

دراسة وتحليل الاستجابة الاهتزازية لعمود نقل القدرة الخاص بسفينة حاويات حقيقية

الدكتور عواطف نصره *

الدكتور منى اسبر **

الدكتور محمد خنيسي ***

المهندس الهادي صالح ****

الملخص

تم في هذا البحث تصميم محطة دفع لسفينة حقيقية بشكل ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks. في البداية تم معايرة الإعدادات والشبكة الرقمية من خلال مقارنتها مع حالة معيارية بعدها تم حساب الخصائص الديناميكية (عزوم عطالة، عزوم التخميد) لمكونات نظام الدفع بعد إدخال المواد الحقيقية المصنوع منها كل جزء، تم اعتماد طريقة تحليل العناصر المنتهية، بعدها تم تطبيق القوى والعزوم الخارجية المحرصة للاهتزاز من أجل إجراء تحليل ستاتيكي وديناميكي للاهتزازات التي تتعرض لها المنظومة من خلال تحديد الترددات الطبيعية والقسرية لعمود نقل القدرة ورسم أنماط الاهتزاز عند سرعات وحالات تحميل مختلفة وتحديد المواضع الحرجة التي تتعرض لأقصى إجهاد فتل على طول العمود، تم رسم مخطط الإجهاد أيضاً كتابع للزمن، في النهاية تمت مقارنة النتائج بنتائج الطرق التحليلية لمحطة دفع السفينة ذاتها.

الكلمات المفتاحية: اهتزازات الفتل، نظام الدفع في السفن، العناصر المنتهية، SolidWorks.

* أستاذ - قسم الهندسة البحرية - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - اللاذقية - سورية. إيميل: dr.awatefwahidnasra@tishreen.edu.sy

** أستاذ - قسم الهندسة البحرية - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - اللاذقية - سورية. إيميل: dr.mounasafyesber@tishreen.edu.sy

*** أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - اللاذقية - سورية. إيميل: dr.mohamadkhnese@tishreen.edu.sy

**** طالب دكتوراه - قسم الهندسة البحرية - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - اللاذقية - سورية. إيميل: alhadee.saleh@tishreen.edu.sy

Study and analyses of the vibration response of a power transmission shaft of a real container ship shaft

* Dr. Awattef Nasra

**Dr. Mona Esber

***Dr. Mohammad Khnese

**** Eng. Alhadee Saleh

ABSTRACT

In this research, a three-dimensional propulsion system for a real ship was designed using the SolidWorks program. The grid and numerical settings were initially validated by comparing them with a standard case. Then, the dynamic properties of the propulsion system components' (moments of inertia, damping moments) were calculated after applying the real materials from which each part is made. The external vibration-inducing forces and moments were applied to conduct a static and dynamic analysis of the vibrations to which the system is exposed by determining the natural and forced frequencies of the power transmission shaft. The vibration patterns at different speeds and load states were presented and analyzed. The maximum values of twisting stress along the shaft were determined, and the stress diagram was plotted as a function of time. Finally, the numerical results were compared with analytical ones.

Keywords: torsional vibrations, ship propulsion system, SolidWorks.

* Prof. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria. Email: dr.awatefwahidnasra@tishreen.edu.sy

** Prof. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria. Email: dr.mounasafyesber@tishreen.edu.sy

*** Assistant Prof. mechatronics Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria. Email: dr.mohamadkhnese@tishreen.edu.sy

**** PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria. Email: alhadee.saleh@tishreen.edu.sy

١. مقدمة

بات من الضروري في السنوات الأخيرة إيلاء اهتمام أكبر لتحليل ومحاكاة اهتزازات الفتل في محطات دفع السفن وذلك للرقابة الصارمة التي باتت تفرضها هيئات التصنيف على المستويات العالية من الاهتزازات التي تشكل خطراً على الانسان والألة معاً. إن التنبؤ بالاهتزازات ومحاكاتها قبل بناء نظام الدفع يعد أمراً حيوياً وهاماً وكذلك مراقبة اهتزازات محطة الدفع للسفن قيد الاستثمار ضروري وذلك لتجنب تطور هذه الاهتزازات وخروجها عن السيطرة. نتيجة التعقيد الكبير لنظام الدفع وتعدد الأجزاء التي تعمل وتتحرك في آن واحد وكذلك تعدد القوى الداخلية والخارجية التي تؤثر على نظراً لصعوبة وقساوة البيئة التي يعمل فيها. اهتم الباحثون ببرمجة وتطوير الموديلات الرياضية الناطمة لنشوء هذه الاهتزازات وكيفية تطورها. لم تقتصر محاكاة ونمذجة الاهتزازات على الطرق التحليلية الرياضية بل استخدمت الطرق الرقمية خصوصاً بعد التطور الكبير في العلوم الحاسوبية، يعتبر برنامج SolidWorks الذي يعتمد تقنية تحليل العناصر المنتهية (FEA) للتنبؤ بالسلوك المادي الفعلي للمنتج عن طريق اختبار النماذج افتراضياً بمساعدة الحاسب CAD (Computer-Aided Detection) أحد البرامج الرائدة جداً في هذا المجال. يمكن لهذا البرنامج أن يوفر نتائج دقيقة وموثوقة لمجموعة واسعة من أنواع الدراسات من التحليل الثابت الخطي الأساسي إلى التحليل غير الخطي والديناميكي الأكثر تعقيداً، وتأكيداً على دقة وموثوقية البرنامج نود أن نشير إلى أنه مستخدم على مجال واسع في التصميم وحسابات الـ FEM، وهنا بعض الدراسات الحديثة والتي تم فيها استخدام هذا البرنامج لهذه الأغراض [1-11].

لقد أجرى العديد من الباحثين في السنوات الأخيرة أبحاثاً لتحليل الاهتزازات في محطات الدفع البحرية رقمياً ففي العام ٢٠١٤ Yuriy Batrak [1] أوضح الأنواع المختلفة للاهتزاز و تسمياتها المختلفة حسب هيئات التصنيف و صنف الاهتزاز بحسب أنواعه الحرة و القسرية وبين الحاجة الماسة للتنبؤ بالاهتزازات بمختلف أنواعها و أهمية الحفاظ على محطة الدفع عند أقل مستوى من الاهتزاز كونها صيانتها تشكل القسم الأكبر من تكاليف صيانة السفينة و أوضح آثار الاهتزاز المدمرة لأنبوبة المؤخرة على مختلف أنواع السفن و

