تصرف حالة الانبعاج لصفيحة ألمنيوم والحاوية على فتحات مركزية بأشكال دائرية وبيضاوية

رائد حكمت متي
ماجستير هندسة ميكانيكية
ميكانيك تطبيقي

الدكتور رافع خليل البزاز
استاذ مساعد
كلية الهندسة – قسم الهندسة الميكانيكية
جامعة الموصل

الخلاصة

يتضمن هذا البحث تنفيذ تحليلات وتجارب عملية لانبعاج جانبي على صفائح مربعة الشكل تحوي على فتحات مركزية بشكل (دائري وبيضاوي) وبأحجام مختلفة وتحت أحمال ضغط احادية المحور ومثبتة بإحكام من طرفين معرضين لحمل الضغط اما الطرفان الاخران من الصفيحة فهما غير مثبتين اي لهما حرية الحركة، وتم استخدام سبيكة الألمنيوم من نوع (AL-2024T_3) في الاختبارات وذلك لاستخداماتها الواسعة في صناعة هياكل الطائرات والصواريخ والمركبات الأرضية لأنها تتميز بقوة تحمل عالية وخفة في الوزن. ان حساب احمال الانبعاج للصفائح المعدنية عامل مهم في حساب استقرارية الهياكل حيث يعد حمل الانبعاج أفضل فحص لأنهُ مؤشر مفيد لتصرف حالة الانبعاج. حيث تم اجراء الدراسة عمليا على صفائح مربعة الشكل وذلك باستخدام مجسات الانفعال. وتم مقارنة النتائج العملية لحمل الانبعاج مع النتائج التحليلية وباستخدام تقنية التحليل الهيكلي للعناصر المحددة (F.E.). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها ان الصفائح المربعة ذات فتحات الدائرية والبيضاوية الشكل انخفاضاً في مقاومة الانبعاج الحرجة كلما ازدادت احجام الأجزاء المقطوعة.

Buckling behavior of aluminum plate with circular and elliptical shapes of central cutout

Raid H. Matti
M.Sc. Mechanical Engineering
Applied Mechanics

Dr. Rafi K. Al-bazzaz
Assistant Professor
College of Engineering/ Mech. Eng. Dept.
University of Mosul

Abstract

The present work performs mechanical buckling analyses and experimental investigation on square plates with central cutout with (circular and elliptical) shape and with different size under uniaxial compressive loading, clamped from the loaded sides and free from others. The plates were mostly used in aircraft structures, rocket and automobiles is aluminum alloy (Al-2024 T_3) because it has a high strength to weight ratio. The determination of critical buckling load of metallic plate is an important factor in determining the structural stability, which consider the best examination for buckling behavior. Experimental investigation was carried out on square plates by using strain gages. The experimental results for buckling load were compared with analytical results by using finite element structure analysis technique (F.E.M) i.e. using (ANSYS) software. Results have been presented that the square plates with circular and elliptical cutouts decrease in buckling strengths as the cutout sizes were increased.

Keywords: Buckling, Aluminum, Al-2024T_3 plate, Cut-outs holes, Finite Element Method, ANSYS.

أستلم: 1-3-2012 **قبل: 6-8-2012**

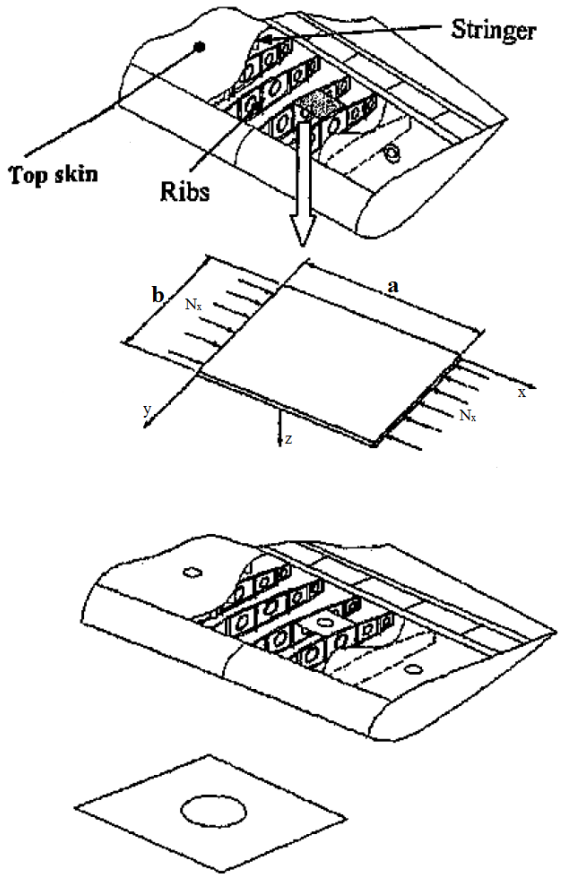
المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

1:المقدمة

تعد الصفائح المعدنية من الاجزاء المهمة التي تستخدم في اجزاء هياكل المركبات الفضائية والطائرات وغيرها. وقد تحتوي هذه الصفائح على فتحات مركزية (central cutout) لاستخدامات مختلفة كأن تكون فتحات كمناطق توصيل لمنظومات كهربائية او منظومات ميكانيكية او منظومات هيدروليكية او لمرور الانابيب التي تنقل الوقود من الخزان الى المحرك او تكون موجودة في اجزاء الطائرة [1] كما في شكل (1).

كذلك تستخدم الفتحات لتقليل الوزن لهيكل المركبات الفضائية او الطائرات وذلك لتقليل الوزن للهيكل وكذلك للأغراض العملية، على سبيل المثال تتطلب الفتحات في سارية الجناح وألواح الغطاء للدخول الى نظام هيدروليكي وكذلك لأغراض الصيانة لأجزاء داخلية وكذلك تستخدم الفتحات في عصب الجناح لتصبح خفيفة الوزن [2]. عليه فان وجود هذه الفتحات يؤدي الى اعادة توزيع الاجهادات في الصفيحة مما يؤدي الى خفض استقراريه الهيكل بشكل ملحوظ مما لفتت انتباه كثير من الباحثين خلال السنوات الماضية.

وتتضمن هذه الدراسة حالة الانبعاج لصفائح من الالمنيوم مربعة الشكل نتيجة تعرضها لحمل ضغط احادي المحور مثبتة بإحكام من طرفي المعرضين لحمل الضغط اما الطرفان الاخران من الصفيحة فهما غير مقيدين اي لهما حرية الحركة. وفي حالة احمال ضغط واطئة فإنّ الصفيحة تبقى في حالة استقرار (متزنة) وعندما تزداد قيمة الحمل تصبح الصفيحة غير مستقرة الى ان تصل الى حمل الضغط الذي يسمى حمل الانبعاج الحرج. إن حساب حمل الانبعاج للصفيحة عامل مهم في حساب استقراريه الهياكل، حيث تنفذ الحسابات في برنامج (ANSYS) وتتم أجراء الدراسة عمليا على العينات من الصفائح.



