جامعة محمد خيضر- بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

مذكرة الماستر

الميدان: علوم وتكنولوجيا
الشعبة: هندسة ميكانيكية
التخصص: إنشاء ميكانيكي

المرجع: .....

مقدمة من طرف:
اعمر السعيد

في: الاثنين 08 جويلية 2019

التحكم النشط في عارضة متجانسة

Active Control of isotropic Beam

لجنة المناقشة:

ا. مسعود بن مشيش	**استاذ محاضر ب**	**جامعة بسكرة**	**رئيسا**
ا. محمد النذير عمران	**استاذ**	**جامعة بسكرة**	**مؤطرا**
ا. ابراهيم نين	**استاذ محاضر ب**	**جامعة بسكرة**	**ممتحنا**

السنة الجامعية: 2018- 2019

الإهـــــدَاء

إلى أبي و أمـــــي حفظهما الله ورضي عنهما وأرضاهما.

إلى كل الإخوة و الأصدقاء.

و إلى كل من يعتز بلغة أهل الجنة.

الشكر

الحمد لله الذي هداني ووفقني لإنجاز هذه المذكرة

وبعد أود أن أقدم شكري الخالص أولا إلى الأستاذ **محمد النذير عمران** الذي وجهني في عملي هذا،

وأيضا إلى كل من الأستاذين **ابراهيم نين** و **مسعود بن مشيش** على كل معلومة أخذتها عنهما في السنوات الماضية للدراسة

وعلى قبول مناقشة مذكرة تخرجي،

و أشكر جزيل الشكر للأستاذ **محمد لطرش** الذي ساعدني كثيرا على البرمجة.

.

الملخص

إن التحكم في الإهتزازات له أهمية كبيرة في مجال الهندسة عموما وفي الهندسة الميكانيكية خاصة.

وفي هذه المذكرة نقدم بين أيديكم دراسة حول المراقبة أو التحكم النشط للإهتزازات الهيكلية و ذلك باستخدام واحدة من المواد الذكية ألا وهي المواد الكهروإجهادية و تسمى كذلك الكهروضغطية.

تم استعمال طريقة العناصر المتناهية (finite element method) في الدراسة التحليلية واجريت المحاكاة بواسطة برنامج ANSYS، كما تمت برمجة التحكم النشط باستعمال برنامج MATLAB حيث تم استخدام المعدل التربيعي الخطي(LQR).

الكلمات المفتاحية: المواد الذكية، الكهروضغطية، التحكم النشط، طريقة العناصر المتناهية، المتحكم الخطي التربيعي (LQR).

الفهرس

الإهداء.....1
الشكر.....2
الملخص.....3
الفهرس.....4
قائمة الأشكال.....5
قائمة الجداول.....6
مقدمة عامة 7

I. عموميات حول طرق ووسائل اخماد الاهتزازات.....8

1. تمهيد 9
2. مواد ذكية جديدة..... 10
2-1 السبائك أوالخليطة المتذكرة للشكل.....11
2-3 مواد التقبض الكهربائي.....13
2-4 مواد التقبض المغناطيسي.....13
3. المراقبة النشطة باستخدام عناصر كهرإجهادية.....13
4. إستراتيجيات المراقبة.....14
5. خوارزمية المراقبة النشطة.....15
6. قانون المراقبة.....15
7. المراقبة المنوالية.....15

II. صيغ ومعادلات الكهروإجهادية وطريقة العناصر المتناهية.....16

1. ظاهرة الكهرباء الإنضغاطية.....17
2. معادلات الكهروضغطية.....18
3. أوضاع إقتران السيراميك الكهروضغطي.....18
4. تحويل الطاقة تحت تأثير الكهرضغطية.....20
5. الدراسة بطريقة العناصر المتناهية.....21
5-1. الطاقة الكامنة و مصفوفة الصلابة.....22
5-2. مصفوفة الصلابة في حالة حركة إنعطاف لجائز 23
5-3. الطاقة الحركية و مصفوفة الكتلة لعنصر.....24
6. طريقة العناصر المتناهية في الحالة الديناميكية.....25
7. إستخدام طريقة المناول.....25
8. التحكم النشط 26

III. نمذجة العارضة الذكية باستعمال طريقة العناصر المتناهية بواسطة برنامج ANSYS.....27

1. نمذجة عارضة الأساس.....28
2. نمذجة العارضة الذكية.....30
3. تفعيل المنظم الخطي التربيعي(LQR) الموجود في برنامج MATLAB.....36

خلاصة.....39
قائمة المراجع.....40

قائمة الأشكال

الشكل (1) آلية الإخماد بواسطة طلية الإجهاد الخامل - 9
الشكل (2) تعريف لبنية ذكية - 10
الشكل (3) المبادلات بين الانظمة - 11
الشكل (4) مضرب HEAD باستخدام الألياف كهرضغطية التي تسيطر عليها المعالج الدقيق - - - - - - - - - - - - - -12
الشكل (5) المراقبة بواسطة التغذية الأمامية - 13
الشكل (6) المراقبة بواسطة التغذية الرجعية- 14
الشكل (7) نزوح شحنات موجبة (Q^+) بالنسبة لأخرى سالبة (Q^-) في المادة - 17
الشكل (8) ترقيم المحاور - 19
الشكل (9) أوضاع إقتران السيراميك الكهروضغطي- 20
الشكل (10) الدورة النظرية لتحويل الطاقة في حالة مشغل كهرضغطي - 21
الشكل (11) عارضة مثبتة-حرة(حالة إنعطاف) - 23
الشكل (12) عارضة الأساس (مثبتة-حرة) - 29
الشكل (13) أنماط العارضة عند الترددات الطبيعية الثلاث -30
الشكل (14) عارضة مثبت عليها الرقاقات- -30
الشكل (15) الشكل الهندسي لـ SOLID5 - 31
الشكل (16) تمثيل الشروط الحدية - 32
الشكل (17) تنشيط الفعل الكهروميكانيكي - 33
الشكل (18) مناول الاهتزاز الحر للعارضة الذكية - 35
الشكل (19) إستجابة العارضة الذكية في الحالتين النشطة والخاملة - 38

قائمة الجداول

الجدول (1) معادلات الكهرواجهادية - 18
الجدول (2) الخصائص الميكانيكية - 28
الجدول (3) قيم ثلاث ترددات خاصة (حالة إنعطاف) - 28
الجدول (4) مقارنة قيم ترددات العارضة الأساس والعارضة الذكية - 35

مقدمة عامة

الإهتزازات أو الضوضاء مصدر للعديد من المشاكل في مختلف المجالات و خاصة الصناعية والدفاعية منها، ولهذا السبب و ضعت الكثير من الدراسات للتحكم من اجل ايجاد حلول مناسبة لتخميدها ، وفي دراستنا هذه نتناول واحدة من أهم طرق التحكم ألا وهي طريقة التحكم النشط في الإهتزازات.

قد تم تنظيم هذه المذكرة في ثلاثة فصول، الفصل الأول عبارة عن مقدمة عامة حول طرق إخماد الإهتزازات وخاصة النشطة منها، والوسائل المستعملة في ذلك، والفصل الثاني يحتوي على جزء صيغ ومعادلات الكهروإجهادية وطريقة العناصر المتناهية.

أما الفصل الأخير فتم فيه إستخدام برنامج ANSYSلإيجاد قيم الترددات الخاصة لعارضة متجانسة (isotropic) قبل وبعد وضع رقاقات كهروإجهادية، و برنامجMATLAB لتوظيف المنظم الخطي التربيعي LQR.

الفصل الاول

عموميات حول طرق و وسائل إخماد الاهتزازات

1. تمهيد

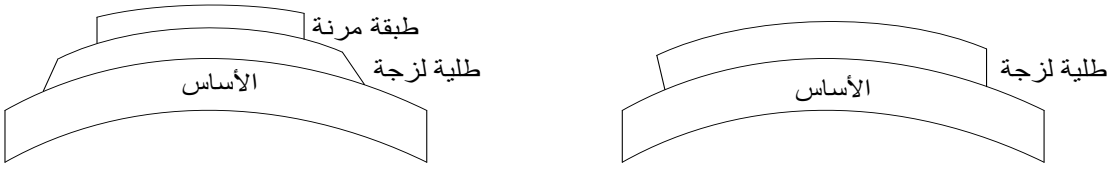
في كثير من الحالات تمثل الإهتزازات الهيكلية مصدر إزعاج لأنها يمكن أن تسبب عدة مشاكل كالتعب الهيكلي مثلا ، أونقل الاهتزازات إلى أنظمة أخرى ، والضوضاء الداخلية أو الخارجية بسبب الموجات الصوتية، إلخ. ومع ذلك من الممكن تقليص تأثيرها، حيث هناك ثلاثة أنواع من تقنيات:

- التقنية الأولى: هي تقنية الإلغاء (أو المسح) ، والتي تستخدم بشكل أساسي للقضاء على الضوضاء الناتجة عن الاهتزاز وليس الاهتزاز نفسه ، ويتم ذلك عن طريق إنتاج مصدر للضوضاء الثانوية تنبعث منها ضوضاء عكسية للأولية بحيث يؤدي إلى إلغاء كليهما.

- التقنية الثانية: هي العزل التي تجنب إنتقال الاهتزازات من منظومة إلى أخرى دون القضاء على الإهتزازات.

- التقنية الثالثة: والتي تسمى التوهين أو الإخماد، فهي تقوم بتقليل سعة الاهتزازات الهيكلية التي تقع ترددداتها بالقرب من الترددات الخاصة للهيكل. وبالتالي فإن هذه التقنيات تجعل من الممكن تخفيف أو حتى إزالة أصداء الهيكل. وبشكل عام تصنف على أنها خاملة أو نشطة:

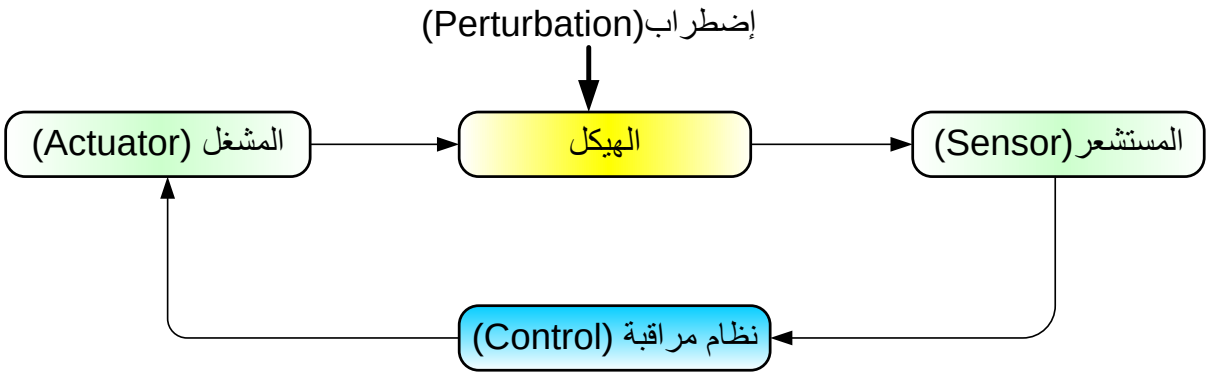
1. الخاملة: تتم بإضافة مواد لها خصائص تخميد، تقرن بالهيكل حيث يتم تخميد الإهتزازات دون أي تدخل خارجي إضافي. فمثلا الطلية المكونة من مواد بوليمر (polymers) لزجة هي علاجات فعالة للغاية لتقليل سعة الرنين للهياكل الإهتزازية، فهذه المواد تتمتع بخاصية الإنتقال من حالة شبه صلبة (مطاطية) ، عند درجات الحرارة المرتفعة وترددات الإهتزاز المنخفضة ، إلى أخرى صلبة (مشدودة) في الوضع المعاكس. علاوة على ذلك فإنها قادرة على تحويل طاقة الإجهاد إلى طاقة حرارية في مرحلة الإنتقال بين هاتين الحالتين، حيث تختلف خصائصهما المرنة بشكل سريع ، وبالتالي تبدد للطاقة الاهتزازية للهيكل الذي لبست عليه في شكل حرارة، بالإضافة إلى ذلك وجد أن هذه الطليات اللزجة تكون أكثر فاعلية عندما تكون مغطاة بطبقة مرنة مما يجعل من الممكن تشويهها في حالة القص (الشكل1) يسمى هذا العلاج طلية الإجهاد الخامل (Passive Constraint Coating).



شكل (1): آلية الإخماد بواسطة طلية الإجهاد الخامل

2. النشطة: بدورها تتيح التقنيات النشطة التحكم في الإهتزازات في كل لحظة بواسطة مشغلات (actuator) تعمل على الهيكل لمقاومة هذه الاهتزازات وفقًا لقانون تحكم مصمم لتقليل شدتها، و رغم ما يتطلبه هذا الحل من توفير للطاقة إلا أنه فعال في العديد من الحالات.

الهيكل الذكي أوالنشط هو الذي يحتوي على مشغلات وأجهزة إستشعار (sensor) ملتصقة أو مندمجة ،ومقترنة بنظام مراقبة (الشكل 2)، عمليا تتم معالجة القياسات التي يوفرها المستشعر عن طريق نظام تحكم مناسب ، ثم ترسل للمشغل إشارة قادرة على تعديل سلوك الهيكل وتكييفه مع السلوك المطلوب.



