

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

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

راند حكمت متي
ماجستير هندسة ميكانيكية
ميكانيك تطبيقي

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-2024T₃) 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 لأنه 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

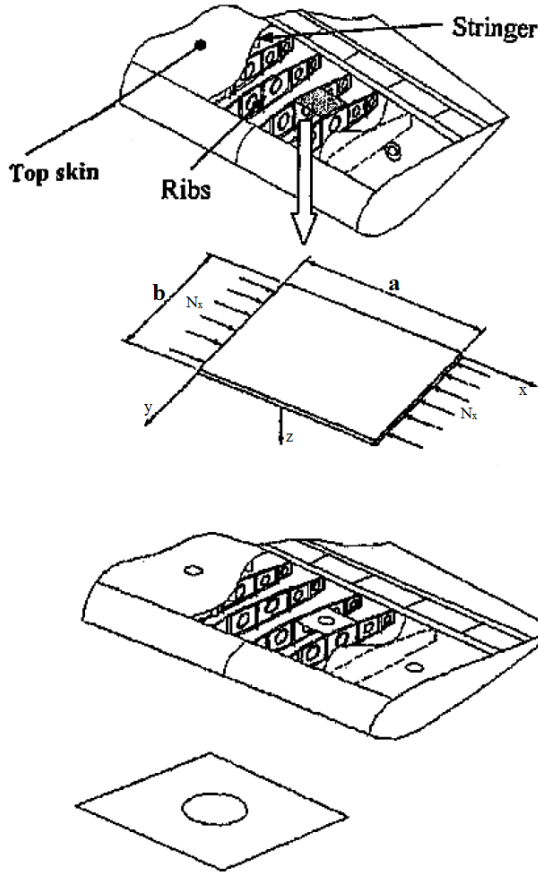
Dr. Rafi K. Al-bazzaz
Assistant Professor
College of Engineering/ Mech. Eng. Dept.
University of Mosul

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 T₃) 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-2024T₃ plate, Cut-outs holes, Finite Element Method, ANSYS.

1: المقدمة



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

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 استقراره 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 الطرفين الاخران من الصفيحة فهما غير مقيدتين اي لهما حرية الحركة. وفي حالة احمال ضغط واطئة فإن 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 استقراره الهياكل، حيث تنفذ الحسابات في برنامج (ANSYS) وتتم اجراء الدراسة عمليا على العينات من الصفائح.

هنالك دراسات مختلفة حول هذا الموضوع وقد قام الباحث (Nemeth 1990) [4] بدراسة تصرف حالة الانبعاج وما بعد الانبعاج لصفائح الالمنيوم (6061-T₆) مربعة ومستطيلة الشكل تحتوي على فتحات مركزية بأشكال مختلفة مثل الدائرة والمربع والشكل البيضاوي تحت حمل الضغط المسلط وقد ثبتت الحافات بأحكام باتجاه الحمل والحافات الغير محملة مثبتة ببساطة. وأوضحت نتائج العملية ان هناك زيادة في قيمة الاجهاد ونقصاً في الجساءة في بداية ما بعد انبعاج وبزيادة عرض 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 وتقريباً (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 الالمنيوم (AL-2024 T₃) 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 شاداً 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.

واستخدم (Jain 2004) [1] طريقة العنصر المحدود لدراسة استجابة ما بعد الانبعاج لصفحة مربعة الشكل متعددة الطبقات (laminates) والحوية على فتحات ومثبتة تثبيثاً بسيطاً، وقد وجد بأن قيمة حمل الانبعاج للصفائح الحوية على فتحات بيضاوية الشكل والتي يكون قطرها الرئيسي باتجاه الحمل اقل من قيمة حمل الانبعاج للصفحة التي تحتوي على فتحة دائرية. ودرس (Ghannadpour 2006) [2] تصرف حالة الانبعاج لصفائح مترابطة متعددة الطبقات ذي طبقات متعامدة (cross-ply laminated) تحتوي على فتحات دائرية وبيضاوية الشكل وذلك باستخدام تحليل العنصر المحدود. وأوضحت نتائجها 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 للصفحة. 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. وأوضحت نتائجها بأن قيمة حمل الانبعاج تقل بزيادة ارتفاع الشكل البيضاوي (c/a) قيمة قطره الرئيسي تساوي (0.5 a) واتجاه قطره الرئيسي باتجاه الحمل وتقل قيمة حمل الانبعاج تدريجياً بزيادة ارتفاع الشكل البيضاوي الذي يكون اتجاه قطره الرئيسي باتجاه عمودي على اتجاه الحمل. وكذلك بزيادة زاوية ميلان الفتحة البيضاوية من (0°-90°) (يتحول اتجاه القطر الرئيسي للشكل البيضاوي من اتجاه مواز لاتجاه الحمل المسلط إلى اتجاه عمودي لاتجاه الحمل المسلط) تقل قيمة حمل الانبعاج.

