Improving The Vibration Damping In A Real Marine Propulsion System Using Solidworks

Dr. Awattef Nasra*
Dr. Mona Esber**
Dr. Mohammad Khnese***
Alhadee Saleh****

(Received 8 / 9 / 2024. Accepted 24 / 11 / 2024)

□ ABSTRACT □

Marine propulsion systems are the core components of a ships, however, vibrations caused by operations can lead to structural problems and inefficient performance. Therefore, vibration damping is an important aspect to ensure the safety and efficiency of these systems. Vibration damping in marine propulsion systems is a vital area that requires continuous research and technological development to ensure sustainable and safe performance. By improving damping techniques, which enhance the efficiency of marine plants and achieve better results in the field of renewable energy.

This research designed a propulsion station for a real ship 3D using SolidWorks program and then conducted virtual modeling of the vibratory response Both the propeller shaft and the medium shaft at two rotation speeds (nominal speed and speed during takeoff) for both displacement and speed and acceleration of vibration as vibration inducing forces arise from pulse forces in engine cylinders as well as from the propeller. These results were compared with the requirements of the BRC, after which many ways in which vibratory response is controlled and adjusted to remain within permissible limits.

Keywords: Dynamic vibrations, ship propulsion system, Damping.

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

*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
*** Associate Prof.، mechatronics Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. 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

تحسين تخميد الاهتزازات في محطة دفع بحرية حقيقية باستخدام برنامج الـ Solid Works

د. عواطف نصره*

د. منى أسبر **

د. محمد خنيسي ***

الهادي صالح ****

(تاريخ الإيداع 8 / 9 / 2024. قُبِل للنشر في 24/ 11 / 2024)

□ ملخّص □

تعتبر محطات الدفع البحرية العنصر الأساسي في السفينة، ومع ذلك، فإن الاهتزازات الناتجة عن عمليات التشغيل يمكن أن تؤدي إلى مشاكل هيكلية وأداء غير فعال. لذا، يُعتبر تخميد الاهتزازات أحد الجوانب المهمة لضمان سلامة وكفاءة هذه المحطات. يعد تخميد الاهتزازات في محطات الدفع البحرية مجالًا حيويًا يتطلب البحث المستمر والتطوير التكنولوجي لضمان أداء مستدام وآمن. من خلال تحسين تقنيات التخميد والتي تعزيز كفاءة المحطات البحرية وتحقيق نتائج أفضل في مجال الطاقة المتجددة.

تم في هذا البحث تصميم محطة دفع لسفينة حقيقية بشكل ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks ثم إجراء نمذجة افتراضية للاستجابة الاهتزازية لكل من عمود الرفاص والعمود المتوسط عند سرعتي دوران (السرعة الاسمية والسرعة أثناء الإقلاع) لكل من الإزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز على اعتبار ان القوى المحرضة للاهتزاز تنشا من القوى النبضية في أسطوانات المحرك وكذلك من الرفاص. تم مقارنة هذه النتائج مع متطلبات هيئة التصنيف البولونية، بعدها تم نمذجة العديد من الطرق التي من خلالها يتم التحكم بالاستجابة الاهتزازية وضبطها لتبقى ضمن الحدود المسموح بها.

الكلمات المفتاحية: اهتزازات ديناميكية، نظام الدفع في السفن، التخميد.

حقـوق النشـر : مجلـة جامعـة تشـرين- سـورية، يحـتفظ المؤلفـون بحقـوق النشـر بموجـب التـرخيص CC BY-NC-SA 04

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

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

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

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

مقدمة:

تعد الاهتزازات الديناميكية التي تتعرض لها منظومة الدفع في السفن مشكلة خطيرة وجادة تهدد كفاءة وموثوقية عمل السفينة وأيضاً سبباً رئيسياً للأعطال الفُجائية التي يمكن أن توقف السفينة في عرض البحر لذلك باتت هيئات التصنيف في السنوات الأخيرة تؤكد على إيلاء اهتمام أكبر لتحليل ومحاكاة الاهتزازات في محطات دفع السفن كون المستويات العالية من الاهتزازات تشكل خطراً على الانسان والآلة معاً. إن تخميد هذه الاهتزازات ومحاكاتها قبل وبعد بناء نظام الدفع يعد أمراً حيويا وهاما وكذلك مراقبة اهتزازات محطة الدفع للسفن قيد الاستثمار ضروري من أجل تجنب تطور هذه الاهتزازات وخروجها عن السيطرة. لقد اهتم الباحثين بالبحث عن الطرق الفعالة بشقيها التصميمي والاستثماري للتقليل من فرص نشوء الاهتزازات وامتصاصها وتخميدها للحد الأدنى في حال نشوئها، ولازالت مشكلة الاهتزازات وخطورتها قائمة الى يومنا هذا نتيجة التعقيد الكبير لنظام الدفع وتعدد الأجزاء التي تعمل وتتحرك بآن واحد وكذلك تعدد القوى الداخلية والخارجية التي تؤثر علية نظرا لصعوبة وقساوة البيئة التي يعمل فيها نظام الدفع. إن اقتراح طريقة ما لتخميد الاهتزازات وامتصاصها لابد له من إمكانية تجريبية قبل اعتماده على المحطة الجاري تخميد اهتزازاتها لذلك لابد من اللجوء الى اختبار النماذج افتراضياً بمساعدة الحاسب CAD (Computer-Aided Detection)، وهي الطريقة التي اعتمدها هذا البحث حيث 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. وهي طريقة جديدة كليا وفعالة الى حد كبير كما سنرى لاحقاً، لقد أجرى العديد من الباحثين في السنوات الخيرة بحوثاً لتخميد وتقليل فرص نشوء الاهتزازات في محطات الدفع البحرية.

ففي العام 2002 Andrew K [1] أوضح الباحث الطرق العامة للتحكم بالاهتزازات في الآلات الديناميكية وماهي البارامترات التي يمكن تغييرها في كل حالة من حالات العمل تبعاً لقيم التردد الذي تعمل عنده الآلة وأوجد أن الأساليب المقبولة عموما للسيطرة على الاهتزاز من المعدات الصناعية تشمل؛ التحكم بالقوة المحرضة للاهتزاز، إضافة الكتلة، ضبط التوازن، العزل، تغيير الصلابة والعطالة ومعامل التخميد.

وفي العام 2006 Paul G. Dylejko [2] درس الباحث سبب نشوء الضجيج و الاهتزاز في السفن و كيفية التقليل منها و تخميدها بواسطة جهاز يدعى (changer resonance) يعمل كأداة ممتصة للاهتزاز الديناميكي و الضجيج و أوضح مكوناته و آلية عمله المعتمد أساسا على علم الهيدروليك.

وفي العام 2013 نشر Franklin J [3] مقالة حلل فيها مختلف العيوب التي تسببها الأنواع المختلفة للاهتزازات لعدة أنواع من السفن اعتماداً على تحليل التردد الناتج عن كل جزء من أجزاء المنظومة باستخدام برنامج Shaft Designer وقدم بعض التوصيات للتقليل من هذه العيوب والاعطال بحسب الحالة المدروسة.

في العام 2018 ناقشت Helene R [4] بحث هدفه النمذجة الديناميكية للتعب التي تسببه الاهتزازات في أنظمة الدفع للسفن المنخفضة السرعة، وناقشت الباحثة مجموعة من الطرق للتحكم بالاهتزازات وأوضحت المشاكل المرافقة لزيادة زمن نطاق السرع الحرج التي يمر بها نظام السفينة أثناء إقلاعها.