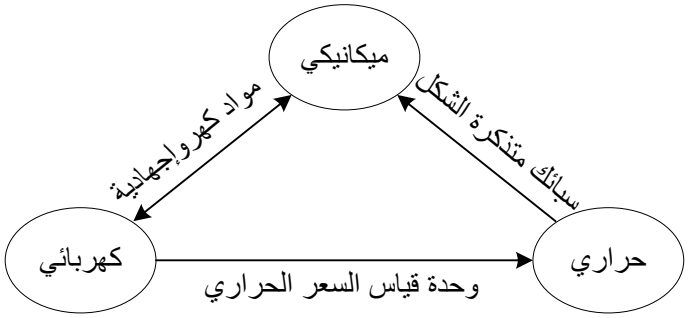
شكل (2): تعريف لبنية ذكية

هناك عدة طرق لإنشاء بنية ذكية مؤلفة من هياكل قاعدية. يعتمد هذا التصميم على اختيار المشغلات وأجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة أو التحكم المناسبة، و تصنع المشغلات والمستشعرات عمومًا إنطلاقا من ما يسمى بالمواد الذكية أو النشطة القادرة على توفير عمل موزَّع ناتج عن الإقتران الطبيعي لتشوهاتها أو إجهاداتها بعوامل خارجية مختلفة مثل الحقول الكهربائية، المغناطيسية أو درجات الحرارة، إلخ[1][2] .

2. مواد ذكية جديدة

المواد الذكية هي مواد حساسة متكيفة وقابلة للتطوير وهذا ما يسمح لها بالتصرف كمستشعر (للكشف عن الإشارات) أو / وكمحرك (لتنفيذ إجراء على بيئتها). هذه المواد قادرة على تعديل خواصها الفيزيائية بشكل تلقائي ، على سبيل المثال شكلها ،لزوجتها أو لونها إستجابة لإثارة طبيعية أو مستحدثة مثل التغيرات في درجات الحرارة ، الإجهادات الميكانيكية ، والحقول الكهربائية أو المغناطيسية. لذلك فهي مناسبة بشكل خاص للتحكم ومراقبة الإهتزازات.

الفئات الثلاث الأكثر دراسة والمستعملة في مراقبة الإهتزازات هي سبائك ذاكرة الشكل (shape-memory alloys)، المواد الكهروإجهادية (piezoelectrics) التي تعتبر المواد الأكثر إستخدامًا، ومواد التقبض الكهربي (electrostrictive) و المغنطيسي (magnetostrictive). ويوجد هناك العديد من المواد الذكية التي لا يسعنا ذكرها في هذه المقدمة [3].



شكل (3): المبادلات بين الانظمة

1-2 السبائك المتذكرة للشكل

تتمتع هذه الخلائط بخصائصها الميكانيكية الجيدة وتكون في طورين مختلفين الأول عند درجات الحرارة المرتفعة (الأوستينيت) والثاني عند درجات الحرارة المنخفضة (مارتنسيت) الذي يسهل فيه تشكيلها أو تحويلها إلى أي صورة ويمكن بعد ذلك إستعادة شكلها الأولي عن طريق التسخين البسيط وعودة مارتينسيت إلى الأوستينيت، وهذا ما يسمى تأثير ذاكرة الشكل البسيط [4].

رغم هذه الخصائص إلا أنها غير مناسبة للتحكم الديناميكي لأن تعديل الحالة غالبًا ما يكون ثنائيًا دون إمكانية التحكم في الحالات البينية ويكون النطاق الترددي الخاص بها محدودًا للغاية، و من ناحية أخرى، بدأ إستخدام سبائك ذاكرة الشكل ذات مغنطة حديدية في التحكم النشط منذ بضع سنوات. فهي تجمع بين خصائص ذاكرة الشكل وخصائص المواد المغناطيسية وتتميز بخصائص التردد العالي يصل إلى 2000 هرتز، ويعتمد مبدأها على إقتران مغناطيسي ميكانيكي.[5]

2-2 المواد الكهروإجهادية

إستخدام المواد الكهرضغطية له مزايا متنوعة، فهذه المواد قادرة على تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية حيث عند تطبيق إجهاد عليها يسبب ظهور جهد بين الأقطاب الكهربائية. هذه الظاهرة قابلة للعكس وبالتالي تسمح باستخدام العناصر الكهروإجهادية سواء كمشغل أو مستشعر أو بالجمع بين الوظيفتين. توفر المواد الكهروإجهادية مجموعة واسعة من الخصائص الكهروميكانيكية إعتمادًا على تركيبتها الكيميائية، مما يجعلها مثالية للتحكم في إهتزاز الهياكل المرنة. وهناك عدة أنواع لها مزايا مختلفة. على سبيل المثال توفر البيزوسيرميك صلابة هيكلية عالية تمنحها قوة كبيرة، و يمكنها أن تتفاعل على ترددات تتراوح بين هيرتز إلى عدة ميغاهرتزات مما يجعلها مفيدة لمجموعة واسعة من التطبيقات، علاوة على ذلك ونظرًا للوزن المنخفض نسبيًا للمواد الكهروإجهادية ، يمكن استخدام هذه العناصر بكمية معتبرة مع زيادة طفيفة في وزن الهيكل.

هناك أربع أصناف رئيسية من المواد الكهروإجهادية: البلورات التي تمتلك الكهروإجهادية الطبيعية، السيراميك، البوليمرات والمركبة التي تحتاج إلى الإستقطاب.

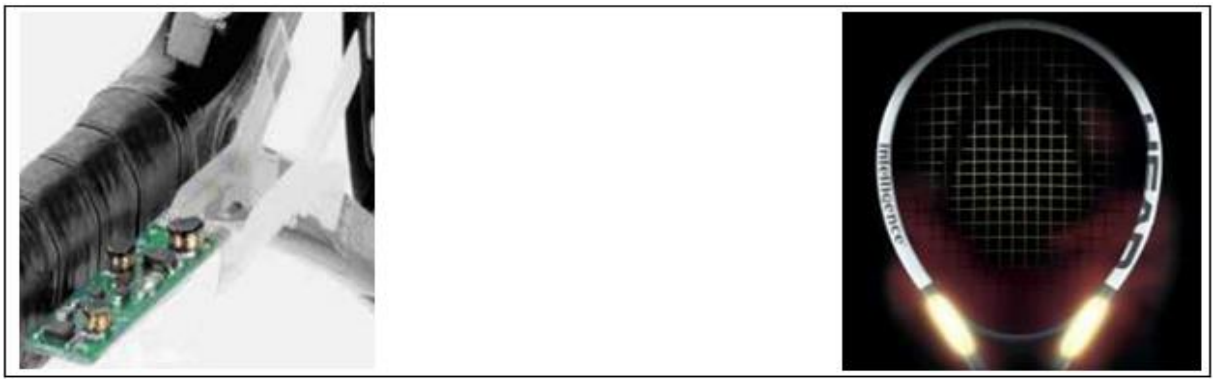
البلورات: البلورة الكهروإجهادية الأكثر شهرة هي الكوارتز، لكن خصائص أدائها غير فعالة في تطبيقات الإهتزاز. أما المواد الأخرى ، مثل نيوبات الليثيوم ($LiNbO_3$) أوتنطلات الليثيوم ($LiTaO_3$) فتظهر قيمًا لمعامل إقتران عالية، لكن التكلفة الباهظة وقابلية كسر هذه البلورات قلل من وجودها في كثير من المنتجات الحالية.

السيراميك: تعتبر السيراميك الكهروإجهادية من أكثر المواد المناسبة في الوقت الحالي للاستخدام في مراقبة الإهتزاز، وهي مستعملة على نطاق واسع نظرًا لتكلفتها المنخفضة وأيضًا لقابلية التصنيع وسهولة تشغيلها وتطويرها، بالإضافة لأداء الفعال، وهناك العديد من التراكيب التي تختلف في خواصها العازلة والميكانيكية إختلافًا كبيرًا ففي كل وضع يوجد السيراميك المناسب، ومن بينها تيتانات الباريوم التي هي أسلاف السيراميك الحالية، وعائلة (الرصاص، الزركونات والتيتانات) لوحدها لديها خمسة إلى ستة تركيبات مختلفة، والأكثر إستخدامًا تيتانات الرصاص$PbTiO_3$ ، ميتانيوبات الرصاص. تايتنات الباريوم ($BaTiO_3$).

البوليمر: يمكن لبعض البوليمرات مثل PVDF (PolyVynilDiFluoroor) والبوليمرات المشتركة مثلPVDF-TrFE إكتساب خصائص الكهرباء الضغطية، وتتميز أيضا بإمكانية أن تكون ذات سمك صغير جدًا مع مرونة كبيرة تجعلها قابلة للتكيف مع الأسطح غير المستوية، و هذا ما جعلها تستخدم في تطبيقات مختلفة، فهي فعالة كأجهزة إستشعار، ويرجع الفضل في ذلك أيضا إلى إنخفاض الهيستریاس لديها.

المركبة: المركبات النشطة هي مركبات بها ألياف لها بعض الخصائص الكهروإجهادية، وعند ظهورها في أوائل الثمانينات أحدثت تقدماً كبيراً في مجال المواد الكهروإجهادية، التي تم تطويرها لأول مرة لتطبيقات السونار، وعلى عكس السيراميك الكهرضغطية يمكن إستغلال معامل الكهرضغطية الطولي (إتجاه الألياف) مما يؤدي إلى ارتفاع عوامل الإقران الكهروميكانيكية. وبالتالي مقاومة أفضل للتلف ويجعل من الممكن التخلص من مشكلة المساحة التي تشغلها الرقاقات الكهرضغطية، لذلك فهي مهمة في مجال مراقبة الإهتزازات.

وعلى سبيل المثال مضرب التنس HEAD هو من بين إستخدامات الألياف الكهرضغطية المتعلقة بتخميد الاهتزاز، حيث يتم دمج الألياف في 4 مناطق على كل جانب من جوانب القلب و المضرب أين يكون التشوه أكبر، ويتم تحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة عن تأثير الكرة إلى طاقة كهربائية بواسطة هذه الألياف في أقل من ملّي ثانية، وتعالج الدارة المدمجة الموجودة على المقبض الإشارة وتولد إهتزازًا مضادًا يشد المضرب حيث يرسل نبضًا إلى الأوتار لتحسين الإرتداد. هذا النظام يمكنه تخفيض الإهتزاز المرتبط بتأثير الكرة إلى النصف.



شكل (4):مضرب HEAD باستخدام الألياف كهرضغطية التي تسيطر عليها المعالج الدقيق

3-2 مواد التقبض الكهربائي

تتشوه هذه المواد مثل PMN-PT تحت تأثير حقل كهربائي، بالتناسب مع مربع الإستقطاب، وعلى عكس المواد الكهرإجهادية فإن قانون علاقة التشوه بالإستقطاب ليست خطية، إلا أنه لا يوجد إستقطاب متبقي، وبالتالي يكون المجال الكهربائي المطبق أكبر، وبسبب اللاخطية وظاهرة الهيستريا‌س الملازمة لهذه المواد تجعل استخدامها أكثر صعوبة للسيطرة الفعالة على الاهتزازات.

4-2 مواد التقبض المغناطيسي

يمكن أن تتشوه مواد التقبض المغناطيسية تحت تأثير المجال المغناطيسي و تصل نسبة تشوهها إلى حوالي 0.2 % التي تجعلها من بين المواد الأكثر قابلية للتشوه ،وهذه النسبة هي ضعف نسبة تشوه مواد التقبض الكهربائي، بالإضافة إلى ذلك فإن معامل إقتران هذه المواد نسبته جد مرتفعة تبلغ حتى75% ، لكن صلابتها العالية تجعلها غير مفضلة في الإستخدام النشط، العيب الرئيسي لهذه المواد هو تغذيتها التي تتطلب تنفيذ حقول مغناطيسية، وبالتالي تيارات جد عالية التي يصعب في كثير من الأحيان إعدادها.

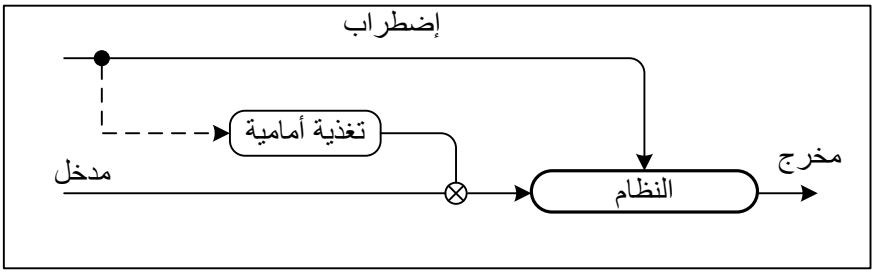
3. المراقبة باستخدام عناصر كهرإجهادية

وُلد التحكم النشط بالاهتزازات في الثلاثينيات من القرن الماضي، وقد تم تطويره فعليا مع ظهور معالجات الإشارات الرقمية في الثمانينيات، وأحدث إستخدام المستشعرات والمحركات القائمة على السيراميك الكهروإجهادي تقدمًا كبيرا في عدة تطبيقات.