قام الباحث (Ganesan 2011) [7] بدراسة حالة الانبعاج المرن لصفائح مترابطة 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 تمرکز الاجهادات (Stress concentration) حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفحة، وإن تأثير تركيز الاجهادات بقي بنفس قيمته عند زيادة طول الضلع للفتحة المربعة الشكل بينما يزداد تأثير حجم المادة المزالة من الصفحة بزيادة إبعاد الفتحة. وأوضحت النتائج بأن قيمة حمل الانبعاج تقل عند وجود فتحات وتختلف هذه القيم باختلاف شكل الفتحة حيث إن الصفحة الحوية على فتحة دائرية لها أعلى قيمة لحمل الانبعاج من غيرها من الفتحات. وأوضحت نتائج (Kumar 2010) [8] إن صفحة متعددة الطبقات ومثبتة تثبيثاً محكماً لكل الحافات المحيطة بالصفحة لها أعلى قيمة لحمل الانبعاج وتحمل ما بعد الانبعاج وكذلك صفحة مثبتة بصورة بسيطة لكل الحافات المحيطة بالصفحة لها أقل 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 ألنوم من نوع (AL-2024T₃) 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 الصفحة. وتقرن النتائج العملية لحمل الانبعاج مع النتائج التحليلية وذلك باستخدام تقنية العناصر المحددة (F.E.) باستخدام البرنامج (ANSYS)، ويشمل التحليل على إيجاد شكل مثالي للفتحة وكذلك أول نمط حرج للانبعاج (first critical mode of buckling) متضمناً إيجاد قيمة (Eigen value) لحمل الانبعاج وشكله، كذلك دراسة تأثير تغيير شكل وحجم الفتحة مع حالة التثبيت المحكم لحافات الصفحة المعرضة للأحمال الضغطية الأحادية المحور.

2: الجزء العملي

1-2: النماذج المستخدمة

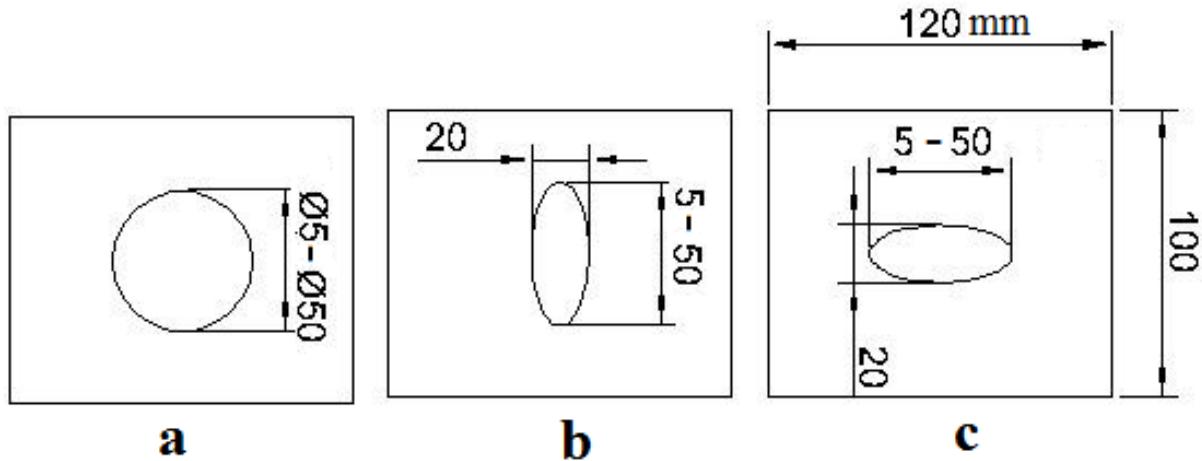
أن الصفائح المعدنية المستخدمة هي من سبيكة ألنوم من نوع (AL-2024T₃) ذات سمك (1.2 mm) تعد من السبائك التجارية المهمة حيث تستخدم في مجالات واسعة مثل هياكل الطائرات (نظراً لأن نسبة المقاومة إلى الوزن عالية جداً) وتستخدم في صناعة عجلات الشاحنات وفي منتجات اجزاء تثبيت المكنات المختلفة. وتحتوي هذه السبيكة عادة 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 ألألنوم (2024) على احتوائها تقريباً (4%) نحاس و(1%) مغنسيوم، مع كمية قليلة من المنغنيز والسيلكون والحديد والكروم والزنك.

