



بسم الله الرحمن الرحيم

تصميم وتحليل خطاف رافعة مفرد باستخدام نظرية العناصر المحددة

Design and Analysis of a Single Crane Hook using Finite Element
Analysis Programs (FEA)

بحث تكميلي لنيل درجة البكالوريوس مرتبة الشرف في
الهندسة الميكانيكية

إعداد:

إبراهيم محمد عبد الله محمد

مصعب أحمد إبراهيم أبوشورة

ميسرة علي بشير محمد خير

إشراف:

أ/عبد السلام عوض الله علي

كلية الهندسة

جامعة الشيخ عبد الله البدري

يونيو - 2025

الإستهلال

قال تعالى:

((لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا ۚ لَهَا مَا كَسَبَتْ وَعَلَيْهَا مَا اكْتَسَبَتْ ۗ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ

أَخْطَاْنَا ۗ رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إَصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا ۗ رَبَّنَا وَلَا تُحَمِّلْنَا مَا لَا طَاقَةَ لَنَا

بِهِ ۗ وَاعْفُ عَنَّا وَاعْفِرْ لَنَا وَارْحَمْنَا ۚ أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ الْكَافِرِينَ))

صدق الله العظيم

الإهداء

أهدي هذا البحث إلى من قال الحق فيهما:

((وَأَخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا

رَبَّيَانِي صَغِيرًا))

صدق الله العظيم

الشكر والتقدير

الشُّكْرُ هو عبادةُ الأنبياءِ والأصفياءِ من كلِّ جيلٍ .. ولذلك فإنَّ المُتَّصِفِينَ بها والعاملينَ لها في كلِّ زمنٍ قليلٌ.....

الحمدُ لله الذي خلقَ السمواتِ والأرضَ وجعلَ الظلماتِ والنورَ، الحمدُ لله كما ينبغي لجلالِ وجهه، وعظيمِ سلطانِه، الحمدُ لله حمدُ الشاكرينَ، والشكرُ له شكرُ الحامدينَ، اللهم لك الحمدُ حتى تَرْضَى، ولك الحمدُ إذا رَضِيتَ، ولك الحمدُ بعد الرِّضَى نحمد الله عز وجل الذي وفقنا الي إتمام هذا البحث العلمي.

من لايشكر الناس لا يشكر الله:

نُقدم جزيل الشكر والتقدير إلى الاستاذ المشرف / عبد السلام عوض الله علي

على كل ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات قيمة ساهمت في إثراء موضوع دراستنا في جوانبها المختلفة.

كما نتقدم بجزيل الشكر إلى أساتذة كلية الهندسة جامعة الشيخ عبدالله البدري.

كذلك الشكر موصول للذين ساهموا معنا في إخراج هذا الجُهد المتواضع بفعل او قول او أسرونا في دعواتهم في ظهر الغيب، وإلى أسرنا التي جاهدت وتكبدت المشاق في سبيل وصولنا لما أعاننا الله للوصول إليه ونسأل الله أن يُعيننا على رد إحسانهم بأحسن مما قدموا لنا وجزاهاهم الله عنا خير الجزاء.

الخلاصة

لا يمكن للرافعات (Cranes) رفع الأحمال الثقيلة بدون الخطاف (Hook). وهو الجزء المعلق الذي يحمل الحمل للرفع أو النقل. يجب أن يكون الخطاف قوياً، ومصنوعاً من معدن قوي ليتحمل وزن الحمل. تتوفر أنواع مختلفة من أشكال الخطافات المستخدمة لأغراض مختلفة لحمل الأحمال. يهدف هذا المشروع إلى تصميم خطاف رافعة مفرد باستخدام مادة (Structural Steel) وإجراء عليه التحليل الإستاتيكي (Static Structural Analysis) باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) لمعرفة حدود التشوهات والإجهادات ومعامل الأمان، وتحليل الكلال (Fatigue Analysis) لمعرفة العمر الافتراضي للخطاف، وتحليل الانبعاج (Buckling Analysis) لمعرفة الحمل الحرج المطلوب لحدوث التشوهات الدائمة (الإنبعاج). تم إنشاء نموذج صلب ثلاثي الأبعاد بواسطة برنامج SOLIDWORKS 20، وتم استخدام طريقة أو منهجية العناصر المحدودة (Finite element Analysis) لإجراء التحليل. وتم الحصول على النتائج باستخدام برنامج ANSYS16، وتم تقديم الدراسات البارامترية.

Abstract

Cranes cannot lift heavy loads without a hook. This is the suspended part that holds the load for lifting or transporting. The hook must be strong and made of a durable metal to withstand the load. Different types of hook shapes are available for different load-carrying purposes.

This project aims to design and analyses a single crane hook using structural steel material. Static structural analysis was performed to determine the deformation limits, stresses, and safety factor. Fatigue analysis was performed to determine the service life of the hook. Buckling analysis was performed to determine the critical load required to cause permanent deformation (Buckling).

A three-dimensional solid model was created using SOLIDWORKS 20, and finite element method (FEM) was used to conduct the analysis.

Results were obtained using ANSYS 16, and parametric studies are presented.

جدول المحتويات (Table of Contents)

i	المستخلص (Abstract)
iii	جدول المحتويات (Table of Contents)
vi	قائمة الرموز (Table of Contents)
viii	قائمة الأشكال (List of Figures)
viii	قائمة الاختصارات (List of Abbreviations)
<p style="text-align: center;">الفصل الأول: المقدمة والدراسات السابقة</p> <p style="text-align: center;">Chapter (1): Introduction & Literature Reviews</p>	
1	1-1 بعض المفاهيم الأساسية (Some Basic Concepts)
2	2-1-1 الحاجة إلى الطرق العددية (طريقة العناصر المحددة)
3	3-1-1 تطبيقات العناصر المحدودة في الهندسة (Finite Element Applications in Engineering)
3	4-1-1 تحليل العناصر المحدودة (FEA) باستخدام ANSYS Workbench
3	5-1-1 نبذة تاريخية عن منهجية العناصر المحدودة (Brief History of FEA)
4	6-1-1 الخطوات العامة لتحليل العناصر المحدودة (A General Procedure For FEA)
5	7-1-1 مقدمة عن برنامج Ansys الميكانيكي (Introduction To Ansys Mechanical)
6	8-1-1 نبذة تاريخية عن برنامج Ansys (A brief history of Ansys)
6	9-1-1 مقدمة عن الرافعات (Introduction To Cranes)
7	10-1-1 أجزاء الرافعات ووظائفها (Parts of Cranes and Their Functions)
10	11-1-1 أنواع الرافعات (Types of Cranes)
15	12-1-1 خطاف الرافعة (Crane Hook)
16	2-1 دراسات سابقة لخطاف الرافعة باستخدام منهجية العناصر المحدودة
<p style="text-align: center;">الفصل الثاني: المرونة في الأبعاد الثلاثة</p> <p style="text-align: center;">Chapter (2): Three-Dimensional Elasticity</p>	
25	1-2 مقدمة (Introduction)
25	2-2 نظرية المرونة (Theory of Elasticity)
26	1-2-2 علاقة الإجهاد والانفعال (Stress–Strain Relation)

26	2-2-2 الإزاحة (Displacement)
26	3-2-2 علاقة الانفعال بالإزاحة (Strain–Displacement Relation)
27	4-2-2 معادلات الاتزان (Equilibrium Equations)
28	5-2-2 الشروط الحدود (Boundary Conditions)
28	6-2-2 تحليل الإجهاد (Stress Analysis)
28	3-2 نمذجة الهياكل المرنة ثلاثية الأبعاد (Modelling of 3-D Elastic Structures)
29	1-3-2 تقسيم الشبكة (Mesh Discretization)
29	2-3-2 الشروط الحدية: التثبيت (Boundary Conditions: Supports)
31	3-3-2 الشروط الحدية: الأحمال (Boundary Conditions: Loads)
31	4-3-2 تحليل التجميع: نقاط التلامس (Assembly Analysis: Contacts)
32	4-2 صياغة العناصر الصلبة (Formulation of Solid Elements)
32	1-4-2 الصيغة العامة (General Formulation)
33	2-4-2 أنواع العناصر الصلبة النموذجية (Typical Solid Element Types)
34	3-4-2 صياغة عنصر سداسي السطوح خطي (Formulation of a Linear Hexahedral Element Type)
38	4-4-2 معالجة الأحمال الموزعة (Treatment of Distributed Loads)
الفصل الثالث: تحليل الفشل	
Chapter (3): Failure Analysis	
40	1-3 مقدمة (Introduction)
40	2-3 الفشل الساكن (Static Failure)
40	1-2-3 الفشل المطاوع (Ductile Failure)
40	1-1-2-3 نظرية إجهاد القص الأقصى (معيار تريسكا) (Maximum Shear Stress Theory (Tresca Criterion))
41	2-1-2-3 نظرية طاقة التشويه (معيار فون ميزس) (Distortion Energy Theory (von Mises Criterion))
41	2-2-3 الفشل الهش (Brittle Failure)
41	1-2-2-3 نظرية الإجهاد العمودي الأقصى Maximum Normal Stress Theory
42	2-2-2-3 نظرية مور-كولومب Mohr–Coulomb Theory
43	3-3 فشل الكلال (Fatigue Failure)

44	1-3-3 معيار فشل سودربيرج Soderberg Failure Criterion
45	2-3-3 معيار فشل جودمان Goodman Failure Criterion
46	3-3-3 معيار فشل جيربر Gerber Failure Criterion
47	4-3 فشل الانبعاج (Buckling Failure)
<p>الفصل الرابع: النمذجة والمحاكاة لخطاف الرافعة</p> <p>Chapter (4) Modeling and Simulation of The Crane Hook</p>	
49	1-4 النموذج (Geometry)
51	2-4 الخطوات المتبعة في تحليل ومحاكاة خطاف الرافعة
52	1-2-4 تحليل الهيكل تحت تأثير الحمل الساكن (Static Structural Analysis)
64	2-2-4 تحليل فشل الكلال -التعب (Fatigue Failure)
64	3-1-4 تحليل فشل الانبعاج Buckling Failure analysis
<p>الفصل الخامس: مناقشة النتائج والخلاصة والتوصيات</p> <p>Chapter (5) Results, Conclusion and Recommendations</p>	
72	1-5 مناقشة النتائج (Results)
72	1-1-5 التحليل الساكن (Static Structural)
74	2-1-5 تحليل الكلال (Fatigue Analysis)
75	3-1-5 تحليل الانبعاج (Buckling Analysis)
77	2-5 الخلاصة (Conclusion)
78	3-5 التوصيات (Recommendations)
79	المراجع (References)

قائمة الرموز (List of Symbols)

الرمز (Symbol)	المعامل (Parameter)	الوحدة (Unit)
F	القوى (Force)	N
U	الازاحة (Displacement)	mm
f_i, f_j	القوة عند العقد (Nodal Forces)	N
u_i, u_j	الازاحة عند العقد (Nodal Displacements)	mm
σ	الاجهاد (Stress)	Pa
σ_x	الإجهاد في الاتجاه X (Stress In X Direction)	Pa
σ_y	الإجهاد في الاتجاه Y (Stress In Y Direction)	Pa
σ_z	الإجهاد في اتجاه Z (Stress In Z Direction)	Pa
τ_{xy}	إجهاد القص في المستوى X و Y (Shear Stress In X, Y Plane)	Pa
τ_{yz}	إجهاد القص في المستوى Y و Z (Shear Stress In Y, Z Plane)	Pa
τ_{xz}	إجهاد القص في المستوى X و Z (Shear Stress In Z, X Plane)	Pa
ε_x	إجهاد في اتجاه X (Strain In X Direction)	mm
ε_y	إجهاد في اتجاه Y (Strain In Y Direction)	mm
ε_z	إجهاد في اتجاه Z (Strain In Z Direction)	mm
γ_{xy}	الالتواء في المستوى X و y (Twist In X, Y Plane)	Deg
γ_{yz}	اللتواء في المستوى Z و Y (Twist In Y, Z Plane)	Deg
γ_{xz}	اللتواء في المستوى X و Z (Twist In Z, X Plane)	Deg
E	معامل يونغ (Young's Modulus)	—
V	نسبة بويسون (Poisson Ratio)	—
G	معامل القص (Shear Modulus)	—

ε_{xo}	الانفعال الأولي في اتجاه X) Initial Strain In X (Direction	mm
ε_{yo}	الانفعال الأولي في الاتجاه Y) Initial Strain In Y (Direction	mm
γ_{xyo}	الالتواء الأولي في اتجاه X و Y) Initial Twist In X,Y (Direction	Deg
σ_o	الإجهاد الأولي (Initial Stress)	Pa
t_x, t_y	قوى الجر (Traction Forces)	N
s_u, s_t	أجزاء من الحدود (Parts of Boundary)	—
Γ_σ	الجر المحدد (Specified Traction)	Pa
Γ_u	الإزاحة المحددة (Specified Displacement)	mm
$\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$	الاجهادات الرئيسية الثلاث (Three Principal Stresses)	Pa
τ^{max}	إجهاد القص الأقصى (Maximum Shear Stress)	N/mm
s_y	مقاومة خضوع المادة (Material Yield Strength)	Pa
σ_e^{max}	إجهاد فون ميس الأقصى (Maximum Von Mises) (Stress	Pa
S_{ut}	قوة الشد القصوى (Ultimate Tensile Strength)	N
S_{uc}	قوة الضغط القصوى (Ultimate Compressive) (Strength	N
σ_a	الاجهاد المتناوب (Alternating Stress)	Pa
σ_m	الاجهاد المتوسط (Mean Stress)	Pa
S_e	حد التحمل (Endurance Limit)	Pa
σ_e	الاجهاد المتناوب الفعال (Effective Alternating) (Stress	Pa

قائمة الاشكال (List of Figures)

الشكل 1-1	أشياء مبنية من قطع بسيطة وصغيرة
الشكل 2-1	رسم تخطيطي لعملية تطوير المنتج بواسطة الكمبيوتر
الشكل 3-1	الرافعة
الشكل 4-1	أجزاء الرافعة
الشكل 5-1	رافعة علوية
الشكل 6-1	رافعة برجية
الشكل 7-1	رافعة زاحفة
الشكل 8-1	رافعة شاحنة
الشكل 9-1	رافعة الاراضي الوعرة
الشكل 10-1	رافعة لجميع التضاريس
الشكل 12-1	خطاف الرافعة
الشكل 13-1	خطاف الرافعة المفرد
الشكل 14-1	خطاف الرافعة المزدوج
الشكل 1-2	حالة الإجهاد عند نقطة في جسم مرن ثلاثي الأبعاد
الشكل 2-2	حدود المجال المرن ثلاثي الأبعاد
الشكل 3-2	تحليل العناصر المحدودة لوصلة السحب
الشكل 4-2	تحليل وصلة تروس
الشكل 5-2	تعيين عنصر لنظام الإحداثيات الطبيعية
الشكل 6-2	القوى العقدية المكافئة على عنصر من الطوب مكون من 20 عقدة لحمل الضغط P
الشكل 1-3	منحنيات الإجهاد والانفعال للمواد الهشة والمطيلة
الشكل 2-3	غلاف الفشل المربع لنظرية الإجهاد العمودي الأقصى
الشكل 3-3	غلاف الفشل السداسي لنظرية مور-كولومب
الشكل 4-3	دورة الإجهاد والكلال النموذجية
الشكل 5-3	مخططات الكلال تُظهر معايير الفشل المختلف
الشكل 6-3	منحنى S-N لتقدير عمر الكلال
الشكل 7-3	انبعاج عمود نحيف
الشكل 8-3	انبعاج عمود نحيف

قائمة الاختصارات (List of Abbreviations)

CAE	الهندسة بمساعدة الحاسوب (Computer-Aided Engineering)
CAM	التصنيع بمساعدة الحاسوب (Computer-Aided Manufacturing)
CAD	التصميم بمساعدة الحاسوب (Computer-Aided Design)
FEM	نظرية العناصر المحددة (Finite Element Method)

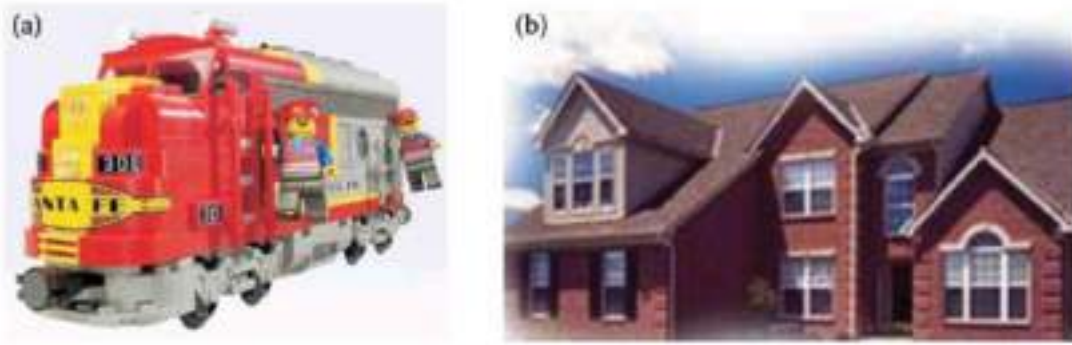
الفصل الأول

المقدمة والدراسات السابقة

(Introduction & Literature Reviews)

1-1 بعض المفاهيم الأساسية (Some Basic Concepts)

تعتمد طريقة العناصر المحدودة (FEM)، أو تحليل العناصر المحدودة (FEA)، على فكرة بناء جسم معقد باستخدام مكعبات بسيطة، أو تقسيم جسم معقد إلى قطع أصغر وأسهل في الاستخدام. يمكن تطبيق هذه الفكرة البسيطة في كل مكان في الحياة اليومية (الشكل 1.1)، وكذلك في الهندسة. على سبيل المثال، يلعب الأطفال بالألعاب الليغو® باستخدام العديد من القطع الصغيرة، كل منها ذات شكل (Geometry) بسيط للغاية، لبناء أشياء مختلفة مثل القطارات والسفن والمباني. مع زيادة عدد القطع الأصغر، ستبدو هذه الأشياء أكثر واقعية. رياضياً، هذا ببساطة استخدام مفهوم الحد (Limit)، أي الاقتراب من جسم أملس أو تمثيله بعدد محدود من القطع البسيطة وزيادة عدد هذه القطع لتحسين دقة هذا التمثيل.



الشكل (1-1) أشياء مبنية من قطع بسيطة وصغيرة

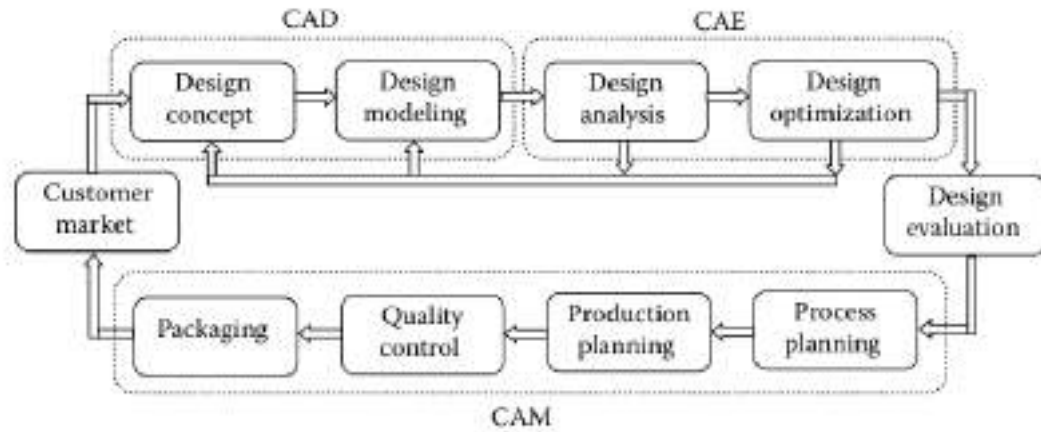
(a) سيارة إطفاء مبنية من ليغو

(b) منزل مبني من عناصر متعددة - طوب، عوارض، أعمدة، ألواح، وما إلى ذلك

1-1-1 طريقة العناصر المحدودة (finite element method)

أحدثت الحواسيب ثورة في مجال الهندسة. فتصميم المنتجات الذي كان يُنجز بالرسومات اليدوية المملة، استُبدل بالتصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) باستخدام رسومات الحاسوب. كان تحليل التصميم يُجرى بالحسابات اليدوية، كما استُبدلت العديد من الاختبارات بالمحاكاة الحاسوبية باستخدام برامج الهندسة بمساعدة الحاسوب (CAE). وقد أحدثت تقنيات التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) والتصنيع بمساعدة الحاسوب (CAM) مجتمعةً تغييرًا جذريًا في الهندسة (شكل 1-2)، يمكن الآن إنتاج سيارة، كانت تستغرق من خمس إلى ست سنوات من التصميم إلى المنتج، بدءًا من التصميم النظري وحتى التصنيع في غضون عام واحد باستخدام تقنيات CAD/CAE/CAM.

من بين جميع الأدوات الحاسوبية المستخدمة في الهندسة (CAE)، تُعد تقنية العناصر المحدودة FEM الطريقة الأكثر استخدامًا، أو إحدى أقوى "الآلات الحاسبة" الحديثة المتاحة لطلاب الهندسة والمهنيين. توفر تقنية FEA طريقة لاختبار تصميم المنتج افتراضياً. فهي تساعد المستخدمين على فهم تصاميمهم وتنفيذ التغييرات التصميمية المناسبة في مرحلة مبكرة من عملية تطوير المنتج. إن اعتماد تحليل العناصر المحدودة في مراحل التصميم مدفوع بحاجة السوق لأنه يجلب العديد من الفوائد التي ستساعد الشركات على صنع منتجات أفضل بتكاليف إنتاج وتطوير أقل ووقت إنتاج أقل.



الشكل 1-2 رسم تخطيطي لعملية تطوير المنتج بواسطة الكمبيوتر

2-1-1 الحاجة إلى الطرق العددية (طريقة العناصر المحدودة)

Need For Numerical Methods (Finite Element Method)

للتنبؤ بسلوك المسائل الهندسية المعقدة، يعتمد المصمم ثلاث أدوات: الطرق التحليلية (Analytical Methods)، والتجريبية (Experimental Methods)، والعددية (Numerical Methods). تُستخدم الطريقة التحليلية للمقاطع المنتظمة للكيانات الهندسية المعروفة أو البدائيات، حيث يتم التعبير عن شكل المكونات رياضياً. يكون الحل الناتج عن الطريقة التحليلية دقيقاً ويستغرق وقتاً أقل. لا يمكن استخدام هذه الطريقة للمقاطع غير المنتظمة والأشكال التي تتطلب معادلات رياضية معقدة للغاية. من ناحية أخرى، تُستخدم الطريقة التجريبية لإيجاد المعاملات المجهولة ذات الأهمية. لكن التجربة تتطلب معدات اختبار وعينة لكل سلوك مطلوب. وهذا بدوره يتطلب تكلفة أولية كبيرة جداً لشراء المعدات وإعداد العينات.

3-1-1 تطبيقات العناصر المحدودة في الهندسة

(Finite Element Applications in Engineering)

يمكن تطبيق طريقة العناصر المحدودة في حل النماذج الرياضية للعديد من المسائل الهندسية، بدءًا من تحليل إجهادات الهياكل الجمالونية والإطارية أو الآلات المعقدة، وصولًا إلى الاستجابات الديناميكية للسيارات والقطارات والطائرات تحت أحمال ميكانيكية وحرارية وكهرومغناطيسية مختلفة. هناك العديد من تطبيقات العناصر المحدودة في الصناعات، بدءًا من السيارات والفضاء والدفاع والمنتجات الاستهلاكية والمعدات الصناعية، وصولًا إلى الطاقة والنقل والبناء، كما امتدت تطبيقات طريقة العناصر المحدودة لتشمل علوم المواد والهندسة الطبية الحيوية والجيوفيزياء والعديد من المجالات الناشئة الأخرى في السنوات الأخيرة.

4-1-1 تحليل العناصر المحدودة (FEA) باستخدام ANSYS Workbench

على مدى العقود القليلة الماضية، أصبحت العديد من البرامج التجارية متاحة لإجراء تحليل العناصر المحدودة. من بين مجموعة شاملة من حلول محاكاة العناصر المحدودة التي تقدمها شركات CAE الرائدة، يُعد ANSYS® Workbench منصة سهلة الاستخدام مصممة للتكامل بسلاسة مع مجموعة تقنيات المحاكاة الهندسية المتقدمة من ANSYS, Inc. يوفر ربط ثنائي الاتجاه بأنظمة CAD الرئيسية. تهدف بيئة Workbench إلى تحسين الإنتاجية وسهولة الاستخدام بين الطلاب والباحثين. وقد تطورت لتصبح أداة لا غنى عنها لتطوير المنتجات في عدد متزايد من الشركات، حيث تجد تطبيقات في العديد من المجالات الهندسية المتنوعة.

5-1-1 نبذة تاريخية عن منهجية العناصر المحدودة (Brief History of FEA)

طريقة العناصر المحدودة هي إجراء عددي يُمكن تطبيقه للحصول على حلول لمجموعة متنوعة من المسائل الهندسية. يمكن تحليل مسائل الاتزان، والمسائل العابرة، والخطية، وغير الخطية في تحليل الإجهاد، وانتقال الحرارة، وتدفق الموائع، والمسائل الكهرومغناطيسية باستخدام طرق العناصر المحدودة. يعود أصل طريقة العناصر المحدودة الحديثة إلى أوائل القرن العشرين، عندما قام بعض الباحثين بتقريب ونمذجة الوصلات المرنة باستخدام قضبان مرنة متكافئة منفصلة. ومع ذلك، يُنسب الفضل إلى كورانت (1943) باعتباره أول من طور طريقة العناصر المحدودة. في ورقة بحثية نُشرت في أوائل الأربعينيات، استخدم كورانت الاستيفاء متعدد الحدود القطعي على مناطق فرعية مثلثية لدراسة مسائل الالتواء.

اتخذت شركة بوينغ الخطوة المهمة التالية في استخدام منهجية العناصر المحدودة في خمسينيات القرن الماضي، عندما استخدمت بوينغ، وتبعها شركات أخرى، عناصر الإجهاد المثلثية لنمذجة أجنحة الطائرات. ومع ذلك، لم يشتهر مصطلح العناصر المحدودة إلا في عام 1960 مع كلوف. وخلال الستينيات، بدأ الباحثون في تطبيق أسلوب العناصر المحدودة على مجالات هندسية أخرى، مثل مسائل انتقال الحرارة والتدفق. وفي عام 1967، كتب زينكيفيتش وتشيونغ (1967) أول كتاب مُخصص بالكامل لطريقة العناصر المحدودة.