تحدث عن الاهتزازات التوافقية و البارامترات المؤثرة في الاهتزازات المخدمة و الغير المخدمة و بين تأثير العزم الجيروسكوبي في الاهتزاز الطولي و سبب نشوء الاهتزاز الدوراني و القوى الهيدروديناميكية في الرفاص و استخدم برنامج Shaft Designer لرسم تطور الإجهادات مع الزمن التي تؤثر في عمود نقل الحركة و العمود المرفقي بشكل مبسط ثم لجأ لنمذجة عمود الدفع متضمنا رفاص بطريقة العناصر المنتهية FEM بشكل مبسط و بتقيد لدرجات الحرية. في نفس العام Germanisher [2] قدم حلا تصميميا لمشكلة الاهتزاز الالتوائي عن طريق تثبيت مثبت اهتزاز التوائي واستخدام أجهزة مختلفة كمخدمات اهتزاز التوائية مثل المخدمات للزجة أو مخدمات احتكاك أو مخدمات مطاطية، نادرا ما تم تركيبها على السفن نظرا لتكاليفها المرتفعة نسبيا، واستخدام برنامج يعتمد FEM و كذلك بعض البرامج التحليلية الموضوعة خصيصا لتصميم العمود، على الرغم من هذه الأدوات المتطورة لتحليل اهتزازات الفتل لا تزال الطرق التحليلية البسيطة مهمة للتصميم الأولي و التحكم في اهتزازات عمود الدوران للسفن القيد الاستثمار. في العام Murawski Lech [3] 2017 نُشر بحث تحدث فيه عن الاهتزازات في نظام نقل الطاقة البحرية و كيفية تحليل هذه الاهتزازات أثناء عملية التصميم و تحدث عن أكثر أنواع الاهتزازات خطورة و استخدم في بحثه محرك ديزل رئيسي متوسط السرعة مستخدما طريقة العناصر المنتهية و أخذ القوى المؤثرة على الرفاص بعين الاعتبار وحدد الاستجابة (Response) للاهتزاز الطبيعي الحر و القسري. وفي العام 2019 قدم Senjanović [4] دراسة أثبتت أن نظام نقل الطاقة في السفينة أحد المصادر الرئيسية للاهتزازات فيها، تتميز محركات الديزل البحرية الحديثة المثبتة على السفن التجارية الكبيرة بشوط طويل و سرعة منخفضة وعدد قليل من الأسطوانات تتميز هذه المحركات بكفاءتها الجيدة في استهلاك الوقود و مع ذلك و برغم إنتاجها للطاقة العالية فإنها تنتج قوى اهتزازية تكون عالية نسبيا إضافة لذلك تتداخل أطيايف الترددات لهذه القوى مع الترددات الطبيعية لبطن السفينة إضافة للاهتزازات الناتجة عن الرفاص بسبب الدوران الغير المنتظم مما يؤدي إلى اهتزازات غاية في الشدة. في العام 2021 Maria et al [16] نشر مقالة تحدثت عن محاكاة حركة السفينة في الأمواج و كيفية التفاعل بين نظام الدفع و الرفاص كان الهدف منها تطوير جهاز محاكاة يسمح

بتحليل الديناميك الحراري للمحرك الرئيسي في ظروف بحرية مختلفة و أيضا في حال عدم الاستقرار الديناميكي للبدن و كيفية الاستثمار الصحيح لمكونات محطة الدفع، تم في هذا البحث التحقق من قدرة النمذجة على محاكاة تأثيرات عدم الاستقرار الديناميكي للبدن على محطة الدفع. في العام ٢٠٢٢ B. Iasi et al [17] قام بنمذجة نظام الدفع على أنه نظام غير خطي باستخدام برنامج Ansys حيث حدد القوى المحرصة للاهتزاز ووضع خوارزمية من عدة خطوات لنمذجة وتحليل نظام الدفع باستخدام الطرق الرقمية وتوصل لرسم أنماط الاهتزاز عند قيم مختلفة للتردد واستنتج أن الطريقة الرقمية لها نتائج جيدة مقارنة بالطرق التحليلية كطريقة Rayleigh Method.

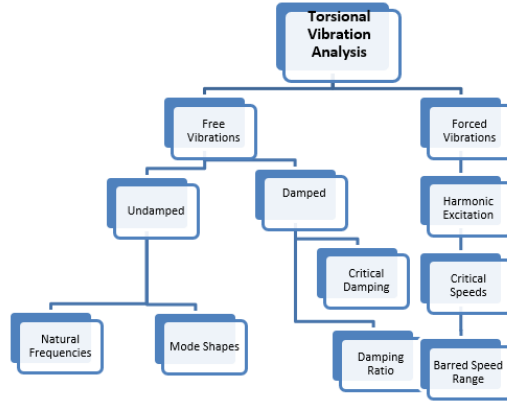
٢. أهداف البحث

- تصميم منظومة دفع بحرية لسفينة تجارية حقيقية باستخدام برنامج الـ SolidWorks.
- تحليل ومحاكاة اهتزازات الفتل لهذه المنظومة باستخدام نفس البرنامج.
- التنبؤ بأنماط الاهتزاز عند شروط عمل مختلفة لسرعة الدوران كتابع للزمن.
- مقارنة نتائج SolidWorks مع نتائج الطرق التحليلية في المرجع [4].

٣. منهجية ومواد البحث

تم في البداية الحصول على الأبعاد الحقيقية (الرسم الهندسي) لمحطة دفع السفينة المراد تحليل اهتزازاتها والموضح في (الشكل ٢) [15]، ومن ثم تم تصميم هذه المنظومة بشكل ثلاثي الابعاد باستخدام برنامج SolidWorks ، ليتم الحصول على نموذج حقيقي لمحطة الدفع والموضح في الشكل ٣(٣). تم استخراج جميع القيم والخصائص الهندسية لهذا النموذج كعزوم العطالة والتخميد والصلابة..... إلخ. بعد تطبيق المادة الحقيقية التي صنع منها العنصر، تم بعدها تحميل النظام بالقوى والعزوم الخارجية المؤثرة عليه، بعدها تم اختيار وتصميم الشبكة المثالية لتقسيم النظام، عندها تبدأ عملية المحاكاة والحصول على

النتائج المطلوبة ليصار الى تحليلها ومقارنتها ومعايرتها. يوضح الشكل ١ المراحل التي يمر بها تحليل اهتزازات الفتل وفقا لأنواعها من حيث القوى المحرصة لها، حيث أن تحليل



الشكل ١: مخطط مراحل تحليل الاهتزازات [18].

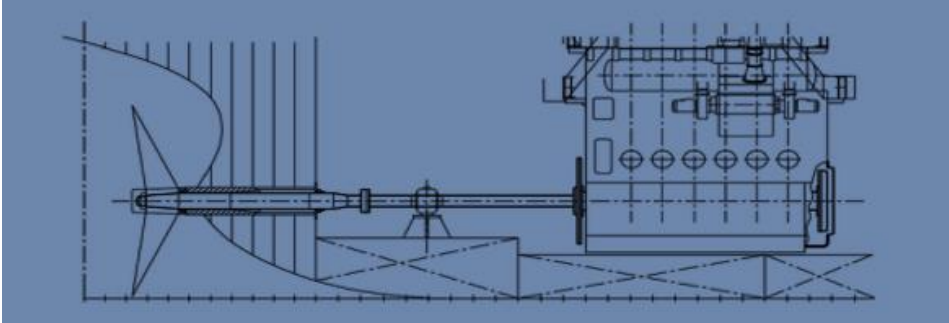
الاهتزازات القسرية يوصل لتحديد السرعة الحرجة التي يحدث عندها الطنين وبالتالي تحديد مجال السرعة الحرج (BSR Barred Speed Range) الذي يتوجب المرور به بأقصر زمن ممكن، أما تحليل الاهتزازات الحرة فله شكلين إما أن يكون مخمداً نحصل من خلاله على نسبة التخميد الحرجة، أو أن يكون غير مخمد نحصل من خلاله على الترددات الطبيعية وأنماط الاهتزاز.

