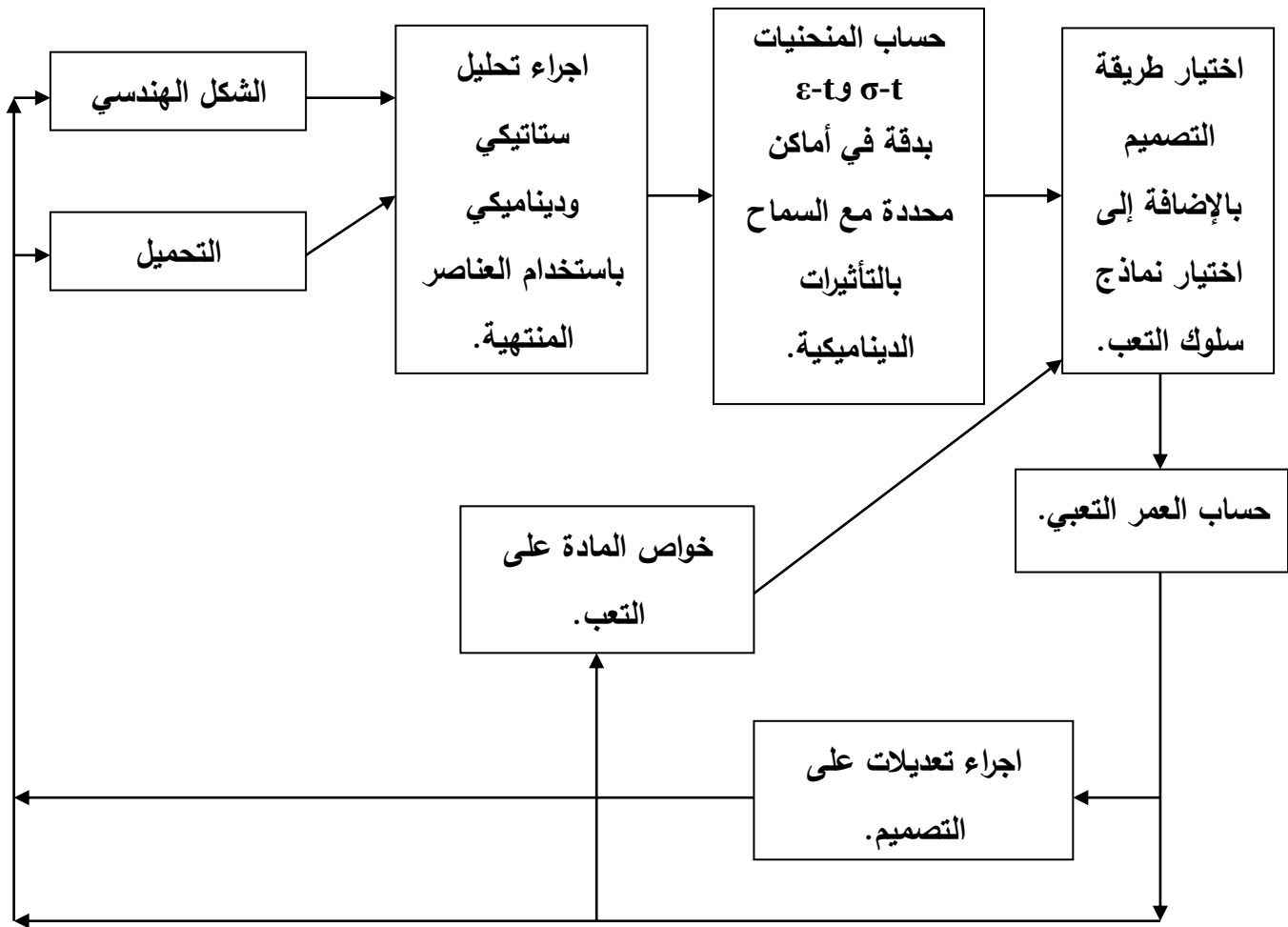
الشكل (20) الطريقة التقليدية لعملية تحليل التعب [10].

أما في معظم التطبيقات العملية يأخذ تحليل التعب النموذج الموجود في الشكل (21) . حيث يستخدم الشكل الهندسي والتحميل معاً مبدئياً للحصول على منحني الإجهاد- عدد دورات تحميل ($\sigma-t$) أو الانفعال- عدد دورات تحميل ($\epsilon-t$) عند النقطة التي تبدو حرجة ، ومن ثم تتم إضافة خواص المادة إلى التعب لحساب العمر التعبّي. خواص المواد التي نحتاجها في الخطوة الأولى هي فقط معامل يونغ ومنحني الإجهاد- الانفعال المرن-اللدن.



الشكل (21) طريقة اخرى للإجراءات التقليدية في حساب العمر التعبى [10].

يعطي استخدام تحليل العناصر المنتهية تحكماً قوياً خلال الانتقال من مرحلة رسم الشكل الهندسي إلى التحميل فضلاً عن السماح بإدخال التأثيرات الديناميكية . يعطي الشكل (22) وصفاً لعملية التحليل باستخدام طريقة العناصر المنتهية مع التأكيد على أهمية طريقة العناصر المنتهية عندما يكون التحليل في منطقة محددة ضرورياً.



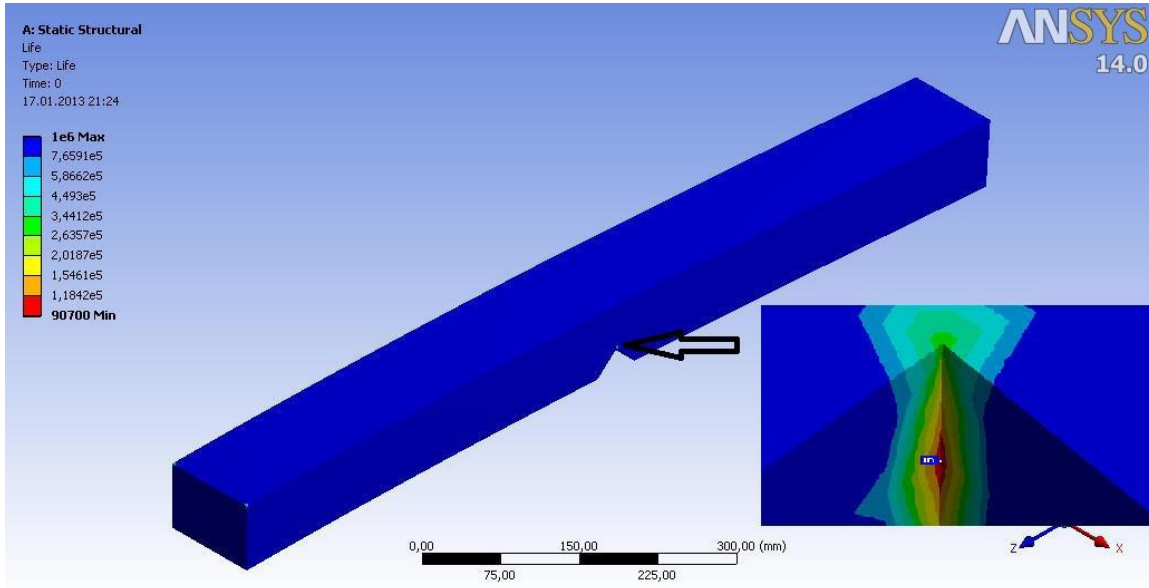
الشكل (22) مخطط حساب العمر التعبي باستخدام العناصر المنتهية [10].

تختلف قاعدة حساب العمر التعبي حسب القطعة المدروسة، و نوع التحميل ، و الحالة التي تعمل بها القطعة المدروسة ،حيث إن القطعة المدروسة ذات الشكل البسيط و بتحميل بسيط تستخدم في الحالة التي يكون فيها احتمال الانهيار ضعيفاً ، و توضع هذه القطعة بالخدمة بالاعتماد على الحسابات الأساسية فقط . أما في الحالات الأكثر تعقيداً و التي يكون فيها عواقب الحسابات الخطأ عالية ، فمن الضروري إجراء التحقق من الحسابات بواسطة التجارب حيث إن تجربة بسيطة تفي بالغرض ، لكن في هذه الحالة لا يحبذ استخدام طريقة العناصر المنتهية.

في الحالة العامة التي يكون فيها الشكل الهندسي للقطعة المدروسة معقداً و التحميل معقد ويسبب عدداً كبيراً من دورات التحميل ويكون تقليل الوزن مطلوباً فإن إنتاج نماذج للقطعة المدروسة بالأبعاد الحقيقية و تحميلها بشكل قريب من حالة التحميل في الخدمة عملية مكلفة. فضلاً عن الكلفة فإن العقبة الحقيقية لهذا النوع من الاختبار أنه لا يمكن في حالة وجود خطأ تصميمي إجراء تصحيح لأنه سيكون مكلفاً ، لذا يتم الاعتماد على الحسابات التقريبية و الموثوقة للعمر التعبي ، و يكون هنا إسهام أدوات حساب التعب في العناصر المنتهية مفيداً في مرحلة تطوير التصميم ، و ذلك قبل إجراء الاختبارات الممكنة [10].

3.2 الدراسات السابقة:

قام الباحثون N. Sinan Köksal, Arif Kayapunar and Mehmet Çevik عام 2013 بتحليل التعب لجائز يحوي شقاً جانبياً على شكل تلم أو حز في المنتصف باستخدام ANSYS Workbench ، وذلك تحت تأثير حمولة نبضية وباستخدام طريقة إجهاد - عدد دورات ، وقاموا بدراسة تأثير مقاس الشق على العمر التعبي . المادة المصنوع منها الجائز هي الفولاذ الإنشائي ذو معامل يونغ 200 GPa و معامل بواسن 0.3 و حدّ خضوع 250 MPa . أما أبعاد الجائز ، فهي طوله 1000 mm و أبعاد مقطعه العرضي 100 mm و الارتفاع 75 mm و التلم يقع في منتصف الجائز . في البداية تم إجراء دراسة تقاربية لتحديد الحجم المناسب لعناصر شبكة العناصر المنتهية ، و استناداً إلى هذه الدراسة كان الحجم المناسب 5mm و من ثم تمّ إجراء تحليل ستاتيكي لمعرفة مجال أحمال التعب المناسبة للتطبيق ضمن المجال المرن ، حيث وجدت أن القوى هي بين 8 kN و 14kN وتحدث التشوهات اللدنة فوق هذا المجال . ومن ثم تمّ إجراء تحليل التعب باستخدام أداة التعب الموجودة في برنامج ANSYS Workbench . لدراسة تأثير مقاس الشق على العمر التعبي تم نمذجة شقوق بأعماق 2, 5, 10, 20, 25mm و لزوايا 45 و 90 و مقارنة النتائج مع جائز سليم من دون شق.



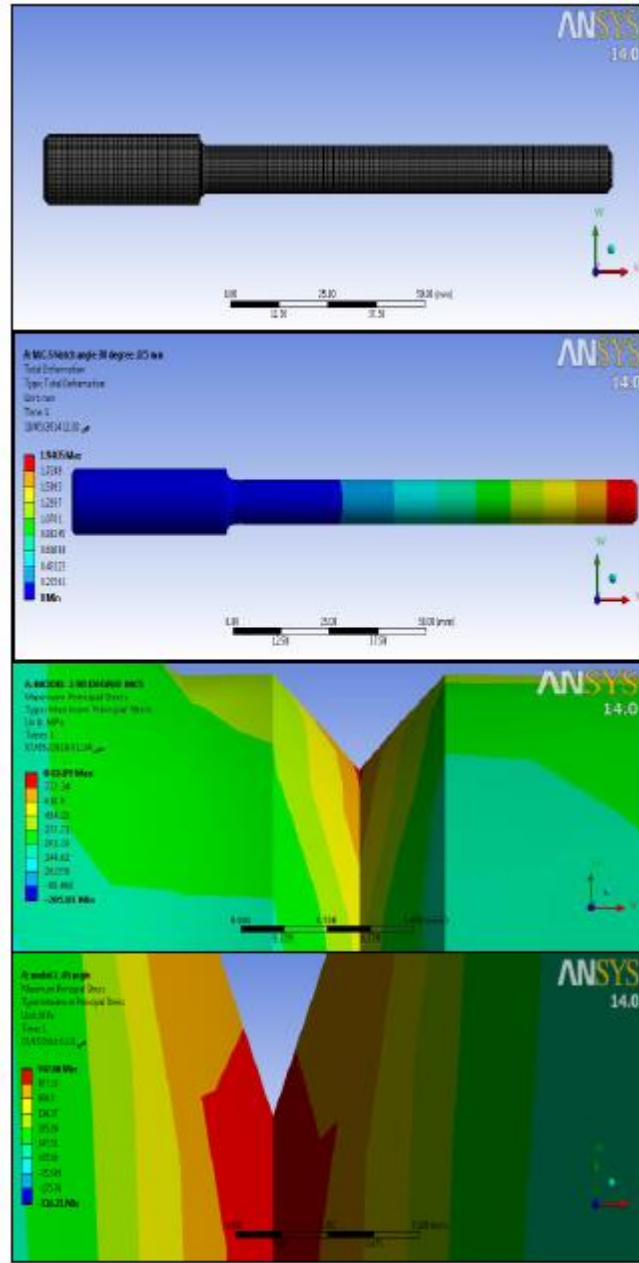
الشكل (23) العمر التعبي لجائز مشقوق.

و توصّل الباحثون إلى أن العمر التعبي يتناقص ببطء قبل العمق (20mm) , و يتناقص بشكل واضح بعد هذه القيمة [13].

و كما درس الباحثون Qasim Bader, Emad Kadum عام 2014 تأثير شكل الحز V على العمر التعبي لجائز فولاذي مصنوع من AISI 1037 , وقاموا بحساب العمر التعبي لعينات محزوزة بشكل حرف V بزوايا (30،45،90) من الاختبارات التجريبية على عينات من دون حز (عينات مرجعية) و باستخدام الطريقة العددية (FEA) . أجريت اختبارات العمر التعبي في درجة حرارة الغرفة، وبتطبيق دورة تحميل متناسقة مع تردد (50Hz) و إجهاد وسطي مساوٍ للصفر ($R=-1$). أجريت الاختبارات على آلة اختبار التعب على الإنحناء الدوراني. تمّ الحفاظ على معدل إجهاد ثابت خلال الاختبارات، و استخدمت طريقة العناصر المنتهية لدراسة تحليل الإجهاد على سطح التصدع ، حيث استخدم برنامج ANSYS اصدار 14 لفحص نتائج التعب المحسوبة. يقسم تحليل التعب على ثلاث مراحل: المواد، و التحليل، والنتائج. استخدمت طريقة اجهاد-عدد دورات مباشرة لتحليل التعب حيث نمذجت عينات تعب سليمة ومحزوزة بزوايا حز مختلفة وبأعماق مختلفة.

ولدت عناصر الشبكة , وأعطيت الشروط الحدية حتى يمكن الوصول إلى شروط التحميل الأعظم , ويظهر أيضاً تحليل الإجهاد من خلال برنامج ANSYS القيم العظمى للإجهاد الذي يحدث بجوار التغير في المقطع العرضي للعينة حيث يوجد الحز V . يظهر الشكل (24) النموذج مع شبكة العناصر المنتهية , و التشوه والإجهادات العظمى المتولدة في النموذج .

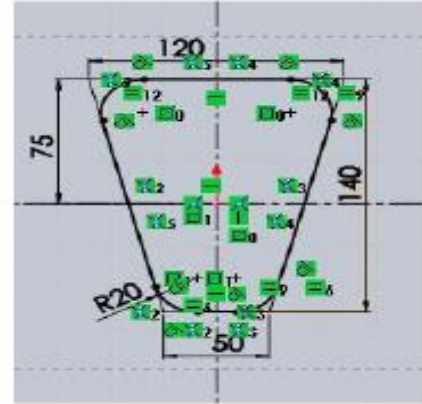
تمّ حساب عامل تركيز الإجهاد للشكل الهندسي المستخدم في هذه الدراسة تحليلاً وعددياً عن طريق FEM. ولوحظ من النتائج أنه في معظم الحالات العمر التعبى المحسوب أقل من القيم التجريبية لكل أنواع العينات المحزوزة. قد يعود ذلك لسبب أنه تمّ حساب العمر التعبى بالاعتماد على الإجهاد الأعظم في مقطع الحز. ومن الملاحظ أيضاً أن العمر التعبى المحسوب من محاكاة العناصر المنتهية مقبول من أجل ساعات مختلفة للإجهاد ولعدد مختلف من الدورات [9]



الشكل (24) نموذج العناصر المنتهية مع شبكة العناصر المنتهية و التشوه والإجهادات الأساسية لحز القضيب [9].

و قام الباحثان Amandeep Singh و Vinod Rohilla عام 2015 بدراسة بعنوان أمثلة و تحليل التعب لخطاف هوك بإستخدام طريقة العناصر المنتهية , حيث قاموا في هذه الدراسة برسم نموذج صلب لخطاف ذي مقطع شبه منحرف على برنامج SOLIDWORKS وإجراء تحليل العناصر المنتهية على برنامج ANSYS Workbench باستخدام السولفر nCode DesignLife. تمّ تغير أطوال الحواف المتوازية للمقطع العرضي للخطاف وذلك تحت تأثير حمل مقداره 30TON وتم دراسة اجهادات Von-Misses و الإزاحات لتقليل الوزن و تم الحصول على أفضل ثلاثة نماذج ، وذلك بعد إجراء تحليل التعب على هذه النماذج وفق الخطوات الآتية:

1- تمّ رسم نموذج الخطاف على برنامج SOLIDWORKS و حفظه بلاحقة X_t لتصديره لبرنامج العناصر المنتهية.



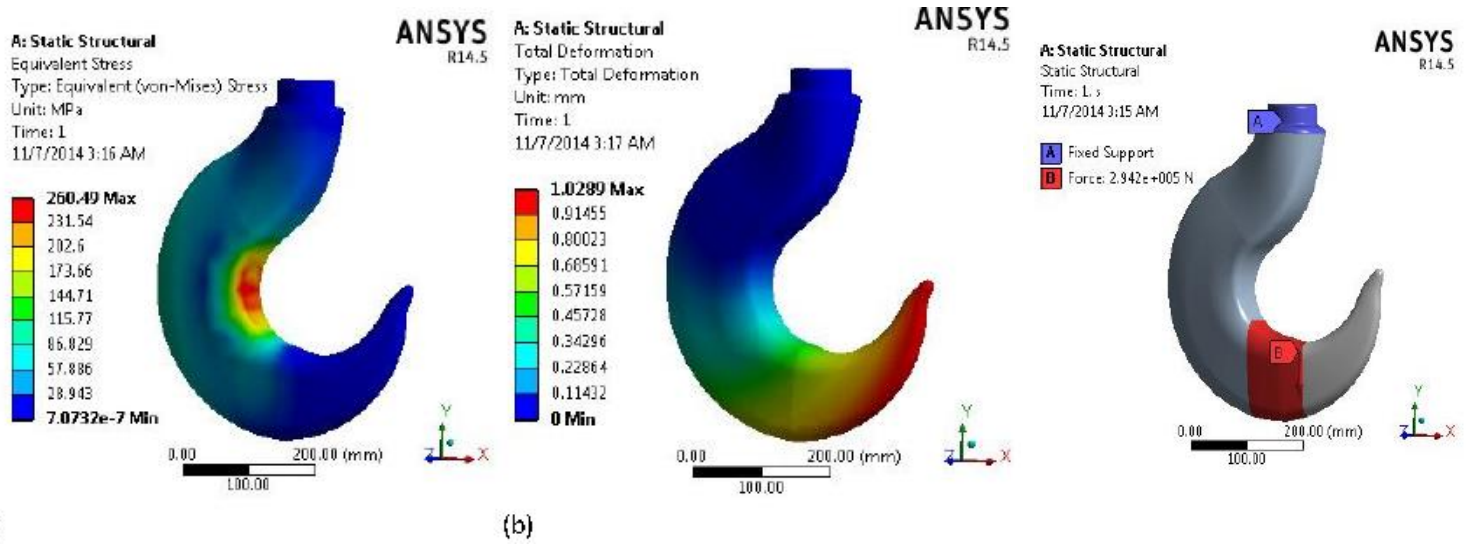
الشكل (25) أبعاد المقطع العرضي لشبه المنحرف الشكل (26) نموذج خطاف هوك الحقيقي

2- اختيار المادة: حيث استخدم الفولاذ AISI4340 150 ذي المواصفات الآتية:

Density	7827 kg m ⁻³
Young's modulus	1.9995E ¹¹ Pa
Poisson's ratio	0.32
Bulk Modulus	1.8514E ¹¹ Pa
Shear Modulus	7.5738E ¹⁰ Pa
Tensile Ultimate Strength	1.0894E ⁹ Pa
Nfc(Numerical fatigue cutoff life)	1E ⁸
Ne(Endurance limit)	1E ⁶

الجدول (3.1) الخواص الميكانيكية للفولاذ AISI4340 150

3- إجراء تحليل العناصر المنتهية : تم إجراء التحليل على مرحلتين المرحلة الأولى إجراء تحليل ستاتيكي ، حيث تم ربط المادة و تطبيق الشروط الحدية ، ومن ثم توليد شبكة العناصر المنتهية . قيمة الحمل المطبق 30ton و تم تثبيت الطرف العلوي للخطاف ، وتم حساب التشوه الكلي والاجهاد المكافئ Von-Misses .



الشكل (27) الشروط الحدية الشكل (28) الاجهاد المكافئ و التشوه الكلي للخطاف الحقيقي

بالإضافة إلى ذلك تمّ تسمية الحافتين المتوازيتين للمقطع العرضي "D" و "d" وتمّ أخذهما كأبعاد متغيرة حيث "D" الحافة الداخلية و "d" الحافة الخارجية . وتتراوح قيم "D" بين 100mm و 125mm و تتراوح قيم "d" بين 40mm و 55mm

الهدف الرئيس لهذه الدراسة هو أمثلة الوزن , لذلك تمّ مقارنة الوزن و الإجهاد المكافئ و التشوه الكلي لهذه النماذج. و بناءً على هذه المقارنة تمّ اختيار أفضل (3) نماذج ومن ثم إجراء تحليل التعب على هذه النماذج .

	Width, D (mm)	Width, d (mm)	Mass (kg)	Stress (MPa)	Displacement (mm)
Candidate No. 1	100	40	55.417	288.53	1.2719
Candidate No. 2	100	45	56.27	268.34	1.1779
Candidate No. 3	105	40	56.13	274.53	1.1681

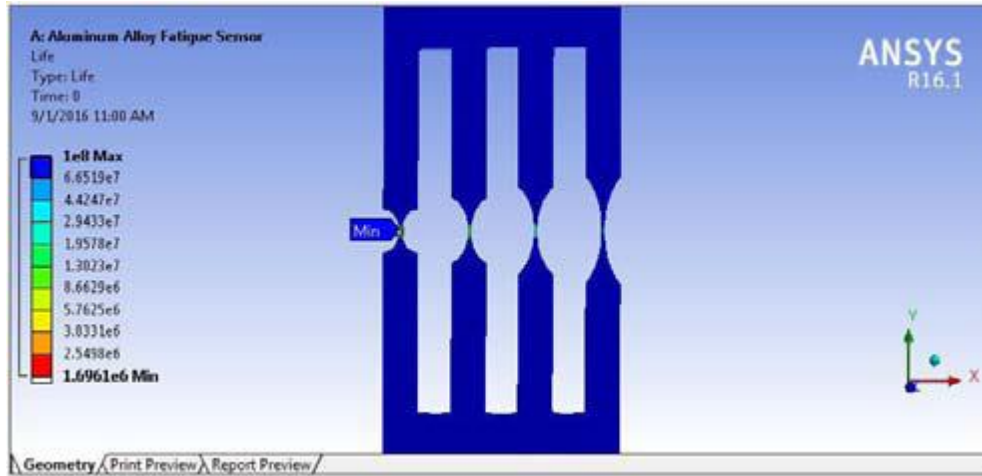
الجدول (3.2) مقارنة بين أفضل (3) نماذج.

المرحلة الثانية :هي تحليل التعب حيث تمّ إجراء تحليل التعب على النموذج الحقيقي للخطّاف وعلى النماذج الثلاثة السابقة , باستخدام سولفر nCode DesignLife بعد ربطه مع سولفر الستاتيك , و تمّ حساب العمر التعبي و تحطم التعب لهذه النماذج , وبناءً على تحليل التعب تمّ التوصل إلى ان أفضل نموذج هو النموذج رقم (3) . تمّ انقاص الوزن النهائي للنموذج (3) بمقدار 15.861kg أي ما يعادل 22.03% بالمقارنة مع النموذج الحقيقي لخطّاف هوك . العمر التعبي الأصغري للنموذج (3) تناقص , و قيمة الإجهاد ازدادت بمقدار 14.04 MPa وهو مقدار ضمن الحدود المسموح بها [5] .

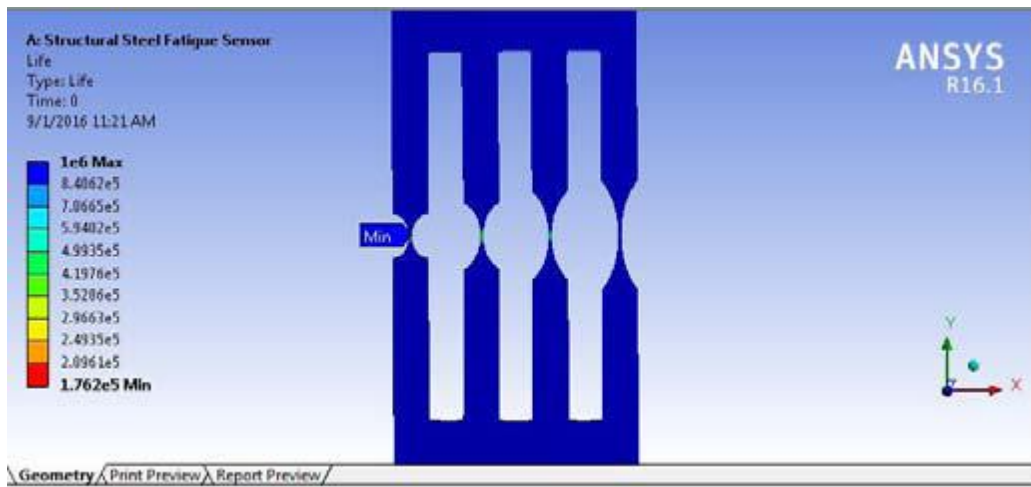
Parameters	Actual Model	Candidate No.3
Width, D(mm)	120	105
Width, d(mm)	50	40
Mass (Kg)	71.991	56.13
Equivalent Stress (von-mises) (MPa)	260.49	274.53
Deformation (mm)	1.0289	1.1681
Minimum Fatigue Life (repeats)	9.104E ⁷	8.805E ⁷
Maximum Fatigue Damage	1.098E ⁻⁸	1.136E ⁻⁸

الجدول (3.3) مقارنة بين النموذج الحقيقي لخطّاف هوك والنموذج الأمثل رقم (3).