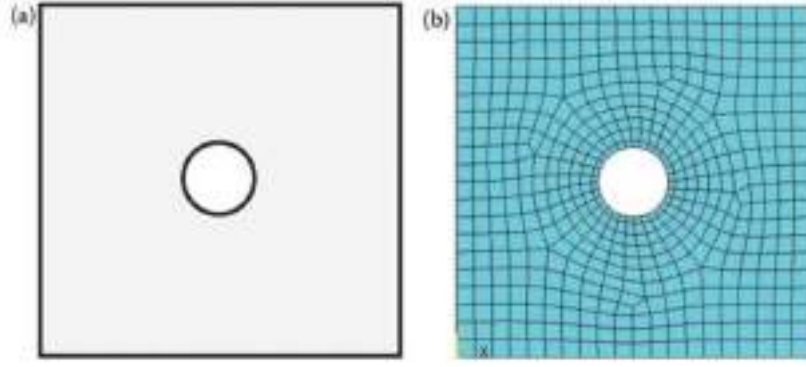
6-1-1 الخطوات العامة لتحليل العناصر المحدودة (A General Procedure For FEA)

لإجراء تحليل العناصر المحدودة، يلزم اتباع الإجراء التالي بشكل عام:

- تقسيم نموذج CAD/الهندسي إلى أجزاء لإنشاء "شبكة" (مجموعة من العناصر ذات العقد، الشكل 4-1).
- وصف سلوك الكميات الفيزيائية على كل عنصر.
- توصيل (تجميع) العناصر عند العقد لتشكيل نظام تقريبي من المعادلات للنموذج بأكمله.
- تطبيق الأحمال والشروط الحدية (مثلاً، لمنع النموذج من الحركة).
- حل نظام المعادلات الذي يتضمن كميات مجهولة عند العقد (مثلاً، الإزاحات).
- حساب الكميات المطلوبة (مثلاً، الانفعالات والإجهادات) عند العناصر أو العقد.

في برامج تحليل العناصر المحدودة التجارية، يُعاد ترتيب هذا الإجراء عادةً إلى المراحل التالية:

- المعالجة المسبقة (بناء نماذج العناصر المحدودة، وتحديد خصائص العناصر، وتطبيق الأحمال والقيود)
- مُحلِّل العناصر المحدودة (تجميع وحل نظام معادلات العناصر المحدودة، وحساب نتائج العناصر)
- المعالجة اللاحقة (فرز النتائج وعرضها)



الشكل (4-1)

(a) صفيحة بها ثقب (نموذج CAD).

(b) تقسيم العناصر المحدودة (شبكة).

7-1-1 مقدمة عن برنامج Ansys الميكانيكي (Introduction To Ansys Mechanical)

يُعد برنامج Ansys الميكانيكي أداة تحليل العناصر المحدودة للتحليل الإنشائي، بما في ذلك الدراسات الخطية وغير الخطية والديناميكية. يوفر هذا المنتج المُحاكي للحاسوب إمكانية استخدام العناصر المحدودة لنمذجة السلوك، ويدعم نماذج المواد الهندسية ومُحلات المعادلات لمجموعة واسعة من مسائل التصميم الميكانيكي. كما يتضمن برنامج Ansys الميكانيكي التحليل الحراري والفيزياء المُقترنة، بما في ذلك التحليل الصوتي والتحليل الكهرو ضغطي والتحليل الحراري الهيكلي والتحليل الكهرو حراري.

يُستخدم هذا النوع من التحليل عادةً لتصميم وتحسين أنظمة معقدة للغاية بحيث يصعب تحليلها يدويًا. أما الأنظمة التي قد تدرج تحت هذه الفئة، فهي معقدة للغاية بسبب هندستها أو مقياسها أو معادلاتها الحاكمة.

يُعد برنامج Ansys أداة التدريس القياسية لتحليل العناصر المحدودة في أقسام الهندسة الميكانيكية في العديد من الكليات. ويُستخدم برنامج Ansys أيضًا في الهندسة المدنية والكهربائية، بالإضافة إلى أقسام الفيزياء والكيمياء. يوفر نظام Ansys طريقةً فعّالة من حيث التكلفة لاستكشاف أداء المنتجات أو العمليات في بيئة افتراضية (Virtual Environment). يُطلق على هذا النوع من تطوير المنتجات اسم "النمذجة الافتراضية". باستخدام تقنيات النمذجة الافتراضية، يُمكن للمستخدمين تكرار سيناريوهات مُختلفة لتحسين المنتج قبل بدء التصنيع بوقت طويل. يُتيح ذلك تقليل مستوى المخاطر، وتقليل تكلفة التصميمات غير الفعّالة. كما تُتيح الطبيعة المتعددة الجوانب لنظام ANSYS وسيلةً لضمان قدرة المستخدمين على رؤية تأثيرات التصميم على سلوك المنتج ككل، سواءً أكان كهرومغناطيسي أم حراريًا أم ميكانيكيًا، إلخ.

8-1-1 نبذة تاريخية عن برنامج Ansys (A brief history of Ansys)

في عام 1971، صدر برنامج Ansys لأول مرة. هو برنامج حاسوبي شامل متعدد الأغراض للعناصر المحدودة، يحتوي على أكثر من 100,000 سطر من التعليمات البرمجية. يستطيع Ansys إجراء تحليلات ثابتة وديناميكية، وتحليلات انتقال الحرارة، وتدفق السوائل، والكهرومغناطيسية. يُعد برنامج Ansys برنامجًا رائدًا في تحليل العناصر المحدودة (FEA) لأكثر من 40 عامًا. يتميز الإصدار الحالي من Ansys بمظهر جديد تمامًا، مع نوافذ متعددة تتضمن واجهة مستخدم رسومية (GUI)، وقوائم منسدلة، ومربعات حوار، وشرائط أدوات. يُستخدم برنامج Ansys اليوم في العديد من المجالات الهندسية، بما في ذلك الفضاء، والسيارات، والإلكترونيات، والطاقة النووية. لاستخدام Ansys أو أي برنامج حاسوبي آخر من برامج تحليل العناصر المحدودة (FEA) بنجاح، من الضروري أولاً فهم المفاهيم والقيود الأساسية لطرق العناصر المحدودة فهماً كاملاً. يُعد Ansys أداة هندسية قوية ومذهلة للغاية، يمكن استخدامها لحل مجموعة متنوعة من المشكلات ومع ذلك، سيجد المستخدم الذي لا يمتلك فهماً أساسياً لطرق العناصر المحدودة نفسه في نفس المأزق الذي يواجهه فني الكمبيوتر الذي يمتلك العديد من الأدوات والأدوات الرائعة، ولكنه لا يستطيع إصلاح جهاز كمبيوتر لأنه لا يفهم آلية عمله!

9-1-1 مقدمة عن الرافعات (Introduction To Cranes)

الرافعة نوع خاص من الأجهزة يُستخدم لرفع وإنزال المواد، بالإضافة إلى تحريكها أفقياً. وعادةً ما تكون مُجهزة بحبل رفع، أو حبال سلكية أو سلاسل، وبكرات. وتشمل معظم تطبيقاتها رفع الأجسام الكبيرة ونقلها إلى مواقع جديدة. ولتحقيق ميزة ميكانيكية وتحريك الأوزان بسرعة تفوق سرعة الإنسان، تستخدم هذه الرافعات آلة بسيطة واحدة أو أكثر. تُستخدم الرافعات بشكل متكرر في التصنيع لتجميع المعدات الثقيلة، وفي البناء لنقل المواد، وفي النقل لتحميل وتفريغ البضائع.



الشكل (2-1) الرافعة

10-1-1 أجزاء الرافعات ووظائفها (Parts Of Cranes And Their Functions)

يُعد كل مكون من مكونات الرافعة تحفة هندسية ضرورية للتشغيل السليم.

فيما يلي أهم مكونات الرافعة (شكل 3-1):

1. الخطاف
2. الحبل السلكي والبكرات
3. ذراع الرافعة
4. الأتقال الموازنة
5. أذرع الامتداد
6. العجلات والجنائز
7. الرافعة
8. ذراع الرافعة



الشكل (3-1) أجزاء الرافعة

- الخطاف (The Hook)

قد يكون هذا أحد أبرز وأهم مكونات الرافعة. وهو نقطة التثبيت الأساسية للرافعة على الأحمال التي يجب أن تحملها. يمكننا الاعتماد على الخطاف لحمل أي أحمال ضخمة أو ثقيلة نحتاج إلى نقلها في موقع العمل حتى تتمكن الرافعة من انجاز العمل. يجب أن تكون الخطافات متينة وطويلة الأمد لتتمكن من حمل الأحمال الثقيلة مع ذلك، تحتاج الخطافات إلى أدوات أخرى لرفع الحمولة. تلعب العناصر التالية دورًا حاسمًا في قدرة الرافعة على رفع الأشياء باستخدام الخطاف.

- الحبال السلكية والبكرات (Wire Rope And Sheaves)

تستخدم الرافعات الحبال السلكية المتينة لرفع أحمال هائلة. في الواقع، هذه الحبال عبارة عن كابلات مصنوعة من أسلاك فولاذية ملتوية على شكل حلزوني. ولصنع حبل أقوى، تُلف العشرات من هذه اللوالب معًا. تُمكن هذه الحبال السلكية الرافعة من رفع الأشياء بخطافها. البكرات هي أجزاء من الرافعة تُحسن مقدار الوزن الذي يتحمله الخطاف. تُنبت الحبال السلكية المتصلة ببقية الرافعة في بكرة، وهي نظام بكرة. يتم توزيع الوزن بشكل أكثر توازنًا باستخدام المزيد من الحبال السلكية. ونتيجة لذلك، يمكن للخطاف أن يتحمل أحمالًا أعلى مما يتحمله حبل سلكي واحد.

• الذراع (The Boom)

يُعد الذراع، حسب حجم الرافعة، أحد أكبر مكوناتها، ويمكن رؤيته غالبًا من على بُعد أميال. يعمل هذا الذراع كذراع يحمل الحمولة، مما يُمكن الرافعة من نقل الأجسام الثقيلة وتحريكها من مكان الي آخر وتوصيل المواد بعيدًا عن قاعدة الذراع.

• الأثقال الموازنة (Counterweights)

تستطيع الرافعات تحمل أوزان كبيرة. وباستخدام الأثقال الموازنة، تتمكن من القيام بذلك دون أن تعرض الاحمال وجسم الرافعة الي حوادث بسبب عدم الاتزان الذي يحدث نتيجة لتحريك الحمل من مكان الي اخر. تُثبت هذه الأثقال على ظهر الرافعة وتعمل على موازنة وزن الحمولة. ستسقط الرافعات إذا لم تكن هناك أثقال موازنة في اتجاه معاكس للحمل، وللحفاظ على ثبات الرافعة وسلامتها، تبقى الأثقال الموازنة دائمًا في الرافعة، أثقال الموازنة قابلة للفصل لتسهيل الحركة. لتلبية متطلبات حمولتك الحالية، يمكنك زيادة أو تقليل كمية الأوزان في نظام الأثقال الموازنة.

الركائز (Outriggers)

عند نقل الأشياء في موقع العمل، تُضيف الركائز، وهي قطع من الرافعات، مستوى إضافيًا من الأمان. فهي، إلى جانب الأثقال الموازنة، تضمن بقاء الرافعات في وضعية رأسية حتى عند نقل أثقل الأحمال. تُثبت الركائز في الأرض بواسطة ركائز تمتد من جسم الرافعة، ترفع الركائز الرافعة عن عجلاتها، مما يُجنبها أي حركة طفيفة قد تُسبب تحركها. تعمل الركائز والأثقال الموازنة ونظام الرفع المُنتَظَر معًا للحفاظ على أمان رافعتك أثناء نقلها للبضائع والأحمال الضخمة عبر موقع العمل، فبالسلامة ضرورية لجميع موظفيك عند استخدام الرافعات.

العجلات والجنائز (Wheels and Tracks)

تتيح العجلات والجنائز للرافعات التحرك في جميع أنحاء موقع العمل، حسب طبيعة التضاريس. توفر العجلات مرونة أكبر في الحركة، بدءًا من المناورة في موقع العمل وحتى القيادة على الطرق السريعة بسرعات عالية، تُعد هذه العجلات الخيار الأمثل للأرض الوعرة وغير المستوية، ولكن قد تكون الجنائز الخيار الأمثل إذا كان موقع العمل رطبًا وموحلاً. مما يمنح الرافعة مستوى ثبات أعلى مقارنةً بالرافعات ذات العجلات. وهي أبطأ قليلًا من الرافعات ذات العجلات، وتحتاج إلى أرض ناعمة ومستوية لسهولة التشغيل.

- آلة الرفع (Hoist)

آلة الرفع هي المكون الرئيسي للرافعة الذي يُؤد قوة الرفع. يُرفع الخطاف ويُخفض باستخدام آلية تدوير وحبل سلكي. ويمكنها تخزين آلاف الأقدام من الحبال السلكية، مما يُتيح نقل أجسام كبيرة لمسافات طويلة وعلى ارتفاعات شاهقة مع بقاء ما يكفي من الكابلات لتثبيتها بإحكام. تُعزى قدرة الرافعة على رفع الأجسام عن الأرض إلى الرافعة. فهي مكون أساسي في الرافعة ومهم لتشغيلها، تمامًا مثل العناصر الأخرى في هذه القائمة. تقع أسطوانة الرافعة خلف الذراع الرئيسي.

11-1-1 أنواع الرافعات (Types of Cranes)

يمكن تقسيم الرافعات إلى قسمين:

1. رافعات ثابتة
2. رافعات متحركة

1- الرافعات الثابتة (Static Cranes)

الرافعة الثابتة لا تتحرك إلا في اتجاه واحد، وهي عبارة عن هيكل ثابت أو شبه ثابت، مثبت على الأرض أو الهياكل.

➤ أنواع الرافعات الثابتة (Types of Static Cranes)

- الرافعات العلوية (Overhead Cranes)

المكونات الأساسية للرافعة العلوية هي جسر علوي ومصعد يتأرجح ذهابًا وإيابًا على طول عارضة الجسر، يتأرجح الجسر العلوي ذهابًا وإيابًا.

يُستخدم مسار أو سكة لرفع وخفض الرافعة العلوية المتصلة بهيكل أفقي يُعرف بالجسر. يتحرك الترام (tram) والرافعة جنبًا إلى جنب على طول الجسر لرفع وخفض الأشياء عبر حجرة مستطيلة. تُستخدم هذه الرافعات لتعزيز الكفاءة والسلامة داخل المستودعات أو المنشآت، ولها حدود حمولة مختلفة تتراوح من 25 إلى 400 طن.



الشكل (4-1) رافعة علوية

● الرافعات البرجية (Hammerhead crane)

تُسمى الرافعات التي تصطف على أفق المدن وتُستخدم في بناء ناطحات السحاب وغيرها من الهياكل الضخمة، رافعات برجية. يتكون كل من ذراع الرافعة الممتد والهيكل العمودي، المعروف أيضًا باسم الصاري، وهما المكونين الرئيسيين للرافعة البرجية، يمكن لذراع الرافعة الدوران 360 درجة حول الصاري والتحرك على طول العربة وكتلة الخطاف (وتُسمى هذه الحركة الدوران). تُستخدم عادةً رافعات أصغر حجمًا وأكثر قابلية للحمل لتجميع هذه الرافعات.



الشكل (5-1) رافعة برجية

2- الرافعات المتنقلة (Mobile Cranes)

الرافعة المتنقلة قابلة للنقل من موقع عمل إلى آخر، ويتم تثبيتها على عجلات أو مجنزرات لا تُقيد الرافعة المتنقلة بمسار محدد. قد تلتقط بعض الرافعات المتنقلة حمولة وتنقلها إلى موضع مختلف باستخدام عجلاتها أو الجنازير، تُعرف هذه الوظيفة باسم "الرفع والحمل". ويتطلب بعض الرافعات المتنقلة استخدام أذرع الرفع، أو أثقال الموازنة، أو حتى التجميع في الموقع.

➤ أنواع الرافعات المتنقلة (Types Of Mobile Cranes)

المكون الأساسي للرافعة المتنقلة هو ذراع ممتد، مثبت على شاحنة أو أي هيكل متحرك آخر يتحرك على جنازير أو إطارات، حسب طراز الرافعة وارتفاعها، يمكن أن يمتد الذراع إلى أطوال مختلفة ويدور حتى 360 درجة. يمكن لهذه الرافعات التنقل في أي مكان في موقع بناء أو بين المواقع، وهي غير مقيدة بمسار محدد، وبناءً على طرازها، يمكن استخدام الرافعة المتنقلة بشكل قانوني على الطرق العامة.

● الرافعات المجنزرة - الزاحفة (Crawler Cranes)

تُعرف الرافعات الزاحفة أيضًا باسم الرافعات ذات الذراع، والرافعات الزاحفة وهي أكبر الرافعات المتنقلة. وتعتبر رافعات كبيرة وقوية، ويمكنها التحرك في موقع البناء مع رفع أكثر من 2500 طن. تتميز الرافعات الزاحفة بأعلى قدرة رفع من أي رافعة متنقلة، وتتطلب أكبر قدر من التجميع في الموقع. واثقال موازنة حسب حجم الرافعة ووزن البضائع التي تحملها.



الشكل (6-1) رافعة زاحفة

● رافعات الشاحنات (Truck Cranes)

رافعات الشاحنات هي نوع من الرافعات المتنقلة المسموح باستخدامها على الطرق العامة، وهي مزودة بذراع مثبت على جسم الشاحنة، رافعات الشاحنات أصغر حجمًا وأقل تنوعًا، وتُستخدم لرفع حمولات أخف وزنًا (بحد أقصى للحمولة يبلغ حوالي 45 طنًا).



الشكل (7-1) رافعة شاحنة

- رافعات الطرق الوعرة (Rough Terrain Cranes)

تُعرف رافعات الطرق الوعرة أيضًا باسم "RT"، وهي نوع خاص من الرافعات المتنقلة المصممة للسير على الطرق الوعرة في ظروف صعبة مثل الطين والثلج، تُستخدم رافعات الطرق الوعرة المزودة بأربعة إطارات وذراع لمهام الرفع والنقل التي تصل أوزانها إلى 165 طنًا. وبفضل هيكلها الصغير، يُمكن رفعها ونقلها عبر المناطق الضيقة.

تُرْكَب رافعات RT على هيكل مزود بإطارات، مما يُسهّل تركيبها ونقلها من موقع إلى آخر، على الرغم من أنها غير مُرخّصة للسير على الطرق. تُشغّل هذه الرافعات من كابينة تدور حول قاعدة ذراع الرافعة. وكجزء من معايير تركيبها في الموقع، يجب استخدام أذرع تثبيت لتثبيت الرافعة أثناء الرفع.



الشكل (8-1) رافعة الأراضي الوعرة

● رافعات جميع التضاريس (All Terrain Cranes)

تُعرف رافعات جميع التضاريس، وهي نوع خاص من رافعات الشاحنات المتنقلة المخصصة للأراضي الصخرية، بأنها قادرة على السير على الطرق المعبدة والوعرة، بما في ذلك بسرعات عالية على الطرق السريعة. يمكن أن تحتوي هذه الرافعات على إطارات تتراوح من 4 إلى 18 إطارًا، حسب ارتفاعها، مما يمنحها مظهر شاحنة كبيرة.

يُستخدم ذراع مثبت على صندوق الشاحنة لرفع ونقل البضائع. على الرغم من أن رافعات جميع التضاريس قادرة على رفع ما يصل إلى 1200 طن، وهي حمولة أكبر بكثير من رافعات الطرق الوعرة، إلا أنها أقل مهارة في التنقل في المساحات الضيقة أو التضاريس الصعبة.



الشكل (9-1) رافعة لجميع التضاريس

12-1-1 خطاف الرافعة (Crane Hook)

خطاف الرافعة هو نقطة تثبيت مصممة للربط بسلاسل وحبال مثبتة بأشياء مثل الآلات والحاويات وعوارض البناء. ومثل باقي مكونات الرافعة، تُصمم الخطافات لتحمل أحمالاً ذات حجم ونوع معينين، وتتوفر بأشكال متنوعة لتناسب مختلف الاحتياجات، من الضروري تجنب استخدام خطاف رافعة غير مناسب، فقد يؤدي ذلك إلى تلف الرافعة أو فقدان الحمولة.

يمكن تصنيف أنواع خطافات الرافعات المختلفة بناءً على تصميمها، وعمليات إنتاجها، وطرق استخدامها، أو غيرها من الخصائص المميزة.

تُصنع هذه الخطافات بتصاميم متنوعة لتناسب مختلف المتطلبات، وهي مصممة لتحمل حمولات من مختلف الأنواع والأحجام.



الشكل (10-1) خطاف الرافعة

➤ أنواع خطافات الرافعات (Types Of Crane Hooks)

يمكن تصميم خطافات الرافعات بطرق متنوعة، وذلك حسب حجمها وقدرتها على تحمل الوزن والاستخدام المقصود لذلك.

● خطافات رافعة مفردة (Single Crane Hooks)

تُعد خطافات الرفع هذه الخيار الأمثل إذا كانت معدّاتك تتحمل حمولات تصل إلى 75 طنًا؛ وبغض النظر عن الطراز الذي تختاره، فإن خطاف الرفع هذا سهل الاستخدام للغاية.



الشكل (11-1) خطاف رافعة مفرد

• خطافات رافعة مزدوجة (Double Crane Hooks)

على الرغم من تطابقها من حيث المفهوم، إلا أن تصميمها يوفر تحملاً فائقاً يمكنه تحمل أوزان أكبر تصل إلى 75 طنًا.



الشكل (12-1) خطاف الرافعة المزدوج

**2-1 دراسات سابقة لخطاف الرافعة باستخدام منهجية العناصر المحدودة (Literature Review)
(of Crane Hook Using Finite Element Analysis)**

[1] M. Shaban et. al (2013): قاموا بدراسة نمط إجهاد خطاف الرافعة في حالته المحملة، وتم إعداد نموذج متين له بمساعدة برنامج Abaqus . في نموذج ثلاثي الأبعاد لخطاف الرافعة، وُجد نمط تركيز إجهاد آني. أما في نموذج أكريليك لخطاف رافعة، فُحص نمط توزيع الإجهاد بدقة باستخدام تقنية الظل الضوئي (Caustic Method). ولإطالة عمر الرافعة وتقليل معدلات الفشل، يتم تغيير شكلها من خلال التنبؤ بمنطقة تركيز الإجهاد. ويهدف البحث بأكمله إلى تطوير إجراء تحليل العناصر المحدودة لقياس الإجهادات من خلال التحقق من صحة النتائج. يُعد تقدير الإجهادات وقيمها ومواقعها المحتملة أمراً

بالغ الأهمية لخفض معدلات فشل الخطاف. وقد شاهدوا المقطع العرضي لمنطقة الإجهاد الأقصى من تحليل الإجهادات. ستخفض الإجهادات إذا تم توسيع المنطقة الموجودة على الجانب الداخلي للخطاف، حيث يوجد الإجهاد الأقصى. تُعد تقنية التآكل طريقة فعالة للغاية لتحديد توزيع الإجهاد على المكونات الميكانيكية المعقدة، مثل الخطافات. وتستطيع هذه الطريقة التنبؤ بدقة بقيمة الإجهاد عند كل موقع ثقب، وذلك بحفر عدد من الثقوب الصغيرة المتباعدة بالتساوي على الخطاف.

[2] E. Narvydas et. al (2012): تمت دراسة عوامل تركيز الإجهاد المحيطي لخطافات الرفع ذات المقطع العرضي شبه المنحرف باستخدام تحليل العناصر المحدودة (FEA) استُخدمت عوامل تركيز الإجهاد بشكل متكرر لتقييم متانة ومثانة الهياكل وأجزاء الآلات. استُخدمت نتائج تحليل العناصر المحدودة، وتم تركيب معادلة عامة محددة. أدى ذلك إلى تطوير خوارزميات لتقييم عوامل تركيز الإجهاد بسرعة في الهندسة دون الحاجة إلى استخدام نماذج العناصر المحدودة. خطاف الرفع وتدعو قواعد التصميم إلى استخدام مواد مطاوعة لمنع الفشل الهش، وفي هذا الصدد نظروا في معايير الفشل القائمة على الإجهادات.

[3] Ram Krishna Rathore et al (2012): يتضمن هذا البحث نهجًا لتحسين حالات الاستجابة المتعددة، بدءًا باستخدام نماذج الانحدار لحساب الارتباطات بين دوال الاستجابة وعوامل التحكم. ثم تُحدد أفضل تركيبات دوال التحكم باستخدام طريقة تحسين بعد تفعيل نظام لدمج دوال الاستجابة المختلفة في كمية واحدة، مثل دالة الهدف، باستخدام مثال خطاف الرافعة، تم تحسين العديد من استجابات معلمات الشكل لتحمل ظروف تحميل جديدة. توضح النتائج الطريقة المقترحة لتحسين مشاكل تحسين الشكل متعددة التخصصات من خلال تقدير انخفاض الكتلة وعامل أمان كافٍ. تقترح هذه الورقة البحثية تقنية تحسين الاستجابات المتعددة. تأخذ هذه الطريقة في الاعتبار دوال الهدف غير المقيدة لدمج استجابات مختلفة في استجابة واحدة، والخوارزمية الجينية متعددة الأهداف (MOGA) لتنفيذ التحسين متعدد التخصصات، والشبكات العصبية الاصطناعية لكل دالة استجابة لحساب علاقتها بدوال التحكم.

[4] Rashmi Uddanwadiker et al (2011): تمت دراسة تحليل إجهاد خطاف الرافعة باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وتم التحقق من صحة النتائج باستخدام مرونة الصورة (Photo Elasticity). وتحليل توزيع الإجهاد في الخطاف تحت ظروف التحميل تم اتخاذ خطوتين:

أولاً: تم استخدام نموذج تقريبي لتحليل إجهاد العناصر المحدودة، وتم التحقق من النتائج باستخدام تجربة مرونة الصورة.

ثانياً: تم افتراض أن الخطاف عبارة عن عارضة منحنية والتحقق منه باستخدام طريقة العناصر المحدودة. عند مقارنة نتائج برنامج Ansys بالحسابات التحليلية، وُجد أن نسبة الخطأ في النتائج ضئيلة بلغت 8.26%. ولتحسين متانة الخطاف، تم إجراء تعديلات على شكله بناءً على منطقة تركيز الإجهاد.

[5] SpasojeTrifkovic et. Al (2011): تم تحليل حالة الإجهاد في الخطاف باستخدام أساليب تقريبية ودقيقة. حُسبت الإجهادات أولاً بافتراض أن الخطاف عبارة عن عارضة مستقيمة، ثم بافتراض أنه عبارة عن عارضة منحنية في مواقع مختلفة من الخطاف. استُخدمت أجهزة الكمبيوتر للمساعدة في استخدام التقنيات التحليلية، بما في ذلك نظرية العناصر المحددة (FEM).

[6] Bhupender Singh et al (2011): استخدم العمل المقدم برنامجي Pro/E Wildfire و Altair Hyper Mes مع برنامج Optistruct Solver لإجراء نمذجة صلبة وتحليل العناصر المحدودة لأذرع الرافعة، وذلك لتحديد تباين الإجهاد والإزاحة في مكونات ذراع الرافعة المختلفة، ولتحديد التدابير التصحيحية المحتملة. وقد تحققت الأهداف المرجوة باستخدام تحليل العناصر المحدودة.

• فقدان الوزن (4.86 كجم، حوالي 5 كجم).

• مستويات الإجهاد معقولة (عند نقاط تحميل أعلى).

• خفض النفقات (180 روبية هندية للمكون الواحد).

وخلص التحليل أيضاً إلى أن نقطة التثبيت هي المكان الذي يوجد فيه أكبر قدر من الإجهاد.

[7] Y. Torres et. al (2010): دُرست في البداية الأسباب المحتملة التي أدت إلى تعطل خطاف الرافعة أثناء الخدمة. وتغطي دراسة الحادث تفاصيل اللوائح المنظمة لإنتاج واستخدام خطافات الرفع، إلى جانب التحليل التجريبي، والسلوك الميكانيكي للفولاذ المستخدم في الخطاف المذكور، ومحاكاة التاريخ الحراري للخطاف. وتبين أن الحادث ناجم عن هشاشة الفولاذ المستخدم نتيجة إجهاد الشيخوخة (Strain-Aging Embrittlement)، وقد تسبب الشق الناتج عن لحام خطاف الرفع في الكسر الهش.