الشكل (1): يوضح استخدام صفائح حاوية على فتحات في جناح طائرة [3].

هنالك دراسات مختلفة حول هذا الموضوع وقد قام الباحث (Nemeth 1990) [4] بدراسة تصرف حالة الانبعاج وما بعد الانبعاج لصفائح ألمنيوم ($6061\text{-}T_6$) مربعة ومستطيلة الشكل تحتوي على فتحات مركزية بإشكال مختلفة مثل الدائرة والمربع والشكل البيضاوي تحت حمل الضغط المسلط وقد ثبتت الحافات بأحكام باتجاه الحمل والحافات الغير محملة مثبتة ببساطة. وأوضحت نتائجه العملية ان هناك زيادة في قيمة الاجهاد ونقصاً في الجساءة في بداية ما بعد انبعاج وبزيادة عرض حجم الفتحة. بالنسبة للصفائح التي تحتوي على الفتحات الدائرية والمربعة الشكل والتي لها نفس العرض تنبعج بنفس قيمة الإجهاد ولها نفس قيمة الجساءة لما بعد الانبعاج تقريباً. وأوضحت نتائج أخرى للصفائح المربعة والتي تحتوي على فتحات بيضاوية الشكل ونسبة عرض الفتحة إلى عرض صفيحة كبيرة وتقريبا (0.6) بزيادة ارتفاع الفتحة البيضاوية تقل قيمة الجساءة قبل الانبعاج وبداية ما بعد الانبعاج وتنبعج الصفائح التي تحتوي على فتحات بيضاوية بنفس قيمة الانفعال.

وقد درس (الصراف 2007) [5] حالة الانبعاج المرن للصفائح المربعة والمستطيلة والحاوية على ثقوب مركزية وتحت أحمال ضغطية أحادية المحور، مستخدماً نوعين من الثقوب الدائرية والمربعة، لسبيكة الألمنيوم ($AL\text{-}2024\ T_3$) باستخدام البرنامج (ANSYS). فأظهرت الصفائح المربعة ذات الثقوب الدائرية والمربعة انخفاضاً في مقاومة الانبعاج الحرجة كلما ازدادت إبعاد الثقوب، وعلى عكس ما كان متوقعا أظهرت الصفائح المستطيلة سلوكاً شاذاً وهو زيادة في مقاومة الانبعاج كلما ازدادت إبعاد الثقوب. وتبين إن مقاومة الانبعاج الحرجة في الصفائح ذات الثقوب المربعة تكون اكبر قليلا من مقاومة الانبعاج في الصفائح ذات الثقوب الدائرية عندما يكون حجم الثقب متوسطاً، والعكس يكون صحيحاً عندما تصبح هذه الثقوب كبيرة.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

واستخدم (Jain 2004) [1] طريقة العنصر المحدود لدراسة استجابة ما بعد الانبعاج لصفيحة مربعة الشكل متعددة الطبقات (laminates) والحاوية على فتحات ومثبتة تثبيتاً بسيطاً، وقد وجد بأن قيمة حمل الانبعاج للصفائح الحاوية على فتحات بيضاوية الشكل والتي يكون قطرها الرئيسي باتجاه الحمل اقل من قيمة حمل الانبعاج للصفيحة التي تحتوي على فتحة دائرية. ودرس (Ghannadpour 2006) [2] تصرف حالة الانبعاج لصفائح متراكبة متعددة الطبقات ذي طيات متعامدة (cross-ply laminated) تحتوي على فتحات دائرية وبيضاوية الشكل وذلك باستخدام تحليل العنصر المحدود. وأوضحت نتائجه بان الفتحة البيضاوية التي يكون قطرها الرئيس باتجاه عمودي على الحمل المسلط لها قدرة تحمل أكثر من تلك التي يكون قطرها الرئيسي باتجاه الحمل المسلط في حالة تثبيت بسيط لكل الحافات للصفيحة.

وقام الباحث (Komur 2010) [6] بتحليل حالة الانبعاج للصفائح المركبة من نسيج زجاجي (woven-glass-polyester) متعددة الطبقات تحتوي على فتحات دائرية وبيضاوية الشكل وتميل بزوايا مختلفة باستخدام تقنية العناصر المحدودة. أوضحت نتائجه بأن قيمة حمل الانبعاج تقل بزيادة ارتفاع الشكل البيضاوي (c/a) قيمة قطره الرئيسي تساوي (0.5 a) واتجاه قطرهُ الرئيسي باتجاه الحمل وتقل قيمة حمل الانبعاج تدريجياً بزيادة ارتفاع الشكل البيضاوي الذي يكون اتجاه قطرهُ الرئيسي باتجاه عمودي على اتجاه الحمل. وكذلك بزيادة زاوية ميلان الفتحة البيضاوية من (°90-°0) (يتحول اتجاه القطر الرئيسي للشكل البيضاوي من اتجاه موازٍ لاتجاه الحمل المسلط إلى اتجاه عمودي لاتجاه الحمل المسلط) تقل قيمة حمل الانبعاج.

قام الباحث (Ganesan 2011) [7] بدراسة حالة الانبعاج المرن لصفائح متراكبة متعددة الطبقات ومتناظرة وتحتوي على فتحات مركزية ومثبتة بصورة بسيطة فقط للحافتين المجهدتين. وتضم هذه الدراسة تأثير حمل الانبعاج بفتحات مركزية بمختلف الأحجام والأشكال (دائرية ومربعة وبيضاوية). وان تأثير الفتحة التي تقلل من قيمة حمل الانبعاج هو نتيجة تمركز الاجهادات (Stress concentration) حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفيحة، وإن تأثير تركيز الاجهادات بقي بنفس قيمته عند زيادة طول الضلع للفتحة المربعة الشكل بينما يزداد تأثير حجم المادة المزالة من الصفيحة بزيادة إبعاد الفتحة. وأوضحت النتائج بأن قيمة حمل الانبعاج تقل عند وجود فتحات وتختلف هذه القيم باختلاف شكل الفتحة حيث إن الصفيحة الحاوية على فتحة دائرية لها اعلى قيمة لحمل الانبعاج من غيرها من الفتحات.