قام الباحثان Tariq Salem Alshahbouni, Dr. Ali Güngör عام 2015 بدراسة تقييمية للعمر التعب لحساس تعب على شكل حرف U مصنوع من الألمنيوم و الفولاذ الإنشائي حيث يستخدم هذا الحساس لمراقبة التحطم التعبى ويعطي حساب موثوق للعمر التعبى المتبقى للقطعة المركب عليها , و بالتالى فإنه يعطى إنذاراً قبل حدوث الانهيار التعبى. تمت هذه الدراسة التقييمية عن طريق إجراء محاكاة على برنامج ANSYS Workbench , حيث تمت دراسة حساس تعبى على شكل حرف U مصنوع من الفولاذ الإنشائي وبأنصاف أقطار $r = 5\text{mm}$ و $r = 20\text{mm}$ و دراسة الحساس نفسه من معدن الألمنيوم , و قد توصل الباحثان إلى أن العمر التعبى الأكبر يكون للحساسات ذات أنصاف الأقطار $r = 20\text{mm}$ لكلا المعدنين و العمر التعبى الأصغرى يكون للحساسات ذات أنصاف الأقطار $r = 5\text{mm}$, و أيضاً لكلا المعدنين , وذلك بسبب أن تركيز الإجهاد يكون أكبر عند نصف القطر الصغير للشكل U وبالتالى يقل العمر التعبى. أما بالنسبة لحساسات ذات أنصاف الأقطار الأكبر فإنه يقل فيها تركيز الإجهادات, وبالتالى يكون العمر التعبى لها أكبر [7].



الشكل (29) العمر التعبى لحساس التعب المصنوع من خليطة الألمنيوم.



الشكل (30) العمرالتعبي لحساس تعب مصنع من الفولاذ الإنشائي.

<i>Fatigue life</i>	$r = 5 \text{ mm}$	$r = 10 \text{ mm}$	$r = 15 \text{ mm}$	$r = 20 \text{ mm}$
Aluminum alloy	8.893e+06	9.766e+06	2.0353e+07	5.351e+07
Structural steel	3.452e+05	2.082e+06	5.587e+07	3.402e+06

الجدول (3.4) مقارنة بين العمرالتعبي لحساس تعب على شكل حرف U مصنع من الفولاذ الإنشائي و الألمنيوم [7].

كما قام الباحثان Dr. S. N. Madhekar , Dinesh S. Shewale عام 2015 بحساب العمر التعبي لجائز فولاذي ذي مقطع بشكل حرف I باستخدام المحاكاة بطريقة العناصر المنتهية تضمنت هذه الدراسة إجراء دراسة تحليلية باستخدام الكود

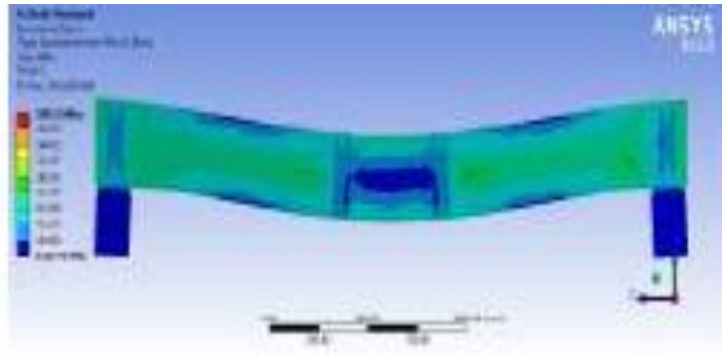
IS 800-2007 و إجراء تحليل العناصر المنتهية باستخدام برنامج

ANSYS Workbench ومقارنة نتائج الدراسة التحليلية والنمذجة مع التجارب العملية .

من أجل التجارب العملية تمّ استخدام جوائز من الفولاذ المدرفل على الساخن بأبعاد $350 \times 175 \text{ mm}$ وبطول 3000 mm سماكة الشفة والنسج المعدنية هي 7 mm و 11 mm على التوالي , وتمّ قطع حوزر بشكل حرف U و بعرض 8 mm على حواف الشفة المعرضة للشد و في منتصف الجائز طول الحز 21.8 mm . تمّ تغطية الجائز بصفائح فولاذية ملحومة بطول 3000 mm وبأبعاد مقطع $240 \times 12 \text{ mm}$. أما اختبار التعب فقد تمّ اختبار الجائز كجائز

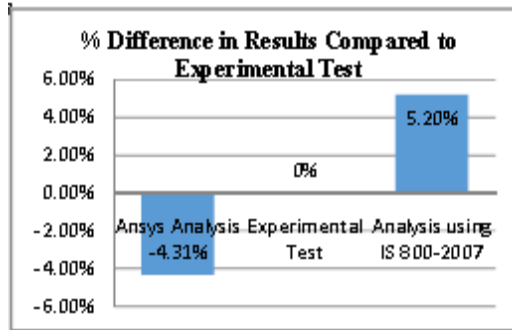
مثبت بشكل بسيط , و تمّ تحميله في نقطتي انحناء , باستخدام دورة بسعة ثابتة وبتردد 4 Hz وبمقدار حمل أعظمي (200 kN) P_{max} لمحاكاة التأثير المشترك للحمل الميت والحمل الحقيقي أما الحمل الأصغري فبمقدار (40 kN) P_{min} لمحاكاة تأثير الحمل الميت وبمعدل تحميل $R=0.2$. بدأت الشقوق بالظهور بشكل واضح بحجم 5 mm عندما وصل عدد دورات التحميل إلى 10^5 دورة , وحدث الانهيار الكامل بعد 15.6×10^4 دورة.

تمّ إجراء النمذجة على برنامج ANSYS Workbench وذلك برسم نموذج ثلاثي الأبعاد و تطبيق نظرية Soderberg على التعب.



الشكل (31) إجهاد فون مايزسس المكافئ .

توصل الباحثان إلى أن العمر التعبي المحسوب بواسطة الكود IS 800-2007 أعلى بمقدار 5.2% بالمقارنة مع النتائج التجريبية و أن العمر التعبي المحسوب بواسطة العناصر المنتهية أقل بمقدار 4.31% بالمقارنة مع النتائج التجريبية.



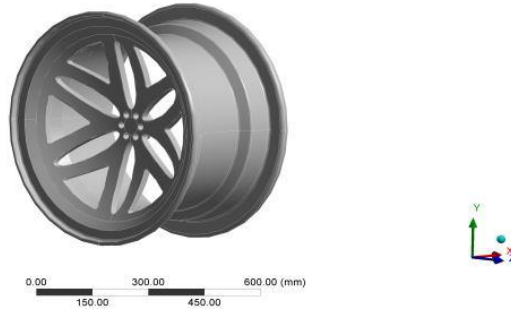
SI No	Method of evaluation	Fatigue life (number of cycles)
1.	Experimental fatigue test	15.6×10^4
2.	Analysis according to IS 800:2007 provisions	16.2019×10^4
3.	Analysis using finite element tool Ansys	14.736×10^4

الجدول (3.5) نتائج العمر التعبّي عند عدد من دورات

أما المقطع العرضي فقد أعطى عمراً تعبياً أكبر على إجهاد القص بالمقارنة مع الإجهاد الناظمي [21].

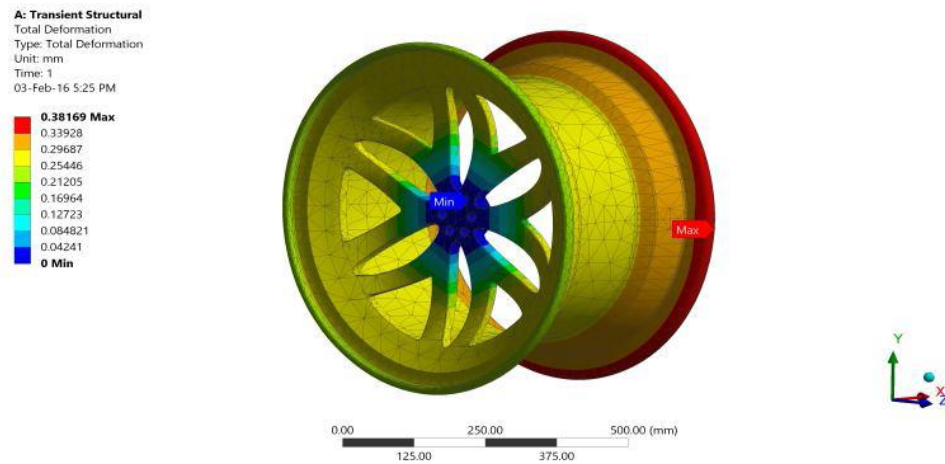
قام الباحثون Mandage A.P., Sharma M.H., Rayate A.K., Kange P.N, Hirulkar N.S عام 2016 بحساب العمر التعبّي لحلقة عجلة مصنوعة من الألمنيوم باستخدام طريقة العناصر المنتهية , حيث تمّ تحليل توزع الإجهادات و الإزاحات باستخدام طريقة إجهاد - عدد دورات لتصوّر العمر التعبّي لعجلات الألمنيوم , وتمّ استخدام سولفر transient structural تحت تأثير حمل دوري و مقارنة نتائج العناصر المنتهية مع الإختبارات العملية.

تمّ رسم نموذج إطار العجلة على برنامج Solidworks وتصدير النموذج إلى برنامج ANSYS Workbench لإجراء شبكة العناصر المنتهية بحجم عناصر مناسب , و وضع الشروط الحدية حيث يتعرض إطار العجلة لضغط مقداره 36 psi والذي يكافئ 0.248 MPa أما السطح الامامي يتعرض لضغط جوي مقداره 0.101 MPa , وتمّ ضبط خطوة الزمن الابتدائية بمقدار $1e^{-04}$ ثانية , و خطوة الزمن الأصغرية هي نفسها الابتدائية أما خطوة الزمن الأعظمي على 0.1 ثانية.



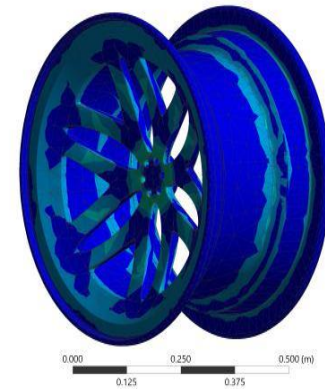
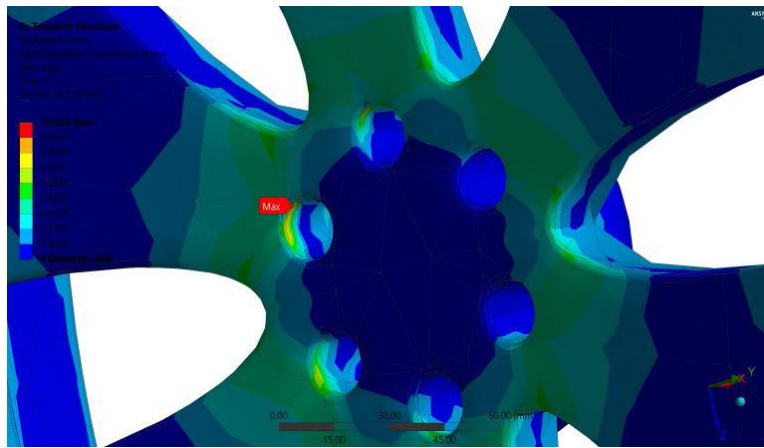
الشكل (32) نموذج اطار العجلة.

أظهر تحليل التشوهات الكلية باستخدام ANSYS Workbench أن أكبر تشوّه كان بمقدار 0.38mm ويقع عند الحافة الداخلية للعجلة.



الشكل (33) التشوهات الكلية.

وبيّنت دراسة الإجهادات أن أكبر تركيز للإجهاد يكون على حواف الثقوب المخصصة للبراغي وبلغ مقداره 102.38 MPa.



الشكل (35) مكان الإجهاد الأعظم

الشكل (34) الإجهاد المكافئ

وعند حساب العمر التعبي باستخدام أداة التعب في برنامج ANSYS Workbench ظهر أن أقل عمر تعب كان في مكان أكبر تركيز للإجهادات ، وبلغ مقداره 1.29×10^7 دورة.

ANSYS Workbench
Transient Structural
Life
Type: Life
Time: 0
03-Feb-16 7:17 PM

1e8 Max
7.9666e7
6.3467e7
5.0562e7
4.028e7
3.209e7
2.5565e7
2.0366e7
1.6225e7
1.2926e7 Min

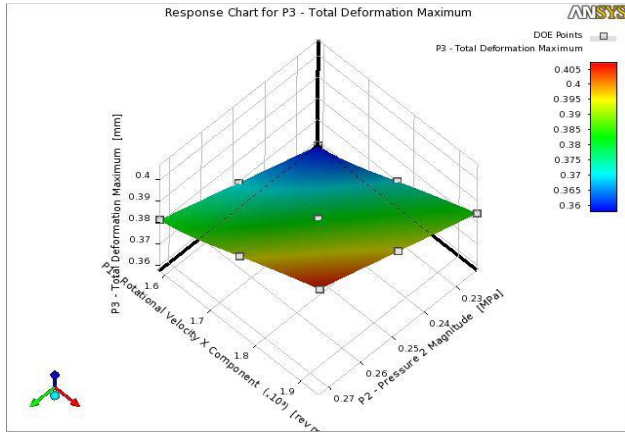


0.00 300.00 600.00 (mm)
150.00 450.00



الشكل (36) العمر التعبي.

ومن أجل توفير الوقت والاختبارات التجريبية قام الباحثون باستخدام أداة جاهزة في برنامج ANSYS Workbench تقوم بربط بارامترات الدخل مع الخرج بمخطط ثلاثي ، وبالتالي يمكن الحصول على المجال الآمن لتصميم إطار العجلة.



	Tyre Pressure Magnitude (MPa)	Total Deformation Maximum (mm)	Equivalent Stress Maximum (MPa)	Life Minimum
1	0.248211	0.381693	102.3777	12925939.79
2	0.248211	0.369434	96.71414	24596345.3
3	0.248211	0.395554	108.6379	6347686.599
4	0.22339	0.370035	102.7929	12330479.47
5	0.273032	0.393417	101.962	13550995.21
6	0.22339	0.357643	97.12933	23463188.59
7	0.22339	0.384157	109.0531	6055299.65
8	0.273032	0.381284	96.29839	25785833.5
9	0.273032	0.407083	108.2223	6654606.954

الشكل (37) مخطط بارامترات الدخل مع الخرج

جدول (3.6) النقاط التصميمية

توصل الباحثون في هذه الدراسة إلى أن طريقة العناصر المنتهية هي أداة فاعلة في حساب العمر التعبّي لإطار العجلة في مرحلة التصميم ، و أظهر برنامج ANSYS Worbench أنه يخضع مكان ظهور الشقوق التعبّية لتركيز الإجهاد ، حيث تبدأ الشقوق التعبّية بالظهور عند مكان أكبر تركّز لإجهادات والتي كانت في ثقب البراغي . واعتماداً على هذه النتائج بلغ أصغر عمر تعبّي قيمة 1.29×10^7 دورة [12].

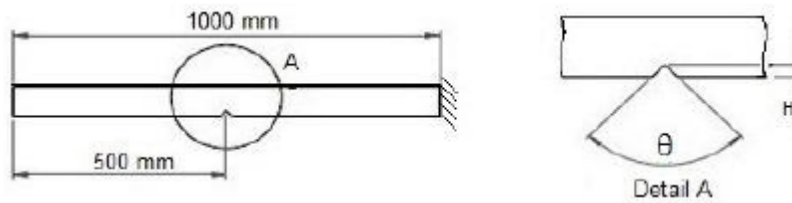
3.3 الدراسة العملية:

أُجريت الدراسة العملية على جائز مشقوق مصنوع من الفولاذ الإنشائي حيث تمّت نمذجة هذا الجائز على برنامج ANSYS Workbench 15. يحتوي هذا البرنامج على أداة جاهزة مدموجة ضمن البرنامج , تساعد على حساب العمر التعبّي للفولاذ تدعى Fatigue tool . و يمكن باستخدام هذه الأداة حساب العمر التعبّي و فق طريقتين , هما اجهاد- عدد دورات و انفعال - عدد دورات مع الأخذ بالحسبان تأثير الإجهاد المتوسط وذلك إما وفق نظرية Goodman أو Soderberg أو Gerber أو منحنيات الإجهاد المتوسط أو يمكن حساب العمر التعبّي من دون الأخذ بالحسبان أي من هذه النظريات.

وتساعد هذه الأداة أيضاً على حساب مقدار التحطم التعبّي , و حساب عامل الأمان التعبّي و ترسم منحنيّاً يظهر حساسية التعب , لذلك يعد برنامج ANSYS Workbench فاعل في نمذجة العمر التعبّي .

3.3.1 مراحل النمذجة:

تمّت نمذجة جائز طوله 1000mm عرضه 100mm , و ارتفاعه 75mm, ويحوي شقاً جانبياً في منتصفه كما يظهر في الشكل (38).



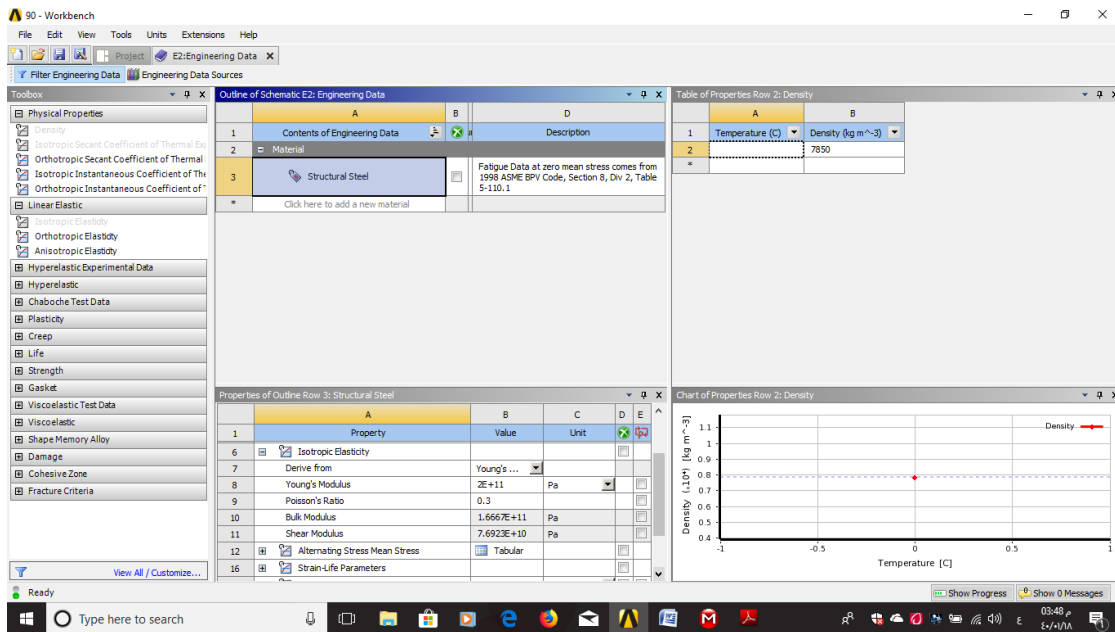
الشكل (38) مقطع جانبي للجائز يظهر فيه موقع الشق.

وتمّ تغيير كل من زاوية الشق و عمق الشق لدراسة تأثير مقاس الشق على العمر التعبّي . في هذه الدراسة تمّ تغيير ارتفاع الشق H ضمن القيم (2, 5, 10, 20, 25) mm و تمّ تغيير الزوايا ضمن القيم (15, 30, 45, 60, 75, 90) درجة , فضلاً عن دراسة جائز سليم من دون شق.

أجريت النمذجة على سولفر Static Structural , وفق الخطوات التالية:

*المرحلة الأولى اختيارالمادة :

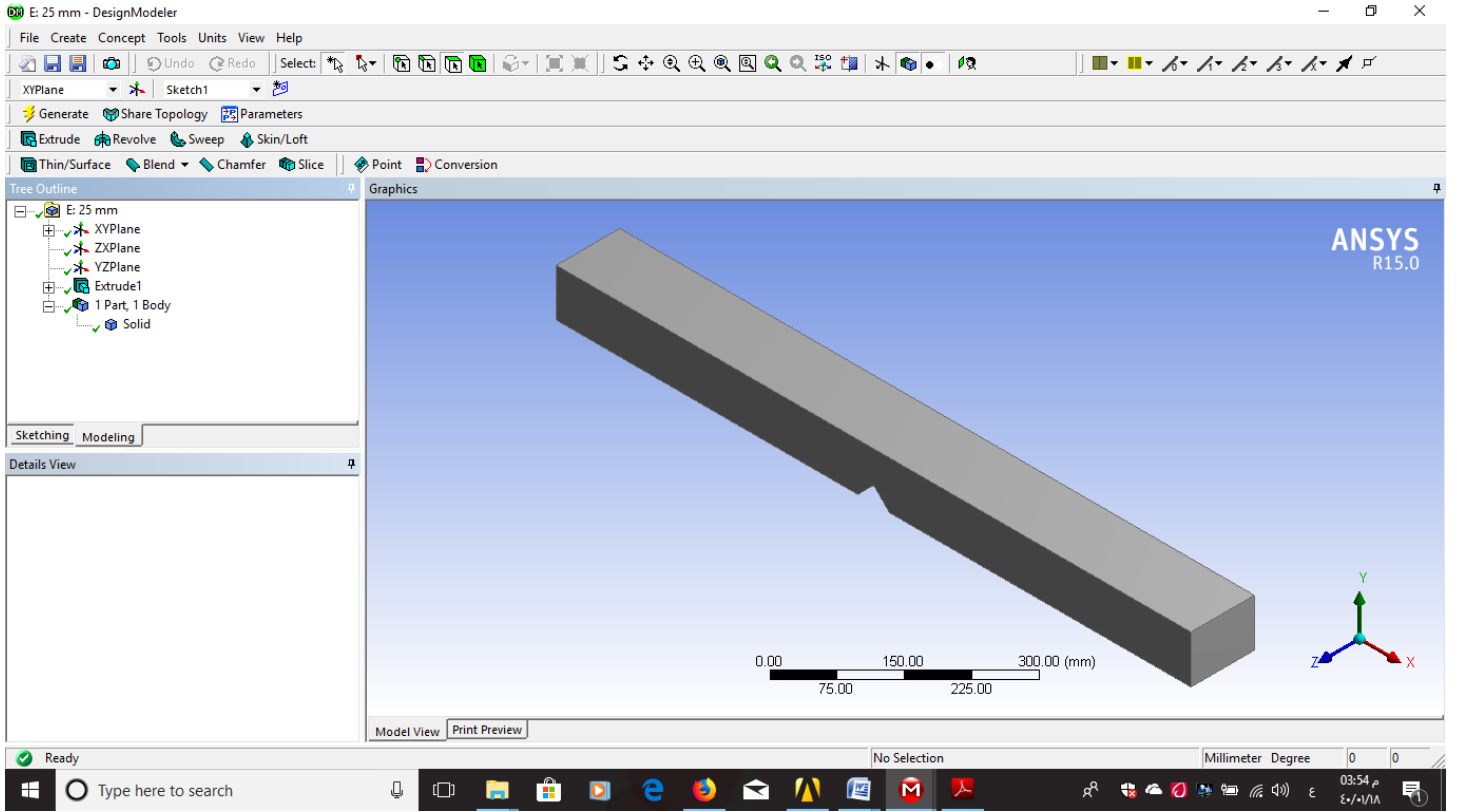
المادة المصنوع منها الجائز هي فولاذ إنشائي الذي له الخواص التالية: معامل يونغ 200 Gpa و معامل بواسن 0.3 , و إجهاد الخضوع 250Mpa تدعى هذه المرحلة في ANSYS Workbench با Engineering Data و يكون مادة الفولاذ الإنشائي معرفة فيها بشكل افتراضي لذلك لا يوجد حاجة لتغييرها.



الشكل (39) واجهة اختيار المادة ضمن ANSYS Workbench

*المرحلة الثانية رسم الشكل الهندسي:

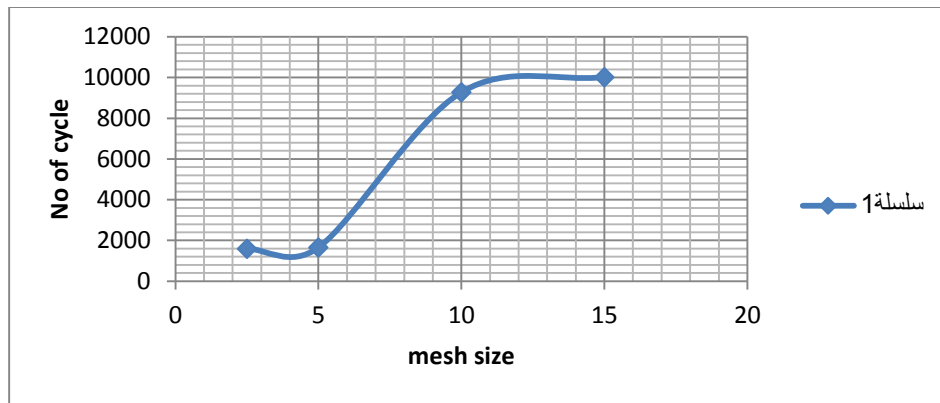
تدعى هذه المرحلة Geometry , ويوفر فيها ANSYS Workbench أدوات رسم مرنة تساعد على رسم الجائز من دون الحاجة لاستخدام برامج رسم مساعدة.



