

قياس القوة المحظورة باستخدام الأعمدة ونظام اختبار صندوق التروس على أساس إشارة الاهتزاز

الصدیق ابوزید ابوحنيك

قسم الفيزياء، كلية التربية، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا.
البريد الإلكتروني: al.abohnik@asmarya.edu.ly

Measuring Blocked Force Using beams and Gear Box Testing System Based on Vibration Signal

Alsdeg A. Abohnik

Physics Department, Faculty of Education, Alasmarya Islamic University, Zliten, Libya.

Received: 15 November 2023; Revised: 08 December 2023; Accepted: 22 December 2023.

الملخص

تصف هذه الدراسة طريقة القوة المحظورة (المعيقة) (Blocked force) وتناقش بعض الفوائد المحتملة في استخدام هذه الطريقة في سياق مراقبة الحالة (للآلات الدوارة). طريقة القوة المحظورة هي نهج عكسي يتم فيه نشر إشارات الاهتزاز المقاسة مرة أخرى إلى موقع أقرب إلى مصدر الاهتزاز باستخدام وظائف استجابة التردد المقاسة مسبقاً. ناتج الحساب العكسي هو القوة المحظورة التي لا يمكن قياسها مباشرة ولكن يمكن أن تسفر عن ميزتين مهمتين لتطبيقات الآلات الدوارة. أولاً، في حين أن إشارات الاهتزاز في علب الماكينة تحتوي على تأثيرات الإثارة من جميع المكونات النشطة، فإن القوى المحظورة خاصة بمصدر معين. وبالتالي، ومن خلال نشر الإشارات مرة أخرى إلى قوة محظورة، من الممكن فصل الإشارات عن المكونات المختلفة، يمكن بعد ذلك استخدام طرق معالجة الإشارات التقليدية مع إشارة أنظف كنقطة انطلاق. ثانياً: في ظل افتراضات معينة، تكون القوى المحظورة خاصية جوهرية لمصدر الاهتزاز. وهذا يعني أنها يمكن أن توفر رؤية قيمة لمصدر الاهتزاز وتساعد في تحديد الأخطاء أو التشوهات المحتملة. بشكل عام، توفر طريقة القوة المحظورة طريقة قوية لمراقبة الحالة من خلال استخراج القوى المحظورة واستخدامها للتحليل واكتشاف الأخطاء.

الكلمات الدالة: القوة المحظورة، العمود، نظام الاختبار، ماتلاب، الاهتزازات.

Abstract

The Blocked Force Method has been stated in this study. A discussion of some promising benefits of using this method in the context of condition monitoring (CM) for rotating machinery also has been described. The Blocked Force Method is an inverse method where measured vibration signals are sent back to a position nearer to the source of vibration utilizing pre-measured frequency response functions (FRFs). The blocked force is obtained as a result of the inverse calculation, which can be measured only indirectly. This procedure can lead to two important benefits for CM applications. Firstly, the blocked forces are exact to a particular source, while vibration signals in machine casings comprise excitation effects from all active components. Therefore, by re-deploying the signals back to blocked forces, it is probable to spread out the signals from different components. Traditional techniques of signal processing can be applied with a cleaner signal as an initial point. Secondly, based on specific assumptions, blocked forces are an inherent property of the vibration source. This means that they can provide valuable insight into the source of vibration and help identify potential faults or abnormalities. Overall, the Blocked Force Method offers a powerful approach to condition monitoring by extracting blocked forces and utilizing them for analysis and fault detection.

Keywords: Blocked force, Shaft, Test system, Matlab, Vibrations.

1. المقدمة

تعتمد نظرية تقنية القوة المحظورة على مبدأ أن القوى الناتجة عن آلة أو مكون اهتزازي مستقلة عن وجود أي مكون أو نظام استقبال آخر. هذا يعني أنه يمكن قياس القوى المحظورة للآلة في بيئة واحدة ثم استخدامها للتنبؤ باستجابة اهتزاز الماكينة في بيئة أخرى. وتتضمن تقنية القوة المحظورة الخطوات التالية:

- قياس استجابة الاهتزاز للآلة أو المكون في بيئة التشغيل العادية.
- استخدام تقنية رياضية تسمى دالة استجابة التردد (Frequency Response Function- FRF) لحساب القوى المحظورة التي ستكون مطلوبة لإنتاج الاستجابة المقاسة. دالة استجابة التردد هي تمثيل رياضي يصف العلاقة بين المدخل والمخرج لنظام ما في مجال التردد. توضح كيفية استجابة النظام لترددات المدخل المختلفة. في الهندسة والفيزياء، يتم تحليل الأنظمة عادة بناءً على استجابتها الترددية لفهم سلوكها تحت مدخلات التردد المختلفة. حيث توفر دالة استجابة التردد معلومات قيمة حول سلوك النظام، مثل الزيادة (استجابة القدرة) والتحول في الزمن (استجابة المرحلة) عند الترددات المختلفة.

- استخدام القوى المحظورة للتنبؤ باستجابة اهتزاز الماكينة في بيئة مختلفة، مثلاً عندما يتم تركيبها على هيكل جهاز استقبال مختلف أو عندما تعمل في ظل ظروف مختلفة.

عملية انعكاس FRF معقدة وتتطلب دراسة متأنية للافتراضات التي يتم إجراؤها. ومع ذلك، عند القيام بذلك بشكل صحيح، يمكن أن تكون تقنية القوة المحظورة أداة فعالة للغاية للتنبؤ باستجابة اهتزاز الآلات في بيئات مختلفة. تتميز تقنية القوة المحظورة بعدد من المزايا مقارنة بالطرق الأخرى للتنبؤ باستجابة الاهتزاز. إنه مفيد بشكل خاص للتنبؤ باستجابة الاهتزاز للآلات والأنظمة المعقدة، حيث يكون من الصعب أو المستحيل قياس استجابة الاهتزاز لجميع المكونات الفردية. إن قياس القوة المحظورة هو قياس القوى التي ستطبقها آلة أو مكون اهتزازي على حدود صلبة تماماً. وهي أداة مفيدة لفهم مصدر الاهتزاز والضوضاء في أغلب الأجهزة، ولتصميم تدابير فعالة لعزل الاهتزاز وتقليل الضوضاء كما في الغسالات وغيرها. كما يمكن قياس القوى المحظورة بشكل مباشر أو غير مباشر. حيث إن القياس المباشر ممكن فقط إذا كان من الممكن عزل الماكينة أو المكون عن محيطه وتركيبه على حدود صلبة، غالباً ما يكون هذا صعباً في الممارسة العملية.

القياس غير المباشر للقوى المحظورة أكثر شيوعاً، حيث يتضمن قياس استجابة الاهتزاز للآلة أو المكون في بيئة التشغيل العادية، ثم استخدام تقنية رياضية تسمى دالة استجابة التردد (FRF) لحساب القوى المحظورة التي ستكون مطلوبة لإنتاج الاستجابة المقاسة. يعد قياس القوة المحظورة أداة قوية تستخدم في مجموعة متنوعة من الصناعات، بما في ذلك الفضاء والسيارات والتصنيع وتوليد الطاقة. بشكل أساسي، يمكن استخدامها لتشخيص المشكلات المتعلقة بالمنتجات الحالية، ولتطوير وتنفيذ تدابير عزل الاهتزاز وتقليل الضوضاء. فيما يلي بعض الأمثلة على تطبيقات قياس القوة المحظورة:

- تصميم عوازل الاهتزازات للمحركات والآلات الأخرى.
- تصميم إجراءات الحد من الضوضاء لكبائن الطائرات والمركبات الأخرى.
- تشخيص أسباب مشاكل الاهتزاز والضوضاء في الآلات.

• دراسة تأثير الاهتزازات على أداء المعدات الإلكترونية.

