تأثير تغيّر السماكة على صلابة صفيحة قشرية ذات ألياف مستقيمة

م. حمدو ابراهيم، د. مصطفى طالب
الهندسة الميكانيكية، جامعة إدلب

الملخص

إن مقاومة الانحناء تعتبر معيار رئيسي في التحكم في تصميم الإنشاءات المصنعة من مواد مركبة على شكل صفائح. إذ أنّ معيار جودة التصميم هو الحاجة إلى أحمال مرتفعة لإحداث الانحناء(و الانفعال المرتبط به) وهذا ينعكس مباشرة على التكلفة الإنشائية أو الوزن بعدة وسائل. تستعرض هذه الدراسة التحسينات التي يتم تحقيقها لأحمال الانحناء الناشئ عن الضغط في صفائح المواد المركبة مربعة الشكل باستخدام مفهوم تغير الصلابة البسيط. حيث يعتمد هذا المبدأ على وضع طبقات وحيدة الاتجاه ضمن السماكة الكلية للصفيحة بحيث تزيد السماكة في بعض الأماكن وتنقص في أماكن أخرى بدون أن يؤثر ذلك سلباً في الصلابة المحورية أو زيادة في الوزن، ويؤدي ذلك إلى ارتفاع في حمل الانحناء. أجرينا الدراسة على نموذجين لحياكة الألياف، الأول يعتمد على زيادة السماكة لحواف الصفيحة، والنموذج الثاني يعتمد على زيادة السماكة في وسط الصفيحة مع الإبقاء على باقي أجزاء الصفيحة ثابتة السماكة، ثم زيادة أبعاد الطبقة المركزية حتى تشمل في النهاية كامل الصفيحة الأساسية. قمنا بدراسة تأثير السماكة بواسطة برنامج Abaqus لتحديد تأثير اتجاه حياكة الألياف على أحمال الانحناء للصفيحة مع شروط حدية متغيرة، ومقارنة النتائج مع تلك التي حصل عليها باحثون سابقون، ثم بعد ذلك قمنا بتصنيع صفائح مماثلة وإجراء اختبارات الضغط عليها ومقارنة النتائج التي حصلنا عليها لملاحظة التحسن المطلوب على صلابة الصفائح وزيادة حمل الانحناء مقارنة بأحمال الانحناء في الصفائح ذات السماكة المنتظمة التقليدية.

الكلمات المفتاحية: تغير الصلابة البسيط، ، حياكة الصفائح، الخواص الاتجاهية للألياف، نسبة عرض الحواف، تنضيد الصفائح

The Effect of Thickness Variation on Straight-fiber Composite Laminate

Hamdo Ebrahim, Mostafa Taleb
Mechanical engineering, Idleb University, Syria

Abstract:

Bending strength is a major criterion in controlling composite materials laminates elements based-structure design. Whereas, design processes that lead to high bending loads (or high strains) of laminate elements can directly reduce structural cost or weight in a number of ways. This study demonstrates the improvements achieved to compression-induced bending loads in rectangular composite material laminates using the concept of simple stiffness variation. The principle is based on placing unidirectional layers within the total thickness of the plate, so that the thickness increases in some places and decreases in others without a loss in axial stiffness or an increase in weight, and This results in an increase in the bending load. The study was carried out according to two models of tailoring, the first depends on increasing the thickness of the edges of the plate, and the second model depends on increasing the thickness in the middle of the plate while keeping the rest of the plate parts fixed in thickness and then increasing the dimensions of the central layer until it covers the entire main plate.

We studied the effect of thickness using ABAQUS software to determine the effect of tailoring fibers on the bending loads of the plate with variable boundary conditions, and we fabricated similar Plates and performed compression tests on them and then compared the results obtained to compare the possible improvement in the stiffness of the Plates and the increase in the bending load compared to the bending loads of regular thickness Plate.

Key words: Simple variation of stiffness, laminates tailoring, directional properties of fibers, aspect ratios, laminate layup.

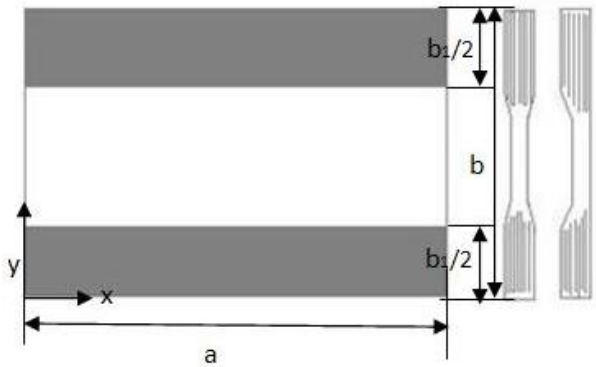
1- مقدمة

تمتلك الألياف خواص اتجاهية، أي أن توجيه الألياف باتجاه معين قد يكون له تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للإنشاء، كالصلابة والمتانة والتي بدورها تؤثر على الأداء الإنشائي للعنصر، وبالتالي تعتمد الخواص الميكانيكية على زوايا التوجيه $[\pm 45,0,90]$

الشكل (1): أشكال توجيه الألياف ضمن الطبقات

يمكن تجميع هذه الطبقات فوق بعضها البعض، وفق توجيه معين وعدد معين مع بعض التكرارات للطبقات، بحيث نحصل على خواص صلابة جديدة وتحمّل أعلى للانحناء. بما أنه يمكن التحكم بخواص هذه الصفائح وإمكانية حياكتها بالشكل الذي يلبي متطلبات التحميل فإننا نستطيع الاستفادة من ذلك من خلال التوضع الدقيق لهذه الطبقات ضمن سماكة الصفيحة، لقد أظهرت الدراسة التي قام بها الباحث **[1]** أن نوع الحياكة المتبع هنا يمكن أن يقدم تحسن بمقدار **42** % في حمل الانحناء للصفائح ذات الخواص المتجانسة الخاضعة للضغط الصافي. و يمكن الحصول على تحسن ملحوظ، عند تطبيق الحياكة، للصلابة على صفائح المواد المركبة. استعرض الباحث **[2]** Biggers and Srinivasan دراسة لصفيحة مستطيلة تحت تأثير التحنيب الناتج عن الضغط وذلك باستخدام نموذج صفيحة يحاكي بعض الانشاءات الموجودة في هياكل الطائرات، والتي تتعرض لظروف تحميل مختلفة، تضم الحياكة المدروسة هنا إعادة توزيع المادة بزاوية **0** في الاتجاه x عبر الصفيحة وضمن سماكتها أي تنضيد(الحياكة) وحيدة المحور، وقد تبين بأن إعادة توزيع

الألياف في الصفيحة ذات الزاوية **0** من منطقة مركز الصفيحة التي تحوي نهايات خاضعة لحمل باتجاه الحواف المدعمة وغير الخاضعة لحمل تميل لزيادة حمل التحنيب في الاتجاه **x (N_x)**. علماً أن **N_x** هي الحمل الوسطي بواحدة العرض**(w)** عبر الصفيحة، وبالعكس فإن إعادة توزيع نفس المادة بعيداً عن الحواف باتجاه منطقة المركز تخفض بشكل كبير حمل الانحناء. والشكل **2** يظهر منظور عام ومقطعين عرضيين لمفهوم حياكة السماكة المتغيرة.