2-2: تهيئة النماذج

استخدمت صفائح مربعة الشكل وذلك لكونها تمتلك صفات مميزة كبيرة للإزاحة ومجال الاجهاد لحالة التحميل والتثبيت المعينة. والصفحة لها طول وعرض ($a = b = 100 \text{ mm}$) ولها سُمك ثابت ($t = 1.2 \text{ mm}$) ونسبة الطول الى العرض يساوي واحداً وان اتجاه طول الصفحة يكون باتجاه الدرفلة. ثقتب 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) و فرق القطر بين الصفحة والصفحة التالية يساوي (5 mm) كما في الشكل (a-2).

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 و فرق القطر بين الصفحة والصفحة التالية (5 mm). ولدينا نوعان من الفتحات البيضاوية النوع الأول فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسط (القطر الثابت (d_2) يكون باتجاه الحمل المسط) كما في الشكل (b-2). والنوع الثاني فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d_1) باتجاه الحمل المسط (القطر الثابت (d_2) يكون باتجاه عمودي على الحمل المسط) كما في الشكل (c-2).

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 للصفحة بإبعادها الحقيقية أي لها طول ($a = 120 \text{ mm}$) مع شكل الفتحة البيضاوية).



All dimension in mm

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

3-2: فحص النماذج

نظراً لوجود عوامل متعددة تؤثر على عملية التحليل النظري لتصرف حالة الانبعاج لصفحة معدنية مربعة أو مستطيلة الشكل حاوية على فتحة فقد أصبحت الطرائق التجريبية مهمة في حل مشكلة حالة الانبعاج للصفائح. لان تحليل الانبعاج يصبح معقداً بشكل كبير جداً في حالة الصفائح الحاوية على الفتحات لان هذه الفتحات تدخل حدوداً حرة للتحميل تتسبب في ايجاد اجهاد غير منتظم في هذه الصفحة المثقبة. عليه فقد تم استخدام مجسات انفعال (Strain gauges) ثنائيته متعامدة موزعه على جانبي محور الفتحات وذلك لإيجاد قيم الانفعالات وبالاتجاهين.

أجريت اختبارات حمل الضغط على تسع وعشرين صفحة 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) سعته (20 kN) في التجارب العملية لحالة الانبعاج لقياس قيمة حمل الضغط المسط الذي سلط باتجاه واحد وبمستوى الصفحة (حمل الضغط احادي المحور). ثم تثبيت الصفائح على جهاز فحص الشد وأمسكت من الجهتين بحيث كان طول الصفحة باتجاه الدرفلة وعند تسليط الحمل فإن الماسكة السفلى تتحرك الى الأعلى بواسطة الأسطوانة الهيدروليكية بينما تبقى الماسكة العليا ثابتة. استخدم مقياس ازاحة لقياس الامالة الجانبية حيث تم توجيه إبرة المقياس عند منتصف طول الصفحة كما مبين في الشكل (3).

تم تسجيل قيم كل من الحمل المسلط والإمالة 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 تقريبا ثابتة (الزيادة في قيمة الحمل تكون قليلة بعد حمل الانبعاج الحرج). فلذلك تم تسجيل قيم كل من الحمل المسلط والإمالة 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 الإمالة الجانبية (4.3 mm).
إن الحمل الذي يسبب الانبعاج يُحدّد من 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 والإمالة 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 فأنا نستطيع عند هذه النقطة ان نحدد قيمة حمل الانبعاج الحرج [1].



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

3: الجانب النظري

في العديد من الهياكل الهندسية مثل الأعمدة والجسور والصفائح يتطور الفشل ليس بسبب الاجهادات الزائدة فقط وانما بسبب حالة الانبعاج ايضا [9]. وفي الحقيقة فإن 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 يسقط حمل ضغط على صفيحة ما فان الاجهاد يتوزع بانتظام على طول المقطع العرضي للصفحة. وعندما تتبجح الصفيحة تقل قيمة الجساء المحورية للمنطقة المركزية للصفحة نتيجة التشوهات بسبب الانحناء للصفحة. وان حالة الانبعاج للصفحة تكون باتجاهين متعامدين وبحالتين مختلفتين لحالات التثبيت المحيطة بالصفحة. الاختلاف الأساسي بين الصفيحة والعمود يكمن في خصائص حالة الانبعاج. حيث عندما يتبجح العمود لا يستطيع مقاومة أي حمل محوري إضافي، لذلك فإن الحمل الحرج للعمود يعد حمل فشل أيضا.