قياسات التسارع والتسارعية (acceleration and accelerance) هما الخطوتان في عملية القياس اللازمة لتحديد القوى المحظورة. يتم توضيح نمج القوة المحظورة باستخدام جهاز الاختبار، والذي سيتم مناقشته لاحقاً. ميزة التقنية العكسية هي أنها تسمح بالتخلي عن إجراء قياسات مباشرة للكمية المقصودة - القوة في هذه الحالة - عن طريق قياس التسارع بدلاً من ذلك، وهو رقم يسهل الحصول عليه ويمكن الحصول على الكمية المقصودة منه (Elliot et al., 2007). ومع ذلك، لا يزال تحديد القوة العكسية موضوعاً للخبراء، حتى مع وجود سجل بحثي جيد وعدد كبير من المنشورات حول هذا الموضوع. تعد الكفاءة الفنية في قياس التسارع ضرورية للحصول على مصفوفات التسارع، كما أن الحكم في إعدادات المعلمات للإفراط في التحديد والتنظيم ضروري للتعامل مع معالجة البيانات اللاحقة (Mas et al., 1994).

نظراً لأنه من الصعب في كثير من الأحيان قياس أو محاكاة القوى الداخلية، عادةً ما يتم استخدام قوى واجهة تشغيلية ماثلة بدلاً منها. يعد تثبيت محولات الطاقة على واجهة الاتصال لقياس القوة المحظورة بشكل مباشر تحدياً كبيراً في معظم سيناريوهات العالم الحقيقي (Höller, 2013). كما أوضح إلبوت ومورهاوس (Elliot & Moorhouse, 2008) وكذلك (Lennström et al., 2016)، بأنه يمكن حساب القوة المحظورة باستخدام تسارع الواجهة (The interface acceleration)، وتسارع بنية المصدر والمستقبل المدمج (Combined Source-receiver structure's accelerance)، من المحتمل أن يتم وضع مقاييس التسارع بالقرب من اتصال المصدر والمستقبل. ومع ذلك، سيكون من الصعب قياس التسارع. حيث تستخدم فكرة فحص التبادلية لتمكين استخدام مواضع القياس عن بعد، مما يساعد على التغلب على هذه المشكلة والحصول على نتائج أكثر دقة. تم إنشاء هذه التقنية بناءً على التحقق التجريبي المذكور في (Moorhouse et al., 2009; & Abohnik, 2018) باستخدام عارضتين (لوحين) متوازيتين متصلتين في مكانين.

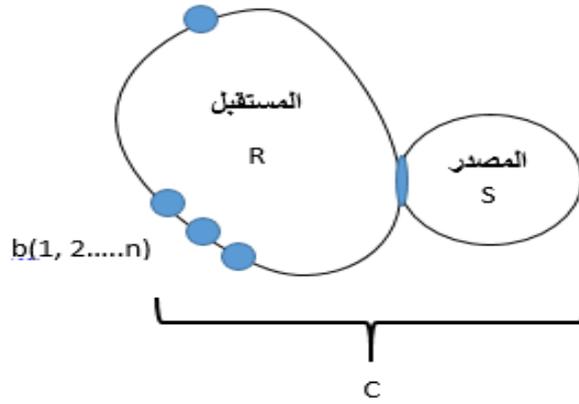
2. الواجهة والمصدر والمستقبل (Interface, Source, and Receiver)

يمكن تقسيم أي بنية إلى مصدر وجهاز استقبال مقترن بالواجهة كما يظهر الشكل (1). جهاز الاستقبال هو الجزء المتبقي من التجميع، في حين أن المصدر عبارة عن منطقة عشوائية تضم كل مكون تشغيلي. يعد موقع الواجهة خياراً مهماً ولكنه اختياري إلى حد ما طالما أن آليات المصدر جميعها مضمنة داخل المصدر.

من الناحية التجريبية، يعد اختيار مكان وضع مقاييس التسارع قراراً مهماً للغاية. لتحديد الواجهة، سنبدأ ببنية عارضتين بطريقة بسيطة حيث تكون الواجهة عبارة عن نقطتين مقترنتين لحزم المصدر والمستقبل. علاوة على ذلك، بالنسبة للهيكل الأكثر تعقيداً (جهاز اختبار علبة التروس)، هناك خياران للواجهة يتم التحقيق في أحدهما، يتضمن "المصدر" العمود، وفي الثاني يشمل فقط المنطقة الضيقة التي تحتوي على نقاط الشبكة. بالنسبة لجهاز اختبار علبة التروس، يبدأ الأمر بالواجهة التي تعتبر محملين داعمين والعمود لتحديد القوة المحظورة في تلك المنطقة. كان الهدف هو حساب القوة المحظورة عند الواجهة القريبة من نقاط ربط التروس (Abohnik et al., 2022).

تستخدم النقطة (c) عند درجة من الحرية (درجة الحركة المستقلة لجسم ما) (Degree of Freedom) للفصل بين المصدر والمستقبل. بينما (b) يتم تعيين نقاط DoF على جهاز الاستقبال والتي سيتم استخدامها لاحقاً لتصنيف القوى المحظورة

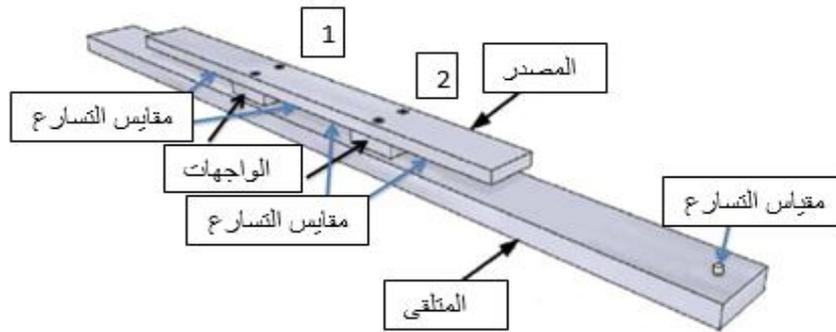
و (R) هي النقطة المرجعية البعيدة على جهاز الاستقبال غير الموجودة في (b) وسيتم استخدامها لأغراض التحقق من صحة القوة المحظورة.



شكل 1. رسم تخطيطي عام للمصدر وجهاز الاستقبال والواجهة

3. تجربة القوة المحظورة باستخدام اللوحين (Beams)

قبل إجراء قياسات القوة المحظورة على منصة الاختبار (الأجهزة الدوارة)، كان من الضروري التأكد من الطريقة (القوة المحظورة) على نظام أبسط وأكثر تحكماً. في التطبيق الفعلي، سيتم دعم مصدر الاهتزاز الحقيقي من خلال العديد من جهات الاتصال. يظهر الشكل (2) تكوين اقتران الحزمة (العوارض أو اللوحين Beams) التجريبي لهذا الاختبار. تم استخدام نقطتين عبر قدمين 4 cm^2 للاقتران القوي بين المصدر والمستقبل. أجبرت البراغي الهياكل على الاقتران في المستوى، مما أدى إلى اقتران المصدر وجهاز الاستقبال بشكل صارم. تم استكشاف القياس البعيد (عن بعد) للقوى المحظورة باستخدام اللوحين كما موضح في الشكل (2).



شكل 2. رسم تخطيطي لوحين (عارضتين) مقترنتين عند نقطتين: يُظهر رسماً توضيحياً للمصدر (بقاعدتين 4 cm^2 قدم) مقترناً بحزمة جهاز الاستقبال بشكل صارم، يشير 1 و 2 إلى الواجهات، ويتم تثبيت أربعة مقاييس تسارع أسفل اللوح العلوي ومقياس تسارع واحد كنقطة بعيدة (نقطة مرجعية) على اللوح السفلي.

تم استكشاف قياس القوى المحظورة عن بعد باستخدام تكوين الشعاع الموضح في الشكل أعلاه. أظهرت دراسات كل من (Elliott & Moorhouse, 2008; and Moorhouse et al., 2011) كيف يمكن استخدام القوى المحظورة في الموقع باستخدام حالة معينة من المعادلة، $a_{Cb} = A_{Rbc} f_{Cc}$ ، ويمكن استخدامها للتنبؤ بكيفية سلوك المصدر عند تركيبه في إعداد جديد (منزل). كما تم إظهار أن التنبؤات الأفضل تتم كلما تم تضمين المزيد من درجات الحرية (Dofs) في التوصيف (Moorhouse et al., 2009).