٤. نمذجة محطة الدفع لسفينة حاويات

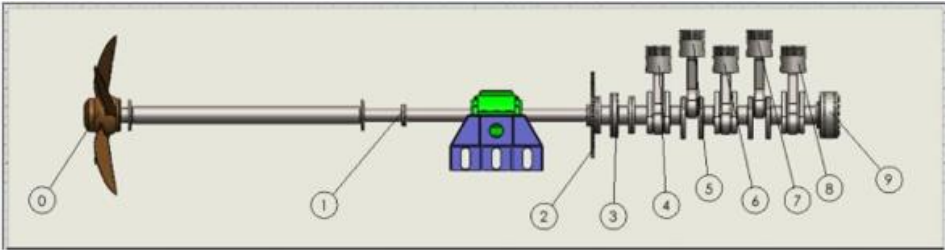
٤.١. الخصائص الهندسية والديناميكية لنظام الدفع

تم تصميم محطة الدفع الموضحة في الشكل ٢ (٢) [15] باستخدام برنامج (SolidWorks) وتم الحصول عليها بشكل ثلاثي الأبعاد كما هو موضح في الشكل ٣ (٣) ثم الحصول على جميع البارامترات اللازمة للحسابات والموضحة في الجدول ١ من خلال برنامج (SolidWorks) بعد تطبيق المادة المصنوع منها كل عنصر من عناصر المنظومة وهي المواد الشائعة في التصنيع كما هو موضح في العمود الثالث من الجدول

١ ثم تم تحميل القوى والعزوم الخارجية المحرصة للاهتزاز لكل من المحرك والرفاص (Engine and Propeller excitation) الموضحة في الجدول ٢ التي تم الحصول عليها من المخططات [15] [19] وكذلك عزوم العطالة والتخميد من الجدول ١ والمحسوبة باستخدام البرنامج والموافقة لسرعات تشغيل مختلفة. وتم في الخطوة التالية تصميم الشبكة المناسبة لإجراء الدراسة.



الشكل ٢: الرسم الهندسي لنظام الدفع لسفينة حاويات حقيقية [15].



الشكل ٣: نظام الدفع للسفينة المدروسة بعد تصميمه باستخدام SolidWorks.

دراسة وتحليل الاستجابة الاهتزازية لعمود نقل القدرة الخاص بسفينة حاويات حقيقية

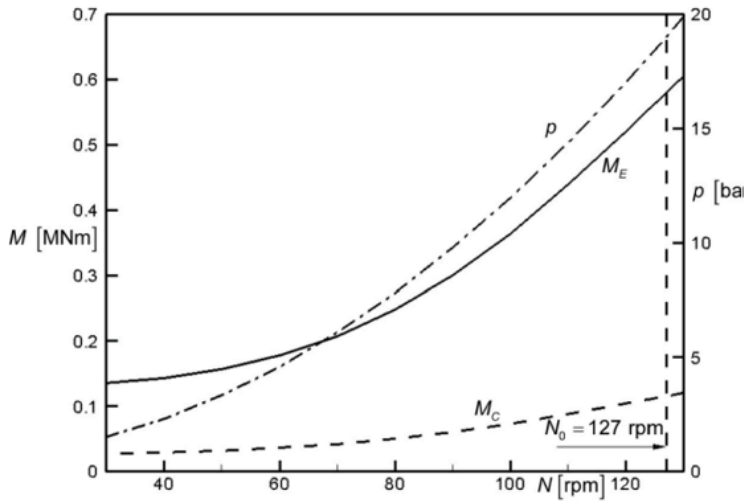
الجدول ١: الخصائص الهندسية والديناميكية لنظام الدفع.

	Designation	Material	Weight(Kg)	Length of shaft segment L(m)	Shaft diameter D(mm)	Shaft cross-section polar moment of inertia I _p (mm ⁴)	Polar moment of inertia of lumped mass J _L (Kg·m ²)	Magnification factor of	Damping ratio γ
0	Propeller	AluminumBronze	80.37	-	-	-	17510	10	0.05
1	Flange	1023CarbonSteel	97.62	8.050	423	0.003143	153	=	0
2	Turning Wheel	1023CarbonSteel	44.09	6.470	350	0.001473	1723	100	0.005
3	Camshaft Drive	1023CarbonSteel	54.67	1.690	655	0.01814	2243	60	0.0083
4	Cylinder	1023CarbonSteel	27.32	1.587	655	0.01814	4100	60	0.0083
5	Cylinder	1023CarbonSteel	27.32	2.034	655	0.01814	4100	60	0.0083
6	Cylinder	1023CarbonSteel	27.32	2.183	655	0.01814	4100	60	0.0083
7	Cylinder	1023CarbonSteel	27.32	2.164	655	0.01814	4100	60	0.0083
8	Cylinder	1023CarbonSteel	27.32	2.135	655	0.01814	4100	60	0.0083
9	Turning Wheel	1023CarbonSteel	56.42	1.827	655	0.01814	7377	100	0.005

تم تحميل المنظومة بكافة القوى والعزوم التي تؤثر عليها وهي عزم المحرك وعزوم التخميد والعطالة وقوى ضغط الغاز وعزم الدفع من الرافص كما هو موضح في الشكل ٤ (٤) . عزوم العطالة والتخميد تحسب من خلال (SolidWorks) وعزم المحرك عند كل سرعة دوران يؤخذ من (الشكل ٥) والمأخوذ من الدراسة المرجعية [15].



الشكل ٤: توزيع القوى والعزوم المؤثرة على نظام الدفع.



الشكل ٥: عزم المحرك المقابل لسرعة الدوران [15].

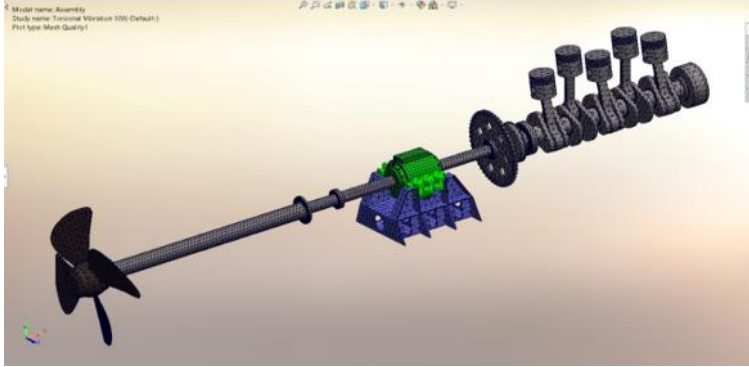
يعرض الجدول (٢) قيم عزوم المحرك عند سرعات دوران مختلفة وقيم اجهاد الفتل (τ) الموافقة لها والمحسوبة بالطرق التحليلية في الدراسة المرجعية [15] والتي ستتم مقارنتها لاحقا مع قيم اجهاد الفتل المحسوب عند نفس سرع الدوران الموافقة باستخدام (SolidWorks). يلاحظ أن الاجهاد الاعظمي يحدث عند السرعة (63 rpm) لأنها سرعة حرجة يحدث عندها حالة طنين يؤدي لساعات اهتزاز كبيرة وإجهادات فتل بقيم كبيرة.

الجدول ٢: قيم عزم المحرك المؤثر على نظام الدفع والإجهاد الناتج عنه عند سرعات مختلفة.

الحالة	N(rpm)	$M_E(\text{MNm})$	$\tau [N/m^2]$
١	٤٠	٠,١٦	١٥
٢	٦٣	٠,١٩	١٢٠
٣	٨٠	٠,٢٥	٢٠
٤	١٠٠	٠,٣٥	١٢

٤,٢ . الشبكة الرقمية

الشبكة الرقمية التي تم استخدامها موضحة في (الشكل ٦) هي الشبكة الغير منتظمة وهي الشبكة الافتراضية في البرنامج، تم استخدام (١٣٠ ألف) خلية حسابية تقريباً. البارامترات الأساسية المميزة للشبكة الرقمية التي يتم استخدامها موضحة في الجدول ٣.



الشكل ٦: الشبكة الرقمية التي تم بناؤها لنظام الدفع.

الجدول ٣: خصائص الشبكة.