الشكل (2): ألية حياكة الصفيحة وفق Biggers

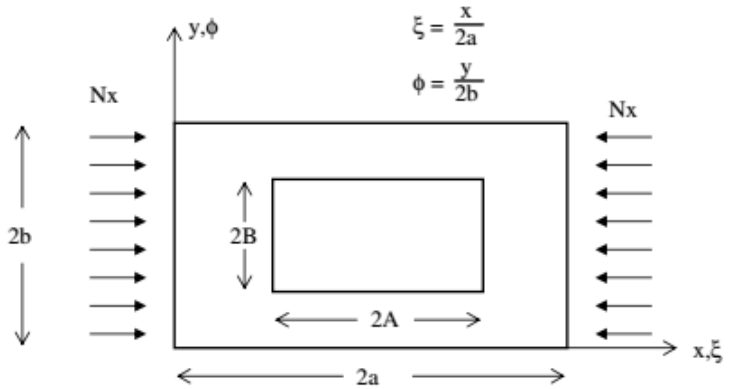
تمثل الصفيحة الظاهرة عنصر سطحي مدعوم بعناصر إنشائية مخفية ضمن البنية الإنشائية، و يفترض أن تقوم العناصر الإنشائية بمنع حدوث تشوهات سطحية فراغية على حواف الصفيحة. من أجل التبسيط ولأجل تقليل الزيادة في تعقيدات التصنيع الناشئ عن الحياكة (Tailoring) يمكن اعتبار أن هذه الصفيحة ذات منطقتي سماكة مختلفتين، وبالتالي يمكن اعتبار أن الصفيحة ذات ألياف مستمرة وفق زاوية التوجيه و متدرجة الحواف وبالتالي يمكن إهمال تركيز الاجهادات الناتج عن الانتقال من منطقة لأخرى في الصفيحة. نستطيع تصنيع هذا الشكل بعدد من الطرق، منها عملية البثق، بطريقة **(RTM)** **[4]** أي صب الريزين على النسيج المحاك بشكل مسبق، أو بتقنية التنضيد اليدوية، أو بطريقة

(Vacuum packing) و هذه الطريقة يتم فيها تصنيع صفائح المواد المركبة باستخدام عملية الخلخلة الهوائية للحجرة التي يتم فيها تصنيع العينة.

إن تأثير منطقة الانتقال الصغيرة بين المناطق السميكة والرقيقة على التحنيب افترضناها صغيرة، وبالتالي لن نقوم بنمذجة هذه المنطقة، إذ انه يمكن لنا أن نأخذ بعين الاعتبار تأثير منطقة الانتقال عند دراسة توزع الاجهادات قبل التحنيب أو بعد التحنيب أو عند التنبؤ بانهيار المادة.

كما قام الباحث Christos Kassapoglou[**3**] بدراسة سلوك صفيحة ذات تنضيد طبقي في مركز الصفيحة بدون الوصول للحواف وتمت هذه الدراسة تحليلياً باستخدام طريقة Rayleigh–Ritz باستخدام عدة متغيرات، كتغير عدد الطبقات للصفيحة المركزية وتغير أبعاد الصفيحة المركزية مع الابقاء على التسلسل الطبقي نفسه ودرس حالتين:

1- دراسة تحنيب صفيحة مستطيلة الشكل مؤلفة من صفيحتين متحدتي المركز، تحتويان على تسلسل طبقي مختلف وخاضعة لحمولة ضغط كما في الشكل(**3**):



الشكل (3): آلية الحياكة وفق Christos

واستنتج عدة معادلات للحساب التحليلي اعتمادا على معادلة الانزياحات العمودية على المستوي المدروس والتي تُعطى بالشكل التالي:

$$w = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} A_{mn} \sin m\pi\xi \sin n\pi\phi \qquad (1)$$

تمثل **m** و **n** قيم فردية و $\boldsymbol{A_{mn}}$ هي معاملات غير معروفة، كما تعطى قيم $\boldsymbol{\xi}$ و $\boldsymbol{\phi}$ بالعلاقة:

$$\xi = \frac{x}{2a}\ , \quad \phi = \frac{y}{2b}$$

وقام بإيجاد صيغة حمل التحنيب بالاستعانة بعلاقة الطاقة الكامنة للصفيحة المدروسة

$$\Pi = \frac{1}{2}\int\int\left\{D_{11}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + 2D_{12}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + D_{22}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2 + 4D_{66}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)\right\}dxdy - \frac{1}{2}\int\int N_a\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 dxdy \qquad (2)$$

وذلك بإجراء تفاضل للعلاقة **(2)** بالنسبة للمعاملات للانزياح ومساواتها بالصفر

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_{mn}} = 0 \qquad (3)$$

وحصل بعدها على معادلة قيم خاصة قام بتعميمها

$$[A]\{x\} = \lambda[B]\{x\} \qquad (4)$$

تمثل القيمة الذاتية $\boldsymbol{\lambda}$ حمل التحنيب $\boldsymbol{N_a}$ في المعادلة **2**، ويحتوي الشعاع الذاتي $\{\boldsymbol{x}\}$ الثوابت $\boldsymbol{A_{mn}}$ للمعادلة **1**، وتحتوي المصفوفات $[\boldsymbol{A}]$ و $[\boldsymbol{B}]$ الخواص الهندسية و خواص الصلابة

للمسألة. وقد قام كريستوس باستخدام المصفوفات المستخدمة في دراسات سابقة **[5]** و **[6]** لإيجاد القيم الذاتية.

2–دراسة الإجهادات السطحية في الصفائح المكونة من نمطين من التنضيد متحد المركز والخاضعة للانضغاط:

واستعان الباحث كريستوس بجملة المعادلات التي تعبر عن القوى الخطية $\boldsymbol{N_x}$،$\boldsymbol{N_y}$، $\boldsymbol{N_{xy}}$ يتم صياغتها كالتالي:

$$N_x = \frac{F_a}{2b} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} H_{mn}(\cos 2m\pi\xi - 1)\cos 2n\pi\phi$$

$$N_y = \frac{b^2}{a^2}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} \frac{m^2}{n^2} H_{mn}(\cos 2m\pi\xi)(\cos 2n\pi\phi - 1) \qquad (5)$$

$$N_{xy} = \frac{b}{a}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} \frac{m}{n} H_{mn}\sin 2m\pi\xi \sin 2n\pi\phi$$