يكون نظام المراقبة نشطًا إذا قام مشغل أو أكثر بتطبيق القوى على الهيكل وفقًا لقانون تحكم باستخدام مصدر طاقة خارجي لتشغيلها، وهناك مبدآن للتحكم:

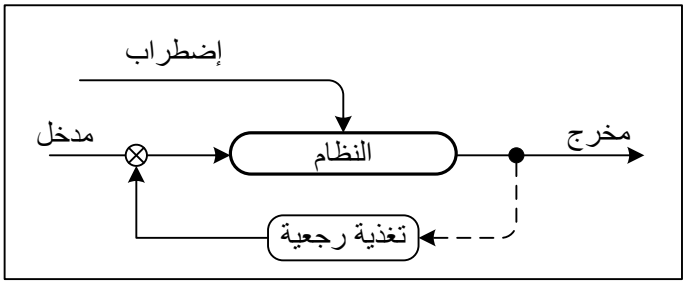
1- التحكم الإستباقي أو بالتغذية الأمامية (feedforward control):

يعتمد التحكم بالتغذية الأمامية (*feedforward*) على التوفر الإسستباقي لمعلومات الإضطراب. فيتم قياس هذه الإضطرابات قبل وصولها إلى الهيكل أو النظام المراد مراقبة إهتزازاته، ولقد تم تطوير هذا التحكم الحاصل على براءة إختراع عام 1936 بشكل أساسي في مجال الصوتيات.



شكل (5):المراقبة بواسطة التغذية الأمامية

2- التحكم بمفعول أوتغذية رجعية (feedback control): يتم بمعالجة القياسات التي توفرها المستشعرات المثبتة على الهيكل مباشرة بواسطة نظام التحكم ، الذي يعيد إرسالها إلى المشغلات من أجل تقليل مستوى الإهتزازات التي يخضع لها الهيكل.



شكل (6): المراقبة بواسطة التغذية الرجعية

4. إستراتيجيات المراقبة

تختلف إستراتيجيات المراقبة باختلاف تموقع المحركات وأجهزة الاستشعار، فيمكن أن تكون:

1-4 محلية أو موضعية (locale) وهي عندما يكون جهاز الإستشعار والمشغل متقابلين وجها لوجه في نفس النقطة، تستخدم فيها قوانين تحكم بسيطة للغاية (عودة ثابتة بسيطة للسرعة) ، وعلى الرغم من أن هذا التموضع يعطي متانة طبيعية إلا أنه ذو فعالية محدودة(محلية).

2-4 شاملة (globale) من أجل تحقيق الإستقرار الشامل للهيكل فهي توفر إمكانية القياس في أي المكان، وأيضا إستقلالية المحرك عن المستشعر، ولذلك هناك صعوبة كبيرة في إعدادها، حيث أنها ليست قوية بشكل طبيعي وحساسة لأخطاء النمذجة.

3-4 المراقبة اللامركزية*(decentralized)* : تتمثل في مجموعة من وحدات مراقبة محلية وذات تحكم ذاتي تسمح بتحسين نتائج المراقبة الموضعية، فالهيكل مكون من أنظمة فرعية كل منها مجهز بأجهزة إستشعار ومشغلات خاصة به، وكل حلقة من حلقات هذا التحكم مستقلة فيما بينها وهذا ما يزيد من إمكانية التعديلات (إضافة أزواج إضافية دون تغيير تصميم وحدة التحكم) وأيضا من دقة النتائج (يمكن تصميم كل حلقة من حلقات التحكم بشكل منفصل وليس من الضروري حساب النموذج بالكامل).

4-4 المراقبة الهرمية *(hierarchical)* :هي تطور للسيطرة اللامركزية، إستراتيجية هذه المراقبة على النحو التالي: تتحكم وحدة مراقبة شاملة في وحدات التحكم المحلية فتتم معالجة معلوماتها بشكل تقريبا مستقل، ويستخدم هذا النوع من المراقبة على نطاق واسع في مجال النقل[3].

5. خوارزمية المراقبة النشطة

لتصميم نظام مراقبة يجب بناء نموذج رياضي (خوارزمية) للهيكل بشكل عام، ويجب تحديد القياسات المطلوبة للإضطرابات التي ستخضع لها البنية و يعتمد هذا التصميم بدرجة كبيرة على إختيار المشغلات وأجهزة الإستشعار وموقعها.

6. قانون المراقبة

يتم اختيار قانون المراقبة وفقًا للعديد من المتغيرات على حسب أهداف هذه المراقبة وإمكانية تحضير نموذج للهيكل هذا من حيث التعقيدات ونوع الهيكل(مستمر أو متقطع، خطي أو غير خطي، مع أو بدون إقتران).

و وفقا لهذه المعايير هناك العديد من خوارزميات المراقبة على غرار: المعدِل التربيعي الخطي LQR (Linear Quadratic Regulator)، المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (Proportional Integral Derivative) PID و طريقة التحكم إتش إنفينتي H_∞، إلخ.

7. المراقبة المنوالية (Modal control)

من أجل تحديد المراقبة على أوضاع معينة من الهيكل تستخدم أساليب التحكم بطريقة المناول على نطاق واسع في المراقبة النشطة، تم تطوير هذه الطريقة في أوائل الثمانينيات، وهي تتمثل في إسقاط المتغيرات المختلفة التي سيتم التحكم بها في قاعدة المناول التي تتكون بشكل عام من الإزاحات والسرعات لكل وضع من أوضاع المراقبة. وميزتها هي الحصول على متغيرات مستقلة أو شبه مستقلة عن بعضها البعض.

تعتمد هذه المراقبة على عدد محدود من مناول التحكم، حيث لا تؤخذ المناول التي لم يتم إختيارها في عين الإعتبار أثناء إنشاء قانون المراقبة، وإذا لم يتم إستهلاك هذه المناول بشكل كافٍ، فيمكن أن تكون مفعلة بواسطة القانون نفسه وهذا يمكن أن يؤدي إلى تدهور الأداء أو زعزعة استقرار النظام (spillover) وهي نقطة الضعف الرئيسية في المراقبة بطريقة المناول.

هناك تقنيات مختلفة يمكن أن تقلل من عدم الإستقرار: أولاً تموقع المحركات وأجهزة الإستشعار، ومن ناحية أخرى يمكن أن تخمّد بواسطة ممتص غير نشط على سبيل المثال، أو باستخدام مرشحات التمرير المنخفض (Low-pass filter).

في الوقت الحالي أصبحت إستراتيجيات المراقبة المنوالية أكثر تعقيدًا، فشملت أيضا قوانين التحكم التكيفي واللاخطي.

الفصل الثاني

صيغ ومعادلات الكهروإجهادية وطريقة العناصر المتناهية

من أجل تصميم نظام مراقبة يعمل بواسطة تأثير ظاهرة الكهرباء الإنضغاطية (Piezoelectricity)، يجب صياغة معادلات إقترانها الكهروميكانيكي التي تستخدم في إنشاء نموذج العناصر المتناهية.

1. ظاهرة الكهرباء الإنضغاطية

يمكن تعريف الإنضغاطية أو الكهروإجهادية بالعلاقة المتبادلة بين الظواهر الميكانيكية (إجهاد، تشوه) والظواهر الكهربائية (الحقول والشحنات الكهربائية). وأكتشفت لأول مرة من قبل عالم المعادن الفرنسي رينيه أيوي(R. Hauy) ، و تم القياس الكمي للتأثير الكهروإجهادي من قبل الأخوين بيير وجاك كوري (Pierre and Jacques Curie) في عام 1880، حيث تمت مراقبة الشحنات الكهربائية التي تظهر على سطح البلورة عند تعرضها للضغط (تأثير مباشر)، وعرض غبريال ليبمان(**G. Lippmann**) لأول مرة التأثير المعاكس (تشوه البلورة عند تطبيق حقل كهربائي عليها)، ثم تم التحقق من صحته تجريبياً بواسطة الأخوين كوري عام 1881.

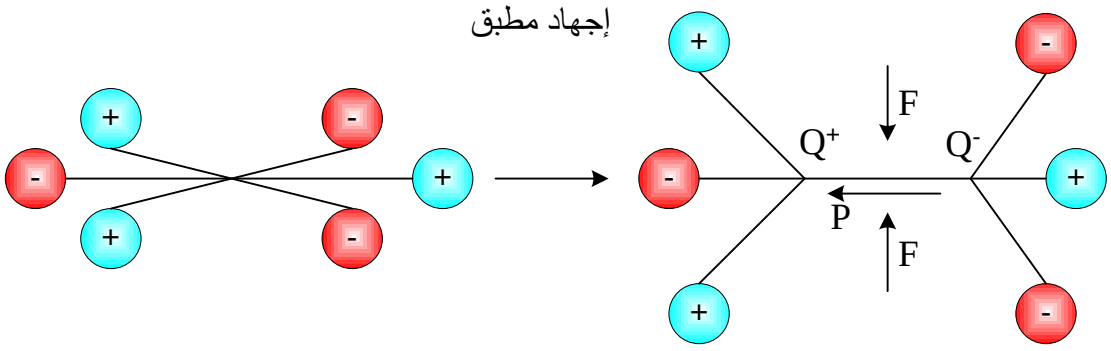
ترتبط ظاهرة الكهرضغطية مباشرة بالبنية البلورية للمواد، فلأن تكون هناك كهرضغطية، يجب أن تكون الشحنات السالبة والموجبة مفصولة وموزعة بشكل متناظر بحيث تكون الشبكة البلورية متعادلة كهربائيا بشكل عام.

تحتوي المادة على استقطاب ناتج عن عزم ثنائي القطب P:

$$P = qd \qquad (1)$$

حيث: q شحنة كل مرجح (barycenter)، d المسافة بين النقطتين.

تتشوه الشبكة عند تطبيق جهد ميكانيكي عليها (تنقص المسافة d) ، وهذا يؤدي إلى توليد جهد كهربائي.



شكل (7): نزوح شحنات موجبة (Q^+) بالنسبة لأخرى سالبة (Q^-) في المادة

2. معادلات الكهروضغطية

يمكن صياغة معادلات الكهروإجهادية إنطلاقا من معادلات الديناميكا الحرارية، مع الأخذ في الإعتبار أزواج المتغيرات المستقلة:

(T،E) ، (T،D) ، (S،E) ، (S،D) حيث E يمثل الحقل الكهربائي (V/m) ، T الإجهاد الميكانيكي (N/m^2)، D الإنتقال أو التهجير الكهربائي(C/m^2) و S التشوه (m/m).

وبالتالي فإن عبارة كمون الديناميكا الحرارية لـ جوزيه غيبس (G. Gibbs) في حالة التحول الأدياباتيكي العكوس تجعل من الممكن صياغة عبارة مختلف معاملات الكهرضغطية في حالة تطوير الدرجة الأولى.

$$G = U - TS - ED \quad (2)$$

حيثU الطاقة الداخلية للنظام، والمتغيرات E، T، D وS المشتقات الجزئية لغيبس، نتحصل على المعادلات الثمانية التالية:

متغيرات مستقلة	كميات كهربائية	كميات ميكانيكية
E, T	$D = dT + \varepsilon^T E$	$S = s^E T + d^t E$
D, T	$E = \beta^T D - gT$	$S = s^D T + g^t D$
E, S	$D = \varepsilon^S E + eS$	$T = c^E S - e^t E$
D, S	$E = \beta^S D - hS$	$T = c^D s - h^t D$

جدول (1): معادلات الكهرواجهادية

حيث:

$[\ ]^t$ منقول المصفوفة [ ].

T إجهاد ميكانيكي (N/m2).

S التشوه النسبي (m/m).

E الحقل الكهربائي (V/m).

D الإزاحة الكهربائية أو الحث (C/m^2).

s المطاوعة أو اللدونة (m2/N).

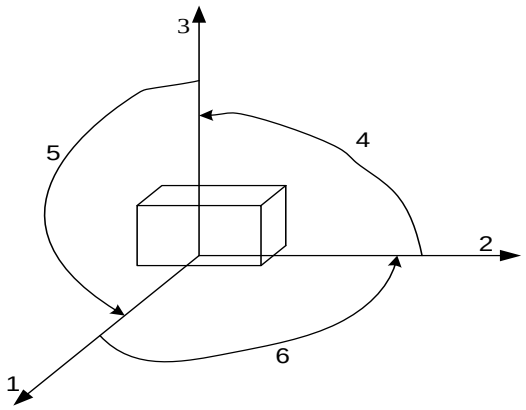
c مصفوفة المرونة (N/m^2).

ε السماحة الكهربائية (F/m).

β (m/F) ثابت شدة العزل أو الكهربائي.

d (C/N أو m/V)، e(C/m^2)، g(m^2/C)، h(V/m) ثوابت الكهروإجهادية تمثل النسبة بين الشحنة و التشوه وبين الحقل.

العلاقات المحددة تشير إلى الاتجاهات المختارة الموضحة في الشكل(8). S1،S2، S3 وT1، T2، T3 تمثل التشوهات و الإجهادات الموازية للمحاور 1،2،3 أما S4، S5، S6 وT4، T5، T6 فتمثل تشوهات وإجهادات القص حول نفس المحاور.