Mesh type	Solid Mesh
Mesher used:	Standard mesh
Element Size	43.5469 mm
Mesh Quality	High
Total Nodes	227159
Total Elements	126231

٥. طريقة العناصر المنتهية

هناك العديد من التطبيقات لطريقة العناصر المنتهية، وأغلبها تتعلق بالهندسة الميكانيكية حيث تستخدم هذه الطريقة ضمن عملية تصميم وتطوير المنتجات المختلفة تعتمد هذه الطريقة على تقسيم الجسم المدروس الى مجموعة من العناصر المتناهية في الصغر (Elements) متصلة مع بعضها البعض بعقد (Nodes) تقوم بعض برامج حساب العناصر المنتهية الحديثة بدراسة وحساب الاجهادات والانفعالات والتشوهات والحرارة

والمغناطيسية الكهربائية وتدفق السوائل... إلخ. لحل أي مسألة باستخدام طريقة العناصر المنتهية يجب اتباع الخطوات التالية [20]:

- تعريف مقتضيات الحساب باستخدام (FEM) وهي خطوة أساسية خلال الدراسة حيث يشكل النموذج المستخدم في الحسابات تمثيلاً مبسطاً للحقيقة الفيزيائية، ويجب أن يعبر بشكل صحيح عن الحالة الخاصة لسلوك الإنشاء المدروس حيث لا يوجد نموذج عام قادر على التعبير عن جميع قوانين السلوك الميكانيكي للمواد.
- صياغة المشكلة (Molding): تسمح هذه الخطوة بالتحول من المسألة الحقيقية (الإنشاء في محيط العمل أو في ظروف الاستثمار) إلى النموذج الافتراضي المناسب لإجراء النمذجة العددية المستخدمة، ومن أجل القيام بالتوصيف الصحيح للمشكلة يجب القيام بالخطوتين التاليتين:

١. إنشاء النموذج الميكانيكي الصحيح (mechanical model) والذي يتضمن كل المعلومات الخاصة بالتوصيف الميكانيكي والهندسي والتقني للمسألة المدروسة، ويشمل توصيف نوع الدراسة ستاتيكية، ديناميك، خطية، غير خطية وفيما إذا كان يمكن تمثيل سلوك الإنشاء بجائز، صفيحة، مسألة مستوية ثنائية البعد، أو حجمية ثلاثية البعد، كما يشمل التوصيف توضيح الشكل الهندسي للإنشاء ويجب أن يتوافق ذلك مع نوع سلوك المادة المستخدم، وأيضاً توصيف علاقة الإنشاء المدروس بالوسط المحيط به، ويمثل ذلك بالشروط الحدية (conditions Boundary) بما فيها نقاط الاستناد والحمولات المؤثرة. يتضمن التوصيف أيضاً تحديد الخصائص الميكانيكية للمادة (معامل يونغ، معامل بواسون، حد الخضوع، الكتلة الحجمية...) وبمعنى آخر جميع المقادير الضرورية لتوصيف السلوك الميكانيكي للمادة. وتتطلب هذه التوصيفات المختلفة استخدام العديد من الفرضيات.

٢. تقسيم النموذج الى عناصر بعد الاختيار الدقيق لشكل عنصر التقسيم بحيث نحصل على شبكة مناسبة لحل المشكلة المدروسة.

– حل المسألة (Solution): بعد أن يتم اختيار النموذج الميكانيكي، ونموذج التحليل بشكل دقيق. يتم البدء بعملية الحل وهنا يجب متابعة ومراقبة الحل لأنه من الممكن أن تظهر مشاكل ترتبط بشكل عام بعدة أخطاء منها أخطاء النمذجة الميكانيكية: مثل غياب جزئي للشروط الحدية الموافقة للإزاحات، أو نسيان أحد البارامترات، أخطاء الشبكة الرقمية: مثل استخدام عناصر تقسيم لا تحقق الشروط الهندسية المطلوبة أو اختيار سيئ لأبعاد الشبكة.

– إظهار وتحليل النتائج: بعد الانتهاء من حسابات الـ (FEM) والحصول على الحلول الرقمية لا بد من عرضها بطريقة واضحة تساعد المستخدم على قراءة النتائج بسهولة، واستنباط المعلومات التي تتيح فهم الخصائص الفيزيائية المختلفة والمترتبة بالمشكلة المدروسة، تتضمن برامج الـ (FEA) التجارية أدوات عرض محتواه ضمن واجهات المستخدم الرسومية والتي تسمح بعرض نتائج التحليل الرقمي على شكل مخططات لونية. بالإضافة إلى ذلك، توجد أيضاً تطبيقات حاسوبية مستقلة يمكن استخدامها لنفس الغرض، وأغلبية هذه التطبيقات تعمل على كافة أنظمة الحواسيب [20].

٦. التحليل باستخدام العناصر المنتهية FEA المستخدم في برنامج SolidWorks

FEA هي تقنية عددية تستخدم لحل المشكلات الفيزيائية المعقدة، مثل تحليل الإجهاد في الهياكل. تتضمن الطريقة تقسيم المسألة إلى عدد محدود من المشكلات الأصغر (الأسهل) المعروفة باسم العناصر ثم دمج استجابات دالة الشكل للعناصر لتقدير استجابة المشكلة. يستخدم FEA سلسلة من النماذج الرياضية لمحاكاة الاستجابة أو السلوك الذي سيكون لجزء أو مجموعة من الأجزاء تحت مجموعة محددة مسبقاً من الشروط. يمكن استخدام طريقة العناصر المحدودة لحل أي من معادلات ميكانيكا الاستمرارية الهندسية، بما في ذلك تدفق السوائل والصوتيات والكهرومغناطيسية، ولكنها تستخدم بشكل شائع لحل معادلات الإجهاد والانفعال. يدعم تحليل العناصر المحدودة المتقدم (FEA) خدمات النمذجة وتطوير المنتج ومحاكاة ظروف الخدمة وتحسين التصميم والتنبؤ بالكفاءة والموثوقية للخدمة وتحليل

التعب. يستخدم (FEA) الجبر الخطي للتعبير عن سلوك العناصر باستخدام المصفوفات. على سبيل المثال، تقيس مصفوفة الصلابة مقاومة العنصر للتشوه بسبب الحمل. والعلاقة بين الإزاحات والقوى في الهيكل مصممة كنظام من المعادلات الخطية ذات المعاملات الحركية غير المعروفة (الإزاحات) [21].

٦,١. المعادلة الخاصة المستخدمة في تحليل اهتزازات الفتل باستخدام العناصر المنتهية

$$[T]=[K]*[\theta] \quad (١)$$

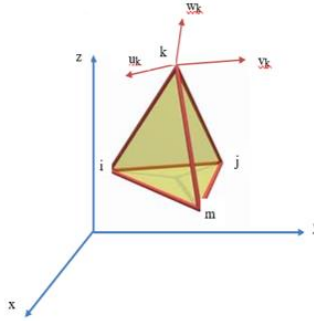
حيث T شعاع العزوم في العقد، k مصفوفة الصلابة، θ شعاع زوايا الفتل في العقد. حيث

$$[T]=\begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \\ T_{1z} \\ \dots \\ T_{nx} \\ T_{ny} \\ T_{nz} \end{bmatrix} \quad [\theta] = \begin{bmatrix} \theta_{1X} \\ \theta_{1Y} \\ \theta_{1Z} \\ \dots \\ \theta_{nX} \\ \theta_{nY} \\ \theta_{nZ} \end{bmatrix}$$

حيث $\theta_X, \theta_Y, \theta_Z$ زوايا الفتل على طول المحاور الاحداثية، T_x, T_y, T_z العزوم المؤثرة وفق اتجاه المحاور الاحداثية.