وهي تحقق معادلات التوازن التالية

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0$$

وقام بصياغة الشروط الحدية:

$$N_x(x = 0) = N_x(x = 2a) = \frac{F_a}{2b} \qquad (6-a)$$

$$N_y(y = 0) = N_y(y = 2b) = 0 \qquad (6-b)$$

$$N_{xy}(x=0) = N_{xy}(x=2a) = N_{xy}(y=0) = N_{xy}(y=2b) = 0 \qquad (6-c)$$

حيث توضح الشروط الحدية في المعادلة **6a** أن القوة الثابتة $\boldsymbol{F_a}$ تم تطبيقها على حافتي الصفيحة المتعاكستين، أما المعادلات **6b** و **6c** فهي تفرض عدم وجود إجهادات عند الحواف. وقام الباحث باستخدام علاقة الطاقة الكامنة الخاصة بهذه الحالة

$$\Pi = \frac{1}{2}\int\int \left[a_{11}N_x^2 + a_{22}N_y^2 + 2a_{12}N_xN_y + a_{66}N_{xy}^2\right] dxdy - \frac{1}{2}\int N_x(x=2a)u(x=2a)dy \qquad (7)$$

إن $\boldsymbol{a_{ij}}$ هي المدخلات الموافقة لمقلوب المصفوفة الغشائية $\boldsymbol{A_{ij}}$ للصفيحة، لقد افترض الباحث هنا أن كلا الصفيحتين المحيطية والمركزية متناظرتين ومتحدتي المركز بحيث أن $\boldsymbol{A_{16} = A_{26} = 0}$ ، و يجب تحديد الانزياح **u** عند حافة الصفيحة بالقيمة $(x = 2a)$ ويتم ذلك بحساب الانفعال ε_x من المعادلة:

$$\varepsilon_x = \frac{N_xA_{22} - N_yA_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \qquad (8)$$

إذ تعبر $\boldsymbol{A_{ij}}$ عن المدخلات الموافقة لمصفوفة الصلابة الغشائية و أما قيم $\boldsymbol{N_x}$ **و** $\boldsymbol{N_y}$ فيتم تحديدها بواسطة المعادلة **5**. إذا تمت مكاملة المعادلة **8** بالنسبة للقيمة **x** فإنها تعطي قيمة الانزياحات **u** من خلال الدالة **y**. يتم تحديد التابع **y** من شروط التناظر $u(x = 2a) = 0$. إن العبارة النهائية للقيمة $u(x = 2a)$ هي

$$u(x = 2a) = u(\xi = 1)$$
$$= \frac{2a}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}\left(\frac{A_{22}F_a}{2b}\right.$$
$$\left. - A_{22}\sum_m\sum_n H_{mn}\cos 2n\pi\phi\right) \qquad (9)$$

يتم الحصول على القيم المجهولة $\boldsymbol{H_{mn}}$ من المعادلة **5** من خلال اختزال قيمة

$$\frac{\partial \Pi}{\partial H_{mn}} = 0 \qquad (10)$$

فباستخدام المعادلة **9** والمعادلة **5** واستبدالها في المعادلة **7** ثم في المعادلة **10** يعطي ذلك نظام المعادلات

$$[E]\{H\} = \{R\} \qquad (11)$$

حيث أن الشعاع $\{H\}$ يحتوي على المجاهيل $\boldsymbol{H_{mn}}$ ويتم الحصول على المصفوفة $[\boldsymbol{E}]$ من خلال تكامل الحد الأول من المعادلة **7**

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث بأن مفاهيم التصميم هذه و التي تقود إلى أحمال تحنيب متزايدة يمكن أن تخفض مباشرة من الوزن وذلك عن طريق:

1- السماح بتدعيم البنية الإنشائية على نطاق واسع وبالتالي إنقاص عدد قطع الإنشاءات (المثبتات، وأجزاء الربط).

2- السماح باستخدام بنية إنشائية أبسط تؤدي إلى كبح دوراني أصغر للعناصر الإنشائية السطحية.

3- تقليل الوزن الهيكلي الكلي من خلال السماح بالتصميم على مستوى انفعال أعلى تحكمه متانة المادة أو تحمل الانهيار بدلاً من خفض القيم التي يحكمها التحنيب.

لذلك قمنا في بحثنا بالاعتماد على البرامترات التي استخدمها الباحثان [2]،[3] وإجراء الدراسة وفق برنامج ABAQUS وتصنيع الطبقات وفق التصميم الهندسي الموجود وإجراء الاختبار عليها مخبرياً ومقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع الدراسات السابقة للباحثين وبيان تأثير الحياكة على تحسن متانة الصفائح (زيادة حمل التحنيب).

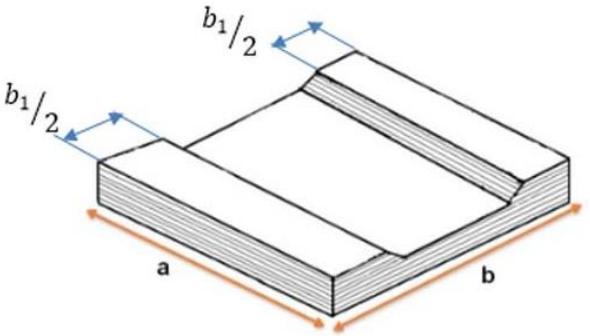
1- الدراسة التحليلية:

أُخذَ بعين الاعتبار عدة برامترات:

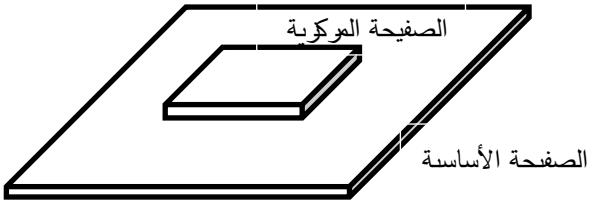
1- النسبة الهندسية للعرض[1]: $\bar{b} = {}^{b_1}/_{b}$ و هو يعتبر أهم برامتر تصميم في هذه الدراسة. حيث له تأثير مهم على تحنيب الصفيحة ويتم التحكم به بسهولة. وهذه النسبة تمثل نسبة عرض المنطقة ذات السماكة الأعلى إلى العرض الكلي للصفيحة. إن تأثير نسبة العرض بناءً على ذلك يظهر بالربط مع برامترات تصميمية أخرى متنوعة. تتدرج نسبة العرض من القيمة 1.0 للصفيحة الأساسية منتظمة السماكة إلى قيم صغيرة ضمن المجال (0.2-0.1) الذي يوافق مناطق صلبة، سميكة وضيقة بالقرب من الحواف. ترتبط نسبة سماكة الحواف مع النسبة $\bar{b}$ في الصفائح المحاكة ويمكن استعراض العلاقة التي تربط بين البرامترين. طالما أن المعدل الكلي للصلابة المحورية السطحية يبقى ثابتاً ويساوي إلى صلابة الصفيحة منتظمة السماكة في كل الحالات، فإن نسبة العرض تتحكم في نقل الحمل المحوري السطحي عبر عرض الصفيحة بتغيير قيم الصلابة السطحية، أي أن عملية الحياكة تهدف إلى إعادة توزيع الأحمال بتغيير السماكات، و نسبة

العرض تتحكم أيضاً بالانحناء النسبي وقيم صلابة الفتل للمناطق الرقيقة والسميكة.

الشكل(4) يبين توزع السماكة حسب[2] والشكل(5) توزع السماكة حسب[3].

