Analysis Digital Calculations Of Natural Frequencies, Vibration Patterns And Power Density Spectrum Drawing For Real Ship Propulsion Station

Alhadee Saleh*

(Received 4 / 2 / 2025. Accepted 6 / 4 / 2025)

□ ABSTRACT □

This research designed a real propulsion system for a real ship with its core components using an engineering design software that adopts digital methods and then calculates the natural frequencies of vibration and approval for external loads. The vibration patterns approved for these frequencies were also drawn and predicted the way the rotating blocks would vibrate around the rotation level in case of movement as well as the angle of the elephant was calculated along the rotor column by calculating vibratory displacement in the vertical direction on the rotation container that is determined by its comparison with the permissible values the stressful state of the power transfer column as well as the special curves of the vibratory spectrum density of both stress and inflammation cases and the identification of frequencies accompanied by maximum stress and effectiveness power as well as an algorithm has been developed as sequential steps to calculate natural frequencies and intensity patterns. The energy intensity was curved using SolidWorks, and the vibratory response to vibration acceleration was drawn at the start of takeoff in order to compare the great value with the values allowed by the BRC. The relationship between the frequency at which the system operates with the great angle of the elephant as well as the great stress has also been inferred, and recommendations have finally been made for consideration during simulation using SolidWorks and recommendations for future research work.

Keywords: torsional vibrations, ship propulsion system, solid works.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Academic Assistance, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. alhadee.saleh@tishreen.edu.sy

الحسابات الرقمية للترددات الطبيعية وأنماط الاهتزاز ورسم طيف كثافة الطاقة لمحطة دفع سفينة حقيقية

الهادي صالح *

(تاريخ الإيداع ٤ / ٢ / ٢٠٢٥. قُبِل للنشر في ٦/ ٤ / ٢٠٢٥)

□ ملخّص □

تم في هذا البحث تصميم نظام دفع حقيقي لسفينة حقيقية بمكوناته الأساسية باستخدام برنامج تصميم هندسي يعتمد الطرق الرقمية ثم حساب الترددات الطبيعية للاهتزاز والموافقة لحالة انعدام الاحمال الخارجية. وكذلك تم رسم أنماط الاهتزاز الموافقة لهذه الترددات والتنبؤ بالطريقة التي ستهتز بها الكتل الدوارة حول مستوي الدوران في حالة الحركة كذلك تم حساب زاوية الفتل على طول العمود الدوار من خلال حساب الازاحة الاهتزازية في الاتجاه العمودي على محور الدوران التي تحدد من خلال مقارنتها مع القيم المسموح بها الحالة الإجهاديه لعمود نقل القدرة وكذلك تم رسم المنحنيات الخاصة بكثافة الطيف الاهتزازي لكل من حالتي الاجهاد والانفعال وتحديد الترددات التي يرافقها أقصى طاقة إجهاديه وانفعالية وكذلك تم وضع خوارزمية على شكل خطوات متتالية لحساب الترددات الطبيعية ورسم أنماط الاهتزاز ومنحني كثافة الطاقة باستخدام برنامج SolidWorks، كذلك تم رسم الاستجابة الاهتزازية لتسارع الاهتزاز عند بداية الإقلاع بهدف مقارنة القيمة العظمى مع القيم التي تسمح بها هيئة التصنيف البولونية، كذلك تم استنتاج العلاقة بين التردد الذي يعمل عنده النظام مع زاوية الفتل العظمى وكذلك الاجهاد الاعظمي، وأخيرا تم تقديم التوصيات اللازم مراعاتها أثناء المحاكاة باستخدام SolidWorks وتقديم التوصيات للأعمال البحثية المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: الترددات الطبيعية، نظام الدفع في السفن، العناصر المنتهية،solid works .

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* قائم بالأعمال- قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية. إيميل: alhadee.saleh@tishreen.edu.sy

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 خطرا على الانسان ومنظومة الدفع معاً. إن التنبؤ بالاهتزازات ومحاكاتها قبل بناء نظام الدفع يعد امرا حيويا وهاما وكذلك مراقبة اهتزازات محطة الدفع للسفن قيد الاستثمار ضروري وذلك لتجنب تطور هذه الاهتزازات وخروجها عن السيطرة. لقد اهتم الباحثون ببرمجة الموديلات الرياضية الناظمة لنشوء وكيفية تأثير الاهتزازات نتيجة التعقيد الكبير لنظام الدفع وتعدد الأجزاء التي تعمل وتتحرك بأن معا وكذلك تعدد القوى الداخلية والخارجية التي تؤثر علية نظرا لصعوبة وقساوة البيئة التي يعمل فيها. لم تقتصر محاكاة ونمذجة الاهتزازات على الطرق التحليلية الرياضية بل استخدمت الطرق الرقمية خصوصا بعد التطور الكبير في العلوم الحاسوبية ولعل من أهم المحاكيات الرقمية هو 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) ، يمكن لمحاكاة SolidWorks أن توفر نتائج دقيقة وموثوقة لمجموعة واسعة من أنواع الدراسات من التحليل الثابت الخطي الأساسي إلى التحليل غير الخطي والديناميكي الأكثر تعقيدًا، يستخدم برنامج الـ SolidWorks بشكل واسع جدا في الأبحاث الأكاديمية التي تخص حسابات الـ FEM والنتائج التي يعطيها تعتبر موثوقة جدا في هذا المجال [10]–[3] ,[11] ,[2] ,[1]. لقد أجرى العديد من الباحثين في السنوات الخيرة بحوثاً لتحليل الاهتزازات في محطات الدفع البحرية رقمياً ففي العام٢٠١٤ 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 الاهتزاز المخمدة و الغير المخمدة 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 FEMبشكل مبسط و بتقييد لدرجات الحرية. في نفس العام [2] Germanisher قدم حلا تصميميا لمشكلة الاهتزاز الالتوائي عن طريق تثبيت مثبط اهتزاز التوائي واستخدام أجهزة مختلفة كمخمدات اهتزاز التوائية مثل المخمدات اللزجة أو مخمدات احتكاك أو مخمدات مطاطية. نادرا ما يتم تركيبها على السفن نظرا لتكاليف 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 [3]2017 Murawski Lech نشر 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 [4] Senjanović 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 أطياف الترددات لهذه القوى مع الترددات الطبيعية لبدن السفينة إضافة للاهتزازات الناتجة عن الرفاص بسبب الدوران الغير المنتظم مما يؤدي إلى اهتزازات غاية في الشدة يتم في الوقت الحاضر تحليل الاهتزازات لأنظمة دفع السفن باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM). في العام Maria et al 2021 [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 ، قدم الملامح الرئيسية لمحاكاة السفن حلول مناسبة و تم 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 انه نظام غير خطي باستخدام برنامج Ansys حيث حدد القوى المحرضة 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.

أهمية البحث وأهدافه:

١. أهداف البحث

- تصميم منظومة دفع لسفينة حقيقية بشكل ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks.
- حساب الترددات الطبيعية لمنظومة الدفع.
- رسم منحني كثافة الطاقة للطيف الاهتزازي.
- حساب زاوية الفتل على طول العمود الدوار لمنظومة الدفع.
- رسم الاستجابة الاهتزازية للتسارع أثناء الإقلاع.