في العام 2019 Meilong et al., [5] نشر الباحثون مقالاً يناقش التحكم بالاهتزازات عن طريق التحكم بالتردد الطبيعي لمنظومة الدفع وذلك عن طريق جعل قيم التردد الطبيعي للنظام بعيد الى حد ما عن قيم الترددات القسرية المسببة للاهتزاز عن طريق التحكم بعطالة الكتل الدوارة.

وفي نفس العام نشر Xiling et al., [6] بحثاً للتحكم بالاهتزازات في نظام بسيط باستخدام طريقة التحكم متعدد القنوات multi-channel global control method وتعتمد هذه الطريقة على خوارزمية معقدة لتحليل الإشارات والتي من شانها منع انتقال الاهتزاز بين النظام المهتز والقاعدة التي يستند عليها.

وفي العام 2020 نشر Ionut et al., [7] مقالة تحلل تأثير مختلف البارامترات على الاهتزازات غير الخطية في منظومة دفع السفينة وما يرافقها من أعطال ومشاكل فنية تقلل كفاءة المنظومة وموثوقيتها بشكل عام وتم استخدام برنامج الـ ANSYS للتنبؤ بكيفية اهتزاز عمود نقل الحركة تحت تأثير قوى التحريض المختلفة.

وفي العام 2021 نشرت هيئة التصنيف الامريكية ABS [8] ملاحظات ارشادية يجب أخذها بعين الاعتبار أثناء تصميم محطة الدفع وقدمت عرضاً عاماً لأكثر الطرق فاعلية في كيفية التحكم بالاهتزازات من خلال التحكم بالبارامترات الرياضية التي من الممكن تغييرها في مرحلة التصميم المبكر لمحطة الدفع.

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 تعقيدًا، وتأكيداً على دقة وموثوقية البرنامج نود أن نشير إلى أنه مستخدم على مجال واسع في التصميم وحسابات الـ FEM، وهنا بعض الدراسات الحديثة المنشورة على موقع Elsevier والتي تم فيها استخدام هذا البرنامج لهذه الأغراض [18]–[11] ,[19] ,[10] ,[9].

أهمية البحث وأهدافه:

1. أهداف البحث

- تصميم نظام دفع لسفينة حقيقية باستخدام برنامج SolidWorks.
- محاكاة وحساب سرعة وإزاحة وتسارع الاهتزاز في عمود الرفاص والعمود المتوسط ومقارنتها مع الحد المسموح به للاهتزاز تبعاً لهيئة التصنيف البولونية.
- رسم منحني الاستجابة الاهتزازية لكل من مطال وسرعة وتسارع الاهتزاز خلال الـ 5 ثواني الأولى من الإقلاع.
- محاكاة بعض الطرق التي من شانها تخفيض شدة استجابة الاهتزاز وجعلها ضمن الحدود المقبولة.

2. منهجية البحث

يقوم البحث على منهجية تحليلية تجريبية في بيئة افتراضية. تم بداية تصميم المنظومة المراد تحليل استجابتها الاهتزازية بشكل ثلاثي الابعاد باستخدام برنامج الـ SolidWorks، من أجل الحصول على نموذج حقيقي لمحطة الدفع. تم استخراج جميع القيم والخصائص الهندسية لهذا النموذج كعزوم العطالة والتخميد والصلابة وذلك بعد تطبيق المادة الحقيقية التي صنع منها العنصر. تم بعدها تحميل نظام الدفع بالقوى والعزوم الخارجية المؤثرة عليه، بعدها تم بناء الشبكة الرقمية المناسبة لتقسيم النظام وفق طريقة العناصر المنتهية.

بعد ذلك بدأت عملية المحاكاة والحصول على النتائج المطلوبة المتعلقة بالاستجابة الاهتزازية من مطال وسرعة وتسارع الاهتزاز ليصار الى تحليلها ومقارنتها مع متطلبات هيئة التصنيف البولونية وكذلك رسم منحنيات الاستجابة الاهتزازية

لمطال وسرعة وتسارع الاهتزاز لكل من عمود الرفاص والعمود المتوسط خلال زمن الإقلاع أخيراً وفي حال كانت النتائج غير مرضية تم محاكاة بعض الطرق للتحكم بالاهتزازات ومناقشة تأثير ونتائج كل منها على الاستجابة الاهتزازية لكل من عمود الرفاص والعمود المتوسط.

طرائق البحث ومواده:

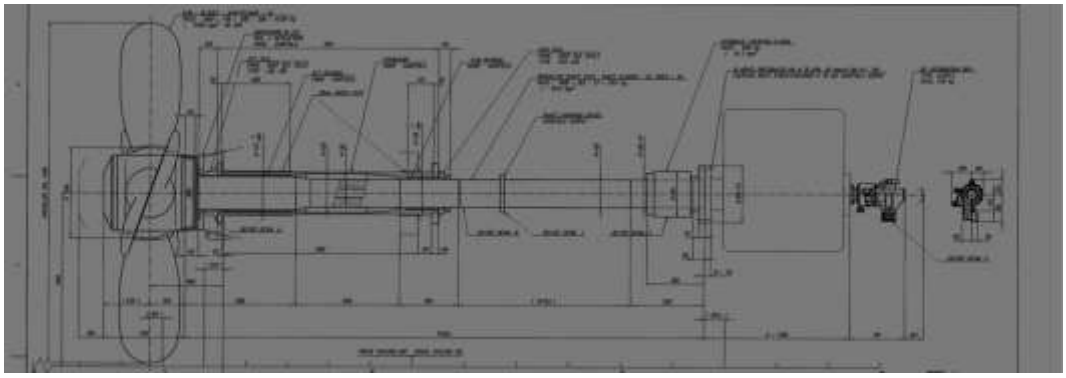
لقد تم في هذا البحث استخدام الطرق والمواد التلية:

- برنامج الـ SolidWorks.
- طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method, FEM المتوفرة ضمن برنامج الـ SolidWorks.
- مخططات سفينة سورية، ومواصفات نظام الدفع الخاص بها، انظر الشكل 1، والجدول 1.

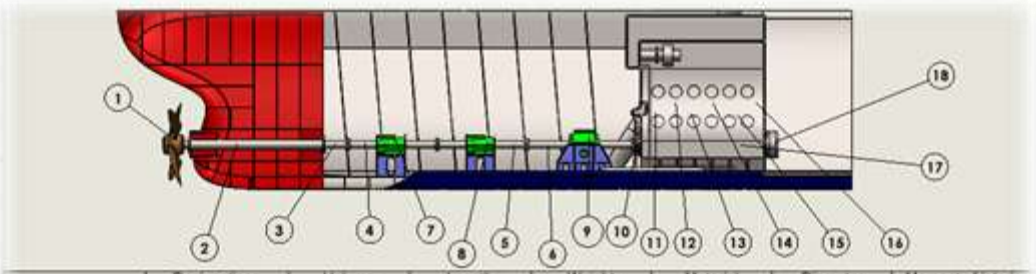
3. نمذجة محطة الدفع لسفينة سورية

3.1. الخصائص الهندسية والديناميكية

تم تصميم محطة الدفع الخاصة بسفينة سورية الموضحة في الشكل 1 باستخدام برنامج SolidWorks ليتم الحصول عليها بشكل ثلاثي الابعاد كما هو موضح في الشكل 2.