شكل (8): ترقيم المحاور

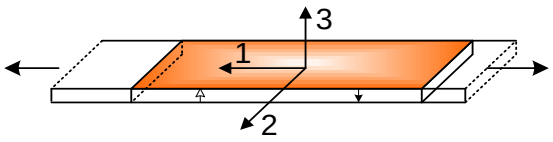
3. أوضاع إقتران السيراميك الكهروضغطي

البنية البلورية للسيراميك لها ميزة التناظر التي تعطي المصفوفات التالية:

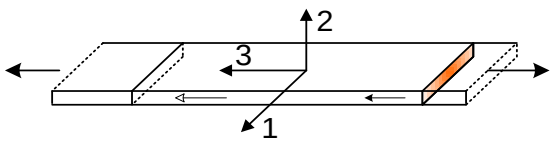
$$S=\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{44} & 0 & 0 \\ & & & & s_{55} & 0 \\ & & & & & s_{66} \end{bmatrix}; \varepsilon=\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}; d=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

السيراميك الكهروضغطي له ثلاثة أوضاع إقتران كهروميكانيكي رئيسية:

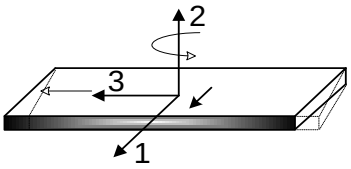
- الوضع الطولي (33)
- الوضع العرضي(31)
- وضع القص(15)



الوضع العرضي(31)



الوضع الطولي(33)



وضع القص(51)

شكل (9): أوضاع إقتران السيراميك الكهروضغطي

4. تحويل الطاقة تحت تأثير الكهرضغطية

الكهرضغطية لها قدرة مباشرة على التحويل الكهروميكانيكي للطاقة.

طريقة عمل مشغل كهروضغطي في دورة نظرية لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية تجعل من الممكن تحديد خصائص التحويل خاصة معامل الإقتران الكهروميكانيكي الذي يلعب دور أساسي في تقنيات مراقبة و إخماد الأنظمة.

الشكل (10) يوضح الحلقة النظرية لتحويل الطاقة، التي يمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل تفصل مراحل العمل الميكانيكي عن تلك الخاصة بالأعمال الكهربائية، يتم توصيل المحرك الكهروإجهادي بمصدر جهد مثالي يفرض حقلا كهربائيًا على طول المحور 3 على إفتراض أن تعمل في وضع عرضي وبالتالي تشوه وفقا للمحور 1، الدراسة الموضوعة هنا لمشغل كهرضغطية يخضع لحقل كهربائي، إذا في حالة تأثير كهرضغطية عكسي.

خلال المرحلة الأولى لهذه الدورة (AO) المشغّل يكون حرا ومع إجهاد ثابتT1، يتشوه تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبق E3 ويخزن الطاقة W المقابلة للعمل الكهربائي وبالتالي العمل الميكانيكي يكون معدوما ويمكن التعبير عن عمل المصدر الكهربائي We_{OA} بدلالة الحقل الكهربائي المطبق وخصائص المادة مع إجهاد مستمر بالعلاقة:

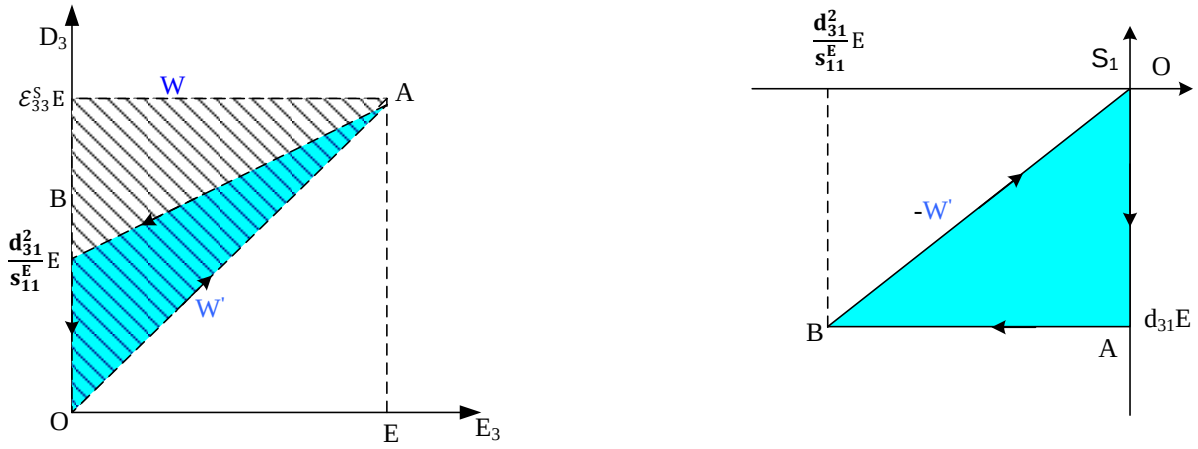
$$We_{OA} = \int_O^A E_3 dD_3 = \frac{1}{2} E_3^2 = W > 0. \quad (3)$$

وفي المرحلة الثانية (AB) تتم استعادة جزء من الطاقة الكهربائية التي يوفرها المصدر في شكل كهربائي بينما يتم تخزين الطاقة المتبقية في المواد في شكل مرونة، وبذلك تتم إعادة الحقل الكهربائي E3 إلى قيمة معدومة مع وجود تشوه S1 نفترض أن يكون ثابت، العمل الميكانيكي عندئذ يكون معدوما و يمكن التعبير عن الأعمال الكهربائية المستردة بدلالة الحقل الكهربائي المطبق وخصائص المادة عند التشوه الثابت :

$$We_{AB} = \int_A^B E_3 dD_3 = -\frac{1}{2} \mathcal{E}_{33}^S E_3^2 = W_i < 0, \quad (4)$$

أما في المرحلة الثالثة (BO) فيتم تحرير السيراميك واستعادة الطاقة المخزنة في شكل عمل ميكانيكي'W، الحقل الكهربائي E3 معدوم وبالتالي العمل الكهربائي معدوما.

$$W_{m_{BO}} = \int_B^O T_1 dS_1 = -\frac{1}{2}\frac{d_{31}^2}{s_{11}^E}E_3^2 = -W' < 0 \quad (5)$$



شكل (10) : الدورة النظرية لتحويل الطاقة في حالة مشغل كهرضغطي

يمكن التعبير عن الطاقة المحولة 'W بدلالة العمل المنجز بواسطة المصدر الكهربائي والطاقة المستعادة إلى المصدر في شكل أعمال كهربائية

$$W' = W - W_i \quad (6)$$

النسبة بين الطاقة المحولة'W وطاقة البداية التي يوفرها المصدر W، تميز قدرة المحول على تحويل الطاقة. حيث يُعرّف جذر هذه النسبة معامل إقتران الكهروميكانيكية للسيراميك الكهروإجهادية K_{31} :

$$K_{31} = \sqrt{\frac{W'}{W}} \quad (7)$$

من (3)،(5) و(7) نكتب

$$K_{31} = \sqrt{\frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^S}} \quad (8)$$

هذا هو معامل الإقتران الكهروميكانيكي لسيراميك وحيدة وحرة [5].

5. الدراسة بطريقة العناصر المتناهية

طريقة العناصر المتناهية هي طريقة حساب عددية ذات طابع فيزيائي أكثر منه مجرد، وضعت إلى حد ما من قبل المهندسين أكثر من علماء الرياضيات، وتم تطبيق هذه الطريقة لأول مرة في المشكلات المتعلقة بتحليل الإجهادات، ثم وسعت لتشمل مشاكل أخرى متعلقة بالأوساط المستمرة.

في جميع التطبيقات نسعى إلى حساب كمية من الحقول على سبيل المثال:

التطبيق	الحقول المدروسة
تحليل الإجهادات	الإجهادات أو الإزاحات
تحليل الحرارة	درجة الحرارة أو التدفق الحراري
سريان الموائع	دالة أو سرعة التيار

طريقة العناصر المتناهية تمكننا من حل مشكلة النتائج التحليلية التي يصعب إيجادها بقيمها الدقيقة، بتوفيرها حل تقريبي للحل الدقيق، حيث يجزأ الوسط المدروس إلى عدة عناصر مترابطة فيما بينها بواسطة عقد، الشكل الهندسي للعنصر يتميز بعدد محدود من العقد على محيطه.

الحل بطريقة العناصر المتناهية هو إيجاد مقدار الإزاحة (مثل الإنتقال والدوران) لهذه العقد، ويتم تحديد مجال النزوح في أي نقطة من الوسط المدروس عن طريق الإستيفاء بين القيم المحددة في العقد، و يستند الاستيفاء على إستخدام دالة الشكل.

1-5 الطاقة الكامنة و مصفوفة الصلابة

الطاقة الكامنة للعنصر iهي

$$\boldsymbol{U_i} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \int_{\Omega} \mathcal{E}^{\mathrm{t}} \sigma \ \mathrm{d}\Omega \tag{9}$$

إنتقال نقطة بدلالة الإنتقال العقدي يعطى بـ :

$$d = N\,\delta \tag{10}$$

حيث d هو شعاع إنتقال نقطة ما داخل العنصر، المصفوفة N نتيجة فرضية حول الانتقال داخل العنصر، δ شعاع إنتقال عقد العنصر.

بإشتقاق العلاقة 10 نجد علاقة التشوه بدلالة الإنتقال العقدي:

$$\mathcal{E} = \mathrm{B}\,\delta \tag{11}$$

نعلم أن

$$\sigma = \mathrm{D}\,\mathcal{E} \tag{12}$$

حيث D مصفوفة مربعة متماثلة عناصرها مرتبطة بالخصائص الميكانيكية للمواد (E،ν)

بتعويض 11و12 في 9 نجد:

$$\mathrm{U_i} = \int_{\Omega} (\mathrm{B}\delta)^{\mathrm{t}}\, \mathrm{DB}\delta \tag{13}$$

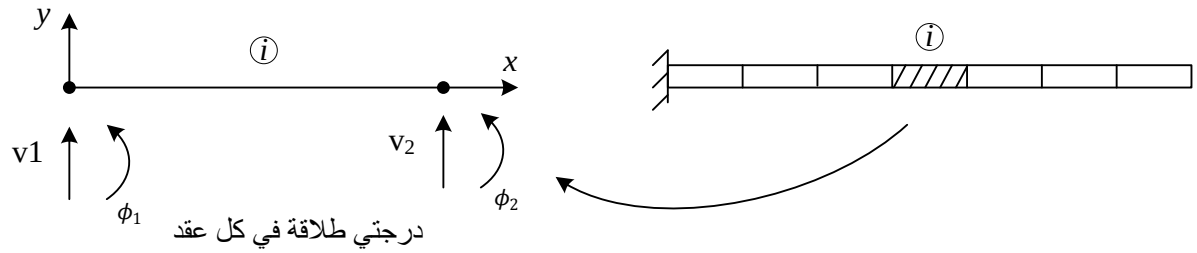
$$= \frac{1}{2}\delta^{t}\left[\int_{\Omega} \mathrm{B}^{\mathrm{t}}\, \mathrm{DB}\ \mathrm{d}\Omega\right]\delta = \frac{1}{2}\delta^{t}\mathrm{K_i}\delta$$

و منه مصفوفة الصلابة للعنصر iهي

$$K_i = \int_\Omega B^t D B \, d\Omega. \quad (14)$$

وتكون متماثلة لأن D متماثلة.