٢. منهجية ومواد البحث

تم بداية الحصول على الأبعاد الحقيقية لمحطة دفع السفينة المراد إجراء الدراسة عليها، بعد ذلك تم تصميم هذه المنظومة بشكل ثلاثي الابعاد باستخدام الـ SolidWorks، بهدف الحصول على النموذج الحقيقي لمحطة الدفع، ومن ثم تم استخراج جميع القيم والخصائص الهندسية لهذا النموذج كعزوم العطالة والتخميد والصلابة..... بعد تطبيق المادة الحقيقية التي صنع منها كل عنصر، تم بعدها اختيار وتصميم الشبكة المثالية لتقسيم النظام، عندها تبدأ عملية الحساب والحصول على النتائج المطلوبة. من أجل إتمام هذه الدراسة تم استخدام كل من البرنامج الهندسي SolidWorks والمخططات التصميمية لمنظومة الدفع وكذلك معرفة دقيقة بالشروط الحدية بهدف الحصول على نتائج دقيقة وواقعية.

طرائق البحث ومواده:

لقد تم في هذا البحث استخدام الطرق والمواد التالية:

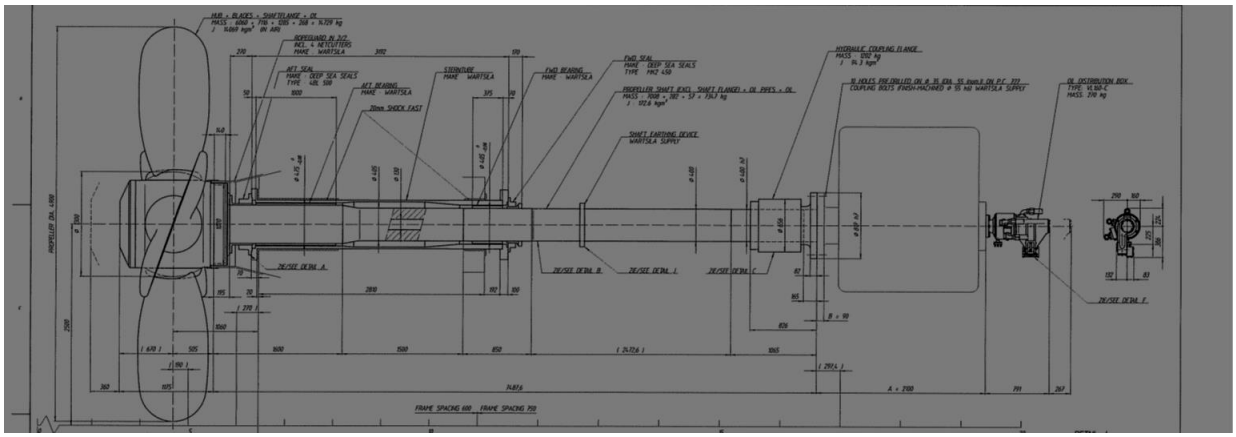
- برنامج الـ SolidWorks.

- طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method, FEM المتوفرة ضمن برنامج الـ SolidWorks.
- مخططات سفينة سورية، ومواصفات نظام الدفع الخاص بها، انظر الشكل1.
- الشبكات الرقمية الغير منتظمة.

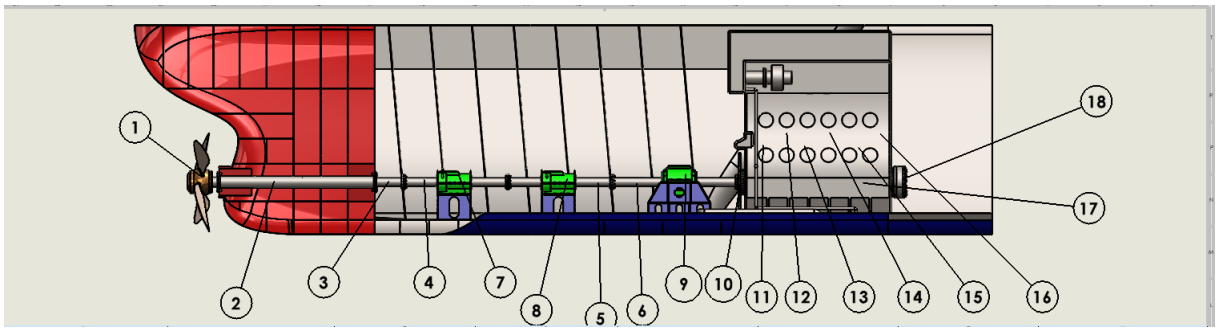
٣. نمذجة محطة الدفع لسفينة سورية

٣,١. الخصائص الهندسية والديناميكية

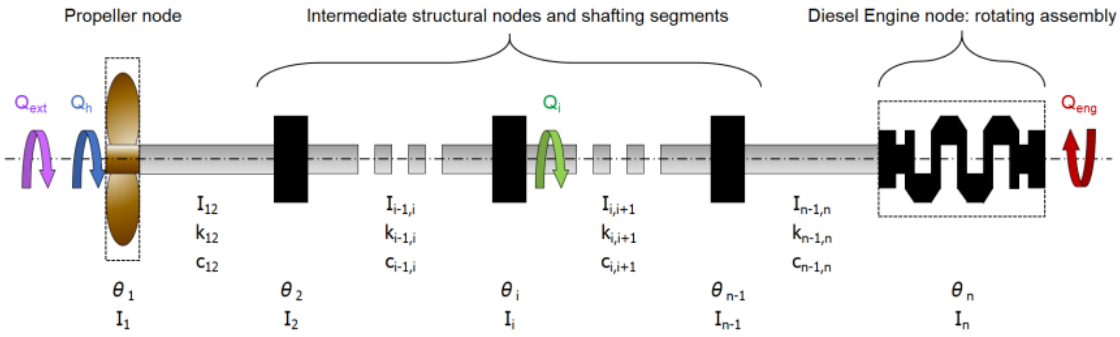
تم تصميم محطة الدفع الموضحة في الشكل1 باستخدام برنامج SolidWorks ليتم الحصول عليه بشكل ثلاثي الابعاد كما هو موضح في الشكل ٢ ثم الحصول على جميع البارامترات اللازمة للحسابات، ثم تم تحميل القوى والعزوم الخارجية المحرضة للاهتزاز لكل من المحرك والرفاص (Engine and Propeller excitation)، تعد هذه الطريقة أكثر دقة من الطرق التحليلية التي تعتمد على مبدأ الكتل المجمعة والتي تظهر في الشكل ٣.



الشكل1: الرسم الهندسي لنظام الدفع لسفينة سورية.



الشكل ٢: نظام الدفع لسفينة سورية بشكل ثلاثي الابعاد.



الشكل ٣: مبدأ الكتل المجمعة المستخدمة في الطرق التحليلية [18].