1.3. إعداد القياس

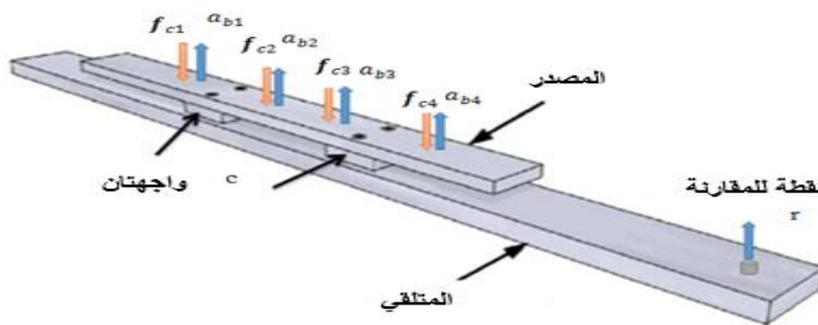
تم اعتبار اللوح العلوي كمصدر بينما تم اعتبار اللوح السفلي هو جهاز الاستقبال. تم تركيب مقاييس التسارع أسفل اللوح العلوي واستخدمت مطرقة القوة للإثارة فوق كل نقطة بدورها (كانت "النقاط المثارة" فوق مقاييس التسارع مباشرة). تم استخدام مقياس التسارع المرجعي المثبت على اللوح السفلي للتحقق من صحة القوى المحظورة من خلال مقارنة التسارع المقاس والمتوقع (المكون باستخدام القوى المحظورة المكتسبة).

2.3. قياس التسارعه (Accelerance)

يظهر في الشكل (3) رسم توضيحي لقياسات مصفوفة التسارع. هنا، تم اختيار أربعة مواضع لوصف واجهة المصدر والمستقبل، وكانت هذه المواضع أعلى مقاييس التسارع مباشرة. تم استخدام مطرقة القوة لإثارة كل نقطة على لوح المصدر العلوي (كل نقطة من هذه المواضع)، وتم ترتيب التسارع الناتجة في المصفوفة كما موضح بالمعادلة (1)،

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{31} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{41} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \dots (1)$$

حيث 4×4 هو عدد القوى والاستجابات. (A_{11}) تمثل دالة نقل بين قوة التأثير عند النقطة f_{c1} والاستجابة عند النقطة a_{b1} . A_{12} دالة نقل بين قوة التأثير عند النقطة f_{c1} والاستجابة عند النقطة a_{b2} ، وهكذا، في المعادلة (1).



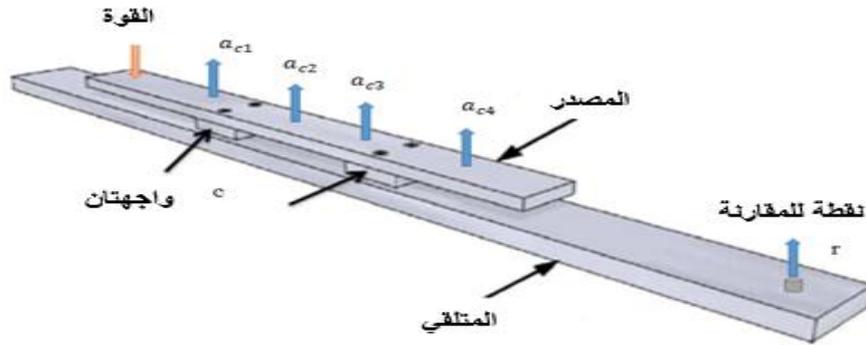
شكل 3. رسم تخطيطي للنظام (المصدر والاستقبال المثالي لتوضيح قياس تسارع النظام المزوج). الأسهم البرتقالية هي القوى المطبقة (ضربات المطرقة) والأسهم الزرقاء هي نقاط الاستجابة لقياس FRF

ومن المهم أن يتم فحص جميع القياسات للتأكد من تماسكها أثناء تنفيذها. حيث تقدم هذه الورقة تقريرًا عن فحص التسارع الذي تم إجراؤه باستخدام فحص التبادلية.

3.3. قياس التسارع (Acceleration)

الشكل (4) يوضح قياس "التسارع". تُستخدم المطرقة لمحاكاة القوى الداخلية، ولهذا السبب فهي ليست تسارعات تشغيلية حقيقية. تم تطبيق الإثارة عند نقطة واحدة على لوح المصدر العلوي وقياسات الاستجابة التي تم إجراؤها باستخدام الواجهة ومقياس التسارع المرجعي البعيد. يتم ترتيب التسارع، المشار إليه (أ)، في متجه كما هو موضح في المعادلة (2).

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \dots\dots (2)$$



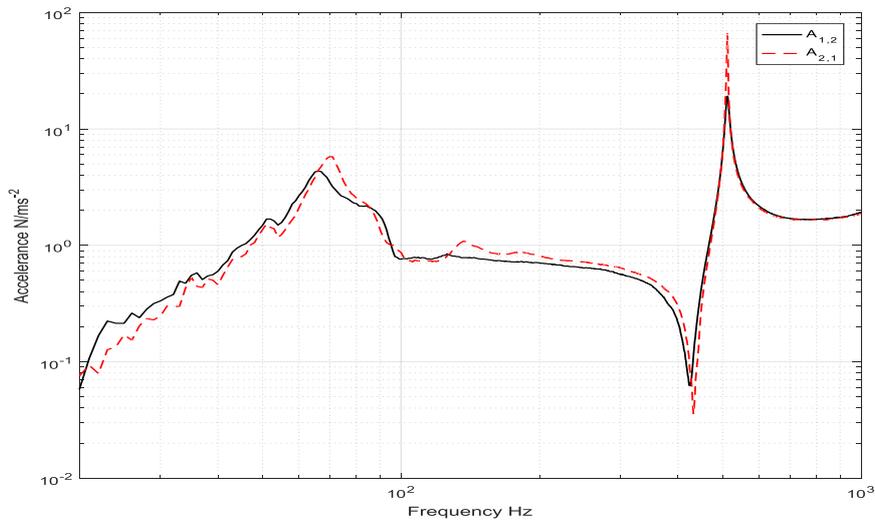
شكل 4. الرسم التخطيطي لمجموعة المصدر والمستقبل يوضح قياس "تسارع" الحزمة المزدوجة عند كل نقطة. السهم البرتقالي هو القوة المطبقة والأسهم الزرقاء هي نقاط الاستجابات لقياس "التسارع".

وبالرجوع مرة أخرى إلى الشكل (4) يتبين أن النقاط التي يتم قياس التسارع فيها تتوافق مع تلك المدرجة في مصفوفة التسارع، كما في الشكل (3). القياسات الوحيدة المطلوبة عند نقاط الاتصال هي استجابات التسارع (الخطية والزاوية) لقوة الإثارة البعيدة (الخطية فقط). إذا تم تضمين قياسات إضافية، أي نقاط أكثر بعدًا من حاصل ضرب عدد نقاط الاتصال ودرجات الحرية (DoFs)، فيمكن المبالغة في تحديد المشكلة (Mas et al., 1994; and Abohnik, 2018). يسمح الجمع بين هذين القياسين (التسارع و"التسارعيه") بحساب القوة المخظورة للمصدر.