٦,٢. بناء معادلة العنصر بعد عملية التقسيم لحساب الإزاحة والانفعال والاجهاد

لنفترض تقسيم محطة الدفع (الشكل ٦) لعناصر على شكل هرمي رباعي الوجوه كما في (الشكل ٧) فينتج (٤) عقد هي (i, m, j, k) تحد هذا العنصر. بشكل عام، يحتوي كل عنصر على ٣ مكونات إزاحة دورانية تم تعيينه بواسطة $\theta_x(x, y, z)$ ، $\theta_y(x, y, z)$ ، $\theta_z(x, y, z)$ (على طول x, y, z) على التوالي. ترتبط مكونات الإزاحة مع بعضها في العقد بالبارامترات (U, V, W) [21].



الشكل ٧: شكل عنصر التقسيم [20].

تبدأ عملية استنتاج المعادلة بالتعبير عن عنصر الإزاحة ومكوناته كما يلي:

$$\{\Theta(x, y, z)\} = \begin{Bmatrix} \Theta_x(x, y, z) \\ \Theta_y(x, y, z) \\ \Theta_z(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U(x, y, z) \\ V(x, y, z) \\ W(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

حيث $\Theta(x, y, z)$ ، $V(x, y, z)$ ، $W(x, y, z)$ مكونات الإزاحة للعنصر على طول المحاور الاحداثية. قد يعبر أيضاً عن إزاحة العنصر $\{\Theta(x, y, z)\}$ من حيث المكونات في العقدة المرتبطة بها من خلال تابع الاستيفاء interpolation function $[N(x, y, z)]$ كما هو مبين في المعادلة (٣):

$$\{\Theta(x, y, z)\} = \begin{Bmatrix} \Theta_x(x, y, z) \\ \Theta_y(x, y, z) \\ \Theta_z(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N(x, y, z)]\{\theta\} \quad (3)$$

مكونات الإزاحة $\{\theta\}$ في (الشكل ٧) لجميع العقد ٤ في العنصر رباعي الوجوه هي:

$$\begin{aligned}\{\theta\}^T &= \{u_i \ v_i \ w_i\} \text{ for Node } i, \\ &= \{u_j \ v_j \ w_j\} \text{ for Node } j, \\ &= \{u_k \ v_k \ w_k\} \text{ for Node } k \\ &= \{u_m \ v_m \ w_m\} \text{ for Node } m\end{aligned}\quad (٤)$$

هذه الإزاحات العقدية في العقد هي قيم نقطية ذات أعداد حقيقية. وبالتالي فإن العدد الإجمالي لمكونات الإزاحة للعقد الأربع لعنصر رباعي السطوح في الشكل ٧ يساوي ١٢، على النحو المعبر عنه في شكل المصفوفة التالي:

$$\{\theta\}^T = \{u_i \ v_i \ w_i \ u_j \ v_j \ w_j \ u_k \ v_k \ w_k \ u_m \ v_m \ w_m\} \quad (٥)$$

وبالتالي يمكننا أن نعبر عن إزاحة العنصر في العنصر رباعي الوجوه في الشكل ٧ من حيث إزاحة للعقد الأربعة بالتعبير المستمر التالي:

$$\begin{aligned}\{\Theta(x, y, z)\} &= \begin{Bmatrix} \Theta_x(x, y, z) \\ \Theta_y(x, y, z) \\ \Theta_z(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N(x, y, z)]\{\theta\} \\ &= \{N_i(x, y, z) \ N_j(x, y, z) \ N_k(x, y, z) \ N_m(x, y, z)\}(\theta)\end{aligned}\quad (٦)$$

أو بشكل موجز كما يلي:

$$\{\Theta(x, y, z)\} = \{N_i \theta_i \ N_j \theta_j \ N_k \theta_k \ N_m \theta_m\} \quad (٧)$$

حيث N_m, N_i, N_j, N_k مكونات وظيفة الاستيفاء المرتبطة مع العقد i, j, k, m في الشكل ٧ على التوالي.

سنقوم بعد ذلك باشتقاق التعبير عن الانفعال ϵ في العنصر من خلال علاقته بالإزاحة العقدية u فنحصل على:

$$\{\varepsilon(x, y, z)\} = [B(x, y, z)]\{u\} \quad (٨)$$

حيث المصفوفة B تعطى بالشكل:

$$[B(x, y, z)] = [D][N(x, y, z)] \quad (٩)$$

المصفوفة $[B(x, y, z)]$ يمكن الحصول عليها باشتقاق المصفوفة $[N(x, y, z)]$ بالنسبة لـ X, Y, Z على التوالي. المصفوفة $[D]$ تعطى بالشكل التالي [21]:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

يحسب الاجهاد بدلالة الازاحة العقدية بالعلاقة:

$$\{\sigma(x, y, z)\} = [C][B(x, y, z)]\{u\} \quad (١٠)$$

حيث المصفوفة C مصفوفة **ثوابت المادة** وتعطى بالعلاقة:

[C]

$$= \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix}$$

وأخيراً، يتم الحصول على التعبير عن طاقة الإجهاد في العنصر المشوه من المعادلة التالية لطاقة الإجهاد للعنصر المشوه:

$$U(\{u\}) = \frac{1}{2} \int_v \{u\}^T [B(x, y, z)]^T [C] [B(x \cdot y \cdot z)] \{u\} dv \quad (11)$$

وأخيراً نتلخص الإجراءات العامة للتحليل بالعناصر المحدودة بما يلي: بناء النموذج الهندسي، تحديد خصائص المادة، إنشاء شبكة عناصر محدودة، تطبيق الأحمال والشروط الحدية، تحديد نوع التحليل ونوع الدراسة، استعراض وتقييم النتائج.

٧. النتائج والمناقشة

تم في هذا البحث حساب الترددات الطبيعية الخمسة الأولى الموضحة في (الجدول) وكذلك حساب إجهاد الفتل على طول منظومة الدفع ورسم مخطط سرعة الاهتزاز باستخدام (SolidWorks) ومقارنة النتائج مع نتائج الطرق التحليلية في الدراسة المرجعية [4] والدراسة المرجعية [22] وتظهر مقارنة قيم الترددات الطبيعية الأولى والثاني^١ في (ونلاحظ التقارب الى حد ما عند التردد الطبيعي الأول والتفاوت في القيمة الى حد بعيد للطرق الثلاثة الأولى عن طريقة (HOLZER) والطريقة الرقمية باستخدام (SolidWorks) عند التردد الطبيعي الثاني ويعود ذلك لاختلاف الطريقة التي تتوزع بها الكتل حول محور الدوران بكلا الطريقتين والذي يظهر أثره مع ازدياد قيمة التردد ونرجح

^١ لم يتم مقارنة باقي الترددات لعدم توافرها بالدراسة المرجعية.

دقة النتائج مع زيادة عدد التقسيمات كون طريقة HOLZER تعتمد على تقسيم المنظومة لعدد كبير جداً من المقاطع بشكل يشابه الطرق الرقمية التي تقسم النظام لعدد كبير جداً من العناصر المتناهية الصغر.

الجدول ٤: الترددات الطبيعية الخمسة الأولى باستخدام SolidWorks.

Study name: Frequency 1			
Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	53.397	8.4984	0.11767
2	61.89	9.8501	0.10152
3	100.11	15.933	0.062763
4	100.2	15.947	0.062709
5	102.73	16.35	0.061163

الجدول ٥: مقارنة الترددات الطبيعية الأول والثاني.