الشكل (40) نموذج الجائز المرسوم ضمن ANSYS Workbench.

*المرحلة الثالثة توليد الشبكة:

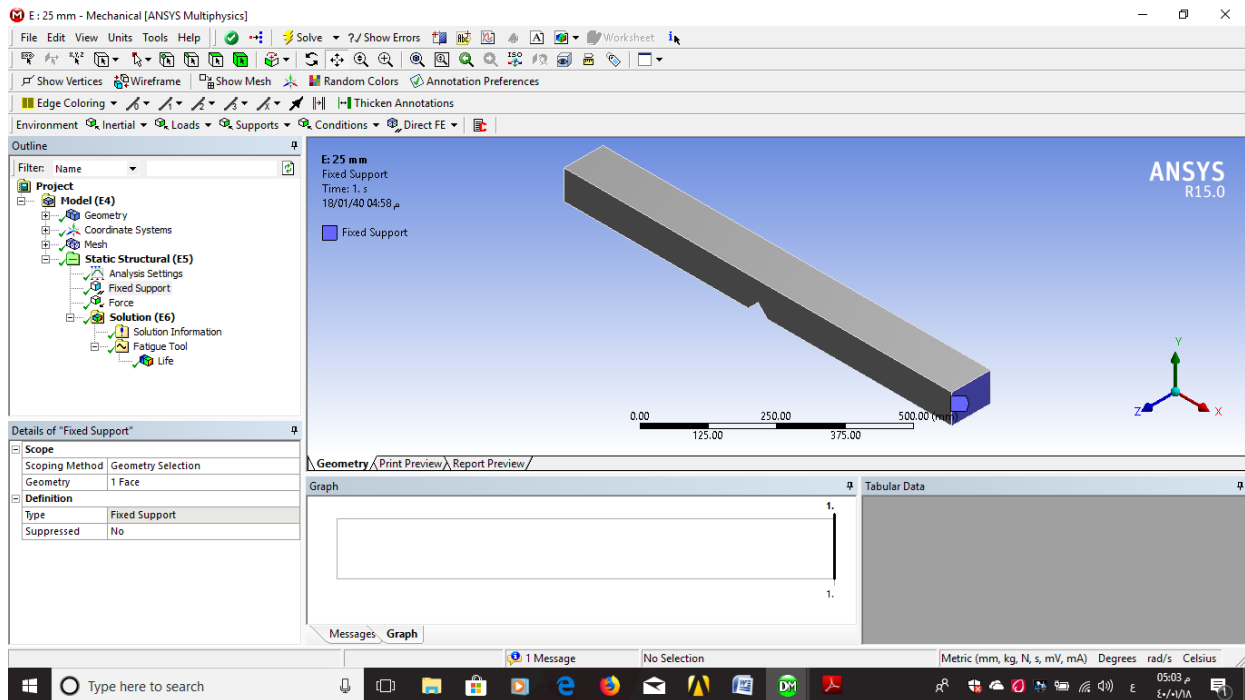
بعد الانتهاء من مرحلة Geometry يتم الانتقال إلى مرحلة Model, و ضمن هذه المرحلة يتم توليد شبكة العناصر المنتهية. استخدم لهذا النموذج عناصر صلبة ثلاثية الأبعاد بثلاث درجات حرية عند كل عقدة وشبكة حرة , و للحصول على حجم عناصر مناسب يعطي حلاً دقيقاً تمّ اجراء دراسة تقاربية للحصول على الحجم المثالي لعناصر الشبكة و بناء على هذه الدراسة تمّ التوصل إلى أن 5 mm هو الحجم الأمثل لعناصر الشبكة.



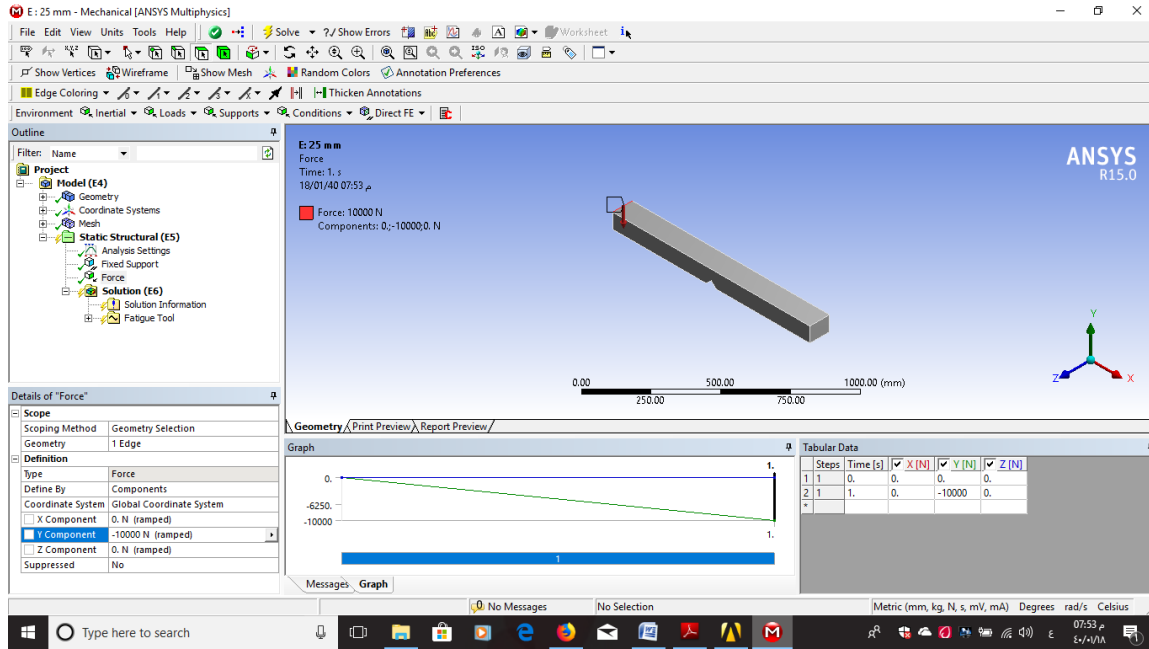
الشكل (41) الدراسة التقاربية.

*المرحلة الرابعة وضع الشروط الحدية:

يتم في هذه المرحلة تثبيت طرف الجائز بمسند ثابت بسيط و تطبيق قوة ستاتيكية ثابتة باتجاه المحور Y على الطرف الثاني المقابل للمسند الثابت.



الشكل (42) تطبيق المسند الثابت.

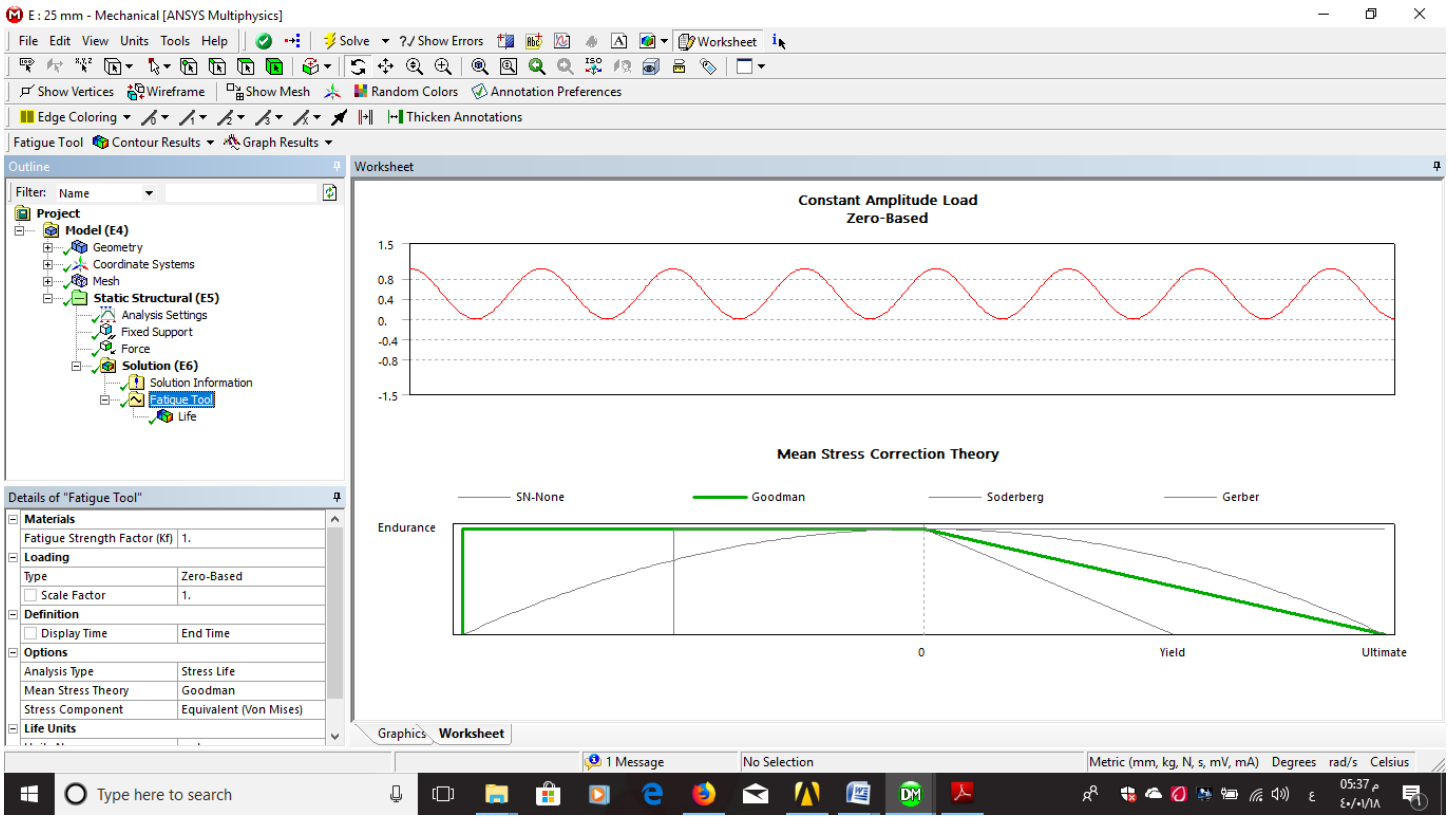


الشكل 43 تطبيق القوة

قبل إجراء تحليل التعب تمّ إجراء تحليل ستاتيكي لمعرفة مجال القوى التي سيتم تطبيقها و تبقى تشوهات الجائز ضمن المجال المرن , و بناء على هذا التحليل كان مجال القوى هو من 8KN إلى 14KN.

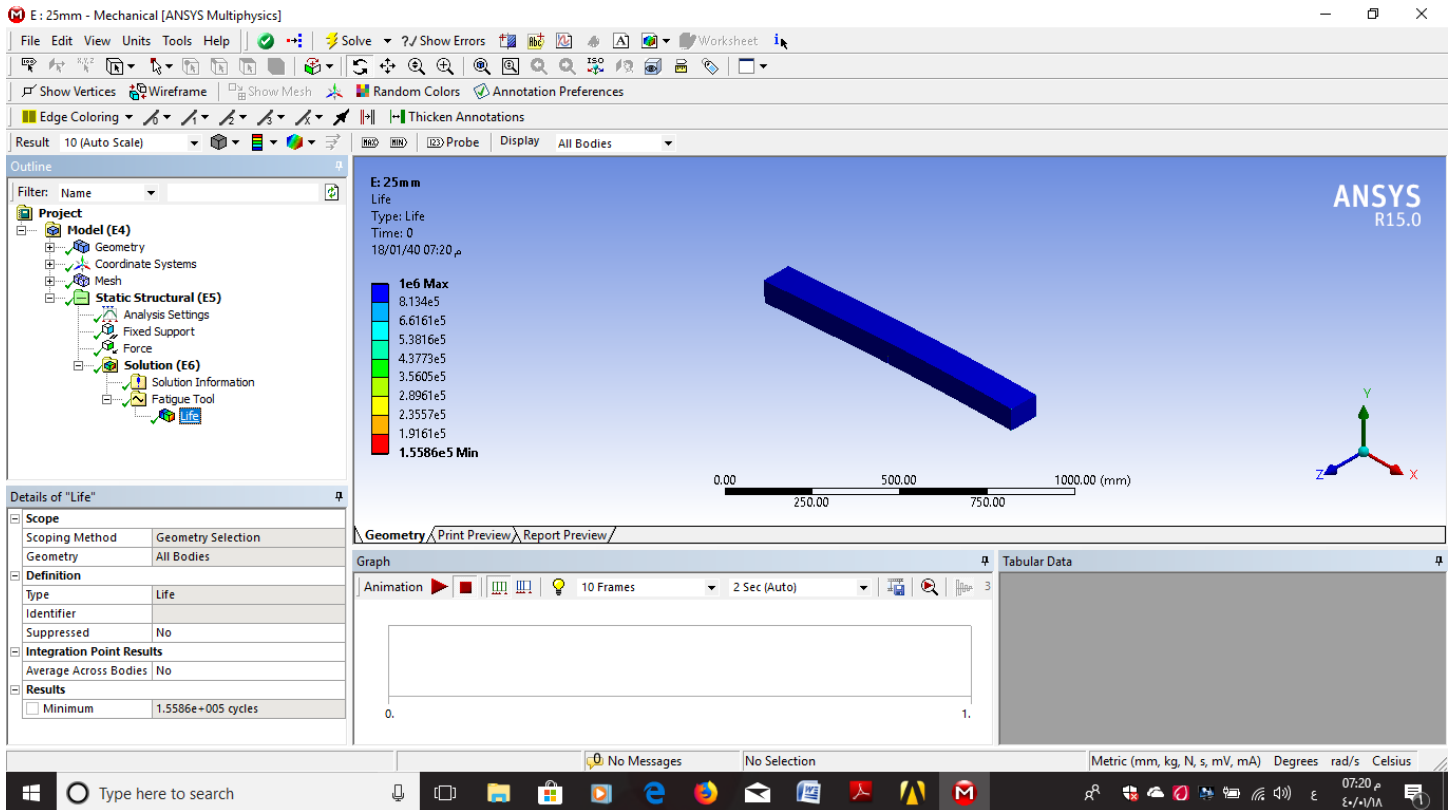
*المرحلة الخامسة تحليل التعب:

بعد الانتهاء من توليد شبكة العناصر المنتهية ، و تطبيق المسند الثابت و القوة الستاتيكية يتم إدراج أداة التعب Fatigue tool ضمن مرحلة الحل وتحتاج هذه الأداة لضبط مؤثرات عدة منها نوع دورة التحميل ، و نوع تحليل التعب هل هو إجهاد-عدد دورات أو انفعال -عدد دورات ونوع نظرية الإجهاد المتوسط. ضمن هذه الدراسة تم اختيار دورة تحميل نبضية أي معدل $R=0$ وتم اختيار نظرية Goodman كنظرية تصحيح للإجهاد المتوسط.

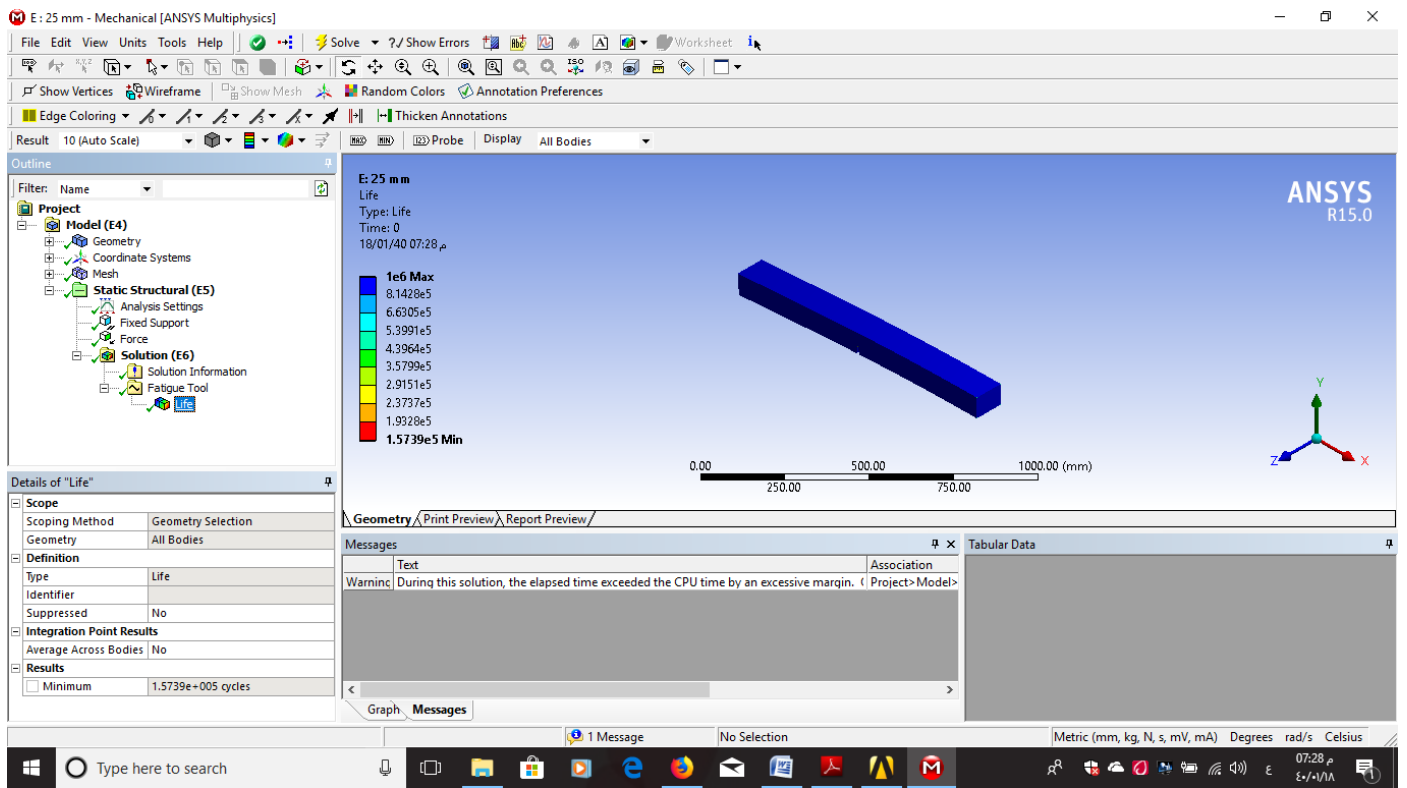


الشكل(44) ضبط مؤثرات أداة التعب.

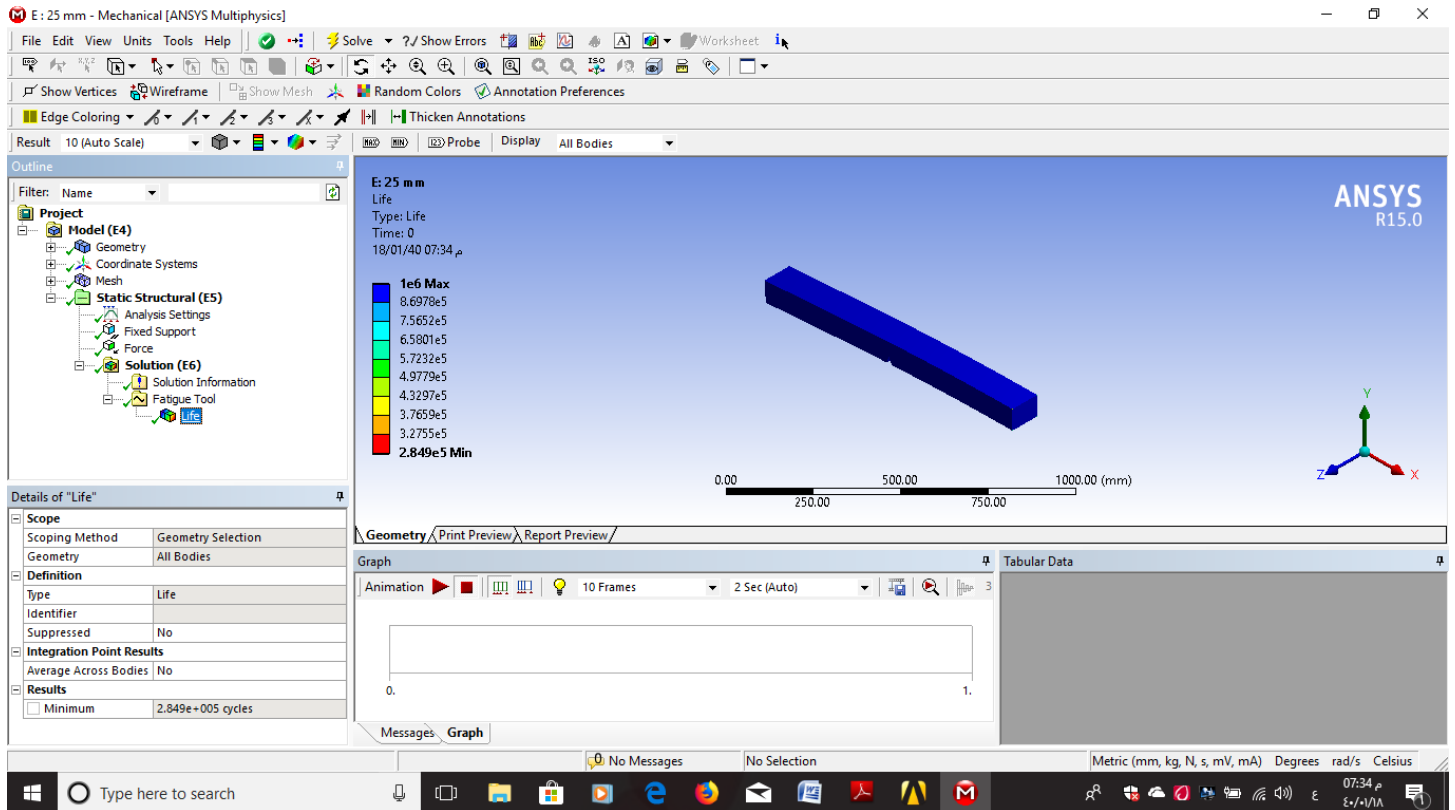
و من بعدها تم حساب العمر التعبي لكل الجوائز عند الزوايا (15, 30, 45, 60, 75, 90) درجة و عند أعماق H (2, 5, 10, 20, 25) mm و عند القوى تقع ضمن مجال 8KN إلى 14KN و ذلك لتوليد قاعدة بيانات كافية من أجل تدريب الشبكة العصبونية في المرحلة التالية .



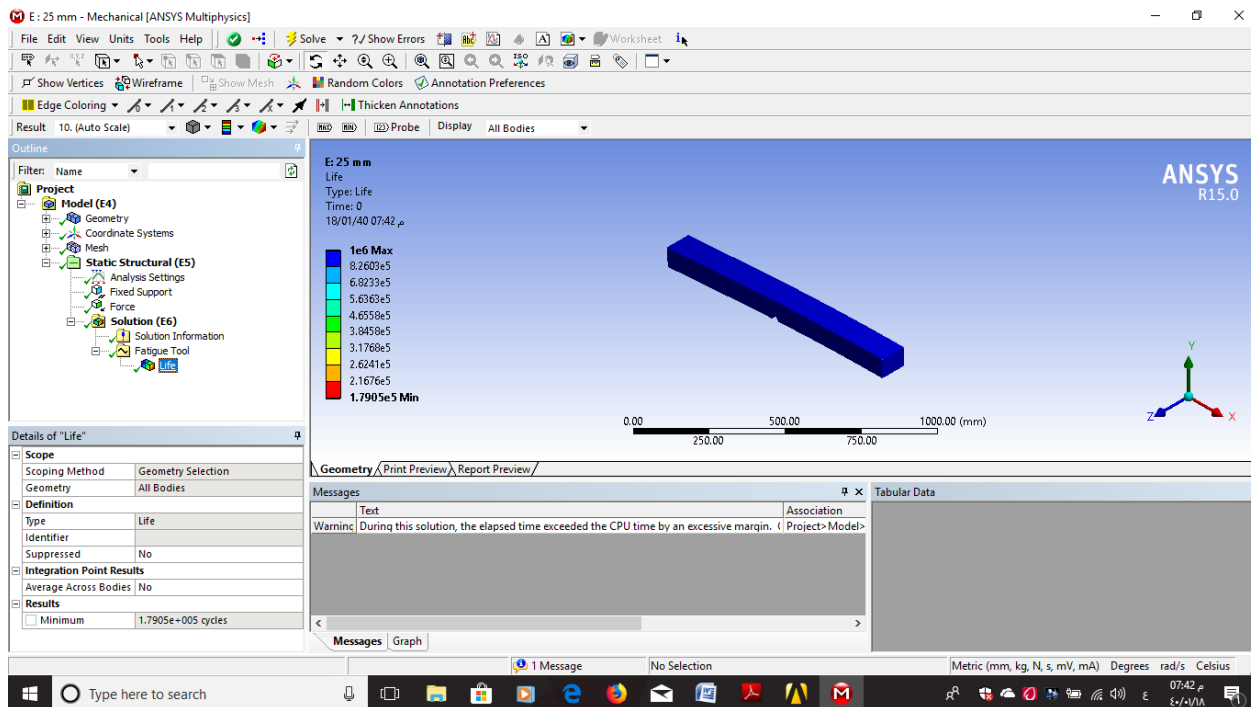
الشكل (45) العمر التعبي لجائز بزاوية 15 ، وعمق 25mm ، وعند القوة 10KN .