[8] Takuma Nishimura et. al (2010): درس تقدير أضرار خطافات الرافعة. وحسب ظروف الحمل، وبُني نموذج FEM لخطاف الرافعة باستخدام أحد تصميماته الحقيقية. واستناداً إلى نموذج FEM، أنشئت قاعدة بيانات تحتوي على مجموعة متنوعة من ظروف الحمل المختلفة وقيم التشوه المرتبطة بها والتي اكتُشفت نتيجة تحليل FEM. وُجدت ظروف الحمل التي تسببت في فشل خطافات الرافعة التالفة

في قاعدة البيانات. ومن بين الصفات المميزة التي تم اختيارها في تصميم م خطاف الرافعة؛ يمكن بعد ذلك الحصول على تشوه خطاف الرافعة التالف بناءً على نقاط الميزة المكتشفة بواسطة معالجة الصور. والنقطة الحرجة تم حساب حالة حمل خطاف الرافعة التالف بمقارنة التشوه الفعلي الناتج وقيم التشوه المُحاكاة في قاعدة البيانات. بناءً على ظروف الحمل المحسوبة هذه، تم تقدير حالة الحمل الحرجة لخطاف الرافعة كتوزيع إحصائي قائم على المنهج البايزي (Bayesian Approach).

[9] C. Oktay Azeloglu Et. Al (2009): يعرض هذا البحث طرقاً مختلفة لحساب إجهاد خطاطيف الرفع بناءً على افتراضات مختلفة. لتحديد مجال الإجهاد على الخطاف، استُخدمت اختبارات المرونة الضوئية (photo elasticity)، وطريقة العناصر المحدودة، ونظرية العوارض المنحنية. لذلك، يُقارن بين تقنيات مختلفة للحصول على مجال الشد على الخطاف. ولحسابات خطاف الرفع بناءً على الاستخدامات الميدانية، قُدمت بعض الاقتراحات.

[10] Yu Huali et. al (2009): تُعد قوة الهيكل المؤشر الرئيسي لاستجابة قدرة تحمل معدات الرفع. تتطلب الخصائص الثابتة للخطاف الذي يعمل بحمل محدود دراسة وتحليلاً لتصميمه بشكل مناسب للخطافات ذات الحمولة الأكبر. تم فحص خطاف بئر الحفر DG450 في هذا البحث.

- أولاً، باستخدام برنامج Pro/E ، تم إنشاء نموذج الجسم ثلاثي الأبعاد للخطاف استناداً إلى تقنية نمذجة الخصائص.

- ثانياً، أجرى برنامج Ansys دراسة ثابتة لثلاثة ظروف عمل خطرة عند أقصى حمل للخطاف. يوضح هذا العمل الأهمية التعليمية والتطبيق الهندسي لتصميم وتطوير خطاف بئر الحفر ذات الحمولة الأكبر.

[11] Bernard Ross et. al (2007): يصف هذا التحليل الهندسي الشامل لحادث الرافعة، والذي أُجري لدحض نظريات ميتسوبيشي (Mitsubishi Theories) بشأن الفشل، كما أكدها حكم هيئة المحلفين. ويشرح التحقيق الهندسي الشامل في حادث الرافعة الذي أُجري لدحض فرضيات ميتسوبيشي بشأن الفشل، والتي وجدتها هيئة المحلفين صحيحة. ومن بين المواضيع التي تمت مناقشتها: اختبار نفق الرياح، والتحليلات الهيكلية للذراع، ودراسة المعادن للأجزاء المعيبة من مجموعة محورية أساسية، وأعمال هندسة التربة المتعلقة بالأحمال الأرضية والإزاحات أثناء الرفع. كما قُدم عرض تقديمي يوضح أهمية معيار SAE J1093 ، وهو معيار 2% معيار الحمل الجانبي للتصميم، ومنطق لامبسون لمعيار استقرار الرافعة الزاحفة بنسبة 85%.

[12] K.M. Amareswari Reddy et.al: درس قدرة تحمل خطاف الرافعة عن طريق تغيير المقاطع العرضية. تم اختيار المقطع I والمقطع T. غير أبعاد مقطعين مختلفين مع الحفاظ على المساحة. باستخدام برنامج النمذجة Solidworks ، تم إنشاء خطاف الرافعة.

باستخدام منضدة العمل Ansys 14.0 ، أجرى تحليلًا للحمل. اكتشف أنه عند مساحة مقطع عرضي ثابتة بين مقطعين عرضيين، يُنتج المقطع T أقل إجهادات عند الوزن المحدد وهو 6 أطنان. استخدم نظرية وينكلر-باخ للعوارض المنحنية للتحقق من دقة نمط توزيع الإجهاد. تم جدولة الإجهادات النظرية المستندة إلى نظرية وينكلر-باخ وإجهادات نموذج خطاف الرافعة المقابلة المحسوبة باستخدام Ansys ، واكتشف أن الانحرافات لا تقل عن 5%. في التحليل الثابت، يُستخدم رقم إجهاد الخضوع كأساس لمعامل الخضوع لخطاف الرافعة. عند مقارنة نتائج الإجهاد النظري بنتائج Ansys ، يبلغ الانحراف 5% على الأقل. الإجهادات الناتجة في الفولاذ الإنشائي، والفولاذ الكربوني، والحديد الزهر الرمادي، وسبائك النيكل المطروق (N06230 ذات المقطعين I و T أقل من الإجهادات المسموح بها لحمل 6 أطنان. ولنفس مساحة المقطع العرضي والحمل، يتعرض المقطع T لإجهاد أقل بقليل من الأجزاء الأخرى. وقد وُجد أن تحسين تصميم خطاف الرافعة يتأثر بمقطع T المصنوع من سبائك النيكل.

[13] Ms. Mamta.R. Zade et.al: تم تصميم الخطاف بطريقة تحليلية، وأجرى تحليل لمقاطع عرضية مختلفة بتطبيق نفس الحمل على خطاف الرافعة، سواء كان مستطيلًا أو شبه منحرف. وبعيدًا عن هاتين المنطقتين، تم اختيار المنطقة شبه المنحرفة لإجراء دراسات إنشائية ثابتة إضافية باستخدام مواد متنوعة، نظرًا لنتائجها الأفضل مقارنةً بالبدائل، نتيجةً لانخفاض الإجهادات المُستحثة في المقطع العرضي شبه المنحرف، بعد الانتهاء من تصميم خطاف الرافعة باستخدام برنامج النمذجة، أُكمل تحليل الخطاف باستخدام برنامج تحليل العناصر المحدودة، وأجريت النمذجة باستخدام حسابات التصميم من أعمال سابقة. كان هدف البحث تحديد أفضل المواد المرشحة.

● مادة خطاف الرافعة هي:

مصنوعة من الفولاذ الهيكلي والحديد المطاوع وسبائك الألومنيوم بناءً على نتائج أبحاث التعب. نتائج تحليل الإجهاد لمواد مختلفة، مثل الفولاذ الهيكلي والحديد المطاوع وسبائك الألومنيوم، كما حددها تحليل العناصر المحدودة. عند استخدام مواد مختلفة، لوحظ أنه حتى مع تشابه درجات اللون، فإن طوبولوجيات المواد (Topologies of The Materials) تُعطي نتائج مختلفة. ومع ذلك، وُجد أن الفولاذ الهيكلي والحديد المطاوع يُنتجان أقل قدر من الإجهاد. خضعت المواد لتحليل تعب إضافي، وتبين أن الحديد

المطاول يتحمل أكبر عدد من دورات التعب قبل أن ينهار. ونتيجة لذلك، يُمكننا استخدام الحديد المطاول في خطاف الرافعة.

[14] Thakur Et.Al: درس تشوه التدفق الحراري (Heat Flux Deformation) تحت تأثير عمليات مناولة المواد ذات الأحمال الثقيلة. باستخدام عمليات المحاكاة التجريبية النظرية، أُجريت دراسة تشوه التدفق الحراري. باستخدام برنامج SolidWorks، تم إنشاء نموذج لخطاف رافعة. ثم استخدم برنامج لتحليل النموذج بناءً على إزاحة حمل التدفق الحراري (Heat Flux Load Displacement). ووفقاً لهذا البحث، فإن الاحتكاك الناتج عن خطاف الرافعة يُسبب إنتاج المزيد من الحرارة في منطقة التحميل الفعلية. تُعد طريقة العناصر المحدودة (FEM) إحدى الطرق الفعالة والفعّالة لتبديد حرارة خطاف الرافعة، وتتيح لنا الدراسة استخلاص الاستنتاج التالي:

يُمكن إزالة الحرارة غير المرغوب فيها باستخدام مادة مناسبة عندما يكون عامل تبديد الحرارة منخفضاً.

[15] Rashmi Uddanwadiker et al: عند دراسة نمط توزيع الإجهاد لخطاف الرافعة في حالته المحملة، تم إعداد نموذج متين له بمساعدة برامج CMM و CAD في نموذج ثلاثي الأبعاد لخطاف الرافعة، تم اكتشاف نمط تركيز الشد في الوقت الفعلي. باستخدام جهاز استقطاب الضوء المنتشر، تم فحص نمط توزيع الإجهاد على نموذج خطاف رافعة أكريليك للتأكد من صحته. ولإطالة عمر الرافعة وخفض معدلات الأعطال، يمكن التنبؤ بمنطقة تركيز الإجهاد. كان البحث بأكمله جهداً لتطوير إجراء تحليل العناصر المحدودة لقياس الإجهادات من خلال التحقق من صحة النتائج. يُعد تقدير الإجهادات وقيمها ومواقعها المحتملة أمراً بالغ الأهمية للحد من أعطال خطاف الرافعة. الشكل الأحدث معقد للغاية، مما يجعل الحسابات التحليلية أكثر صعوبة. تم رؤية المقطع العرضي لمنطقة الإجهاد الأقصى من تحليل الإجهاد.

تنخفض الضغوط إذا توسعت المنطقة الواقعة داخل خطاف الرافعة، حيث يقع أقصى ضغط. ووفقاً للحسابات، تنخفض الضغوط بنسبة 17% لكل زيادة قدرها 3 مم في سمك الخطاف. ولتقليل احتمالية الفشل بشكل كبير، يمكن تغيير التصميم برفع رقم السُمك على الانحناء الداخلي.

[16] Takuma Nishimura et al.: تم إنشاء نموذج CAD لخطاف الرافعة، استناداً إلى إحدى نسخته الفعلية. بُنيت قاعدة البيانات كمجموعة من ظروف التحميل المختلفة وقيم التشوه المقابلة لها، والتي تم العثور عليها في نتائج تحليل العناصر المحدودة (FEM)، وتم تنظيمها بناءً على نموذج، تم تحديد

ظروف التحميل التي قد تضرر بخطافات الرافعة هذه باستخدام قاعدة البيانات وتم اختيار بعض نقاط الميزات لتصميم خطاف الرافعة.

وبناءً على نقاط الميزات التي تم العثور عليها من خلال معالجة الصور، أمكن الحصول على تشوهات خطاف الرافعة التالف، بمقارنة التشوهات الحقيقية التي تم الحصول عليها وقيم التشوهات المخزنة في قاعدة البيانات، تم تحديد حالة التحميل الحرجة لخطاف الرافعة المكسور، وتم حساب حالة التحميل الحرجة لخطاف الرافعة باستخدام ظروف التحميل المحسوبة هذه، وتم تقديرها كتوزيع إحصائي باستخدام طريقة بايز (Bayesian Method).

[17] Govind Narayan Sahu et al.: تم تقديم تصميم وتحليل إجهاد لمقاطع عرضية مختلفة لخطاف الرافعة البسيط. وبمساعدة التصاميم الموجودة، تم إنشاء نموذج CAD لخطاف الرافعة. ولغرض إجراء تحليل إجهاد ثابت، تم تحميل نموذج CAD هذا في برنامج Ansys ، يحتوي النموذج الحالي لخطاف الرافعة الأساسي على إجهادات وتشوهات.

لتقييم تأثير الإجهادات القصوى المُدخلة، تم تعديل مساحات المقاطع العرضية. وكانت مساحات المقاطع العرضية الدائرية والمربعة والمنحنية من بين الأنواع المختلفة المستخدمة. ثم، لزيادة الإجهادات القصوى المُنتجة، تم تعديل المقطع المنحني مرة أخرى. وقد اكتُشف أن الخطاف المنحني المعدل لديه أقل قدر من الإجهادات والتشوهات المُولدة. ويعود ذلك إلى التوزيع المنتظم لتأثير تركيز الشد. وقد أدى هذا الشكل المعدل إلى توفير في المواد والكتلة.

[18] Bhupendra Singh et al.: قَدِّمَت نمذجة المواد الصلبة وتحليل العناصر المحدودة باستخدام برنامجي Pro/E Wildfire 2.0 و Altair Hyper Mesh مع ذراع الرافعة. استُخدم Optistruct. برنامج Solver 8.0 لإجراء نمذجة المواد الصلبة وتحليل العناصر المحدودة. استُخدم Hyper Mesh لتحديد التباين في الإجهادات والإزاحات في الأجزاء المختلفة من ذراع الرافعة. ولخفض الإجهادات والإزاحات القصوى، عُدِّل التصميم كما خلص التحليل إلى أن موقع التثبيت هو المكان الذي يتواجد فيه أكبر قدر من الإجهاد. وقد ساعد استخدام العناصر المحدودة في تحقيق الأهداف التالية:

- فقدان الوزن (5 كجم).
- كانت مستويات الإجهاد مقبولة. انخفضت التكاليف (بمقدار 180 روبية لمكون معين).

[19] **R.K. Rathore**: عارض الباحثون تقنية تحسين خطاف الرافعة، التي استُخدمت لحساب أفضل التركيبات لدالة التحكم (Combinations for Control Function)، واستخدموا تصميم التجربة بطريقة التصميم المركب المركزي (Central Composite Design Method)، والشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks)، لحساب الاستجابات لكل معلمة بالنسبة لدالة المخرجات، كما استخدموا الخوارزمية الوراثية متعددة الأهداف لتحسين الاستجابات الناتجة عن الشبكات العصبية الاصطناعية. وعلى عكس تقنية تحسين خطاف الرافعة، التي استُخدمت لتحديد أفضل التركيبات لدالة التحكم، استُخدم تصميم التجربة بطريقة التصميم المركب المركزي، والشبكات العصبية الاصطناعية، والخوارزميات الوراثية متعددة الأهداف لحساب الاستجابات لكل معلمة بالنسبة لدالة المخرجات. حُسبت استجابات الشكل لـ 29 خطاف رافعة للكتلة وعامل الأمان. ارتفع عامل الأمان من 0.54 إلى 1.1 عند مقارنة التصميم الجديد بالتصميم الأصلي، وانخفض الوزن من 752 جراماً إلى 669 جراماً. استُخدم تصميم خطاف الرافعة لتوضيح استخدام الخوارزمية الجينية متعددة الأهداف في نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية لسطح الاستجابة كتقنية تقريب بديلة لتحسين التصميم متعدد التخصصات. بعد تحليل خطاف الرافعة، طُبقت الخوارزمية الجينية متعددة الأهداف على النموذج الوصفي للشبكة العصبية الاصطناعية لسطح الاستجابة، وكانت النتائج أكثر تحسناً.

[20] **Torres Et Al.**: هدف هذه الدراسة هو تحديد الأسباب التي أدت إلى تعطل خطاف الرافعة أثناء الخدمة. يتضمن التحقيق في الحادث ما يلي:

- تلخيص وتحليل للخصائص الكامنة في المواصفات التي تحكم إنشاء وتطبيق هذا النوع من الأجهزة
- تحليلات كسورية ومعدنية وكيميائية؛
- تقييم السلوك الميكانيكي للفولاذ من حيث معامل صلابة فيكرز، وقوة الشد، وطاقة الكسر؛
- محاكاة للتاريخ الحراري للخطاف.

تُظهر الفحوصات البصرية والمجهريّة لهيكل الخطاف بعض الدلائل على أن طبقة لحام قد تشكلت عن طريق الخطأ على سطحه. ومن هناك، ارتفع عدد من الكسور إلى المادة. يُظهر سطح الكسر خصائص الهشاشة (كسر انشطار عبر الحبيبات). يتميز الفولاذ غير المخلوط ومنخفض الكربون بمحتوى عالٍ من النيتروجين غير المركب ($>0.0075\%$) ومحتوى منخفض نسبياً من الألومنيوم (0.025%). وتتوافق جميع الأدلة المُجمعة مع عملية شيخوخة الإجهاد (Strain-Aging Process) التي تُضعف المادة، حيث يبدأ الكسر عند شق نشأ في المنطقة المتأثرة بالحرارة نتيجة عملية لحام خاطئة.

[21] Apichit Manee-ngam et al.: صُمم الخطاف بتقسيم الدراسة إلى عمليات من ثلاث خطوات، باستخدام متغيرات التصميم، وذلك لإنشاء عملية تصميم مثالية لخطافات الرافعة. صُنعت خطافات هذه الرافعة من الفولاذ عالي الكربون، AISI 4340، وهي مصممة لتحمل حمولة 2 طن. تتوافق تقنية تحليل العناصر المحدودة المستخدمة في التصميم وفقًا لمعيار ISO 7597 مع نهج التصميم الأمثل وتقنية تصنيف العوامل المرجحة. من بين جميع الطرق، تم التوصل إلى أفضل نتيجة، مما يسمح بزيادة سعة التحميل وتقليل الوزن. النوع التاسع من الخطافات هو فئة خطافات الرافعة التي تم إنشاؤها باستخدام هذه التقنية. وقد تم تحسين هذا البعد ليكون مرناً. طريقة التصميم الجديدة أكثر ملاءمة من التصميم القياسي، إلا أن اختيار أفضل تصميم لخطافات الرافعة لتحديد أبعاد النموذج الأولي الذي سيكون مفيداً في المستقبل، يتم بهدف تطوير التصميم وإضافة عامل الأمان، ويمكن أن يخفض تكاليف الإنتاج بنسبة تصل إلى 27.49% مقارنةً بأسعار المواد لكل قطعة وزيادة عامل الأمان بنسبة 42.16% عند النظر إلى المظهر.

[22] Patel Ravin B et.al: استخدم أسلوباً تحليلياً وصمم خطافاً لمواد مختلفة، مثل الفولاذ المطروق والفولاذ عالي الشد. بعد تطبيق المنهج الرياضي، صمم خطاف الرافعة باستخدام برنامج النمذجة (الحافة الصلبة (Solid Edge)). في برنامج تحليل العناصر المحدودة (FEA)، يُجرى تحليل الخطاف من خلال النمذجة (Ansys). يُحدد الإجهاد في النموذج الحالي بناءً على هذه النتيجة. يزداد عمر الخطاف وينخفض إجهاد الفشل من خلال التنبؤ بمنطقة تركيز الإجهاد. تُحدد نتائج تحليل الإجهاد من خلال تحليل العناصر المحدودة (FEA) للعديد من المواد المختلفة، بما في ذلك الفولاذ المطروق، والحديد المطاوع، وسبائك الألومنيوم. عند استخدام طوبولوجيات (Topologies) مواد مختلفة بنفس الدرجة اللونية، وُجد أن النتائج تختلف باختلاف المادة، ولكن الفولاذ المطروق يُعطي أقل إجهاد.

الفصل الثاني

المرونة في الأبعاد الثلاثة

Three-Dimensional Elasticity

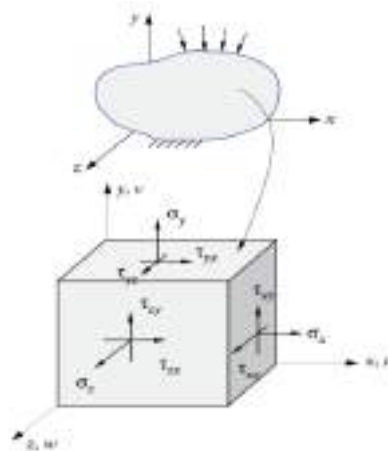
1-2 مقدمة (Introduction)

تتضمن التصميم الهندسي هياكل ثلاثية الأبعاد لا يمكن تمثيلها بدقة باستخدام نماذج أحادية أو ثنائية الأبعاد. تُعد العناصر الصلبة القائمة على المرونة ثلاثية الأبعاد أكثر العناصر شيوعًا لتحليل الإجهاد عندما تصبح عناصر القضبان، والعوارض، والإجهاد/الانفعال المستوي، والصفائح/القشرة المبسطة غير صالحة أو دقيقة. بشكل عام، يُعد التحليل الإنشائي ثلاثي الأبعاد من أهم وأقوى الطرق لتوفير فهم أعمق لسلوك التصميم الهندسي. في هذا الفصل، سنراجع معادلات المرونة للتصميم ثلاثي الأبعاد، ثم نناقش بعض أنواع العناصر المحدودة المستخدمة بشكل شائع لتحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد. سيتم تقديم أنواع مختلفة من الدعامات، والأحمال، وقيود التلامس للنمذجة الإنشائية ثلاثية الأبعاد، تليها دراسة حالة حول التنبؤ بالتشوه والإجهادات في هيكل تجميعي باستخدام ANSYS® Workbench.

2-2 نظرية المرونة (Theory of Elasticity)

يوضح الشكل حالة الإجهاد عند نقطة في جسم مرن ثلاثي الأبعاد. في صورة متجهة، يمكن كتابة مكونات الإجهاد (Stress) الستة المستقلة التي تحدد حالة الإجهاد على النحو التالي:

$$\sigma = \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \text{ or } \{\sigma_{ij}\} \quad (1,2)$$



الشكل (1-2) حالة الإجهاد عند نقطة في جسم مرن ثلاثي الأبعاد.

وبالمثل، يمكن التعبير عن مكونات الانفعال (Strain) المستقلة الستة في الأبعاد الثلاثية على النحو التالي:

$$\varepsilon = \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \text{ or } \{\varepsilon_{ij}\} \quad (2,2)$$

1-2-2 العلاقة بين الإجهاد والانفعال (Stress–Strain Relation)

تُعطى العلاقة بين الإجهاد والانفعال في الأبعاد الثلاثة بواسطة:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3,2)$$

أو في شكل مصفوفة

$$\sigma = E\varepsilon$$

2-2-2 الإزاحة (Displacement)

يمكن وصف مجال الإزاحة بأنه

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (4,2)$$

3-2-2 العلاقة بين الانفعال والإزاحة (Strain–Displacement Relation)

يرتبط الانفعال بالإزاحة كما هو موضح أدناه:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (5,2)$$

يمكن كتابة هذه المعادلات الست في الشكل التالي (index or tensor form):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

أو ببساطة،

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (Tensor notation)$$

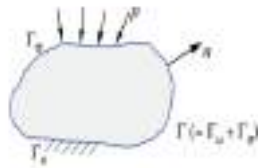
4-2-2 معادلات الإتران (Equilibrium Equations)

عند كل نقطة للجسم تحقق الإجهادات ومتجه القوة f معادلات الإتران الثلاث التالية لمسائل المرونة الساكنة:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \quad (6,2)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0$$



الشكل (2-2) حدود المجال المرن ثلاثي الأبعاد

أو في الصيغة التالية (in index or tensor notation):

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0$$

5-2-2 الشروط الحدية (Boundary Conditions)

عند كل نقطة على الحدود Γ وفي كل اتجاه، يجب إعطاء إما الإزاحة -displacement أو الجر - traction (الإجهاد على الحدود)، أي

$$u_i = \bar{u}_i \text{ on } \Gamma_u \text{ (specified displacement)}$$

$$t_i = \bar{t}_i \text{ on } \Gamma_\sigma \text{ (specified traction)} \quad (7,2)$$

حيث تشير الكميات المخططة إلى قيم معينة، ويتم تعريف الجر (الإجهاد على السطح) بواسطة

$$t_i = \sigma_{ij}n_j$$

أو في شكل مصفوفة:

$$\begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix}$$

حيث n عمودي على الحدود (الشكل 2-2).

6-2-2 تحليل الإجهاد (Stress Analysis)

لتحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد، يلزم حل المعادلات في المعادلات ((6,2)، (5,2)، (3,2)) باستخدام الشروط الحدية في المعادلة (7,2) للحصول على حقول الإجهاد والانفعال والإزاحة (15 معادلة لـ 15 مجهولاً لمسألة ثلاثية الأبعاد). يصعب عادةً إيجاد حلول تحليلية، ولذلك تُستخدم غالباً أساليب عددية مثل نظرية العناصر المحدودة (FEA) في تحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد.

3-2 نمزجه الهياكل المرنة ثلاثية الأبعاد (Modelling of 3-D Elastic Structures)

يُعد تحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد باستخدام العناصر الصلبة من أصعب المهام في نظرية العناصر المحدودة (FEM). فيما يلي، نناقش الاعتبارات العملية في نمذجة طريقة العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد، مثل إنشاء الشبكة (Mesh) والشروط الحدية (BCs). كما نعرض أنواع التلامس أو الاتصال (Contact) المستخدمة في التحليل التجميعي (assembly analyses).

1-3-2 إنشاء الشبكة (Mesh Discretization)

قد يكون تقسيم الهياكل الشبكية ذات الأشكال الهندسية المعقدة أمرًا شاقًا ويستغرق وقتًا طويلاً. لذا، يجب توخي الحذر الشديد لضمان جودة شبكة تحليل العناصر المحدودة (مثلاً، بدون عناصر مشوهة). وتُعد تكلفة الحساب عاملاً آخر. فبالنسبة للهياكل ذات تركيزات الإجهاد، غالبًا ما تكون هناك حاجة إلى نماذج تحليل عناصر محدودة كبيرة، والتي قد تستغرق ساعات أو أيامًا. يجب أن يكون مهندس (CAE) الماهر قادرًا على تحديد أماكن تطبيق الشبكة الدقيقة وأماكن عدم تطبيقها، وذلك لتحقيق التوازن بين التكلفة الحسابية ودقة مهمة تحليل العناصر المحدودة.

يوضح الشكل (2-3) مثالاً على نموذج تحليل عناصر محدودة باستخدام عناصر صلبة لوصلة سحب في سيارة. على الرغم من أن الهيكل ذو شكل نحيف، إلا أنه يحتوي على زاوية منحنية وثقوب. في هذه الحالة، تُعد العناصر الصلبة ثلاثية الأبعاد ضرورية لتحليل الإجهاد. يُولى عناية كبيرة في تقسيم هذا الجزء، حيث تُستخدم عناصر تربيعية لتحسين دقة تحليل الإجهاد. يمكن أيضًا إجراء تحليل الانبعاج للهياكل النحيلة عند تعرضها للضغط.

يوضح الشكل (2-4) تحليلًا ثلاثي الأبعاد لربط تروس يُستخدم لنقل الطاقة عبر عمودين دوارين متوازيين. يجب تحديد إجهادات التلامس وأوضاع الفشل بناءً على نماذج تحليل العناصر المحدودة (FEA) ثلاثية الأبعاد. يتطلب هذا التحليل استخدام خيارات تحليل العناصر المحدودة غير الخطية، وهي متوفرة بسهولة حاليًا في معظم حزم برامج تحليل العناصر المحدودة.