NO	method	$\omega 1[hz]$	$\omega 2[hz]$
١	Tow-mass	٥,٢٥٠	١٩,٢٧١
٢	Three-mass	٥,١٦٧	١٩,١١
٣	Multi-mass	٥,٣٣٩	١٩,٢٢٢
٤	HOLZER	٧,٧٢١	٨,٩١١
٥	SolidWorks	٨,٤٩٨٤	٩,٨٥٠١

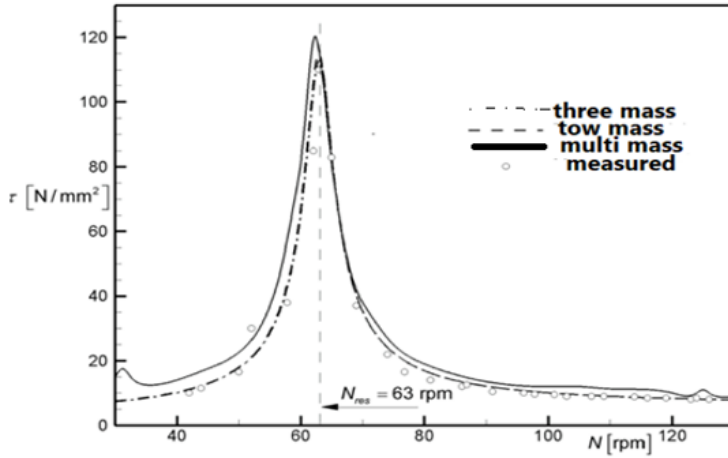
يلاحظ السهولة في الحصول على العدد اللازم من الترددات باستخدام (SolidWorks) مقاسةً بمختلف الواحدات مقارنة بالصعوبة الكبيرة بإيجاد عدد كبير من الترددات بالطرق التحليلية المذكورة في المرجع [4].

كذلك تم حساب إجهاد الفتل الأعظمي عند سرعات دوران مختلفة كما يعرض

الجدول ٤ يلاحظ من الجدول تقارب القيم كلما زاد عدد التقسيمات والمقاطع المكافئة لمحطة الدفع في الطريقة المستخدمة وهذا يعني التشابه الكبير بين النموذج الافتراضي ومحطة الدفع الحقيقية مع زيادة عدد التقسيمات (العناصر) الممثلة لها مما يؤيد اعتماد التحليل والمحاكات باستخدام (SolidWorks). توضح الأشكال ١٢-٩ قيم إجهاد الفتل الاعظمي

τ الذي تتعرض له منظومة الدفع عند سرعة الدوران الموافقة والذي تم حسابة باستخدام SolidWorks حيث يبلغ قيمته الاعظمية عند سرعة دوران ٦٣ وهي سرعة الدوران الحرجة التي يحدث عندها الطنين مما يؤدي لزيادة سعة الاهتزاز لمستويات غير مقبولة. قيم τ للطرق التحليلية الموجودة في

الجدول ٤ : أخذت من (الشكل ٨).



الشكل ٨: قيم الاجهاد τ كتابع لسرعة الدوران [4].

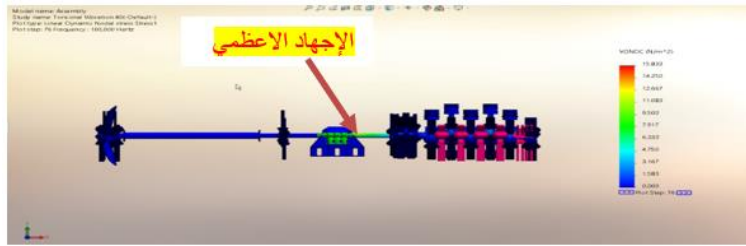
نستطيع باستخدام SolidWorks تحديد الاجهاد وسرعة وتسارع ومطال الاهتزاز عند كل عقدة وفي أي مكان على طول محطة الدفع وهو ما يحتاج للكثير من الوقت والجهد باستخدام الطرق التحليلية وكذلك تحديد المنطقة التي تتعرض لأقصى إجهاد بكل سهولة وذلك بالبحث عن اللون الأحمر على امتداد النموذج بينما بالطرق التحليلية نحن بحاجة لرسم أنماط الاهتزاز وتخمين أن الكتلة التي تهتز أكبر ما يمكن ستتعرض لأقصى إجهاد، وبالتالي يمكن تحديد العمر الافتراضي وعدد ساعات العمل قبل الصيانة وكذلك دراسة ونمذجة الحلول المقترحة وتأثيرها على الأداء العام للمحطة بكل سهولة وهو الأمر الغير ممكن التحقيق لولا النمذجة الرقمية.

الجدول ٤: مقارنة إجهاد الفتل الأعظمي عند سرعات دوران مختلفة

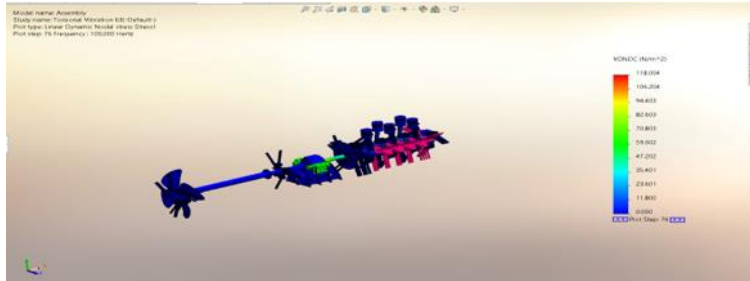
دراسة وتحليل الاستجابة الاهتزازية لعمود نقل القدرة الخاص بسفينة حاويات حقيقية

الحالة	N [rpm]	M _E [MN.m]	τ [N/ mm ²] Tow- mass	τ [N/ mm ²] Three- mass	τ [N/ mm ²] Multi-mass	τ [N/mm ²] SolidWorks
١	٤٠	٠,١٦	١٥	١٥,٢	١٥,٧	١٥,٨٣٣
٢	٦٣	٠,١٩	١١٦	١١٧	١١٨	١١٨,٠٠٤
٣	٨٠	٠,٢٥	١٨	١٨,٥	٢٠	١٩,٢٧٧
٤	١٠٠	٠,٣٥	١٣	١٢,٥	١٣,٥	١٣,٨٠٥

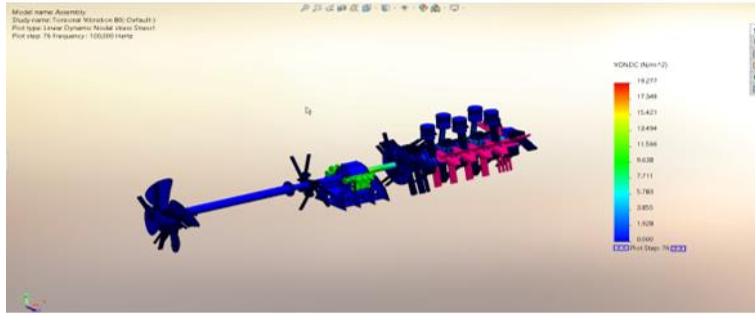
مثلا عند السرعة 40 rpm يبلغ إجهاد الفتل ذروته في الأجزاء الداخلية للعمود المتوسط، واللون الأزرق يعني أن الإجهاد ضمن الحدود الطبيعية للمادة المطبقة للعنصر المدروس.



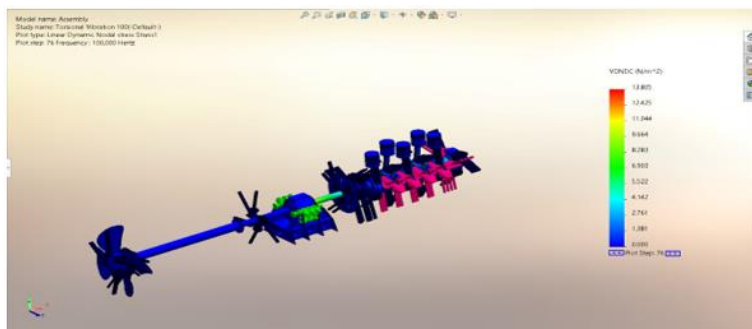
الشكل ٩: قيم الاجهاد عند السرعة ٤٠ دورة في الدقيقة.