٣,٢. أنماط الاهتزاز الطبيعية

يتم تحديد الترددات الطبيعية للنظام اعتماداً على الكتلة والصلابة والتخميد. قيمة هذه الترددات تعطي فكرة عن الخصائص الديناميكية للنظام، والتنبؤ بسلوكه الحركي بعد استنتاج معادلات الحركة له، وهذا مهم جدا في المراحل المبكرة للتصميم فهي تمكننا من معرفة استجابة النظام لقوى وعزوم التحريض التي تؤثر عليه قسريا وبالتالي معرفة المناطق المعرضة لأقصى ضغط وأقصى إجهاد وإيجاد الحلول المثالية لتجنب عمل النظام عند ترددات الطنين وبالتالي خروج المنظومة عن الخدمة. يمتلك نظام الدفع عدد من الترددات الحرة (الطبيعية) مساوياً لعدد الكتل الدوارة حول محور الدوران منقوصا منه ١ وبالتالي كلما تعقد نظام الدفع واحتوى عدد أكبر من الكتل الدوارة (كعلبة سرعة مثلا) تزداد احتمالية حدوث الطنين في منطقة ما منه. كل تردد طبيعي يعطي نمط اهتزاز محدد من الممكن رسمه لمعرفة الطريقة التي ستهتز بها الكتل الدوارة حول محور الدوران. يجب أن تكون أولى الخطوات في حساب الترددات الطبيعية في برنامج SolidWorks هي إجراء عملية المعايرة وقد تمت هذه العملية في حسابات سابقة على نفس المنظومة وقد تم الحصول على نتائج رقمية لبارامترات أخرى مطابقة لنتائج الطرق التحليلية والتجريبية. [19]

لحساب الترددات الطبيعية لمنظومة الدفع لسفينة حقيقية بعد رسمها وتصميمها بشكل ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks، يجب اتباع الخوارزمية التالية:

١. نمذجة محطة الدفع في SolidWorks: إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد لمحطة الدفع بدقة في برنامج SolidWorks.

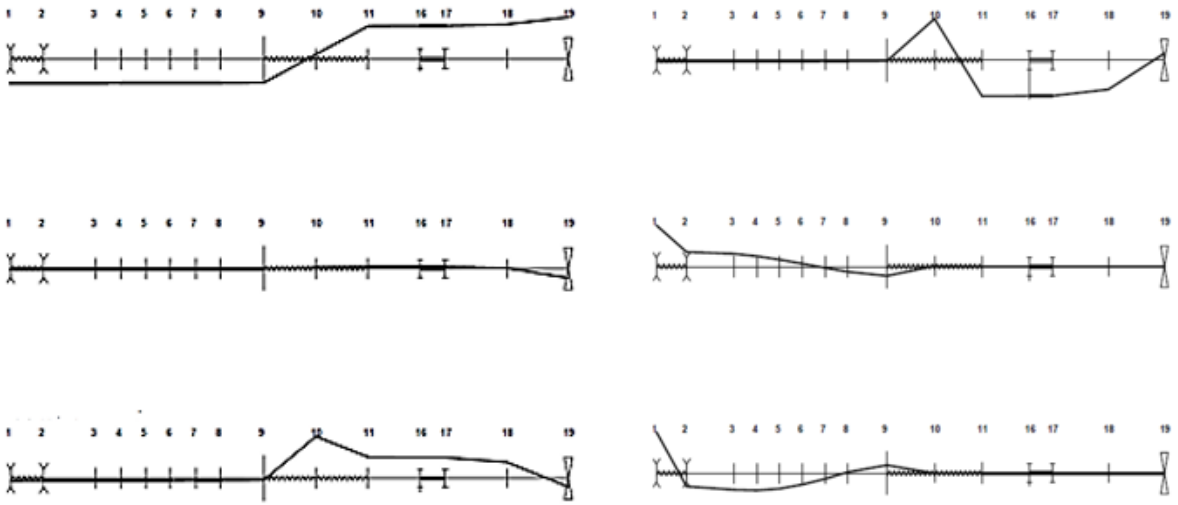
٢. تطبيق الشروط الحدية: تحديد الشروط الحدية لمنظومة الدفع على السفينة، مثل القوى المؤثرة وشروط التحميل.

٣. تحليل الترددات الطبيعية: استخدم أدوات التحليل في SolidWorks لحساب الترددات الطبيعية لمحطة الدفع يمكنك تحديد الأوضاع الطبيعية للاهتزاز وتقدير الترددات المرتبطة بها.

٤. تقييم النتائج والتحسين: بعد الحصول على النتائج وتقييمها يمكن إجراء أي تحسينات ممكنة لتحسين أداء منظومة الدفع.

٥. توثيق النتائج: توثيق النتائج والتقارير الفنية المتعلقة بحساب الترددات الطبيعية للمنظومة الدافعة.

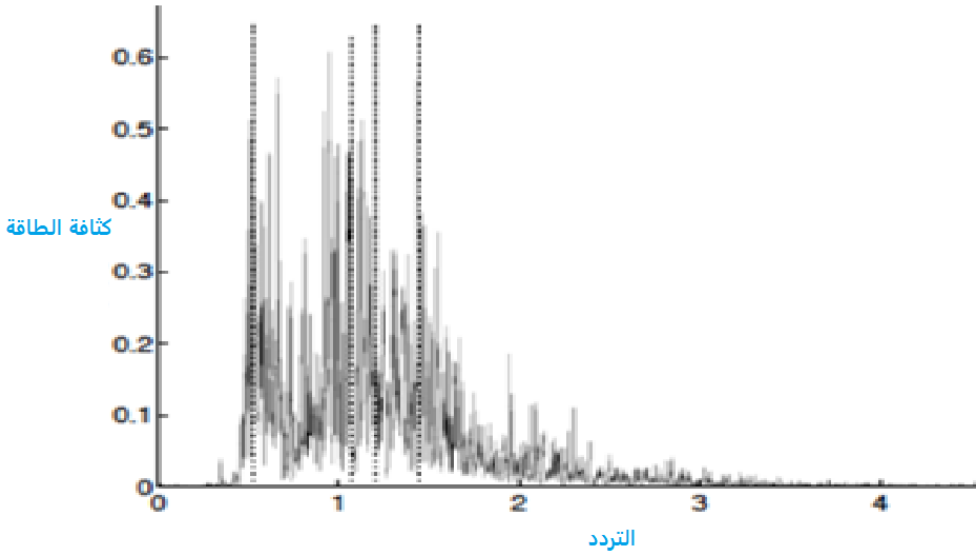
يوضح الشكل ٤ أنماط الاهتزاز لسفينة سورية عند سرعات ترددات عمل مختلفة وقد أخذت هذه الأنماط من المخططات التصميمية لمحطة دفع السفينة وتم رسمها تجريبيا من قبل المصنعين لمحطة الدفع في شركة Caterpillar / MaK الألمانية.



الشكل ٤: أنماط الاهتزاز لمحطة دفع سفينة سورية (مخططات السفينة).

٣,٣. منحني كثافة الطاقة:

يمثل كمية الطاقة المرافقة لكل تردد (طاقة إجهاد– انفعال–حرارية....) وبالتالي يمكن من خلاله تحديد كمية الطاقة في مجال تردد معين يمثل المحور الشاقولي توزع الطاقة مقابل التردد الممثل على المحور الافقي يستخدم هكذا نوع من المخططات لتحديد كمية الطاقة المرافقة لمجال ترددي معين وكيف ستتغير هذه الطاقة كتابع لسرعة الدوران.



الشكل ٥: طيف كثافة الطاقة PSD [20].

٣,٣,١. تعريف منحنى كثافة الطاقة (PSD)

منحنى كثافة الطاقة (Power Spectral Density - PSD) هو دالة رياضية تصف كيفية توزيع الطاقة أو القوة عبر ترددات مختلفة في إشارة أو نظام معين. يتم استخدام PSD لتحليل الإشارات في مجالات متعددة مثل الهندسة، الفيزياء، والعلوم الحاسوبية. يُظهر هذا المنحنى العلاقة بين الترددات المختلفة ومستوى الطاقة المرتبطة بها، مما يساعد في فهم سلوك الإشارات المعقدة [21].