وأوضحت نتائج (Kumar 2010) [8] إن صفيحة متعددة الطبقات ومثبته تثبيتاً محكماً لكل الحافات المحيطة بالصفيحة لها أعلى قيمة لحمل الانبعاج وتحمل ما بعد الانبعاج وكذلك صفيحة مثبتة بصورة بسيطة لكل الحافات المحيطة بالصفيحة لها اقل قيمة لحمل الانبعاج وتحمل ما بعد الانبعاج بغض النظر عن شكل وحجم الفتحة.

1-1: الهدف من البحث

الهدف الأساسي من البحث الحالي هو دراسة تصرف حالة الانبعاج المرن للصفائح المعدنية مربعة الشكل والتي تحتوي على فتحات مركزية بأشكال واحجام مختلفة او بدونها والمصنوعة من سبائك المنيوم من نوع ($AL\text{-}2024T_3$) مربعة الشكل تحتوي على فتحات مركزية بأشكال (دائرية وبيضاوية) وبأحجام مختلفة، ودراسة تأثير كل من إبعاد وشكل الفتحة على مواصفات حالة الانبعاج (قيمة حمل الانبعاج الحرج) لهذه الصفيحة. وتقارن النتائج العملية لحمل الانبعاج مع النتائج التحليلية وذلك باستخدام تقنية العناصر المحددة (F.E.) باستخدام البرنامج (ANSYS)، ويشمل التحليل على أيجاد شكل مثالي للفتحة وكذلك أول نمط حرج للانبعاج (first critical mode of buckling) متضمنا أيجاد قيمة (Eigen value) لحمل الانبعاج وشكله، كذلك دراسة تأثير تغير شكل وحجم الفتحة مع حالة التثبيت المحكم لحافات الصفيحة المعرضة للأحمال الضغطية الأحادية المحور.

2: الجزء العملي

2-1: النماذج المستخدمة

أن الصفائح المعدنية المستخدمة هي من سبيكة ألمنيوم من نوع ($AL\text{-}2024T_3$) ذات سمك (1.2 mm) تعد من السبائك التجارية المهمة حيث تستخدم في مجالات واسعة مثل هياكل الطائرات (نظراً لان نسبة المقاومة إلى الوزن عالية جداً) وتستخدم في صناعة عجلات الشاحنات وفي منتجات اجزاء تثبيت المكائن المختلفة. وتحتوي هذه السبيكة عادة على عناصر متعددة، تتكون في الغالب من عنصرين سبائكيين أساسيين مضافين إليها. ويمكن استعمال مخطط ثلاثي الطور (Ternary Phase Diagram) كدليل لحساب المعاملات الحرارية المطلوبة. فعلى سبيل المثال، يعتمد اعتبار سبيكة الألمنيوم (2024) على احتوائها تقريبا (4%) نحاس و(1%) مغنسيوم، مع كمية قليلة من المنغنيز والسيلكون والحديد والكروم والزنك.

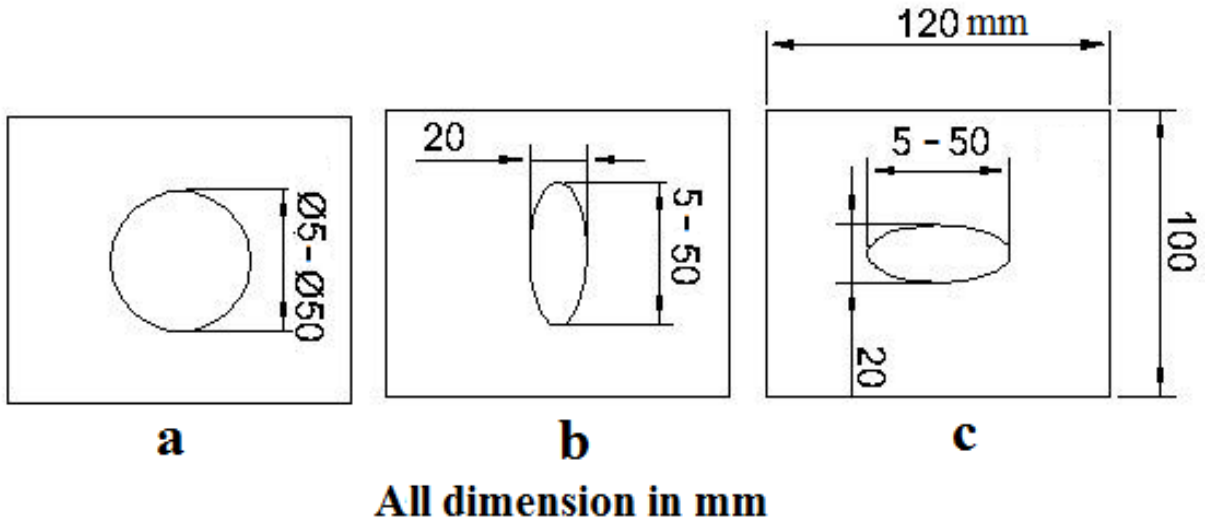
المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

2-2: تهيئة النماذج

استخدمت صفائح مربعة الشكل وذلك لكونها تمتلك صفات مميزة كبيرة للإزاحة ومجال الاجهاد لحالة التحميل والتثبيت المعينة. والصفيحة لَها طولُ وعرض (a = b = 100 mm) ولها سُمك ثابت (t = 1.2 mm) ونسبة الطول الى العرض يساوي واحداً وان اتجاه طول الصفيحة يكون باتجاه الدرفلة. ثقبت الصفائح التي تحتوي على الفتحات المركزية الدائرية الشكل بواسطة ماكينة تثقيب حيث تتغير قيمة قطر الفتحة الدائرية (d) لعشر صفائح من (5 mm) إلى (50 mm) وفرق القطر بين الصفيحة والصفيحة التالية يساوي (5 mm) كما في الشكل (2-a).

اما بالنسبة للصفائح المربعة التي تحتوي على فتحات بيضاوية والتي يكون احد قطريها ثابتاً (d_2) ويساوي (20 mm) وقطرها الاخر (d_1) يتغير من (5 mm) الى (50 mm) لعشر صفائح وفرق القطر بين الصفيحة والصفيحة التالية (5 mm). ولدينا نوعان من الفتحات البيضاوية النوع الأول فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط (القطر الثابت (d_2) يكون باتجاه الحمل المسلط) كما في الشكل (2-b). والنوع الثاني فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط (القطر الثابت (d_2) يكون باتجاه عمودي على الحمل المسلط) كما في الشكل (2-c).