2-5 مصفوفة الصلابة في حالة حركة إنعطاف لجائز :



شكل (11): عارضة مثبتة-حرة (حالة انعطاف)

$$V(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3. \quad (15)$$

$$\phi(x) = \frac{\partial V}{\partial x} = a_2 + 2a_3 x + 3a_4 x^2. \quad (16)$$

عند $x=0$

$$V_1 = a_1$$

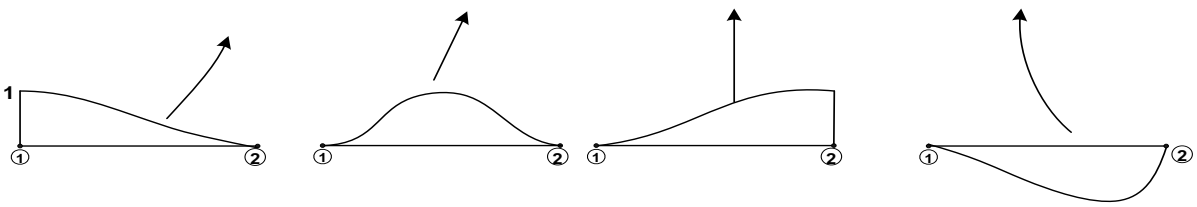
$$\phi_1 = a_2$$

عند $x=l$

$$V_2 = a_2 l + a_3 l^2 + a_4 l^3 \quad (17)$$

$$\phi_2 = a_2 + 2a_3 l + 3a_4 l^2 \quad (18)$$

$$V(x) = \begin{bmatrix} \underbrace{1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}}_{\boldsymbol{N_1}} & ; & \underbrace{x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}}_{\boldsymbol{N_2}} & ; & \underbrace{\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3}}_{\boldsymbol{N_3}} & ; & \underbrace{\frac{-x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}}_{\boldsymbol{N_4}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_1 \\ \phi_1 \\ V_2 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} \quad (19)$$



من خصائص هذه الدوال (دوال الشكل) أن لها قيم الوحدة عند العِقد المعني وقيم معدومة فيما سواها.[6]

<u>في حالة الإنعطاف :</u>

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_x = -y \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (20)$$

$$\mathcal{E} = -y\left[-\frac{6}{l^2}+\frac{12x}{l^3};\ -\frac{4}{l}+\frac{6x}{l^2};\ \frac{6}{l^2}-\frac{12x}{l^3};\ -\frac{2}{l}+\frac{6x}{l^2}\right]\begin{Bmatrix}V_1\\ \phi_1\\ V_2\\ \phi_2\end{Bmatrix} \tag{21}$$

$$U = \frac{1}{2}\ \frac{EI}{L^3}\begin{Bmatrix}V_1\\ \phi_1\\ V_2\\ \phi_2\end{Bmatrix}^{\mathrm{t}}\begin{bmatrix}12 & 6l & -12 & 6l\\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2\\ -12 & -6l & 12 & -6l\\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}V_1\\ \phi_1\\ V_2\\ \phi_2\end{Bmatrix} \tag{22}$$

$$k_i = \frac{EI}{l^3}\begin{bmatrix}12 & 6l & -12 & 6l\\ & 4l^2 & -6l & 2l^2\\ sym & & 12 & -6l\\ & & & 4l^2\end{bmatrix} \tag{23}$$

3-5 الطاقة الحركية و مصفوفة الكتلة لعنصر

$$E_c = \frac{1}{2}\int_{\Omega}\rho V^2 \mathrm{d}\Omega \tag{24}$$

ولدينا $\mathrm{d}= \mathrm{N}\,\delta \ \rightarrow V= \mathrm{N}\,\dot{\delta}$

$$E_c = \tfrac{1}{2}\int_{\Omega}\rho\left(N\dot{\delta}\right)^{\mathrm{t}}.N\,\dot{\delta}\ \mathrm{d}\Omega \tag{25}$$

$$E_c = \frac{1}{2}\,\dot{\delta}^{\mathrm{t}}\left[\int_{\Omega}\rho\ N^{\mathrm{t}}\,N\ \mathrm{d}\Omega\right]\dot{\delta} \tag{26}$$

$$E_{c_i} = \frac{1}{2}\dot{\delta}^{\mathrm{t}}M_i\dot{\delta}\ \rightarrow\ M_i = \int_{\Omega}\rho N^t N\ \mathrm{d}\Omega \tag{27}$$

وفي حالة حركة إنعطاف لجائز مصفوفة الكتلة هي كالتالي:

$$M_i = \frac{\rho s l}{420}\begin{bmatrix}156 & 22l & 54 & -13l\\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2\\ 54 & 13l^2 & 156 & -22l\\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2\end{bmatrix} \tag{28}$$

6. طريقة العناصر المتناهية في الحالة الديناميكية

لتقييم سلوك الهياكل المعقدة يلزم إستخدام طريقة العناصر المتناهية، كما أنها تجعل من الممكن تصميم الهياكل الذكية أيضا ولا سيما فيما يتعلق بتحديد موضع المشغلات وأجهزة الاستشعار الكهروإجهادية و وضع التقديرات الأولية لأداء نظام المراقبة، ويتم الحصول على معادلة المنظومة :

$$\begin{cases}\mathrm{m}\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta + \mathrm{K_z v} = f\\ \mathrm{K_z^t}\delta + \mathrm{C_p v} = \mathrm{Q}\end{cases} \tag{29}$$

إنطلاقا من معادلات الكهرضغطية المذكورة سابقا و مبدأ هاميلتون:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (L + W)dt = 0, \quad (30)$$

حيث تشير t_1 و t_2 إلى لحظتين مختلفتين، L معادلة لاغرنج و W هو العمل الافتراضي للقوى الميكانيكية والكهربائية الخارجية.

δ هو متجه الإزاحة ، v هو متجه الكمون الكهربائي، m،k وc هي على التوالي مصفوفة الكتلة، الصلابة والإخماد، K_z هي مصفوفة الاقتران الكهروإجهادي، f القوى العقدية، C_p هي مصفوفة السعة و Q تمثل مصفوفة الشحنات الكهربائية.

7. إستخدام طريقة المناول

إذا كان لمنظومة n درجة طلاقة فلها n هزة خاصة ω_i و n شكل خاص X_i، اللذان يعرفان المنوال الخاص ϕ_i.

إذن كل منظومة ذات n درجة طلاقة لها n منوال.

$$\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (31)$$

ϕ تسمى مصفوفة المناول أو العبور.

الإسقاط في قاعدة المناول

لتكن هناك علاقة بين δ و ϕ:

$$[\delta] = [\phi][q] \quad (32)$$

حيث δ و q هما بالترتيب الإحداثيات الفيزيائية والإحداثيات في قاعدة المناول.

وبالتعويض في معادلة المنظومة نجد :

$$\begin{cases} m\phi\ddot{q} + c\phi\dot{q} + k\phi q + k_z v = f \\ K_z^t \phi q + C_p v = Q \end{cases} \quad (33)$$

وبالضرب في ϕ^{-1} تصبح

$$\begin{cases} M\ddot{q} + C\dot{q} + K q + \alpha v = f \\ \alpha^t q + C_p v = Q \end{cases} \quad (34)$$

حيث M، C، K و α^t هي على الترتيب المصفوفة المنوالية لـ : الكتلة، الإخماد، الصلابة و الإقتران الكهروميكانيكي .

8. التحكم النشط

في هذه المرحلة نقوم بتحويل معادلة الحركة (34) للمنظومة الى معادلة الحالة والتي تعطى بالعلاقة:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) \end{cases}$$

حيث A،B وC هي مصفوفات: المنظومة، المدخل و المخرج على الترتيب وهي كالتالي:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i \\ -\omega_i & 2\zeta_i\omega_i \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$[B^t] = [0 \quad b_i] \quad (37)$$

$$[C] = [c_i \quad 0] \quad (38)$$

b_i يمثل فعل المشغل عند المنوال الخاص i :

$$b_i = (2h + h_p)\int_s \left(e_{31}\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + e_{32}\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}\right)\mathrm{dS} \quad (39)$$

C_i يمثل ثابت الكشف للمستشعر عند المنوال الخاص i:

$$C_i = \frac{1}{\varepsilon_{33}}(h + h/2)\int_s \left(e_{31}\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + e_{32}\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}\right)\mathrm{ds} \quad (40)$$

$(\phi، \omega_i)$ يمثلان الزوج (التردد /الشكل) الخاص i.

ζ_i هو نسبة الاخماد i.

e_{31}، e_{32} معاملات الكهروضغطية.

نفرض الدالة في الحالة المراقبة الاتية:

$$\{\Psi\} = [G]\{x\} \quad (41)$$

G مصفوفة الجواب(gain) في حالة الرجعية.

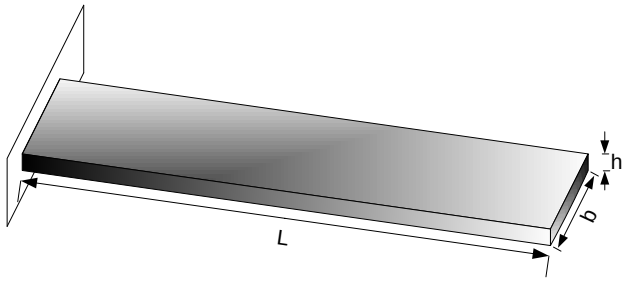
من اجل المنظم LQR انتقاء Q وR ضروري [7] .

الفصل الثالث

نمذجة العارضة الذكية باستعمال طريقة العناصر المتناهية بواسطة برنامج ANSYS

في هذه الدراسة نتناول نمذجة عارضة ذكية. نقوم بتحديد الخصائص الإهتزازية أولا لعارضة الأساس (عارضة متجانسة بدون رقاقات كهروإجهادية) والمتمثلة في تحديد الأنماط والاهتزازات الطبيعية، وثانيا للعارضة الذكية(بعد تثبيت الرقاقات)

1. نمذجة عارضة الأساس :



شكل (12): عارضة الأساس (مثبتة-حرة)

الخصائص الميكانيكية موجودة في الجدول (2):

الطول(L)	400 مم
العرض(b)	25مم
السمك(h)	3مم
معامل يونغ(E)	$2,07 \cdot 10^{11}$ باسكال
الكتلة الحجمية(ρ)	7850 كغ/م^3

جدول(2): الخصائص الميكانيكية

نظريا يتم حساب الترددات الخاصة لهذه العارضة بالعلاقة التالية :

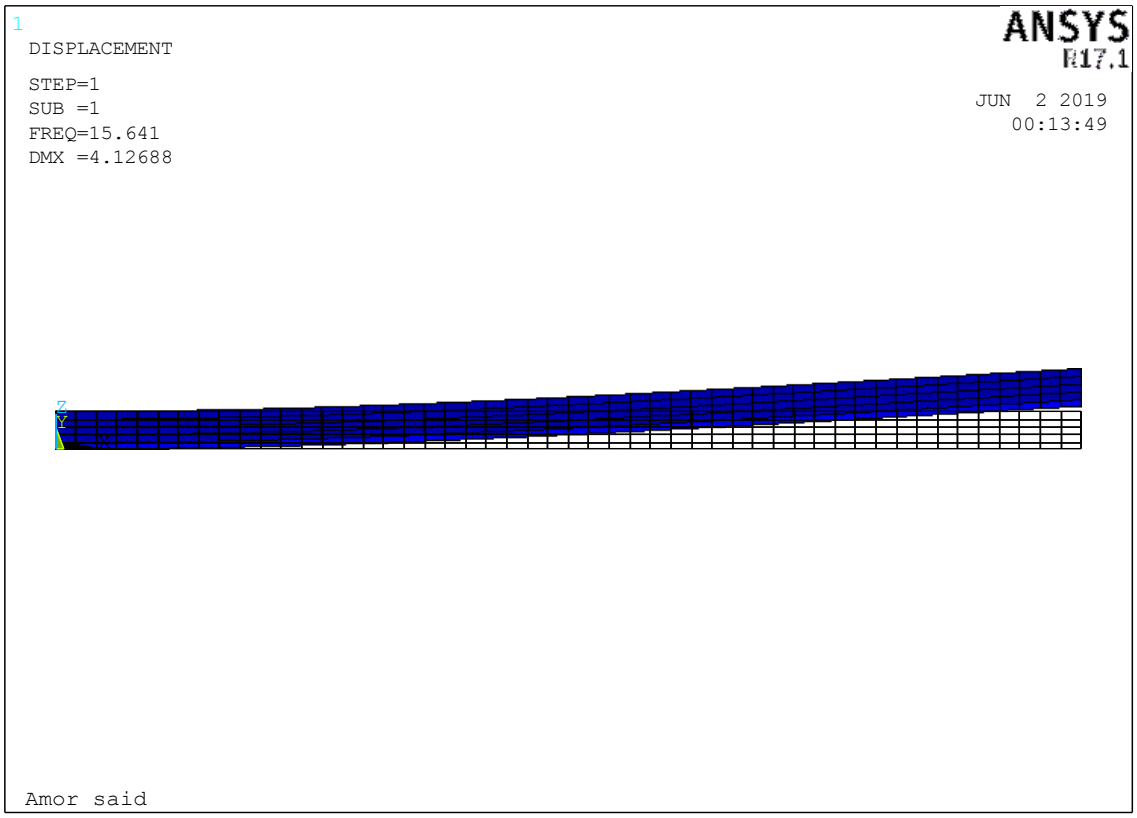
$$f_i = \frac{{X_i}^2}{2\pi L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (Hz) \qquad (35)$$

حيث: $\boldsymbol{X_i}$ المعامل الخاص بكل منوال وهو يتعلق بالشكل الهندسي والشروط الحدية، I العزم الرباعي $I = b*h^3/12$.