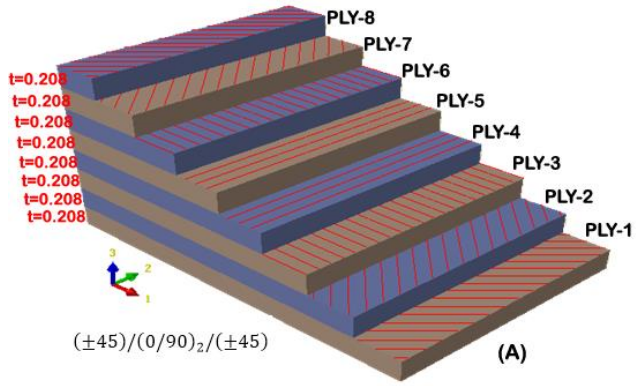


الشكل(4) الصفيحة متغيرة السماكة[2]



الشكل (5): الصفيحة متغيرة السماكة من المركز[3]

2- التسلسل الطبقي للصفائح: إن الصفيحة المتجانسة المرجعية المستخدمة وفق **[2]** هي صفيحة مواد مركبة رقيقة شبه متجانسة مكونة من ألياف زجاجية ومادة حاضنة هي الإيبوكسي ذات تنضيد $[\pm 45/0/90]_S$ حيث تشير القيم داخل القوسين التربيعيين إلى زوايا توجيه الليف، من اليسار لليمين هو ترتيب الطبقات من الخارج للداخل والرمز **s** يشير إلى وجود تناظر وأن الطبقات مكررة وبالتالي العدد الكلي للطبقات سيكون **8** ثمان طبقات كما في الشكل**(6)**

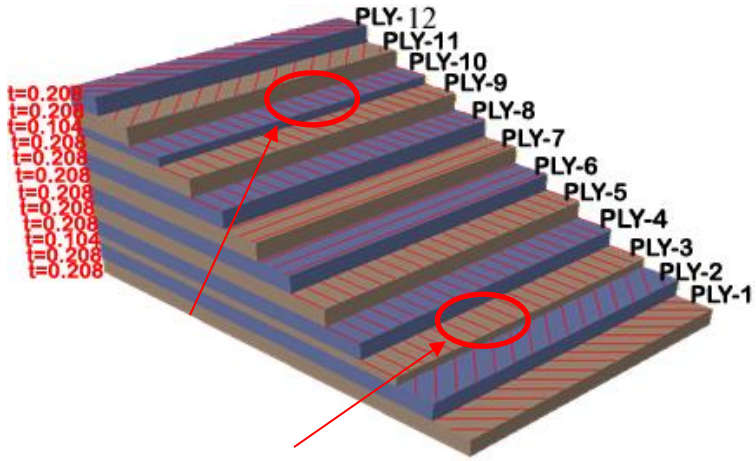


الشكل (6): التسلسل الطبقي للصفيحة الرئيسية

أما بالنسبة للصفائح بحواف سميكة فإن التنضيد الطبقي للحواف السميكة من الشكل $[\pm 45/0_n/90]_S$. حيث تعرف قيمة n على أنها وبشكل مبسط:

$$n = {}^{1}/_{\bar{b}}$$

وتمثل **n** عدد الطبقات ذات التوجيه صفر درجة التي يمكن إضافتها ضمن المناطق السميكة ونفرض أنها تأخذ قيم صحيحة وقيم تحوي فواصل. القيم الصحيحة يمكن الحصول عليها فقط لأجل $\bar{\boldsymbol{b}} = \mathbf{1.0, 0.5, 0.333, 0.25, 0.2, } \boldsymbol{etc}$ أما القيم الوسطى للمقدار $\bar{b}$ تأخذ أعداد غير صحيحة للمقدار **n** وهذا يمكن تحقيقه باستخدام طبقات ذات سماكات مختلفة. وبالتالي يمكن لنا بمعرفة القيمة الهندسية للعرض بأن نوجد عدد الطبقات ذات التوجيه الصفري الموافقة لها من خلال العلاقة المذكورة أعلاه وتحديد السماكة لكل طبقة يمكن إضافتها. بهذه الحالة يمكن لنا المحافظة على الوزن الكلي الثابت للصفيحة. الشكل (7) يبين التسلسل الطبقي لحواف الصفيحة.

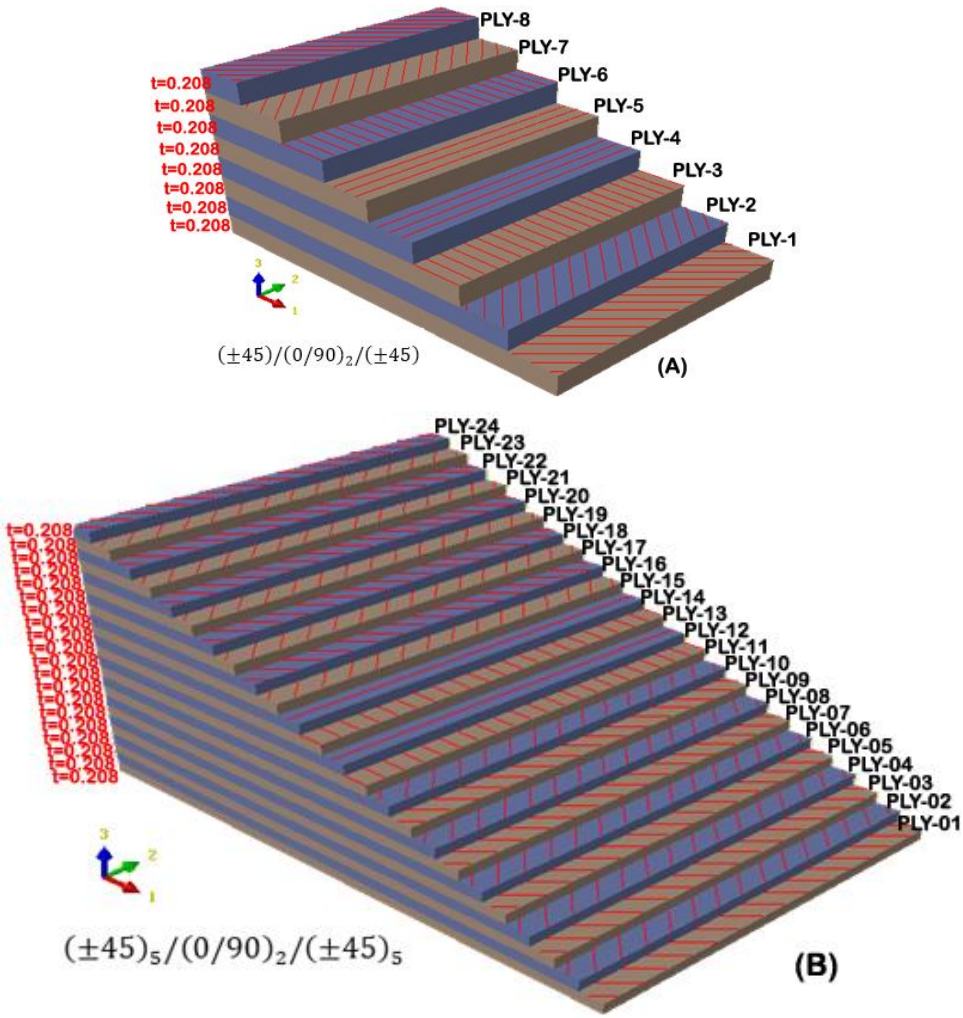


الشكل (7): التسلسل الطبقي للحواف

أما الصفيحة المستخدمة وفق[3] Christos Kassapoglou ستكون الصفيحة المحيطية الرئيسية Baseline لها توضع طبقي من الشكل التالي $(\pm 45)/(0/90)_2/(\pm 45)$ والمنطقة المركزية سميكة الحواف في الصفيحة ذات ترتيب طبقي $(\pm 45)_5/(0/90)_2/(\pm 45)_5$، ثم يتم زيادة أبعاد الصفيحة المركزية حتى نصل لحالة يتم فيها تغطية الصفيحة الرئيسية كاملة. تم إجراء الحياكة بإيجاد حمل التحنيب عن طريق برنامج ABAQUS لـ **6** صفائح مركزية مختلفة الأبعاد مع المحافظة على التنضيد نفسه:

a) 50.8×50.8 mm
b) 101.6×101.6 mm
c) 254×254 mm
d) 381×381 mm
e) 457.2×457.2 mm
f) 508×508 mm

يبين الشكل(8) توضيح للتنضيد الطبقي للصفائح المدروسة



الشكل (8): عينة توضيحية للتنضيد الطبقي للصفائح الستة المدروسة مختلفة الأبعاد

3- نسبة حمل التحنيب الناتج عن الضغط$(\bar{N}_x)$: في كل الحالات إن فوائد الحياكة تظهر بمفهوم تأثير برامترات التصميم على حمل التحنيب النسبي، والذي يتم تعريفه على أنه حمل التحنيب في الاتجاه **x** للصفيحة المحاكة مقسوم على حمل التحنيب للصفيحة المنتظمة الأساسية الموافقة بدون تغير سماكة. إن الصلابة السطحية

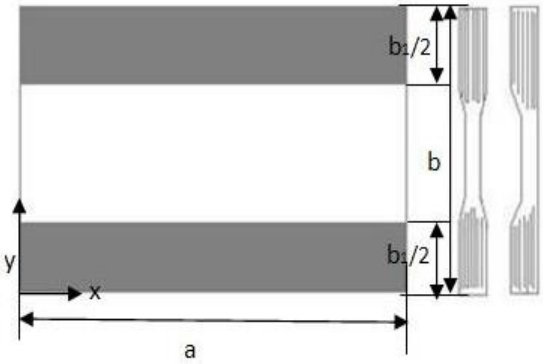
الكلية في اتجاه التحميل الرئيسي تبقى ثابتة دوماً بدون تجزئة على كامل عرض الصفيحة. هذه البرامترات الثلاثة سوف يتم أخذها بعنين الاعتبار أثناء الدراسة.

4- الشروط الحدية:

تختلف نتائج الدراسة حسب نوع الشروط الحدية التي سيتم تطبيقها، في حالة Biggers[**2**] سيتم تثبيت الصفيحة من جميع الاتجاهات ومنعها من الانزياح باتجاه المحور **z** وكذلك بالنسبة للمحور **y** بينما سنعطي الصفيحة انزياح واحدي بالاتجاه **x** من الطرف اليميني، والطرف اليساري ممنوع من الانزياح وفق الاتجاه **x**. وفي حالة Christos Kassapoglou[**3**] سيتم تثبيت الصفيحة من جميع الاتجاهات ومنعها من الانزياح باتجاه المحور **z** وكذلك بالنسبة للمحور **y** بينما نطبق حمل واحدي على طرفي الصفيحة اليميني واليساري بالاتجاه **x**، و النتائج التي يتم مناقشتها على صفيحة مثبتة بشكل بسيط من الجهات الأربع. إن حمل الانحناء الناتج في كل حالة يتم نسبه للصفيحة المنتظمة ذات الطبقات الثمانية مع شروط حدية موافقة لتلك الحالة الخاصة. بناءً على ذلك عندما تقترب النسبة $\bar{b}$ من **1.0** فإن كل نسب الانحناء تقترب من **1.0**.

2- الدراسة الرقمية

يتم حساب أحمال الانحناء في الصفائح المحاكة باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعتمد على العناصر المنتهية. والعنصر المعتمد في الدراسة العددية هو عنصر(eight-node quadrilateral anisotropic shell) قشري متغير الخواص اتجاهياً رباعي العقد(-eight node). تحسب الصلابة للعنصر بالتكامل العددي عبر سماكة الصفيحة متعامدة الخواص، من خلال استخدام ثلاث نقط تكامل لكل طبقة.



الشكل (9): الصفيحة المحاكة المدروسة

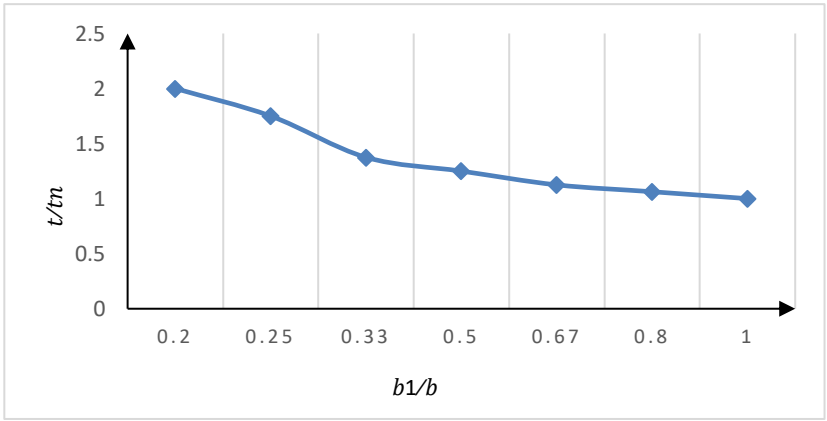
تم تحليل الصفائح وفق قيم البارمترات السابقة الذكر باستخدام ABAQUS ثم قمنا بمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع النتائج التي حصل عليها الباحثان Biggers and Srinivasan تحليليا للصفائح ذات الاستناد البسيط.