قطعت الصفائح التي تحتوي على الفتحات المركزية البيضاوية الشكل باستخدام ماكينة بلازما للقطع حيث تم ذلك برسم نماذج الصفائح الحاوية على فتحات بيضاوية باستخدام برنامج (Auto CAD_2010) ومن ثم أدخلت على الحاسبة الخاصة لماكنة البلازما واعطي امراً لقص النماذج كما هي مرسومة في البرنامج (حيث رسمت الحافات الخارجية للصفيحة بإبعادها الحقيقية أي لها طول (a = 120 mm) مع شكل الفتحة البيضاوية).



الشكل (2): ثلاثة أنواع من صفائح تحتوي على فتحات مركزية دائرية أو بيضاويةً الشكل. (a) فتحة دائرية الشكل. (b) فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط. (c) فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط.

3-2: فحص النماذج

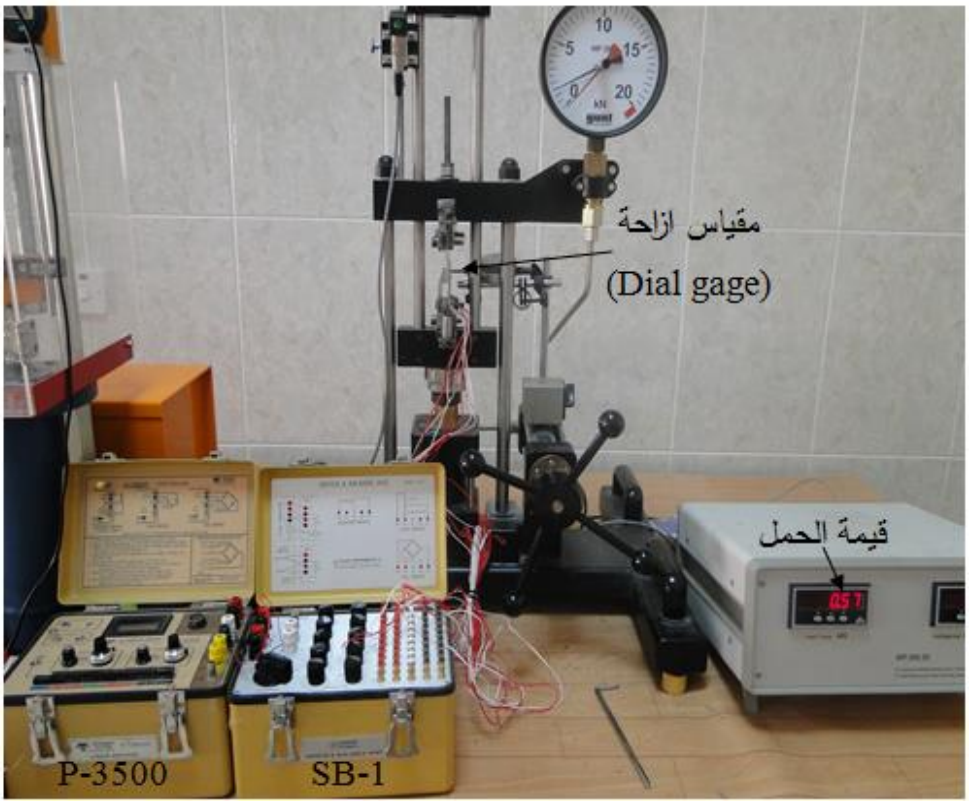
نظراً لوجود عواملِ متعدده تؤثر على عملية التحليلِ النظري لتصرف حالة الانبعاج لصفيحة معدنية مربعة أو مستطيلة الشكل حاوية على فتحة فقد أَصْبَحتْ الطرائق التجريبية مهمةً في حَلّ مشكلةِ حالة الانبعاج للصفائح. لان تحليل الانبعاج يصبح معقدا بشكل كبير جدا في حالة الصفائح الحاوية على الفتحات لان هذه الفتحات تدخل حدودا حرة للتحميل تتسبب في ايجاد اجهاد غير منتظم في هذه الصفيحة المثقبة.عليه فقد تم استخدام مجسات انفعال (Strain gauges)ثنائيه متعامدة موزعه على جانبي محور الفتحات وذلك لإيجاد قيم الانفعالات وبالاتجاهين.

أجريت اختبارات حمل الضغط على تسع وعشرين صفيحة حاوية على فتحات بأشكال دائرية وبيضاوية وبمختلف الأحجام وذلك لمعرفة تأثير كل من شكل وحجم الفتحة على تصرف حالة الانبعاج لهذه الصفائح. حيث تم استخدام جهاز مختبري لفحص الشد (WP 300 materials testing device) سعتهُ (20 kN) في التجارب العملية لحالة الانبعاج لقياس قيمة حمل الضغط المسلط الذي سلط باتجاه واحد وبمستوى الصفيحة (حمل الضغطِ احادي المحور). ثم ثبيت الصفائح على جهاز فحص الشد وأمسكت من الجهتين بحيث كان طول الصفيحة باتجاه الدرفلة وعند تسليط الحمل فأن الماسكة السفلى تتحرك الى الأعلى بواسطة الأسطوانة الهيدروليكية بينما تبقى الماسكة العليا ثابتة. استخدم مقياس ازاحة لقياس الامالة الجانبية حيث تم توجيه إبرة المقياسِ عند منتصف طول الصفيحة كما مبين في الشكل (3).

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

تم تسجيل قيم كل من الحمل المسلط والامالة الجانبية عند الزيادة في قيمة الحمل لحد الوصول إلى قيمة حمل الانبعاج الحرج كما تم تسجيل قيم الانفعالات الحاصلة على جانبي الفتحات من المجسات المتواجدة. إن إي زيادة ضئيلة في قيمة الحمل تزداد بسببها الإمالة الجانبية زيادة كبيرة وتبقى قيمة الحمل تقريباً ثابتة (الزيادة في قيمة الحمل تكون قليلة بعد حمل الانبعاج الحرج). فلذلك تم تسجيل قيم كل من الحمل المسلط والامالة الجانبية بعد حمل الانبعاج عند الزيادة في قيمة لإمالة الجانبية وتتراوح قيمة الزيادة بين (0.1-0.2 mm) حتى تصل قيمة الإمالة الجانبية ما بين (4.3-4.7mm) واغلب القراءات تساوي قيمة الامالة الجانبية (4.3 mm).

إنّ الحملَ الذي يسبب الانبعاج يُحدَّدُ مِنْ الرسم البياني لمنحنى الإمالة الجانبية مع حمل الضغط المسلط. وذلك بإيجاد قيمة حمل الانبعاج المرن للصفائح الحاوية على الفتحات بالطريقة العملية وتحدد قيمته عند نقطة معينة من المنحني بين القوة المسلطة والامالة الجانبية، وهذه النقطة تحدد على اساس ملاحظة قيمة الزيادة في الإمالة الجانبية عند الزيادات المتساوية لقيمة الحمل فعندما تتم الزيادة في قيمة الإمالة الجانبية عن قيمتها السابقة فأننا نستطيع عند هذه النقطة ان نحدد قيمة حمل الانبعاج الحرج [1].