2-3-2 الشروط الحدية: التدعيم (Boundary Conditions: Supports)

تتوفر العديد من أنواع التدعيم للتحليل الهيكلي ثلاثي الأبعاد. التالي عبارة عن شروط التدعيم الشائعة:

- دعامة ثابتة (Fixed support):

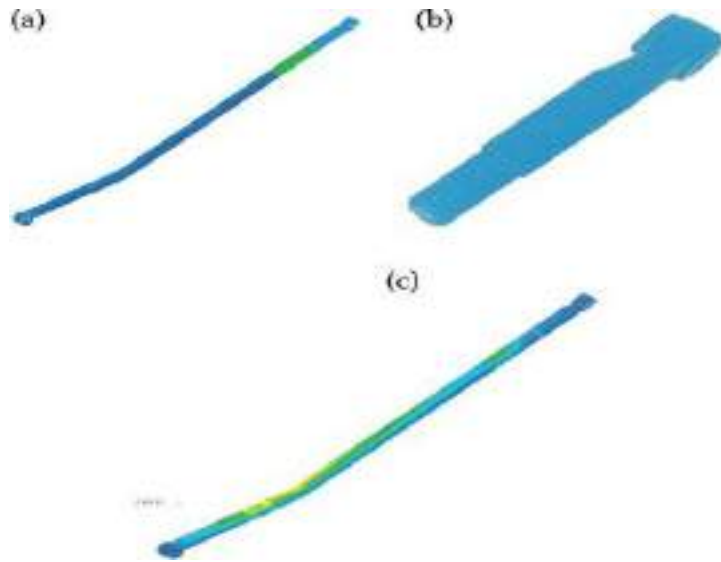
تمنع الجسم الهندسي من الحركة أو التشوه.

- دعامة عديمة الاحتكاك (Frictionless support):

تمنع سطح الشكل الهندسي من الحركة أو التشوه في الاتجاه العمودي بالنسبة للسطح.

- دعامة أسطوانية (Cylindrical support):

تمنع السطح الأسطواني من الحركة أو التشوه في كلا الاتجاهات الشعاعية والمحورية أو المماسية بالنسبة للأسطوانة.

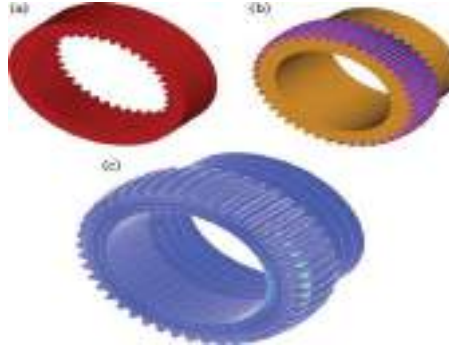


الشكل (3-2): تحليل العناصر المحدودة لوصلة السحب

(a) النموذج

(b) الشبكة للطرف الأيمن

(c) توزيع الإجهاد الناتج عن أحمال الشد المطبقة على الطرفين.



الشكل (4-2): تحليل وصلة تروس

(a) ترس حلقي

(b) ترس محوري

(c) إجهادات تلامس عالية في أسنان التروس تم الحصول عليها باستخدام تحليل العناصر المحدودة غير الخطي.

تجدر الإشارة إلى وجود ست حركات للأجسام الصلبة للأجسام ثلاثية الأبعاد: ثلاث حركات انتقالية وثلاثة حركات دورانية، يجب إزالة هذه الحركات (التي تُسبب تفرد نظام المعادلات) من نموذج تحليل العناصر المحدودة (FEA) لتحليل الإجهاد لضمان دقة التحليل. من ناحية أخرى، قد تؤدي القيود الزائدة إلى نتائج غير دقيقة أو غير مبررة.

3-3-2 الشروط الحدية: الأحمال (Boundary Conditions: Loads)

تشمل أنواع الأحمال الإنشائية التي يمكن مواجهتها في التحليلات ثلاثية الأبعاد: القوة، والعزم، والضغط، وتحمل التحميل، وما إلى ذلك. كما قد يكون لأحمال القصور الذاتي، مثل التسارع، أو الجاذبية الأرضية القياسية، أو سرعة الدوران، تأثير غير بسيط على سلوكيات إجهاد الهياكل. كما يمكن أن تُشارك أنواع أخرى من الأحمال، مثل الأحمال الحرارية، أو الكهربائية، أو المغناطيسية، ولكنها أقل شيوعاً.

4-3-2 تحليل التجميع: نقاط التلامس (Assembly Analysis: Contacts)

لتحليل التجميع يلزم وجود شروط تلامس لوصف كيفية تحرك أجسام التلامس المختلفة بالنسبة لبعضها البعض:

- **مُلصق (Bonded):** هذا هو التكوين الافتراضي. يمكن اعتبار المناطق المُلصقة مُلتصقة ببعضها، مما يمنع الانزلاق أو الفصل بين مناطق التلامس. في العديد من التطبيقات، يُعد التلامس المُلصق كافيًا لحسابات الإجهاد بين الأجزاء المثبتة بمسامير أو الملحومة في التجميعات.
 - **لا فصل (No Separation):** يسمح هذا النوع من التلامس بالانزلاق بدون احتكاك على طول أسطح التلامس، ولكن لا يُسمح بفصل الأوجه المتلامسة.
 - **بدون احتكاك (Frictionless):** يسمح هذا النموذج التلامسي بالانزلاق الحر، بافتراض أن معامل الاحتكاك صفر. قد تتشكل فجوات بين مناطق التلامس.
 - **خشن (Rough):** يفترض هذا النموذج وجود معامل احتكاك لانهاضي بين الأجسام المتلامسة. لا يمكن حدوث انزلاق.
 - **احتكاكي (Frictional):** يسمح هذا النموذج للأجسام المتلامسة بالانزلاق بالنسبة لبعضها البعض، بمجرد تجاوز إجهاد القص المكافئ حتى قيمة معينة.
- في معظم الحالات، يُمكن اكتشاف مناطق التلامس وتوليدها تلقائيًا في برنامج تحليل العناصر المحدودة (FEA) كما يُمكن تعديلها يدويًا عند الحاجة.

4-2 صياغة العناصر الصلبة (Formulation of Solid Elements)

في هذا القسم سنُلخّص أولاً صياغة تحليل العناصر المحدودة (FEA) لمسائل المرونة ثلاثية الأبعاد، وهي امتدادات مباشرة لصياغات تحليل العناصر المحدودة (FEA) لمسائل المرونة أحادية البعد وثنائية الأبعاد، سنستخدم بعد ذلك مثالاً لعنصر سداسي السطوح (طوب ثماني العقد - Eight-Node Brick) الخطي لدراسة صياغة العنصر بالتفصيل.

1-4-2 الصيغة العامة (General Formulation)

كما هو الحال في صيغ تحليل العناصر المحدودة (FEA) للمسائل أحادية وثنائية الأبعاد، نقوم أولاً باستيفاء حقول الإزاحة داخل عنصر ثلاثي الأبعاد باستخدام دوال الشكل N_i :

$$u = \sum_{i=1}^N N_i u_i$$

$$v = \sum_{i=1}^N N_i v_i \quad (8,2)$$

$$w = \sum_{i=1}^N N_i w_i$$

حيث u_i و v_i و w_i هي القيم العقدية للإزاحة على العنصر، و N هو عدد العقد على هذا العنصر. في شكل مصفوفة، لدينا:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (9,2)$$

أو في شكل مصفوفة:

$$u = N d$$

باستخدام العلاقات الواردة في المعادلتين (5-2) و (8-2)، يمكننا استنتاج متجه الانفعال للحصول على:

$$\varepsilon = B d$$

حيث B : هي المصفوفة التي تربط متجه الإزاحة العقدي d بمتجه الانفعال ε

لاحظ أن أبعاد مصفوفة B : هي 3×6 .

بمجرد إيجاد مصفوفة B ، يُمكن تطبيق الصيغة التالية لتحديد مصفوفة الصلابة للعنصر:

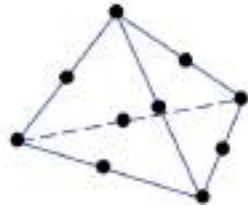
$$k = \int_v^0 B^T E B dv \quad (10,2)$$

أبعاد مصفوفة الصلابة k هي $3N \times 3N$. غالبًا ما يلزم إجراء تربيع عددي لتقييم التكامل المذكور أعلاه، وهو أمر قد يكون مكلفًا إذا كان عدد العقد كبيرًا، كما هو الحال في العناصر ذات الرتبة الأعلى.

2-4-2 أنواع العناصر الصلبة النموذجية (Typical Solid Element Types)

يمكننا تصنيف أنواع العناصر في المسائل ثلاثية الأبعاد كما يلي وفقًا لأشكالها وترتيب دوال الشكل المكوّنة لها:

- رباعي السطوح (Tetrahedron):

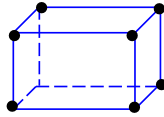


تربيعي (10 عقد)

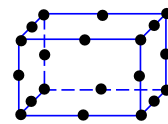


خطي (أربع عقد)

- سداسي الوجوه (Hexahedron):

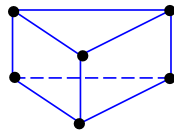


خطي (ثمانى عقد)

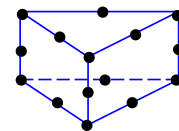


تربيعي (20 عقدة)

- الخماسي السطوح (Pentahedron):



خطي (ستة عقد)



تربيعي (15 عقدة)

يُنصح باستخدام عناصر من رتبة أعلى (تربيعية)، مثل عناصر الطوب رباعية السطوح ذات العشر عقد، وعناصر الطوب ذات العشرين عقدة، لتحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد. يُنصح بتجنب استخدام العناصر الخطية، وخاصةً رباعية السطوح ذات الأربع عقد، في تحليل الإجهاد ثلاثي الأبعاد، لأنها غير دقيقة لهذه الأغراض. مع ذلك، يُنصح باستخدامها لتحليل التشوه أو تحليل الاهتزاز.

3-4-2 صياغة عنصر سداسي السطوح خطي (Treatment of Distributed Loads)

مجال الإزاحة في العنصر:

$$u = \int_{i=1}^8 N_i u_i, \quad v = \int_{i=1}^8 N_i v_i, \quad w = \int_{i=1}^8 N_i w_i \quad (11,2)$$

وظائف الشكل:

$$N_1(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_2(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_3(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \quad (12,2)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$N_8(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

• ملاحظة أن لدينا العلاقات التالية لوظائف الشكل:

$$N_i(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) = \delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 8.$$

$$\sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) = 1$$

الإحداثيات (التعيين):

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i x_i, y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i, z = \sum_{i=1}^8 N_i z_i \quad (13,2)$$

أي أن دوال الشكل نفسها تُستخدم لهندسة العنصر كما هو الحال في مجال الإزاحة. يُسمى هذا النوع من العناصر عناصر متساوية المعايير (Isoparametric Element).

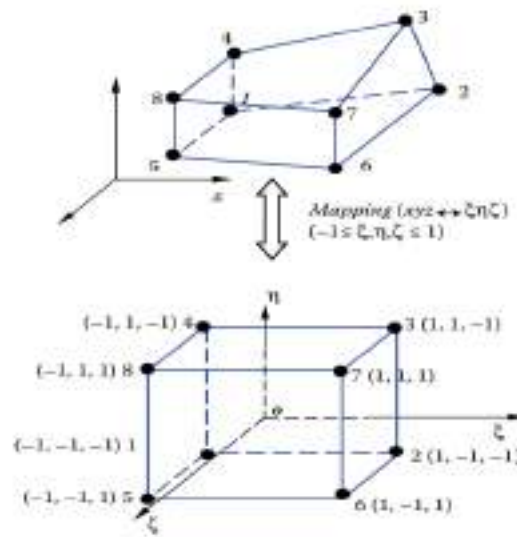
يسمى التحويل بين (x, y, z) و (ξ, η, ζ) المشار اليه في المعادلة (13,2)

باسم رسم الخرائط متساوية المعايير (Isoperimetric Mapping).

مصفوفة جاكوبي (Jacobian Matrix):

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (14,2)$$

مصفوفة جاكوبي J=



الشكل (5-2) تعيين عنصر لنظام الإحداثيات الطبيعية.

وبعكس هذه العلاقة نحصل على:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix}, \text{ with } \frac{\partial u}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} u_i \text{ and so on } (15,2)$$

وبالمثل بالنسبة ل (v و w) تؤدي هذه العلاقات إلى التعبير التالي للانفعال (Strain):

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = B d$$

حيث d هو متجه الإزاحة العقدي، أي :

$$\varepsilon = B d \quad (16,2)$$

يتم تقييم طاقة الانفعال على أنها:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon dV = \frac{1}{2} \int_V (E \varepsilon)^T \varepsilon dV = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T E dV \\ &= \frac{1}{2} d^T \left[\int_V B^T E B dV \right] d \end{aligned} \quad (17,2)$$

وهذا يعني أن مصفوفة صلابة العنصر هي:

$$k = \int_V B^T E B dV \quad (18,2)$$

في الإحداثيات (ξ, η, ζ) :

$$dV = (\det) d\xi d\eta d\zeta \quad (19,2)$$

لذلك:

$$k = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T E B (\det J) d\xi d\eta d\zeta \quad (20,2)$$

ومن السهل التحقق من أن أبعاد مصفوفة الصلابة هذه هي 24×24 .

● الإجهادات (stress):

لحساب الإجهادات داخل عنصر، نستخدم العلاقة التالية بعد معرفة متجه الإزاحة العقدي لذلك العنصر:

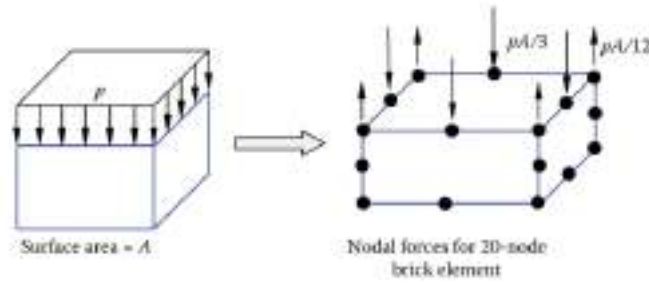
$$\sigma = E\varepsilon = E B d$$

يتم تقييم الإجهادات عند نقاط محددة (نقاط أو عقد غاوسية - Gaussian points or nodes) على كل عنصر. غالبًا ما تكون قيم الإجهادات عند العقد غير متصلة وأقل دقة. غالبًا ما يُستخدم متوسط الإجهادات من العناصر المحيطة بالعقدة لتسهيل نتائج مجال الإجهاد.

يتم إعطاء إجهاد فون ميزس (Von Mises Stress) للمسائل ثلاثية الأبعاد بواسطة:

$$\sigma_e = \sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (21,2)$$

حيث σ_1 و σ_2 و σ_3 هي الإجهادات الرئيسية الثلاث.



الشكل (6-2) القوى العقدية المكافئة على عنصر من الطوب مكون من 20 عقدة لحمل الضغط (p) .

4-4-2 معالجة الأحمال الموزعة (Treatment of Distributed Loads)

الأحمال الموزعة المنتشرة على طول أو مساحة أو حجم، شائعة في سيناريوهات الحياة العملية. لتحليل هذه الأحمال باستخدام تحليل العناصر المحدودة (FEA)، يجب تحويلها إلى قوى عقدية مكافئة. يعتمد هذا التحويل على مفهوم الطاقة المكافئة (Equivalent Energy Concept). يتضمن الشكل (6-2) تحويل حمل ضغط موزع إلى قوى عقدية لعنصر سداسي الوجوه ذي 20 عقدة. قد يبدو اتجاه القوى عند عقد الزوايا غير بديهي، مما يُبرز أهمية فهم المبادئ الأساسية للعناصر المحدودة.

الفصل الثالث

تحليل الفشل

Failure Analysis

1-3 مقدمة (Introduction)

يمكن أن تنهار الهياكل، مثل الجسور والطائرات ومكونات الآلات، بطرق مختلفة. قد يتعرض الهيكل المثقل بأحمال زائدة لتشوهات دائمة، مما قد يؤدي إلى خلل في وظيفته أو فشله الكامل. عند تعرض الهيكل لملايين الأحمال الصغيرة المتكررة، قد تنمو ببطء التشققات السطحية، مما قد يتسبب في تقليل قوة المادة وانهيار مفاجئ. عند تحميل هيكل نحيف تحت ضغط قد يتعرض لتشوهات كبيرة غير متوقعة ويفقد قدرته على تحمل الأحمال. يلعب تحليل الفشل دورًا هامًا في تحسين سلامة وموثوقية الهيكل الهندسي. في هذا الفصل، سنناقش بعض المواضيع المتعلقة بتحليل الفشل الهيكلي. سيتم عرض مفاهيم الفشل الساكن، والتعب، والانبعاج.

2-3 الفشل الثابت (Static Failure)

في ظل ظروف التحميل الساكن، يمكن أن يحدث فشل المواد عند تعرض الهيكل لإجهاد يتجاوز حد المرونة. هناك نوعان من فشل المواد الناتج عن التحميل الثابت، وهما الفشل اللدن (Ductile Failure) والفشل الهش (Brittle Failure). يتمثل الفرق الرئيسي بين نوعي الفشل في مقدار التشوه البلاستيكي الذي تتعرض له المادة قبل الكسر. كما هو موضح في الشكل (3.1)، تميل المواد اللدنة إلى التشوه البلاستيكي الشديد قبل الكسر، بينما من المرجح ألا تتعرض المواد الهشة لأي تشوه بلاستيكي واضح قبل الكسر.

1-2-3 الفشل اللدن -المطيل (Ductile Failure)

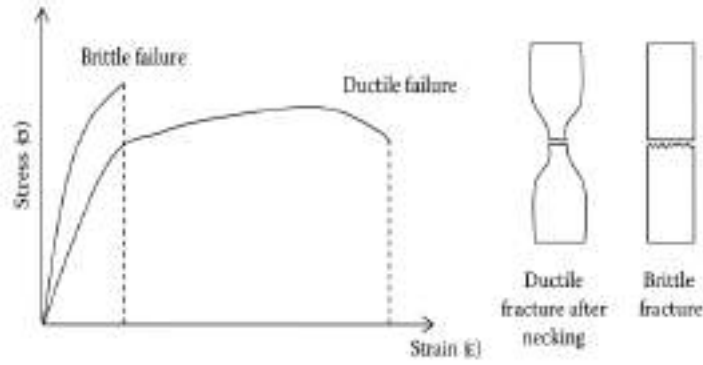
في هذا القسم، نستعرض نظريتين شائعتين حول الفشل المطاوع وهما:

- نظرية إجهاد القص الأقصى - معيار تريسكا (The Maximum Shear Stress Theory (or Tresca Criterion)
- نظرية طاقة التشوه - معيار فون ميزس (Distortion Energy Theory (or Von Mises Criterion)

1-1-2-3 نظرية إجهاد القص الأقصى (معيار تريسكا): (Maximum Shear Stress Theory (Tresca Criterion)

وفقًا لنظرية إجهاد القص الأقصى، يحدث الفشل اللدن (المطيل) عندما يتجاوز إجهاد القص الأقصى (τ^{max}) نصف مقاومة خضوع المادة (S_y (Material Yield Strength) ، بافتراض مراعاة عامل الأمان n في التصميم، تُعطى معادلة التصميم كما يلي:

$$\tau^{max} < \frac{S_y}{2n} \quad (1,3)$$



الشكل (1-3) منحنيات الإجهاد والانفعال للمواد الهشة والمطيلة

2-1-2-3 نظرية طاقة التشوه (مقياس فون ميزس): Distortion Energy Theory (Von Mises Criterion)

بناءً على نظرية طاقة التشوه، يحدث الفشل المطيل عندما يتجاوز أقصى إجهاد فون ميزس (σ_e^{max}) مقاومة خضوع المادة s_y ، بتطبيق عامل أمان n على التصميم، تصبح معادلة التصميم:

$$\sigma_e^{max} < \frac{s_y}{n} \quad (2,3)$$

2-2-3 الفشل الهش (Brittle Failure)

بالنسبة للمواد الهشة فإن نظريتي الفشل الشائعتين هما:

- نظرية الإجهاد الطبيعي الأقصى (Maximum Normal Stress)
- نظرية مور- كولومب (Mohr-Coulomb)

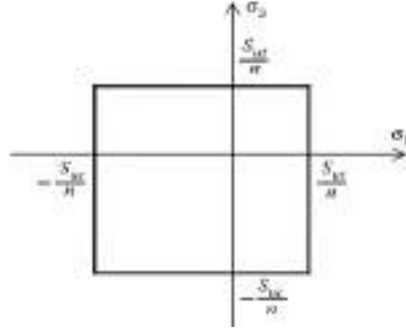
1-2-2-3 نظرية الإجهاد العمودي الأقصى (Maximum Normal Stress Theory)

تنص نظرية الإجهاد العمودي الأقصى على أن الانهيار الهش يحدث عندما يتجاوز الإجهاد الرئيسي الأقصى ((قوة الشد أو الضغط) القصوى للمادة). بافتراض مراعاة عامل الأمان n في التصميم، تتطلب شروط التصميم الآمن أن:

$$-\frac{s_{uc}}{n} < \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\} < \frac{s_{ut}}{n} \quad (3,3)$$

- σ_1 و σ_2 و σ_3 هي الإجهادات الرئيسية في الاتجاهات الثلاثة،
- S_{uc} و S_{ut} هما قوة الشد القصوى وقوة الانضغاط القصوى على التوالي.

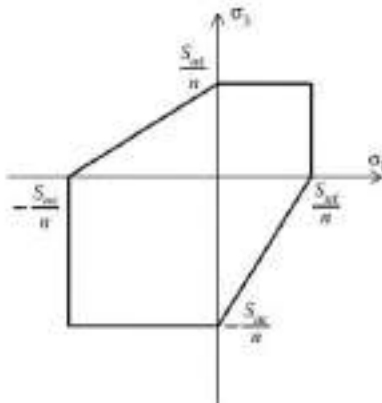
لتجنب الانهيار الهش، يجب أن تقع الإجهادات الرئيسية عند أي نقطة في الهيكل ضمن نطاق الانهيار المربع الموضح في الشكل (2-3)، وذلك بناءً على نظرية الإجهاد العمودي الأقصى.



الشكل (2-3) حيز الفشل المربع لنظرية الإجهاد العمودي الأقصى.

2-2-2-3 نظرية مور-كولومب Mohr-Coulomb Theory

تتنبأ نظرية مور-كولومب بالفشل الهش من خلال مقارنة أقصى إجهاد رئيسي بقوة الشد القصوى (S_{ut}) وأدنى إجهاد رئيسي بقوة الضغط القصوى (S_{uc}). بافتراض مراعاة عامل الأمان n في التصميم. تتطلب شروط التصميم الأمان أن تقع الإجهادات الرئيسية ضمن غلاف الفشل السداسي الموضح أعلاه في الشكل (3-3).



الشكل (3-3) حيز الفشل السداسي لنظرية مور-كولومب

3-3 فشل الكلال - التعب (Fatigue Failure)

غالبًا ما يحدث فشل التعب في المكونات الهندسية بشكل غير متوقع نتيجةً للتحميل الدوري عند مستويات إجهاد أقل من أقصى قوة للمكون. تشمل المفاهيم الأساسية لفهم الكلال:

- متوسط الإجهاد (σ_m).
- الإجهاد المتناوب (σ_a)
- حد التعب - حد التحمل (S_e).

➤ الإجهاد المتوسط:

هو متوسط الإجهاد القصوى والدنيا في دورة واحدة.

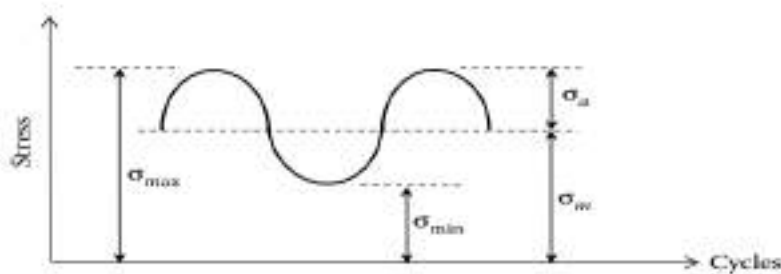
$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

➤ الإجهاد المتناوب:

هو نصف نطاق الإجهادات في دورة واحدة

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$$

تُستخدم معايير فشل متعددة، مثل سودربيرج (Soderberg) وجودمان (Goodman) وجيربر (Gerber)، للتنبؤ بعمر التعب. تتضمن عملية الفشل عادةً بدء الضرر وانتشاره. يُعد فهم هذه المفاهيم أمرًا بالغ الأهمية لضمان موثوقية المكونات المعرضة للتحميل الدوري.



الشكل (3-4) دورة الإجهاد والكلال النموذجية

1-3-3 معيار فشل سودربيرج (Soderberg Failure Criterion)

تنص هذه النظرية على أن الهيكل آمن إذا:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} < \frac{1}{n} \quad (4,3)$$

- الإجهاد المتناوب σ_a
- متوسط الإجهاد σ_m
- حد التحمل S_e
- مقاومة الخضوع S_y
- معامل الأمان n

عند رسم الإجهاد المتناوب σ_a مقابل متوسط الإجهاد σ_m ، يمكن رسم خط سودربيرج بين النقطتين:

$$\sigma_m = S_y/n \text{ و } \sigma_a = S_e/n$$

إذا كانت قيمة الجهد أسفل الخط، يكون التصميم آمناً. وهذا معيار يعتمد على مقاومة الخضوع المادة S_y انظر الشكل (5-3).

2-3-3 معيار فشل جودمان (Goodman Failure Criterion)

تنص هذه النظرية على أن الهيكل آمن إذا:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} < \frac{1}{n} \quad (5,3)$$

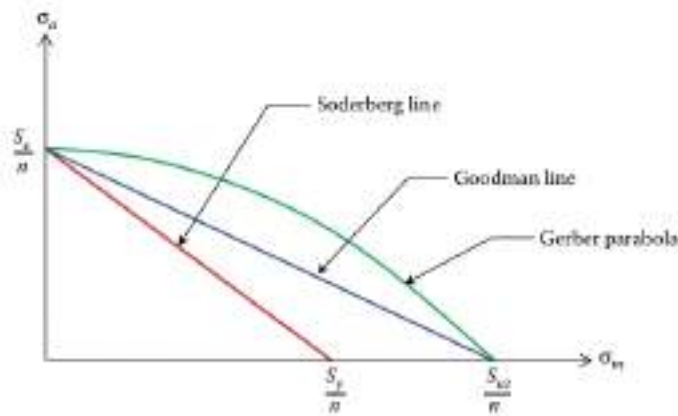
S_{ut} هي قوة الشد القصوى

n هي معامل الأمان

عند رسم الإجهاد المتناوب σ_a مقابل متوسط الإجهاد σ_m ، يمكن رسم خط غودمان بين نقاط:

$$\sigma_m = S_{ut}/n \text{ و } \sigma_a = S_e/n$$

إذا كان الإجهاد أسفل الخط، يكون التصميم آمناً. وهو معيار أقل تحفظاً، قائم على القوة القصوى للمادة، يعني اتباع نهج تصميم يسمح بمستويات إجهاد أعلى قبل الانهيار مقارنةً بالطرق الأكثر تحفظاً، غالباً ما يستخدم قوة الشد القصوى للمادة (S_{ut}) معايير جودمان وتصميم القوة القصوى مثالان على ذلك. يستفيد تصميم القوة القصوى من القوة الاحتياطية الناتجة عن توزيع إجهاد أكثر كفاءة، مما يسمح بإجهادات مرنة. يتناقض هذا مع الأساليب التي تعطي الأولوية لحدود إجهاد أقل لتعزيز السلامة، مثل تلك القائمة على نقطة الخضوع، مما يؤدي إلى تصميمات أكثر كفاءة في استخدام المواد ولكن مع زيادة محتملة في المخاطر. لذلك، يوفر هذا المعيار توازناً بين السلامة والكفاءة كما في الشكل (5-3).