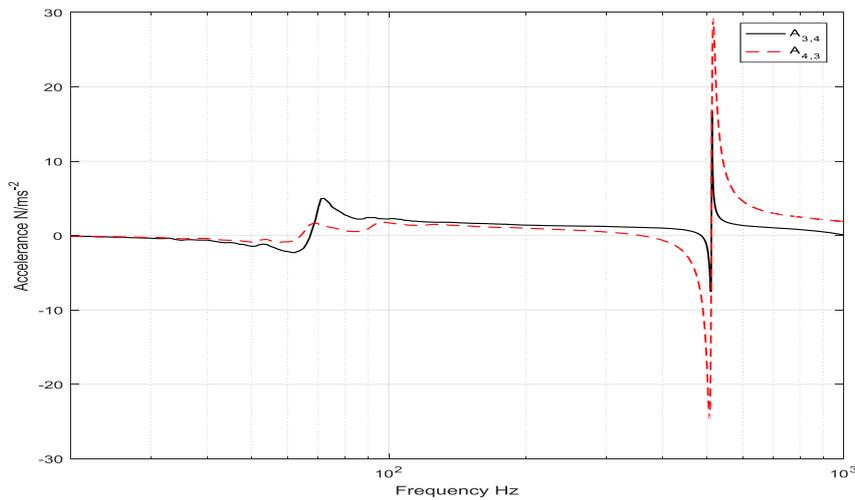
4.3. فحص معالجة البيانات المسبقة

في القسم السابق تم شرح طريقة القياس العكسي. في هذا القسم، تم وصف أهمية إجراء فحوصات أولية للحصول على البيانات صحيحة، وسعة التسارعيه والطور. تعد المعاملة التبادلية (reciprocity) إحدى الطرق العديدة للتحقق من البيانات وتلعب دورًا مهمًا مع مصفوفة التسارعيه (The accelerance matrix). لذا يجب أن تكون مصفوفة تسارع السطح البيئي المقاسة متبادلة (FRF)، أي يجب أن تكون المصفوفة متماثلة بشكل معقد. ومع ذلك، إذا لم تكن متبادلة، فقد تؤدي إلى مشاكل في تحديد

القوة المحظورة. وبالتالي، من المهم جدًا التحقق من البيانات قبل محاولة الإجراءات العكسية وإحدى طرق القيام بذلك هي مقارنة القيم المتبادلة. ولتحقيق ذلك، يجب إجراء تجارب مختلفة لقياس البيانات والتحقق منها. يوضح الشكلان (5) و (6) أمثلة على المعاملة التبادلية للتسارعية. تظهر جميعها توافقًا جيدًا عبر نطاق التردد بأكمله. تُظهر المعاملات التبادلية الأخرى مستويات مماثلة من الاتفاق، ولكن على الرغم من أن عمليات التحقق من المعاملة بالتبادل هذه تعطي الثقة في النتائج، إلا أنها في بعض الأحيان لا تضمن جودة القياسات لأن بعضها تكون أمثلة عشوائية من المجموعة الكاملة للمنحنيات المتبادلة.

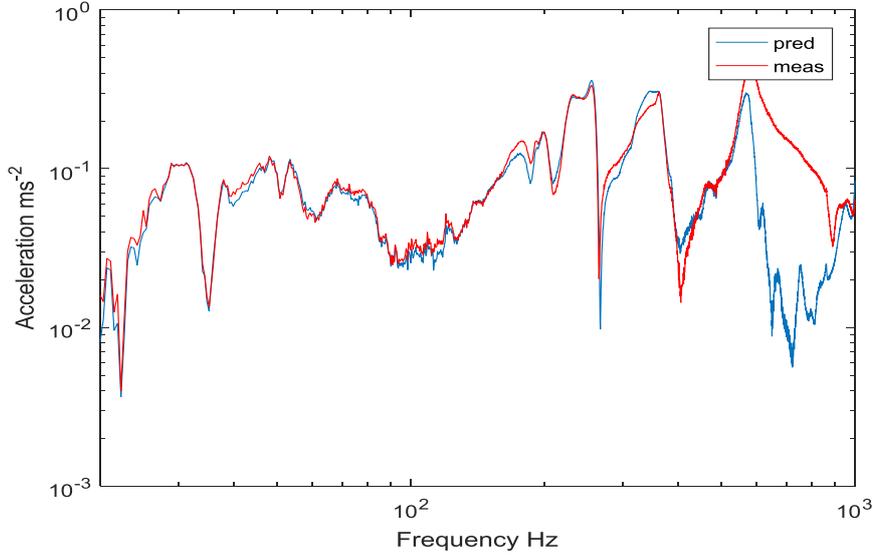


شكل 5. التبادلية بين تسارعي الواجهتين, $A_{2,1}$ $A_{1,2}$



شكل 6. التبادلية بين تسارعي الواجهتين, $A_{4,3}$ $A_{3,4}$

لتحديد القوة المحظورة، يتم قياس "التسارع الاصطناعي" ثم يتم ضربه بمعكوس قيمة التسارعية، كما بينه (Abohnik, 2018). يشير مصطلح 'On-board validation' (التحقق من صحة الإشارة المقاسة والمحسوبة) إلى عملية التحقق من إشارات القوة المحظورة التي تم الحصول عليها، كما هو موضح في الشكل (7).



شكل 7. التحقق من صحة الإشارات للإثارة الاصطناعية لتجربة اللوحين. الخط الأحمر هو الاستجابة المقاسة. الخط الأزرق هو الاستجابة المتوقعة باستخدام القوة المحظورة

5.3. التحقق من صحة القياسات (On-board Validation)

أصبح التحقق من صحة القياسات (الإشارات المتحصل عليها) باستخدام الإثارة الاصطناعية شائعاً كأداة لضمان جودة القوى المحظورة المقاسة والتحقق من النتائج التي تم الحصول عليها. من الصعب تحديد درجات الحرية Dofs الأكثر أهمية عند وصف الاقتران الهيكلي بين المصدر والمستقبل. وكما ذكرنا سابقاً، بعد قياس التسارعية، يتم بعد ذلك فحصه ودمجه مع "التسارع" المقاس للحصول على إشارة القوة المحظورة باستخدام المعادلة (3)؛

$$f_{C_c} = A_{R_{bc}}^{-1} a_{C_b} \quad \dots \dots (3)$$

بالتالي، تسارع هيكل الاستقبال a_{C_b} ، بعيد عن واجهة الاتصال، ويُعتبر $A_{R_{bc}}^{-1}$ مصفوفة نقل التسارع (Transfer accelerance matrix). حيث يمكن الحصول على القوى التشغيلية f_{C_c} عند واجهة المصدر والمستقبل باستخدام المعادلة (3).

يمثل الشكل (7) النتيجة التي تم الحصول عليها من التحقق من صحة القياسات للنظام المقترن للحزمة (اللوحتين). النتيجة التي تم الحصول عليها جيدة خاصة بالنظر إلى أن الحسابات في هذا العمل تم إجراؤها دون تنظيم. ومع ذلك هذه النتائج تعتبر كافية لتوضيح الإجراء. وبشكل عام فإن الأطياف الترددية تظهر تطابقاً جيداً بين النتائج المتوقعة والنتائج المقاسة، خاصة أقل من (557Hz)، على الرغم من أن الاختلافات تزداد مع زيادة التردد.

4. تجارب مع القوى المحظورة في إعداد اختبار واقعي

بعد عرض قياس القوة المحظورة في القسم السابق باستخدام تجربة بسيطة (لوحين معدنين)، تم إجراء قياس القوة المحظورة باستخدام نفس الأساليب كما هو موضح سابقاً. تم قياس التسارعية والتسارع كما هو موضح أعلاه لأغراض هذه التجربة. في هذه الحالة، يتم أخذ مقياسين تشغيليين متميزين في الاعتبار:

(أ) القياس "التشغيلي" الاصطناعي: يتم استخدام مطرقة القوة للتحكم في عمود القيادة وتحفيزه بشكل متكرر.
(ب) القياس التشغيلي الفعلي: المحرك يعمل ويتم إزالة مقاييس التسارع الموجودة على الواجهة (لا يمكن تشغيل التروس بطريقة أخرى).

في العمليات الواقعية، تحتوي الإشارة على مجموعة متنوعة من التوافقيات، مما يجعل فحص النتائج أمرًا صعبًا. ومع ذلك، فإن الإثارة الاصطناعية تنتج استجابة سلسلة في مجال التردد، مما يسهل اكتشاف الاتجاهات.
من الواضح أن المصدر والمستقبل والواجهة الخاصة بجهاز الاختبار تختلف عن تلك الموجودة في الحزم الموضحة في الشكل (2). لا يوجد مصدر واحد هنا؛ بدلاً من ذلك، هناك مزيج من التروس والعمود والحامل الداعمة. الواجهات هي النقاط التي تلتقي فيها أعمدة التروس بالجسم.

1.4 القوى المحظورة على أساس الإثارة الاصطناعية

استخدمت المطرقة للتحفيز الاصطناعي في هذا الجزء، وذلك بتفكيك المحرك وإزالته. وتركيب مقاييس التسارع على واجهتين مختلفتين. كما أشير سابقًا، يتم استخدام نقطة إضافية أكثر بعدًا (نقطة المرجع) للتحقق (التحقق على متن الجهاز).