النتائج التي حصلنا عليها لتأثير الحياكة على الصفيحة القشرية:

a) قمنا بإيجاد العلاقة البيانية بين نسبة العرض الوسطية $\bar{b}$ و السماكة النسبية $\bar{t} = {t}/{t_{uniform}}$ لكل صفيحة

الجدول (1): العلاقة بين السماكة النسبية للحواف المحاكة والعرض النسبي

العرض النسبي b_1/b	السماكة النسبية للصفيحة t/t_n
1	1
0.8	1.0625
0.67	1.125
0.5	1.25
0.33	1.375
0.25	1.75
0.2	2



الشكل (10): نسب سماكة منطقة الحواف للصفائح المحاكة بالنسبة للصفيحة المنتظمة

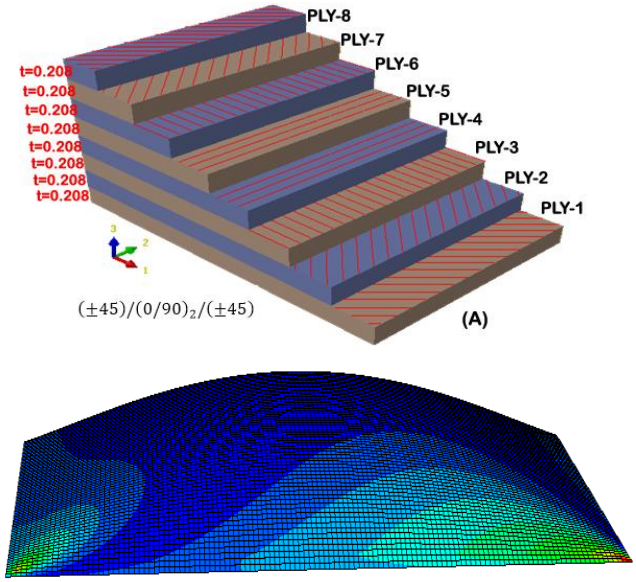
يظهر لدينا زيادة مضطردة في سماكة الحواف مع نقصان قيمة العرض النسبي لهذه الحواف.

b) تم إجراء الاختبار على الصفيحة المنتظمة التي تملك سماكة ثابتة وتحوي **8** ثمان طبقات والتي تم اعتمادها كصفيحة مرجعية لأجل حمل التحنيب النسبي ثم قمنا بإجراء اختبارات على الصفائح ذات التسلسل الطبقي المبين بالجدول **2.**

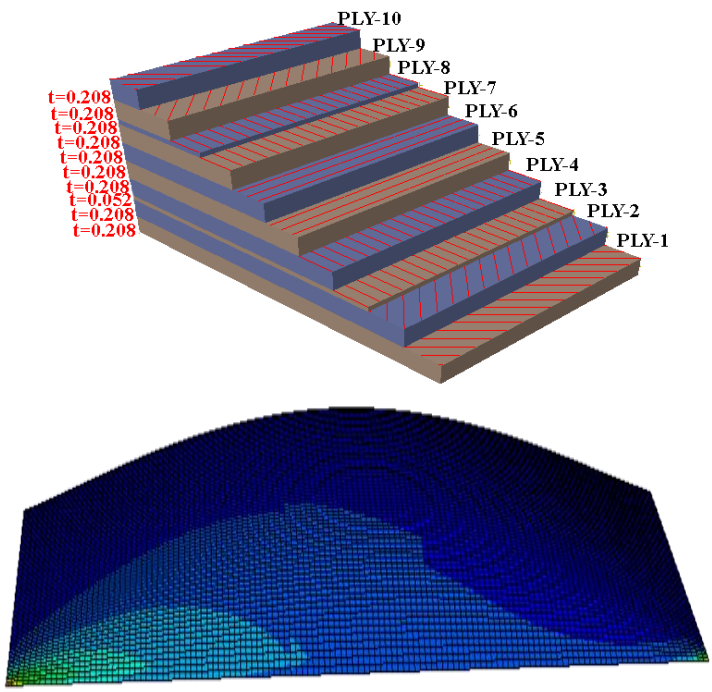
الجدول(2): نتائج الدراسة الرقيمية للصفائح القشرية

الصفيحة	التسلسل الطبقي	نسبة العرض $\bar{b} = {b_1}/{b}$	عدد الطبقات $n = {1}/{\bar{b}}$	الحمل N_x (N/mm^2) وفق ABAQUS	الحمل النسبي $\bar{N}_x = \frac{N_x}{N_{uniform}}$
Baseline	$[\pm 45\ /0\ /90]_s$	1	1	680	1
P_{1st}	$[\pm 45\ /0_{1.25}\ /90]_s$	0.8	1.25	743	1.09
P_{2nd}	$[\pm 45\ /0_{1.5}\ /90]_s$	0.67	1.5	893	1.3
P_{3rd}	$[\pm 45\ /0_{2}\ /90]_s$	0.5	2	1110	1.63
P_{4th}	$[\pm 45\ /0_{3}\ /90]_s$	0.33	3	1403	2.06
P_{5th}	$[\pm 45\ /0_{4}\ /90]_s$	0.25	4	1657	2.44
P_{6th}	$[\pm 45\ /0_{5}\ /90]_s$	0.2	5	1542	2.27

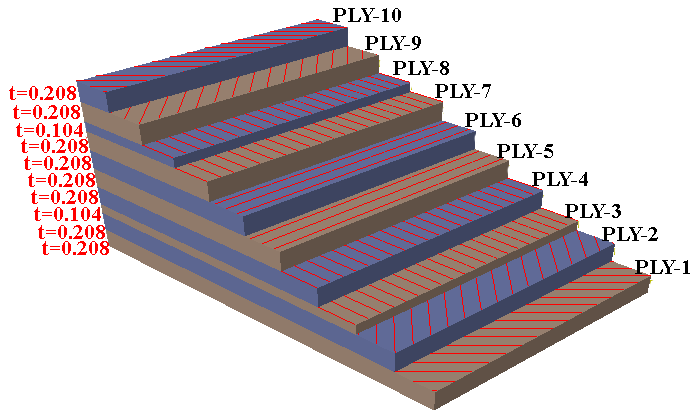
الصفيحة المنتظمة $[\pm 45\ /0\ /90]_s$

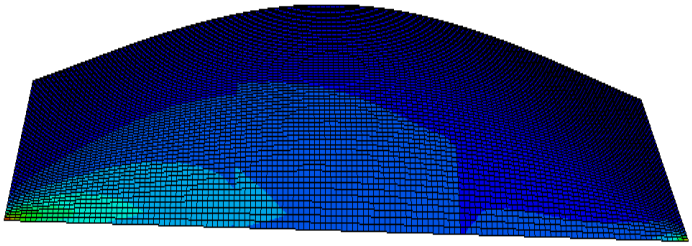


الصفيحة القشرية الأولى $[\pm 45 /0_{1.25} /90]_s$

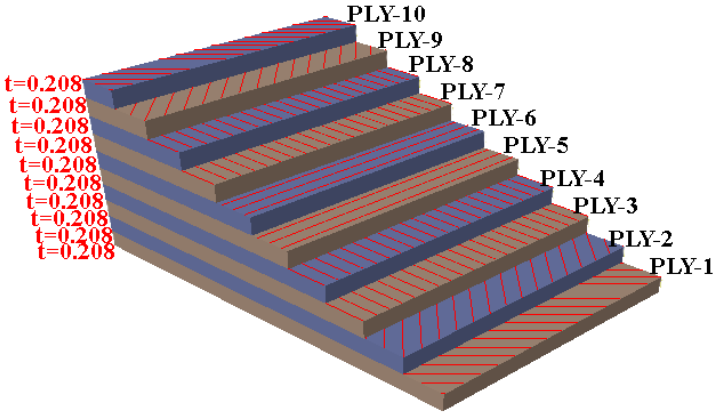


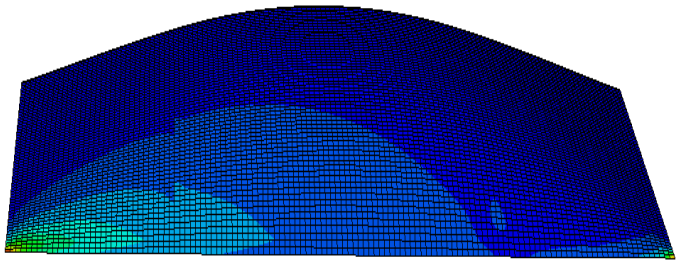
الصفيحة القشرية الثانية $[\pm 45 /0_{1.5} /90]_s$