الشكل ١٠: قيم الاجهاد عند السرعة ٦٣ دورة في الدقيقة.

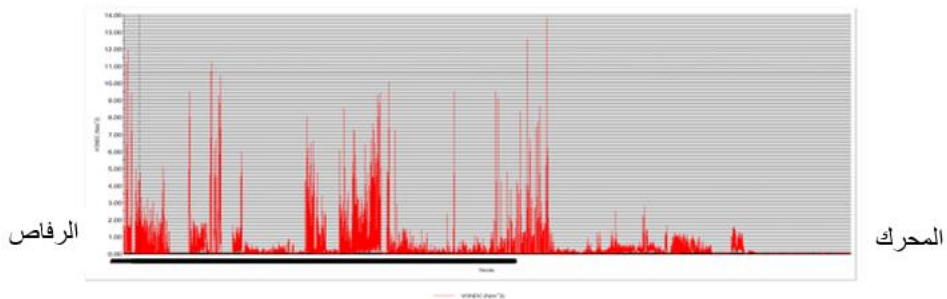


الشكل ١١: قيم الاجهاد عند السرعة ٨٠ دورة في الدقيقة.



الشكل ١٢: قيم الاجهاد عند السرعة ١٠٠ دورة في الدقيقة.

كذلك يمكن التعبير عن قيم الاجهاد بشكل أدق كما في الشكل ١٣ الشكل ١٠ على طول محطة الدفع، يوضح الشكل أن القيمة الاعظمية للإجهاد عند السرعة 100 rpm تبلغ قيمتها في العمود المتوسط وتبلغ ١٣,٨ وهو ما يتوافق مع الشكل ١٢.



الشكل ١٣ : قيم إجهاد الفتل على طول محطة الدفع عند السرعة 100rpm.

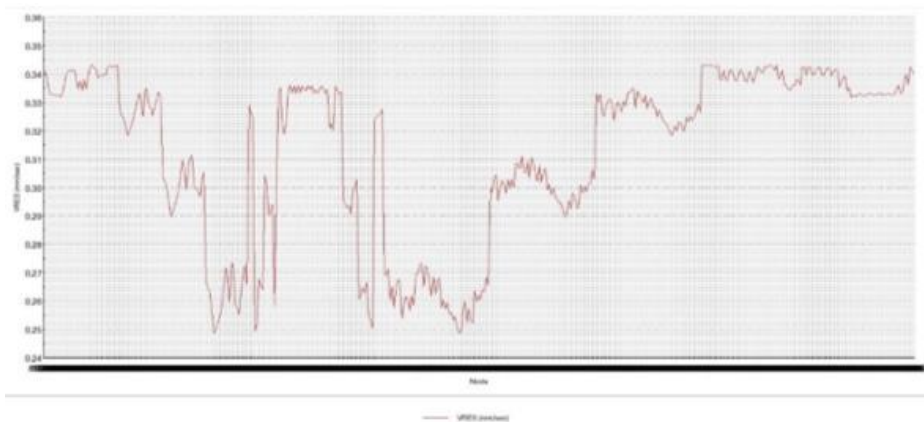
دراسة وتحليل الاستجابة الاهتزازية لعمود نقل القدرة الخاص بسفينة حاويات حقيقية

يبين الجدول 5 أقصى سعة اهتزاز في مختلف الاتجاهات x, y, z مقاسة بـ mm عند أنماط اهتزاز مختلفة.

الجدول 5: إزاحة الاهتزاز الاعظمية عند أنماط اهتزاز مختلفة.

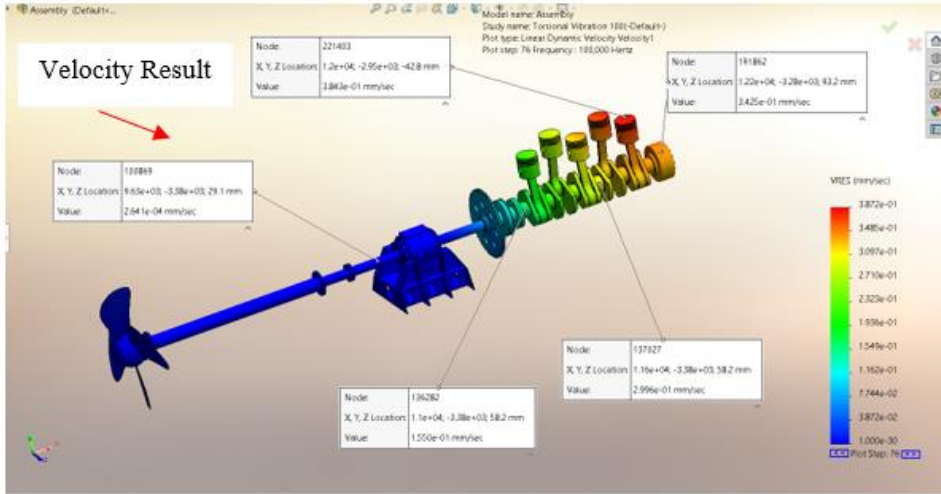
Mode Number	Frequency [Hz]	X direction	Y direction	Z direction
1	8.5254	0.00070113	0.14739	0.2906
2	9.9276	0.0010803	0.28984	0.15134
3	18.124	0.0018504	0.00018625	3.2488e-05
4	18.359	0.0017352	3.2879e-05	0.00019648

أيضا تم رسم مخطط سرعة الاهتزاز كما يبين الشكل ١٤ وهو منحنى مهم يربط سرعة الاهتزاز مقاسة بـ mm/s على المحور الشاقولي مع العقد الممثلة لطول محور الدفع على المحور الافقي وتعد سرعة الاهتزاز احدى أهم الطرق لقياس وتقييم شدة الاهتزازات التي توصي بها هيئات التصنيف. وكما هو واضح من الشكل تبلغ اعلى سرعة اهتزاز في المكابس اقصى يمين الشكل بسبب بعدها عن محور الدوران. يعرض الشكل ١٥ نتائج تحليل سرعة الاهتزاز لمنظومة الدفع حيث تم حساب سرعة الاهتزاز في نقاط مختلفة بكل سهولة



الشكل ١٤: مخطط سرعة الاهتزاز.

تعتبر سرعة الاهتزاز من أهم البارامترات التي تعطي فكرة عن الأعطال التي تتشكل في الآلة ومنشأ هذه الأعطال. من خلال الشكل ١١ يمكن قراءة سرعة الاهتزاز عند كل نقطة من نقاط محطة الدفع. ويلاحظ من الشكل أن سرعة الاهتزاز تبلغ ذروتها في الاسطوانتين الأخيرتين للنهاية الحرة لعمود الكرنك.



الشكل ١٥: سرعة الاهتزاز الحرجة.

٨. الاستنتاجات والتوصيات

٨.١. الاستنتاجات

من خلال هذا البحث يمكن الوصول إلى مجموعة من الاستنتاجات والتي يمكن تلخيصها كما التالي:

١. المحاكاة الرقمية للاهتزازات تعتبر أداة جيدة جداً من أجل تصميم واختبار الأنظمة الميكانيكية في البيئة الافتراضية، وهذا يساعد بشكل كبير في توفير الجهد والوقت والتكلفة.