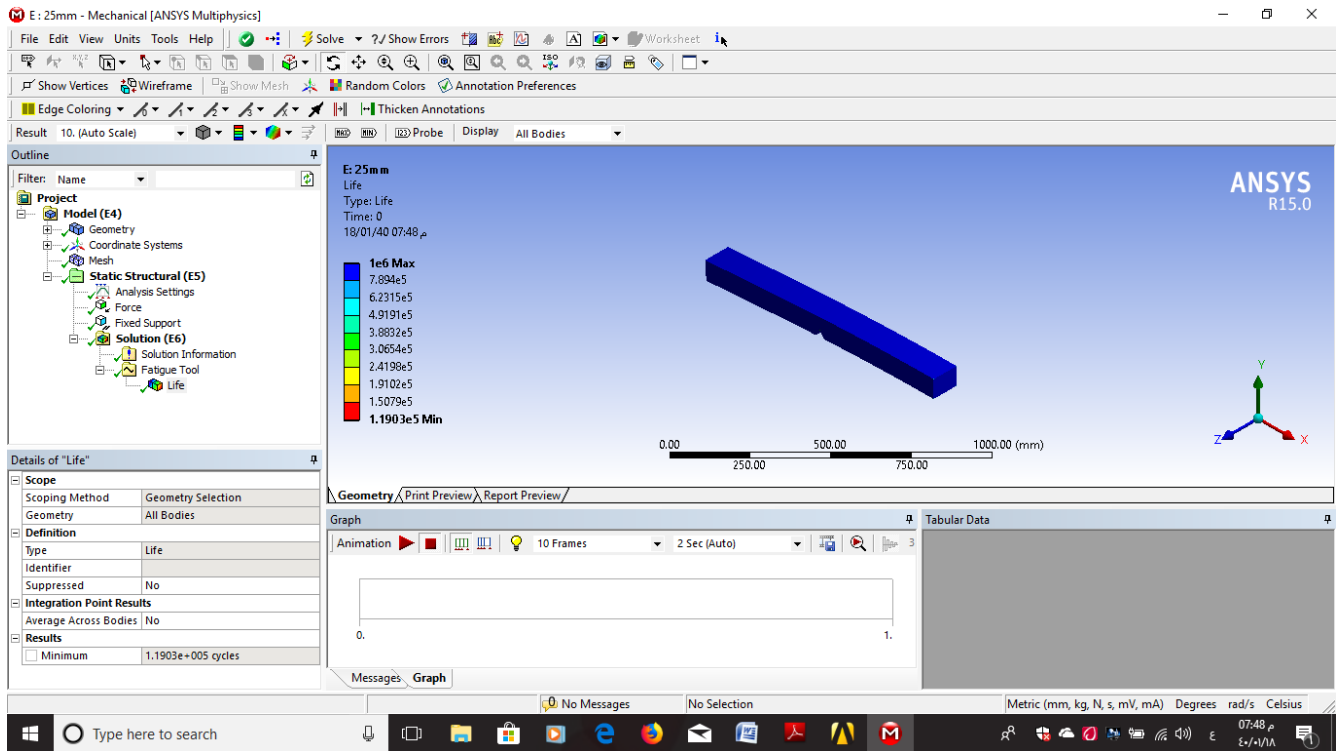
الشكل (46) العمر التعبي لجائز بزاوية 30 ، وعمق 25mm ، وعند القوة 10KN.



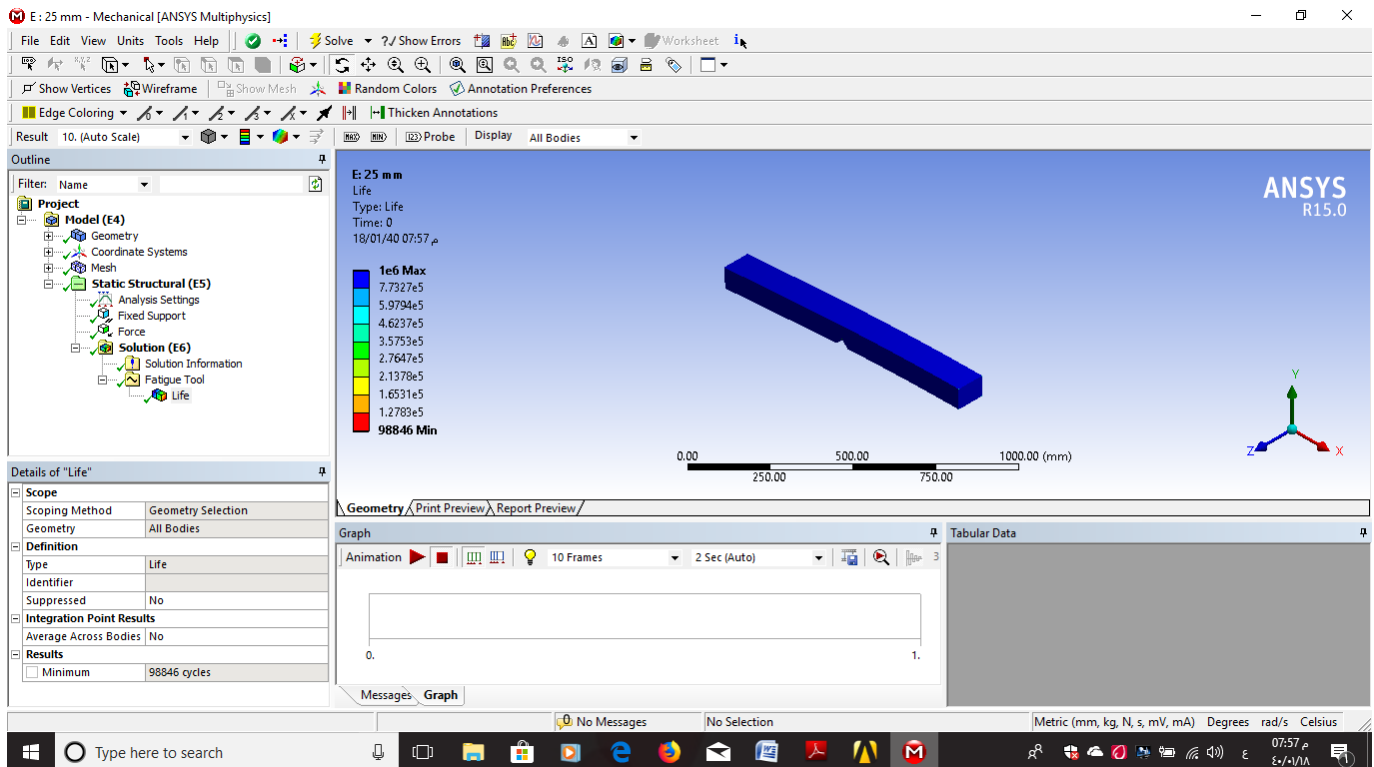
الشكل (47) العمر التعبي لجائز بزاوية 45 , وعمق 25mm , وعند القوة 10KN.



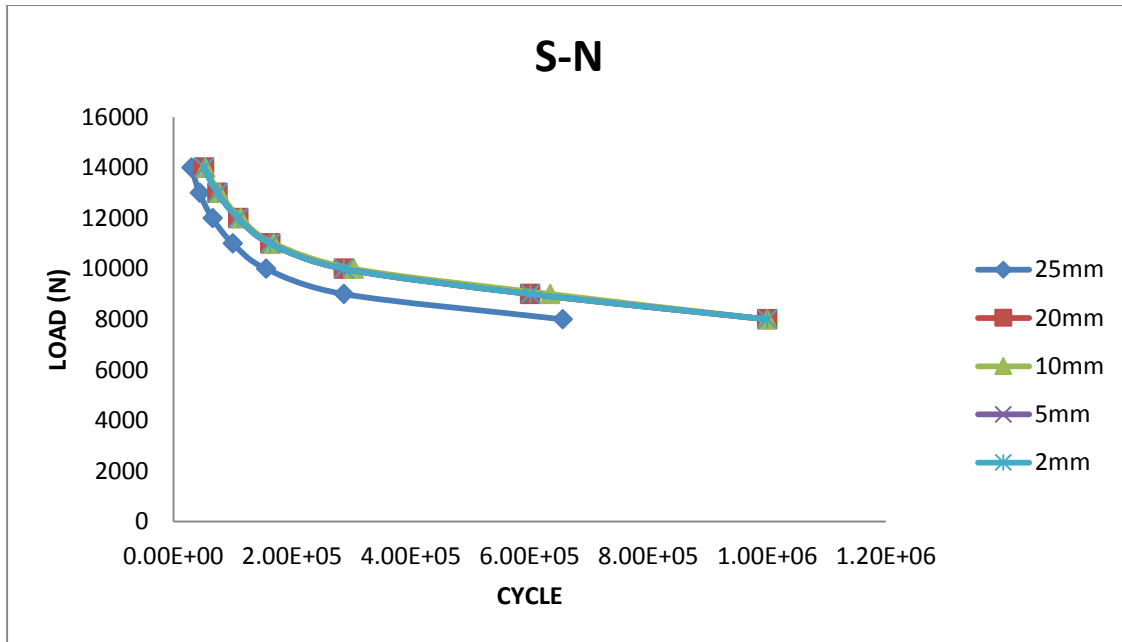
الشكل (48) العمر التعبي لجائز بزاوية 60 , وعمق 25mm , وعند القوة 10KN.



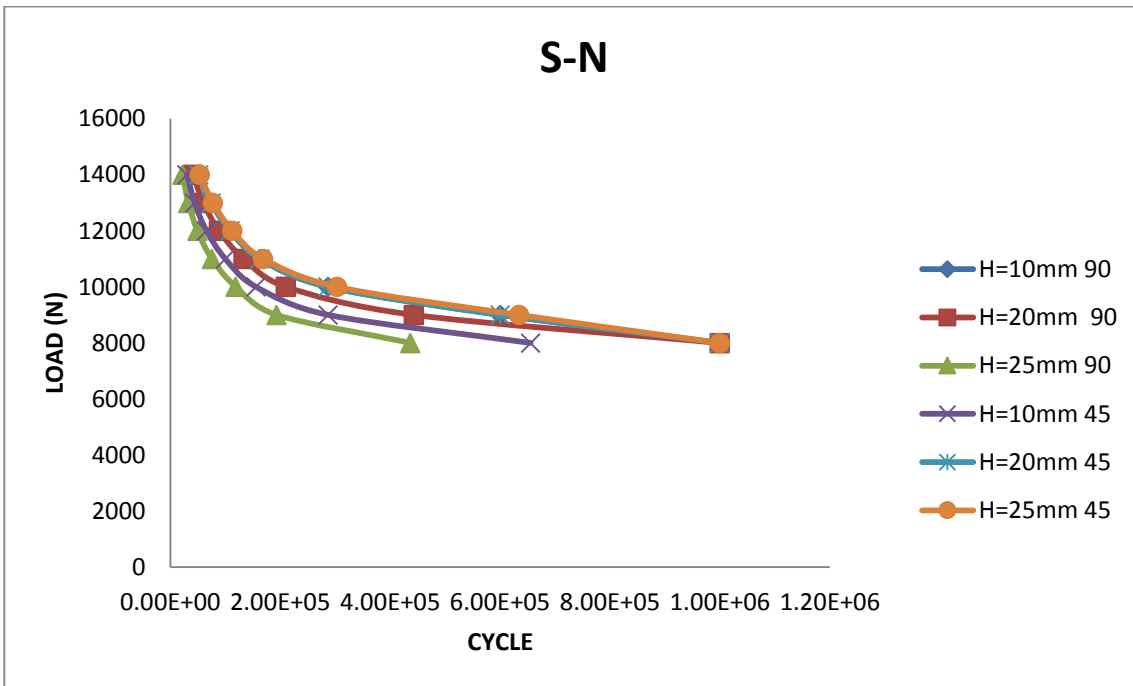
الشكل (49) العمر التعبي لجائز بزاوية 75 وعمق 25mm وعند القوة 10kN.



الشكل (50) العمر التعبي لجائز بزاوية 90 , وعمق 25mm , وعند القوة 10kN



الشكل (51) مخطط العمر التعب للزاوية 90 عند أعماق مختلفة.



الشكل (52) مقارنة بين مخطط العمر التعب للزاويا 90 و 45.

تظهر هذه المخططات أن عمق الشق يعطي تأثيراً على العمر التعبّي عند الأعماق 20mm و 25mm وهذا بسبب أن معامل تركيز الإجهاد يزداد بازدياد عمق الشق , مما يؤدي إلى نقصان في العمر التعبّي.

الفصل الرابع

استخدام الشبكات العصبونية

الصناعية في حساب العمر

التعبى.

مقدمة:

يُعدُّ استخدام نموذج الشبكات العصبونية الصناعية أقل كلفة، و أكثر فاعلية، و وسيلة بديلة بموثوقية عالية لحساب خواص التعب للمادة باستخدام البيانات التي تمَّ الحصول عليها من الاختبارات الثابتة. وظفت منهجية الشبكات العصبونية أيضاً في حساب البارامترات المتعلقة بعملية تصنيع المواد.و استخدمت أيضاً هذه الطريقة للبحث واستنتاج الطريقة التي تؤثر في خواص المادة عند تغير بارامترات العناصر الرئيسة التي تتحكم بهذه الخواص. و حث العديد من الباحثين على تطبيقات مماثلة في دراستهم مثل[8]

(Bucar et al., 2006; Genel, 2004; Han, 1995; Lee et al., 1999; Liao et al., 2008; Malinov et al., 2001; Mathew et al., 2007; Mathur et al. 2007; Park & Kang, 2007; Pleune & Chopra, 2000; Srinivasan et al., 2003; Venkatesh & Rack, 1999).

بمجرد تدريب نموذج الشبكة بصورة مناسبة تصبح الشبكة قادرة على توفير حساب مناسب للخروج المطلوب , وذلك باستخدام بارامترات الدخل المعطاة.

4.1- لمحة عامة عن الشبكات العصبونية الصناعية :

طبقت الشبكات العصبونية الصناعية في السنوات الأخيرة في العديد من المجالات , واستخدمت كتابع تقريبي أو حساب. تعد الشبكة العصبونية الصناعية ملكة تقنية معالجة المعلومات حيث فهي جيدة في التعامل مع المسائل التي تملك علاقات غير خطية معقدة موجودة بين متغيرات الدخل والخروج. تشابه الفكرة الأساسية لطريقة الشبكة العصبونية وظيفة الدماغ البشري. تعتمد الشبكات العصبونية الصناعية على بنية ووظيفة الجهاز العصبي البيولوجي. العصبونات هي الوحدة الأساسية أو وحدة البناء للدماغ. يتألف الدماغ البشري من 10^{11} عصبوناً يقود حوالي 1000 تريليون ارتباط عصبي. يستقبل العصبون العديد من إشارات الدخل , لكنه ينتج إشارة خرج واحدة . تتكون الشبكة العصبونية ذات الانتشار العكسي من عدد كبير من العصبونات المترابطة. تترتب العصبونات في طبقات : طبقة دخل واحدة، و طبقة خرج واحدة ، وطبقة

واحدة أو أكثر مخفية بين طبقة الدخل وطبقة الخرج. يرتبط كل عصبون في طبقة الدخل بكل عصبونات الطبقة المخفية والتي بدورها ترتبط بعصبون في طبقة الخرج. يعرف هذا النوع من الشبكات عادة بالمتعرف متعدد الطبقات ويتخسر MLP . في شبكة MLP التقليدية لا يوجد روابط بين العصبونات في الطبقة نفسها. يعرف الارتباط بين عصبونين بالمشبك. ويملك كل مشبك وزن والذي يؤثر على خرج العصبون. تستقبل العصبونات في طبقة الدخل إشارات دخل من كل نموذج تدريب. تكون خرج العصبونات في طبقة الدخل هي نفسها إشارات دخل لعصبونات الطبقة المخفية. تستقبل عصبونات الطبقة المخفية خرج عصبونات طبقة الدخل. ومن ثم تجري هذه الإشارة ضمن توابع تفعيل غير خطية لإنتاج خرج لكل عصبون في الطبقة المخفية. يرسل خرج عصبونات الطبقة المخفية الأخيرة بدوره كدخل لكل عصبون في طبقة الخرج. كلما زاد عدد الطبقات المخفية زاد تعقيد النموذج. يقارن الخرج المحسوب مع الخرج المطلوب , وترسل الأخطاء إلى الطبقة المخفية لتحسين الحساب. توصف بنية الشبكة العصبونية الصناعية بعدد الطبقات المخفية، بعدد العصبونات في كل طبقة، شكل تابع التنشيط المستخدم للعلاقة غير الخطية بين الدخل والخرج ، وبارامترات أخرى مستخدمة في الشبكة.

يتطلب تنفيذ الشبكة العصبونية صنع ثلاثة قرارات , و هي البنية أي بنية الشبكة، نوع توابع التنشيط، وخوارزمية التعليم. تتعامل بنية الشبكة العصبونية مع عدد الطبقات المخفية المستخدمة في الشبكة العصبونية , فضلاً عن العقد المستخدمة في كل طبقة. يشير تابع التنشيط إلى تابع النقل للعصبونات في كل طبقة ماعدا طبقة الدخل والتي تستخدم تابع تنشيط مماثل. يشير مفهوم التعليم إلى استخدام خوارزمية تعليم مناسبة في عملية تدريب الشبكة.

يجب أن يتم تعريف بنية الشبكة قبل التدريب. وكقاعدة عامة يجب أن يكون عدد العصبونات كبيراً و كافياً لرسم العلاقة الضمنية الموجودة بين متغيرات الدخل والخرج للمسألة المعطاة. ومن جهة أخرى، يجب ألا يكون عدد العصبونات كبيراً بشكل زائد , لأن ذلك يجعل الأوزان لا تعطي حساباً دقيقاً من بيانات التدريب المتاحة.

بالاعتماد على بنية الشبكة العصبونية المصممة المستخدمة في مسألة محددة يمكن تصميم شبكتين عصبونيتين عامتين وهما شبكات عصبونية ذات تغذية رجعية وذات تغذية أمامية.

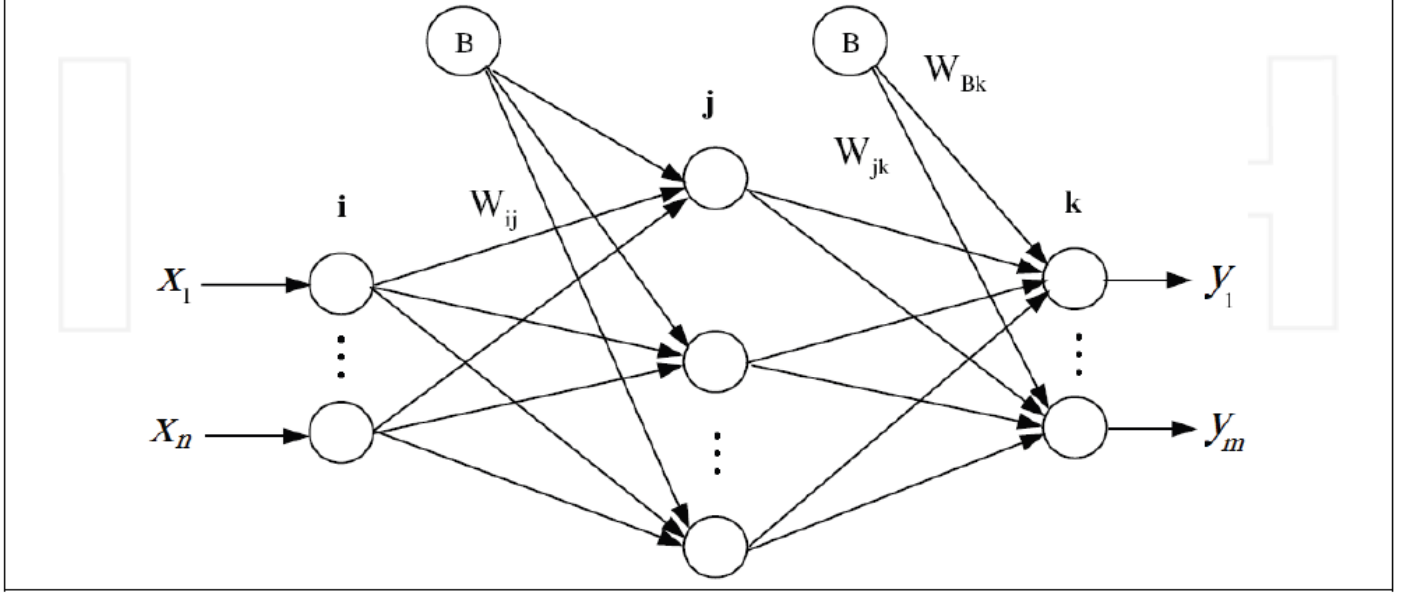
يكون استخدام الخوارزميات في الشبكة العصبونية ذات التغذية الأمامية العامة أكثر ، إذ تكون هذه الخوارزمية بسيطة من حيث البنية و سهولة التحليل الرياضي. مخطط الشبكة العصبونية الصناعية ذات الانتشار العكسي ذات القدرة الكبيرة على التعلم في التدريب ورسم العلاقات بين الدخل والخرج هي أكثر نموذج شبكة مستخدم (Koker et al., 2007).

ينتمي تطبيق نموذج الشبكة العصبونية الصناعية في علم المواد إلى اختصاص مبتكر من موضوع المواد القياسية. الشبكة العصبونية الصناعية ANN هي شبكات مترابطة متوازية لعناصر حاسوبية بسيطة والتي تقوم بالتفاعل مع الأجسام في العالم الحقيقي بطريقة مشابهة لنظام العصبي الحيوي (Muc & Gurba, 2001). إن الشبكة العصبونية الصناعية هي نموذج موجه بحيث تمثل العقد مجموعة من وحدات معالجة تدعى العصبونات، أو عناصر معالجة، وتمثل الارتباطات قنوات تدفق المعلومات. يملك كل ارتباط بين عصبونين قيمة مساعدة تدعى الوزن (Wij) والذي يحدد قوة الارتباط من الوحدة i إلى الوحدة j (Bahrami et al., 2005). يعتمد اختيار نوع محدد من الشبكات لمحاكاة مسألة معقدة غير خطية على تنوع العوامل مثل الدقة المطلوبة والمعلومات المسبقة عن الدخل والخرج (Mousavi Anijdan et al, 2005). أكثر نوع لشبكة العصبونية الصناعية المستخدم في هندسة علم المواد للأبحاث هو المستقبل متعدد الطبقات ذو التغذية الأمامية والذي ترتب فيه العصبونات ضمن طبقة دخل واحدة، طبقة أو أكثر مخفية ، وطبقة خرج واحدة.

(Muc & Gurba, 2001; Bahrami et al., 2005; Mousavi Anijdan et al., 2005; Song et al., 1995).

يعطي الشكل (53) وصفاً تخطيطياً لشبكة تغذية أمامية مكونة من ثلاث طبقات. وذلك بافتراض ان الشبكة تتكون من عصبونات n,p,m في طبقة الدخل ، والطبقة المخفية ، وطبقة الخرج على التسلسل، يعطى شكل دخل (Zj) إلى العقدة j في الطبقات المخفية بالعلاقة:

$$Z_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} X_i + b_j \quad j= 1, 2, 3 \dots p \quad (1)$$



الشكل (53) مخطط يصف ترتيب الشبكة العصبونية الصناعية.

حيث X_i دخل العقدة j لطبقة الدخل، الوزن المرتبط الذي يربط العقدة i لطبقة الدخل والعقدة j للطبقة المخفية، الانحياز المرتبط بالعقدة j في الطبقة المخفية. لا تأخذ عصبونات الانحياز أي دخل وتقوم بإرسال قيمة خرج ثابتة خلال الأوزان المرتبطة بعصبونات الطبقة الآتية.

يتألف كل عصبون من تابع تحويل يعبر عن مستوى التنشيط الداخلي. يحدد الخرج (h) من العصبون بواسطة تحويل دخله باستخدام تابع تحويل مناسب كالآتي:

$$h_j = f(\sum_{i=1}^n W_{ij} x_{ij} + b_j), \quad j = 1, 2, 3, \dots, p \quad (2)$$

بشكل عام، توابع التنشيط هي تابع سيغمويد، تابع مماس القطع الزائد، والتابع الخطي

.(Fogel, 1994; Wong & Y. W. Wong, 1995.)

في طبقة الدخل ، يعطى دخل الشبكة Z_k للعقدة k بالعلاقة:

$$Z_K = \sum_{j=1}^p W_{jk} h_j + b_k \quad , \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

ويكتب الخرج y_k للعقد k في طبقة الخرج بالعلاقة:

$$y_k = g \left(\sum_{j=1}^p W_{kj} h_j + b_k \right) \quad , \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

لحساب درجة الدقة للشبكة تقسم قاعدة البيانات إلى مجموعتين فرعيتين: تستخدم ما يسمى مرحلة التعليم لتحديد الأوزان المرتبطة بكل ارتباط (مرحلة التدريب)، ومرحلة الاختبار أو التحقق من الصحة والتي تتحقق من الشبكة قادرة على حساب الأمثلة التي لم تدرب عليها من قبل (مرحلة التحقق). تتضمن مرحلة التدريب تحديد الأوزان التي تنتج أفضل ملائمة للدخل مع الخرج المحسوب خلال كل مجموعة بيانات التدريب. ومن ثم يتم إنتاج شعاع الدخل في طبقة الدخل ، و ينتشر خلال الشبكة ، و كل ذلك من خلال طبقة الخرج. ومن ثم يستخدم الاختلاف بين شعاع الخرج المحسوب والخرج المطلوب لتحديد تابع الخطأ المناسب. يسمى هذا النوع من التدريب بخوارزمية التدريب ذات الانتشار العكسي (Mousavi Anijdan, 2005).

هناك العديد من المتغيرات التي تؤثر على تدريب الشبكة العصبونية الصناعية ANN. هذه المتغيرات هي عدد نقاط بيانات التدريب (N)، و حجم الشبكة (عدد الطبقات المخفية والعصبونات في كل طبقة) ، و عدد مرات تكرار التدريب أو الفترات (c) . لإيجاد أفضل مجموعة من هذه المتغيرات والبارامترات يجب تصنيف هذه المتغيرات ، و من ثم اختيار أفضل مجموعة.