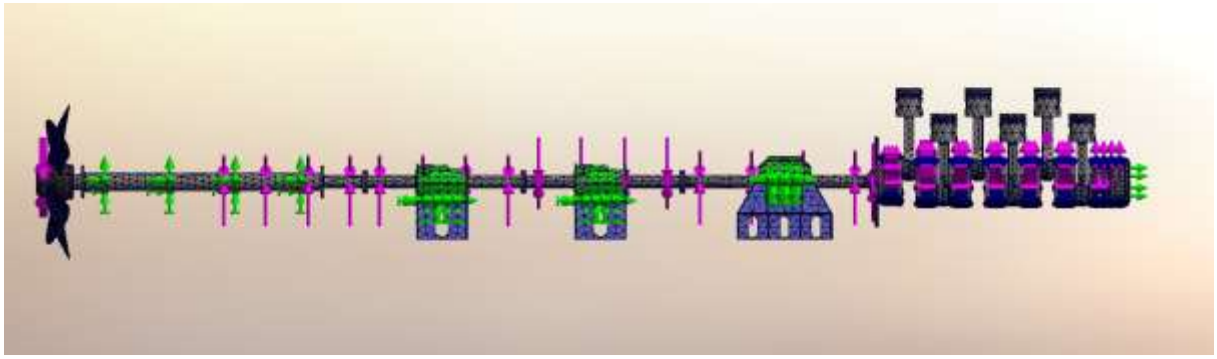
الشكل 1: الرسم الهندسي لنظام الدفع لسفينة سورية.



	Designations	Volume	Length	Weight	Material	Diameter	Moment of inertia
1	cp propeller	1.14	0	8399.59	AluminumBronze	0	1274
2		0.9	7.62	7858	1023CarbonSteel	0.56	
3		1.46	10.18	11493.08	1023CarbonSteel		
4		0.66	5	5215.25	1023CarbonSteel	0.4	
5		0.66	5	5215.25	1023CarbonSteel	0.4	
6		0.79	6	6202.71	1023CarbonSteel	0.4	
7	ip flexible coupling	1.19	8.19	9372.81	1023CarbonSteel	36.4	284
8	mp flexible coupling	1.19	1042	9372.81	1023CarbonSteel	0	274
9		2.63		20660.7	1023CarbonSteel		
10	flywheel	0.66	1042	5190.3	1023CarbonSteel	0	1550
11	running gear Cy1	0.27	5.3	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
12	running gear Cy2	0.27	5	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
13	running gear Cy3	0.27	5	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
14	running gear Cy4	0.27	5	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
15	running gear Cy5	0.27	5	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
16	running gear Cy6	0.27	5	2086.53	1023CarbonSteel	38	282.20
17					1023CarbonSteel		
18	op-vibration damper	0.85	80	6642.84	1023CarbonSteel	0	156

الشكل 2: نظام الدفع لسفينة سورية بشكل ثلاثي الابعاد والخصائص الهندسية لأجزاء هذا النظام.

تم تحميل القوى والعزوم الخارجية المحرضة للاهتزاز لكل من المحرك والرفاص (Engine and Propeller excitation) الموضحة في الشكل 3 والموافقة لنقطة العمل الاسمية وتم تغيير هذه القيم أثناء الدراسة وفقا للحالة المدروسة، وكذلك عزوم العطالة والتخميد لأجزاء المنظومة ليتم في الخطوة التالية تصميم الشبكة الرقمية المناسبة لإجراء دراسة محاكاة من نوع Dynamic Linear ثم رسم منحنيات الاستجابة الاهتزازية لكل من إزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز لكل من العمود المتوسط وعمود الرفاص.



الشكل 3: تحميل منظومة الدفع بالقوى والعزوم المؤثرة عليها

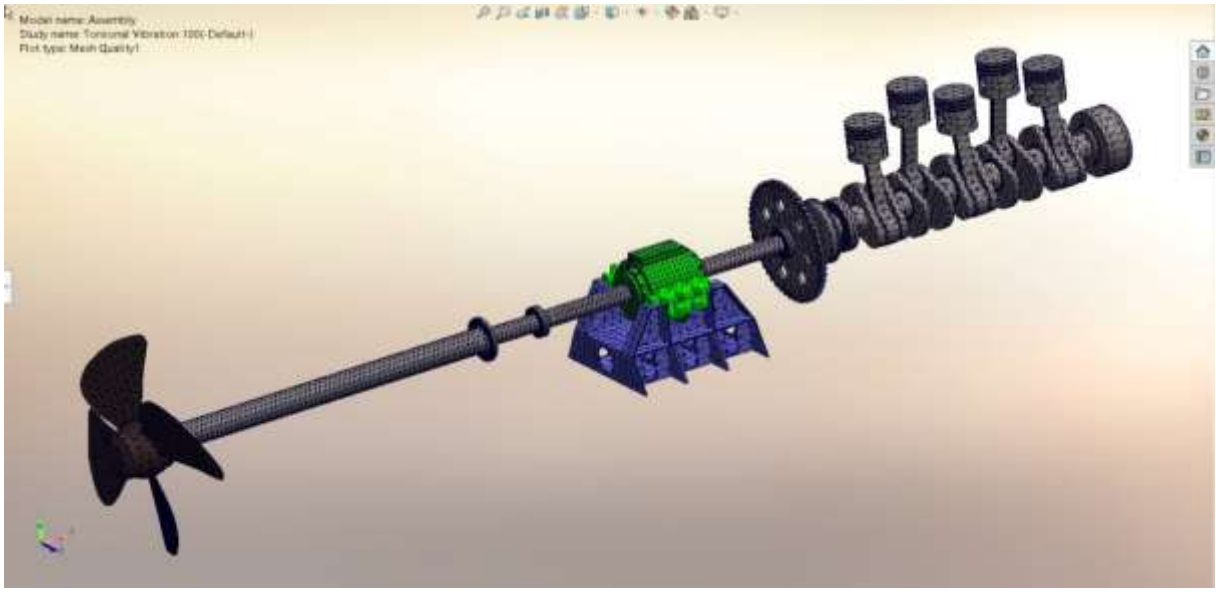
الجدول 1: الخصائص الهندسية والديناميكية لمحرك الديزل البحري لسفينة سورية

Engine data

Rated power: 5400 kW Bore: 430 mm	Rated speed: 500 1/min Stroke: 610 mm	1 – 3 – 5 – 6 – 4 – 2
Charger type: ABB TPL 73 A 30 Max speed: 21600 1/min	Number: HT 458454 t max: 650°C	Specification: 40601
Fuel injection pump: Typ 457706	Plunger diameter: 38 mm	Idle stroke 'X': 10,5 mm

3.2. الشبكة الرقمية

الشبكة الرقمية التي تم استخدامها موضحة في (الشكل 4) هي الشبكة الغير منتظمة وهي الشبكة الافتراضية في البرنامج، تم استخدام (130 ألف) خلية حسابية تقريباً. البارامترات الأساسية المميزة للشبكة الرقمية التي يتم استخدامها موضحة في الجدول 2.



الشكل 4: الشبكة الرقمية التي تم بناؤها لنظام الدفع.

الجدول 2: خصائص الشبكة.