الشكل (3): جهاز مختبري لفحص الشد (WP 300 materials testing device) سعتهُ (20 kN) استخدم في الجانب العملي لحالة الانبعاج.

3: الجانب النظري

في العديد من الهياكل الهندسية مثل الاعمدة والجسور والصفائح يتطور الفشل ليس بسبب الاجهادات الزائدة فقط وانما بسبب حالة الانبعاج ايضاً [9]. وفي الحقيقة فإنّ ظاهرة الانبعاج تظهر قبل ظاهرة حد المرونة في أجزاء الهياكل الرقيقة كالصفائح والأعمدة الرقيقة. حيث نلاحظ ان اجهادات الانبعاج تكون اقل بكثير من اجهاد خضوع المادة لأجزاء الهياكل الرقيقة لذا فإنها تكون ضمن المنطقة المرنة للمادة [5]. وعندما يسلط حمل ضغط على صفيحة ما فان الاجهاد يتوزع بانتظام على طول المقطع العرضي للصفيحة. وعندما تنبعج الصفيحة تقل قيمة الجساءة المحورية للمنطقة المركزية للصفيحة نتيجة التشوهات بسبب الانحناء للصفيحة. وان حالة الانبعاج للصفيحة تكون باتجاهين متعامدين وبحالتين مختلفتين لحالات التثبيت المحيطة بالصفيحة. الاختلاف الأساسي بين الصفيحة والعمودِ يَكْمن في خصائصِ حالة الانبعاج. حيث عندما ينبعج العمود لا يَستطيعُ مُقَاوَمَة أيّ حمل محوري إضافي، لذلك فأن الحمل الحرج للعمودِ يعد حملُ فشلُ أيضا.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

إما بالنسبة للصفيحة فأنها تُدْعَمُ دائماً من الحافاتِ، لذلك تُقَاوَم الحملِ المحوري الإضافي تتواصل الصفيحة في تحمل ولا تَفْشلُ حتى بعد حمل الانبعاج الأولي [9].

ففي هذه الدراسة تم اللجوء ايضاً الى إلى طرائق تحليلية لإيجاد حمل الانبعاج الحرج. ولأن تحليل الانبعاج يصبح معقدا بشكل كبير جدا في حالة الصفائح الحاوية على فتحات لأنها تدخل حدودا حرة للتحميل والتي تسبب في المجال المقطوع إجهادا غير منتظم في الصفيحة. هنالك طرائق تحليلية تقريبية لإيجاد حمل الانبعاج الحرج حيث استخدم بعض الباحثين طرائق تحليل نظري تقريبي وبعد ذلك لجأوا الى طريقة التحليل العددي باستخدام نظرية العناصر المحدود في الدراسات السابقة. حيث ان نظرية العناصر المحدود لها سرعة عالية في الحل لأي منظومة معقدة لذلك فأن التوجه الحالي هو باتجاه استخدام هذه النظرية كأداة فعالة في التحليل الهيكلي. تم استخدام طريقة التحليل العددي وذلك بمساعدة برنامج (ANSYS 13) كمُحَلِّلِ لحملِ الانبعاج الحرجِ لصفائح الألمنيومِ المربعة الشكل وتحتوي على فتحات مركزية مختلفة الأشكال والأحجام.

4: النتائج والمناقشة

تم إيجاد قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفائح الحاوية على الفتحات بالطريقة العملية وذلك بتحديد قيمتهُ من المنحني بين القوة المسلطة والإمالة الجانبية. وتمت مقارنة هذه القيم مع النتائج التي تم حصول عليها من طريقة العنصر المحدود (F.E) وذلك باستخدام برنامج (ANSYS). ويجب أن يفهم سلوك حالة الانبعاج للصفائح الرقيقة المحتوية على فتحات بشكل تام عند التصميم. حيث أن مميزات الانبعاج لصفيحة غير مثقبة تختلف بصورة جوهرية عن تلك المميزات للصفيحة المثقبة، ففي الصفائح غير المثقبة يكون مجال الإجهاد قد حدد بشكل تام قبل الانبعاج ووفقاً للتماثل والاستمرارية في المقطع العرضي للصفيحة. أما مجال الإجهاد قبل الانبعاج في الصفائح المثقبة فهو غير معروف وذلك نسبة إلى وجود حافات حرة للثقوب في وسط الصفيحة لذا فان طريقة الحل النظري للمشكلة غير ممكنه وهذا هو السبب في استخدام الطريقة العملية أو استخدام طريقة العناصر المحددة في الحل.

4-1: تأثير الفتحة الدائرية على قيمة حمل الانبعاج

تم تسجيل القيم العملية لحمل الضغط المسلط مع قيمة الامالة الجانبية لكل الصفائح وقارنت هذه القيم العملية مع النتائج التي تم حصول عليها من طريقة العنصر المحدود (F.E) وكما في الجدول (1). حيث يلاحظ من هذا الجدول إن قيمة حمل الانبعاج الحرج تتناسب عكسياً مع زيادة في قيمة قطر الفتحة الدائرية. حيث تقل قيمة حمل الانبعاج مع زيادة قطر الفتحة المركزية الدائرية الشكل للصفيحة نتيجة تمركز الاجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفيحة، حيث تقل قيمته بسبب النقصان في مساحة المقطع عند مركز الصفيحة (عند منتصف طول الصفيحة) وما يصاحبها من نقصان في عزم القصور الذاتي الذي يؤدي إلى خفض من استقرارية الهيكل، ويعتمد تصرف الانبعاج وما بعد الانبعاج بشكل كبير على حجم الفتحة. حيث تقل القيمة العملية والتحليلية لحمل الانبعاج بنسبة (35%) و(32.7%) على التوالي عند زيادة نسبة (d/b) من (0) الى (0.5). اما اذا كانت الحافات غير معرضة للأحمال المقيدة فقد تزداد قيمة حمل الانبعاج عند زيادة قطر الفتحة المركزية الدائرية الشكل وهذا ما يسمى بالحالات الشاذة [10]

الجدول (1): مقارنة بين القيم العملية والقيم التحليلية لحمل الانبعاج الحرج للصفائح الحاوية على الفتحات الدائرية الشكل.