الشكل (5-3) مخططات التعب تُظهر معايير الفشل المختلف

3-3-3 معيار فشل جيربر (Gerber Failure Criterion)

تنص هذه النظرية على أن الهيكل آمن إذا:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 < \frac{1}{n} \quad (6,3)$$

عند رسم الإجهاد المتناوب σ_a مقابل متوسط الإجهاد σ_m ، يمكن رسم قطع مكافئ Gerber بين نقطتي:

$$\sigma_m = S_e/n \text{ و } \sigma_a = S_e/n$$

إذا كان الإجهاد أقل من القطع المكافئ، فإن التصميم آمن. وهذا معيار أقل تحفظاً يعتمد على قوة الشد القصوى للمادة S_{ut} انظر الشكل (5-3).

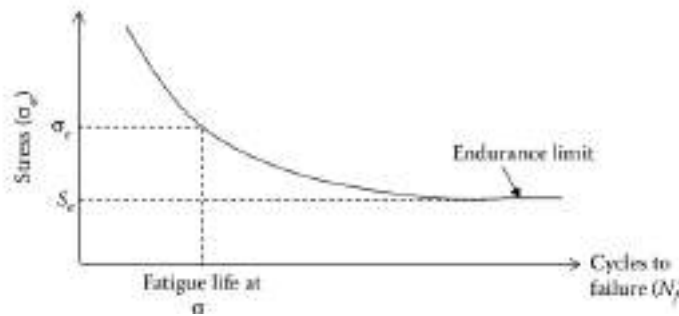
بشكل عام، ستفشل معظم الهياكل في النهاية بعد عدد معين من دورات التحميل المتكرر. في تحليل عمر التعب، تُستخدم منحنيات S-N على نطاق واسع لتقدير العمر، وخاصة في حالات التعب عالية الدورة حيث يكون التحميل الدوري مرئياً وعدد الدورات حتى الفشل كبير. يربط منحنى S-N

(انظر الشكل (3-5)) الإجهاد المتناوب σ_a ، بعدد الدورات حتى الفشل N_f ويتم إنشاؤه من اختبارات التعب على عينات من المادة المحددة. تُطوّر معظم منحنيات S-N بناءً على إجهاد متوسط صفري. ومع ذلك، تتضمن العديد من تطبيقات التحميل إجهاداً متوسطاً غير صفري.

يمكن استخدام نظريات سودربيرج وجيربر المذكورة أعلاه لتقدير تأثيرات الإجهاد المتوسط على عمر التعب. تجدر الإشارة إلى وجود فرق طفيف بين النظريات الثلاث عندما يكون متوسط الإجهاد σ_m صغيراً نسبياً مقارنةً بالإجهاد المتناوب σ_a .

لنأخذ نظرية جيربر كمثال. لتقدير عمر التعب لهيكل ما عند قيمة معينة من الإجهاد المتوسط σ_m والإجهاد المتناوب σ_a ، يمكن أولاً إيجاد الإجهاد المتناوب الفعال σ_e ، بناءً على معادلة جيربر المعدلة التالية:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 < \frac{1}{n} \quad (7,3)$$



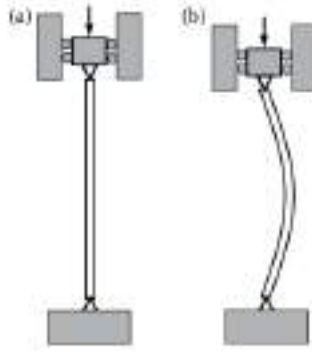
الشكل (3-6) استخدام منحنى S-N لتقدير عمر الكلال

بمجرد الحصول على الإجهاد المتناوب الفعال، σ_e ، من المعادلة (7,3)، يُمكن تحديد عمر التعب للإجهاد المتناوب الفعال المقابل σ_e من منحنى S-N للمادة المُعطاة (انظر الشكل (3-6)). إذا تم الحفاظ على الإجهاد المتناوب الفعال، σ_e ، أقل من حد التحمل، S_e ، يُعتبر الهيكل ذا عمر غير محدود.

4-3 فشل الانبعاج (Buckling Failure)

الانبعاج هو عدم استقرار هيكلي مفاجئ وانهيار للأجزاء النحيلة تحت تأثير أحمال الضغط. يحدث هذا ضمن نطاق مرونة المادة، ما يعني أن إجهاد الضغط عند الانهيار يكون أقل من قوة الضغط القصوى للمادة، تشمل الجوانب الرئيسية لتحليل الانبعاج تحديد الحمل الحرج (أقصى حمل ضغط قبل الانبعاج) وأشكال أنماط الانبعاج. تؤثر الظروف الحدية بشكل كبير على سلوك الانبعاج على سبيل المثال: تؤثر دعائم نهاية العمود على خصائص انبعاجه، كما تؤثر عزوم الانحناء، وخاصةً تلك الناتجة عن الأحمال المحورية اللامركزية، على سلوك الانبعاج، ويجب أخذها في الاعتبار. يُعد عامل الأمان العالي ضروريًا في حسابات الانبعاج نظرًا لاحتمالية حدوث انهيار كارثي. (انظر الشكل (7-3) لتوضيح فشل الانبعاج لعمود نحيف، والشكل (8-3) لأشكال أوضاع الانبعاج المختلفة). ونظرًا لأن فشل الانبعاج يمكن أن يؤدي إلى نتائج كارثية، فغالبًا ما يُستخدم عامل أمان (مرتفع >3 على الأقل) لحسابات الحمل الحرج.

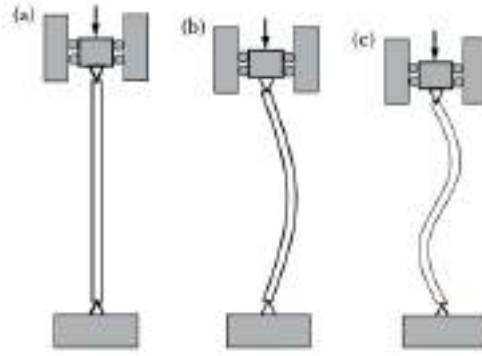
عند نمذجة الانبعاج، تُعدّ الشروط الحدية بالغة الأهمية لأنها تؤثر بشدة على سلوك انبعاج الهيكل. تُؤثر دعائم نهاية العمود (سواءً كانت مثبتة أو ثابتة أو حرة) بشكل كبير على كيفية انبعاجه. تنبعج الأعمدة ذات النهاية المثبتة بسهولة أكبر من الأعمدة ذات النهاية الثابتة، كما تؤثر عزوم الانحناء، كذلك الناتجة عن الأحمال المحورية اللامركزية على الانبعاج، ويجب أخذها في الاعتبار عند التحليل.



الشكل (7-3) انبعاج عمود نحيف

(A) الحمل $>$ الحمل الحرج

(B) الحمل $<$ الحمل الحرج



الشكل (8-3) انبعاج عمود نحيف

(a) غير منحنى

(b) وضع الانبعاج الأول

(c) وضع الانبعاج الثاني

الفصل الرابع

النمذجة والمحاكاة لخطاف الرافعة

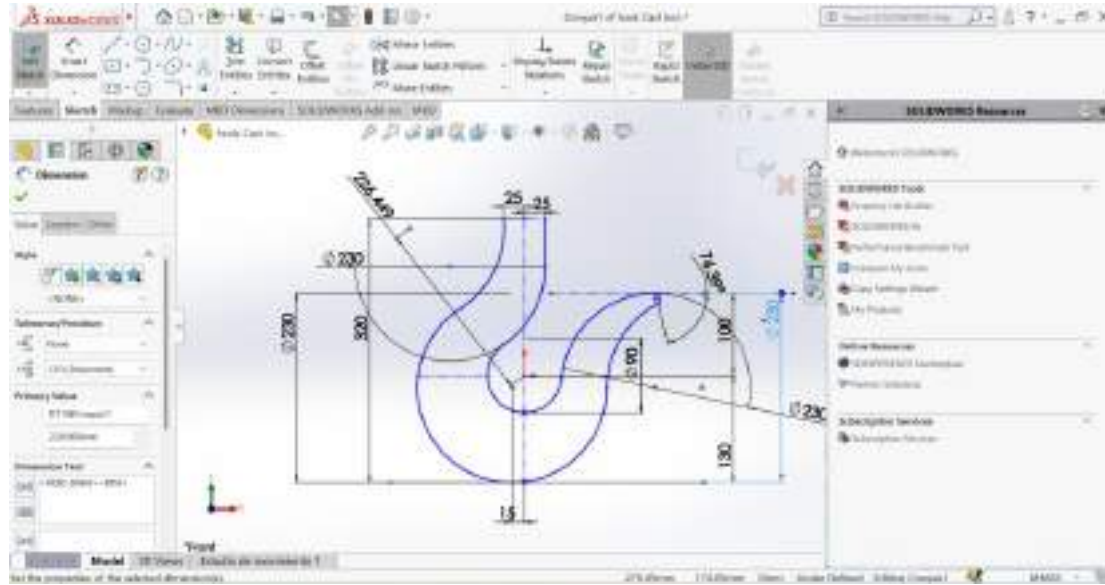
Modeling and Simulation of the Crane Hook

1-4 انشاء النموذج باستخدام برنامج 20 Solid Works (Geometry)

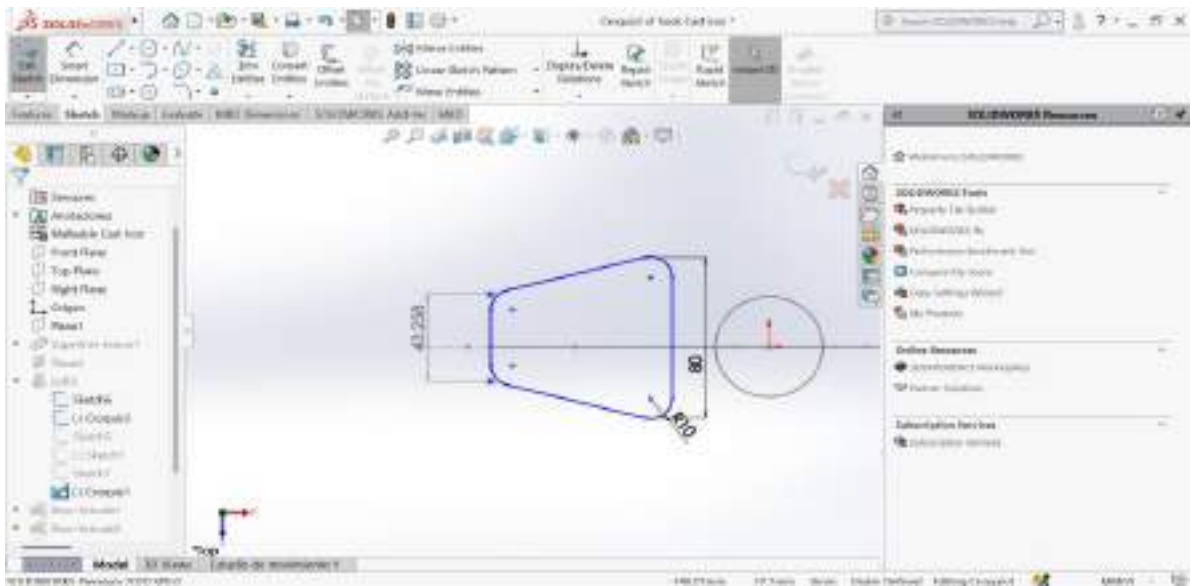
➤ خطاف رافعة مفرد (Single crane hook)

- الرسم ثنائي الأبعاد بالأبعاد الموضحة ادناه بالمليمتر (2D Sketch):

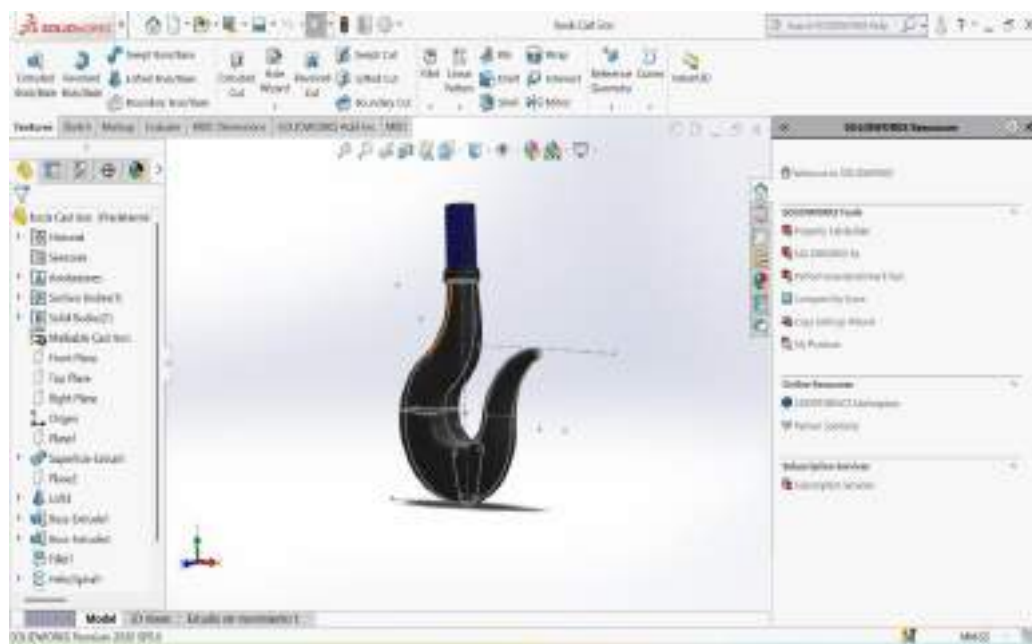
❖ المسقط الامامي

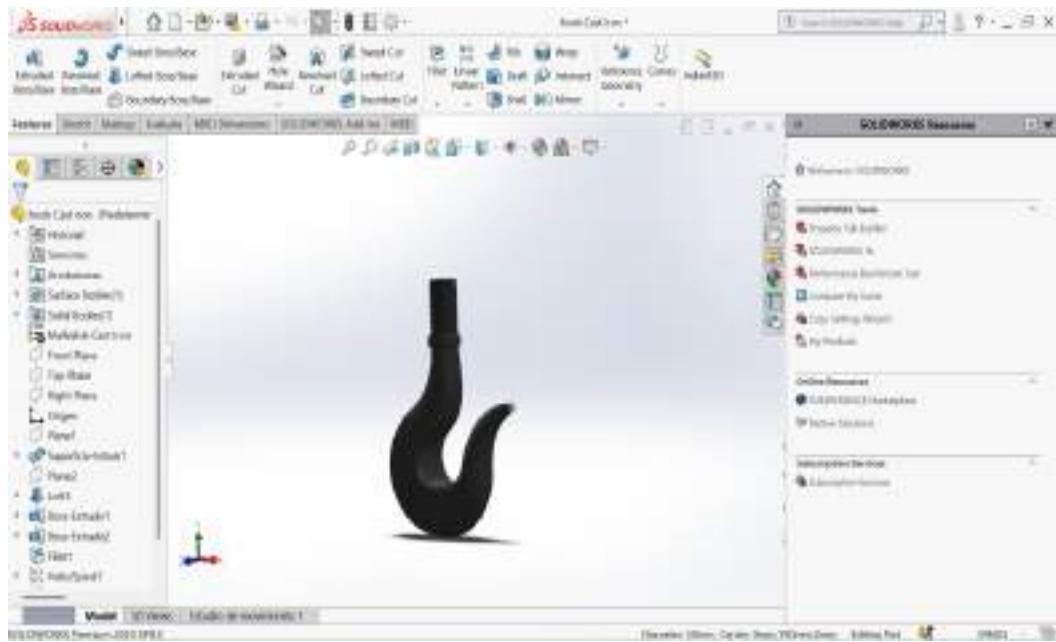


❖ المسقط الافقي

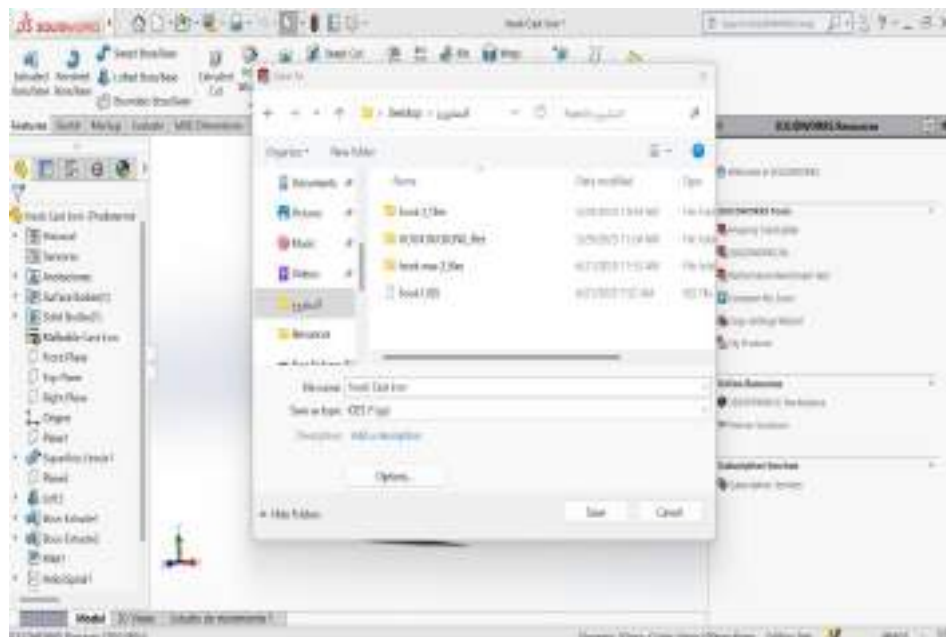


- الشكل ثلاثي الابعاد (3D Model)





- حفظ النموذج ثلاثي الأبعاد لخطاف الرافعة المنشأ باستخدام Solid Works بصيغة "IGS".



2-4 الخطوات المتبعة في تحليل ومحاكاة الخطاف باستخدام Ansys Workbench

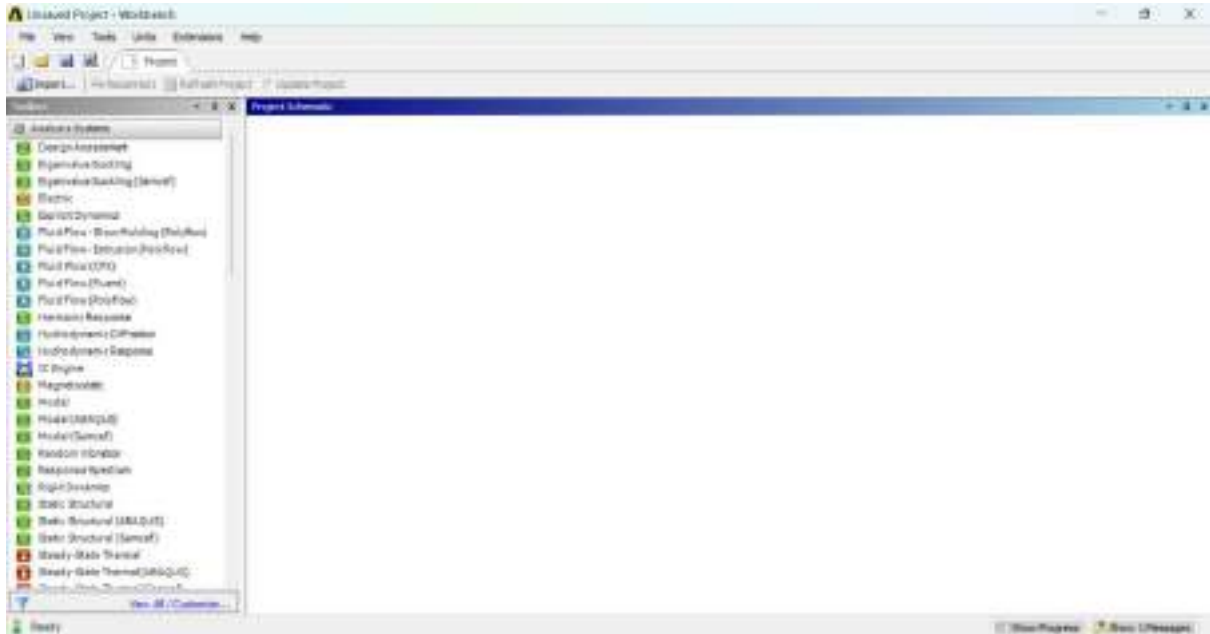
يُجرى تحليل خطاف الرافعة لدراسة الإجهاد (Stress) والتشوه (Deformation) والكلال (Fatigue) والانبعاج (Buckling) الذي يتعرض له كل مقطع عرضي. وتشتمل عملية التحليل على الخطوات التالية:

1-2-4 تحليل الخطاف تحت تأثير الحمل الساكن (Static Structural Analysis)

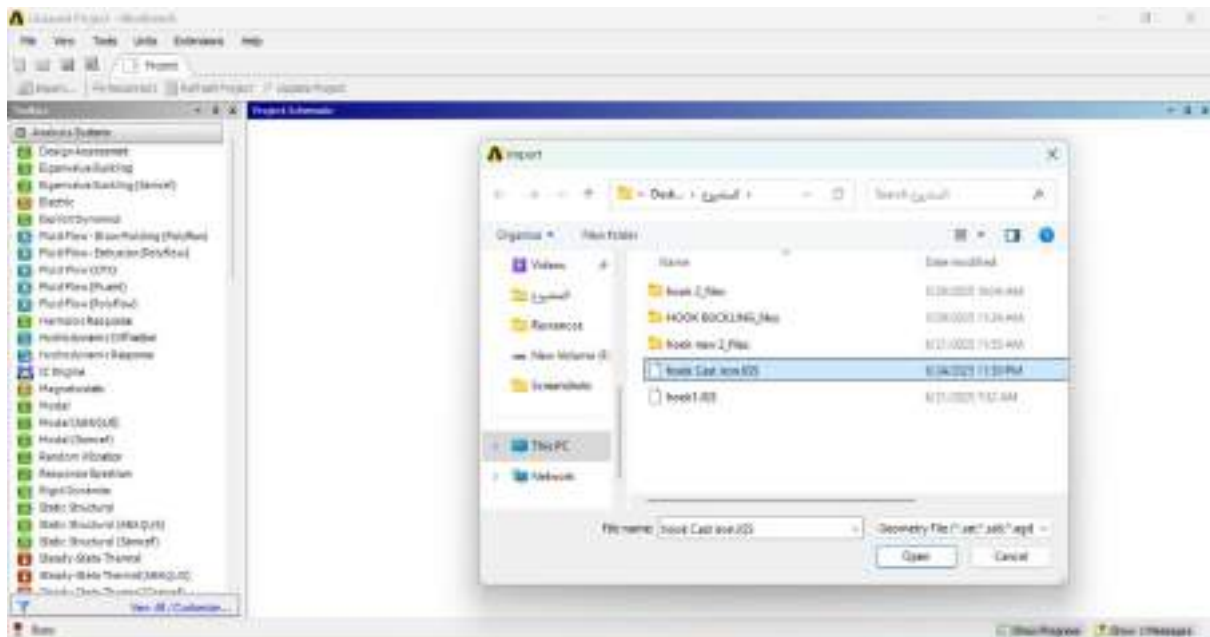
➤ النموذج (Model)

❖ في برنامج Ansys Workbench يبدأ التحليل الهيكلي الساكن باستيراد النموذج الذي تم حفظه بصيغة (IGS). تُعرّف خصائص المواد في قسم بيانات المواد الهندسية (Engineering Data). ثم يُنقل النموذج ثلاثي الأبعاد إلى مُصمم النماذج (Design Modeller). يسمح هذا بإنشاء النموذج اللازم للتحليل الهيكلي في بيئة Ansys.

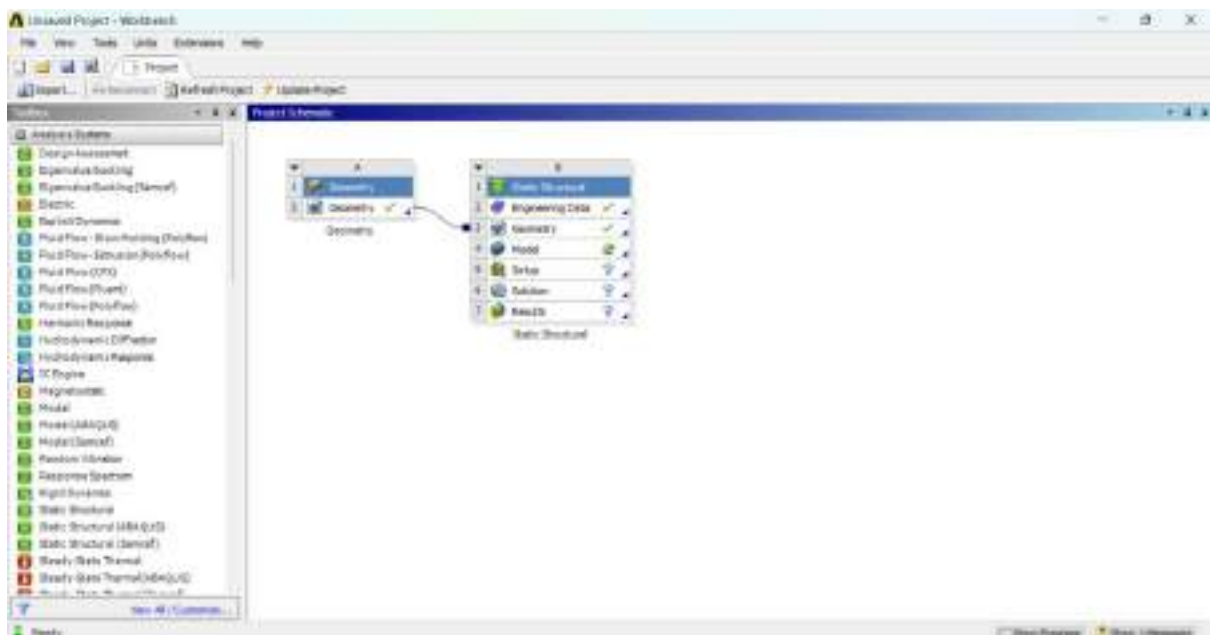
• واجهة البرنامج (Interface)



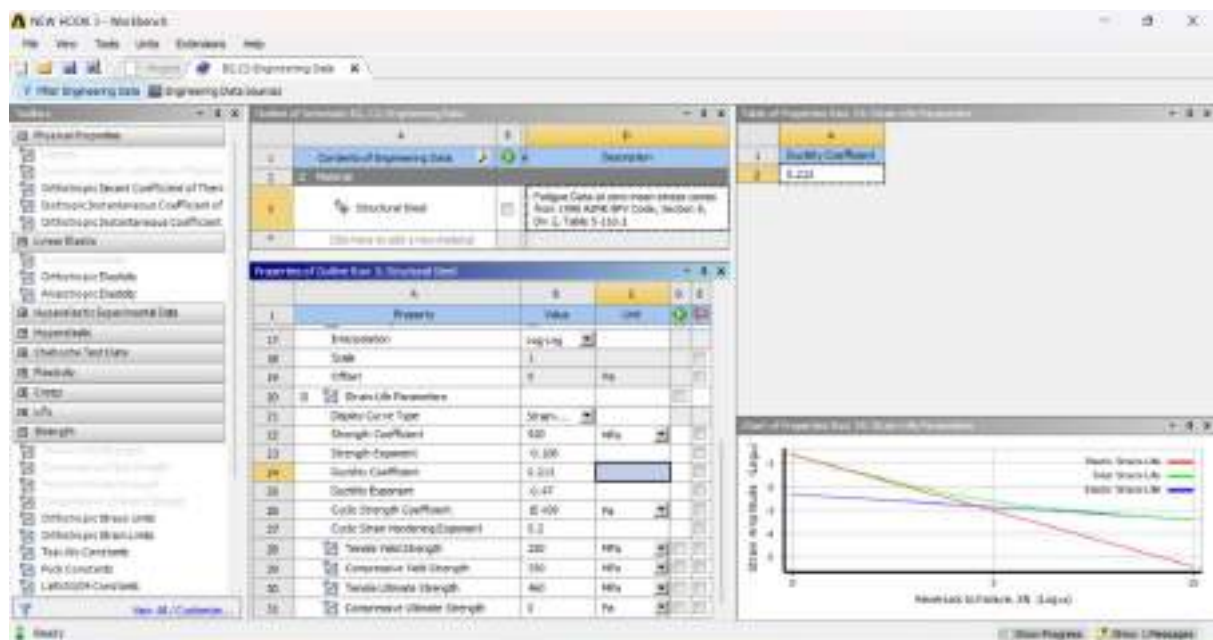
- استيراد خطاف الرافعة الذي تم إنشائه في برنامج Solid Works بصيغة IGS الي برنامج Ansys.