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

3.3. الحدود المسموح بها للاهتزاز وفق هيئة التصنيف البولونية

في الحركات الاهتزازية ذات التردد 600 rpm أقل من 10 Hz يكون التسارع منخفض جدا أما التعبير بسرعة الاهتزاز فيكون غير مجدي لأنه ذات قيمة صغيرة صعب قياسها أيضا الازاحة ستكون كبيرة نسبيا لذا يتم اختيار الإزاحة كالبارامتر الأنسب لقياس الاهتزازات ذات التردد أقل من 10 HZ. اما في الحالات ذات التردد أعلى من 10 HZ ولغاية 50 Hz فإن التسارع يعتبر البارامتر الأفضل لتحديد حالة الاهتزاز. أما في المجال الذي يتراوح من - 50 HZ) (100 HZتعد السرعة مؤشر جيد ومناسب لحالة الاهتزاز. يعرض الجدول 3 القيم المسموح بها للاهتزاز لكل عنصر من عناصر منظومة الدفع والمرقمة في العمود الأول من الجدول، تم في هذا البحث اجراء دراسة على عمود الرفاص والعمود المتوسط (السطر الأول من الجدول 3) أي العناصر 3 و 4 في الشكل 2 وكما هو واضح يجب أن توضع حساسات القياس على المساند الارتكازية، اتجاه القياس يكون بالاتجاهين الافقي والشاقولي وفق العمود 4 من الجدول 2 في العمود الخامس يعرض الجدول 2 حدود التردد التي سيتم قياس الاهتزاز فيها والتي تعتمد على سرعة الدوان ومضاعفاتها، في مجال التردد المحصور في المجال (1-10 Hz) يكون مطال الاهتزاز هو الأفضل لتحديد الحالة الاهتزازية ويجب أن يبقى أقل من 0.35mm وفي مجال التردد المحصور في المجال (10-50 Hz) يكون التسارع هو البارامتر الأفضل لتحديد الحالة الاهتزازية ويجب أ يبقى ضمن m/s^2 (0-15) بالنسبة لعمود المتوسط وعمود الرفاص. يعرض الشكل 5 الحدود المسموح بها للاهتزاز بشكل أوسع حيث تمثل الزرقاء قيمة مطال الاهتزاز والخطوط الحمراء سرعة الاهتزاز والخطوط السوداء تمثل تسارع الاهتزاز ويمثل الخط الأصفر قيمة التردد التي تحدد وفق سرعة الدوران والخط الأخضر يمثل العنصر رقم 1 وهو بحسب الجدول 3 عمود الرفاص والعمود المتوسط. في حال تجاوز الاهتزاز المعيار المسموح به يجب إجراء تحليل لطيف الاهتزاز والبحث عن طريقةٍ ما لتخفيف شدة الاهتزاز وضبطها لتبقى ضمن الحدود المسموح بها. يعنى هذا البحث بتحديد البارامترات الخاصة بشدة الاهتزاز بالاتجاه الشاقولي والافقي لكل من عمود الرفاص والعمود المتوسط لسفينة حقيقية عند سرعة دوران 85% من سرعة الدوران الاسمية للمحرك والبالغة 500 rpm بحسب الجدول 1 كونها السرعة التي ستعمل عندها السفينة في حالة العمل الاعتيادية لفترة طويلة من الزمن وكذلك عند السرعة 50 rpm التي سيمر بها أثناء الإقلاع والتي تعتبر ضمن المجال الحرج لسرع الدوران.

الجدول 3:المستويات المسموح بها للاهتزاز وفق هيئة التصنيف البولونية [20].

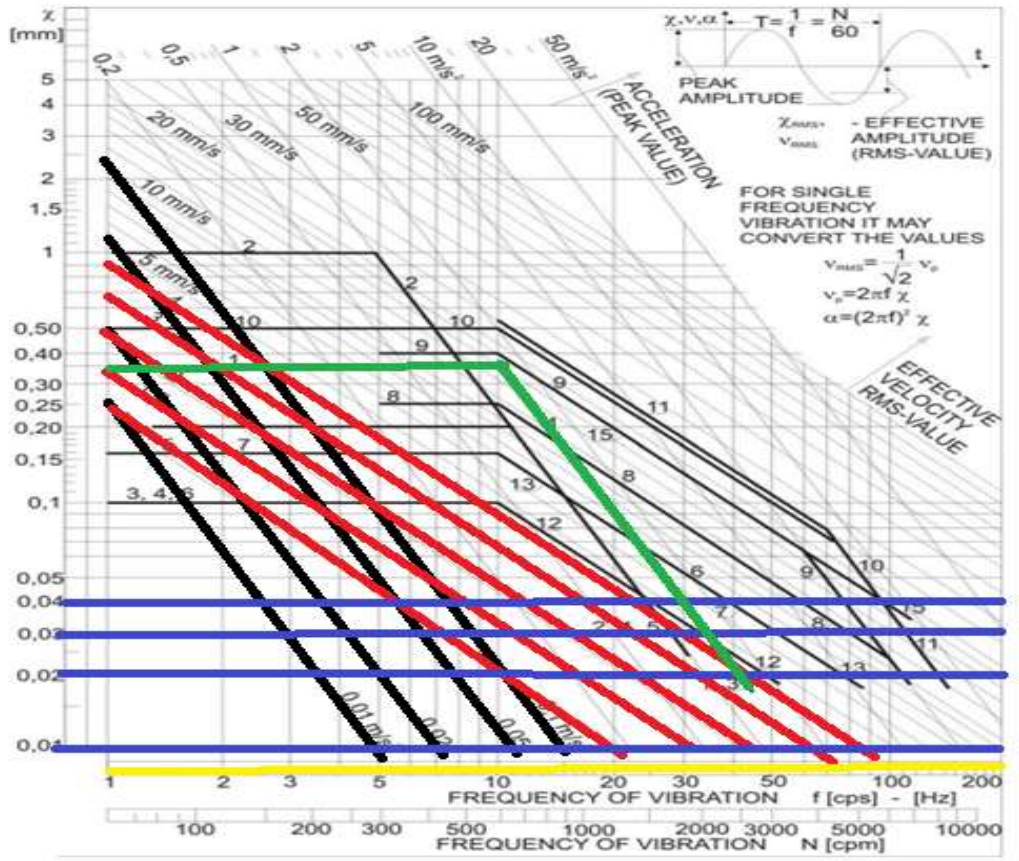
No. of item	Name of construction machines or equipment		Directions of vibration	Frequency range	Amplitudes of vibration		
					x_p	v_{sk}	a
				Hz(cps)	mm	mm/s	g
1	2		3	4	5	6	7
1	PROPULSIVE SYSTEM OF SHIP	Propeller shaft and intermediate shafts, points of measurement on bearings body	V, H	1–10	0.35		
				10–50			0,15.
2		THRUST BEARINGS (on body) – slow running direct propulsion (without reduction gearbox)	L	1–5	1.0		
				5-50			0.1
3		– for propulsive plants equipped with one-stage reduction gear-box	L	1–20	0.1		
				20-50			0.15
4		– for propulsive plant equipped with two-stage reduction gear-box	L	1-16	0.1		
				16-50			0.1
5		Main gearboxes, measuring points on bearing bodies or on seating pads	V, H	1-11.2	0.20		
				11.2-50			0.1
6		Main turbines meas. points on seating pads or on bearings body	V, H	1-16	0.1		
				16-100		7.1	
7		Diesel engines up to 300 rpm meas. points on seating pads	V, H	1–10	0.16		
				10–100		7.1	

يعتبر هذا البحث أن القوى الخارجية المحرضة للاهتزاز تنتج عن تفاوت ضغط الغاز في المحرك وكذلك من تذبذب قوة الدفع الناتجة عن الرفاص والتي ينتج لأسباب هيدروديناميكية متعددة ويحسب ترددات كل من هاتين القوتين وفق المعادلتين التاليتين مع العلم أن الرفاص لسفينة سورية رباعي الشفرات.

$$fp = n, 2n, nz, 2nz, 3nz, \ldots\ldots \quad \textbf{(1)}$$

$$fe = k.m.i.n \quad \textbf{(2)}$$

حيث n سرعة دوران المحرك والرفاص (ربط مباشر بدون علبة سرعة) تقدر1/S، z عدد شفرات الرفاص، k ثابت يتعلق بعدد أسطوانات المحرك ويأخذ قيمه من 1 حتى 4i، m ثابت يتعلق بنوع المحرك البحري ويأخذ القيمة 0.5 للمحرك رباعي الشوط، i عدد أسطوانات المحرك.