d/b	حمل الانبعاج (kN)		نسبة الاختلاف %
	القيم العملية	القيم التحليلية	
0.00	6.3	6.2382	0.981
0.05	6.3	6.3346	-0.549
0.10	6.1	6.1576	-0.944
0.15	5.9	5.9672	-1.139
0.20	5.7	5.7534	-0.936
0.25	5.5	5.6183	-2.151
0.30	5.3	5.4024	-1.932
0.35	5.1	5.1433	-0.849
0.40	4.8	4.8485	-1.01
0.45	4.5	4.5668	-1.484
0.50	4.1	4.1917	-2.236

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

2-4: تأثير الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط على قيمة حمل الانبعاج

تم تسجيل القيم العملية لحمل الضغط المسلط مع قيمة الامالة الجانبية لكل الصفائح وحدد القيم العملية لحمل الانبعاج الحرج وقارنت مع النتائج التي تم حصول عليها من طريقة العنصر المحدود (F.E) وكما في الجدول (2). حيث يلاحظ من هذا الجدول ان قيمة حمل الانبعاج الحرج تتناسب عكسياً مع الزيادة في قيمة قطر الفتحة البيضاوية (d_1). حيث تقل قيمة حمل الانبعاج الحرج تدريجياً عند زيادة قطر الفتحة المركزية البيضاوية الشكل (d_1) للصفيحة نتيجة تمركز الاجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفيحة، حيث تقل قيمته بسبب النقصان في مساحة المقطع عند مركز الصفيحة (عند منتصف طول الصفيحة) وما يصاحبها من نقصان في عزم القصور الذاتي الذي يؤدي إلى خفض استقرارية الهيكل. وتقل القيمة العملية والتحليلية لحمل الانبعاج الحرج بنسبة (28.5%) و(27.7%) على التوالي عند زيادة نسبة (d_1/b) من (0) الى (0.5).

الجدول (2): مقارنة بين القيم العملية والقيم التحليلية لحمل الانبعاج الحرج للصفائح الحاوية على الفتحات البيضاوية الشكل التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط.

d_1/b	حمل الانبعاج (kN)		نسبة الاختلاف %
	القيم العملية	القيم التحليلية	
0.00	6.3	6.2382	0.981
0.05	6.2	6.2609	-0.982
0.10	6.0	6.0787	-1.311
0.15	5.9	5.9748	-1.267
0.20	5.7	5.7534	-0.936
0.25	5.6	5.6013	-0.023
0.30	5.4	5.4289	-0.535
0.35	5.2	5.2047	-0.09
0.40	4.9	4.9798	-1.628
0.45	4.7	4.7358	-0.761
0.50	4.5	4.5105	-0.233

3-4: تأثير الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط على قيمة حمل الانبعاج

تم فحص الصفائح الحاوية على الفتحات البيضاوية الشكل والتي يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط وقطرها الأخر (d_2) باتجاه عمودي على الحمل المسلط وقيمته تساوي (20 mm). حيث تم تسجيل القيم العملية لحمل الضغط المسلط مع قيمة الإمالة الجانبية لكل الصفائح وتم تحديد القيم العملية لحمل الانبعاج الحرج وقورنت مع النتائج التي حصل عليها من طريقة العنصر المحدود (F.E) وكما في الجدول (3). حيث يلاحظ من هذا الجدول إن قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفيحة الحاوية على فتحة بيضاوية قطرها (d_1) يساوي (5 mm) اقل كثيراً من قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفيحة غير الحاوية على فتحة. لأن القطر الرئيسي للفتحة البيضاوية في هذه الحالة يكون باتجاه عمودي على الحمل المسلط، وبسبب وجود التغير الحاد في شكل الفتحة (حافة الفتحة حادة). ويلاحظ من الجدول (3) أن القيم العملية لحمل الانبعاج الحرج تكون متساوية للبعض من أقطار الفتحة المركزية البيضاوية الشكل (d_1)، لان قراءات الحمل المسلط المأخوذة لها مرتبة بعد الفارزة العشرية (لان الجهاز المستخدم لفحص حالة الانبعاج في دراستنا هذه يحتوي على مرتبتين بعد الفارزة العشرية). لذلك تم الجوء الى القيم التحليلية لحمل الانبعاج حيث تقل قيمة حمل الانبعاج الحرج تدريجياً عند زيادة قطر الفتحة المركزية البيضاوية الشكل (d_1) للصفيحة نتيجة تمركز الاجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفيحة، حيث ان تأثيرها يكون اكبر من تمركز الاجهاد لان قيمتهُ تكون قليلة، كلما يزداد حجم الفتحة (كمية المادة المزالة من الصفيحة) تنخفض قيمة تحمل الصفيحة. ماعدا الصفيحتين الحاويتين على فتحة بيضاوية قطرها (d_1) يساوي (25) mm و(40 mm). وتقل القيمة العملية والتحليلية لحمل الانبعاج الحرج بنسبة (12.7%) و(9.7%) على التوالي عند زيادة نسبة (d_1/b) من (0) الى (0.5).

الجدول (3): مقارنة بين القيم العملية والقيم التحليلية لحمل الانبعاج الحرج للصفائح الحاوية على الفتحات البيضاوية الشكل التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط.

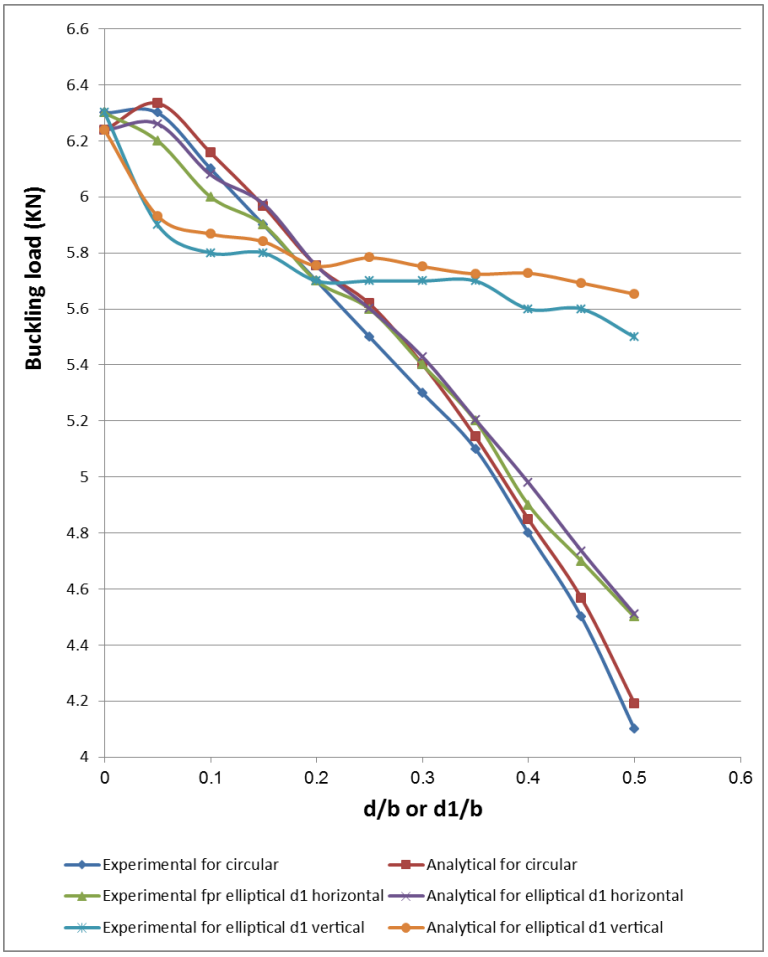
d_1/b	حمل الانبعاج (kN)		نسبة الاختلاف %
	القيم العملية	القيم التحليلية	
0.00	6.3	6.2382	0.981
0.05	5.9	5.9313	-0.53
0.10	5.8	5.8674	-1.162
0.15	5.8	5.8400	-0.689
0.20	5.7	5.7534	-0.936
0.25	5.7	5.7828	-1.452
0.30	5.7	5.7514	-0.901
0.35	5.7	5.7248	-0.435
0.40	5.6	5.7275	-2.276
0.45	5.6	5.6925	-1.651
0.50	5.5	5.6535	-2.791