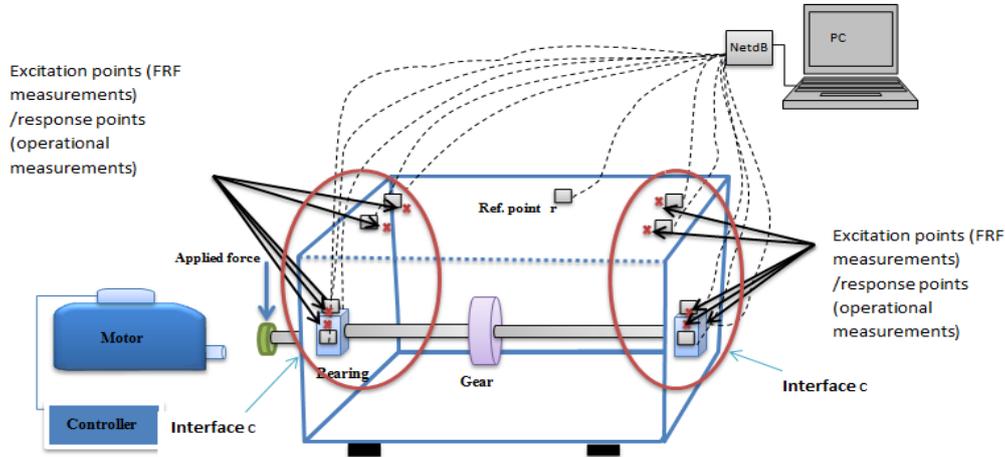
2.4 إعداد القياس

تم تجميع المكونات في الهيكل، الذي فصل عنه المحرك في إعداد الاختبار هذا. كان يُعتقد أن المصدر عبارة عن عمود واحد به ترس ومحملان داعمان، بينما كان جهاز الاستقبال عبارة عن الصندوق. وعرفت الوصلات بين المصدر والمستقبل على أنها واجهتين (كما هو موضح في الشكل (8) مع مربعين أحمرين). كانت هناك حاجة إلى عشرة مقاييس تسارع على الواجهة، مما زاد الترتيب تعقيدًا، واستخدم مقياس تسارع واحد كنقطة مرجعية للتحقق من صحة القياس.

ويوضح الشكل (8) مخططًا تخطيطيًا لجهاز الاختبار، ومواقع الإثارة، ومقاييس التسارع المناسبة الموضوع على الحامل الداعمة والإسكان (الصندوق). ضربت مطرقة القوة على عمود تروس الإدخال الموجود أعلى رأس العمود في هذا الاختبار، كما هو موضح من خلال الأسهم السوداء والصلبان الحمراء. تم استخدام المطرقة لقياس التسارع و"التسارعية" كما هو موضح سابقًا. للبدء، تم استخدام المطرقة لإثارة كل نقطة على الواجهة من أجل حساب مصفوفة التسارع (Abohnik, 2018). تم إعداد

مصفوفة التسارع على النحو المبين في المعادلة (4)؛

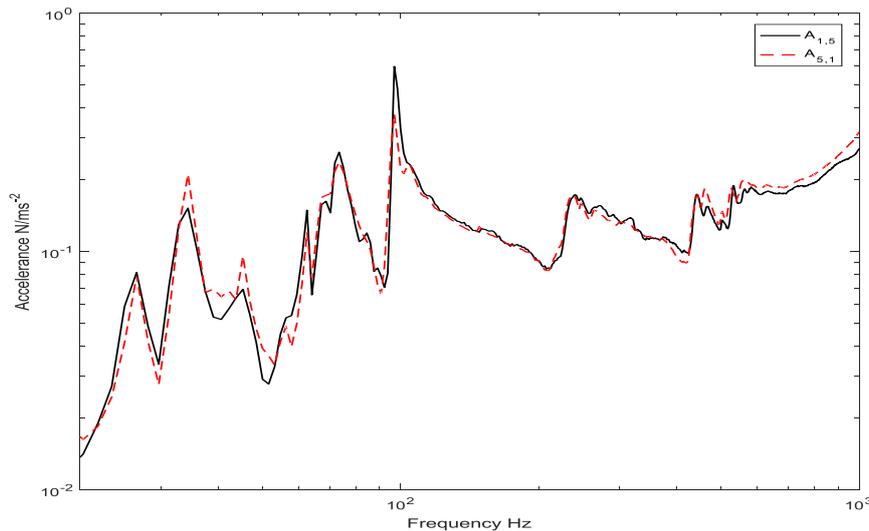
$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} & A_{1,4} & A_{1,5} & A_{1,6} & A_{1,7} & A_{1,8} & A_{1,9} & A_{1,10} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} & A_{2,4} & A_{2,5} & A_{2,6} & A_{2,7} & A_{2,8} & A_{2,9} & A_{2,10} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} & A_{3,4} & A_{3,5} & A_{3,6} & A_{3,7} & A_{3,8} & A_{3,9} & A_{3,10} \\ A_{4,1} & A_{4,2} & A_{4,3} & A_{4,4} & A_{4,5} & A_{4,6} & A_{4,7} & A_{4,8} & A_{4,9} & A_{4,10} \\ A_{5,1} & A_{5,2} & A_{5,3} & A_{5,4} & A_{5,5} & A_{5,6} & A_{5,7} & A_{5,8} & A_{5,9} & A_{5,10} \\ A_{6,1} & A_{6,2} & A_{6,3} & A_{6,4} & A_{6,5} & A_{6,6} & A_{6,7} & A_{6,8} & A_{6,9} & A_{6,10} \\ A_{7,1} & A_{7,2} & A_{7,3} & A_{7,4} & A_{7,5} & A_{7,6} & A_{7,7} & A_{7,8} & A_{7,9} & A_{7,10} \\ A_{8,1} & A_{8,2} & A_{8,3} & A_{8,4} & A_{8,5} & A_{8,6} & A_{8,7} & A_{8,8} & A_{8,9} & A_{8,10} \\ A_{9,1} & A_{9,2} & A_{9,3} & A_{9,4} & A_{9,5} & A_{9,6} & A_{9,7} & A_{9,8} & A_{9,9} & A_{9,10} \\ A_{10,1} & A_{10,2} & A_{10,3} & A_{10,4} & A_{10,5} & A_{10,6} & A_{10,7} & A_{10,8} & A_{10,9} & A_{10,10} \end{bmatrix} \dots (4)$$



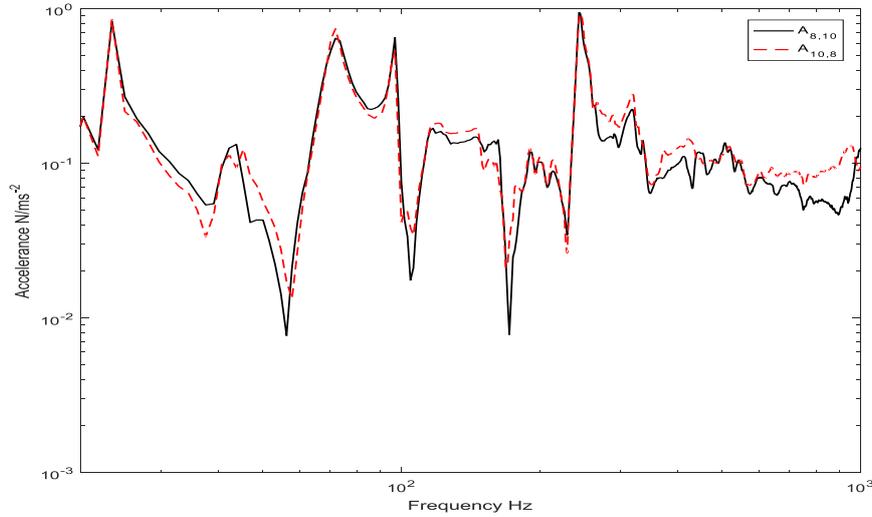
شكل 8. رسم تخطيطي لجهاز الاختبار (علبة التروس) يُظهر إجراء قياس على مرحلتين للحصول على القوى المحظورة عند الواجهات (C) في الدوائر الحمراء. تشير الصلبان الحمراء إلى نقاط الإثارة والاستجابة لقياس FRF و"التسارع"، Γ هي النقطة المرجعية (من بعد) المستخدمة لغرض التحقق من صحة دراسة الحالة. يشير السهم الأزرق إلى نقطة قياس الإثارة للإثارة الاصطناعية.