إما بالنسبة للصفحة فإنها تُدعم دائماً من الحافات، لذلك تُقاوم الحمل المحوري الإضافي تتواصل الصفحة في تحمل ولا تُفشل حتى بعد حمل الانبعاج الأولي [9].

ففي هذه الدراسة تم اللجوء أيضاً إلى طرائق تحليلية لإيجاد حمل الانبعاج الحرج. ولأن تحليل الانبعاج يصبح معقداً بشكل كبير جداً في حالة الصفائح الحاوية على فتحات لأنها تدخل حدوداً حرة للتحميل والتي تسبب في المجال المقطوع إجهاداً غير منتظم في الصفحة. هنالك طرائق تحليلية تقريبية لإيجاد حمل الانبعاج الحرج حيث استخدم بعض الباحثين طرائق تحليل نظري تقريبي وبعد ذلك لجأوا إلى طريقة التحليل العددي باستخدام نظرية العناصر المحدود في الدراسات السابقة. حيث أن نظرية العناصر المحدود لها سرعة عالية في الحل لأي منظومة معقدة لذلك فإن التوجه الحالي هو باتجاه استخدام هذه النظرية كأداة فعالة في التحليل الهيكلي. تم استخدام طريقة التحليل العددي وذلك بمساعدة برنامج (ANSYS 13) كمحلل لحمل الانبعاج الحرج لصفائح الألمنيوم 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 قيمته 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 لصفحة غير مثقبة تختلف بصورة جوهرية عن تلك المميزات للصفحة المثقبة، ففي الصفائح غير المثقبة يكون مجال الإجهاد قد حدد بشكل تام قبل الانبعاج ووفقاً للتمائل والاستمرارية في المقطع العرضي للصفحة. أما مجال الإجهاد قبل الانبعاج في الصفائح المثقبة فهو غير معروف وذلك نسبة إلى وجود حافات حرة للثقوب في وسط الصفحة لذا فإن طريقة الحل النظري للمشكلة غير ممكنة وهذا هو السبب في استخدام الطريقة العملية أو استخدام طريقة العناصر المحددة في الحل.

1-4: تأثير الفتحة الدائرية على قيمة حمل الانبعاج

تم تسجيل القيم العملية لحمل الضغط المسلط مع قيمة الإمالة 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 للصفحة نتيجة تمركز الإجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفحة، حيث تقل قيمته بسبب النقصان في مساحة المقطع عند مركز الصفحة (عند منتصف طول الصفحة) 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) إلى (0.5). أما إذا كانت الحافات غير معرضة للأحمال المقيدة فقد تزداد قيمة حمل الانبعاج عند زيادة قطر الفتحة المركزية الدائرية الشكل وهذا ما يسمى بالحالات الشاذة [10]

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

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

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

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) للصفحة نتيجة تمرکز الاجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من الصفحة، حيث تقل قيمته بسبب نقصان في مساحة المقطع عند مركز الصفحة (عند منتصف طول الصفحة) 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).

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 وقيمتها تساوي (20 mm). حيث تم تسجيل القيم العملية لحمل الضغط المسلط مع قيمة الامالة 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 ان قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفحة الحاوية على فتحة بيضاوية قطرها (d_1) يساوي (5 mm) اقل كثيراً من قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفحة 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) للصفحة نتيجة تمرکز الاجهادات حول الفتحة وتأثير كمية المادة المزالة من