تدعى أهم خطوة في بناء نموذج الشبكة العصبونية الصناعية ، بالتدريب وهي عملية ملائمة الشبكة مع البيانات التجريبية وهي عملية حاسوبية قوية. يتضمن التعليم في نموذج الشبكات العصبونية الصناعية MLP خوارزمية النزول التدريجي في الطريقة التفاعلية وذلك لتصغير الجذر التربيعي للأخطاء بين الخرج الفعلي للشبكة العصبونية والخرج المطلوب الناتج من الدخل المعطى. يتم إجراء التدريب أولاً في شبكات MLP ، و من ثم يتبع بعملية عكسية. تنتج الشبكة خرجها الفعلي لنموذج محدد من بيانات الدخل وباستخدام أوزان مرتبطة آنية.

بشكل تسلسلي، تنفذ العملية العكسية لتعديل الأوزان في محاولة لتتقيد الأخطاء بين الخرج الفعلي والمطلوب. يتأثر تحديث الأوزان ببارامترين ، هما: ما يسمى معدل التعلم η ومعامل الزخم α .

يعرف معدل التعلم سرعة التغيرات التي تؤثر على الأوزان المرتبطة. يقدم معامل الزخم تحسناً لعملية التعلم لجعل عملية التعلم أسرع عن طريق إضافة مدة لتعديل الأوزان تكون متناسبة مع التغير السابق للوزن.

يحسب الخطأ عن طريق المعادلة (5) والتي تعرف بمتوسط الخطأ التربيعي. هنا يرمز N الرقم الكلي للعينات في مجموعة التدريب:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (5)$$

بمجرد تقديم كل عينة دخل للشبكة العصبونية ووصول خطأ الشبكة العصبونية للقيمة المحسوبة بالمعادلة (5) عندها يبدأ حساب عينة الدخل، ينشر هذا الخطأ بشكل عكسي خلال الشبكي وتعديل الأوزان اعتماداً على ما يعرف الانتشار العكسي لقاعدة تعلم الخطأ. يتم تقديم عينة الدخل التالية إلى الشبكة ، وتكرر العملية حتى تأخذ كل عينات الدخل فرصة إدخالها للشبكة. عندما يتم إدخال عينات الدخل كلها إلى الشبكة مرة واحدة عندها يمكن القول إن مرحلة قد اكتملت في عملية التدريب. تكرر هذه المسألة المطلوبة. أخيراً ، تستخدم بيانات الاختبار لتحقيق من العلاقة غير الخطية بين مجموعة بيانات الدخل والخرج.

يمكن استخدام نموذج الشبكات العصبونية الصناعية ANN للاستيفاء الدقيق ضمن مجال متغيرات الدخل المستخدمة في بناء النموذج. بقدر ما أن الاستقرار خلف مجال البيانات التجريبية المستخدمة في مجموعة التدريب، يجب الحذر من عدم وضع ثقة كبيرة في خرج الشبكة العصبونية ، لأنها يمكن ألا تنتج نتائج موثوقة لبيانات الدخل [8].

4.1.1 خوارزميات تدريب الشبكة العصبونية الصناعية:

تستخدم الشبكات العصبونية الصناعية كأداة تخصصية لأنواع عدة من المسائل غير الخطية. من أجل تصميم شبكة عصبونية لمسألة محددة ، فإن أول ماتحتاجه هو خوارزمية التدريب.

يعتمد تابع الشبكة العصبونية على العينات , لذا من الضروري تحضير مجموعة من الأمثلة تمثل المسألة على شكل بيانات دخل وخرج. خلال مرحلة التدريب، يتم تعديل الأوزان و الانحيازات في الشبكة لتصغير الأخطاء , و للحصول على أداء عالٍ من أجل المسألة.

يوجد العديد من خوارزميات التدريب المستخدمة في تطبيقات الشبكة العصبونية الصناعية. ومن الطبيعي ألا تكون مهمة بسيطة التنبأ أي من خوارزميات التدريب ستكون مناسبة أكثر لأي مسألة. وعادة يعتمد ذلك على عوامل عدة , مثل : البنية الهندسية للشبكة، والتطبيق المتوفر (تميز عينات، التصنيف، أو تابع تقريب). ويوجد أيضاً قضايا أخرى قد تكون مهمة , مثل: بنية البيانات و تماثل مجموعة التدريب، كل ذلك يمكن أن يؤثر على دقة النظام والأداء.

من الضروري خلال مرحلة التدريب تجنب التدريب الزائد في محاولة للحصول على أفضل ملائمة. حيث هذه مشكلة محتملة عند استخدام طرق التراجع غير الخطي الفاعلة في النمذجة بالشبكة العصبونية الصناعية. يميل التدريب الزائد لنموذج الشبكة العصبونية إلى تذكر العلاقة بين متغيرات الدخل والخرج , ولذلك تضعف القدرة على التعميم (Mathew et al.;2008).

خلال مدة التدريب، تتغير الأوزان بشكل مستمر حتى يتم تصغير الاختلاف بين الخرج المحسوب والقيم التجريبية , بمعنى يعرف تابع الخطأ على أنه مجموع مربعات الاختلاف بين القيم المحسوبة والتجريبية , وذلك حتى تصل كل عينات الدخل إلى الحد المطلوب أو يكتمل عدد عمليات التدريب أو الفترات. خوارزمية Levenburg-Marquardt , خوارزمية Quasi-Newton , وطريقة Steepest-Descent هي بعض تقنيات الأمثلة المستخدمة في تدريب الشبكات العصبونية. من كل هذه الخوارزميات أكثر خوارزمية تدريب مستخدمة في شبكة MLP هي خوارزمية Levenburg-Marquardt وذلك بسبب سرعتها على التجميع.

تتمتع خوارزمية التعليم ذات الانتشار العكسي التي تعتمد بالدرجة الأولى على ميل خطأ الشبكة بميزة بساطة تنفيذها , فضلاً عن سهولة استخدامها. حتى الآن تعاني هذه الخوارزمية من سيئة وحيدة هي البطء في التجميع. إن خوارزمية Levenburg-Marquardt هي خطوة لحل مشكل بطء التجميع لطريقة الانتشار العكسي BP (Hagan & Menhaj, 1994). تعتمد طريقة Levenburg-Marquardt بالدرجة الثانية على ميل خطأ الشبكة.

حيث إن سرعة التجميع هو نتيجة لحظية من حقيقة أن هذه الخوارزمية لها ميزة في استخدامها فقط كتقريب لمصفوفة Hessian بدلاً من عمل هذا من خلال الحساب الحاسوبي لهذه المصفوفة. وتتجنب خوارزمية Levenburg-Marquardt خصوصية هذه المصفوفة عن طريق إضافة مدة صغيرة في الحساب التقريبي لهذه المصفوفة. من المعروف أن أداء خوارزمية Levenburg-Marquardt أكثر سرعة من قاعدة الانتشار العكسي BP التي تحتاج ذاكرة أكبر. وجدت خوارزمية Levenburg-Marquardt لتكون أسرع خوارزمية تدريب إلى هذا اليوم.

بمجرد انتهاء تدريب الشبكة، يجب فحص قدرة الشبكة المدربة على التعميم باستخدام بيانات دخل خرج غير موجودة في مجموعة التدريب. تعرف هذه المجموعة عادة بمجموعة الاختبار أو مجموعة التحقق. تحضر هذه المجموعة من خلال أخذ 20 إلى 25 % من مجموعة البيانات الأصلية بشكل عشوائي. ولقد تم الإشارة إلى أنه يجب أن يكون كل نموذج في مجموعة الاختبار يقع ضمن المجال المعرف بواسطة كل مجموعة التدريب [8].

4.2- بعض الملاحظات في استخدام الشبكة العصبونية الصناعية:

لتطوير أداء الشبكة العصبونية الصناعية، يجب أن تتوفر كمية كافية من البيانات التجريبية. خلال فترة التدريب والاختبار يجب اختيار أفضل خوارزمية تعليم و أفضل بنية للشبكة العصبونية وبارامترات أخرى وذلك لمسألة محددة خلال البحث. عندما يتم اختيار أفضل البارامترات للشبكة واعتماد تدريب الشبكة على البيانات التجريبية يصبح عندها من الممكن للشبكة أن تولد نتائج مرضية، وذلك عند اعطائها أية عينة دخل لم تدرب عليها من قبل.

إن زيادة عدد العصبونات في الطبقة المخفية يؤدي إلى زيادة عدد الارتباطات و الأوزان، ليكونوا مناسبين. لا يمكن زيادة عدد العصبونات وعدد الطبقات المخفية من دون وجود حد لذلك حيث أن هذا يمكن أن يؤدي إلى الوصول لحالة يكون فيها عدد الارتباطات المناسبة أكبر من عدد أزواج البيانات المتاحة للتدريب. خلال فترة تدريب الشبكة تكون المسألة غير محددة رياضياً. حيث إنه رياضياً لا يمكن تحديد بارامترات ملائمة أكثر من نقاط البيانات المتاحة. على سبيل المثال، يتطلب الانحدار الخطي نقطتي بيانات على الأقل، بينما يحتاج الانحدار

الذي على شكل قطع مكافئ ثلاث نقاط بيانات. عملياً ، للحصول على انحدار موثوق يجب استخدام كمية بيانات أكثر من الحد الأصغري وذلك لزيادة القيمة الإحصائية. على سبيل المثال، اذا استخدمنا نقطتين لتحديد الميل في الانحدار الخطي، يكون بهذه الحالة الخطأ للانحدار المحسوب كبيراً حتماً . حيث أنه لايملك الميل المحدد من خلال نقطتين قيمة إحصائية (Sha & Edwards, 2007).

لزيادة فاعلية تقنيات التدريب الشبكة العصبونية الصناعية، من الضروري استخدام قاعدة بيانات كبيرة تتألف من عدد كافٍ من عينات التدريب لتغطية كل مجال العمل للمسألة المدروسة. لايمكن للنمذجة بالشبكات العصبونية الصناعية استبدال التجارب حيث إنها في الواقع تعتمد على نتائج التجارب السابقة وبسبب كون التجارب مكلفة وتستهلك الوقت ، وخطيرة أصبح تركيز الباحثين على طريقة الشبكات العصبونية الصناعية. تكون تقنية الشبكات العصبونية أكثر فاعلية عند توفر كمية كبيرة من البيانات ضمن الدراسات السابقة. في حالات كهذه، تكون الشبكة العصبونية طريقة فاعلة لحفظ وتحليل كمية كبيرة ومجالاً واسعاً من البيانات من مصادر مختلفة. بسبب عشوائية البيانات، والحجم الكبير للبيانات وتنوع طبيعة متغيرات الدخل في معظم الحالات، يصعب عادة من الصعب استخراج القواعد الفيزيائية التي تحكم مجموعة البيانات الكبيرة أو النظريات الفيزيائية الكمية التي يمكن أن تصف بيانات المسألة ، لذلك يكون نموذج الشبكات العصبونية الصناعية مثالياً في مثل هذه الحالات. في الواقع عندما تكون كمية البيانات محدودة، فإنه من الأفضل بذل جهود في تطوير نماذج فيزيائية أكثر من النماذج الإحصائية أو الشبكات العصبونية الصناعية.

لقد أشير إلى أن الأخطاء التي تمّ الحصول عليها من مجموعة الاختبار أكثر أهمية من الأخطاء التي تمّ الحصول عليها من مجموعة التدريب ، ويعود ذلك إلى أن الأخطاء من مجموعة الاختبار تكون بشكل طبيعي أكبر ، ولا يمكن مقارنتها بشكل جيد مع الأخطاء من مجموعة التدريب. أمر مهم آخر يجب الإشارة إليه أنه من الأكثر فاعلية تطوير نماذج منفصلة لمتغيرات الخرج الفردية. وذلك بسبب أن زمن التدريب يزداد بشكل ملحوظ عند ازدياد عدد بيانات الخرج و طبيعته. لذلك، ضبط سلسلة من نماذج الشبكات العصبونية مع كل نموذج

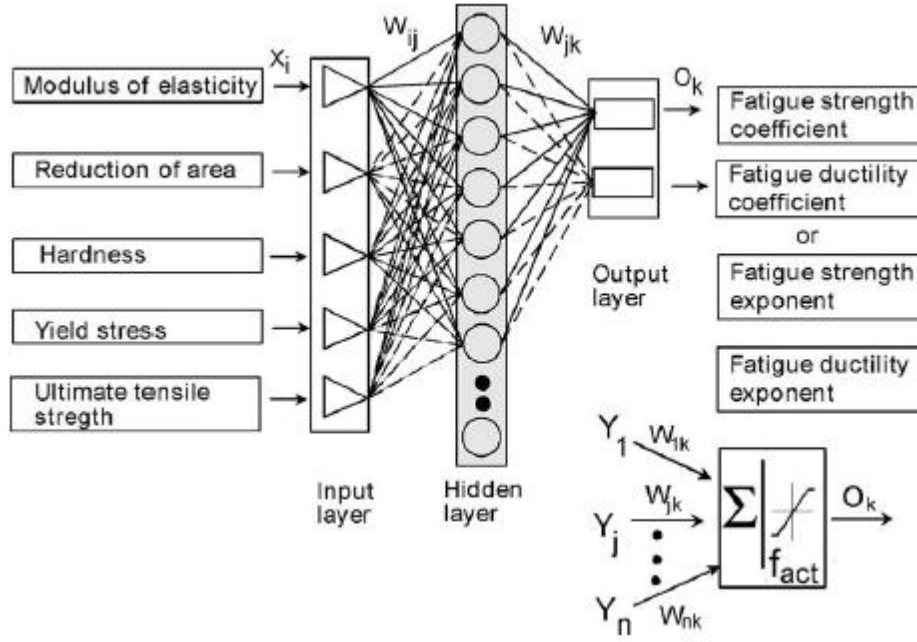
يتعامل مع متغير خرج وحيد يحسن بشكل ملحوظ تعليم الشبكة و يبسط ويسرع التدريب لنموذج الشبكة العصبونية.

في الواقع، اذا كان يوجد متغير دخل واحد، لن تكون الشبكة العصبونية أفضل من الشبكة التقليدية وذلك في حال الإنحدار البسيط , لأنه لن تكون الشبكة العصبونية في هذه الحالة أكثر من أو أفضل من توابع برنامج الاكسل "لحساب المتوسط" أو مشابهة لتوابع "خط الاتجاه" أو حتى " خط مستقيم". إن أفضل استخدام للشبكة العصبونية هو نمذجة تفاعلات معقدة بين عدد بارامترات دخل (Sha & Edwards, 2007).

من خلال تجارب استخدام الشبكة العصبونية الصناعية في المسائل الهندسية كلها. لوحظ أن أنواعاً محددة من الشبكات العصبونية تكون مناسبة لمسائل محددة. على سبيل المثال، لوحظ أنه لحساب العمر التعبي للمواد أو حساب السلوك الميكانيكي للمواد تحت تأثير أحمال دورية وستاتيكية ، فقد أثبتت الشبكة العصبونية متعددة الطبقات مع خوارزمية تعليم ذات انتشار عكسي أنها الأكثر فاعلية ودقة وخصوصاً عندما يوجد بيانات تدريب كافية [8] (Abdalla &Hawileh; 2010).

4.3 الدراسات السابقة:

درس K. Genel عام 2004 امكانية تطبيق الشبكات العصبونية الصناعية لحساب خواص التعب للفولاذ المختبر على الشد بطريقة انفعال- عدد دورات استخدم 73 نوعاً من الفولاذ لحساب خواص التعب الخاصة وتم حساب قيم معامل إجهاد التعب و معامل مرونة التعب. استخرجت بيانات التعب لهذه الأنواع من الفولاذ من الدراسات السابقة و التي استخدمت في تشكيل مجموعة التدريب ANN. استخدمت ثلثا البيانات في تدريب المجموعات والثلث المتبقي من البيانات استخدم في مجموعة الاختبار. في هذه الدراسة طورت شبكات منفصلة لخصائص تعب فردية , ووفقاً لذلك أسست أربع شبكات رئيسة مع خرج واحد. ولكي يتم تقرير البنية الأمثل للشبكة العصبونية , فإنه تمّ فحص معدل تقارب الخطأ عن طريق تغير عدد العصبونات المخفية , وتعديل معدل التدريب ومعامل الزخم. دربت الشبكات بشكل دورات , حيث كان معدل الخطأ النسبي الوسطي مرضياً. وعلاوة على ذلك , فإن هذه الدورات لم يكن لها تأثير ملحوظ على تخفيض الخطأ. وتمّ تحديد قيم معامل الزخم , و معدل التدريب الأمثل في كل شبكة من أجل الحصول على تقارب أسرع مع الأخذ بالحسبان أداء كل من مجموعات التدريب والاختبار مقابل دورات التدريب مع العدد المختلف للعصبونات المخفية فإنه تم تحديد العدد المثالي للعصبونات في كل شبكة.



الشكل (54) بنية شبكة عصبونية مؤلفة من ثلاث طبقات و مستخدمة في هذه الدراسة.

ولقد استنتج أنه يمكن استخدام ANN لحساب خواص التعب لطريقة انفعال-عدد دورات , وذلك بموثوقية عالية. ولقد لوحظ أن أفضل نوعية للحساب بالشبكات العصبونية تم عند استخدام شبكة بخمسة مداخل و مخرج واحد . وتمّ حساب معامل إجهاد التعب و معامل مرونة التعب و اللذين يشكلان الخصائص الأساسية لمنحني سعة الإجهاد مقابل انفعال وذلك بدقة عالية تصل 98%, 99% على التوالي [2].

درس M.D. Mathew, Dae Whan Kim, Woo-Seog Ryu عام 2007 خواص التعب عند عدد منخفض من الدورات لخليطة فولاذ نيتروجينية 316L عند درجات حرارة مختلفة بين درجة حرارة الغرفة و 873K . اختبرت خليطة الفولاذ بنسب نيتروجين مختلفة هي 0.042, 0.131 , و 0.151wt% عند أربع درجات حرارة و بدورة متتاسقة عند سعة انفعال ثابتة $\pm 0.5\%$ ومعدل انفعال $2 \times 10^{-3} S^{-1}$. باستخدام البيانات طورت شبكة عصبونية لحساب العمر التعبّي لخليطة فولاذ منتردة 316LSS. يستطيع نموذج الشبكة العصبونية حساب العمر التعبّي ضمن عامل 0.2 للقيم التجريبية لكل مجالات حرارة الاختبار وبنسب النيتروجين.

تمّ توسيع نموذج الشبكة لتطوير نموذج موحد لحساب العمر التعبّي لخيطه الفولاذ 316SS مع و من دون نتروجين، وبنسبة كربون عادية ومنخفضة. غطت بارامترات اختبار التعب مجاًلاً واسعاً من درجات الحرارة، مجالات الانفعال ومعدلات الانفعال. تم ايجاد نموذج الشبكة الموحد لحساب العمر التعبّي عند أي شروط اختبار ضمن عامل 2. نوع الشبكة العصبونية المستخدم في هذه الدراسة هو شبكة الانتشار العكسي والعدد الكلي لبيانات الاختبار 20 [1].

قام Ghajar et al عام 2011 حساب أس الانفعال عند عدد مرتفع من الدورات و عامل المتانة الدوري للفولاذ باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية حيث استخدمت الشبكة العصبونية MLP مع خوارزمية الانتشار العكسي لحساب أس الانفعال عند عدد مرتفع من الدورات n' ، ومعامل المتانة الدوري K' للفولاذ. تم حساب K' و n' بإستخدام شبكتين منفصلتين. استخدم لهذا الحساب بيانات الشد كدخل لنموذج الشبكة العصبونية حيث أخذت هذه البيانات من الدراسات السابقة (SAE, 2001; Kim et al., 2002; Roessle & Fatemi, 2000)

لتحسين أداء التدريب للشبكة تم تسوية كل من متغيرات الدخل والخرج قبل تدريب الشبكة. لكي يتم البحث عن تأثير بارامترات الدخل على حساب K' و n' يتم استخدام عدة شبكات مع مجموعات مختلفة من بيانات الشد واستخدم مربع الخطأ الوسطي (MSE) بين الخرج المطلوب ونتيجة الشبكة العصبونية الصناعية ANN.

استخدم مجال واسع من 82 عينة فولاذ لنمذجة n' . استخدمت أول مجموعة بيانات مؤلفة من 60 قيمة لتدريب الشبكة , واستخدمت مجموعة أخرى مكونة من 22 قيمة لاختبار الشبكة المدربة. أجريت الاختبارات الأولية على مجموعات مختلفة من σ_y , BHN, RA%, Su, و E كبيانات للشبكة العصبونية الصناعية ANN وذلك لتحديد البارامترات المؤثرة على حساب n' . أختير أخيراً ثلاث مجموعات من بيانات الشد من بين كل البيانات كآلاتي: $(\sigma_y, Su \text{ and BHN})$, $(\sigma_y, Su, RA\% \text{ and BHN})$,

و $(\sigma_y, Su, RA\%, BHN \text{ and E})$.

تمّ البحث أيضاً على العدد المناسب لبنى الشبكة العصبونية الصناعية مع أعداد مختلفة للعصبونات في الطبقات المختلفة (من 2 إلى 10 عصبونات). أشارت النتائج إلى أنه تتضمن أفضل بنية للشبكة العصبونية 7 عصبونات لأول مجموعة

(σ_y , Su and, BHN) و 9 عصبونات للمجموعة الثانية (σ_y , Su, RA% and BHN) و 6 عصبونات للمجموعة الثالثة (σ_y , Su, RA%, BHN and E). تم تقييم أداء الشبكة من خلال حساب خطأ MSE وتحديد صلاحية الشبكة العصبونية ودقتها، تم تمثيل تحليل الانحدار بين خرج الشبكة العصبونية و القيمة المطلوب الوصول إليها ، و تشير مقارنة نتائج الانحدار لبيانات الاختبار إلى أنه تعطي مجموعة بيانات الاختبار (σ_y , Su, RA% and BHN) أفضل حساب، $R=0.866$

لحساب K' ، استخدمت خصائص 48 عينة من الفولاذ الموجودة في الدراسات السابقة (SAE, 2001; Kim et al., 2002; Roessle & Fatemi, 2000). استخدمت 36 قيمة من البيانات لتدريب الشبكة ، واستخدمت 12 قيمة أخرى من البيانات لاختبار الشبكة المدربة.

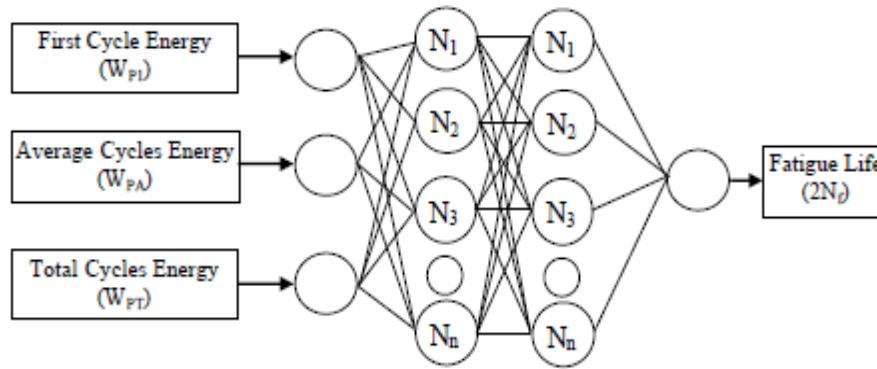
استخدمت ثلاث مجموعات من بيانات الشد مؤلفة من σ_y , Su, RA%, BHN and E لتحديد البامترات المؤثرة على حساب K' بالأسلوب نفسه المتبع عند حساب n' . تم البحث عن أفضل رقم لبنية الشبكة العصبونية مع عدد مختلف للعصبونات في الطبقات المخفية (من 2 إلى 10 عصبون). وجد أفضل بنية للشبكة مع 6 عصبونات للمجموعة (σ_y , Su and BHN)، و 8 عصبونات للمجموعة (σ_y , Su, RA% and BHN)، و 7 عصبونات للمجموعة (σ_y , Su, RA%, BHN and E). أعطت المجموعة (σ_y , Su, RA% and BHN) أفضل حساب، $R=0.953$

واستنتجوا أن حساب أس الانفعال عند عدد مرتفع من الدورات ومعامل المتانة الدوري للفولاذ واللذان يصفان المنحني المستقر لسعة الإجهاد الحقيقي مقابل سعة الانفعال اللدن الحقيقي

باستخدام الشبكة العصبونية الصناعية ANN بدقة عالية 0.865 و 0.953% على التوالي بينما الدقة المحسوبة بالاعتماد على العلاقات التقريبية هي 0.693 و 0.726%. أي إن الحساب المستقر لخصائص منحني الإجهاد الحقيقي - الانفعال الحقيقي بالشبكة المدربة أكثر دقة بالمقارنة مع العلاقات التجريبية التي تعتمد على خصائص التعب عند عدد منخفض من الدورات [8].

حيث σ_y إجهاد الخضوع , و S_U حدّ المتانة الأعظم على الشد , و BHN القساوة , و RA% نسبة تناقص مساحة المقطع , و E معامل يونغ.

قام الباحثون J. Abdalla & R. Hawileh عام 2010 باستخدام الشبكة العصبونية الصناعية (ANN) لحساب العمر التعبّي الذي يقاس بعدد الدورات المعكوسة التي تؤدي إلى الانهيار ($2N_f$) لقضبان فولاذ التسليح بالاعتماد على الطاقة المبددة في أول دورة تحميل (W_{p1})، و الطاقة المبددة في الدورات المتوسطة (W_{PA}) والطاقة الكلية المبددة من قضبان الفولاذ المسلح (W_{PT}). حيث استخدمت شبكة عصبونية صناعية بانتشار عكسي متعددة الطبقات (BP-MLP) وذلك بطبقتين مخفيتين. واستخدم أربعة متغيرات دخل مختلفة وهم W_{p1} , W_{PA} , W_{PT} منفصلين ومجموعين مع بعضهم. خرج الشبكة العصبونية الصناعية ANN هو عدد الانعكاسات التي تؤدي إلى الانهيار التعبّي لكل الحالات الأربع.



الشكل (55) بنية الشبكة العصبونية الصناعية.