الشكل 5:مخطط بياني للحدود المسموح بها للاهتزاز وفق الجدول 3 [20].

4. التحكم بالاهتزازات

يتم عموما التحكم بالاستجابة الاهتزازية بالعديد من الطرائق يناقش هذا البحث الطرائق الأكثر فاعلية:

4.1. التحكم بالترددات الطبيعية لنظام الدفع

من المعروف جيدًا أنه عندما يتطابق تردد القوة المحرضة للاهتزاز مع أحد الترددات الطبيعية للنظام يحدث الرنين (الطنين) الذي يسبب مطال كبير للاهتزاز والذي يسبب بدوره إجهادات كبيرة غير مرغوب فيها مما قد يؤدي إلى انهيار النظام. لذلك يجب تجنب حصول الرنين أثناء الاستثمار. في معظم الحالات لا يمكن التحكم في تردد القوة المحرضة للاهتزاز لأنه مفروض بسبب المتطلبات الوظيفية للنظام أو الآلة. يجب علينا التركيز على التحكم في الترددات الطبيعية للنظام لتجنب الرنين.

يعطى التردد الطبيعي عموماً بالشكل $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$، وعليه يمكن تغيير التردد الطبيعي للنظام إما عن طريق تغيير الكتلة m أو الصلابة k. لا يمكن تغيير الكتلة بسهولة، حيث أن قيمتها محددة بواسطة المتطلبات الوظيفية للنظام. على سبيل المثال، تحدد كتلة الحدافة على عمود المرافق كمية الطاقة التي يجب أن تخزنها في دورة واحدة. لذلك، فإن عامل الصلابة للنظام هو الأكثر شيوعًا في تغيير ترددانه الطبيعية. على سبيل المثال، يمكن تغيير صلابة عمود الرفاص عن طريق تغيير واحد أو أكثر من خصائصه الفيزيائية مثل المواد أو عدد ومواقع نقاط الدعم (المحامل) وهذه الطريقة يجب أن تحاكى أثناء التصميم ومن هنا تنبع أهمية هذا البحث لأن تعديل الترددات الطبيعية بعد التصميم يواجه عدة تحديات، منها:

1. تقييد الكتلة: في العديد من الأنظمة، تكون الكتلة محددة مسبقًا وفقًا لمتطلبات وظيفية معينة، مما يجعل من الصعب تغييرها. على سبيل المثال، كتلة العجلات الطائرة تعتمد على كمية الطاقة التي يجب تخزينها، مما يحد من الخيارات المتاحة لتعديل التردد الطبيعي.

2. تحديات الصلابة: تغيير صلابة النظام هو الخيار الأكثر شيوعًا لتعديل الترددات الطبيعية، ولكن ذلك يمكن أن يكون معقدًا. يتطلب الأمر أحيانًا تغييرات كبيرة في التصميم أو المواد المستخدمة، مما قد يتطلب إعادة تصميم أو إعادة بناء أجزاء من النظام.

3. التوازن بين الترددات: عند محاولة تغيير التردد الطبيعي، يجب مراعاة الترددات الأخرى في النظام. أحيانًا، قد يؤدي تعديل أحد الترددات إلى زيادة الاهتزازات في ترددات أخرى، مما يمكن أن يؤدي إلى مشاكل جديدة في الرنين.

4. التكلفة والموارد: تعديل الترددات الطبيعية قد يتطلب استثمارات كبيرة في الوقت والموارد، سواء من حيث المواد أو العمالة. هذا يمكن أن يكون عائقًا أمام العديد من المشاريع.

5. التحليل والتقييم: يتطلب فهم كيفية تأثير التغييرات على الترددات الطبيعية تحليلًا دقيقًا. في الأنظمة المعقدة، قد يكون من الصعب قياس وتوقع تأثيرات التعديلات، مما يزيد من صعوبة اتخاذ القرارات. تتطلب هذه التحديات تخطيطًا دقيقًا وتصميمًا مرنًا لضمان نجاح التعديلات المطلوبة [21].

4.2. التخميد

على الرغم من إهمال التخميد من أجل تبسيط التحليل، خاصةً في إيجاد التردّدات الطبيعية، إلا أن معظم الأنظمة تحتوي على قدر من التخميد إلى حد ما، يجب إدخال التخميد لتلبية المتطلبات الوظيفية. إذا خضع النظام لاهتزاز قسري، فإن استجابته أو سعة الاهتزاز تميل إلى أن تصبح كبيرة بالقرب من الرنين إذا لم يكن هناك تخميد. يحدّ وجود التخميد دائمًا من سعة الاهتزاز. إذا كان تردد القوة القسرية معروفًا فقد يكون من الممكن تجنب الرنين عن طريق تغيير التردد الطبيعي للنظام. ومع ذلك، قد يُطلب من النظام أو الآلة أن تعمل على نطاق واسع من السرعات، قد لا يكون من الممكن تجنب الرنين في جميع ظروف التشغيل. في مثل هذه الحالات، يمكننا إدخال التخميد في النظام لتقليل سعة الاهتزاز عند التردد الطبيعي. في بعض التطبيقات الإنشائية، يتم إدخال التخميد من خلال الوصلات. على سبيل المثال، الوصلات الانزلاقية، والتي تسمح بالانزلاق بين الأسطح، تبدد المزيد من الطاقة مقارنةً بالوصلات الملحومة، والتي لا تسمح بالانزلاق. لذلك تكون مرغوبة لزيادة تخميد النظام. ومع ذلك، فإن الوصلات الانزلاقية تقلل من صلابة النظام، وتنتج شوائب بسبب انزلاق الوصلة وتآكل الاحتكاك. على الرغم من هذا، إذا كان مطلوبًا نظام ذو تخميد عالٍ، فيجب عدم تجاهل الوصلات الانزلاقية.

كما يتم استخدام المواد اللزجة المرنة وهي مواد تجمع بين السلوك اللزج والسلوك المرن. عند تطبيق إجهاد على مادة لزجة مرنة، فإنها تستجيب بجزء مرن وجزء لزج. الجزء المرن يخزن الطاقة والجزء اللزج يبدد الطاقة على شكل حرارة. هذه الخاصية تجعل المواد اللزجة المرنة مفيدة في تطبيقات التحكم في الاهتزازات والضوضاء.

يمكن نمذجة سلوك المواد اللزجة المرنة باستخدام نموذج المعادلة التفاضلية التالية تحت تأثير إثارة بتابع جيبي والموضحة في المعادلات التالية:

$$F(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + k(1 + i\eta)x = F_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

حيث:

– m هي الكتلة – k هي الصلابة – η هو معامل الفقد (أو معامل الخسارة) – x هي الإزاحة

يعطى معامل الفقد η بالمعادلة التالية:

$$\eta = \frac{(\Delta W/2\pi)}{W} \quad (5)$$

حيث:

– ΔW هو الطاقة المبددة خلال دورة واحدة من الإزاحة التناغمية مقدراً بالراديان.

– W هو أقصى طاقة إجهاد في الدورة.