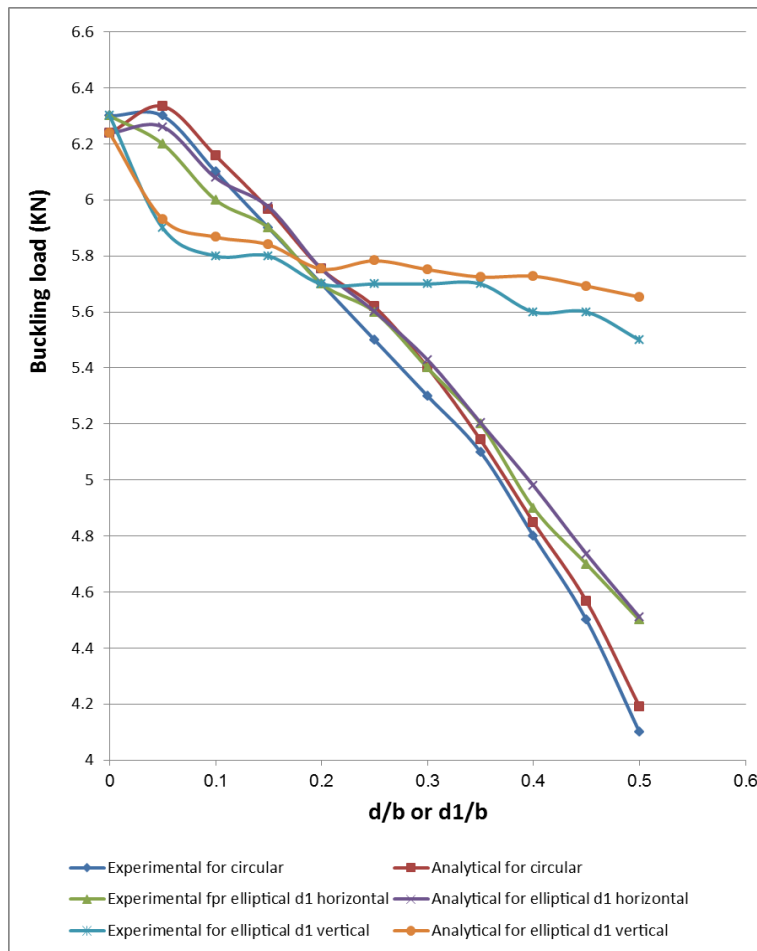
d_1/b	حمل الانبعاج (kN)		نسبة الاختلاف %
	القيم العملية	القيم التحليلية	
0.00	6.3	6.2382	0.981
0.05	5.9	5.9313	-0.53
0.10	5.8	5.8674	-1.162
0.15	5.8	5.8400	-0.689
0.20	5.7	5.7534	-0.936
0.25	5.7	5.7828	-1.452
0.30	5.7	5.7514	-0.901
0.35	5.7	5.7248	-0.435
0.40	5.6	5.7275	-2.276
0.45	5.6	5.6925	-1.651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

الصفحة، حيث ان تأثيرها يكون اكبر من تمرکز الاجهاد لان قيمته تكون قليلة، كلما يزداد حجم الفتحة (كمية المادة المزالة من الصفحة) تنخفض قيمة تحمل الصفحة. ماعدا الصفحتين 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).

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

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 بنوعها موضحة في الشكل (4)، ولجعل ذلك ممكناً فإنه يجب توحيد المحور السيني لأنواع الفتحات عن طريق مساواة حجمها وفق العلاقة الآتية:

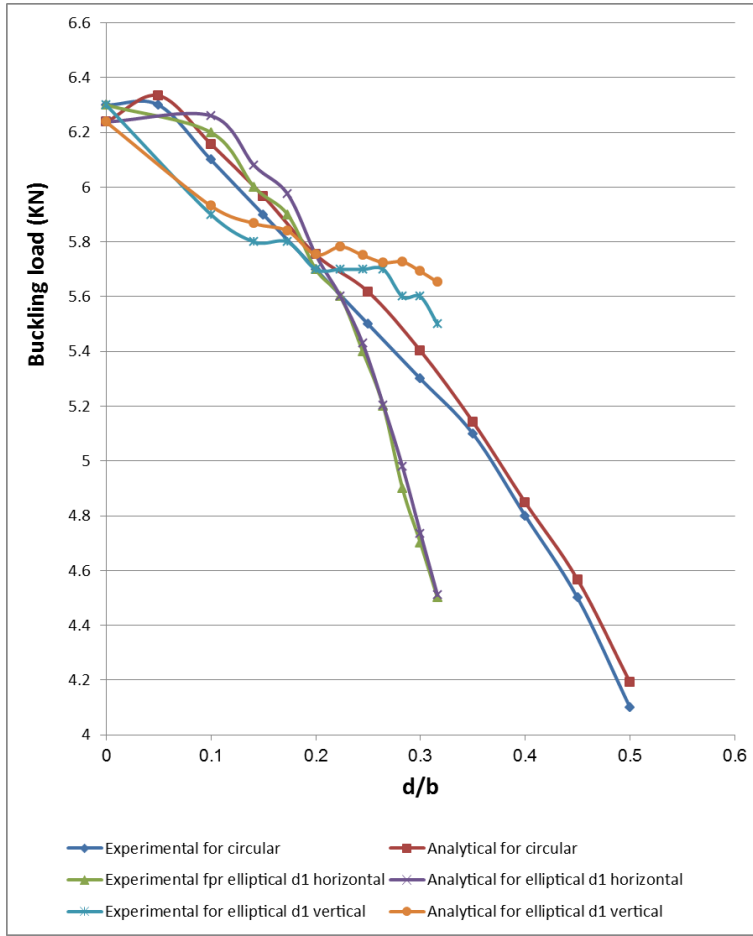
$$\frac{\pi d^2}{4} t = \frac{\pi d_1 d_2}{4} t \Rightarrow \frac{d}{b} = \frac{\sqrt{d_1 d_2}}{b} \dots \dots \dots (1)$$