تحديد منحنى كثافة طيف القدرة (PSD) لمحطة الدفع له فوائد عديدة في مجالات الهندسة والفيزياء:

١. تحليل الاهتزازات والضوضاء: يساعد PSD في تحديد مصادر الاهتزازات والضوضاء في الآلات، مما يسمح بتحسين التصميم وتقليل هذه المشكلات.

٢. تحسين الأداء: من خلال تحليل PSD، يمكن تحديد الترددات الطبيعية لمنظومة الدفع والتحكم فيها لتحسين الأداء وزيادة الكفاءة.

٣. تجنب الرنين: معرفة الترددات الطبيعية من PSD تساعد في تجنب ظاهرة الرنين التي قد تؤدي إلى تلف منظومة الدفع أو انهيارها.

٤. تحسين التصميم: تحليل PSD يوفر معلومات قيمة لمهندسي التصميم لتحسين تصميم الآلات وتقليل الاهتزازات والضوضاء.

٥.التنبؤ بالعمر الافتراضي: يمكن استخدام PSD للتنبؤ بالعمر الافتراضي للآلات من خلال تحليل الاهتزازات والإجهادات الميكانيكية.

إن تحديد منحنى PSD لمنظومة الدفع يساعد في تحسين الأداء وتقليل الاهتزازات والضوضاء، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة وموثوقية الآلات.

٣,٣,٢. أهمية PSD

تعتبر كثافة الطاقة الطيفية أداة مهمة لتحليل الإشارات لأنها توفر معلومات حول:

– توزيع الطاقة: يساعد PSD في تحديد كيف تتوزع الطاقة عبر الترددات، مما يمكن من فهم الخصائص الأساسية للإشارة.

– التعرف على الأنماط: يمكن أن تكشف الأنماط الموجودة في الإشارات عن معلومات هامة حول النظام المدروس، مثل وجود ترددات معينة قد تشير إلى ظواهر معينة.

– تقدير العمر الافتراضي: في التطبيقات الهندسية، يمكن استخدام PSD لتقدير عمر المكونات بناءً على تحليل الترددات المرتبطة بالاهتزازات أو الضغوط.

٣,٣,٣. طرق حساب PSD

هناك عدة طرق لحساب منحنى كثافة الطاقة، ومن أبرزها:

– طريقة ويلش (Welch's Method): تعتمد على تقسيم الإشارة إلى نوافذ زمنية صغيرة وحساب PSD لكل نافذة ثم تجميع النتائج للحصول على تقدير أكثر دقة.

– تحليل فورييه السريع (FFT): طريقة شائعة لتحويل الإشارة من المجال الزمني إلى المجال الترددي، مما يسهل حساب PSD.

٣,٣,٤. تطبيقات PSD

تستخدم منحنيات كثافة الطاقة في مجموعة متنوعة من التطبيقات، منها:

١. الهندسة الميكانيكية: لتحليل اهتزازات الآلات وتحديد نقاط الضعف.

٢. علوم المواد: لفهم سلوك المواد تحت الضغوط المختلفة.

٣. معالجة الإشارات: في الاتصالات لتحسين جودة الإشارة وتقليل الضوضاء.

٤. التحليل المالي: لفهم تقلبات الأسعار في الأسواق المالية.

منحنى كثافة الطاقة (PSD) هو أداة تحليلية قوية تُستخدم لفهم سلوك الإشارات عبر الترددات المختلفة. تساعد هذه الأداة في العديد من المجالات العلمية والهندسية من خلال توفير رؤى قيمة حول توزيع الطاقة، التعرف على الأنماط، وتقدير العمر الافتراضي للأنظمة.

٣,٤. زاوية الفتل

زاوية الفتل هي الزاوية الناتجة عن دوران عمود حول محوره نتيجة تطبيق عزم (Torque) يمكن حسابها باستخدام العلاقة:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{J \cdot G} \qquad (١)$$

حيث ان:

θ زاوية الفتل $[Rad]$

T العزم المؤثر $[N.m]$

L طول العمود $[m]$

J عزم القصور الذاتي للعمود $[\mathrm{m}^4]$

G معامل القص للمادة $[N/m^2]$

٣,٤,١. طريقة قياس زاوية الفتل

لقياس زاوية الفتل في الأعمدة الدوارة، هناك عدة طرق حديثة تعتمد على تقنيات متطورة توفر دقة عالية:

١ – أنظمة القياس بالليزر:

تستخدم أنظمة الليزر لقياس الزوايا بدقة عالية. يتم توجيه شعاع الليزر نحو نقطة معينة على العمود، ويتم قياس الزاوية باستخدام مستشعرات دقيقة توفر هذه الأنظمة دقة متناهية، مما يجعلها مثالية للاستخدام في التطبيقات الصناعية.

٢ – أجهزة قياس الزاوية الرقمية:

تتضمن هذه الأجهزة استخدام مستشعرات رقمية لقياس الزوايا بدقة يمكن أن تكون هذه الأجهزة محمولة أو مثبتة على الأعمدة تقدم دقة عالية وتسمح بتسجيل البيانات بشكل رقمي لتحليلها لاحقا.

٣ – آلات الاتزان المحمولة:

تستخدم آلات الاتزان المحمولة لتحديد عدم اتزان الأعمدة أثناء التشغيل تحتوي هذه الأجهزة على مجسات إزاحة مثل مقياس التسارع والخلية الضوئية توفر دقة جيدة في قياس الاهتزازات وتحديد زاوية القتل أثناء عمل العمود.

٤ – تقنية الاستشعار عن بعد:

تعتمد على استخدام أجهزة استشعار متقدمة يمكنها قياس الزوايا من مسافات بعيدة دون الحاجة للتلامس مع العمود تتيح هذه التقنية قياسات دقيقة في البيئات التي يصعب الوصول إليها.

٥– التحليل العددي والمحاكاة:

تعتمد هذه الطريقة على نمذجة الأعمدة باستخدام برامج الحاسوب المتخصصة لتحليل سلوكها تحت تأثير العزوم والاهتزازات تعتمد دقتها على جودة النموذج المستخدم والبيانات المدخلة، مما يجعلها أداة قوية في البحث والتطوير.

تواجه تقنيات قياس زاوية القتل في الأعمدة الدوارة عدة تحديات تؤثر على فعاليتها ودقتها فيما يلي أبرز هذه التحديات:

التحديات الرئيسية:

١. الدقة في القياس:

تقنيات قياس زاوية القتل قد تعاني من مشكلات تتعلق بالدقة، خاصة عند التعامل مع الأحمال المتغيرة أو الظروف البيئية القاسية. يمكن أن تؤدي الاهتزازات أو الضغوط الخارجية إلى قراءات غير دقيقة، مما يؤثر على أداء النظام بشكل عام.

٢ التعقيد في التصميم:

تتطلب الأنظمة التي تستخدم تقنيات قياس زاوية الفتل تصميمات معقدة، مما يزيد من تكلفة التصنيع والصيانة. هذا التعقيد يمكن أن يؤدي إلى صعوبات في التركيب والتشغيل، خاصة في البيئات الصناعية حيث تكون الظروف غير متوقعة.