وقد استنتجوا أنه عند استخدام بارمترات الطاقة الثلاثة (W_{p1} , W_{PA} , W_{PT}) مجموعين كبارامترات دخل , فإن حساب الشبكة العصبونية الصناعية يكون قريباً من القيم المقاسة تجريبياً

لعدد $2N_f$ ومع عامل $r=0.96$ وبمعدل خطأ في كل عينات الاختبار 20% أو أقل. أما بقية الاستنتاجات يمكن تلخيصها كالآتي:

- يمكن استخدام الشبكة العصبونية الصناعية ANN كأداة حاسوبية موثوقة لحساب عدد الدورات المعكوسة التي تؤدي إلى الانهيار التعبى لقضبان الفولاذ المسلح باستخدام الطاقة المبددة كبارامترات دخل للشبكة العصبونية
- تم تحقيق أفضل دقة لحساب الشبكة العصبونية الصناعية عند استخدام جميع بارامترات الطاقة كبارامترات دخل للشبكة العصبونية بينما لوحظ أسوأ دقة لحساب الشبكة العصبونية عند استخدام طاقة أول دورة تحميل فقط كبارامتر دخل للشبكة العصبونية الصناعية.
- أعطت طاقة الدورات المتوسطة وطاقة الدورات الكلية عدد الدورات المعكوسة نفسها التي تؤدي إلى الانهيار عند استخدامهم كبارامترات للشبكة العصبونية الصناعية، لكن كانوا أقل دقة من حالة استخدامهم مجموعين وأكثر دقة من حالة استخدام طاقة أول دورة تحميل مفردة.
- بوجود الشبكة المدربة، يمكن تنفيذ دراسة بارامترية لدراسة تأثير بارامترات الطاقة المختلفة على عدد الدورات المعكوسة التي تؤدي إلى الانهيار [15].

الفصل الخامس

استخدام الشبكات العصبونية

الصناعية و النمذجة بطريقة

العناصر المنتهية في حساب

العمر التعبى للفولاذ.

مقدمة:

أدى تطور قدرات الكمبيوترات الحديثة لمعالجة المصفوفات الكبيرة إلى بناء العديد من النماذج العددية الكبيرة والمعقدة. واحدة من هذه النماذج العددية هي النمذجة بطريقة العناصر المنتهية. كان التطبيق الأول لتقنيات العناصر المنتهية هو حل مسائل المرونة المعقدة وتحليل البنى الإنشائية الهندسية في هندسة الطيران و الهندسة المدنية. تم تطوير طريقة العناصر المنتهية أولاً بواسطة العالم Hrennikoff (1941) , فضلاً عن العالمين Courant and Robbins (1941).

يعطي نموذج العناصر المنتهية عادة نتائج لا تكون النتائج نفسها التي تم الحصول من التجربة وتعود أسباب التناقض بين بيانات نموذج العناصر المنتهية والبيانات المقاسة حسب (Friswell and Mottershead, 1995) إلى:

1- أخطاء البنية الإنشائية للنموذج والتي تكون ناتجة من صعوبة نمذجة الوصلات , و القطع الملحومة , والحواف.

2- أخطاء درجة النموذج التي تنتج من صعوبة النمذجة غير الخطية.

3- أخطاء تحديد بارامترات النموذج التي تنتج من صعوبة تعريف الخواص الصحيحة للمادة.

4- أخطاء في القياسات.

وبسبب التضارب بين البيانات المقاسة وبيانات العناصر المنتهية طوّرت طرق حاسوبية تطبق مع النمذجة بطريقة العناصر المنتهية, ليصبح هناك تقارب بين البيانات المقاسة و البيانات المحسوبة بواسطة نموذج العناصر المنتهية

(Mottershead and Friswell, 1993; Friswell and Mottershead, 1995)

استخدمت الشبكات العصبونية الصناعية مع النمذجة بطريقة العناصر المنتهية لأنها توفر الخواص الآتية:

1-مقاومة التشتت في البيانات.

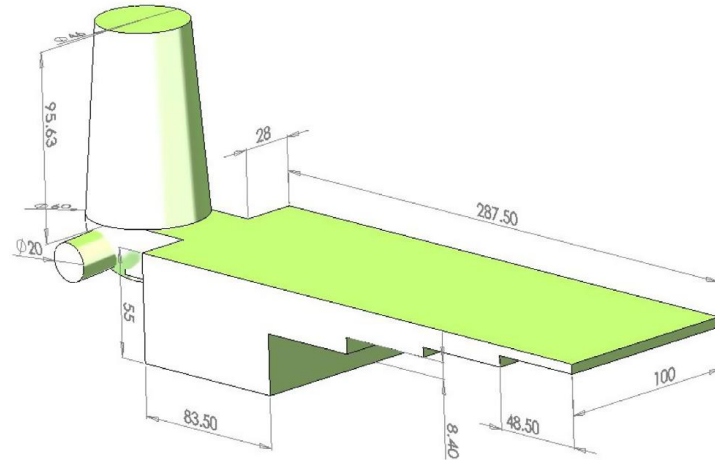
2-القدرة على تجنب عمليات المعقدة.

3-القدرة على العمل مع أعداد غير كاملة من درجات الحرية للقيم المقاسة التجريبية و النماذج[11].

5.1الدراسات السابقة:

قام الباحثان Mohsen Ostad Shabani , Ali Mazahery عام 2011 بدراسة تطبيق الشبكات العصبونية الصناعية في النمذجة بطريقة العناصر المنتهية لحساب الخصائص الميكانيكية لخليطة Al-Si و لحساب هذه الخصائص نحتاج الى مجموعة من البارامترات هي معدل التبريد, و التدرج الحراري, و إجهاد الخضوع, و إجهاد الشد الأعظمي, و القوى العظمى, و نسبة الاستطالة. وللحصول على هذه البارامترات تم إجراء مجموعة من التجارب العملية و التحليل بطريقة العناصر المنتهية.

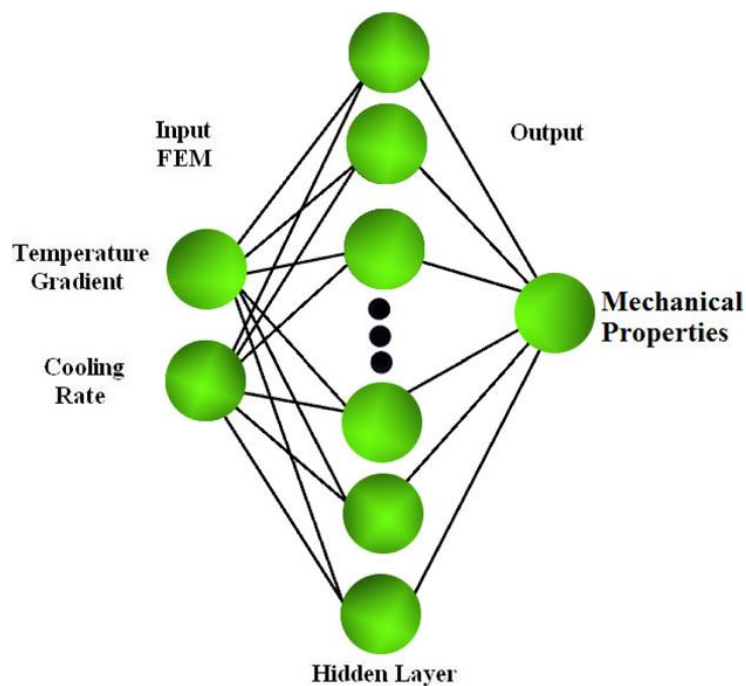
تضمنت التجارب العملية صهر 5 kg من A356 , وذلك بتسخينها إلى درجة حرارة فوق 720 C ومن ثم صبها في قالب رملي و تطبيق خمسة مزدوجات حرارية للحصول على قيم معدل التبريد التجريبية حيث طبق هذه المزدوجات على سماكة مقدارها 10 mm من الحافة لكل مرحلة وتم تحضير 5 عينات شد من كل مرحلة. ومن اختبار الشد استطعنا الحصول على إجهاد الخضوع , و الإجهاد الأعظمي المسموح به , و القوى العظمى و نسبة الاستطالة لكل موضع قطعت منه العينة.



الشكل (56) شكل نموذج الصب.

أما معدل التبريد والتدرج الحراري ، فقد تم الحصول عليهما من التحليل بطريقة العناصر المنتهية حيث استخدم نموذج الحرارة المؤقت transient temperature لحساب حقل الحرارة المؤقت في مرحلة التبريد. و رسم نموذج الصب على برنامج solid works ونفذت شبكة العناصر المنتهية على برنامج SUT Cast ، و بعد ذلك طبقت الشروط الحدية و التي أخذت من التجارب العملية ، و هذه الشروط هي الكثافة، و معامل انتشار الحرارة و التغيرات الحرارية. استخدمت نتائج العناصر المنتهية كقاعدة بيانات لتدريب الشبكة العصبونية الصناعية.

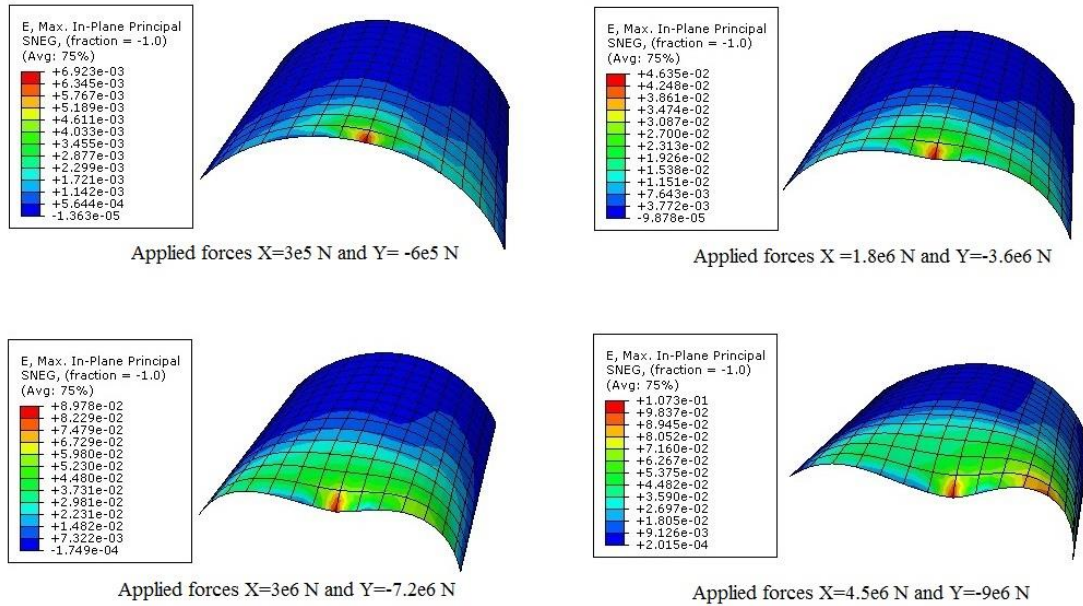
استخدمت في هذه الدراسة شبكة ذات انتشار عكسي عدد عصبونات الدخل والخرج هو نفسه عدد متغيرات الدخل و الخرج ، وتمّ تغيير عدد العصبونات في الطبقة المخفية ، و حساب معدل الخطأ لكل شبكة. ومن أجل تدريب الشبكة تمّ استخدام متغيرين للدخل تم الحصول عليهم من تحليل العناصر المنتهية ، وهما معدل التبريد و التدرج الحراري. و أجرى الباحثان دراستين مختلفتين لمقارنة الخرج الأفضل. حيث كان يوجد الدراسة الأولى خرج واحد فقط هو الخصائص الميكانيكية أما في الدراسة الثانية فكان يوجد أربعة متغيرات للخرج وهم (إجهاد الخضوع، الإجهاد الأعظمي المسموح به، القوى العظمى و الاستطالة). استخدام تابع سيغمويد كتابع نقل بين كل الطبقات و بلغت عدد العينات 33 عينة استخدم 25 منهم كعينات تدريب و 8 كعينات تحقق من فاعلية الشبكة[23].



الشكل (57) بنية الشبكة العصبونية الصناعية.

و توصل الباحثان إلى أن الشبكة العصبونية هي أداة فاعلة في حساب الخصائص الميكانيكية لخليطة ألومنيوم A356 مصبوبة ، و بينت الدراسة أن الشبكة بخرج واحد أعطت توافقاً جيداً مع البيانات التجريبية بعكس الشبكة ذات الأربعة متغيرات للخروج التي لم تعط أداء جيداً [23].

قام الباحثون Žarko Čojbašić, Vlastimir Nikolić, Emina Petrović, Vukašin Pavlović, Miša Tomić, Ivan Pavlović, Ivan Ćirić بتحليل سلوك البنى الإنشائية القشرية بالزمن الحقيقي بواسطة الشبكات العصبونية الصناعية بالاعتماد على طريقة العناصر المنتهية, حيث قام الباحثون بنمذجة قوس من اسطوانة مثبت بشكل بسيط نصف قطر القوس $R=360\text{ mm}$ وبزاوية مركزية 112.5° وبعرض $b=700\text{ mm}$ وبثخانة قدرها 30 mm . تم تطبيق قوى بالاتجاهات X و Y حيث كان مجال القوى المطبق بالاتجاه X من 0.3 MN إلى 4.6 MN و مجال القوى المطبق في الاتجاه Y من 0.6 MN إلى 0.9 MN وتم حساب الإزاحات بالاتجاهات X, Y, Z حيث يعتبر هذا النوع من التحليل بأنه تحليل غير خطي ويستهلك الكثير من الوقت و نفذ هذا التحليل بواسطة برنامج ABAQUS.

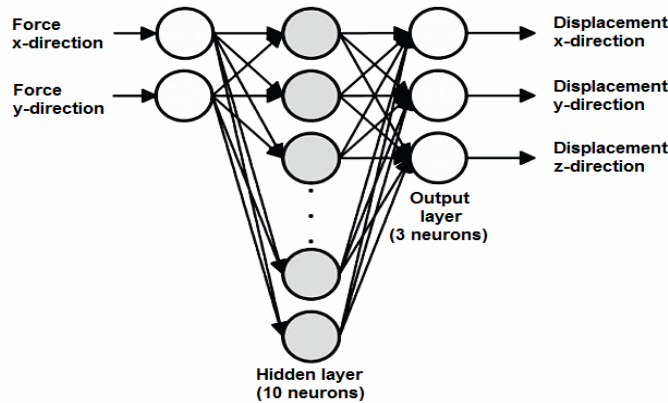


الشكل (58) الإزاحات القشرية بالاتجاهات المختلفة.

استخدمت نتائج النمذجة كقاعدة بيانات لتدريب الشبكة العصبونية الصناعية , حيث استخدم الباحثون في هذه الدراسة شبكة عصبونية ذات انتشار عكسي لها ثلاث طبقات: طبقة دخل

بعصبونين هما بارمترات الدخل والتي هي القوى بالاتجاه X و Y وطبقة مخفية واحدة بعشرة عصبونات و طبقة خرج لها ثلاثة عصبونات , هي بارمترات الخرج والتي هي الإزاحات بالاتجاه X,Y,Z . بلغ عدد بيانات التدريب 224 عينة تم الحصول عليها من برنامج

.ABAQUS

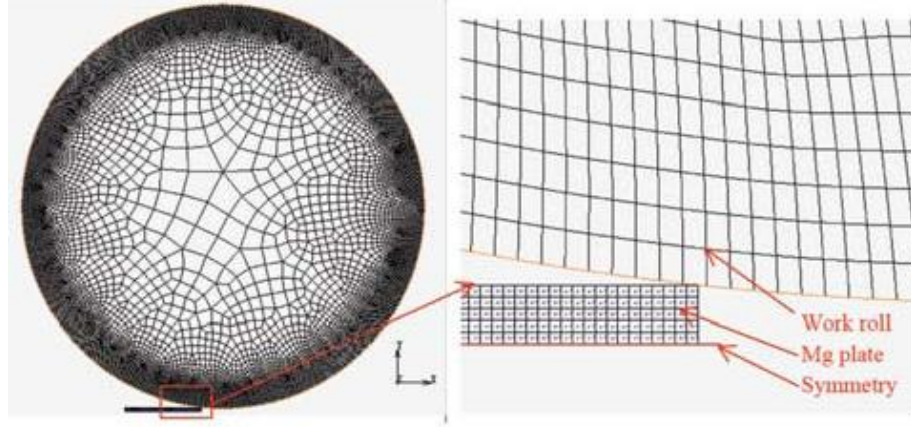


الشكل (59) بنية الشبكة العصبونية الصناعية.

الاختلاف بين قيم المحاكاة التي حصلنا عليها من الشبكة العصبونية الصناعية والعناصر المنتهية ضمن مجال 0.0001% مما يعطي توافقاً جيداً لنموذج الشبكة العصبونية الصناعية [4].

وقام الباحثون Z.Y. Guo, J.N. Sun, and F.S. Du عام 2016 بتطوير نموذج حسابي يجمع طريقة العناصر المنتهية والشبكات العصبونية الصناعية لحساب قوة الدرفلة عند الدرفلة على الساخن لصفائح مصنوعة من خليطة المغنيزيوم.

تم إجراء النمذجة بطريقة العناصر المنتهية على أساس أنها مسألة انفعال مستوي، لأن عرض الصفيحة أكثر من 600 mm ، وتم أخذ نصف الصفيحة بسبب التناظر و كنموذج ثنائي البعد وذلك لتوفير وقت الحساب ، وتم تمثيل عملية الدرفلة بواسطة كرة بقطر 425 mm وعند حرارة 160°C وبعد إجراء النمذجة تم مقارنة النتائج مع التجارب العملية للتحقق من دقة نموذج العناصر المنتهية، حيث بلغ مقدار الخطأ 8.6% و تم استخدام نتائج النمذجة كقاعدة بيانات للتدريب، و اختبار فاعلية الشبكة العصبونية الصناعية.



الشكل (60) نموذج العناصر المنتهية.

إن زمن الحساب بطريقة العناصر المنتهية لهذا النوع من المسائل طويل لذلك فهي غير مناسبة لإجراء حساب فوري.

إن تقنية الشبكات العصبونية الصناعية التي تحاكي الوظائف الأساسية للدماغ قد خضعت في السنوات الأخيرة للتطور سريع لذلك يمكن استخدام قدرتها على التعلم و التعامل مع المسائل غير الخطية في حساب قوة الدرفلة. تم اختيار بارامترات الدخول لهذه المسألة وهي الثخانة الابتدائية للصفحة، و نسبة تناقص الثخانة، و درجة الحرارة الابتدائية للصفحة، و عامل الاحتكاك في أماكن الاتصال، و سرعة الدرفلة أما خرج الشبكة فهو قوة الدرفلة. تم توليد 243 عينة من نموذج العناصر المنتهية ، حيث تم تقسيم هذه العينات إلى 195 عينة عشوائية كعينات تدريب و إلى 48 عينة عشوائية للتحقق من فاعلية الشبكة .

عند استخدام الشبكات العصبونية الصناعية ، فإنه من الضروري تحديد تابع النقل و تابع التدريب في هذه المسألة تم اختيار تابع سيغمويد المثلثي في الطبقات المخفية، و طبقة الخرج والذي يمكنه تحسين دقة و فاعلية نموذج ANN . وتم اختيار أيضاً خوارزمية L-M كتابع تدريب .

من المهامات الضرورية أيضاً عند استخدام ANN هو تحديد البنية المثالية للشبكة في هذه الدراسة توصل الباحثون إلى أن البنية المثالية هي خمسة عصبونات في طبقة الدخول طبقة مخفية واحدة تحتوي على أربعة عصبونات، و طبقة خرج واحدة بعصبون واحد. معدل التعلم هو

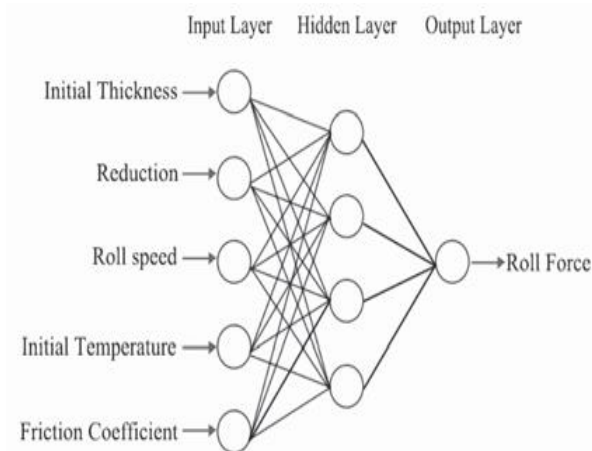
0.001 ، قيمة هدف التدريب هو 10^{-5} و عدد دورات التدريب هي 2000 دورة.

باستخدام معامل التصحيح R يمكن اختبار أداء الشبكة من ناحية العلاقة بين خرج الشبكة و الخرج الهدف, في هذه الشبكة بلغ معامل التصحيح في مرحلة التدريب 0.9964 و معامل التصحيح في مرحلة التحقق 0.99278.

Table V

The ANN architecture and functions

Network	Feed-forward back-propagation network
Transfer function	Tangential sigmoid
Training function	Levenberg–Marquardt
Learning function	Gradient descent with momentum weight and bias learning function
Performance function	Mean squared error (MSE)
Number of input layer unit	5
Number of hidden layers	1
Number of hidden layer units	4
Number of output layer units	1



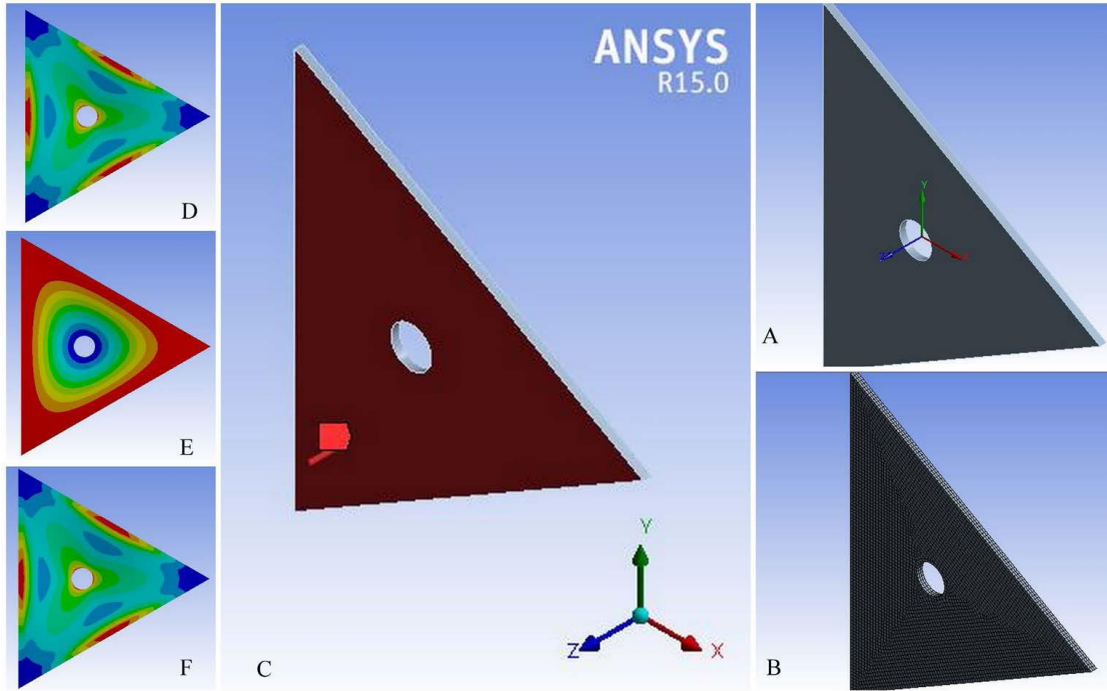
الشكل (61) نموذج الشبكة العصبونية الصناعية الجدول (5.1) بنية الشبكة العصبونية

أعطت الشبكة العصبونية الصناعية توافقاً مناسباً مع عينات الاختبار, و هذا يشير إلى قدرة النموذج على حساب قوة الدرفلة لخليطة مغنزيوم بدقة و بسرعة في الشروط الحرارية المختلفة للدرفلة . و توصل الباحثون إلى أن نموذج الشبكة العصبونية الناتج مناسباً لأمثلة شروط درفلة خليطة المغنزيوم و للتحكم بعملية الدرفلة و يمكن بسهولة توسيع النموذج لأنواع أخرى من عمليات الدرفلة على الساخن لخليطة المغنزيوم. حيث أن الحساب الدقيق لقوة الدرفلة عامل مهم في أمثلة شروط الدرفلة, و ضروري من أجل الحصول على منتجات بشكل جيد [3] .

قام الباحثان Saket Rusia, Krishna Kant Pathak عام 2016 بدراسة تطبيق الشبكة العصبونية الصناعية في تحليل الإجهاد الأعظمي المكافئ فون مايزسس, و الانفعال و التشوه بالاتجاه Z لصفحة مثلثية متساوية الأضلاع لها ثقب مركزي وخاضعة لضغط مستوي بالاتجاه Z حيث تم استخدام التحليل بطريقة العناصر المنتهية لتوليد 81 حالة عن طريق التغير بأبعاد

الصفیحة و أبعاد الثقوب و مقدار الحمل و تم تنفيذ هذا التحليل على برنامج ANSYS Workbench.

رسمت الصفیحة على موديل التصميم ببرنامج ANSYS Workbench ومن ثم ولدت شبكة العناصر المنتهية، وتم تثبيت حواف الصفیحة المثلثية جميعها وتطبيق ضغط مستوي بالاتجاه Z وتم حساب الإجهاد الأعظم المكافئ فون مايزسس، الانفعال و التشوه بالاتجاه Z .



الشكل (62) النموذج وشبكة العناصر المنتهية ونتائج التحليل للصفیحة المثلثية.

استخدمت نتائج التحليل بطريقة العناصر المنتهية كقاعدة بيانات لتدريب الشبكة العصبونية حيث استخدم في هذه الدراسة الشبكة العصبونية الصناعية ذات الانتشار العكسي لها أربعة عصبونات في طبقة الدخل و طبقة مخفية لها ستة عصبونات و طبقة خرج بثلاثة عصبونات. بارامترات دخل الشبكة هي أبعاد الحواف، و قطر الثقب، و ثخانة الصفیحة و الضغط المطبق. أما بارامترات الخرج: فهي الإجهاد المكافئ فون مايزسس، و الانفعال المكافئ فون مايزسس و التشوه بالاتجاه Z. تم الحفاظ على معدل خطأ مقداره 0.005، و أخذت الشبكة 1996082 دورة لكي تتقارب الشبكة مع هذا المعدل الخطأ.