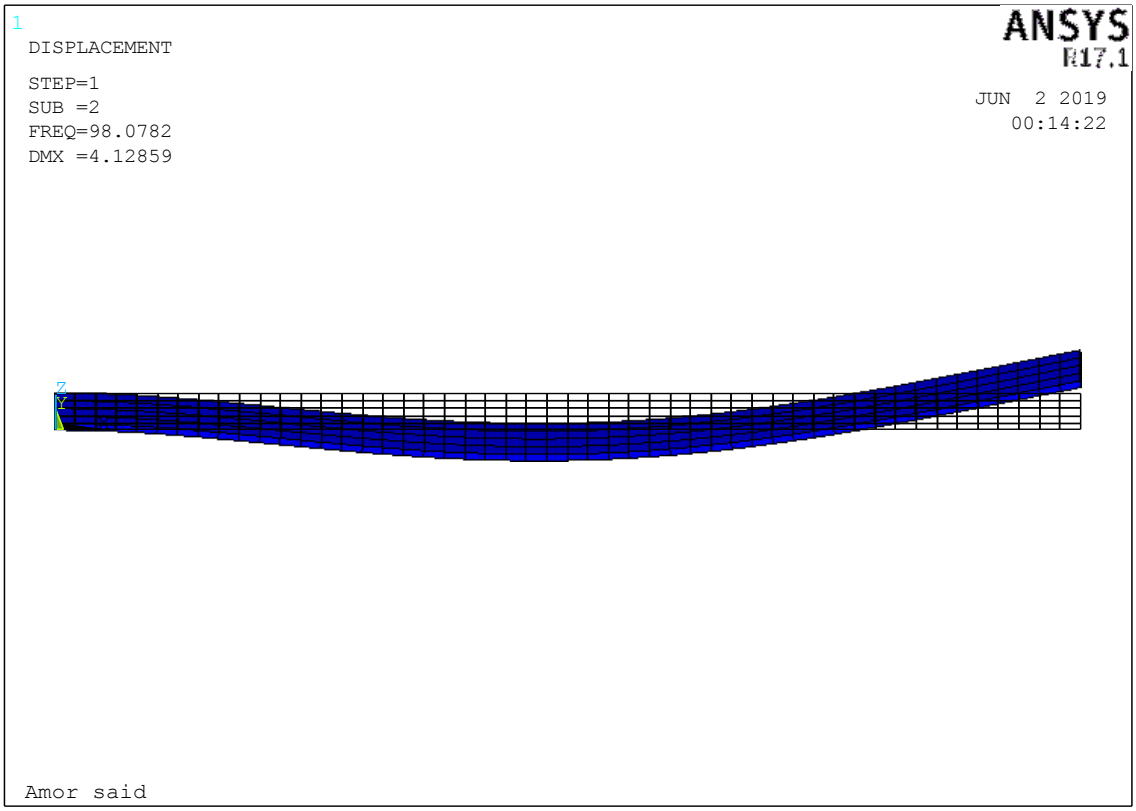
الوضع	${X_i}^2$	f_i (Hz) نظريا	f_i (Hz) بواسطة ANSYS
1	3,516	15,553	15,641
2	22,03	97,452	98,078
3	61,69	272,889	275,146

جدول(3): قيم ثلاث ترددات خاصة (حالة إنعطاف)

الشكل (13) يوضح مناول الاهتزاز لعارضة الأساس:

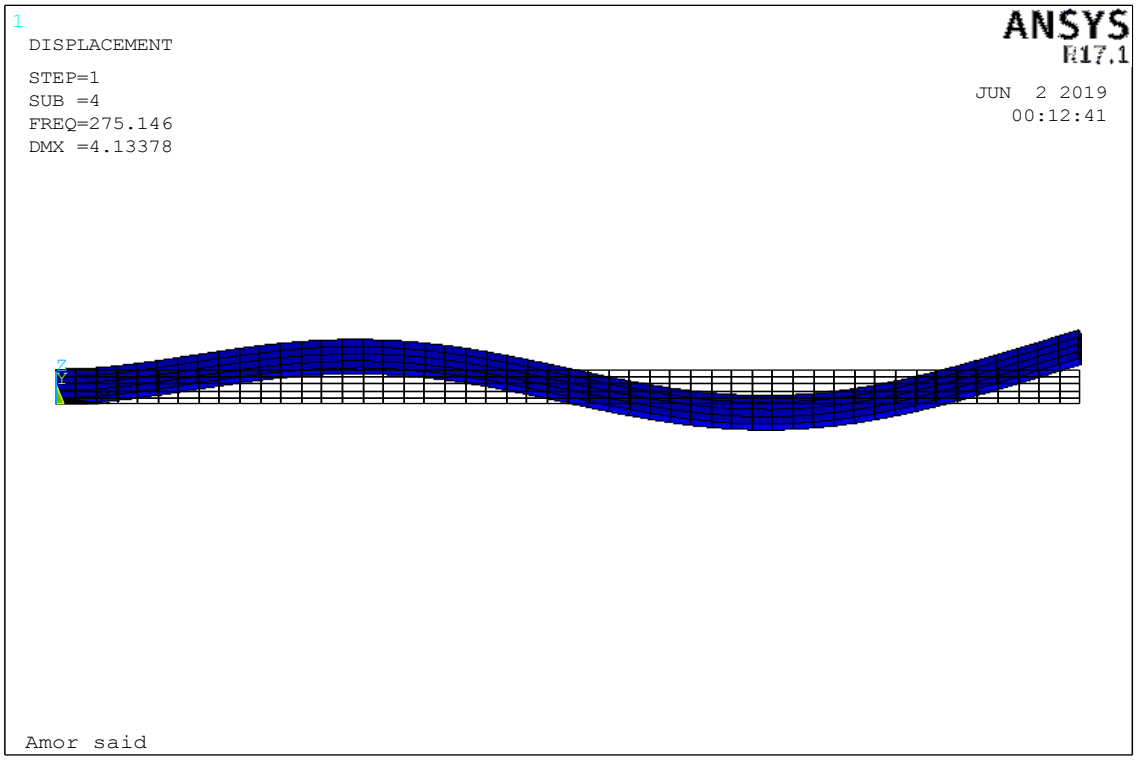


المنوال الأول



المنوال الثاني

.



المنوال الثالث

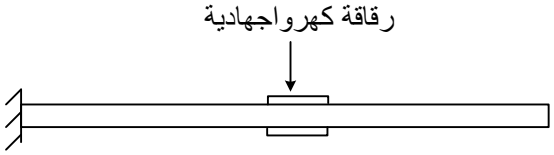
شكل (13): مناول العارضة الاساس عند الترددات الطبيعية الثالث.

2. نمذجة العارضة الذكية

في هذه المرحلة ندرس عارضة الأساس مضاف إليها زوج من الرقاقات الكهرواجهادية الملصقة مثاليا على بعد175مم من الجهة المثبتة.

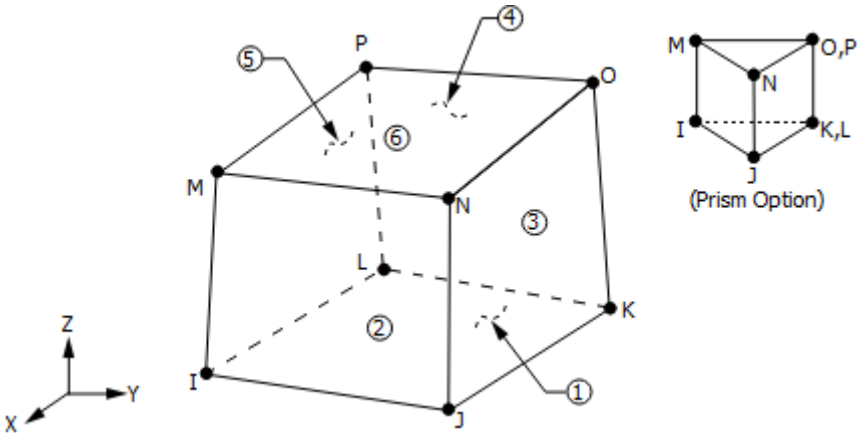
لنمذجة العارضة الذكية نتبع الخطوات التالية:

أ_ رسم النموذج الذكي.



شكل (14): عارضة مثبت عليها الرقاقات

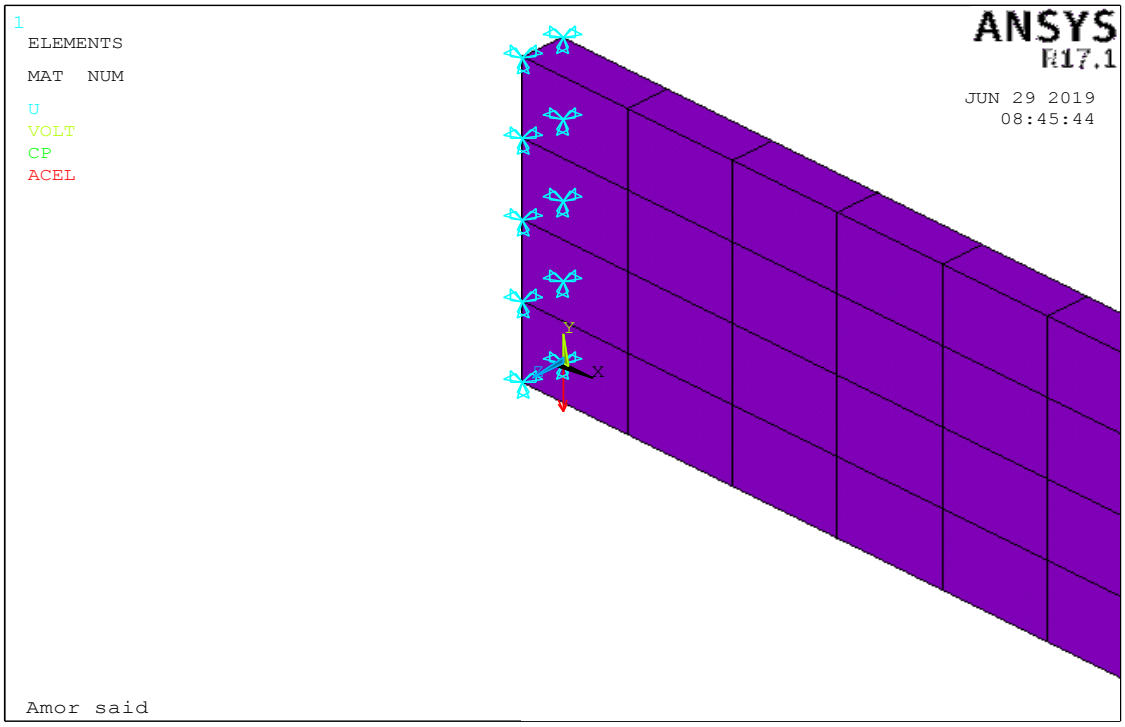
ب_ إختيار عناصر مكتبة ANSYS.apdl، العنصر النموذجيSOLID5,2 لعارضة الأساس، العنصر النموذجي SOLID5,3 لنمذجة الرقاقات وتنشيط الفعل الكهروإجهادي.



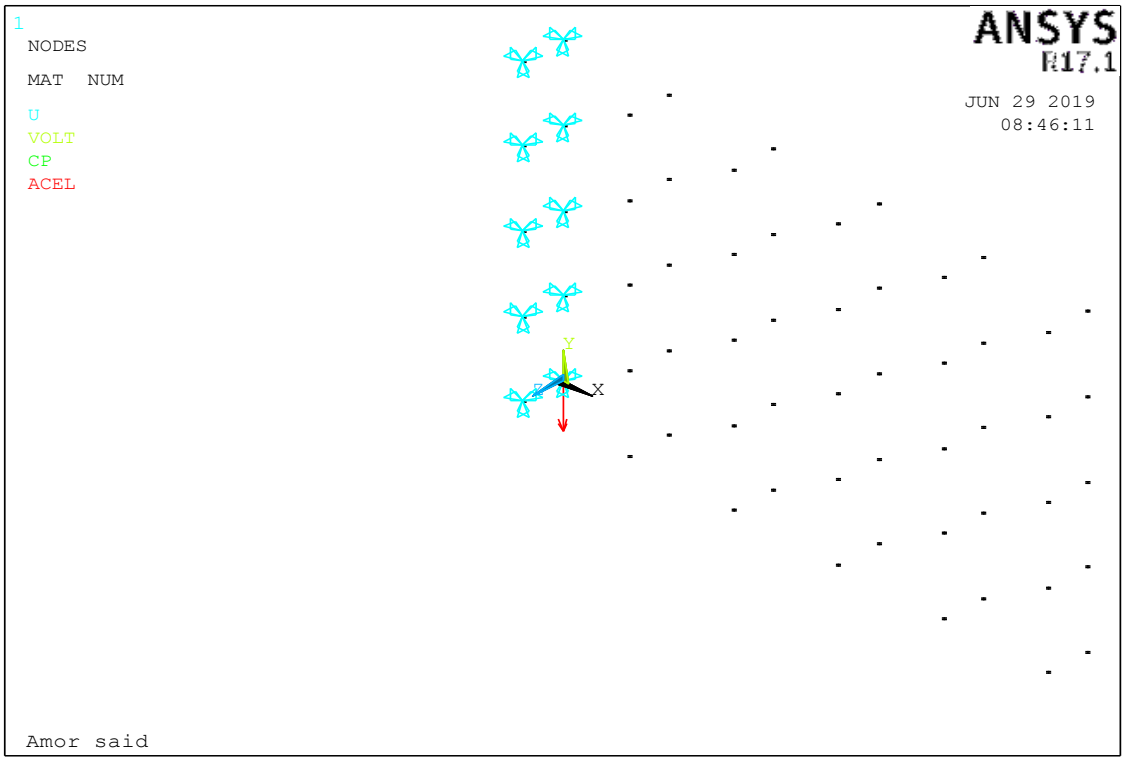
شكل (15): الشكل الهندسي لـ SOLID5 (ANSYS)

ج_ إدخال الخصائص الميكانيكية للعارضة الأساس و الخصائص الميكانيكية والكهربائية للرقاقات.

د_ لتمثيل الشروط الحدية نقوم بتثبيت جميع عقد الحافة.