٣. التحكم الديناميكي:

تحتاج الأنظمة إلى آليات تحكم ديناميكية فعالة لضبط زاوية الفتل بشكل مستمر عدم وجود نظام تحكم فعال يمكن أن يؤدي إلى عدم استقرار الأداء، مما يجعل من الصعب تحقيق الكفاءة المطلوبة في التطبيقات العملية.

٤. التأثيرات البيئية:

العوامل البيئية مثل درجة الحرارة والرطوبة يمكن أن تؤثر على أداء أجهزة القياس تحتاج الأنظمة إلى مواد وتقنيات مقاومة لهذه العوامل لضمان استمرارية الأداء الجيد.

٥. الكفاءة الاقتصادية:

التكلفة المرتفعة لتطوير وصيانة هذه التقنيات قد تجعلها غير مجدية اقتصادياً لبعض التطبيقات، خاصة في المشاريع ذات الميزانيات المحدودة. هذا يتطلب توازناً بين الأداء والكلفة لتحقيق جدوى اقتصادية.

التمييز بين زاوية الفتل وزاوية الاسترخاء: هما مصطلحان يُستخدمان في مجالات مختلفة، وخاصة في الهندسة والفيزياء، ولكن لهما معاني محددة في سياقات معينة [22].

زاوية القتل:

زاوية القتل تشير إلى الزاوية التي يتم عندها لف أو دوران عمود دوار حول محوره في التطبيقات الهندسية، مثل الأعمدة الدوارة في الآلات أو الهياكل تعبر زاوية الفتل عن مدى انحناء العمود تحت تأثير العزوم أو الضغوط الميكانيكية. هذه الزاوية تؤثر على أداء العمود واستقراره، وعادة ما يتم قياسها بالدرجات.

زاوية الاسترخاء:

زاوية الاسترخاء من ناحية أخرى تعبر عن الزاوية التي يعود إليها الجسم بعد إزالة القوة المؤثرة عليه في المواد المرنة، تشير زاوية الاسترخاء إلى الزاوية التي يتخذها الجسم بعد أن يتم تحريره من الضغوط أو التوتر، مما يعنى أن الجسم قد عاد إلى وضعه الأصلي أو حالة توازن جديدة.

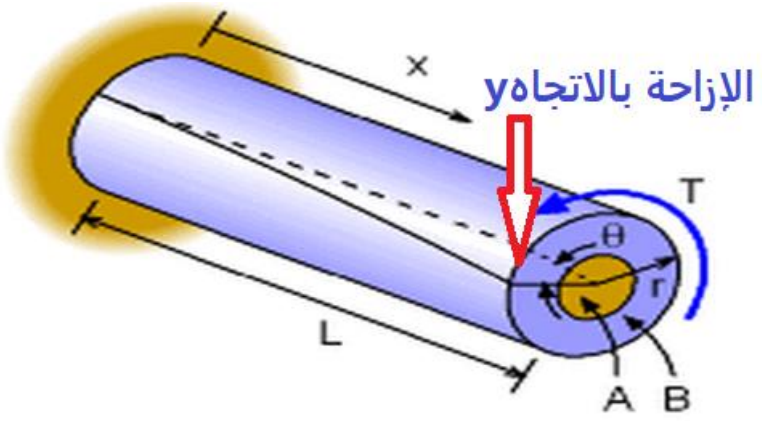
الاختلاف بينهما:

التعريف: زاوية الفتل تتعلق بالدوران تحت تأثير قوة معينة، بينما زاوية الاسترخاء تتعلق بالعودة إلى وضع التوازن بعد إزالة القوة.

زاوية الفتل تُستخدم غالبًا في سياقات ميكانيكية وهندسية، بينما زاوية الاسترخاء تستخدم في سياقات تتعلق بالمواد والفيزياء.

القياس زاوية القتل تقاس أثناء تطبيق القوة، بينما زاوية الاسترخاء تقاس بعد إزالة القوة.

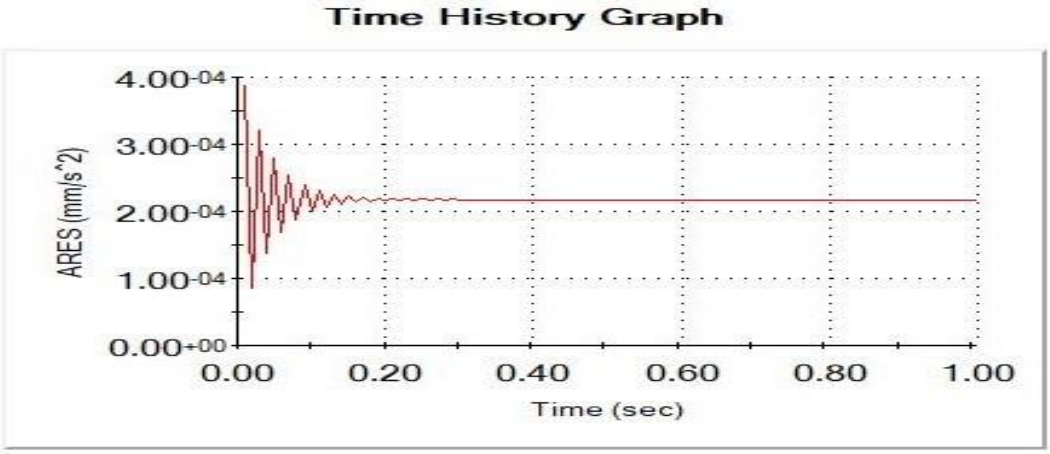
بشكل عام، يمكن القول إن زاويتين هاتين تعكسان جوانب مختلفة من سلوك المواد تحت تأثير القوى الخارجية.



الشكل ٦: رسم توضيحي لزاوية الفتل في الأعمدة الناتجة عن عزم الدوران [22].

النتائج والمناقشة:

تم الحصول على الاستجابة الاهتزازية لتسارع الاهتزاز خلال الثانية الأولى من الإقلاع الشكل ٧ ويتضح أن الاستجابة تستقر بعد زمن قصير نسبيا وبعد مقارنة هذه الاستجابة مع الحدود المسموح بها لهيئة التصنيف البولونية نجد أن الاستجابة تقع ضمن الحدود المسموح بها حيث أن الاستجابة تستقر عند mm/s^2 ٢ حيث يبلغ الحد المسموح به mm/s^2 ٣ مع بداية الإقلاع. عندما يبدأ جسم ما في الاقلاع، يتعرض للتسارع المفاجئ. هذا التسارع يمكن أن يسبب اهتزازات في الجسم نتيجة للاستجابة الديناميكية للقوى المطبقة. الاستجابة الاهتزازية للتسارع خلال الثانية الأولى من الاقلاع تعتمد على التردد الطبيعي للنظام، التخميد، ونوع الاهتزاز (حرة أو قسرية). يمكن تحليل هذه الظواهر باستخدام نماذج رياضية وتحسينها لتحقيق أداء أفضل واستقرار أكبر في الأنظمة الميكانيكية.