٢. النتائج التي يتم الحصول عليها باستخدام برنامج الـ SolidWorks تتوافق بشكل كبير مع طريقة Holzer وذلك لأن طريقة Holzer تعتمد على تقسيم المنظومة إلى عدد كبير من المقاطع وهذا مشابه من حيث المبدأ للطريقة الرقمية (FEM) التي يستخدمها البرنامج.

٣. السهولة في الحصول على العدد اللازم من الترددات الطبيعية للمنظومة باستخدام (SolidWorks) مقاسةً بمختلف الواحدات مقارنة بالصعوبة الكبيرة بإيجاد عدد كبير من الترددات بالطرق التحليلية المذكورة في المرجع [4].

٤. يُمكننا برنامج الـ SolidWorks من اختبار الكثير من الشروط الحدية التي من الممكن أن تتعرض لها المنظومة أثناء عملها ومعرفة نتائج هذه الشروط على عمل المنظومة وهذا يساعد بشكل كبير في توقع أداء المنظومة واتخاذ الاحتياطات اللازمة لتفادي أخطار الاهتزازات من المراحل الأولى للتصميم وبالتالي زيادة عمر المنظومة وتقليل صيانتها.

٥. يجب تصميم النموذج بحيث تكون تردداته الطبيعية بعيدة إلى حد ما عن الترددات القسرية التي سيتعرض لها.

٦. العامل المؤثر على الإجهادات هو سرعة الدوران ولا تأثير لتوزع الكتلة.

٧. - تحديد المنطقة الأكثر عرضة للإجهاد والاتجاه الذي يتعرض لأكبر إزاحة.

٨.٢. التوصيات

- يوصى باستخدام برامج النمذجة الرقمية (مثل الـ SolidWorks, Ansys) في حسابات الاهتزازات للأنظمة المعقدة وذلك للدقة الإضافية التي تمنحها مقارنة بالطرق التحليلية.

- يوصى بعدم إغفال الأنواع الخاصة للقوى والعزوم التي يتعرض لها نظام الدفع وعدم اعتبارها قوى توافقية بشكل دائم.

- من الأفضل حساب قيمة العزوم المؤثرة عند قيم سرعات مختلفة ثم تطبيق العزوم على النظام وأجراء الدراسة لأن محاولة جعل البرنامج يغير السرعة ويحسب العزوم الجديدة ويطبقها على النظام ستكون عملية معقدة ضمن نفس الدراسة.

٨,٣. التوصيات للأعمال المستقبلية

- يوصى بإجراء نمذجة لنظام الدفع أثناء دوران الرافص في الماء باستخدام Simulation flow وذلك لمقارنة عطالة المياه المرافقة لشفرات الرافص بالطريقة الرقمية باستخدام SolidWorks مع العطالة المحسوبة بالطرق التقريبية لما لها من تأثير واضح على عطالة العمود ككل وبالتالي تأثير كبير على الاجهادات المرافقة لاهتزازات الفتل.
- يوصى بالبحث عن طرق وأساليب من شأنها تخفيض الاهتزازات وضبطها ومحاكاة هذه الطرق باستخدام SolidWorks .

References

- [1] L. M. Gómez-López, V. Miguel, A. Martínez, J. Coello, and A. Calatayud, "Simulation and Modeling of Single Point Incremental Forming Processes within a Solidworks Environment," *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 632–641, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.08.253.
- [2] S. Bock, "New open-source ANSYS-SolidWorks-FLAC3D geometry conversion programs," *J. Sustain. Min.*, vol. 14, no. 3, pp. 124–132, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.JSM.2015.11.002.
- [3] R. Abdallah *et al.*, "The use of SolidWorks in the evaluation of wind turbines in Palestine," *Energy Nexus*, vol. 7, p. 100135, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.NEXUS.2022.100135.
- [4] I. Glodová, T. Lipták, and J. Bocko, "Usage of Finite Element Method for Motion and Thermal Analysis of a Specific Object in SolidWorks Environment," *Procedia Eng.*, vol. 96, pp. 131–135, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.12.131.
- [5] A. Arora, A. Pathak, A. Juneja, P. Shakkarwal, and R. Kumar, "Design and analysis of multi cavity injection mould using solidworks," *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 3648–3650, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.343.
- [6] M. Feder, A. Giusti, and R. Vidoni, "An approach for automatic generation of the URDF file of modular robots from modules designed using SolidWorks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 858–864, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROCS.2022.01.283.
- [7] N. Dagar, R. Sharma, M. Lal Rinawa, S. Gupta, V. Chaudhary, and P. Gupta, "Design and analysis of piston using aluminum alloy and composites in Solidworks and Ansys," *Mater. Today Proc.*, vol. 67, pp. 784–791, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.07.318.
- [8] R. Mahakul, D. Nath Thatoi, S. Choudhury, and P. Patnaik, "Design and numerical analysis of spur gear using SolidWorks simulation technique," *Mater. Today Proc.*, vol. 41, pp. 340–346, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.09.554.

- [9] A. Arora, A. Pathak, A. Juneja, P. Shakkarwal, and R. Kumar, "Design & analysis of progressive die using SOLIDWORKS," *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 956–960, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.06.335.
- [10] K. Vardaan and P. Kumar, "Design, analysis, and optimization of thresher machine flywheel using Solidworks simulation," *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 3651–3655, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.348.
- [11] S. Mishra and A. V. Ullas, "Concept Modelling of Small Scale Device for Continuous Production of Graphene using Solidworks," *Mater. Today Proc.*, vol. 79, pp. 345–348, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.12.034.
- [12] Y. A. Batrak, A. M. Serdjuchenko, and A. I. Tarasenko, "Calculation of torsional vibration responses in propulsion shafting system caused by ice impacts," *Torsional Vib. Symp.*, no. January 2011, 2014.
- [13] L. Murawski and A. Charchalis, "Simplified method of torsional vibration calculation of marine power transmission system," vol. 39, pp. 335–349, 2014.
- [14] D. Van Doan, L. Murawski, and K. P. Techniki, "VIBRATIONS IN MARINE POWER TRANSMISSION SYSTEM," no. 100, pp. 37–50, 2017.
- [15] I. Senjanović, I. Ančić, G. Magazinović, N. Alujević, N. Vladimir, and D. S. Cho, "Validation of analytical methods for the estimation of the torsional vibrations of ship power transmission systems," *Ocean Eng.*, vol. 184, pp. 107–120, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2019.04.016.
- [16] M. Acanfora, M. Altosole, F. Balsamo, L. Micoli, and U. Campora, "Simulation Modeling of a Ship Propulsion System in Waves for Control Purposes," 2022.
- [17] B. Iasi-ro, "PARAMETRIC OPTIMIZATION AND CALCULATION OF VIBRATIONS INTRODUCED BY PROPULSION INSTALLATION," pp. 15–28, doi: 10.2478/9788395720413-002.
- [18] H. Rimstad, "Dynamic Modelling , Vibration and Fatigue Analysis of Slow Rotating Propulsion Systems," no. July, 2018.
- [19] I. Senjanović, N. Hadžić, L. Murawski, N. Vladimir, N. Alujević, and D. S. Cho, "Analytical procedures for torsional vibration analysis of ship power transmission system," *Eng. Struct.*, vol. 178, no. October 2018, pp.

227–244, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.035.

- [20] A. E. Analysis, *Introduction to Finite-element Analysis*, vol. 2018, no. Isbn 9781119071204. 2018.
- [21] J. E. Akin, “Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks,” 2009.
- [22] N. Awattef, M. Esber, M. Khnese, and A. Saleh, “Simulation of Torsion Vibration of Power Transmission Shaft in Marine Propulsion System using MATLAB,” *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 46, no. 3, 2024.