3.4. فحص البيانات قبل المعالجة

يوضح الشكلان (9 و 10) عمليات فحص المطابقة لعدة قطع باستخدام جهاز الاختبار. تتوافق هذه التبادلات بشكل جيد عبر نطاق التردد الكامل. تم اختيار هذه المجموعة من التسارع المتبادل بشكل عشوائي، ولكن نفس القيد ينطبق على النحو الوارد أعلاه: هذه الرسوم البيانية لا تضمن صحة جميع القياسات، لكنها تزودنا بالثقة.



الشكل 9. التبادلية بين تسارعي الواجهتين، $A_{5,1}$ و $A_{1,5}$

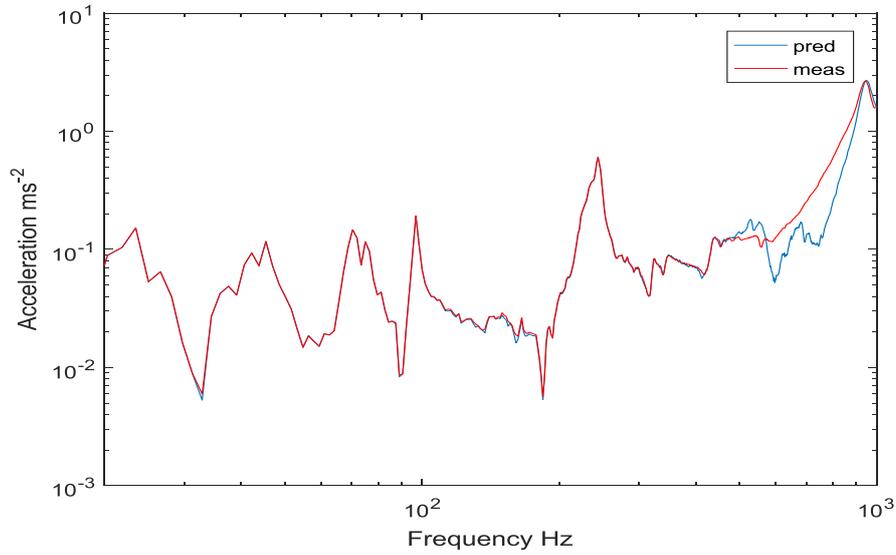


شكل 9. التبادلية بين تسارعي الواجهتين, $A_{10,8}$ و $A_{8,10}$

ويعد التحقق من بيانات التسارع، تم قياس التسارع باستخدام الإثارة الاصطناعية للعمود. واستخدم التسارع المقاس للتحقق من صحة إشارة القوة المحظورة من خلال مقارنتها بالتسارع المتوقع.

4.4. التحقق من صحة القياسات

استخدام التحقق من صحة القوة المحظورة التي تم الحصول عليها للبيانات المأخوذة من منصة الاختبار. لتلبية متطلبات اختبار الجودة لآلة دوارة (جهاز اختبار علبة التروس)، من الضروري أن تكون لديك ثقة في التسارع المتوقع بناءً على القوى المحظورة. لذلك، من الضروري التحقق من صحة القوى المحظورة التي تم الحصول عليها. يبين الشكل (11) نتائج التحقق من صحة القياس باستخدام عشر قوى محظورة. النتيجة التي تم الحصول عليها ممتازة خاصة بالنظر إلى أن الحسابات في هذا العمل تم إجراؤها دون تنظيم. تتوافق الاستجابة المتوقعة بشكل ممتاز مع الاستجابة المقاسة مباشرة عبر غالبية نطاق التردد. ومع ذلك، هناك توقع ناقص صغير بين حوالي (500Hz) و(900Hz)، مما يشير إلى أن مصدر الطاقة ربما لم يكن في الاعتبار.



شكل 11. التحقق من صحة التحفيز الاصطناعي باستخدام نظام الاختبار. الخط الأحمر هو الاستجابة المقاسة. الخط الأزرق هو الاستجابة المتوقعة باستخدام القوة المحظورة.

بعد الحصول على إشارة القوة المحظورة بناءً على الإثارة الاصطناعية لجهاز اختبار علبة التروس، تم إجراء اختبار آخر باستخدام نفس الإجراء ولكن بناءً على الإثارة التشغيلية الحقيقية وبمزيد من التعقيد عن طريق تغيير الواجهة وإضافة المزيد من المكونات.

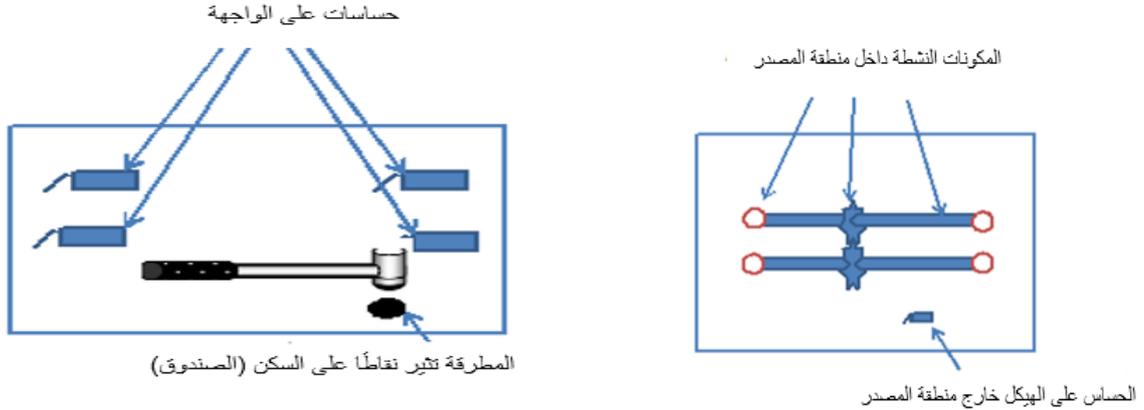
5.4. القوى المحظورة بناءً على بيانات تشغيلية حقيقية

في الحالة السابقة، كان من المفترض أن يكون عمود واحد مع محامل دعم وتروس هو المصدر وتم استخدام مطرقة القوة لإثارة الهيكل بشكل مصطنع لقياس التسارع و"التسارع التشغيلي". فيما يلي، يتم استخدام مطرقة القوة فقط لقياس التسارع، ومع ذلك، يتم توفير الإثارة من خلال المصدر التشغيلي نفسه، عن طريق شبكة التروس التي يقودها المحرك. علاوة على ذلك، في هذا الاختبار، تمت إضافة مكونات إضافية إلى كل من البنية والواجهة التي تم تغييرها.