في حالة الرنين تحسب استجابة النظام الاهتزازية من المعادلة التالية حيث:a هو معامل التضخيم، E هو معامل المرونة.

$$\frac{F_0}{k\eta} = \frac{F_0}{aE\eta} \quad (6)$$

المواد اللزجة المرنة هي مواد فعالة للتحكم في اهتزازات الآلات، وتستخدم على نطاق واسع في مختلف المجالات. يمكن نمذجة سلوكها باستخدام نماذج رياضية تأخذ في الاعتبار الخصائص المرنة واللزجة معًا. تتأثر خصائص هذه المواد بالعديد من العوامل وتتميز بقدرتها على تبديد الطاقة الميكانيكية على شكل حرارة. يمكن إضافة مواد لزجة مرنة إلى النظام لزيادة التخميد. تتميز هذه المواد بخصائص ميكانيكية تعتمد على درجة الحرارة والتردد. يمكن استخدام المواد اللزجة المرنة في العديد من التطبيقات لكنها تظهر عيبًا هو أن خصائصها تتغير مع درجة الحرارة والتردد والإجهاد [21].

4.3. امتصاص الاهتزاز

عزل الاهتزازات هو إجراء يُستخدم لتقليل الآثار غير المرغوب فيها للاهتزاز. يتضمن هذا الإجراء بشكل أساسي إدخال عنصر مرن (أو عازل) بين الكتلة المهتزة (أو المعدات أو الحمولة) ومصدر الاهتزاز، بحيث يتم تقليل الاستجابة الديناميكية للنظام تحت ظروف محددة من إثارة الاهتزاز. يُقال إن نظام العزل نشط أو سلبي اعتمادًا على ما إذا كانت هناك حاجة لطاقة خارجية لكي يؤدي العازل وظيفته أم لا. يتكون العازل السلبي من عنصر مرن (صلابة) ومبدد للطاقة (مخمد). تشمل أمثلة العوازل السلبية النوابض المعدنية، الفلين، اللباد، النوابض الهوائية، ونوابض المطاط.

العازل النشط يتكون من آلية خدمية مع مستشعر، معالج إشارة، ومحرك. يتم التعبير عن فعالية العازل من حيث قابلية النقل TR والتي تُعرف بأنها نسبة سعة القوة المنقولة إلى سعة القوة المحرضة للاهتزاز.

عزل الاهتزازات يمكن تحقيقه بطريقتين الطريقة الأولى: يتم حماية القاعدة أو الأساس لآلة مهتزة ضد القوى غير المتوازنة الكبيرة (كما في حالة الآلات التبادلية والدوارة) أو القوى الارتدادية (كما في حالة آلات الطرق والضغط). يتم نقل القوة إلى الأساس من خلال النابض والخامد. القوة المنقولة إلى القاعدة تُعطى بالعلاقة:

$$F_i(t) = kx(t) + c\dot{x}(t) \quad (7)$$

إذا تغيرت القوة المنقولة إلى القاعدة تناغمياً، كما في حالة الآلات التبادلية والدوارة غير المتوازنة، فإن الإجهادات الناتجة في مسامير القاعدة تتغير أيضًا تناغمياً، مما قد يؤدي إلى فشل بسبب التعب. حتى لو لم تكن القوة المنقولة كبيرة، فيجب تقييد مقدارها إلى القيم المسموح بها بأمان.

الطريقة الثانية: يتم حماية النظام ضد حركة أساسه أو قاعدته (كما في حالة حماية أداة أو معدات حساسة من حركة حاويتها). إذا تم تمثيل الأداة الحساسة كنظام ذو درجة حرية واحدة، فإن القوة المنقولة إلى الأداة تُعطى بالعلاقة:

$$F_t(t) = m\ddot{x}(t) = k[x(t) - y(t)] + c[\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] \quad (8)$$

حيث $(x(t) - y(t))$ و $(\dot{x}(t) - \dot{y}(t))$ تشير إلى الإزاحة النسبية والسرعة النسبية للنابض والمخمد على التوالي. في العديد من المشكلات العملية، يجب تصميم الحزمة بشكل صحيح لتجنب نقل قوى كبيرة إلى الأداة الحساسة لتفادي التلف.

الخلاصة يمكن التحكم بالاهتزازات من خلال:

- التحكم بالترددات الطبيعية للنظام وتجنب العمل بتردد الطنين الموافق لتردد قوى الاحمال الخارجية المطبقة.
- منع الاستجابة المفرطة من خلال التخميد المناسب في الموقع المناسب لنظام دفع السفينة.
- تقليل انتقال القوى المحرضة للاهتزاز من عنصر لأخر في النظام باستخدام اجهزة لامتصاص الاهتزازات [21].

النتائج والمناقشة:

يعرض الجدول 4 الاستجابة الاهتزازية لنظام الدفع المدروس في هذا البحث وفق برنامج الـ SolidWorks حيث تم قياس الاستجابة من نقط واقعة على مساند الارتكاز(العناصر7،8،9 على الشكل 2)وذلك عند كل سرعة على حده، تتراوح الترددات الطبيعية بين 8.4 و 29 HZ والتي تعتمد على كتلة وصلابة النظام كما ذكر سابقاً، كما تم حساب الترددات القسرية لكل من المحرك والرفاص وفق المعادلتين (1) و(2) حيث تم اعتماد(Z=4 M=1/2 I=6 والثابت k تم اعطاءه قيم بين 1 الى 24) كذلك تم استخراج إزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز عند كل من السرعتين 50 و 425 وذلك بكل من الاتجاهين العمودي V والموافق للاتجاه z وكذلك بالاتجاه الافقي H الموافق للاتجاه X لكل من عمود الرفاص (العنصر 3 في الشكل 2) والعمود المتوسط (العنصر4 في الشكل 2) والمعبر عنهما بالعنصر رقم 1 في الجدول 3 والشكل 5.

من الجدول 4 يتضح التداخل الكبير بين قيم الترددات الطبيعية والترددات الخارجية المفروضة من شروط العمل (يوجد ترددات لقوى قسرية أخرى لم يناقشها هذا البحث) وبالتالي احتمال الطنين سيكون كبير وبالتالي إزاحة كبيرة للاهتزاز لولا وجود المخمد (العنصر18 في الشكل 2) ومع ذلك سيحدث مطال عالٍ للاهتزاز سيسبب اجهادات عالية وتعب لبعض أجزاء المنظومة يمكن تحديدها بدقة من خلال برنامج الـ SolidWorks لكنها خارج موضوع هذا البحث. كذلك يتضح من خلال الجدول 4 أن بعض قيم الاستجابة لإزاحة الاهتزاز بالاتجاه العمودي 0.45 و0.5 عند السرعة 50 rpm حيث يعتبر التردد المسيطر هو التردد الأول للمحرك والبالغ 5 Hz حيث تعتبر إزاحة الاهتزاز هي البارامتر المميز للحالة الاهتزازية كما ذكر سابقا أي قيمة مطال الاهتزاز المسموح بها وفق الجدول 3 الجدول 3هي 0.15 mm قد تجاوزت الحد المسموح به لهيئة التصنيف البولونية ويفسر هذا التجاوز أثناء الإقلاع بالمرور بمجال السرعة الحرج والذي غالبا ما يحدث فيه الطنين. وكذلك عند السرعة 425 rpm حيث يسيطر التردد 21 Hz سيكون البارامتر المميز هو تسارع الاهتزاز وتبلغ القيمة المسموحة من 0 وحتى 15 m/s^2 لكن قيمته بلغت 17.1 في الاتجاه العمودي لعمود الرفاص أي تجاوزت الحد المسموح بقليل سيعمل هذا البحث على اقتراح ومحاكاة بعض الطرق التي من شانها التأثير على الترددات الطبيعية لإبعادها قدر المستطاع عن الترددات القسرية وكذلك تخفيف الاستجابة الاهتزازية للمنظومة لتبقى ضمن الحد المسموح به، كل هذا ما كان ليتم لولا إمكانية المحاكاة الرقمية لأنه من الصعب عمليا التنبؤ بتأثير بارامتر معين على الاستجابة الاهتزازية للمنظومة عموما، أي من الممكن أن تخفف طريقة ما الاستجابة

الاهتزازية لعمود الرفاص والعمود المتوسط لكنها قد تزيدها في مكان أخر وتساعدنا تقنيات الواقع الافتراضي بعدم الوقوع بهذه المشكلة، ومن بعض هذه الطرق نذكر التالي:

الجدول 4: قيم الاستجابة الاهتزازية لنظام الدفع وفق SOLID WORKS.