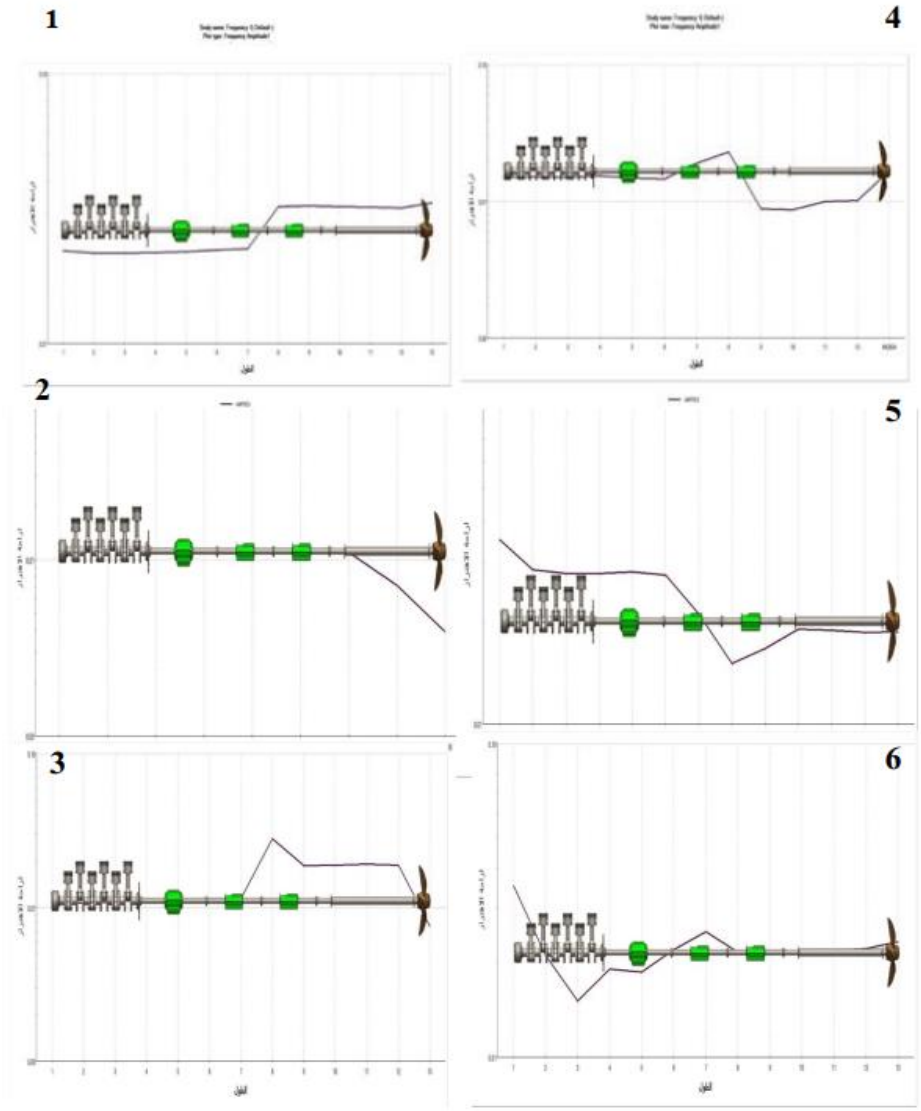


الشكل ٧: الاستجابة الاهتزازية لتسارع الاهتزاز عند بداية الإقلاع.

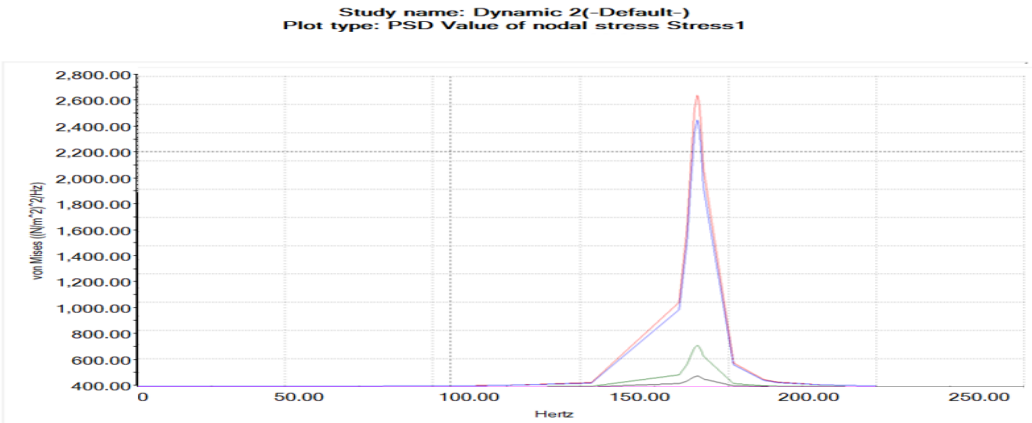
تم رسم أنماط الاهتزاز الطبيعية الستة الأولى لمحطة الدفع المدروسة باستخدام SolidWorks الشكل ٨ عند ترددات عمل مختلفة (سرعات مختلفة) ومطابقة للترددات التي رسمت عندها الأنماط لمحطة الدفع الحقيقية في الشكل ٤ تجريبيا وتحليليا من قبل المصنعين لمحطة الدفع حيث يتضح التشابه الكبير بين هذه الأنماط وهذا يؤكد مرة أخرى مقدار الدقة والموثوقية في نتائج برنامج الـ SolidWorks .إضافة للسهولة الكبيرة التي يمنحها مقارنة مع الطرق التحليلية أو

التجريبية، يعود الاختلاف بين أنماط الاهتزاز عند ترددات مختلفة للتغير الحاصل في السرعة لمحور الدوران وبالتالي التغير في التردد الذي يرسم على أساسه نمط الاهتزاز الموافق حيث تؤثر الترددات المختلفة على كيفية انتقال الاهتزاز عبر الجسم. عند الترددات المنخفضة، تكون الإزاحة صغيرة ولكن يمكن أن تؤدي إلى تسارع كبير عند الترددات العالية، كذلك عند تعرض نظام فيزيائي لترددات معينة تسمى ترددات الرنين، يهتز النظام بأقصى شدة. هذه الظاهرة تحدث لأن النظام يقوم بتخزين طاقة الاهتزازات عند ترددات معينة، كذلك يمكن تفسير تغير أنماط الاهتزاز فيزيائيا في الجزيئات وفقًا لترددات امتصاص الطاقة. تؤدي الذرات حركات دورية مختلفة مثل الامتطاط والقص والانحناء، مما يؤثر على كيفية حركة الذرات داخل الجزيء، أيضا عند ترددات معينة، يمكن أن يحدث تداخل بنائي بين الموجات، مما يزيد من سعة الاهتزاز. هذا يؤدي إلى تغيير في نمط الاهتزاز، في حالات أخرى، يمكن أن يحدث تداخل حذفي، مما يقلل من سعة الاهتزاز ويؤثر على نمطها.