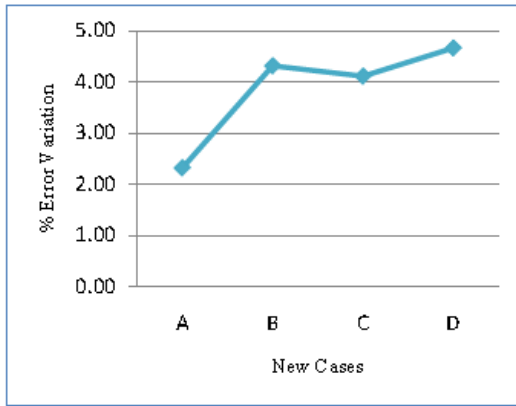
بعد الانتهاء من تدريب الشبكة تم التحقق من فاعلية الشبكة باستخدام أربع حالات جديدة وتم حساب الخطأ بين نتائج حساب الشبكة العصبونية , و نتائج برنامج ANSYS Workbench لهذه الحالات.

Sr. No.	New Cases			
	Edge Dimension (mm)	Hole Dia. (mm)	Thickness of Plate (mm)	Pressure Applied (MPa)
A	900	80	15	0.35
B	600	60	25	0.4
C	700	70	20	0.45
D	800	90	25	0.5

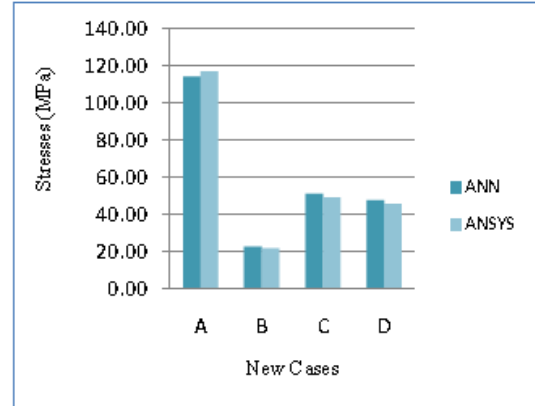
الجدول (5.2) الحالات الأربعة الجديدة المستخدمة للتحقق من فاعلية الشبكة العصبونية الصناعية.

Sr. No.	Model	Maximum Equivalent von Mises Stress			Maximum Equivalent von Mises Strain			Directional Deformation in (-Z) Direction		
		ANN	ANSYS	%	ANN	ANSYS	%	ANN	ANSYS	%
1	A	114.28	117.00	2.32	0.00065	0.00059	9.25	0.63140	0.66198	4.62
2	B	22.79	21.85	4.31	0.00011	0.00011	1.59	0.03625	0.03450	5.08
3	C	51.25	49.22	4.11	0.00024	0.00025	2.07	0.14082	0.13491	4.38
4	D	47.74	45.62	4.66	0.00024	0.00023	3.89	0.13281	0.13041	1.84

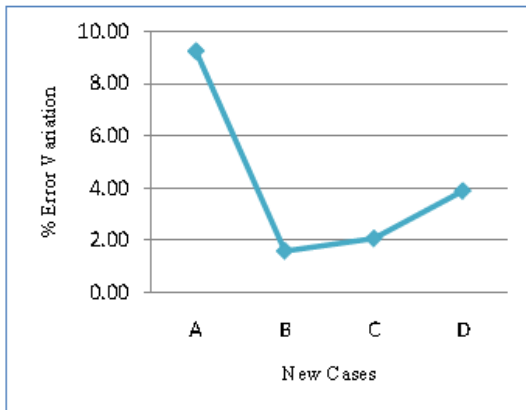
الجدول (5.3) نتائج التحقق من فاعلية الشبكة العصبونية الصناعية.



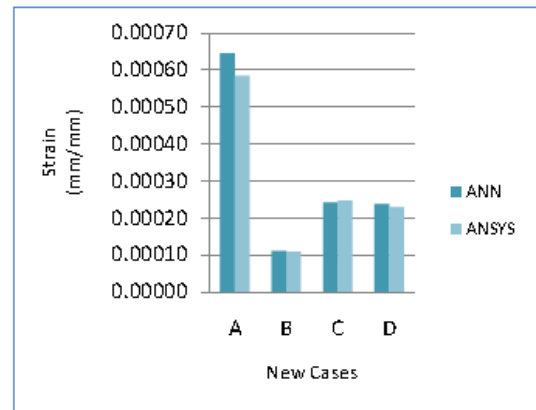
الشكل (64) نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.



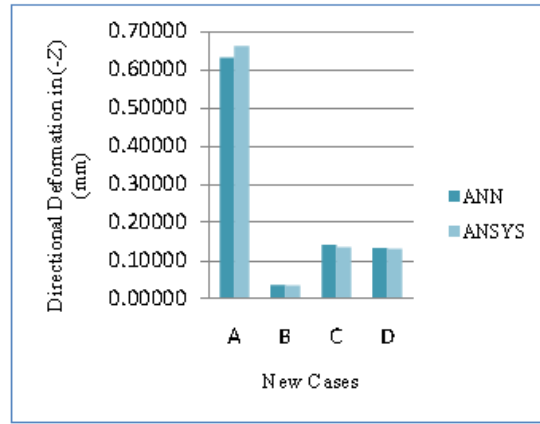
الشكل (63) الإجهاد الأعظم المكافئ المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.



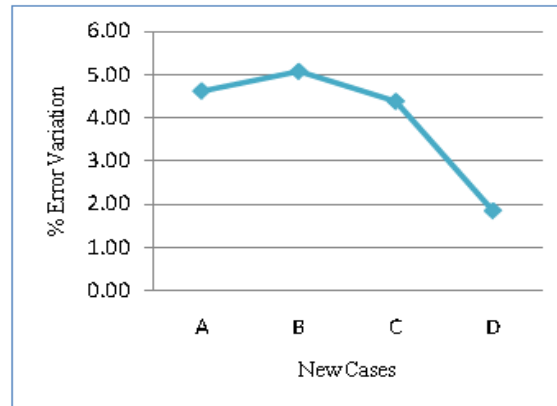
الشكل (66) نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.



الشكل (65) الانفعال الأعظم المكافئ المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.



الشكل (67) التشوه بالاتجاه Z المحسوب بواسطة ANN و ANSYS.



الشكل (68) نسبة الاختلاف بين ANN و ANSYS.

وقد توصل الباحثون في هذه الدراسة إلى أن الشبكات العصبونية الصناعية أداة فاعلة في تحليل الإجهادات لصفحة مثلثية لها ثقب مركزي، وهي طريقة سهلة، و سريعة بالمقارنة مع طرائق التحليل التقليدية التي تستهلك وقتاً طويلاً وتحتاج لمهارات كثيرة أما الاختلاف بين النتائج المحسوبة بين ANN و ANSYS فكان منخفضاً [14].

5.2 الدراسة العملية:

استخدمت في هذه الدراسة الشبكة العصبونية الصناعية لحساب العمر التعبى لجائز فولاذي يحوي شقاً في المنتصف تم تحليله بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج ANSYS Workbench و استخدمت النتائج التي تم الحصول عليها من برنامج ANSYS Workbench كقاعدة بيانات لتدريب الشبكة العصبونية الصناعية . على الرغم من أن طريقة العناصر المنتهية فاعلة في حساب العمر التعبى , إلا أن زمن الحساب طويل, و يحتاج لإمكانات حاسوبية متطورة و لمهارات عالية في النمذجة بعكس طريقة الشبكة العصبونية الصناعية التي تتميز بالمرونة والسهولة و سرعة الحساب و لا تحتاج لمهارات عالية كما أن الشبكة لها قابلية عالية لتعميم حالات جديدة وحسابها لم يتم التدريب عليها و بدقة عالية.

عند استخدام الشبكات العصبونية الصناعية يجب تحديد نوع الشبكة, و نوع خوارزمية التدريب, و البنية المثالية للشبكة و بارامترات الدخل و الخرج.

استخدمت في هذه الدراسة شبكة ذات انتشار عكسي و خوارزمية تدريب Leverberg – Marquardt و بثلاث بارامترات دخل هي القوة F عمق الشق H و زاوية الشق θ أما الخرج فهو العمر التعبى و طبقة مخفية واحدة 35 عصبون.

عدد بيانات التدريب 73 عينة استخدم منها 59 منها لتدريب الشبكة و 7 عينات لاختبار الشبكة و 7 عينات للتحقق من فاعلية الشبكة. وبعد الانتهاء من تدريب الشبكة تم حساب أربع حالات جديدة ومقارنة نتائج ANN و العناصر المنتهية.

5.2.1 مراحل النمذجة بطريقة الشبكة العصبونية الصناعية:

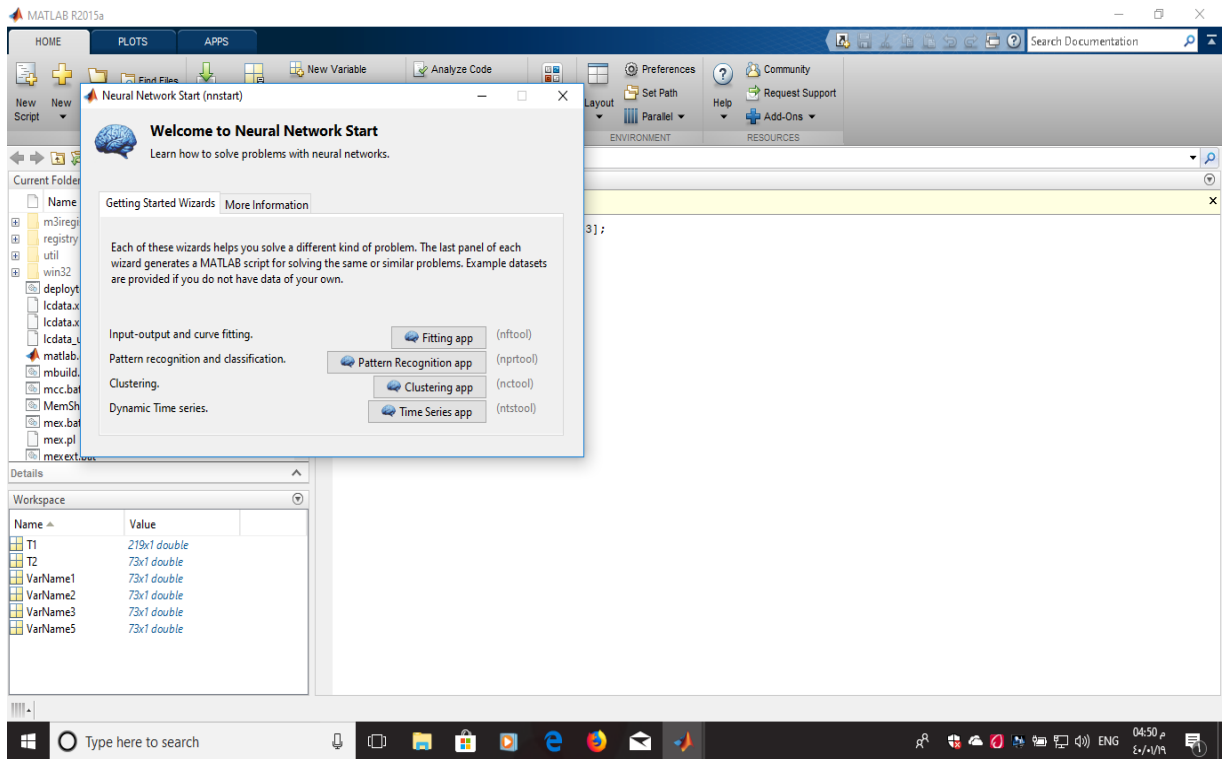
تم استخدام برنامج Matlab 15a في تدريب الشبكة

*المرحلة الأولى استيراد البيانات:

يتم استيراد البيانات من الإيكسل وكتابتها على شكل مصفوفتين عموديتين مصفوفة دخل و مصفوفة خرج , و لتسهيل حسابات الشبكة تمّ تصغير خرج الشبكة بقسمته على 10^5 لتسريع عملية الحساب.

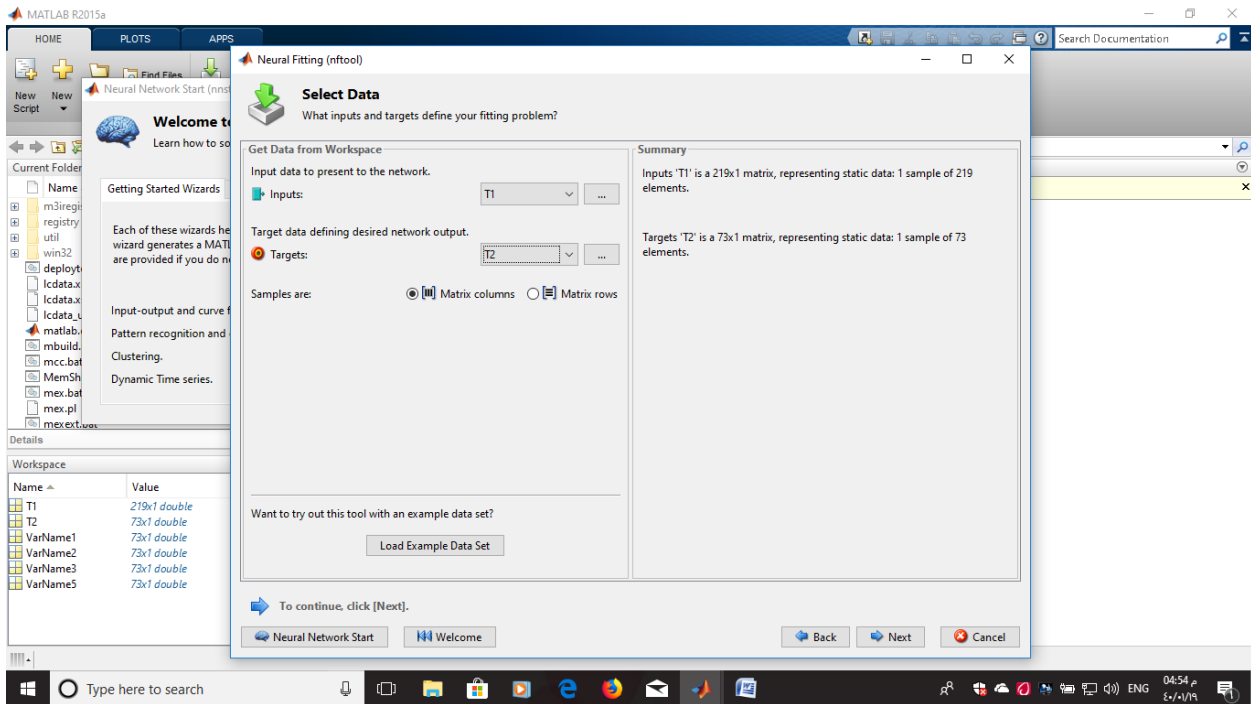
*المرحلة الثانية البدء باستخدام الشبكة العصبونية الصناعية:

تم استدعاء الشبكة عن طريقة تعليمة nnstart واختيار Fitting app.



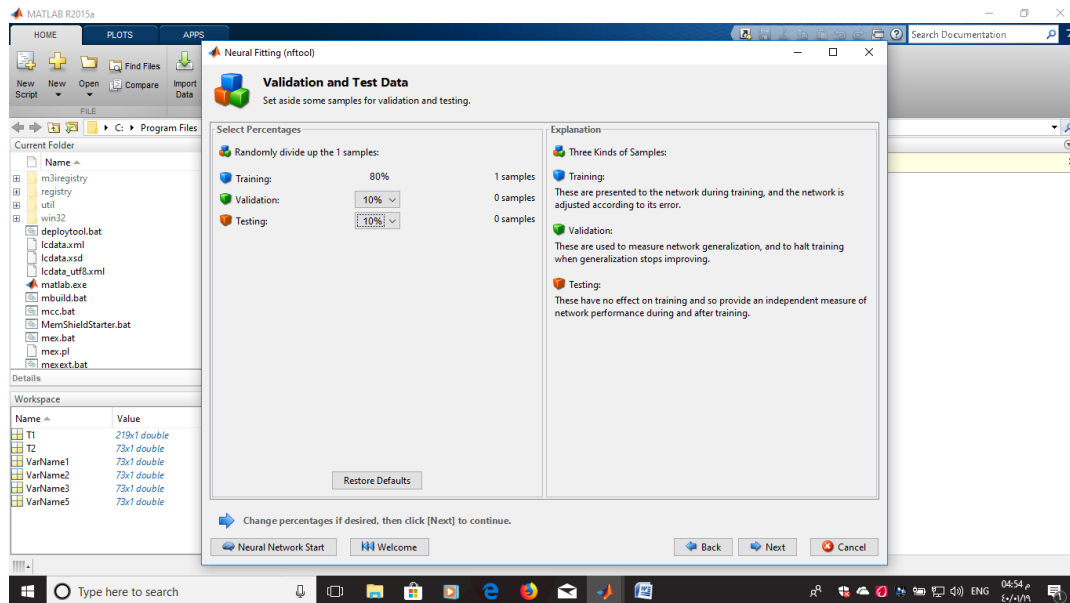
الشكل (69) استدعاء الشبكة العصبونية الصناعية باستخدام تعليمة nnstart.

بعدها يتم إدخال مصفوفات الدخل والخرج.



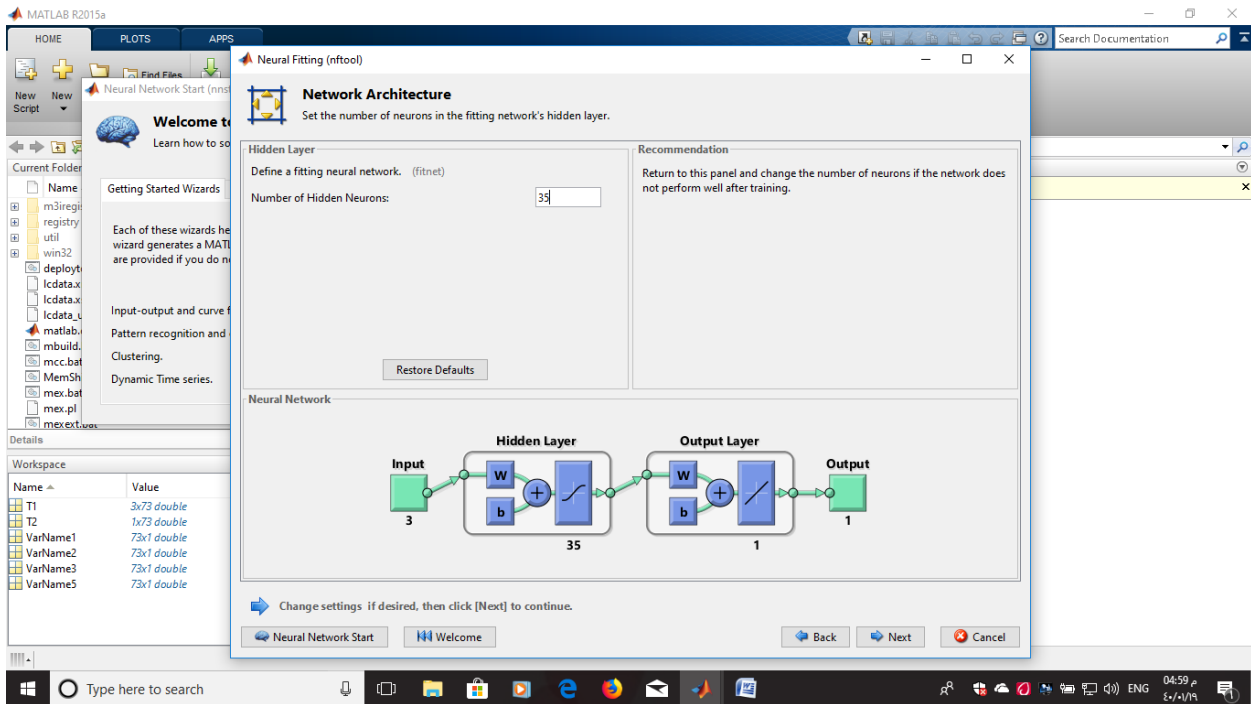
الشكل (70) إدخال مصفوفات الدخل و الخرج.

ومن ثم يتم تحديد نسبة بيانات التدريب و الاختبار و التحقق. و في هذه الدراسة كانت النسبة المثالية هي 80% للتدريب, و 10% للاختبار, و 10% للتحقق.



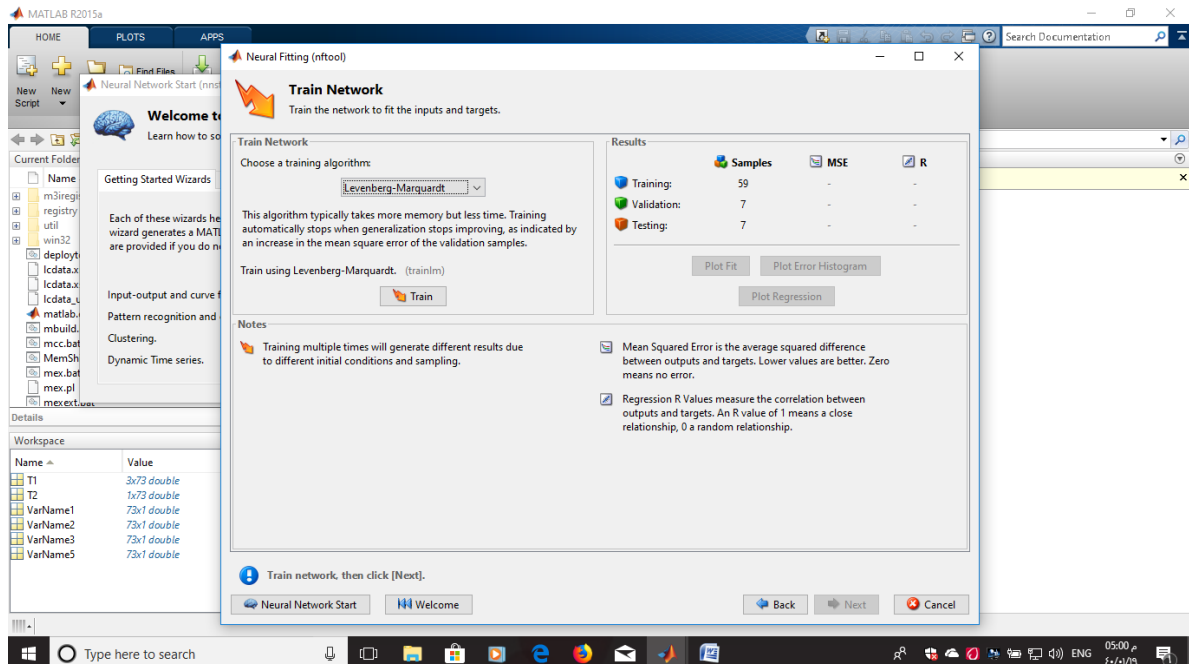
الشكل (71) تحديد نسب البيانات.

بعدها يتم تحديد بنية الشبكة حيث استخدم 35 عصبوناً في الطبقة المخفية.



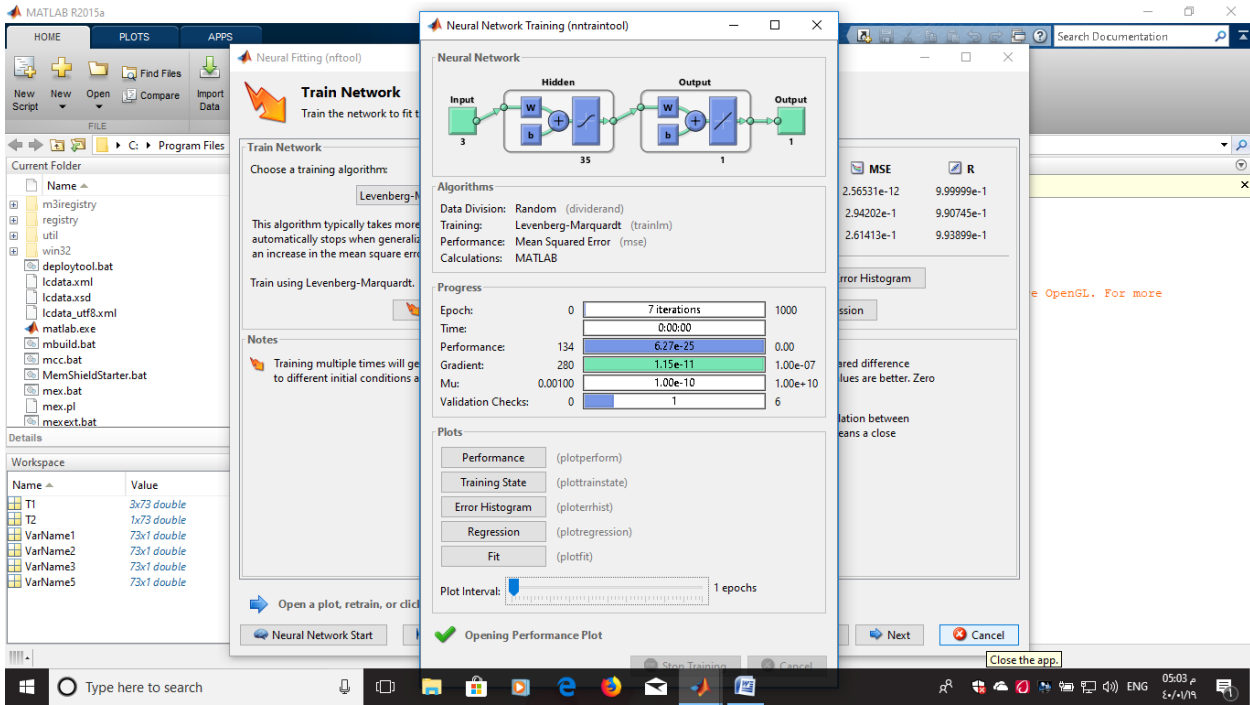
الشكل (72) تحديد بنية الشبكة.