تسارع الاهتزاز m/s^2		سرعة الاهتزاز mm/s		إزاحة الاهتزاز mm		الترددات القسرية HZ					السرعة RPM		الترددات الطبيعية HZ				
العمود المتوسط	عمود الرفاص	العمود المتوسط	عمود الرفاص	العمود المتوسط	عمود الرفاص												
V (18.3) H (13.4)	V (20.1) H 15.02)	V 8.01) H 3.45)	V 9.80) H 4.05)	V 0.45) H (0.31)	V (0.5) H 0.31)	45	30	15	10	5	محرك	50	29	16.8	15.9	9.8	8.4
						13.3	10	6.66	1.6	0.8	رفاص						
V (15) H 8.91)	V (17.1) H (9.5)	V 14.5) H 11.2)	V 15.0) H 11.5)	V 0.35) H (0.34)	V 0.45) H 0.37)	105	84	63	42	21	محرك	425					
						113	85	56.6	14.1	7	رفاص						

4.4. زيادة صلابة العمود

كما ذكر سابقاً يعطى التردد الطبيعي بالشكل $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ وعليه سيزداد مع زيادة الصلابة k ويهدف تغيير الصلابة لأبعاد الترددات الطبيعية عن الترددات القسرية وتتم زيادة الصلابة عن طريق تغيير المرونة الالتوائية، تم إنقاص المرونة الالتوائية للعناصر 3 و4 و5 و6 بنسبة 5% فزادت الصلابة الالتوائية لها بمقدار 8% مما أدى لزيادة وسطية بنسبة 6% في قيم الترددات الطبيعية الخمسة الأولى وهذا يجعل قيمها ضمن نطاق الترددات القسرية وعليه زيادة الصلابة طريقة غير فعالة في النظام المدروس.

4.5. تقليل صلابة العمود

بناء على ما ذكر سابقا يجب ان تنخفض قيم الترددات الطبيعية للنظام مع إنقاص الصلابة k ويتم ذلك من خلال زيادة المرونة الالتوائية لعناصر المنظومة، يتوقع هبوط مستوى الاجهاد وكذلك الاستجابة الاهتزازية للنظام. تمت زيادة المرونة لأجزاء العمود (3،4،5،6) بنسبة 10% وأدى ذلك الى انخفاض الترددات الطبيعية بنسبة 5% ويعد هذا الانخفاض غير مجد لكن إنقاص صلابة المخمد (العنصر18) بنسبة 10% أدى الى انخفاض الاجهاد الاعظمي بنسبة 4% وهذه نتيجة جيدة ويتم خفض صلابة المخمد باستخدام نوابض فولاذية خاصة أو أنواع خاصة من السوائل الهيدروليكية المستخدمة فيه.

4.6. تغيير نسبة التخميد

من الطبيعي أن المزيد من التخميد في النظام تؤدي الى تقليل الاهتزازات، يتم ذلك عن طريق زيادة معامل التخميد C (زيادة معاملات رايلي ريتز في SolidWorks) أو إضافة مخمدات أخرى الى النظام (تعديل التصميم)، يلاحظ أن زيادة التخميد لا يؤثر على الترددات الطبيعية حيث يتم تعديل تخميد العمود أولا ثم تعديل تخميد الكتل الدوارة:

تعديل تخميد العمود:

إن زيادة معامل التخميد في المخمد (العنصر 18) الى الضعف أدى الى أنقاض الاهتزازات في الأماكن القريبة من المحرك بنسبة 20% وقد زادت في أماكن أخرى كعمود الرفاص مثلاً بنسبة 13% لذلك لا يعد زيادة التخميد فعالاً دون دراسة دقيقة لتأثيره على الاهتزاز في كافة نقاط المنظومة.

تعديل تخميد الكتلة:

تم زيادة التخميد للرفاص الى 0.05 مما أدى الى إنقاص الاهتزازات على مستوى المنظومة بحدود 4% وتم ذلك من خلال استخدام البيانات المصنعية للرفاص ومنحني التخميد المرافق.