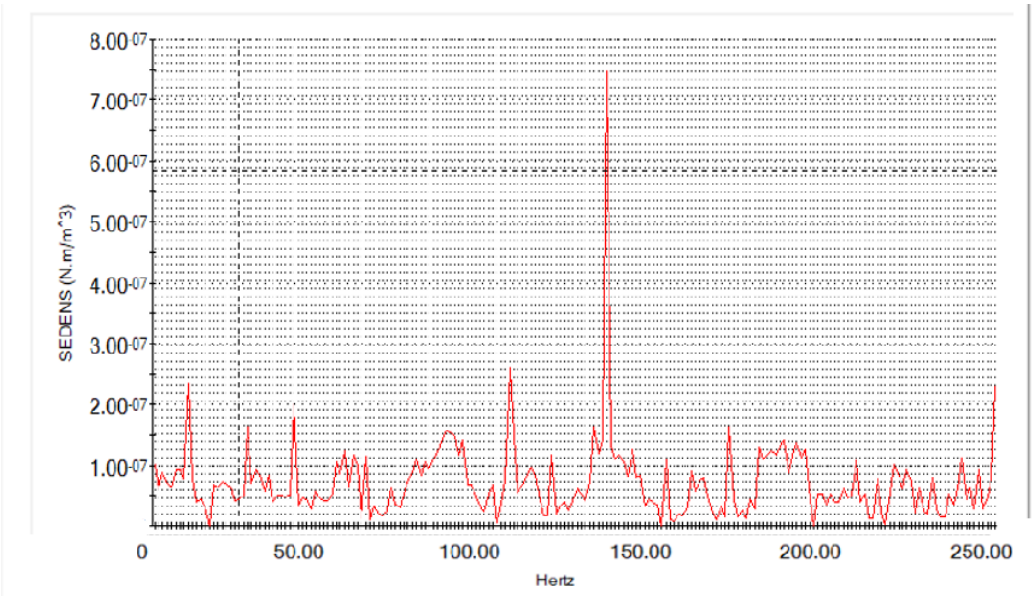
تم رسم منحني الكثاقة الطيفية للإجهاد المرافق لعمل المحطة في الشكل ٩ حيث يعبر عن طاقة الاجهاد المرافقة لكل تردد تعمل عنده المحطة(تُظهر الألوان الترددات الطبيعية الستة المدروسة) ويظهر الاجهاد الاعظمي مترافق مع مجال التردد (١٥٠-٢٠٠) HZ لذلك يجب الابتعاد عن العمل في هذا المجال لتجنب الاضرار التي ستلحق بالمنظومة نتيجة الاجهاد. كذلك تم رسم منحني الكثافة الطيفية لإنفعال منظومة الدفع الشكل ١٠ حيث أن المنظومة ستختزا اكبر طاقة انفعال عند التردد ١٤٥ HZ وهو قريب من التردد الاعظمي للاجهاد ويعود ذلك للسلوك المرن للمواد التي صنع منها عمود نقل القدرة.



الشكل ٨: أنماط الاهتزاز لسفينة سورية باستخدام SolidWorks.



الشكل ٩: منحني الكثافة الطيفية PSD لإجهاد محطة الدفع.



الشكل ١٠: منحني الكثافة الطيفية PSD لانفعال محطة الدفع.

كما ذكرنا الكثافة الطيفية هي كمية تصف توزيع الطاقة عبر أطوال موجية مختلفة. في سياق طاقة الإجهاد، يمكن أن تشير إلى توزيع الطاقة المخزنة في المواد عند إجهادها. عند إجهاد مادة، تزداد طاقة الإجهاد المخزنة فيها. يمكن أن تظهر هذه الزيادة في منحني الكثافة الطيفية كزيادة في شدة الإشعاع عند أطوال موجية معينة، مما يشير إلى زيادة في الطاقة المخزنة. يمكن أن يفسر هذا التأثير بزيادة الترددات الطبيعية للمادة نتيجة للإجهاد، مما يؤدي إلى تغيير في توزيع الطاقة عبر الأطوال الموجية. الإجهاد يمكن أن يؤثر على الترددات الطبيعية للمادة عن طريق تغيير بنيتها الداخلية. يمكن أن يؤدي ذلك إلى تغيير في قيم الترددات الطبيعية، مما يظهر في منحني الكثافة الطيفية كتغيرات في شدة الإشعاع عند أطوال موجية محددة. يمكن أن يفسر هذا التأثير بزيادة أو انخفاض في ثابت صلابة العمود أو عزم عطالة الكتل الدوارة، مما يؤثر على الترددات الطبيعية. يمكن استخدام التحليل الطيفي لدراسة تأثير الإجهاد على المواد عن طريق تحليل منحني الكثافة الطيفية، يمكن الحصول على معلومات حول كيفية تغير طاقة الإجهاد مع الإجهاد المطبق.

يُظهر التحليل الفيزيائي أن منحني الكثافة الطيفية يمكن أن يُستخدم لدراسة تأثير الإجهاد على المواد. يمكن أن يُستخدم هذا التحليل لتحسين فهم كيفية تغير طاقة الإجهاد والانفعال مع الحمل المطبق، مما يسهم في تحسين تصميم المواد والهياكل. يمكن تفسير ظهور قيمة الانفعال أو الاجهاد الأعظمي عند تردد عمل محدد إلى عدة عوامل:

الخصائص الميكانيكية للمادة

- **الانفعال والاجهاد** :عند تطبيق إجهاد على مادة يحدث انفعال. قيمة الانفعال الأعظمي هي أقصى انفعال يمكن أن تتحمله المادة قبل أن تنكسر أو تتعرض لضرر دائم.
- **التردد** :يمكن أن يؤثر التردد على سلوك المادة حيث أن الترددات المحددة قد تسبب ترددات طبيعية للمادة، مما يزيد من الانفعال

.الاهتزازات والتشوهات

- **الاهتزازات** :عند تطبيق تردد معين قد تتعرض المادة لاهتزازات تزيد من الانفعال، خاصة إذا كان التردد قريباً من التردد الطبيعي للمادة.

- **التشوهات** :يمكن أن تؤدي التشوهات إلى تغيير في سلوك المادة، حيث تزيد من الانفعال عند ترددات معينة بسبب الاختلافات في البنية الداخلية للمادة.

الخصائص الديناميكية

- **الاستجابة الديناميكية** :المادة قد تظهر استجابة ديناميكية مختلفة عند ترددات معينة، مما يؤدي إلى زيادة في الانفعال بسبب التفاعل بين الإجهادات والاهتزازات.

بشكل عام، ظهور قيمة الانفعال الأعظمي عند تردد عمل محدد يعتمد على التفاعل بين الخصائص الميكانيكية للمادة والشروط الديناميكية.

يعرض الجدول ١ إزاحة الاهتزاز في مختلف الاتجاهات عند ترددات عمل مختلفة وتقاس زاوية الفتل على الاتجاه y (العمودي على محور الدوران) وذلك بتقسيم مقدار الازاحة على نصف قطر العمود على اعتبار أن زاوية الفتل ذو قيمة ضئيلة جدا أقل من ٢ درجه في الحالات الحرجة وفقا الشكل ٦ نجد $\theta = \frac{y}{r}$.وباعتبار أن نصف القطر ثابت r=240mm نجد ان θ تكون اعظمية عندما تكون y أعظمية أي(درجة$\theta max = \frac{0.201}{240} = 0.00089$).

الجدول ١:إزاحة الاهتزاز الاعظمية عند ترددات عمل مختلفة.

Mode Number	Frequency [Hz]	X direction(mm)	Y direction(mm)	Z direction(mm)
1	6.215	0.00365	0.112	0.154
2	7.550	0.00531	0.201	0.215
3	8.5254	0.000701	0.14739	0.2906
4	9.9276	0.001080	0.09984	0.15134
5	10.124	0.0018504	0.00018	0.2488
6	10.359	0.0017352	0.02879	0.0001

في الحركة الاهتزازية التوافقية البسيطة لنظام خطي (كنظام دفع السفينة) يمكن تمثيل العلاقة الإزاحة وزاوية الفتل كما يلي:

$s=\ell\theta$ حيث أن s هي إزاحة الاهتزاز، ℓ طول عمود نقل القدرة، θ زاوية الفتل وبالتالي يمكن تحسين زاوية الفتل وتقليلها باستخدام بعض الاستراتيجيات:

١. **تقليل طول عمود نقل القدرة** تقليل طول العمود يؤدي إلى زيادة التردد الطبيعي للنظام، مما يقلل من زاوية الفتل اللازمة لتحقيق نفس الإزاحة.