و من ثم تحديد خوارزمية التدريب وهي Levenberg – Marquardt

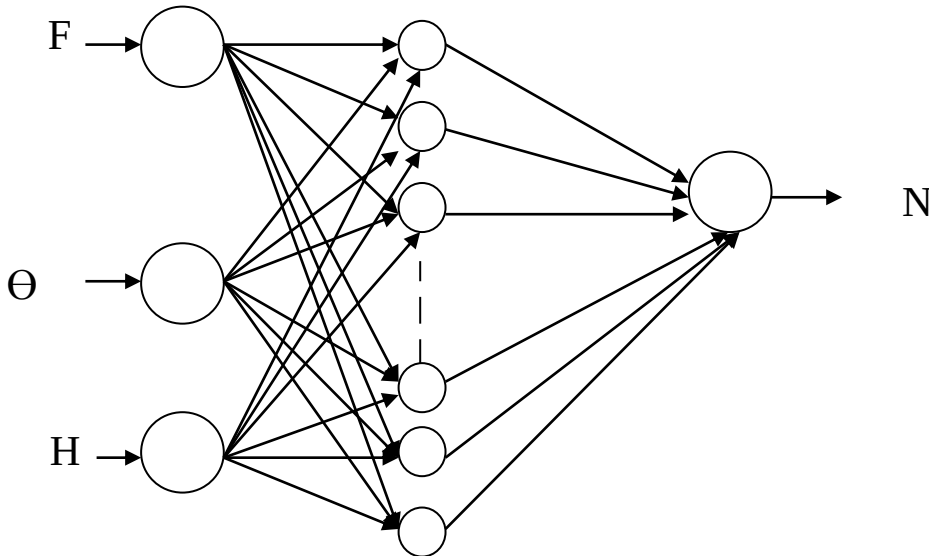


الشكل (73) اختيار خوارزمية التدريب.

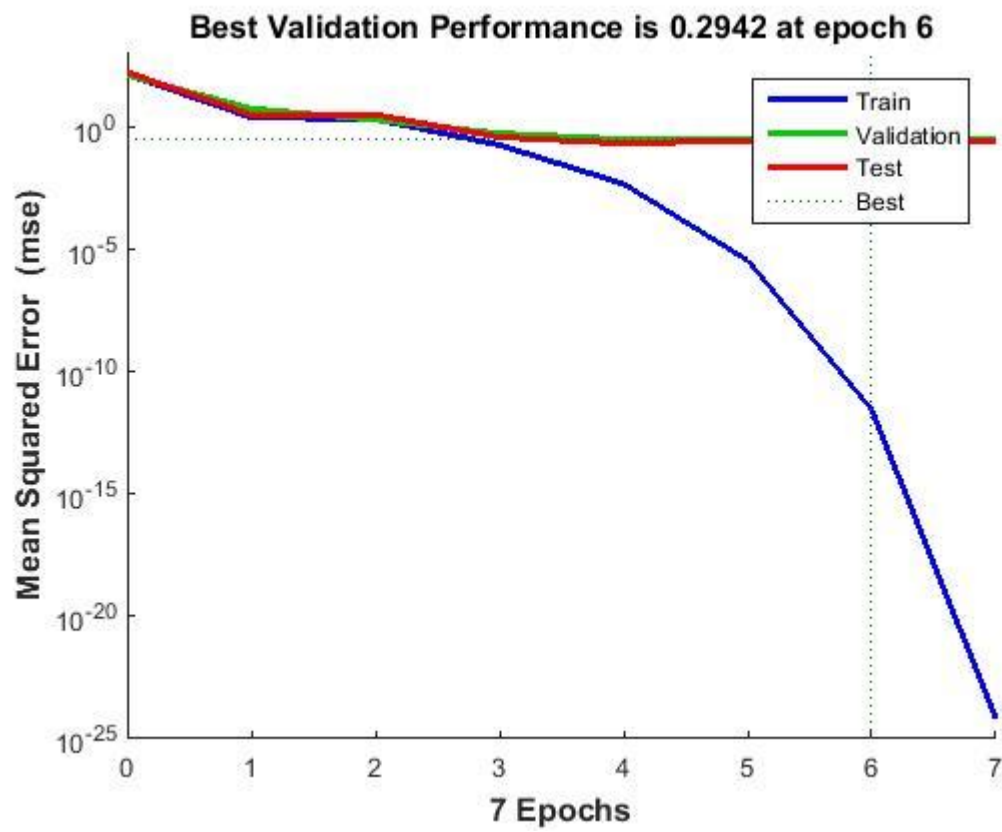
استغرقت الشبكة 7 دورات للتدريب .



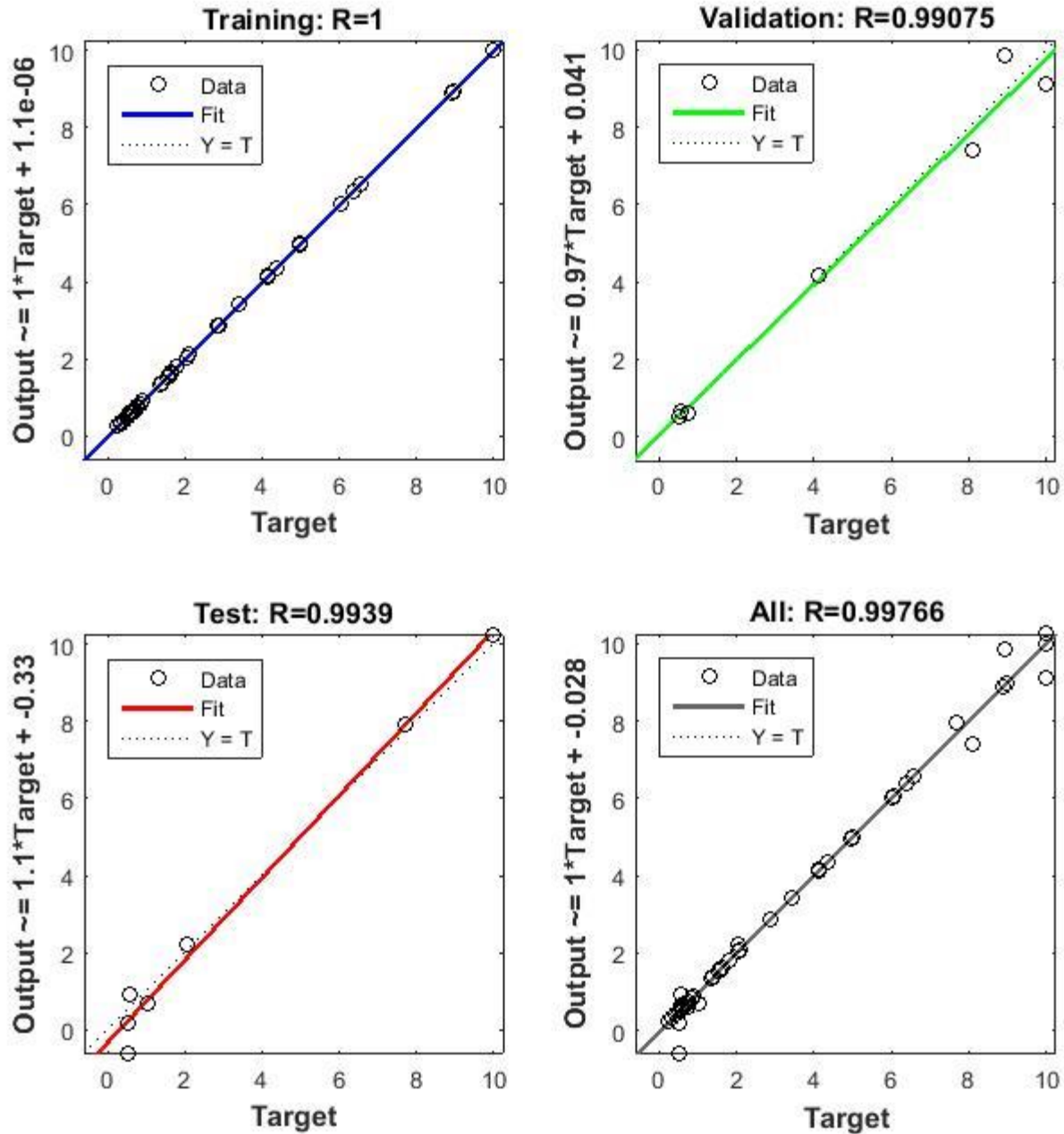
الشكل (74) تدريب الشبكة.



الشكل (75) نموذج الشبكة المقترحة.

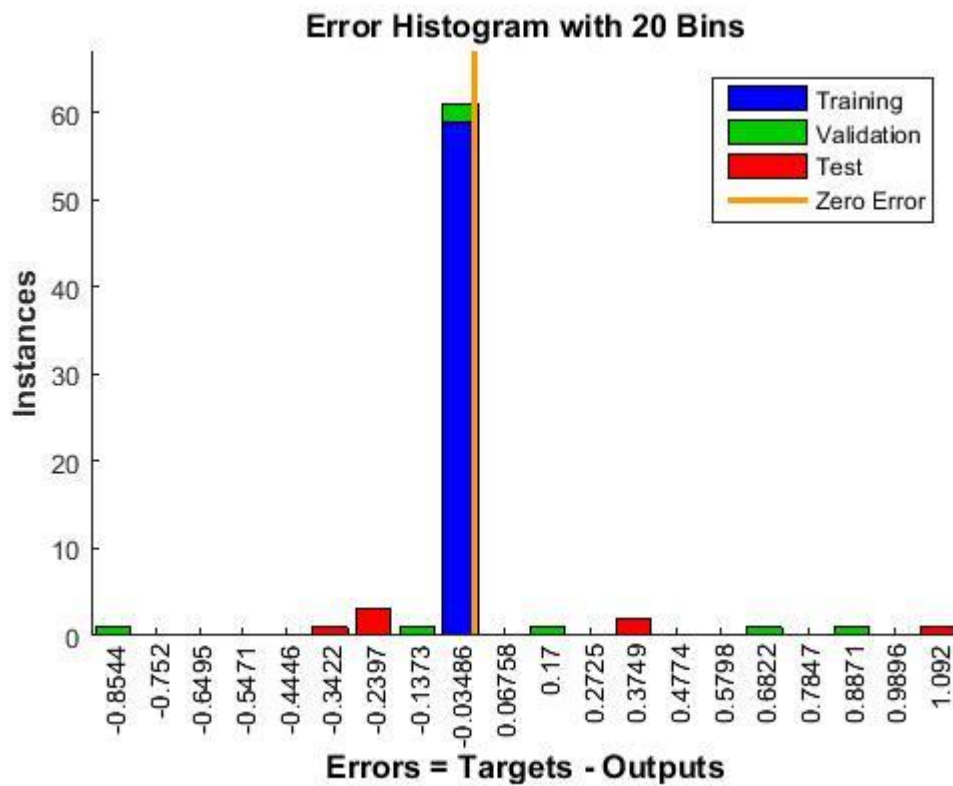


الشكل (76) مقدار الخطأ الوسطي.



الشكل (77) مخطط الانحدار في مراحل التدريب و الاختبار و التحقق.

من خلال هذا الشكل نجد أن النسبة R كانت في مرحلة التدريب تساوي 1 و مرحلة الاختبار 0.9939 و التحقق 0.99075. أما النسبة R الكلية كانت 0.99766 و هذه النسب تدل على أن الشبكة أصبحت جاهزة للاستخدام.

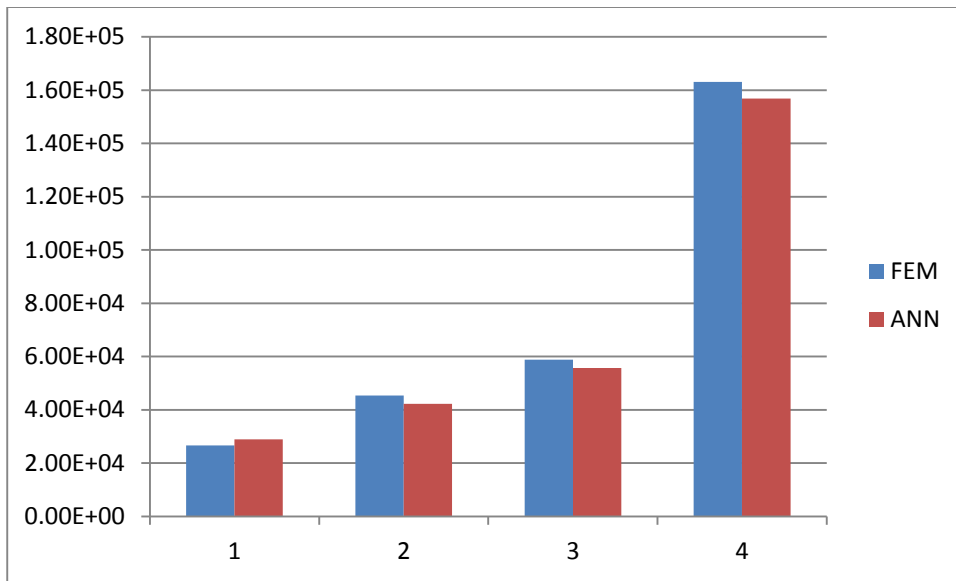


الشكل (78) مخطط الخطأ.

وبعد الانتهاء من تدريب الشبكة تمّ اختبارها بأربع حالات ومقارنة نتائج حسابات الشبكة العصبونية الصناعية بنتائج العناصر المنتهية وفق الجدول (5.4).

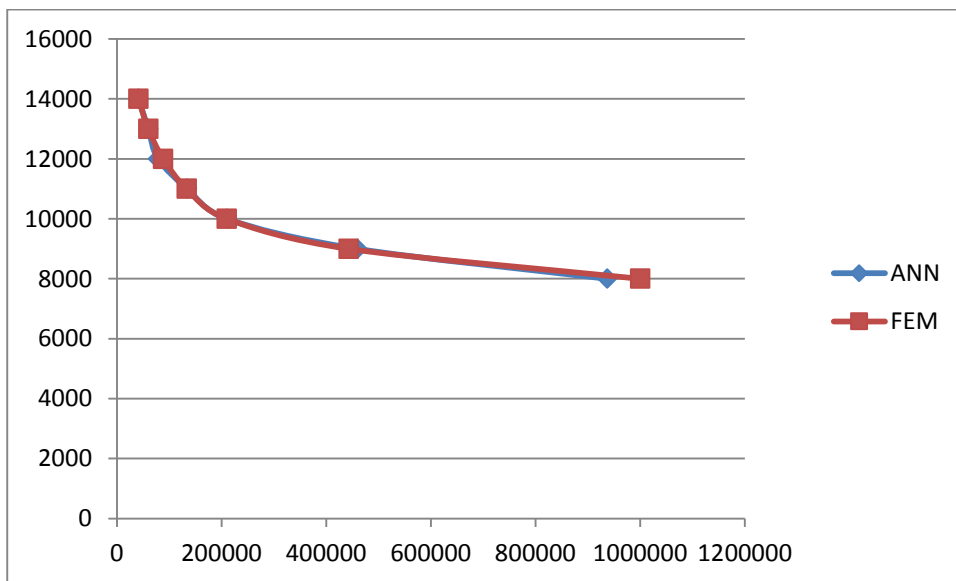
القوة (N)F	الزاوية (degree) θ	العمق (mm)H	نتائج FEM	نتائج ANN	نسبة الخطأ
13000	90	25	26681	28890	%7.64
13750	75	20	45365	42240	%6.88
13500	30	20	58789	55740	%5.18
10000	15	20	163050	156860	%3.79

الجدول (5.4) المقارنة بين نتائج FEM و ANN.



الشكل (79) مخطط المقارنة بين نتائج FEM و ANN.

و تمّ أيضاً رسم مخطط إجهاد - عدد دورات بواسطة العناصر المنتهية و الشبكات العصبونية الصناعية لمقارنة دقة الشبكة.



الشكل (80) مخطط إجهاد-عدد دورات محسوب بواسطة العناصر المنتهية, و الشبكات العصبونية الصناعية.

عدد دورات الانهيار (cycle) (2N)	العمق H (mm)	الزاوية θ (degree)	القوة F (N)
1.00E+06	2	90	8250
5.66E+04	2	90	13750
8.96E+05	5	90	8500
5.67E+04	5	90	13750
6.04E+05	10	90	9000
5.18E+04	10	90	14000
1.00E+06	20	90	8000
5.19E+04	20	90	13500
1.61E+05	25	90	9000
2.41E+04	25	90	13250
5.18E+04	0	0	14000
1.00E+06	2	45	8000
2.04E+05	2	45	10500
6.79E+04	2	45	13250
8.94E+05	5	45	8500
9.00E+04	5	45	12500
4.97E+05	10	45	9250
8.98E+04	10	45	12500
3.41E+05	20	45	9750
2.85E+05	20	45	10000
5.14E+04	20	45	14000
1.00E+06	25	45	8000
7.39E+04	25	45	13000
6.04E+05	2	60	9000
8.19E+04	2	60	12750
2.88E+05	5	60	10000
8.18E+04	5	60	12750
4.14E+05	10	60	9500
7.46E+04	10	60	13000
4.13E+05	20	60	9500
5.17E+04	20	60	14000
8.08E+05	25	60	8000

1.79E+05	25	60	10000
2.03E+05	2	30	10500
8.98E+04	2	30	12500
7.70E+05	5	30	8750
1.03E+05	5	30	12250
5.36E+04	5	30	14000
1.00E+06	10	30	8000
1.38E+05	10	30	11500
6.37E+05	20	30	9000
6.43E+04	20	30	13500
1.57E+05	25	30	10000
4.92E+04	25	30	12750
2.87E+05	2	15	10000
6.18E+04	2	15	13500
4.12E+05	5	15	9500
5.16E+04	5	15	14000
1.00E+06	10	15	8000
1.53E+05	10	15	11250
5.87E+04	10	15	13750
8.91E+05	20	15	8500
1.33E+05	20	15	11500
5.16E+04	20	15	14000
6.55E+05	25	15	8000
1.39E+05	25	15	10250
3.31E+04	25	15	13750
4.99E+05	2	75	9250
7.45E+04	2	75	13000
5.17E+04	2	75	14000
1.00E+06	5	75	8000
2.03E+05	5	75	10500
1.63E+05	10	75	11000
6.17E+04	10	75	13500
5.16E+04	10	75	14000
1.00E+06	20	75	8000

2.10E+05	20	75	10000
7.27E+04	20	75	12500
6.00E+04	20	75	13000
4.14E+04	20	75	14000
4.37E+05	25	75	8000
7.56E+04	25	75	11000
3.28E+04	25	75	13000

الجدول (5.5) البيانات المستخدمة في تدريب الشبكة.

5.4 الخاتمة:

تمّ في هذه الدراسة استخدام الشبكات العصبونية الصناعية في حساب العمر التعبّي لجائز فولاذي يحوي شقاً في المنتصف، حيث ولدت البيانات اللازمة لتدريب الشبكة من نمذجة الجائز الفولاذي على برنامج ANSYS Workbench، و قد أظهرت الشبكات العصبونية الصناعية فاعلية و مرونة كبيرة في حساب العمر التعبّي حيث اختصرت مراحل و اجراءات كثيرة كانت تتم أثناء حساب العمر التعبّي بطريقة العناصر المنتهية، و اختصرت زمن حساب العمر التعبّي مما يساعد على استخدام الشبكة العصبونية الصناعية في التحكم اللحظي ببارامترات اختبار التعب و اجراء التصحيحات اللازمة عند ربطها المباشر مع آلة اختبار التعب، كما يمكن توسيع استخدام الشبكات العصبونية كأداة أمثلة لاختيار أبعاد القطع المدروسة أو أنواع الفولاذ القادر على تحمل أكبر عدد ممكن من دورات التحميل.

الاختلافات بين نتائج العناصر المنتهية و الشبكات العصبونية الصناعية مهمل لم يتجاوز 3% مما يعطي توافق جيد في النتائج المحسوبة، ويعطي امكانية استخدام الطريقتين معاً في مسائل تعب أخرى، ويفتح خطوط بحثية جديدة في مجال التعب على اختلاف ظروف التحميل أو البيئة المحيطة أو نوع المواد المستخدمة.

5.4 التوصيات و العمل المستقبلي:

- ينصح بالاستخدام المشترك لتقنية العناصر المنتهية و الشبكات العصبونية الصناعية في حساب العمر التعبى للفولاذ عموماً ولأي مادة نظراً للفائدة من مزايا الطريقتين للحصول على نموذج أفضل لحساب العمر التعبى.
- العمل على حساب العمر التعبى ضمن طرق أخرى، حيث تمّ حساب العمر التعبى للفولاذ في هذه الدراسة بطريقة إجهاد-عدد دورات، لذا ينصح بحساب العمر التعبى باستخدام طريقة انفعال - دورات أو طريقة ميكانيك التصدع المرن الخطي وذلك باتباع منهجية الدراسة المقترحة نفسها.
- العمل على حساب العمر التعبى لحالات تحميل معقدة كتطبيق الانحناء الدوراني أو لحالات تحميل متغيرة السعة و حالات تحميل متعددة المحاور.
- تطوير الشبكة العصبونية المقترحة من أجل أنواع أخرى من الفولاذ و استخدام هذه الشبكة لاختيار النوع الأفضل من الفولاذ القادر على تحمل أكبر عدد من الدورات.
- تطوير الشبكة العصبونية المقترحة لاختيار الأبعاد الأمثل للقطع المدروسة وبالتالي الوصول إلى عينة بأبعاد مثالية و بوزن مثالي و قادر على تحمل عدد مرتفع من دورات التحميل.
- تهجين الشبكة العصبونية المقترحة بالخوارزميات الجينية من أجل رفع قدرة الشبكة على فرز و اختيار العينات و الحالات المثالية .
- استخدام المنطق الضبابي fuzzy logic مع الشبكة العصبونية المقترحة وذلك من أجل تحسين معاملات الشبكة العصبونية كعدد العصبونات المخفية في الشبكة أو معامل التعلم أو يمكن استخدام الشبكة العصبونية الصناعية للاستنتاج بأسلوب المنطق الضبابي.

- تطوير شبكات عصبونية صناعية لحساب العمر التعبى لتطبيقات هندسية أخرى ,مثل حساب العمر التعبى لمسنن أو لولب نقل قدرةإلخ.

- 1- Mathew, M. D., Kim, D. W., & Ryu, W. S. (2008). A neural network model to predict low cycle fatigue life of nitrogen-alloyed 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 474(1-2), 247-253.
- 2- Genel, K. (2004). Application of artificial neural network for predicting strain-life fatigue properties of steels on the basis of tensile tests. *International Journal of Fatigue*, 26(10), 1027-1035.
- 3-Guo, Z. Y., Sun, J. N., & Du, F. S. (2016). Application of finite element method and artificial neural networks to predict the rolling force in hot rolling of Mg alloy plates. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(1), 43-48.
- 4-Ćojbašić, Ž., Nikolić, V., Petrović, E., Pavlović, V., Tomić, M., Pavlović, I., & Ćirić, I. (2014). A real time neural network based finite element analysis of shell structure. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 12(2), 149-155.
- 5-Singh, A., & Rohilla, V. OPTIMIZATION AND FATIGUE ANALYSIS OF A CRANE HOOK USING FINITE ELEMENT METHOD.
- 6-M. A. Maleque and M. S. Salit, (2013) Materials Selection and Design, SpringerBriefs in Materials
- 7-Alshahbouni, T. S., & Güngör, A. An Evaluation Study on Fatigue Life of U-shape Aluminium and Structural Steel Fatigue Sensor.
- 8- Sadati, S. H., Kaklar, J. A., & Ghajar, R. (2011). Application of Artificial Neural Networks in the Estimation of Mechanical Properties of Materials. In *Artificial Neural Networks-Industrial and Control Engineering Applications*. InTec
- 9- Bader, Q., & Kadum, E. (2014). Effect of V Notch Shape on Fatigue Life in Steel Beam Made of AISI 1037. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), 39-46.

- 10- Bishop, N. W., & Sherratt, F. (2000). *Finite element based fatigue calculations*. NAFEMS.
- 11- Marwala, T. (2010). *Finite element model updating using computational intelligence techniques: applications to structural dynamics*. Springer Science & Business Media.
- 12- Mandage, A. P., Sharma, M. H., Rayate, A. K., Kange, P. N., & Hirulkar, N. S. Fatigue Life Estimation of An Aluminium Wheel Rim Using Finite Element Analysis.
- 13- Köksal, N. S., Kayapunar, A., & Çevik, M. (2013, June). Fatigue analysis of a notched cantilever beam using ANSYS workbench. In *Proceedings Book Of The Fourth International Conference On* (p. 111).
- 14- Rusia, S., & Pathak, K. K. (2016). Application of artificial neural network for analysis of triangular plate with hole considering different geometrical and loading parameters. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(01), 31.
- 15- Abdalla, J. A., & Hawileh, R. (2010, June). Energy-based predictions of number of reversals to fatigue failure of steel bars using artificial neural network. In *Proc. 13th Int. Conf. Comput. Civ. Build. Eng.(ICCCBE-2010)*, Univ. of Nottingham, Nottingham, England.
- 16 - Allen, C. M., & Boardman, B. (2005). ASM handbook, volume 1, properties and selection: irons, steels, and high performance alloys section: publication information and contributors publication information and contributors. *Fonderie*, 1, 1618.
- 17- Howard, K., & Dana, M. (2000). ASM Handbook: Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation.
- 18- Dexter, R. J., Fisher, J. W., & Roy, S. (1999). Fatigue and fracture. *FUNDAMENTALS*, 451.
- 19- Bannantine, J. A., Comer, J. J., & Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis* (Vol. 90). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.

- 20- Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. Tata McGraw-Hill Education.
- 21- S. Shewale, D., & Madhekar, S.N.(2015, July) Fatigue life prediction of steel I section using finite element simulation
- 22- Demuth,H., Beale.,M &Hagan, M. Neural Network Toolbox user's Guide MATLAB
- 23-Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2011). The ANN application in FEM modeling of mechanical properties of Al–Si alloy. *Applied Mathematical Modelling*, 35(12), 5707-5713.