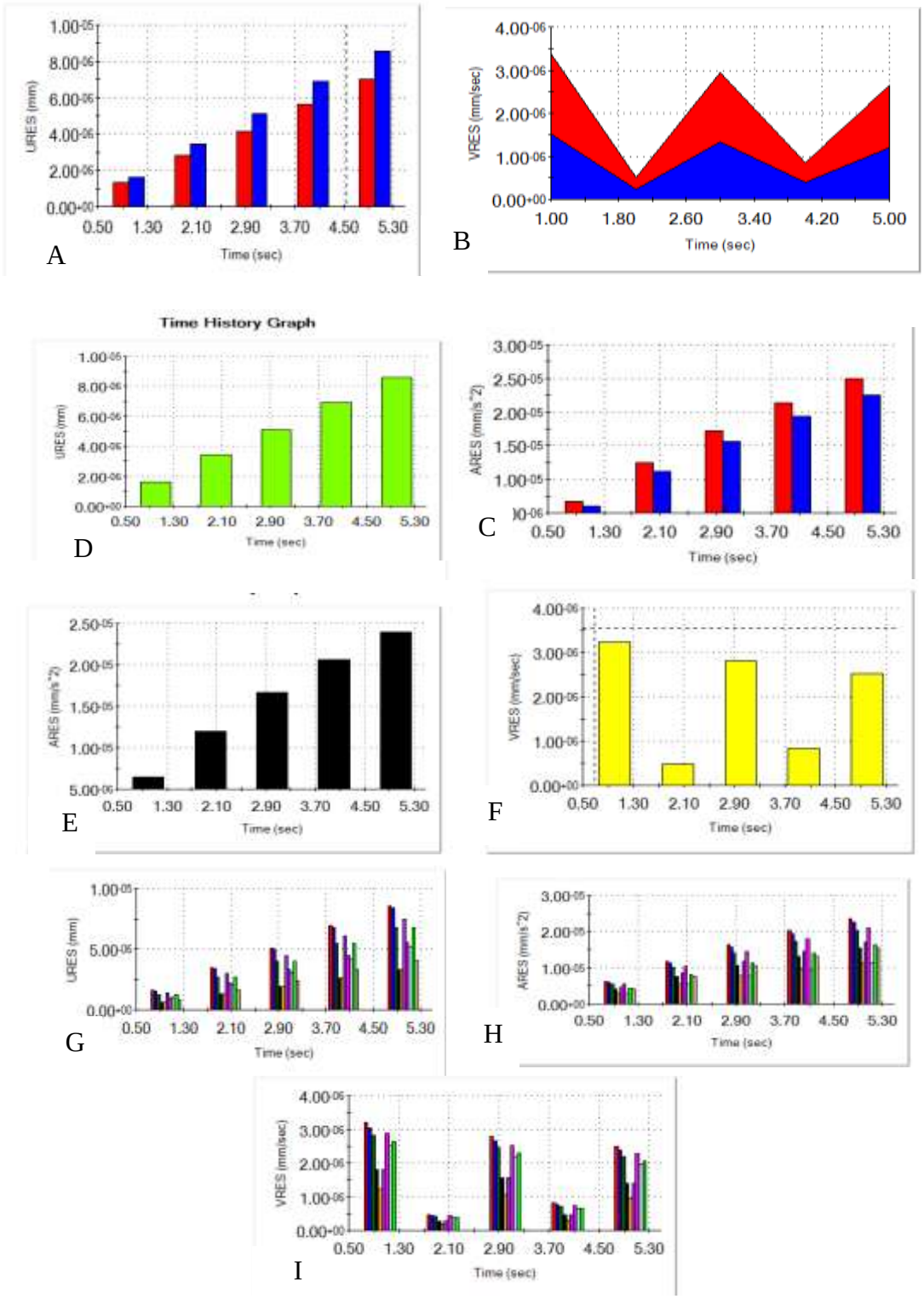
4.7. إضافة تخميد في العمود المتوسط

يؤدي ادخال التخميد في العمود المتوسط الى استجابة اهتزازية جيدة وذلك في الأجزاء الواقعة بعد المحرك من جهة الرفاص ويتم ذلك من خلال زيادة المرونة الالتوائية لهذا الجزء من العمود وبالتالي تقليل صلابته وذلك باستخدام المادة المناسبة. حيث أن تقليل صلابته أي زيادة معدل تخميده بنسبة 10% أدى لتحسن ملحوظ في الاستجابة الاهتزازية بحدود 20% في بعض المواضع على طول المنظومة بعد المحرك من جهة الرفاص.

يمكن ايضاً محاكاة طرق أخرى قد تكون مفيدة في تخفيف شدة الاستجابة الاهتزازية لنظام الدفع بشكل عام لم يناقشها هذا البحث ومنها: التغيير بتصميم المحرك وتوزيع كتل الموازنة– التعديل بتصميم الرفاص أو استخدام الرفاص متغير الخطوة اسناد المساند على نوابض مرنة – استخدام مادة شديدة اللزوجة أثناء الإقلاع ثم تغييرها بعد بدء العمل– استخدام قارنات مرنة– تغيير مواقع المساند.

4.8. منحنيات الاستجابة الاهتزازية

تم الحصول على التمثيل البياني للاستجابة الاهتزازية لكل من إزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز خلال الإقلاع وذلك لكل من عمود الرفاص والعمود المتوسط في الشكل 6 (A, B, C)على الترتيب حيث يمثل اللون الأحمر العمود المتوسط واللون الأزرق يمثل عمود الرفاص، كذلك تم تمثيل الاستجابة الاهتزازية لإزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز للمنظومة مجتمعة في الشكل 6 (D, E, F) على الترتيب ويمثل الشكل 6 (G, H, I) الاستجابة الاهتزازية لإزاحة وسرعة وتسارع الاهتزاز لمختلف عناصر المنظومة منفردةً على الترتيب خلال أول 5 ثواني من الإقلاع، تفيد هذه المنحنيات في تقدير زمن العبور في مجال السرعة الحرج وتحديد مستويات الاجهاد التي ستتعرض لها المنظومة خلال كل عملية إقلاع.



الشكل 6: منحنيات الاستجابة الاهتزازية خلال إقلاع منظومة دفع السفينة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

من أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها من هذا البحث:

- يجب استخدام تقنية العناصر المنتهية والمتوفرة ضمن برنامج الـ SolidWorks لمحاكاة الاستجابة الاهتزازية لمنظومة دفع السفينة في المراحل الأولى من تصميم المنظومة لأن ذلك الأمر يساعد وبشكل كبير في تفادي الكثير من المشاكل التي من الممكن أن تتعرض لها المنظومة بفعل الاهتزازات أثناء العمل في الظروف الحقيقية.
- إجراء الحسابات الاهتزازية في المراحل الأولى من التصميم يساعد في إمكانية تعديل الترددات الطبيعية للمنظومة ككل من خلال تغيير توزع الكتل أو أي إجراء آخر الأمر الذي يساعد في تفادي حالة الطنين أثناء الخدمة.

التوصيات:

من خلال هذا العمل نوصي باستخدام برنامج الـ SolidWorks لإجراء هذه الحسابات الرقمية لمنظومات الدفع البحرية من المراحل الأولى في تصميم المنظومة، لأن هذه الحسابات تساعدنا في توقع سلوك المنظومة في ظروف العمل الحقيقية الأمر الذي يساعد في بناء المنظومة بأفضل شكل ممكن.

التوصيات للأعمال المستقبلية

من أهم التوصيات للأعمال المستقبلية نوصي بما يلي:

- يجب إجراء محاكاة لاهتزاز جميع عناصر منظومة الدفع عند شروط عمل مختلفة ومحاكاة مختلف أنواع القوى الأخرى المسببة للاهتزازات وذلك أثناء عملية التصميم الأولية لمحطة الدفع لتجنب الأعطال الفجائية وتعب المنظومة أثناء الاستثمار.
- يجب اجراء دراسة للاستجابة الاهتزازية بشكل عام وبوقت واحد وذلك لتجنب التأثير السلبي على بعض أجزاء منظومة الدفع أثناء اقتراح الطرق لتحسين الاستجابة الاهتزازية لعنصر محدد فيها.

References:

[1] A. K. Costain, B. S. Eng, J. M. Robichaud, and P. Eng, "Practical Methods for Vibration Control of Industrial Equipment."

[2] P. G. Dylejko, N. J. Kessissoglou, Y. Tso, and C. J. Norwood, "ARTICLE IN PRESS Optimisation of a resonance changer to minimise the vibration transmission in marine vessels," vol. 300, pp. 101–116, 2007, doi: 10.1016/j.jsv.2006.07.039.

[3] F. J. Domínguez Ruíz, "Analysis of most frequent cases of vibration in propulsion systems," *Cienc. y Tecnol. buques*, vol. 7, no. 13, p. 65, 2013, doi: 10.25043/19098642.85.

[4] H. Rimstad, "Dynamic Modelling , Vibration and Fatigue Analysis of Slow Rotating Propulsion Systems," no. July, 2018.

[5] M. Chen, H. Ouyang, W. Li, D. Wang, and S. Liu, "applied sciences Partial Frequency Assignment for Torsional Vibration Control of Complex Marine Propulsion Shafting Systems," 2020.

[6] X. Xie, M. Ren, D. Yang, and Z. Zhang, "Simulation and experiment on tonal vibration transmission control with a multi-channel global control method," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 138, p. 106563, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106563.

[7] B. Iasi-ro, "PARAMETRIC OPTIMIZATION AND CALCULATION OF VIBRATIONS INTRODUCTED BY PROPULSION INSTALLATION," pp. 15–28, doi: 10.2478/9788395720413-002.

[8] G. N. On, "Guidance Notes on Ship Vibration May 2021," no. May, 2021.

[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 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.
[15] 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.
[16] 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.
[17] 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.
[18] 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.
[19] 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.
[20] Polski Rejestr Statków., *Prevention of vibration in ships*, no. 2. 2004.
[21] S. S. Rao and F. F. Yap, *Mechanical vibrations*, vol. 4. Addison-Wesley New York, 1995.