٢. **زيادة كتلة العمود** :زيادة كتلة العمود لا تؤثر بشكل مباشر على زاوية الفتل، ولكن يمكن أن يؤدي إلى تقليل تأثير الاضطرابات الخارجية المؤثرة عليه.

٣. **تطبيق قوى مخمده** :تطبيق قوى مخمده يمكن أن يساعد في تقليل زاوية الفتل عن طريق تقليل سعة الاهتزاز بمرور الوقت.

العلاقة بين الإزاحة وزاوية الفتل في الاهتزازات تعتمد على نوع النظام وخصائصه. يمكن تحسين زاوية الفتل وتقليلها من خلال تعديل خصائص النظام مثل طول العمود أو تطبيق قوى مخمده. هذه التعديلات يمكن أن تساعد في تحقيق أداء أفضل واستقرار أكبر في الأنظمة الاهتزازية.

يلاحظ أنه عند جميع الترددات في الجدول ١ ستكون زاوية الفتل صغيرة جدا لذلك يمكن اعتبار ان زاوية الفتل مستقلة عن الترددات الطبيعية لنظام الفتل عند الإزاحات الزاوية الصغيرة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

يمكن أن يتأثر التردد الطبيعي لنظام ديناميكي بالإجهاد(الحمل) المطبق عليه عند تطبيق إجهادات مختلفة، قد تتغير الخصائص الميكانيكية للنظام، مما يؤثر على تردده الطبيعي. على سبيل المثال، قد يؤدي الإجهاد إلى تغيير في الصلابة أو التخميد، مما يؤثر على ترددات الاهتزاز.

عند تطبيق إجهاد عند تردد قريب من التردد الطبيعي للنظام، يحدث الرنين. هذا يؤدي إلى زيادة كبيرة في سعة الاهتزاز، مما قد يؤدي إلى فشل النظام إذا لم يتم التحكم فيه.

يمكن أن يؤثر الإجهاد المطبق على استقرار النظام الديناميكي. عند تطبيق إجهادات كبيرة، قد يصبح النظام غير مستقر، مما يؤدي إلى اهتزازات غير مرغوب فيها أو فشل النظام

يمكن أن يتأثر معامل المرونة للنظام (مثل معامل يونج) بالإجهادات المطبقة عليه. عند تغيير الإجهادات، قد يتغير معامل المرونة، مما يؤثر على التردد الطبيعي للنظام.

يمكن استخدام تحليل الاستجابة الديناميكية لتحديد كيفية استجابة النظام الديناميكي للإجهادات المختلفة. هذا التحليل يساعد في تحديد الترددات الطبيعية وتقييم تأثير الإجهادات على أداء النظام.

عندما تزداد زاوية الفتل، يمكن أن يتغير تردد النظام الطبيعي بسبب تغييرات في القوى المؤثرة عليه. في الأنظمة المعقدة، قد تؤدي التغيرات في زاوية الفتل إلى تغييرات في الترددات الطبيعية بسبب التفاعلات بين القوى المختلفة.

عندما تتوافق زاوية الفتل مع الترددات الطبيعية للنظام، يمكن أن يحدث الرنين، مما يزيد من سعة الاهتزاز. هذا يحدث عندما تكون القوة المؤثرة على النظام عند تردد قريب من التردد الطبيعي، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في استجابة النظام.

باختصار، تؤثر زاوية الفتل على الترددات الطبيعية لأنظمة الفتل الديناميكية من خلال التأثير على القوى المؤثرة والاستجابة للقوى الخارجية. يمكن أن يؤدي تغيير زاوية الفتل إلى تغييرات في الترددات الطبيعية، مما قد يؤثر على ظاهرة الرنين والاستجابة العامة للنظام.

استخدام منحني الكثافة الطيفية في تحليل الاستجابة الاهتزازية لنظام ديناميكي معقد يُعتبر أداة قوية لفهم وتحليل سلوك النظام. هذا المنحني يوفر تمثيلًا دقيقًا لكيفية توزيع قوة الإشارة أو الاهتزاز عبر مختلف الترددات، مما يسمح للمهندسين بتحديد ترددات الرنين وتقييم استجابة النظام للاهتزازات.

نستطيع الاعتماد على SolidWorks في رسم منحني الكثافة الطيفية وكذلك حساب زاوية الفتل ورسم أنماط الاهتزاز بدلا من الطرق المكلفة والمعقدة المذكورة في البحث أعلاه.

العلاقة بين الترددات الطبيعية لنظام ديناميكي وزاوية الفتل تعتمد على نوع النظام وخصائصه. في معظم الحالات، يكون التردد الطبيعي مستقلًا عن زاوية الفتل، ولكن يمكن أن يظهر تأثيرات غير خطية عند زوايا الفتل الكبيرة. يمكن تحسين التردد الطبيعي وتقليل زاوية الفتل من خلال تعديل خصائص النظام وتطبيق قوى مخمده.

التوصيات:

من خلال هذا البحث يتحتم على مهندسي التصميم اختبار وتحديد الترددات الطبيعية وأنماط الاهتزاز لمحطة الدفع قبل اعتماد التصميم النهائي، كذلك يتوجب رسم منحني كثافة الطاقة للمعلومات المهمة التي يوفرها لاحقا والتي ذكرت ضمن البحث، إن اعتماد برنامج SolidWorks في التنبؤ بمستويات الاهتزاز له أهمية بالغة في مراحل الاستثمار لتجنب العمل بترددات قسرية قريبة على الترددات الطبيعية وكذلك تحديد المواقع المعرضة لأقصى إجهاد على طول عمود الدفع.

التوصيات للأعمال المستقبل

يجب العمل مستقبلا على إيجاد الطرق والأساليب التي تمكننا من التحكم بمستويات الاهتزاز بصورة مؤتمتة بشكل كامل من خلال القدرة على تغيير الترددات الطبيعية والقسرية بشكل لحظي خلال عملية الاستثمار والعمل على وضع دليل استرشادي لكل محطة دفع يحدد ساعات العمل الافتراضية لكل مكون من مكوناتها بناء على البيانات التي يقدمها تحليل الاهتزازات.

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] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[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, "Simpli fi ed 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 INTRODUCTED BY PROPULSION INSTALLATION," pp. 15–28, doi: 10.2478/9788395720413-002.
[18] D. Zou, C. Jiao, N. Ta, and Z. Rao, "Forced vibrations of a marine propulsion shafting with geometrical nonlinearity (primary and internal resonances)," *Mech. Mach. Theory*, vol. 105, pp. 304–319, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2016.07.003.
[19] N. Awattef, M. Esber, M. Khnese, and A. Saleh, "No TitleSimulation 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.*
[20] H. Rimstad, "Dynamic Modelling , Vibration and Fatigue Analysis of Slow Rotating Propulsion Systems," no. July, 2018.
[21] C. Faster, "FasterCapital." https://fastercapital.com/arabpreneur/ (accessed Jan. 29, 2025).
[22] "Torsion Angle," *IUPAC Compend. Chem. Terminol.*, vol. 2193, p. 6406, 2008, doi: 10.1351/goldbook.t06406.