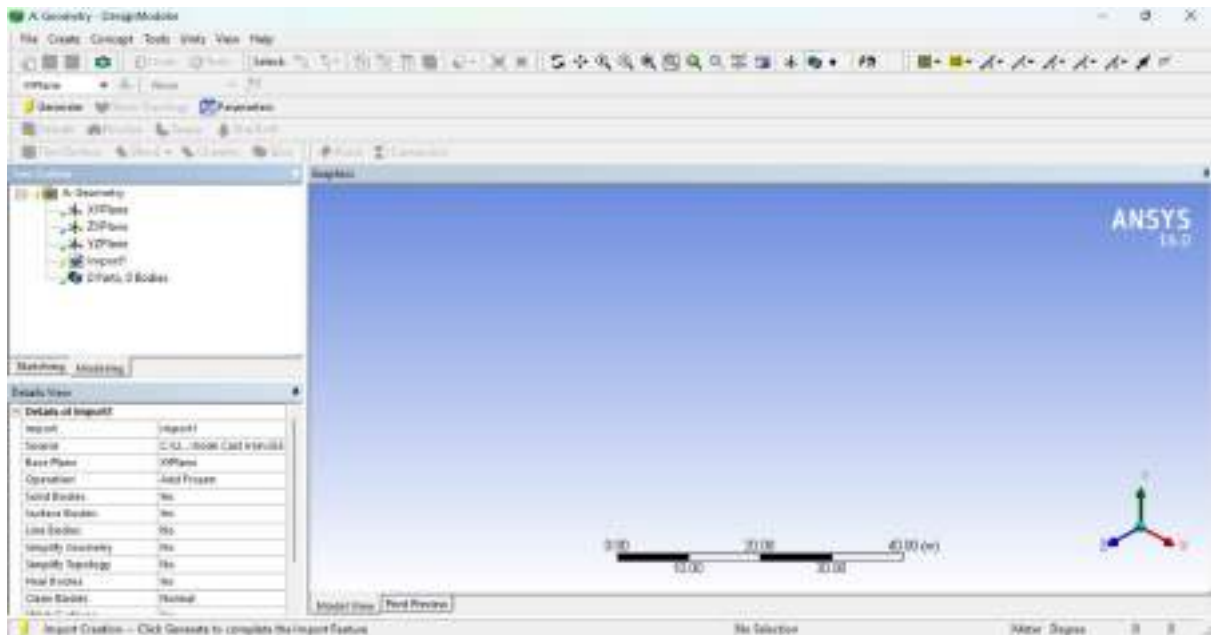
- اختيار نظام التحليل الساكن (Static Structural System) من أنظمة التحليل الموجودة في واجهة البرنامج.



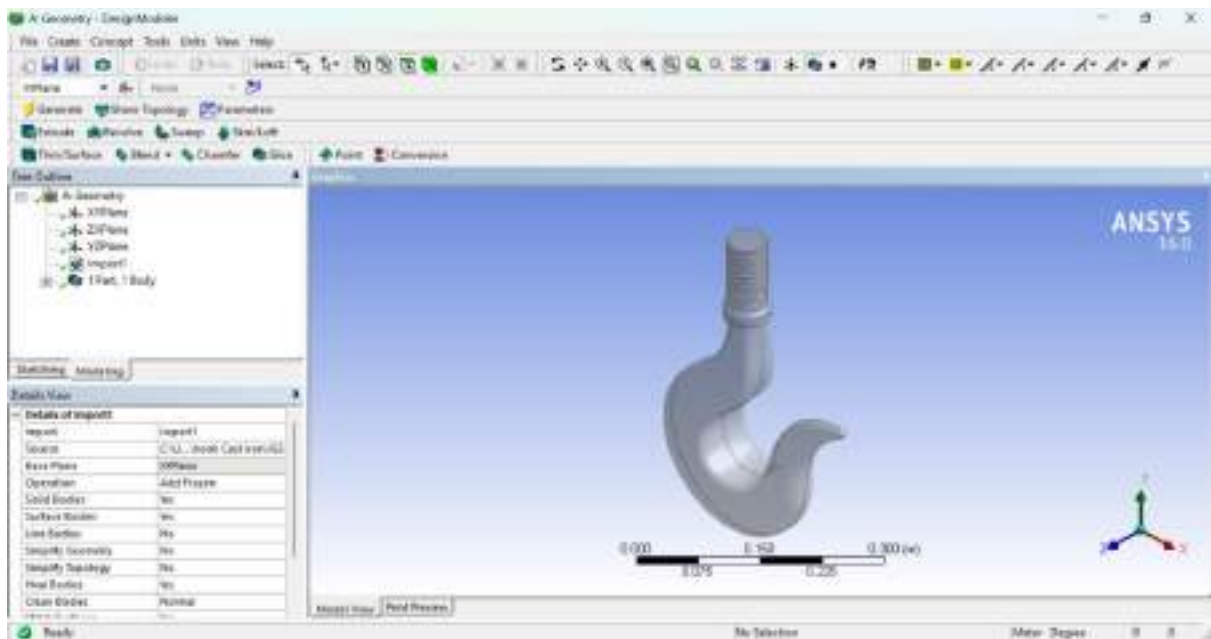
- ادخال خصائص المادة الهندسية (Structural Steel) في قسم البيانات الهندسية (Engineering Data)



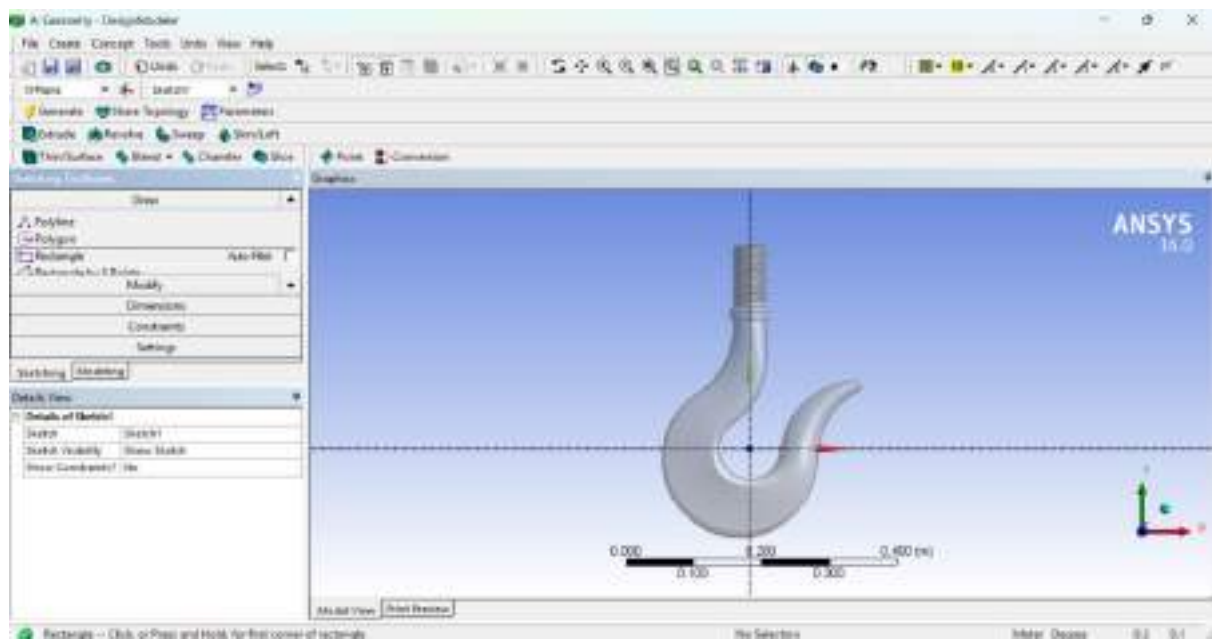
- 54

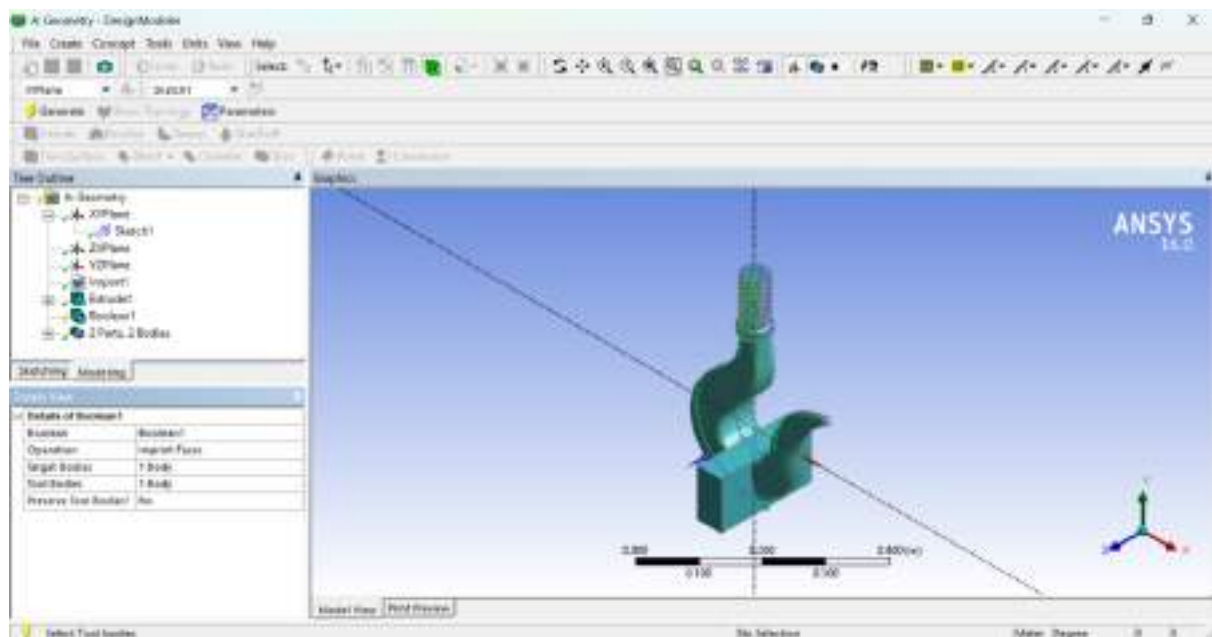
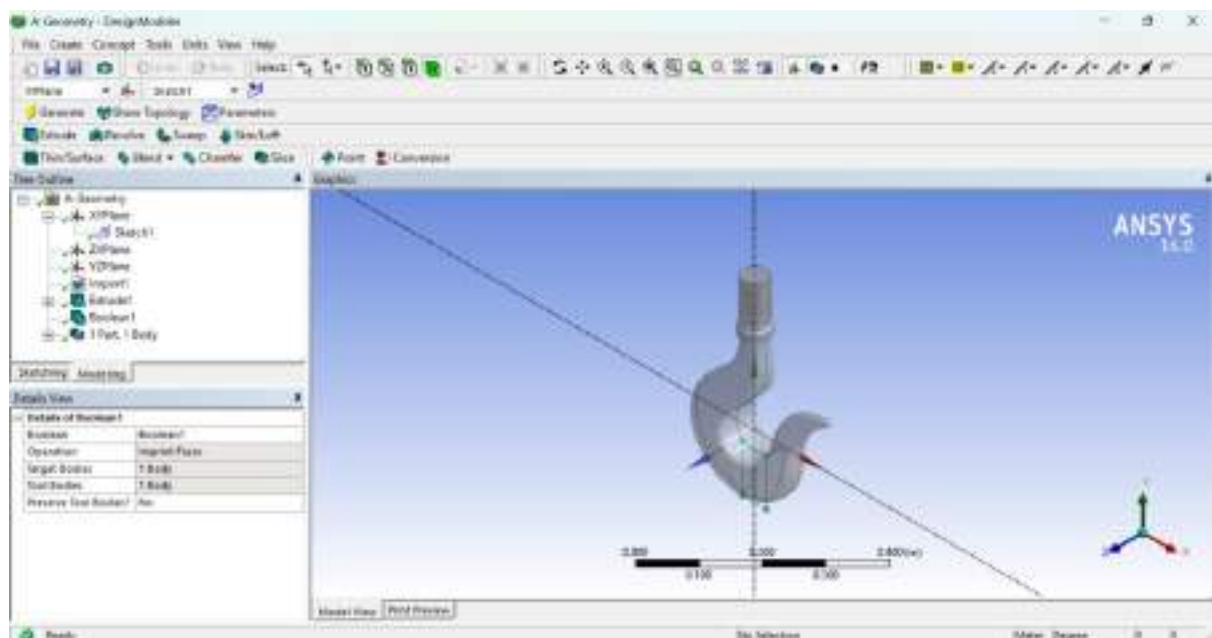


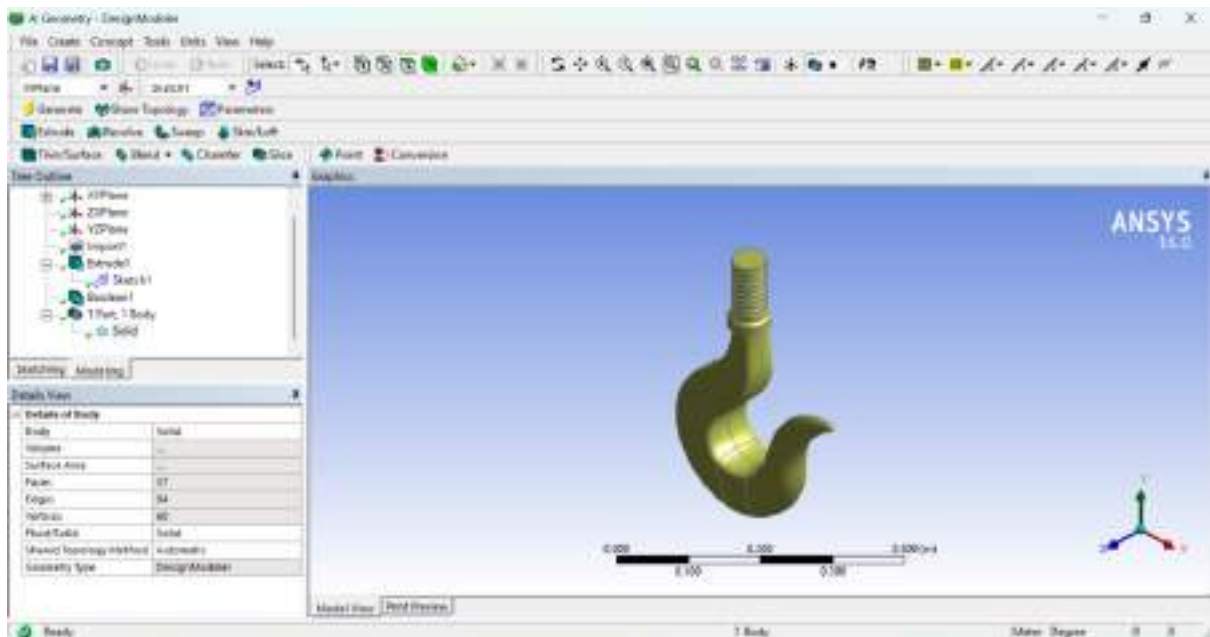
- انشاء المجسم ثلاثي الأبعاد ليعمل في بيئة Ansys.



- تقسيم النموذج ثلاثي الأبعاد إلى أقسام لتسهيل تحديد منطقة التحميل أثناء التحليل.





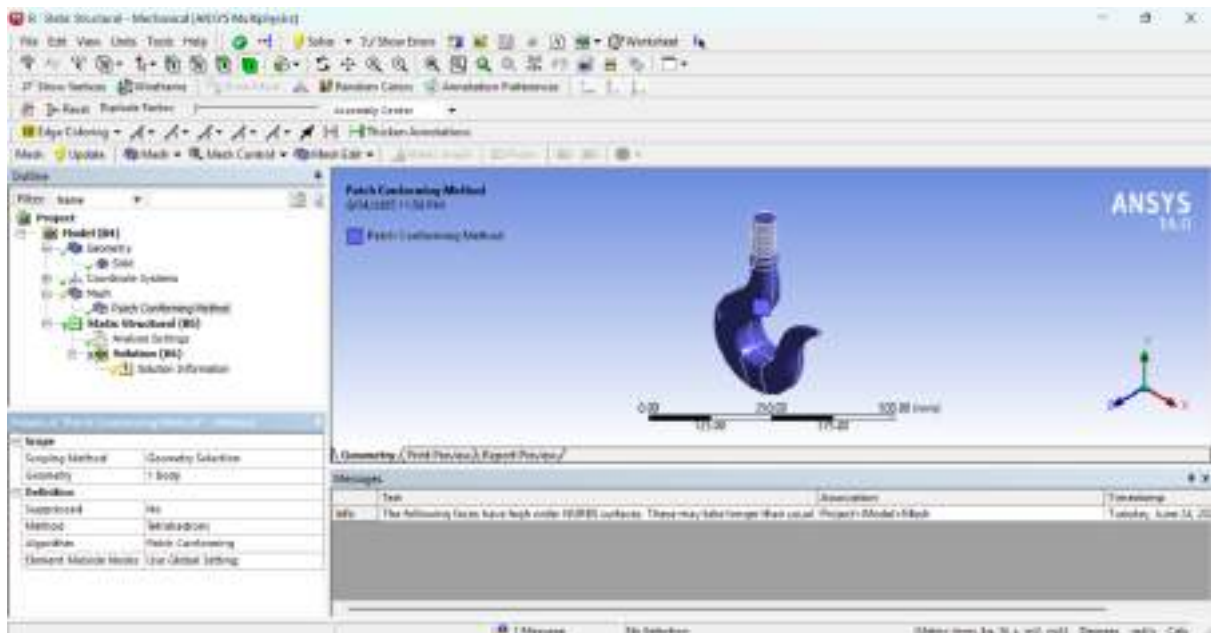


➤ إنشاء الشبكة (Generate Mesh)

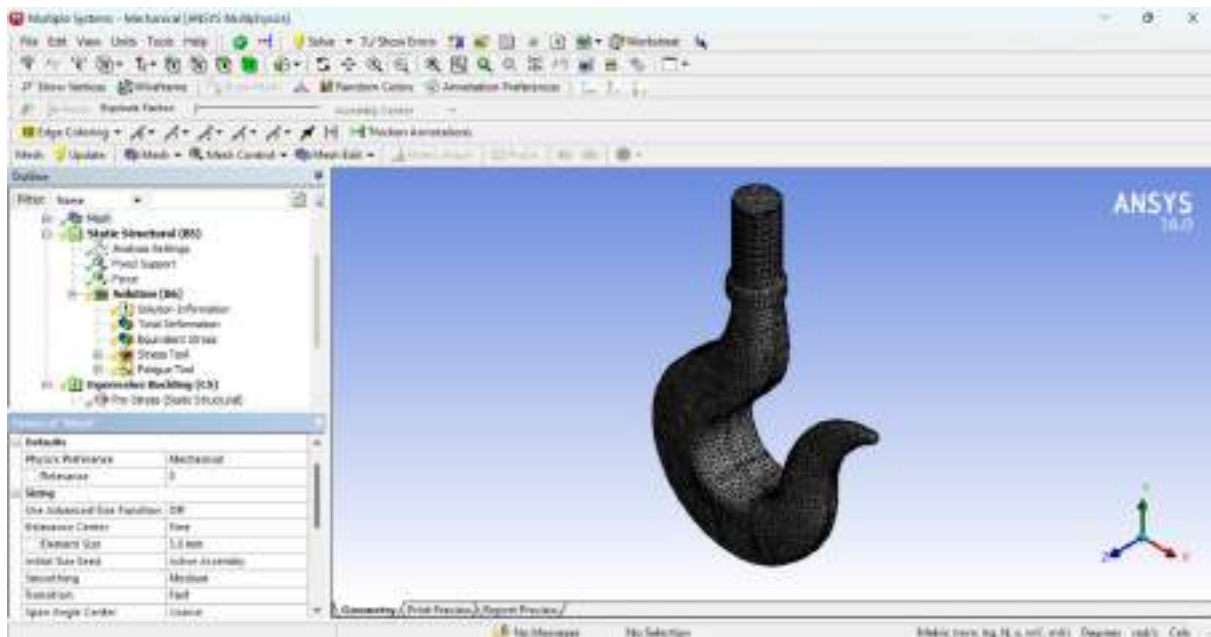
- تتم عملية التقسيم (Discretization) باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEA)



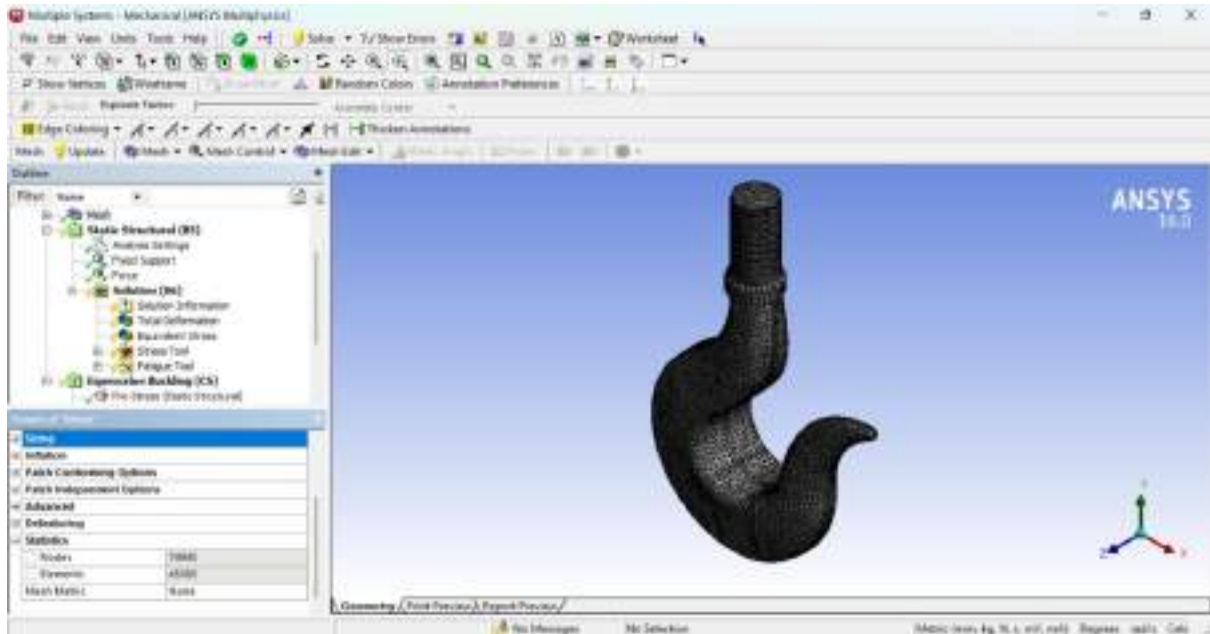
- إختيار العنصر رباعي الأسطح (Tetrahedron Method) لإنشاء الشبكة (Mesh) للجسم ثلاثي الأبعاد.



- يتم تنفيذ الشبكة بحجم عنصر 3 mm للدقة في النتائج



- عدد العناصر وعدد العقد في الشبكة كما موضح ادناه:

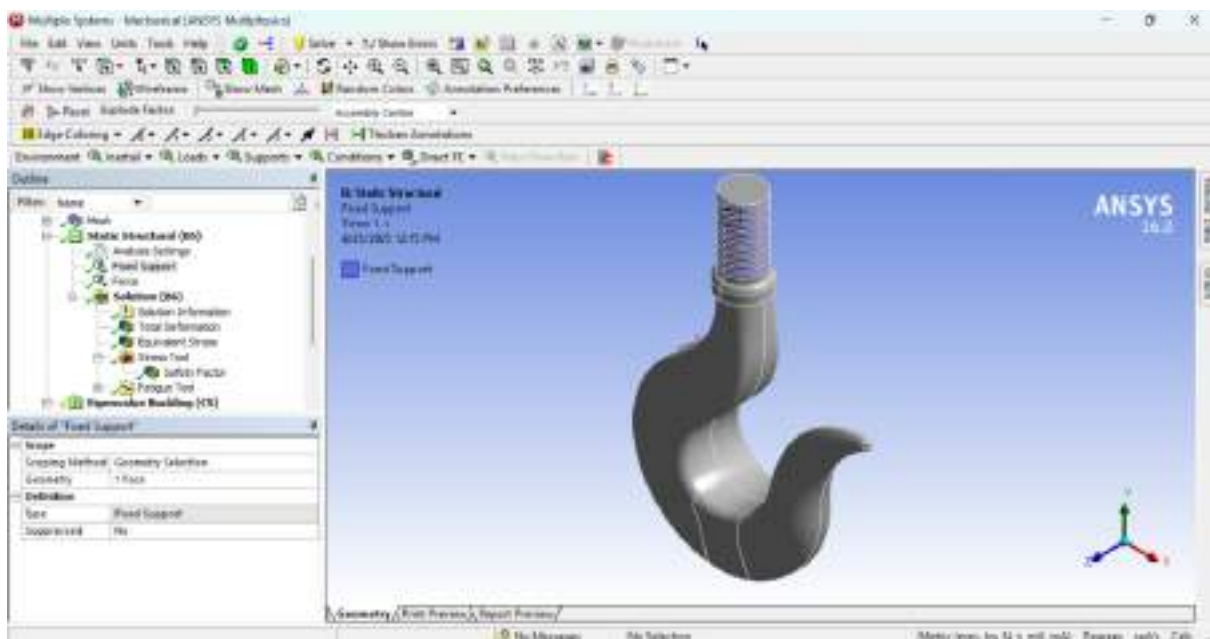


➤ الشروط الحدية (Boundary Conditions)

يتم تطبيق الشروط الحدية المطلوبة (التثبيت والقوة - Support and force) عن طريق تحديد مناطق على الخفاف.