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

4-4: مقارنة نتائج حمل الانبعاج للصفائح الحاوية على فتحات دائرية أو بيضاوية بنوعيها

يعتمد تصرف الانبعاج وما بعد الانبعاج بشكل كبير على حجم الفتحة وهناك انخفاض في مقاومة ما بعد الانبعاج للصفائح المثقبة حتى لو استمرت الصفيحة لتحمل حملاً إضافياً في مدى ما بعد الانبعاج مثل الصفيحة غير المثقبة بسبب وجود الحافات الحرة للفتحة. تم إجراء مقارنة بين الفتحات المركزية الدائرية والبيضاوية بخصوص مقاومة الانبعاج الحرجة (حمل الانبعاج الحرج). النتائج التي تم الحصول عليها بالنسبة للصفائح الحاوية على فتحات دائرية والنتائج المناظرة لها للصفائح الحاوية على فتحات بيضاوية بنوعيها موضحة في الشكل (4)، ولجعل ذلك ممكنا فانه يجب توحيد المحور السيني لأنواع الفتحات عن طريق مساواة حجميها وفق العلاقة الآتية:

$$\frac{\pi d^2}{4}t = \frac{\pi d_1 d_2}{4}t \Rightarrow \frac{d}{b} = \frac{\sqrt{d_1 d_2}}{b} \quad \ldots\ldots(1)$$

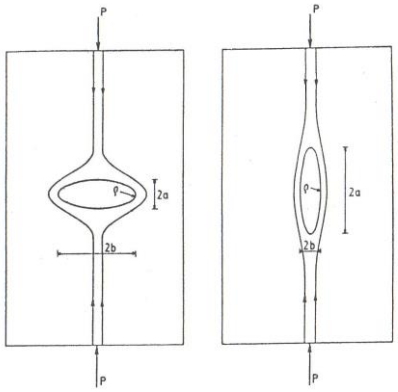


الشكل (4): العلاقة بين القيم العملية والتحليلية لحمل الانبعاج الحرج مع نسبة قطر الفتحة الى عرض الصفيحة.

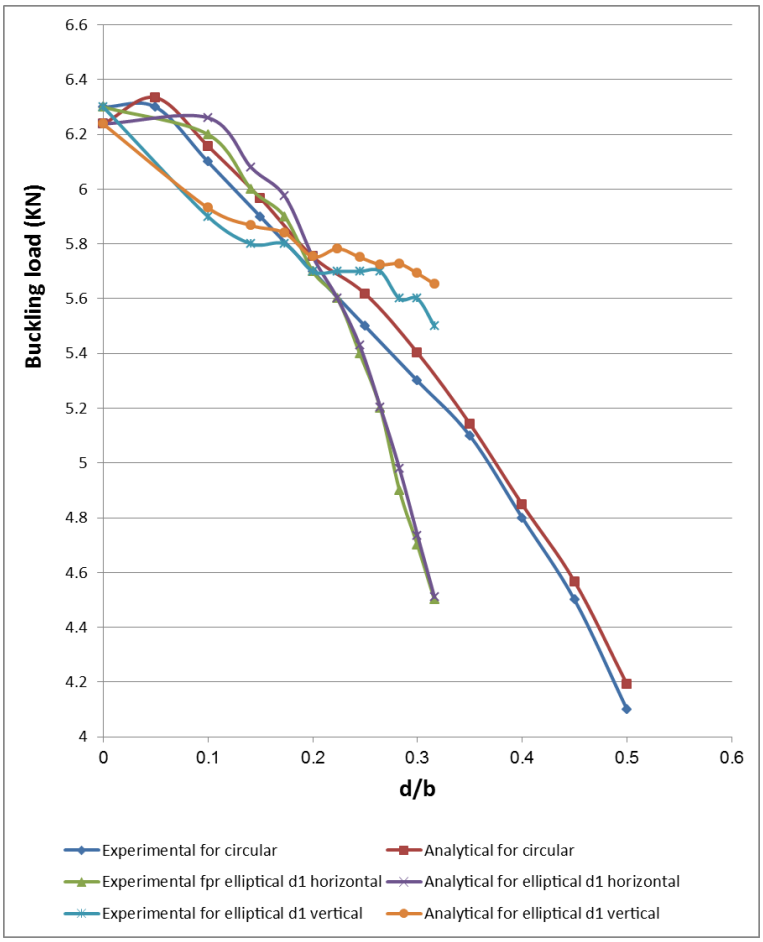
يبين كل من الجدول (1) و(2) و(3) وكذلك الشكل (4) أن قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفائح ذات الفتحات الدائرية اكبر من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعيها (فتحة قطرها الرئيسي باتجاه الحمل واخرى باتجاه عمودي على الحمل) وذلك عندما يكون قطر الفتحة صغيراً (اقل من (20 mm))، لان حجم المعدن المزال من الصفيحة الحاوية على فتحة الدائرية اقل مما هو عليه في حالة الصفيحة الحاوية على الفتحة البيضاوية بنوعيها، حيث إن حجم المعدن المزال يتناسب عكسياً مع قيمة تحمل الصفيحة، إي انه كلما يزداد حجم المعدن المزال تقل قيمة تحمل الصفيحة. إما عند ملاحظة الشكل (5) فان الصفائح الحاوية على الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط (قطرها رئيسي باتجاه الحمل) لها أعلى قيمة حمل الانبعاج الحرج من غيرها من الفتحات عند نفس حجم المعدن المزال، لان زيادة الاجهادات حول الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه الحمل اقل مما هو عليه في حالة الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل وكما هو موضح في الشكل (6) واقل ايضاً مما هو عليه في حالة الفتحة الدائرية، حيث ان زيادة الاجهاد حول المقطع نتيجة تغير المقطع يتناسب عكسياً مع قيمة تحمل الصفيحة، وكلما يزداد الاجهاد تقل قيمة تحمل الصفيحة. ويلاحظ من الجداول السابقة ومن الشكل (4) أن قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفائح ذات الفتحات الدائرية تكون اقل من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعيها عندما يكون حجم الفتحة كبيراً (اكبر من (20 mm))، لان حجم المعدن المزال من الصفيحة الحاوية على الفتحة الدائرية اكبر مما هو عليه في حالة الصفيحة الحاوية على الفتحة البيضاوية بنوعيها، ويلاحظ من الشكل (5) فان الصفائح الحاوية على الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط (قطرها رئيسي باتجاه عمودي على الحمل) لها اقل قيمة حمل الانبعاج الحرج من غيرها من فتحات عند نفس حجم المعدن المزال، وإن قيمة حمل الانبعاج الحرج في