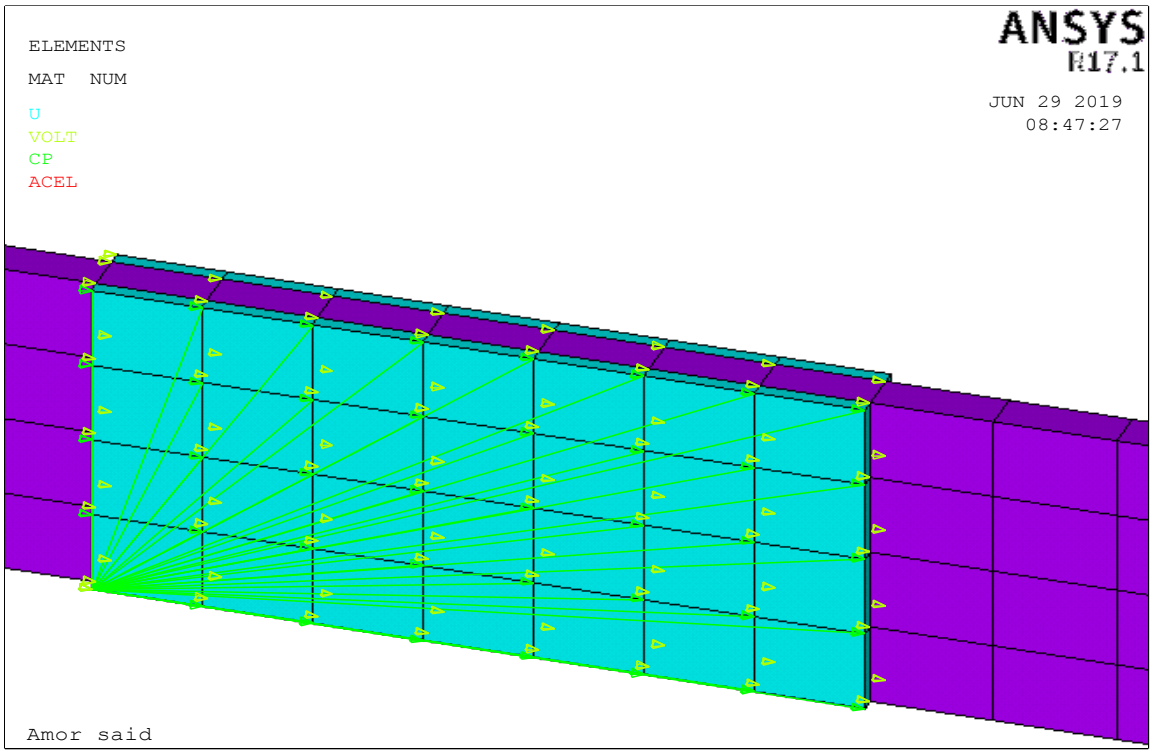
البنية عنصريا



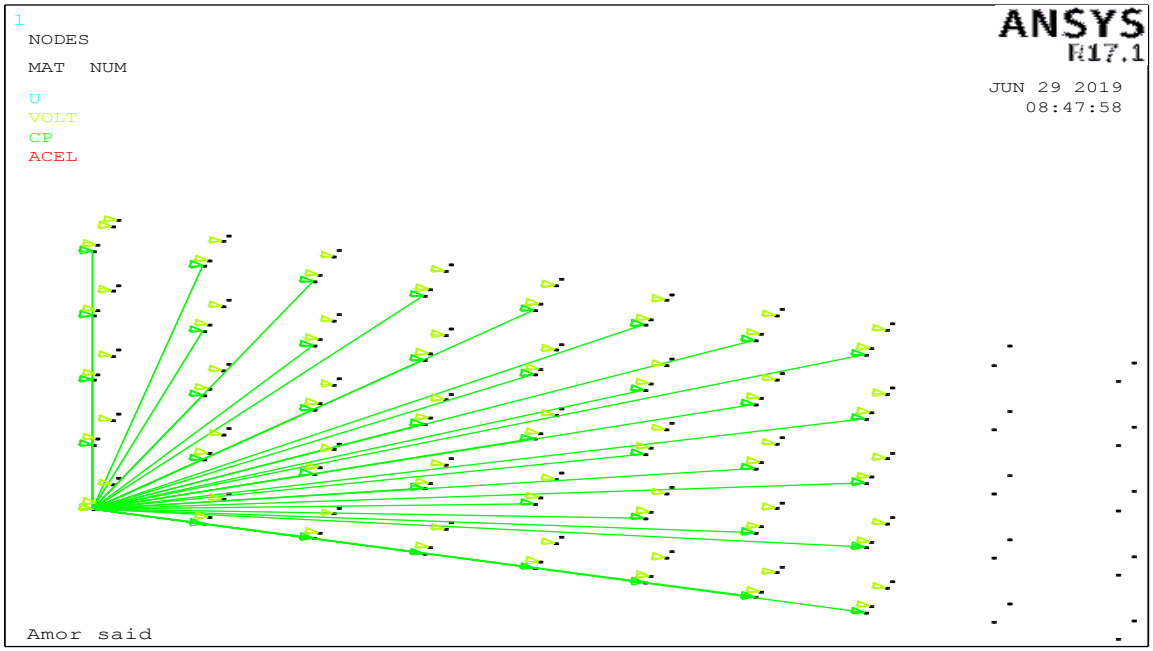
البنية عقديا

شكل (16): تمثيل الشروط الحدية

ه_ نقوم بتقسيم خاص من أجل الحصول على تطابق كلي لعقد الرقاقات مع عقد العارضة الأساس والمزاوجة بين درجات الطلاقة الميكانيكية والكهربائية وهذا بهدف تنشيط الفعل الكهروميكانيكي.



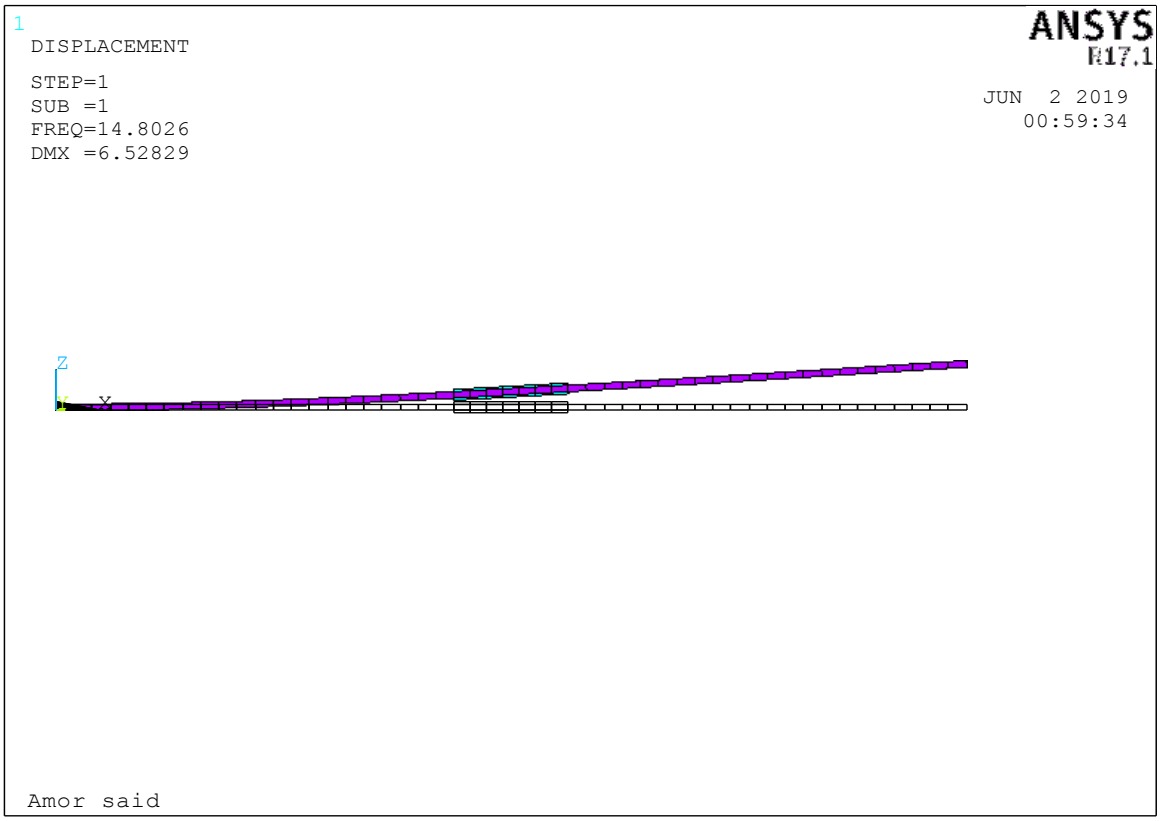
البنية عنصريا



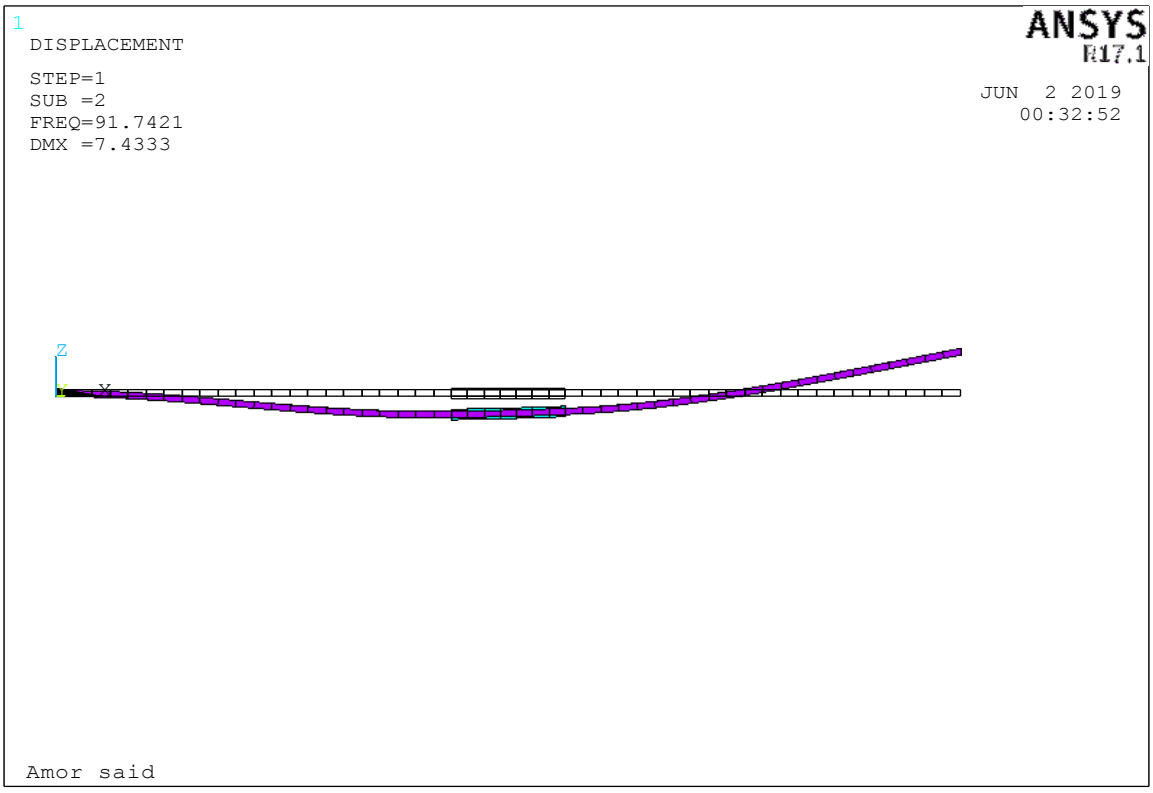
البنية عقديا

شكل (17) : تنشيط الفعل الكهروميكانيكي

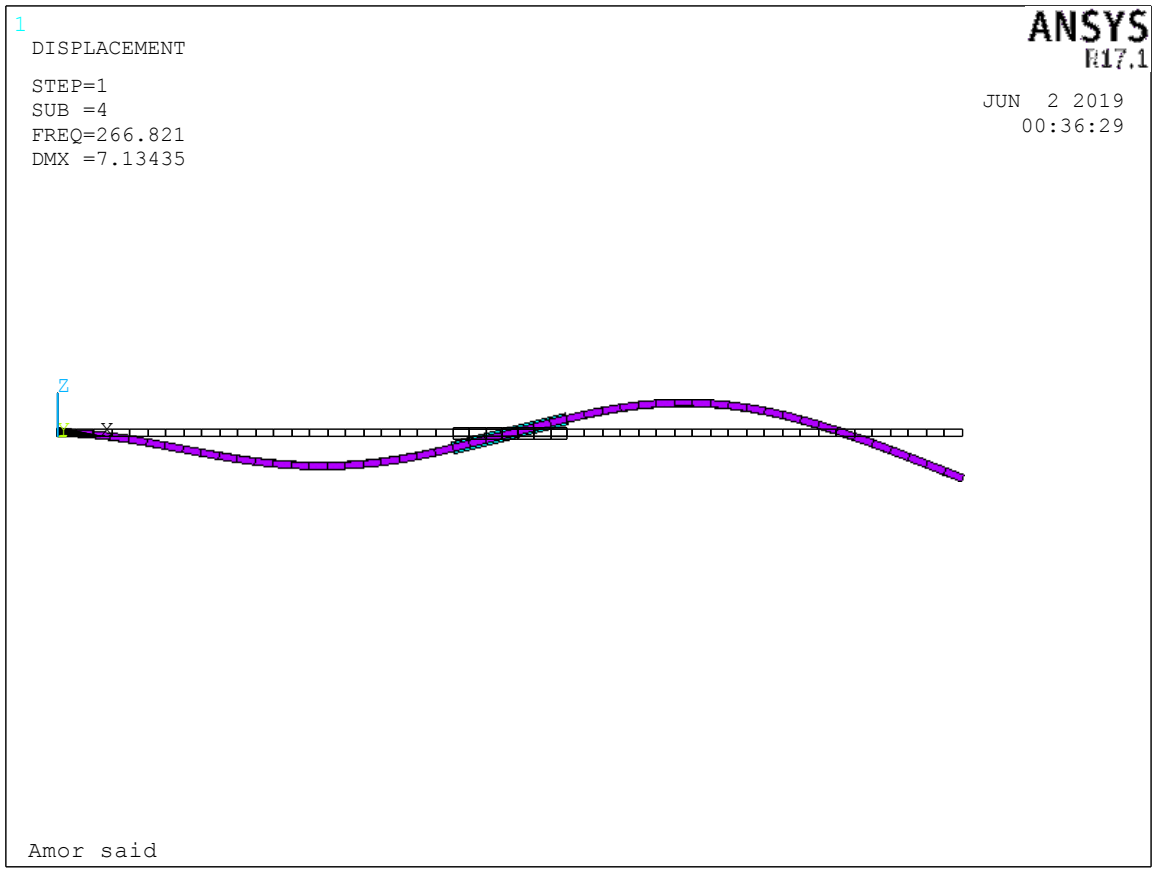
الشكل(18) يمثل مناول الإهتزاز للعارضة بعد تثبيت الرقاقات :



المنوال الأول



المنوال الثاني



المنوال الثالث

شكل (18): مناول الاهتزاز للعارضة بعد تثبيت الرقاقات

وفي الجدول التالي نلخص قيم ترددات العارضة الأساس و بعد تثبيت الرقاقات.