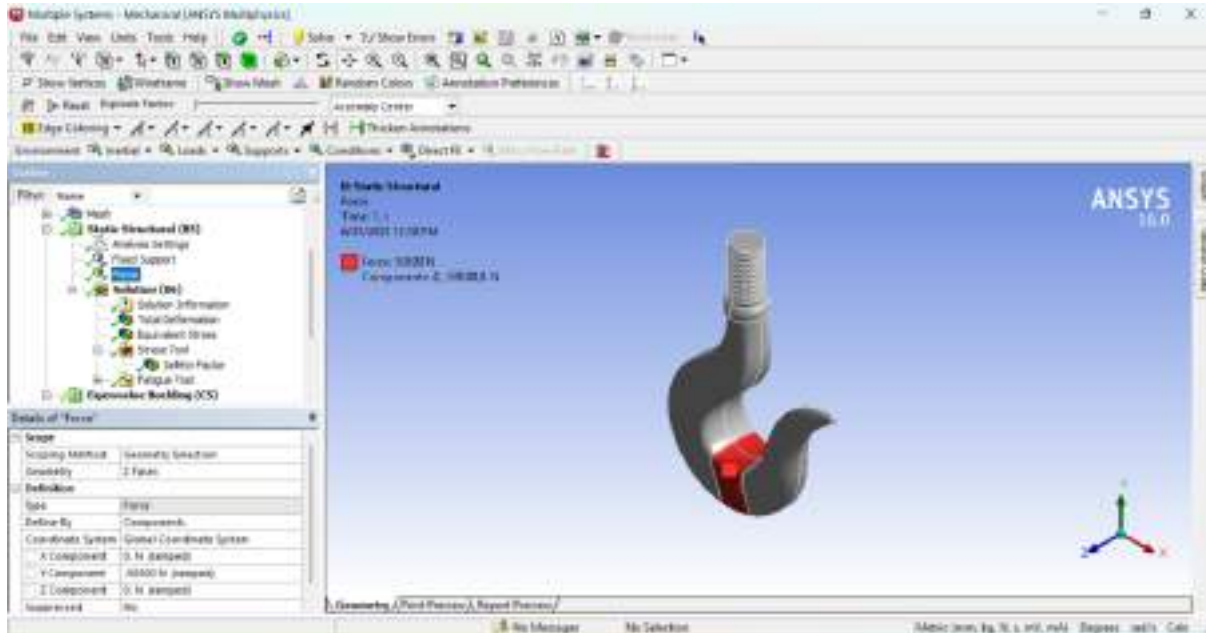
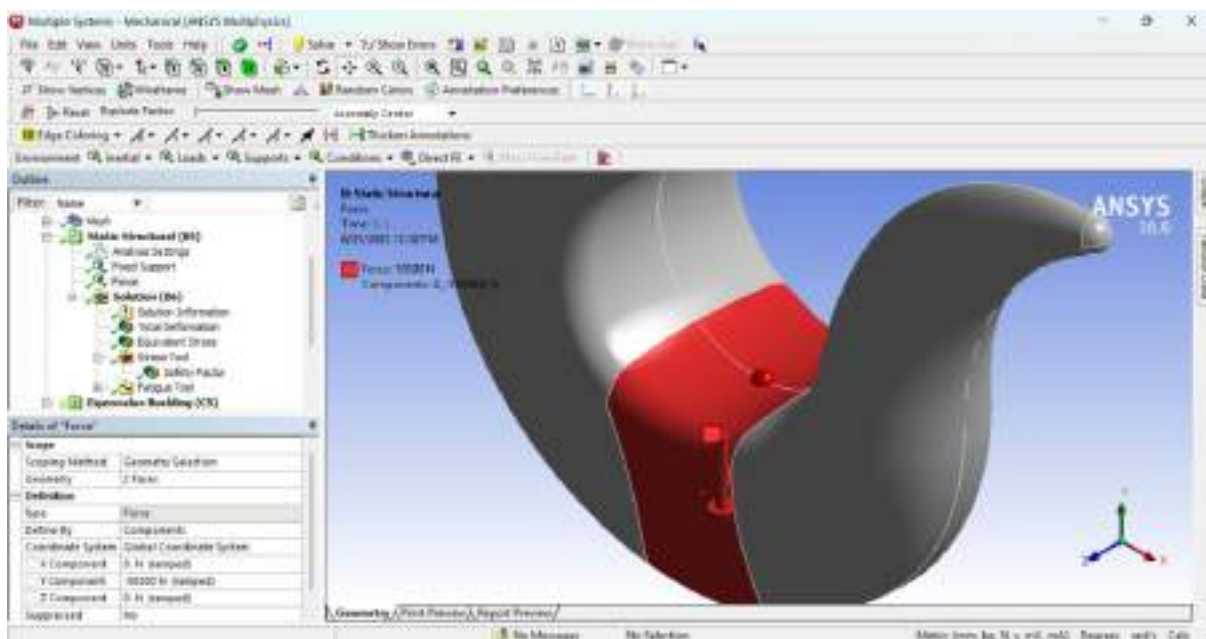
- التثبيت من النوع (fixed support)

❖ تشير المنطقة ذات اللون الأزرق الي نقطة تثبيت الخفاف.



- الحمل (force)

تشير المنطقة ذات اللون الأحمر الي منطقة تركيز الحمل والسهم يشير الي إتجاه القوة.

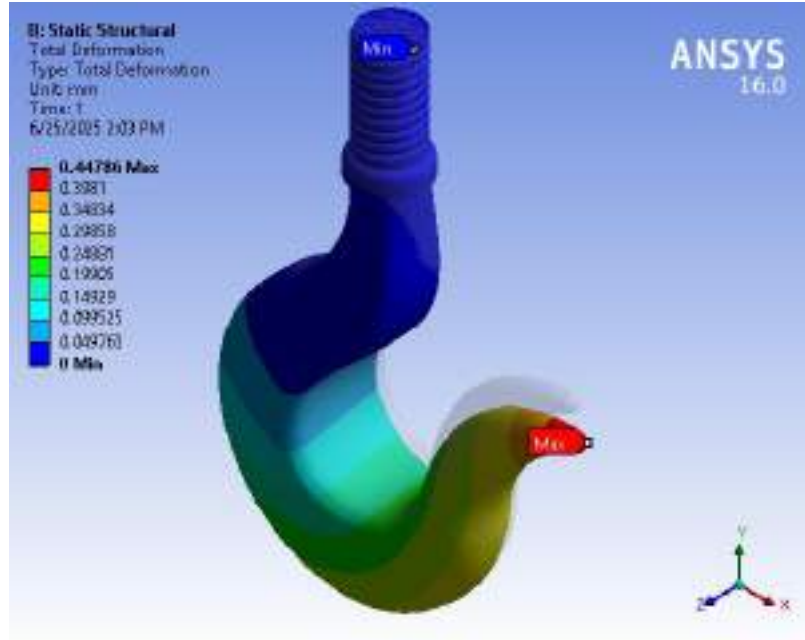


➤ نتائج التحليل الساكن (Static Analysis Results)

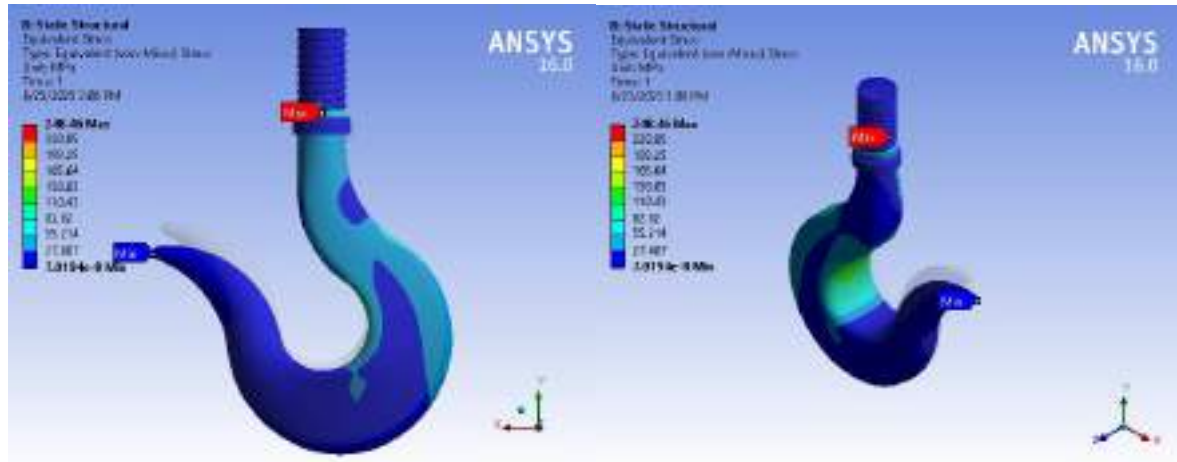
- تُظهر النتائج ادناه توزيع (التشوه الكلي، الإجهاد المكافئ (إجهاد فون ميزس) ومعامل الأمان)

❖ من أدوات العرض تم اختيار (Show Undeformed Model) لإظهار الخطاف قبل وبعد التشوه

✓ التشوه الكلي (Total Deformation)



✓ الإجهاد المكافئ (Equivalent Stress)



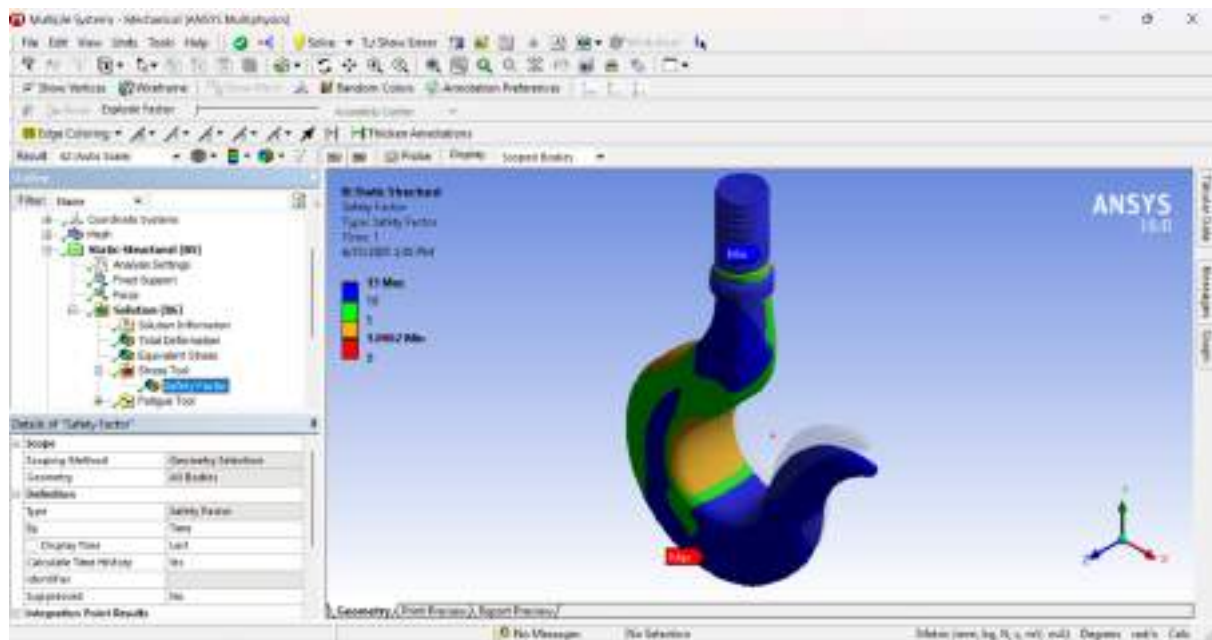
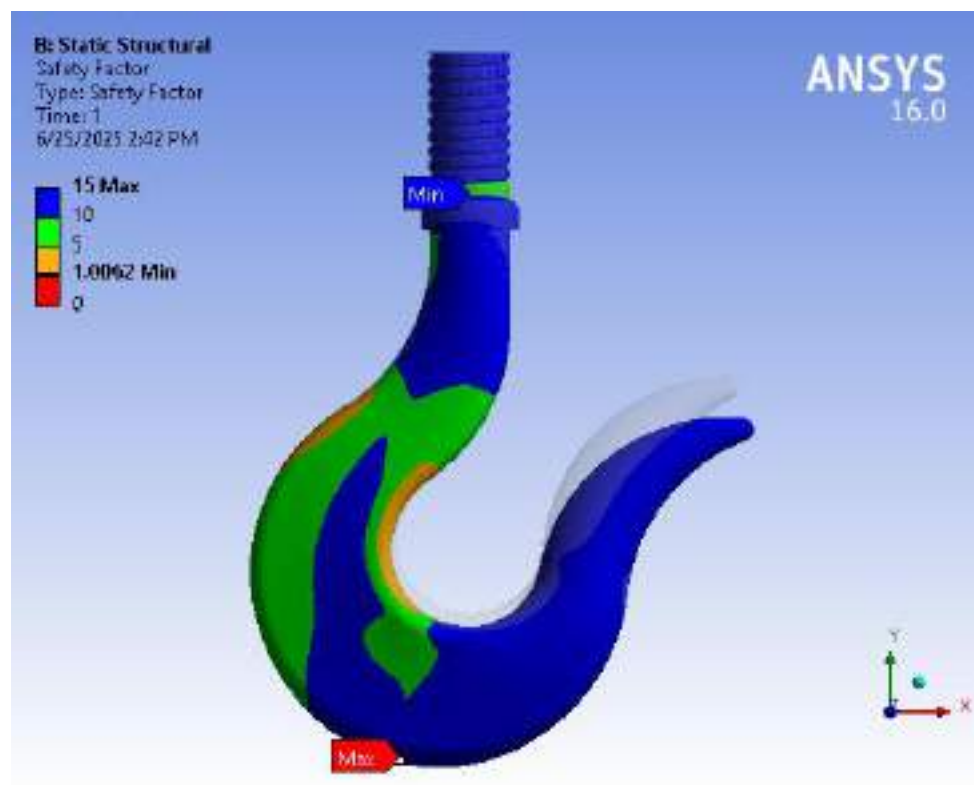
✓ معامل الأمان (Safety Factor)

❖ يمكن التنبؤ بالخضوع الأولي (Initial Yielding) لعينة الاختبار بمقارنة أقصى إجهاد فون ميزس

(maximum von Mises stress) الناتج في العينة مع مقاومة خضوع الشد (Yield Tensile)

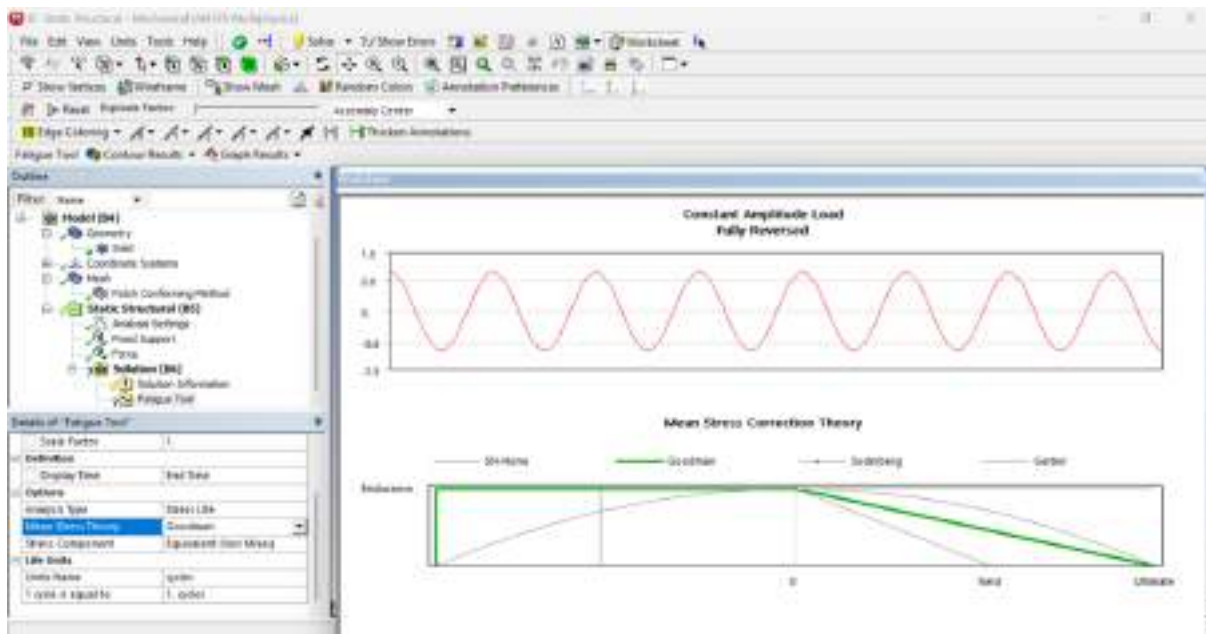
(Strength) لمادة العينة (Specimen Material).

- نستخدم أدوات الإجهاد (Stress Tool) لعرض نتائج معامل الأمان.



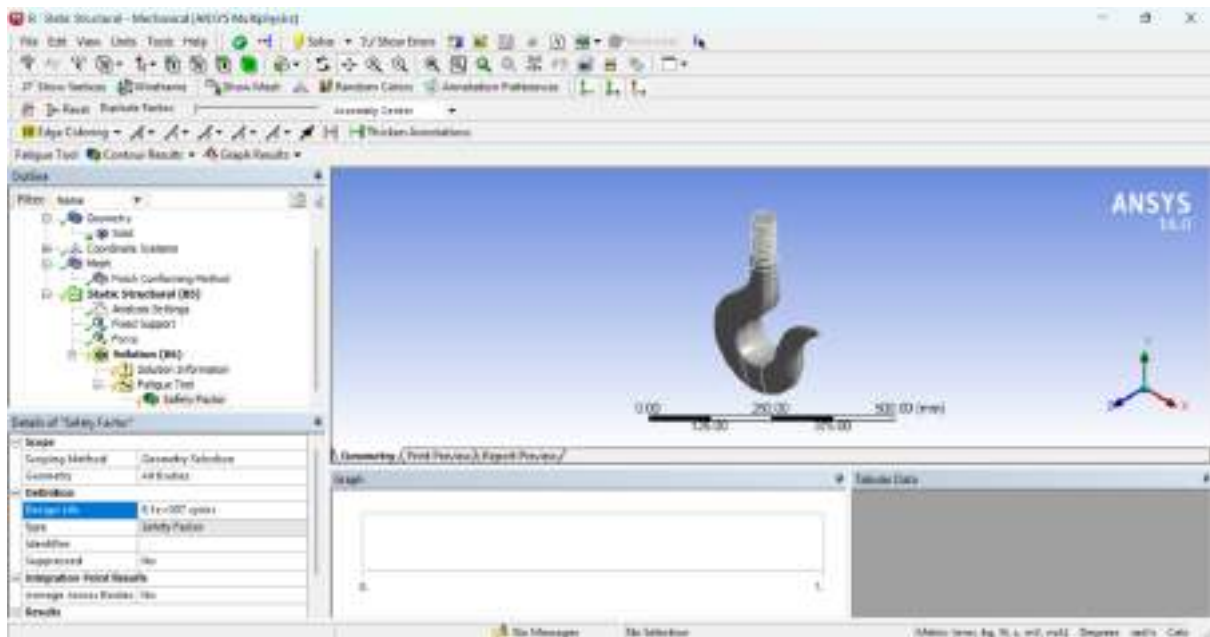
2-2-4 تحليل الكلال - التعب (Fatigue Analysis)

- يتم اختبار الكلال للخطاف بتطبيق الشروط الحدية في التحليل السابق مع تغيير نوع التحميل من ساكن (Static Load) الى (Fully Reversed Load)
- من تفاصيل أدوات الكلال (Details of Fatigue Tool) في نافذة البرنامج يتم اجراء الآتي:
- ضبط نظرية الإجهاد المتوسط (Mean Stress Theory) على جودمان (Goodman).
- نوع التحميل حمل معكوس بالكامل – شد وضغط (Fully Reversed constant amplitude load)
- نوع التحليل (analysis type) من النوع (Stress Life type) باستخدام معيار فون ميزس للإجهاد



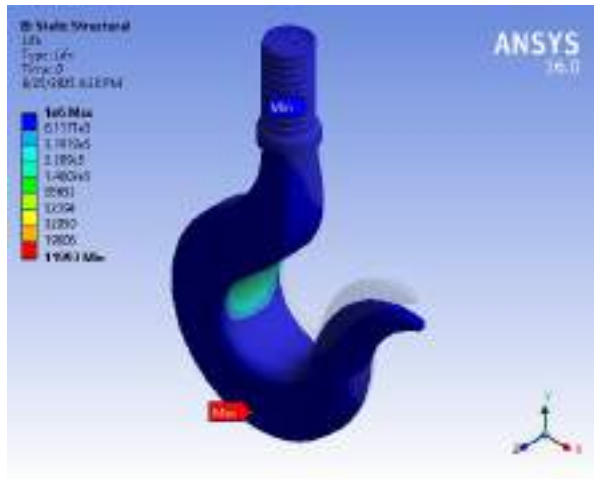
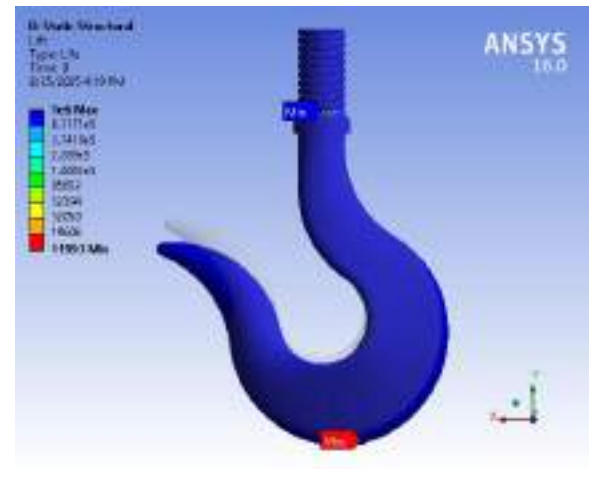
- من أدوات الكلال (Fatigue Tool) في نافذة البرنامج تم ادراج العمر (Life) ومعامل الأمان (Safety Factor)
- من تفاصيل معامل الأمان (Details of Safety Factor) في نافذة البرنامج يتم اجراء الآتي:
- عمر التصميم (Design life) $9.104E^7$ دورة.

❖ القيمة المدخلة لعمر التصميم تعتبر اقل عمر افتراضي يوضع لتصميم الخطاف في حال تم استخدام المادة من النوع (Structural Steel).

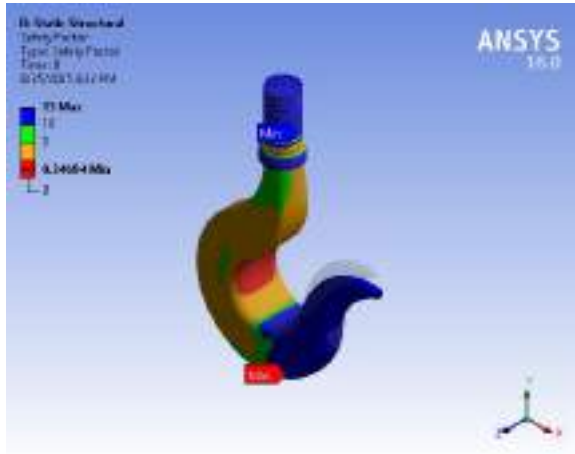
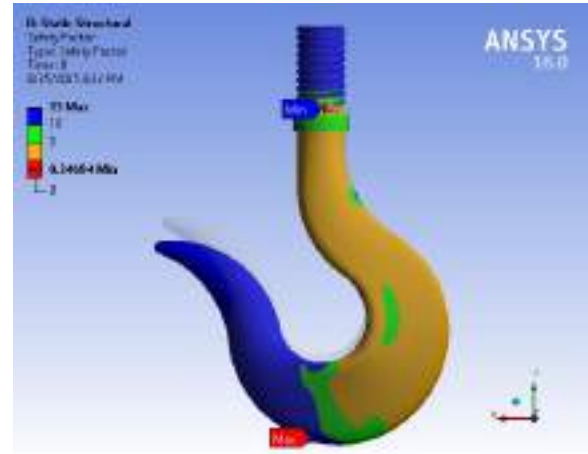


➤ نتائج تحليل الكلال (fatigue analysis results)

✓ العمر (life)



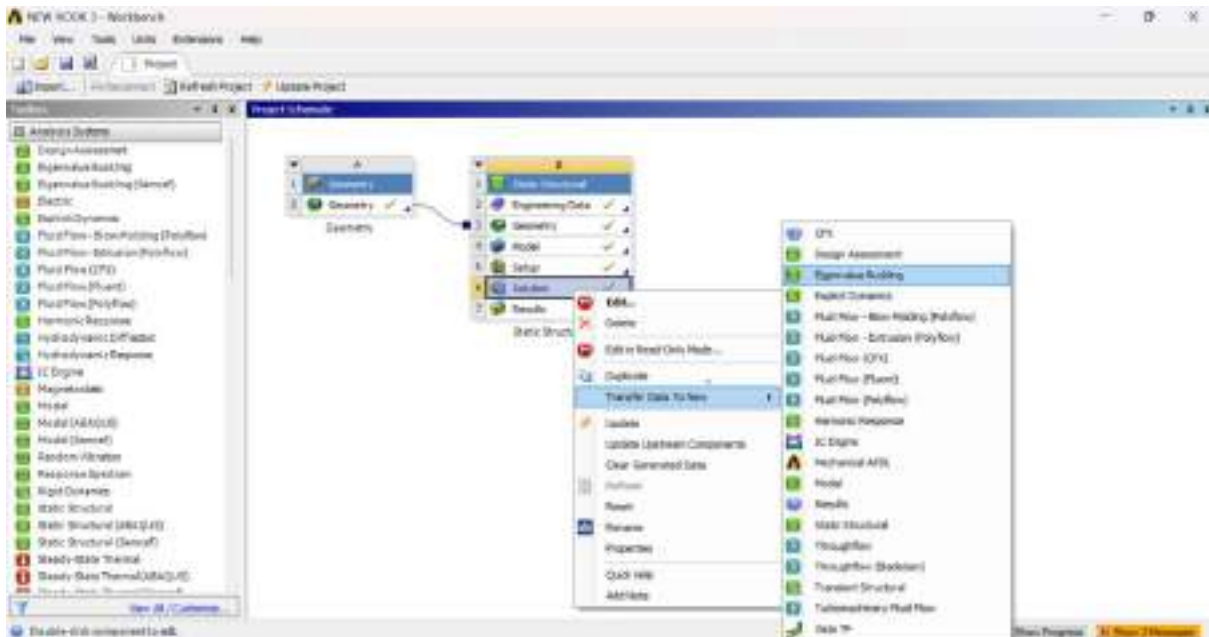
✓ معامل الأمان (Safety Factor)

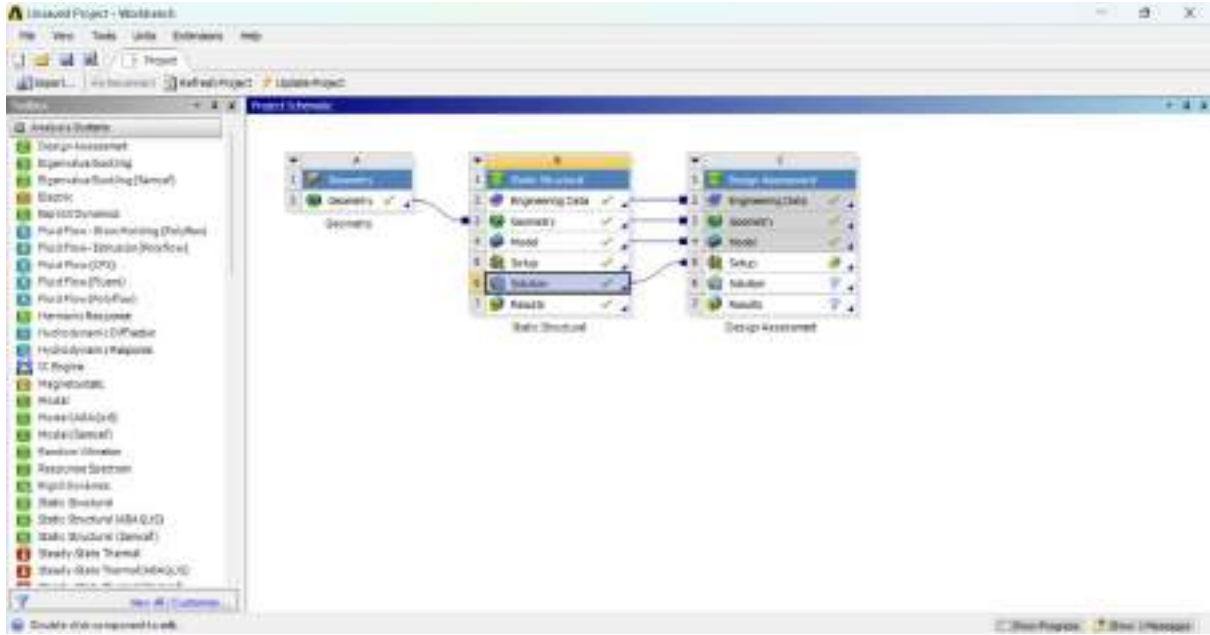


3-1-4 تحليل الانبعاج (Buckling analysis)

➤ يتم إدراج اختبار الانبعاج (Buckling Analysis) الي التحليل الساكن السابق (Static Structural Analysis) حيث تنقل تلقائياً البيانات المدخلة في التحليل الساكن الي تحليل الانبعاج ويتم في هذه الخطوة:

- استخدام نتائج التحليل الساكن كشروط ابتدائية.
- سيشارك كلا التحليلين البيانات الهندسية والهندسة والنموذج.