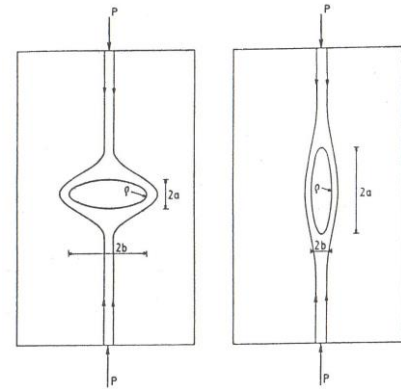
الشكل (4): العلاقة بين القيم العملية والتحليلية لحمل الانبعاج الحرج مع نسبة قطر الفتحة الى عرض الصفيحة.

يبين كل من الجدول (1) و(2) و(3) وكذلك الشكل (4) أن قيمة حمل الانبعاج الحرج للصفائح ذات الفتحات الدائرية أكبر من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعها (فتحة قطرها الرئيسي باتجاه الحمل واخرى باتجاه عمودي على الحمل) وذلك عندما يكون قطر الفتحة صغيراً (أقل من (20 mm))، لأن حجم المعدن المزال من الصفيحة الحاوية على فتحة الدائرية أقل مما هو عليه في حالة الصفيحة الحاوية على الفتحة البيضاوية بنوعها، حيث إن حجم المعدن المزال يتناسب عكسياً مع قيمة تحمل الصفيحة، أي أنه كلما يزداد حجم المعدن المزال تقل قيمة تحمل الصفيحة. أما عند ملاحظة الشكل (5) فإن الصفائح الحاوية على الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط (قطرها الرئيسي باتجاه الحمل) لها أعلى قيمة حمل الانبعاج الحرج من غيرها من الفتحات عند نفس حجم المعدن المزال، لأن زيادة الاجهادات حول الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه الحمل أقل مما هو عليه في حالة الفتحة البيضاوية والتي قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل وكما هو موضح في الشكل (6) وأقل أيضاً مما هو عليه في حالة الفتحة الدائرية، حيث أن 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 أقل من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعها عندما يكون حجم الفتحة كبيراً (أكبر من (20 mm))، لأن حجم المعدن المزال من الصفيحة الحاوية على الفتحة الدائرية أكبر مما هو عليه في حالة الصفيحة الحاوية على الفتحة البيضاوية بنوعها، ويلاحظ من الشكل (5) فإن الصفائح الحاوية على الفتحة البيضاوية التي يتغير قطرها (d_1) باتجاه عمودي على الحمل المسلط (قطرها الرئيسي باتجاه عمودي على الحمل) لها أقل قيمة حمل الانبعاج الحرج من غيرها من فتحات عند نفس حجم المعدن المزال، وإن قيمة حمل الانبعاج الحرج في



الصفائح ذات الفتحات البيضاوية قطرها الرئيسي باتجاه الحمل تكون اكبر بنسبة 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 الصفحة لان الاجهاد يزداد حول الفتحة وتصل قيمته الى قيمة جهد الانبعاج مما يؤدي الى حدوث حالة الانبعاج



الشكل (6): تمرکز الاجهادات حول الفتحات البيضاوية.

عند حمل اقل من حمل الانبعاج لصفحة 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 ألنيوم من نوع (AL-2024T₃) 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 بنوعها (فتحة بيضاوية يتغير قطرها (d₁) باتجاه عمودي على الحمل المسلط وفتحة بيضاوية يتغير قطرها (d₁) باتجاه الحمل المسلط).

2- إن قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية تكون اكبر من قيمة حمل الانبعاج الحرج في الصفائح ذات الفتحات البيضاوية بنوعها (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 بنوعها 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.

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 تمرکز 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 الهندسة = جامعة الموصل