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

الصفائح ذات الفتحات البيضاوية قطرها الرئيسي باتجاه الحمل تكون اكبربنسبة 5% تقريبا من قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفائح ذات الفتحات الدائرية او البيضاوية قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل عند نفس حجم المعدن المزال، حيث ان تركيز الاجهادات حول الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه الحمل اقل مما هو عليه في حالة الفتحة الدائرية واقل مما هو عليه في حالة الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل لان هذه الفتحة لها التغير الحاد في الشكل مما يؤدي الى زيادة في قيمة الاجهاد. وكلما يزداد الاجهاد تقل قيمة تحمل الصفيحة لان الاجهاد يزداد حول الفتحة وتصل قيمته الى قيمة جهد الانبعاج مما يؤدي الى حدوث حالة الانبعاج



الشكل (6): تمركز الاجهادات حول الفتحات البيضاوية.



عند حمل اقل من حمل الانبعاج لصفيحة غير الحاوية على فتحة. ويلاحظ مما سبق ان افضل الفتحات هي الفتحات البيضاوية التي قطرها الرئيسي باتجاه الحمل المسلط.

6: الاستنتاجات

تم استنتاج عدد من الملاحظات حول دراسة تصرف حالة الانبعاج المرن للصفائح المعدنية والمصنوعة من سبائك الألمنيوم من نوع ($AL\text{-}2024T_3$) مربعة الشكل تحتوي على فتحات مركزية بأشكال (دائرية وبيضاوية) وبأحجام مختلفة، وتضم هذه الدراسة تأثير كل من إبعاد وشكل الفتحة على مواصفات حالة الانبعاج (قيمة حمل الانبعاج الحرج وتوزيع الانفعال حول الفتحة). ويمكن الخروج بالاستنتاجات التالية:

1- بصورة عامة تنقص مقاومة الانبعاج الحرجة عندما يزداد حجم الفتحة سواء كانت الفتحة دائرية أو بيضاوية الشكل بنوعيها (فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط وفتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسلط).

2- إن قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات الدائرية تكون اكبر من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعيها (فتحة بيضاوية قطرها الرئيسي باتجاه الحمل المسلط وفتحة بيضاوية قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل المسلط) عندما تكون هذه الأقطار اقل من (20 mm). وتكون قيمته في هذه الصفائح اقل من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعيها عندما تكون هذه الأقطار اكبر من (20 mm).

3- إن الصفائح ذات الفتحات البيضاوية التي قطرها الرئيسي باتجاه الحمل المسلط لها أعلى قيمة حمل انبعاج حرج من غيرها من الفتحات عند نفس حجم المعدن المزال.

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com

4- تجنب استخدام الفتحات البيضاوية التي قطرها رئيسي باتجاه عمودي على الحمل المسلط، بسبب التغير الحاد في شكل هذه الفتحة مما يؤدي الى زيادة في قيمة تمركز الاجهاد.

References المصادر

1. Jain, P., Kumar, A., "Postbuckling response of square laminates with a central circular/elliptical cutout", Composite Structures, Vol. 65, Issue 2, 2004, India, pp. 179-185.
2. Ghannadpour, S.A.M., Najafi, A., Mohammadi, B., "On the buckling behavior of cross-ply laminated composite plates due to circular/elliptical cutouts", Composite Structures, Vol. 75, 2006, Iran, pp. 3-6.
3. Varughese, B., Kishore, A., Radhakrishna, K., Rao, M.S., "Buckling and Postbuckling Studies on Stiffened Composite Panels with Circular Cutouts", National Aerospace Laboratories, Bangalore, pp. 369-379.
4. Nemeth, M.P., "Buckling and Postbuckling Behavior of Compression-Loaded Isotropic With Cutouts", NASA Technical Paper 3024, 1990,Virginia, pp. 1-20.U.S.A.
5. د .سعد عباس خضر الصراف، أ.د .حسين جاسم محمد العلكاوي، جميل حسين ذرب، "تحقق من الانبعاج المرن لصفائح مثقبة في هياكل الطائرات"، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد ٢٥، العدد 5، ٢٠٠٧، بغداد/ العراق، .pp. 179-197
6. Komur, M.A., Sen, F., Atas, A., Arslan, N., "Buckling analysis of Laminated composite plates with an elliptical/circular cutout using FEM", advances in Engineering software, Vol. 41, Issue 2, 2010, Turkey, pp. 161-164.
7. Ganesan, C., Dash, P.K., "Elasto Buckling Behaviour Of Gfrp Laminated Plate With Central Holes", International Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 1, Issue 1, 2011, India, pp. 73-76.
8. Kumar, D., Singh, S.B., "Effects of boundary conditions on buckling and postbuckling responses of composite laminate with various shaped cutouts", Composite Structures, Vol. 92, Issue 3, 2010, India, pp. 769-779.
9. Kumar, A., "Buckling Analysis of Woven Glass epoxy Laminated Composite Plate", M.Sc., Technology In Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela-769008, Orissa, India, pp. 1-63, 2009.
10. William, L.Ko., "Anomalous Buckling Characteristics of Laminated Metal-Matrix Composite Plates with Central Square Holes", NASA Technical Paper 206559, 1998, California/ U.S.A., pp. 1-22.

تم اجراء البحث في كلية ألهندسة = جامعة ألموصل

المنارة للاستشارات
www.manaraa.com