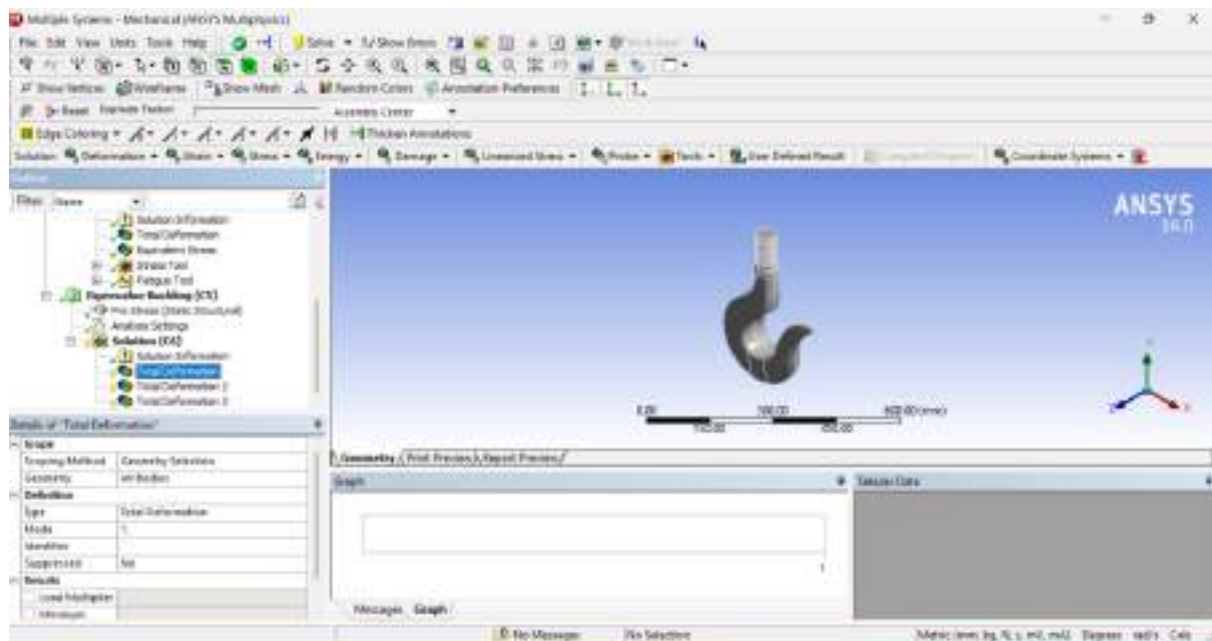
➤ في تفاصيل اعدادات تحليل الانبعاج (Analysis Settings) يتم الآتي:

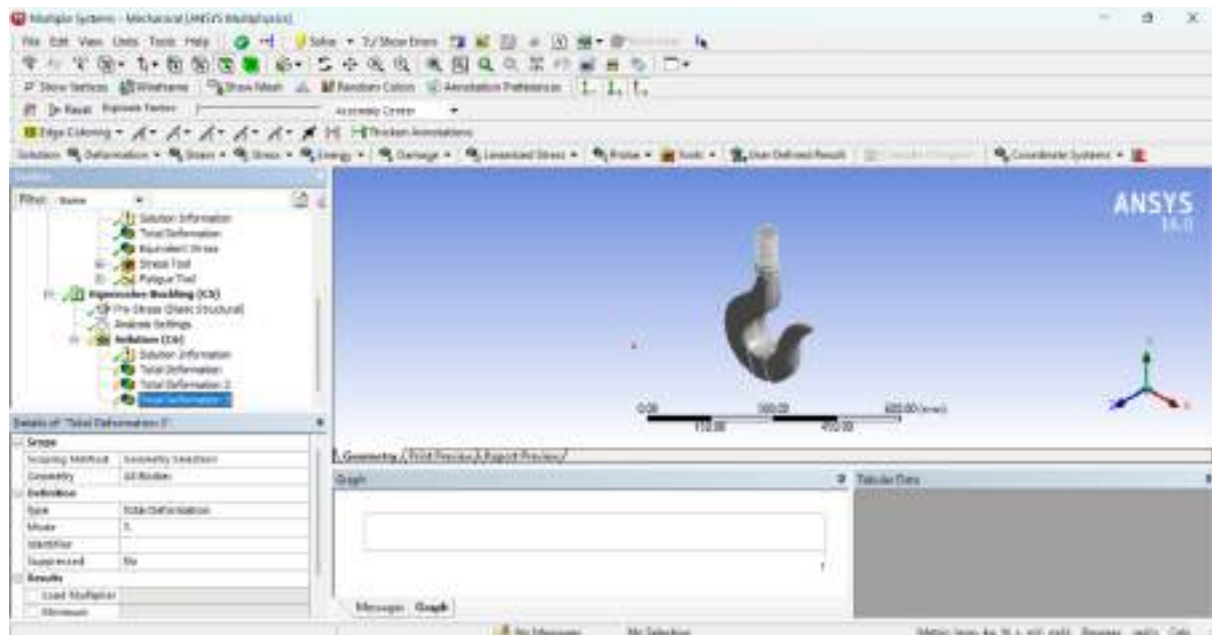
- تحديد عدد اشكال نمط الانبعاج (Max Modes to Find)، وتم اختيار العدد ثلاثة للحصول على اول ثلاثة اشكال لأنماط الانبعاج
- إيقاف مُضاعف الحمل السالب (Negative Load Multiplier) للحصول على الحمل الحرج الذي يحدث عنده الانبعاج

❖ يشير مضاعف حمل الانبعاج السالب ببساطة إلى أن عكس الأحمال المطبقة (والتدرج بواسطة المضاعف) سيؤدي إلى انبعاج النموذج ولكن لا يُمكننا من حساب الحمل الحرج الذي يحدث عنده الانبعاج تحت ظروف التحميل. عند تشغيل مضاعف الحمل المعكوس غالبًا ما تكون النتائج غير مادية ضمن ظروف حمل النموذج الأصلي، مما يُشير إلى ضرورة إعادة تقييم سيناريو التحميل أو التكوين الهيكلي لضمان أن يعكس التحليل بدقة السلوك المادي المُراد. يُساعد مُضاعف حمل الانبعاج المعكوس، في جوهره في تحديد عدم الاستقرار المُحتمل في ظل ظروف حمل مُختلفة.



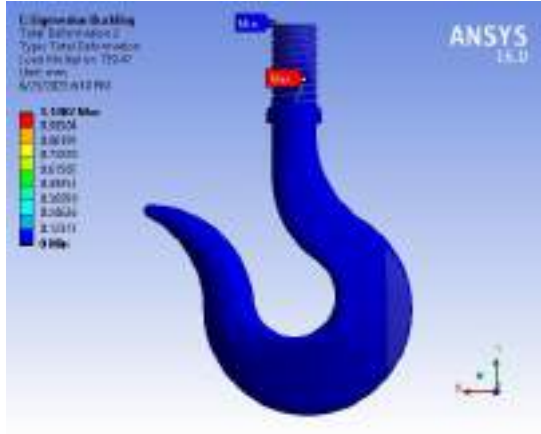
➤ في ضبط تفاصيل الحل في نافذة البرنامج (Solution) يتم تعريف اول ثلاثة اشكال لانماط التشوهات الناتجة عن الحمل



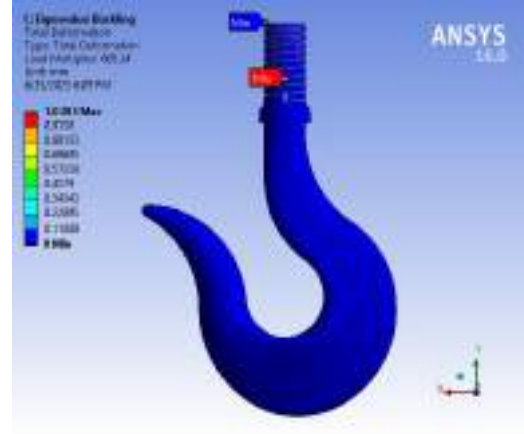


➤ نتائج تحليل الإنبعاج (Buckling Analysis Results)

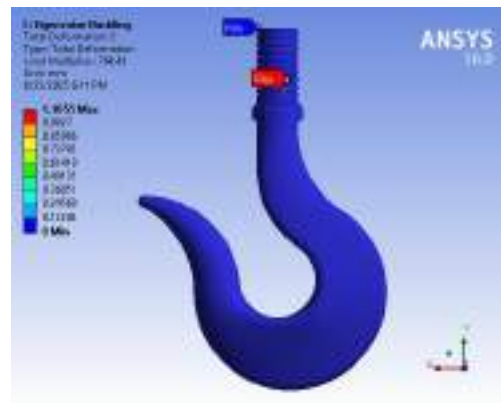
(b) النمط الثاني (Mode Shape 2)



(a) النمط الأول (Mode Shape 1)



(c) النمط الثالث (Mode Shape 3)



الفصل الخامس

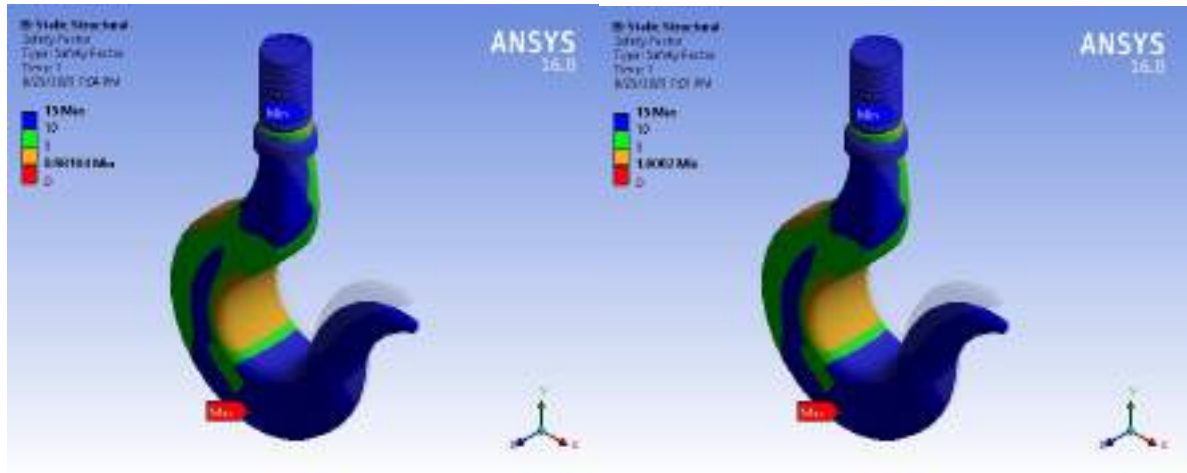
مناقشة النتائج والخلاصة والتوصيات

Results, Conclusion and Recommendations

1-5 مناقشة النتائج (Results Conclusion)

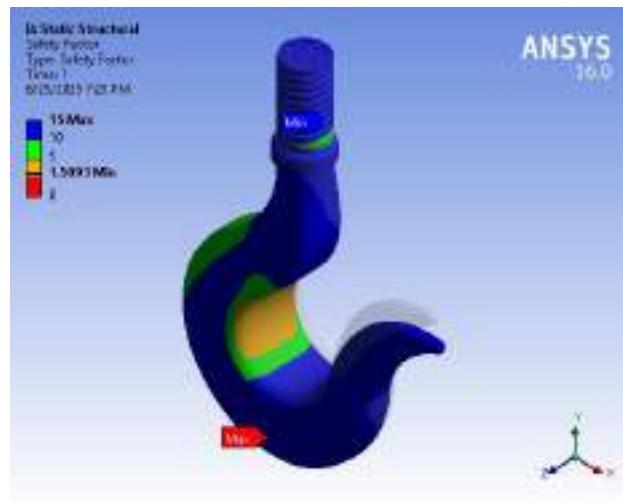
1-1-5 التحليل الساكن (Static Structural)

✓ من نتائج التحليل للخطاف المصنوع من (Structural Steel) وتحت تأثير الحمل الساكن، اتضح أن الخطاف لن يفشل (Not Yield) في أي موضع إذا تم تحميله بحمل ساكن مقداره 58.850 KN كما في الشكل (a) وسيفشل في الحد الفاصل بين القلووظ وجسم الخطاف إذا تم زيادة مقدار الحمل عن هذه القيمة كما في الشكل (b)، وباعتبارات التصميم يتضح ان التشغيل الأمثل للخطاف عند معامل امان 1.5 وقيمة الحمل 39 KN باعتبار ان الفشل (Initial Yield) يحدث إذا تجاوزت قيمة الإجهاد الأقصى الناتج (Maximum Von Mises Stress) قيمة مقاومة خضوع الشد للمادة (Tensile Yield Strength) 250 Mpa (Yield Strength) لل (Structural Steel).



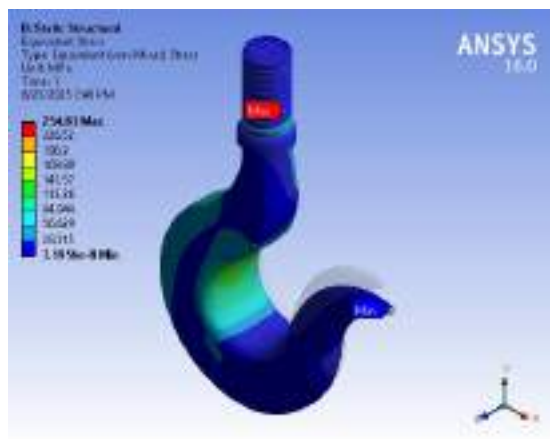
الشكل (b)

الشكل (a)

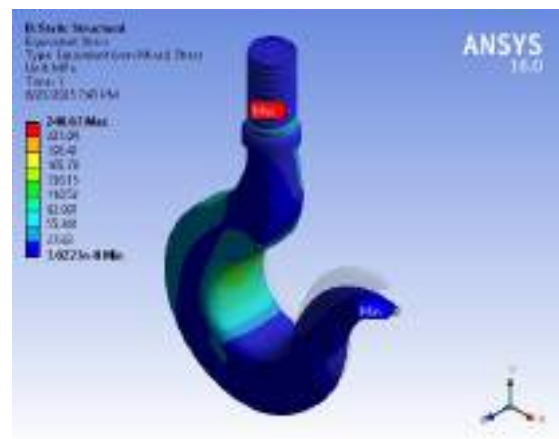


الشكل (c)

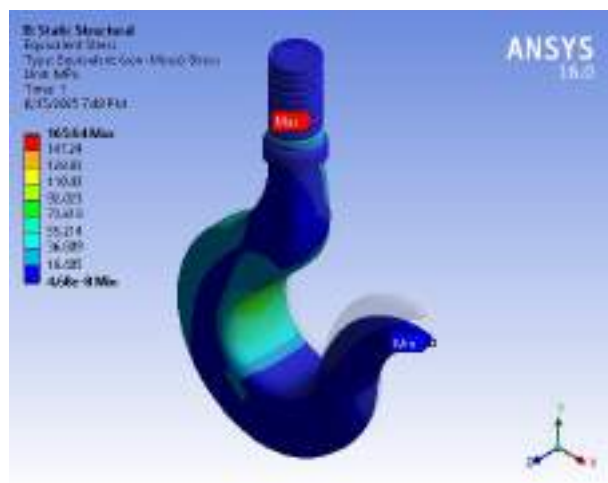
✓ أقصى قيمه للإجهادات تكون في منطقة القلوظ عند كل قيم التحميل المذكورة سابقاً كما يتضح في الأشكال التالية



الشكل (b)

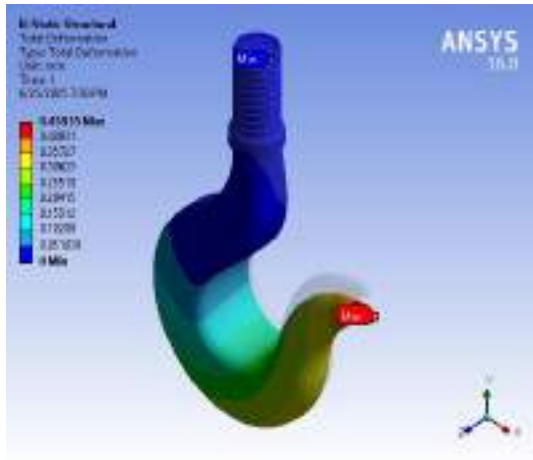


الشكل (a)



الشكل (c)

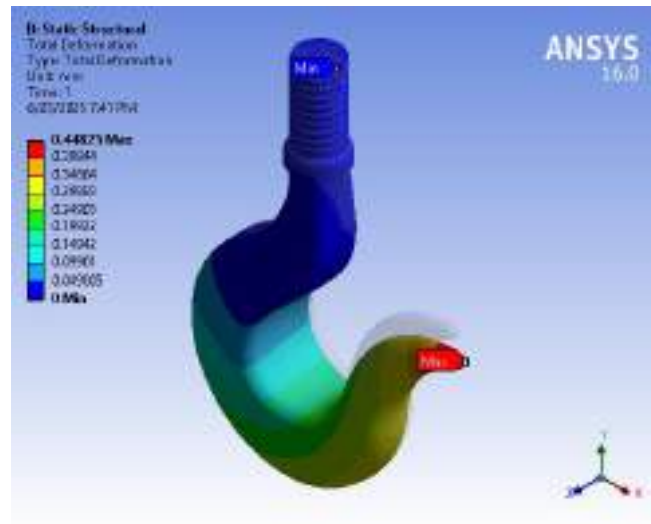
✓ أقصى قيمه للإزاحة تكون عند ابعد نقطة من نقطة التثبيت عند كل قيم التحميل المذكورة سابقاً
كما يتضح في الأشكال التالية:



الشكل (b)



الشكل (a)

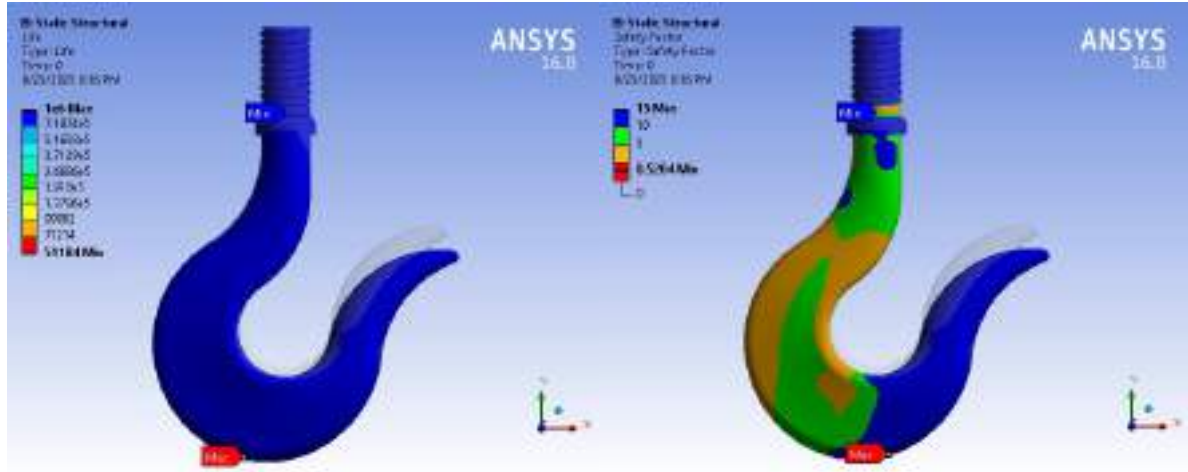


الشكل (c)

2-1-5 تحليل الكلال (fatigue analysis)

✓ بناءً على نتائج تحليل الكلال، فإن أقصر عمر للخطاف هو عند منطقة القلوظ (51184 دورة)، يليه القطر الداخلي للخطاف.

✓ معامل الأمان في منطقة القلوظ 0.5204 وهذه القيمة تشير الي ان الخطاف سيفشل في اختبار الكلال بافتراض ان العمر التصميمي 9.104×10^7 دورة.



الشكل (b)

الشكل (a)

3-1-5 تحليل الانبعاج (Buckling Analysis)

❖ نلاحظ أن مضاعف الحمل (load multiplier) لنمط الانبعاج الأول يساوي 904.87. لمعرفة الحمل اللازم (الحمل الحرج) لانبعاج هيكل الخطاف، نقوم بضرب الحمل المطبق على الخطاف في مضاعف الحمل.

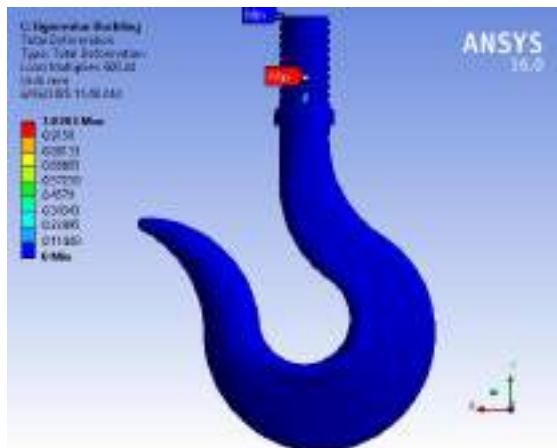
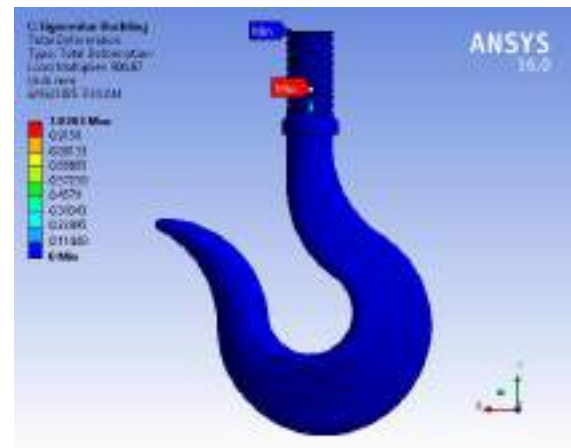
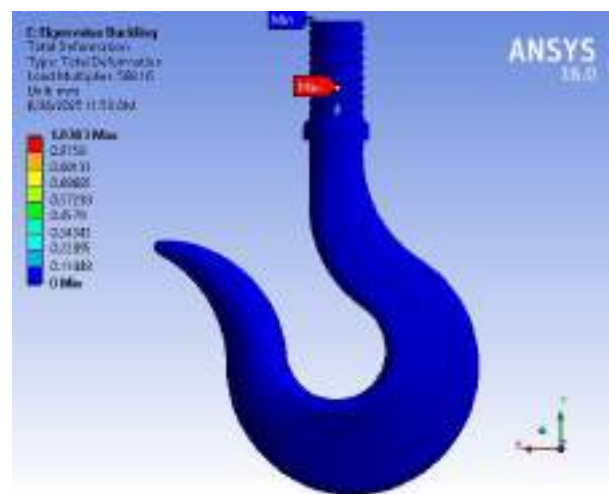
• الحمل الحرج للانبعاج (Critical Load) = مضاعف الحمل (load multiplier) × الحمل المطبق (Applied Load)

❖ على سبيل المثال، سيكون الحمل اللازم للانبعاج في النمط الأول هو 35289.93 KN (904.87 × 39 كيلو نيوتن). سيؤدي الحمل المطبق البالغ 39 كيلو نيوتن إلى عدم حدوث انبعاج للخطاف، لأنه أقل من حمل الانبعاج الحرج.

❖ بمقارنة الأشكال (a)، (b)، (c) عند الأحمال (39 KN)، (58.5 KN)، (60 KN) على التوالي، لم تتغير قيمة الحمل الحرج اللازم للانبعاج (35289.93 KN) في النمط الأول (Mode Shape 1) وهذا يعني أن هذه القيمة (35289.93 KN) تساوي الحمل التصميمي الحرج اللازم لحدوث انبعاج (تشوه دائم) للخطاف.

✓ بما أنه لم يحدث انبعاج في النمط الأول (Mode Shape 1) هذا يعني أنه لا يحدث انبعاج في جميع الأنماط التي تلي النمط الأول.

✓ وبالتجربة وُجد أن الانبعاج يحدث غالباً في الأشكال النحيفة ذات السمك المنخفض.



2-5 الخلاصة (Conclusion)

في هذا المشروع، استعرضنا بإيجاز نظريات الفشل للمواد تحت تأثير الأحمال الساكنة (نظريات فشل المواد المطيلة والهشة)، ونظريات فشل الكلال لهيكل الخطاف تحت تأثير أحمال منخفضة ودورية، ونظرية فشل الانبعاج. أستخدم خطاف رافعة مفرد لتوضيح كيفية إجراء تحليلات الفشل الساكن (Static Failure)، وفشل الكلال (Fatigue Failure)، وفشل الانبعاج (Buckling Failure) باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) ببرنامج Ansys Workbench.

3-5 التوصيات (Recommendations)

1. تحسين التصميم بتعديل ابعاد الشكل الهندسي من خلال زيادة القطر في منطقة القلوظ.
2. تقليل الموديول (Module) لأسنان القلوظ.
3. تتركز الاجهادات في القطر الداخلي لذلك يجب زيادة القطر الداخلي للخطاف.
4. استخدام معامل أمان أكبر عند التصميم لفشل الخطاف في اختبار الكلال.
5. استخدام مواد أكثر جساءة لتقليل الازاحة الناتجة من التحميل.
6. تغيير شكل المقطع العرضي للخطاف لإجراء المزيد من الاختبارات وتعريضه لنفس الشروط الحدية لإجراء مقارنة مع نتائج هذا المشروع وتحديد المقطع العرضي الأفضل للتصميم.

(References)

المراجع

1. Finite Element Modelling and Simulation with ANSYS Workbench, Second Edition by Xiaolin Chen, Yijun Liu (2019).
2. Introduction To Static Analysis Using Solid Works Simulation by Radostina V. Petrova (2015).
3. Investigation On Stress Analysis in Crane Hook Using Finite Element Analysis by N. Anil Kumar Et Al (April 2023).
4. Practical Aspects of Finite Element Simulation A Study Guide by Alexandre Urquiza and Vivek Hanchate (2019).
5. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 21 by Huei-Huang Lee (2021).
6. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS By Erdogan Madenci · Ibrahim Guven (2015).
7. Optimization And Fatigue Analysis A Crane Hook Using Finite Element Method By Amandeep Singh, Vinod Rohilla (November 2015).