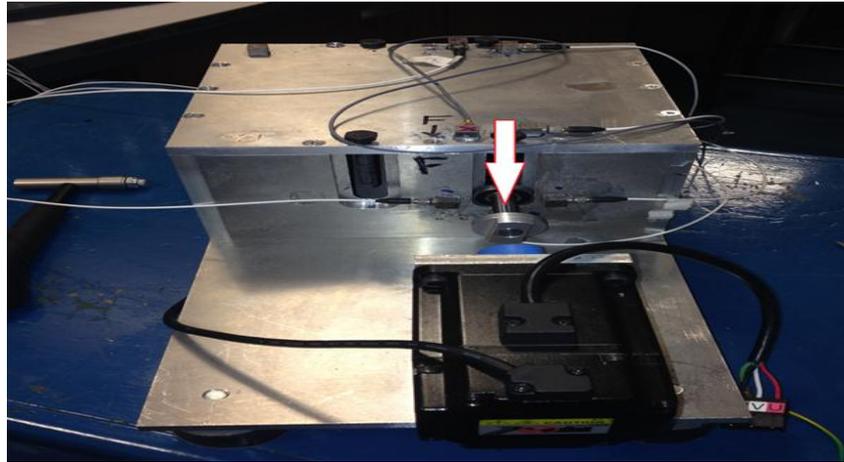
1.5.4. إعداد القياس

على عكس الاختبار السابق، فإن النظام الذي تم النظر فيه هنا أكثر تعقيداً بسبب العمود الإضافي، وما إلى ذلك. وكان من المفترض أن تكون الواجهة بين مجموعتي أسنان التروس المتشابكة (منطقة صغيرة) مصدرًا، بينما كان من المفترض أن تكون بقية الهيكل المستقبل. هنا، كانت هناك حاجة إلى وجود مقياسي تسارع على الواجهة لأن منطقة الواجهة صغيرة جدًا بحيث لا يمكن إدخال المزيد من مقاييس التسارع. تم تركيب أربعة مقاييس تسارع على السكن كما هو موضح في الشكل (12). ومع ذلك، تم تحفيز ثلاثة من مقاييس التسارع هذه واستخدم واحد كنقطة بعيدة لأغراض التحقق من الصحة. تشمل الاختبارات على:

- قياس FRF (تم إيقاف تشغيل الجهاز) مع إزالة مقاييس التسارع على حدود منطقة المصدر (منطقة صغيرة عند نقطة التماس التروس) وإثارة المطرقة في المواقع الموجودة على الهيكل.
- إزالة مقاييس التسارع المثبتة على الواجهة وتسجيل إشارات الاهتزاز عند نفس المواقع على الصندوق (السكن).
- ملاحظة: كان من الصعب جدا إثارة نقطة الواجهة (منطقة المصدر) لأنها كانت داخل الآلة، أنظر الشكل (13).



شكل 12. مخطط لهيكل مصدر الاهتزاز؛ هيكل مجمع (السكن)، مما يؤدي إلى استجابات الاهتزاز عند واجهة المصدر والمستقبل وفي مواضع بعيدة على هيكل المستقبل.



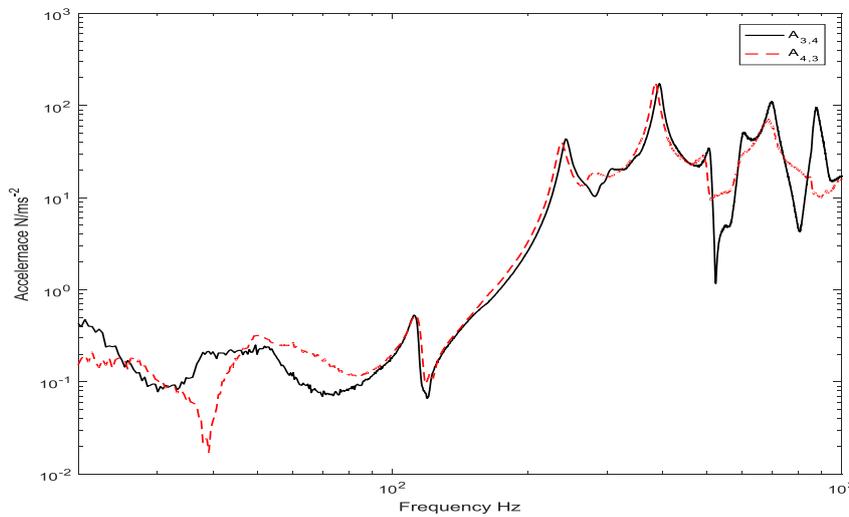
شكل 13. المصدر والواجهة في نظام الاختبار

- تم إجراء القياس الأولي باستخدام (2DoFs). ومع ذلك، اعتبرت (DoF) واحدة مناسبة في هذه التجربة:
- نظرًا لأننا استخدمنا تروسًا محفزة، فإن الحمل يتحول بشكل أساسي من خلال الاتجاه الرأسي، ولهذا السبب استخدمنا DoF فريدًا في هذا الاتجاه. ومن الجدير بالذكر أنه بالنسبة لأنواع أخرى من التروس مثل التروس الحلزونية، يمكن استخدام DoF إضافية ولكن هذا للعمل في المستقبل). حيث ولأول مرة نبدأ التجربة بدرجة الحرية DoF البسيطة.
 - تم في البداية اعتبار (2DoF) باستخدام 4 مقاييس تسارع ومن ذلك وجدنا أن النتيجة المكتسبة من 2 مقياس تسارع باستخدام DoF واحد متشابهة. لقد حاولنا استخدام المزيد من DoF (باستخدام المزيد من مقاييس التسارع) ولم يكن أداء الوصف التفصيلي مع 2 DoFs أفضل. تم قياس التسارع من خلال إثارة المواضع المختارة على الهيكل باستخدام مقياسي تسارع مثبتين على الواجهة (أسنان شبكية للتروس).
 - بعد ذلك تم ترتيب التسارع المقاس في مصفوفة كما هو موضح في المعادلة (1). تجدر الإشارة إلى أن النقطة المرجعية لم يتم تضمينها في مصفوفة التسارع. وبعد قياس التسارع، تمت إزالة مقاييس التسارع المثبتة على الواجهة وتشغيل المحرك حتى يتمكن من قياس إشارة التسارع التشغيلية الحقيقية. هنا، نحن نستحضر مبدأ العلاقة المتبادلة (Reciprocity)

لتجنب القياس المباشر، الأمر الذي قد يتطلب الإثارة داخل السكن (الهيكلي) ومقاييس التسارع على السكن. باستخدام مبدأ العلاقة المتبادلة، يمكن تبادل موضع إثارة الاستجابة؛ نقوم بتطبيق الإثارة خارجياً على الهيكل بينما يتم تركيب مقاييس التسارع داخل الهيكل.

2.5.4. فحص البيانات قبل المعالجة

كما في الحالة السابقة للاختبارات، يوضح الشكل (14) فحص العلاقة المتبادلة. مرة أخرى، يُرى اتفاق جيد من خلال معظم نطاق الترددات، مع بعض الاختلاف أقل من (80Hz) وما فوق (600Hz). مرة أخرى، هذه النتائج لا تضمن القياسات ولكنها تعطي الثقة.



شكل 14. التبادلية بين تسارعي الواجهتين, $A_{4,3}$ و $A_{3,4}$

وبعد قياس وفحص التسارع كما في الشكل (14) يتم قياس التسارع التشغيلي ومن ثم تحويله إلى المجال الترددي. بعد ذلك، يتم دمجها مع مصفوفة التسارع العكسي لحساب إشارة القوة المحظورة.

3.5.4. التحقق من صحة الإشارة المقاسة

مرة أخرى يتم استخدام التحقق من صحة القياسات للتحقق من صحة القوة المحظورة للبيانات التي تم الحصول عليها من منصة الاختبار. تم استخدام المعادلة (3) للتنبؤ بالتسارع التشغيلي، والذي يستخدم للمقارنة مع التسارع المقاس، من أجل التحقق من صحة إشارة القوة المحظورة التي تم الحصول عليها.

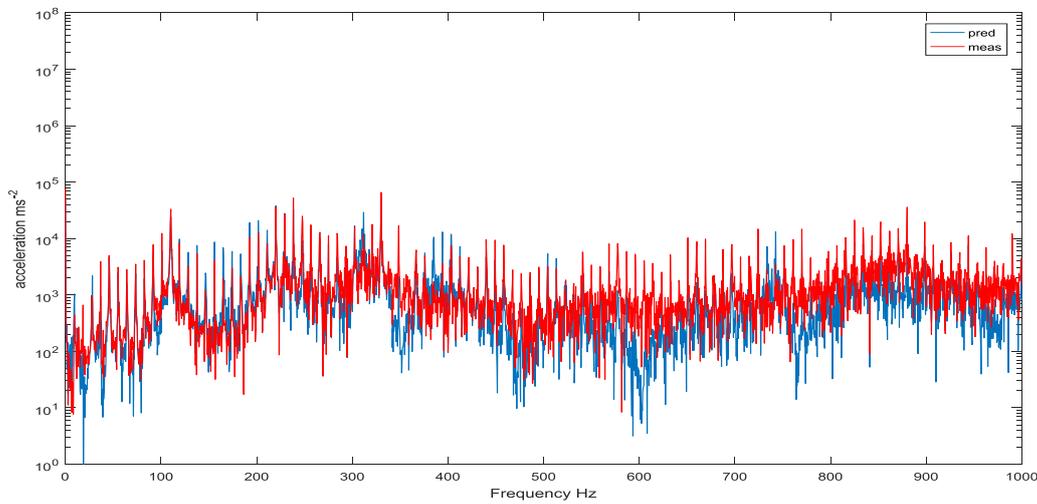
من خلال استبدال الإثارة "التشغيلية" (المصطنعة) بالتسارع الحقيقي، فإن الحصول على قوة الحجب الناتجة وإجراء التحقق من صحة القياسات باستخدام التسارع الحقيقي، سيسمح بتوضيح الطريقة. توفر المقارنة بين مجموعة من التسارع المتوقع والمقاس التحقق من القوة المحظورة المحسوبة.