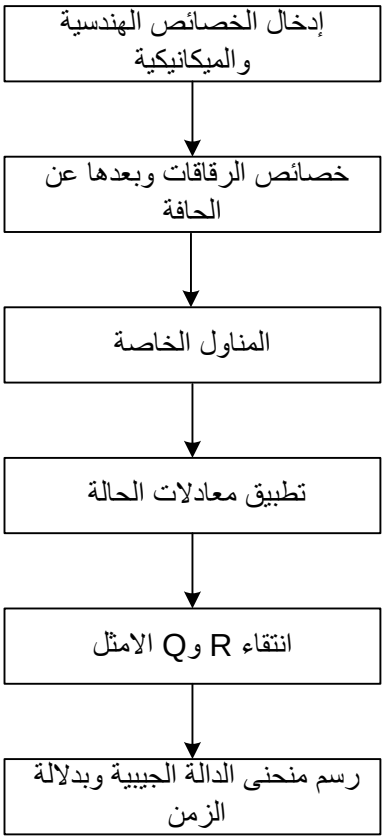
الوضع	X_i^2	f_i (Hz) نظريا	f_i (Hz)عدديا (ANSYS)	f_i بعد تثبيت الرقاقات
1	3,516	15,553	15,641	14,802
2	22,03	97,452	98,078	91,742
3	61,69	272,889	275,146	266,821

جدول (4): مقارنة قيم ترددات العارضة الأساس والعارضة الذكية

نلاحظ أن القيم متقاربة وهذا لأن حساب الترددات الطبيعية (الخاصة) متعلق بمصفوفة الكتلة والصلابة التي يحدث لها تغير طفيف عند إضافة الرقاقات الكهروإجهادية.

3. تفعيل المنظم الخطي التربيعي(LQR) الموجود في برنامج MATLAB

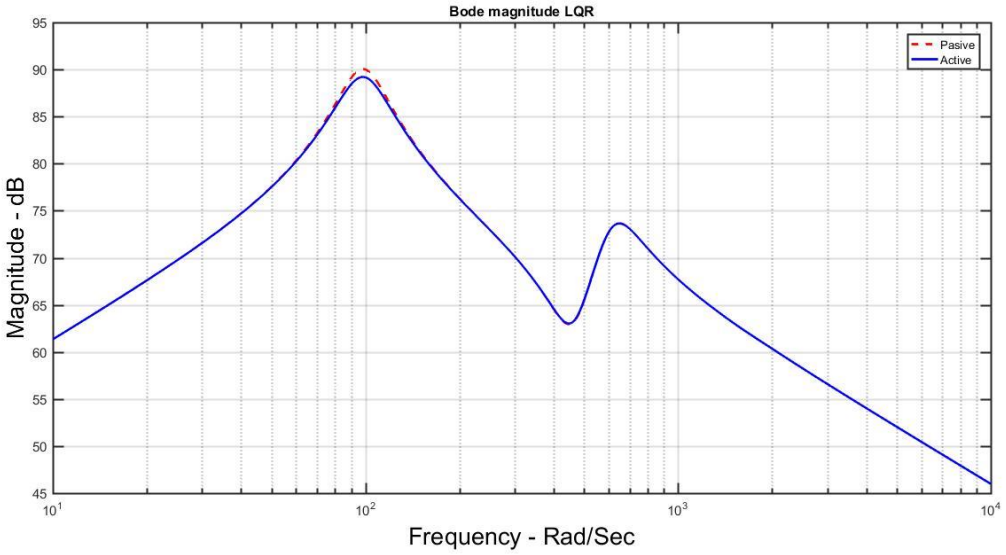
حسب الفرع الاخير في الفصل الثاني نقوم بتطبيق محاكاة للتحكم التربيعي الخطي وفق المراحل التالية :



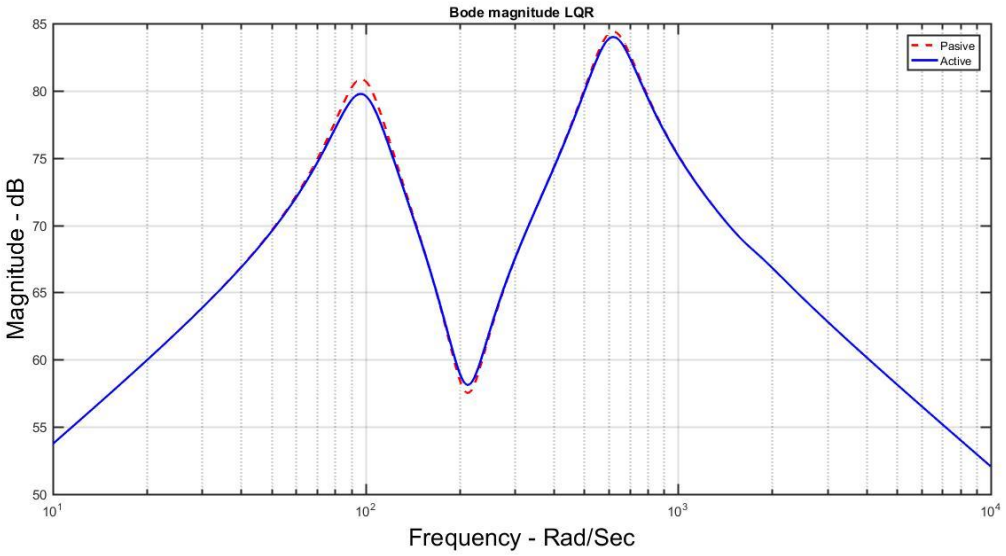
يوضح الشكل (19) إستجابة العارضة الذكية في الحالتين النشطة والخاملة بعد محاولات اختيار Q وR:

ففي كل حالة نغير المعامل المضروب في المصفوفةA وB حيث:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

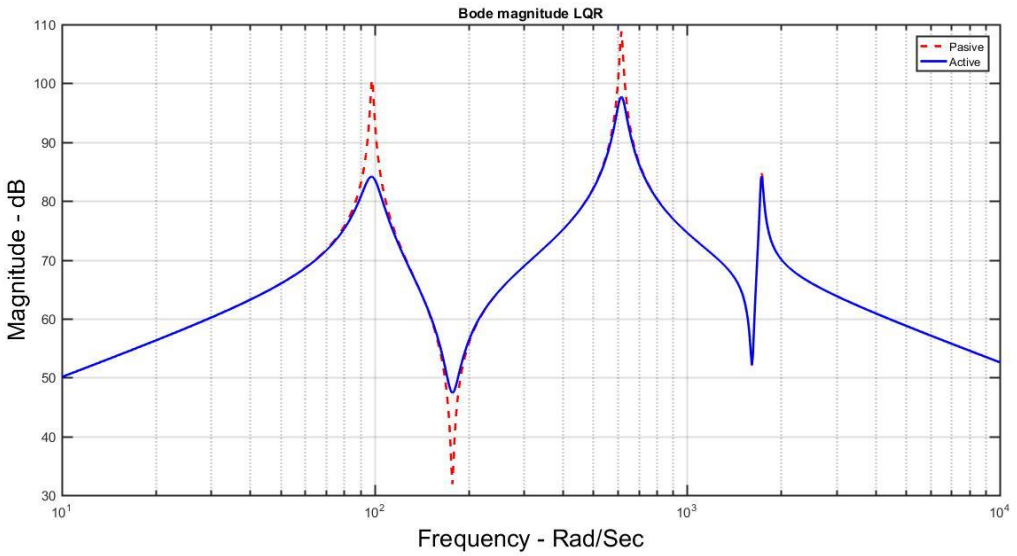


Q=10. A ; R=20. B

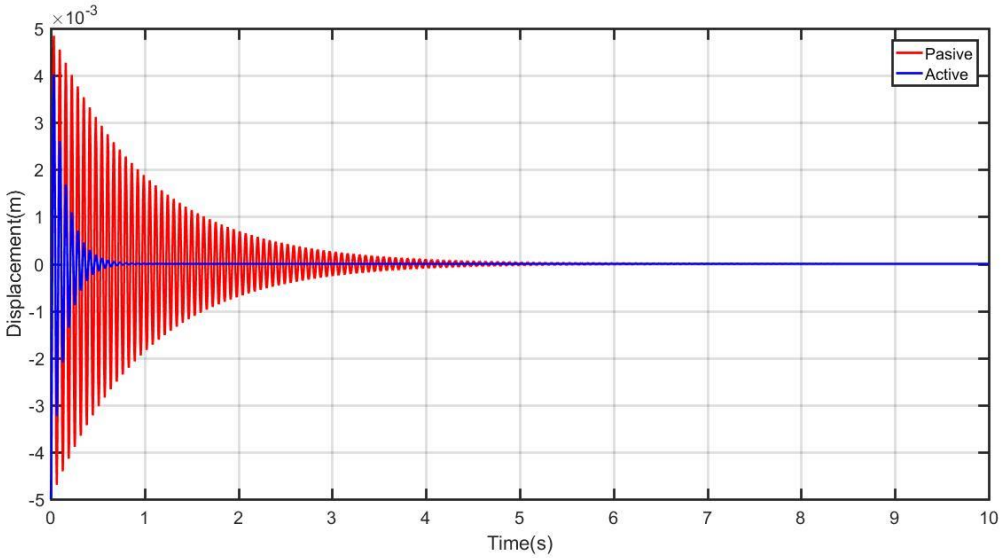


Q=10.A ; R=30.B

(19- أ): Q و R غير مناسبين



Q=20.A ; R=20.B



بدلالة الزمن

(19- ب): Q و R مناسبين

شكل (19) إستجابة العارضة الذكية في الحالتين النشطة والخاملة

خلاصة

بعد هذه الدراسة نستخلص أن طريقة العناصر المتناهية مهمة جدا في النمذجة و على اساسها انشأت برامج المحاكاة على غرار ANSYS مثلا.

ونستنتج أن التحكم النشط للاهتزازات (المنظم التربيعي الخطي) يتسبب في عدم استقرار اجوبة الجملة وذلك بحسب قيم معاملات التحكم Q و R التي تتطلب جهد كبير لحصرها عند محاكاة التحكم حيث نلاحظ انخفاض في القيم الحدية للدالة الجيبية لاستجابة العارضة بدلالة التردد وهذا حتى لا يتوافق الإضطراب الخارجي مع التردد الخاص للمنظومة المدروسة كي لا يحدث الانهيار.

قائمة المراجع

[1]. Marcelo Areias Trindade. Contrôle hybride actif-passif des vibrations de structures par des matériaux piézoélectriques et viscoélastiques: poutres sandwich/multicouches intelligentes. Thèse de Doctorat. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2000. Français.

[2]. Valérie Pommier[1] - Marc Budinger[2] - Bernard Mouton[3]- Sylvaine Leleu[4]. Contrôle actif de vibrations. CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005.

[3]. Stéphanie Harari. Contrôle modal semi-actif et actif à faible consommation énergétique par composants piézoélectriques. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2009. Français.

[4]. Karine CHASTAING .Etude d'alliages à mémoire de forme base Ru pour applications hautes températures. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) Soutenue le 28/09/2007.

[5]. Baptiste CHOMETTE. Contrôles modaux actif, semi-adaptatif et semi-actif de structures intelligentes embarquées Application aux cartes électroniques. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2008.

[6]. M.N. AMRANE. Cours "finite element analysis"_University of Biskra. (2018-2019).

[7]. I. Bruant, L. Proslier, Optimal location of an actuators and sensors in active vibration control, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 16 (2005) 197–206, 2005.