تصف هذه القوة المحظورة المصدر بشكل مستقل ويمكن استخدامها للتنبؤ. علاوة على ذلك، تم قياس التسارع الذي يقوده المحرك وتم تحديد الاستجابات في نفس المواضع مثل مقاييس التسارع (باستثناء تلك الموجودة على الواجهة التي تمت إزالتها).

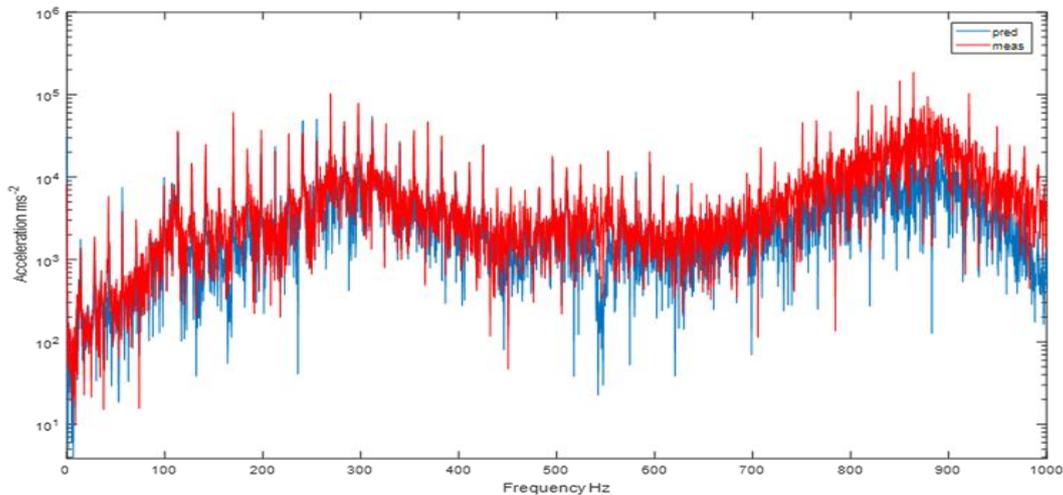
يتم استخدام النقطة البعيدة للتحقق من صحة إشارة القوة المحظورة التي تم الحصول عليها من خلال مقارنتها بالإشارة المقاسة التي لم يتم تضمينها في مصفوفة التسارع.

للاكمال، تم أخذ مجموعتين من القوى المحظورة في الاعتبار، واحدة من جهاز الاختبار الأصلي، والأخرى من جهاز الاختبار كما تم تعديلها بواسطة طبقة علوية من مادة وسلك مختلفين.

يوضح الشكلان (15) و(16) النتائج التي تم الحصول عليها من التحقق من صحة القياسات باستخدام قوتين محجوبتين عند واجهة شبكة التروس بسرعتين مختلفتين. وكما يتبين، هناك مستوى جيد من الاتفاق الذي تم الحصول عليه عبر غالبية نطاق الترددات، مما يشير إلى أن معظم DoFs المساهمة قد تم أخذها في الاعتبار. يعد الاتفاق بين التسارعات التشغيلية المتوقعة والمقاسة جيدًا في غالبية نطاق الترددات.



شكل 15. نتائج التحقق من صحة القوتين المحجوبتين باستخدام غطاء من الألمنيوم. الخط الأزرق هو التسارع المقاس. الخط الأحمر هو التسارع المتوقع عند (500rpm).



شكل 16. نتائج التحقق من صحة القوتين المحجوبتين باستخدام غطاء من الألمنيوم. الخط الأزرق هو التسارع المقاس. الخط الأحمر هو التسارع المتوقع عند (850rpm).

ومع ذلك، هناك توقعات أقل من اللازم في بعض الترددات. يشير هذا مرة أخرى إلى أنه ربما لم يتم حساب بعض الطاقة. لذلك، يمكن القول إنه يمكن استخدام القوة المحظورة (المحظورة) في الموقع كواصف مصدر ثابت لجهاز الاختبار.

5. الاستنتاجات

بدأت هذه الدراسة بتوضيح القياسات الأولى لتقنية القوة المحظورة في الموقع على تجربة بسيطة (لوحين معدنين) قبل الانتقال إلى تجربة أكثر تعقيداً، وهي علبة التروس. من أجل اختبار القوة المحظورة، تم قياس التسارع والتسارع التشغيلي باستخدام منصة الاختبار المصممة خصيصاً. ومع ذلك، تم قياس التسارع باستخدام مطرقة القوة بينما تم تقسيم قياس التسارع إلى قسمين؛ استخدام المطرقة لمحاكاة "التسارع" ثم تشغيل المحرك ثانياً للحصول على التسارع الحقيقي. لاحظ أن الواجهة كانت مختلفة بالنسبة للاختبارين. تم نقله ليكون قريباً من نقطة شبكة التروس لاستخراج الإشارة المندفعة بسبب شبكة التروس. بالنسبة لكلا اختباري العارضة وجهاز الاختبار، أظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها توافقاً جيداً. بالإضافة إلى ذلك، تم التحقق من صحة القوات المحظورة التي تم الحصول عليها باستخدام نظام التحقق من صحة البيانات. وهكذا، فقد أظهرت هذه الورقة أنه يمكن قياس القوة المحظورة لعلبة التروس، وينصح باستخدامها في الكشف عن العيوب في الآلات الدوارة بالاعتماد على الاهتزازات أو الموجات الصوتية باستخدام الميكروفون.

المراجع

- Abohnik, A. (2018). *In situ blocked force measurement in gearboxes with potential application for condition monitoring*. M.Sc. thesis, University of Salford, UK.
- Abohnik, A. A., Abuaisa, A. F., & Yazid, M. A. B. (2022). Gear mesh fault detection based on blocked force measurements. *Journal of Applied Science (JAS)*, 35(1), 42-61.
- Elliott, A., & Moorhouse, A. T. (2008). Characterisation of structure borne sound sources from measurement in-situ. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3176.
- Elliott, A., Moorhouse, A., & Pavic, G. (2007). Characterisation of a structure-borne sound source using independent and in-situ measurement. In: *ICA 19*, Sep 2007, Madrid, Spain.
- Höller, C. (2013). *Indirect methods of obtaining activity and mobility of structure-borne sound sources*. Doctoral dissertation, University of Liverpool.
- Lennström, D., Olsson, M., Wullens, F., & Nykänen, A. (2016). Validation of the blocked force method for various boundary conditions for automotive source characterization. *Applied Acoustics*, 102, 108-119.
- Mas, P., Sas, P., & Wyckaert, K. (1994). Indirect force determination based upon matrix inversion: A study on statistical and deterministic accuracy. In: *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, pp. 1049-1065.
- Moorhouse, A. T., Elliott, A. S., & Evans, T. A. (2009). In situ measurement of the blocked force of structure-borne sound sources. *Journal of sound and vibration*, 325(4-5), 679-685.
- Moorhouse, A. T., Elliott, A. S., Eastwick, G., Evans, T. A., Ryan, A., von Hünerbein, S., ... & Waddington, D. C. (2011). *Noise and vibration from building-mounted micro wind turbines Part 2: Results of measurements and analysis*. Available at: [https://salford-repository.worktribe.com/preview/1500698/Defra_NANR244_Final_Report_Pt2_Results_of_measurements_and_analysis.pdf].