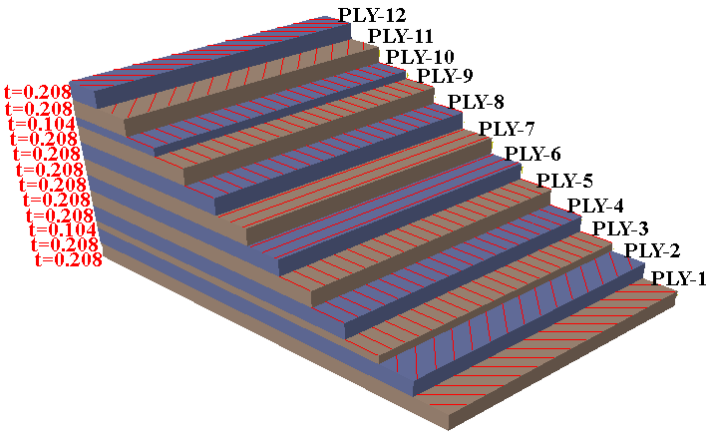


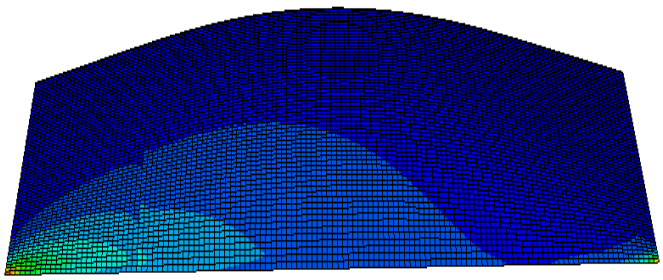
الصفيحة القشرية الثالثة $[\pm 45 /0_2 /90]_s$



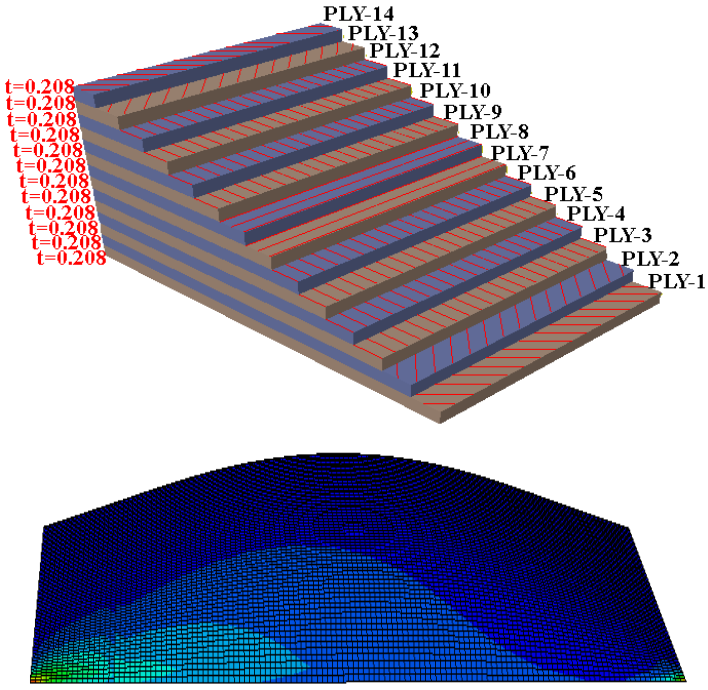


الصفيحة القشرية الرابعة $[\pm 45 /0_3 /90]_s$

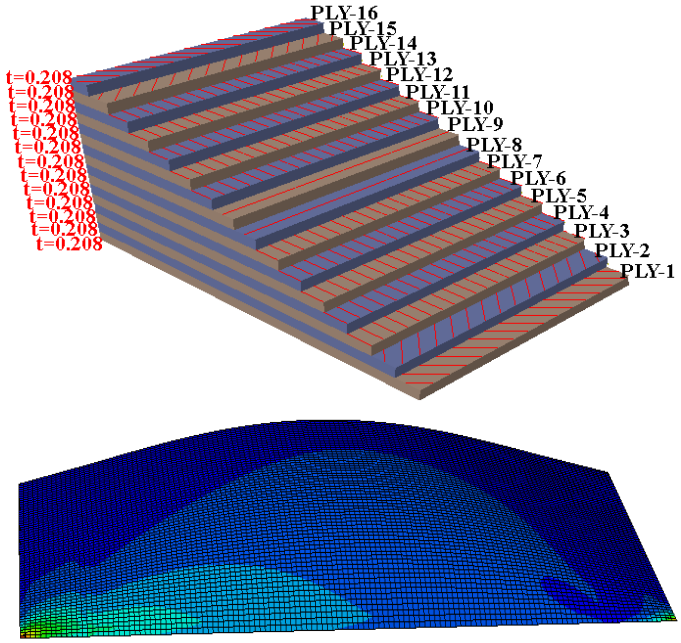




الصفيحة القشرية الخامسة $[\pm 45 /0_4 /90]_s$

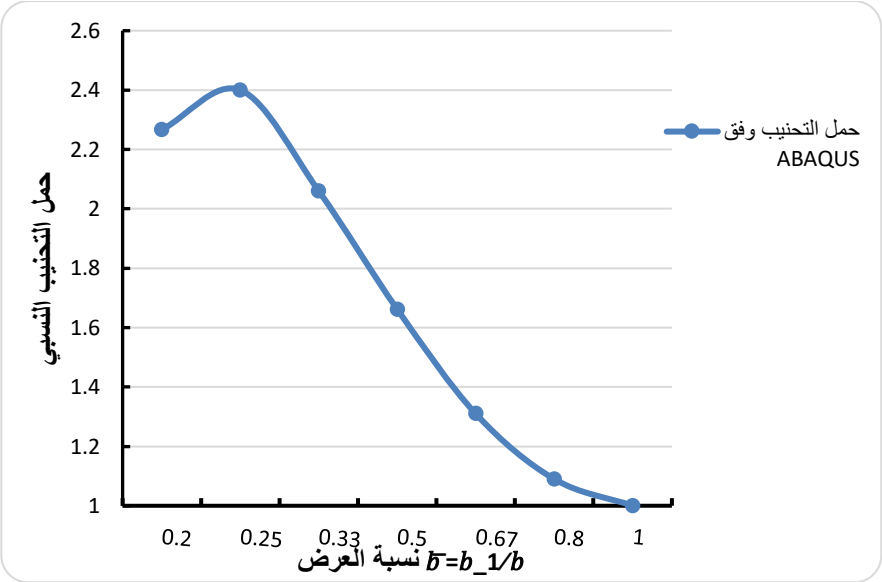


الصفيحة القشرية السادسة $[\pm 45 /0_5 /90]_s$



الشكل(11): نتائج الاختبارات للصفائح المحاكة

الشكل (12): يبين تأثير حياكة الصفائح على حمل التحنيب:



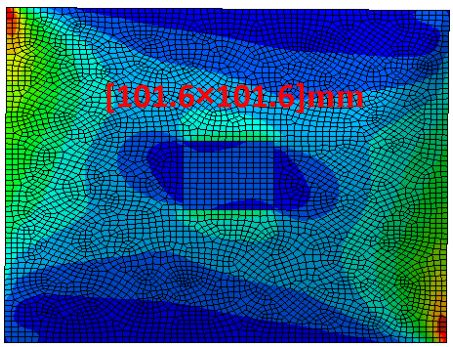
الشكل (12): نتائج الحياكة للصفائح بيانياً

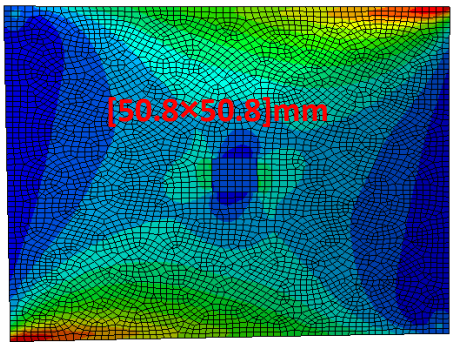
يظهر لدينا من خلال قراءة المخطط ارتفاع قيمة حمل التحنيب كلما زاد عدد الطبقات القشرية ذات التوجيه الصفري أي كلما زادت سماكة الطبقات على الحواف ونلاحظ أن أفضل قيمة لحمل التحنيب توافق قيمة $\bar{b} = 0.25$ أي توزع أفضل للحمل على الحواف السميكة للصفائح التي قمنا باختبارها رقمياً وفق ABAQUS.

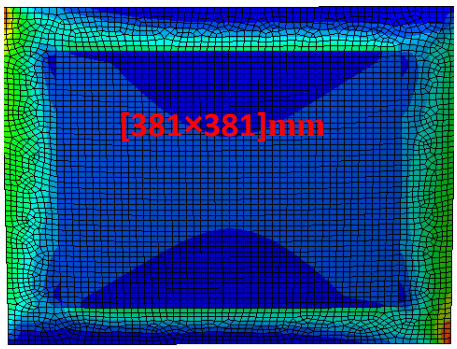
- درسنا سلوك الصفائح وفق Kassapoglou[3] باستخدام قيم البارمترات السابقة الذكر باستخدام ABAQUS ثم قمنا بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع النتائج التي حصل عليها الباحث Kassapoglou[3] باستخدام طريقة Rayleigh–Ritz للصفائح. تعتمد النتائج على دراسة تأثير الحياكة لعدد من الطبقات بأبعاد مختلفة مع تسلسل طبقي ثابت كما شرحنا سابقاً.

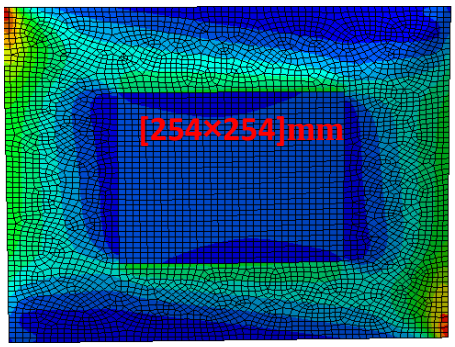
والجدول (3): يبين لنا نتائج الدراسة الرقمية بواسطة ABAQUS

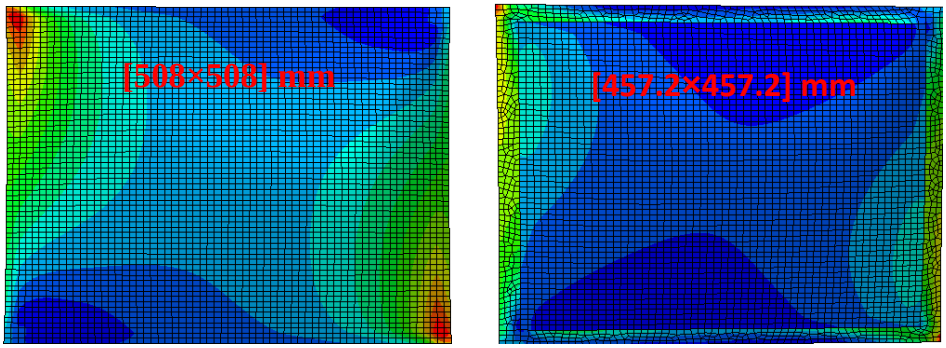
أبعاد الصفيحة المركزية المربعة mm	حساب حمل التحنيب باستخدام **Abaqus** (N/m)
[50.8×50.8]	385
[101.6×101.6]	436.1
[254×254]	693
[381×381]	1739
[457.2×457.2]	6025
[508×508]	10220



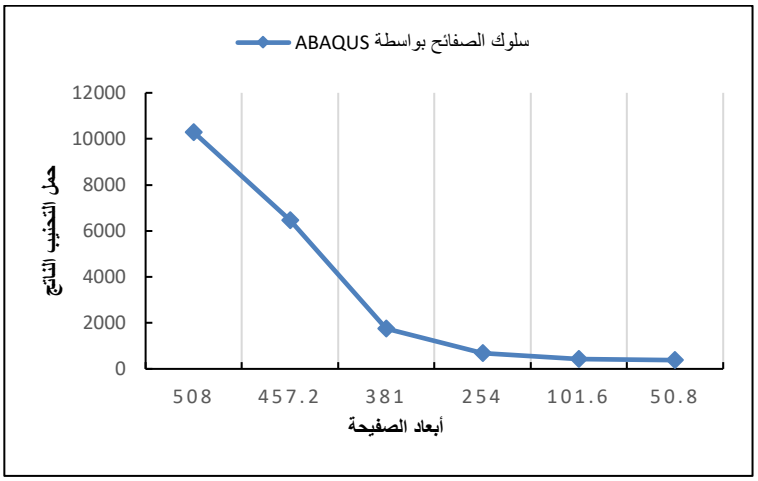








الشكل (13): التحنيب في الصفائح ذات التنضيد الثابت والأبعاد المتغيرة



الشكل (14): نتائج حياكة الصفائح رقميا

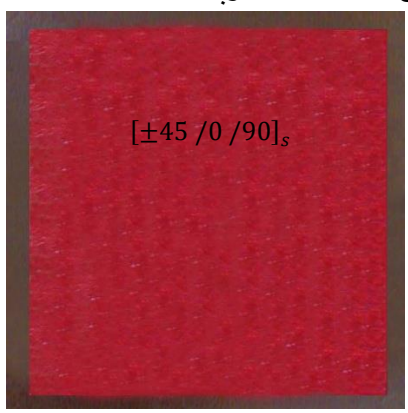
ثالثاً: الاختبار التجريبي:

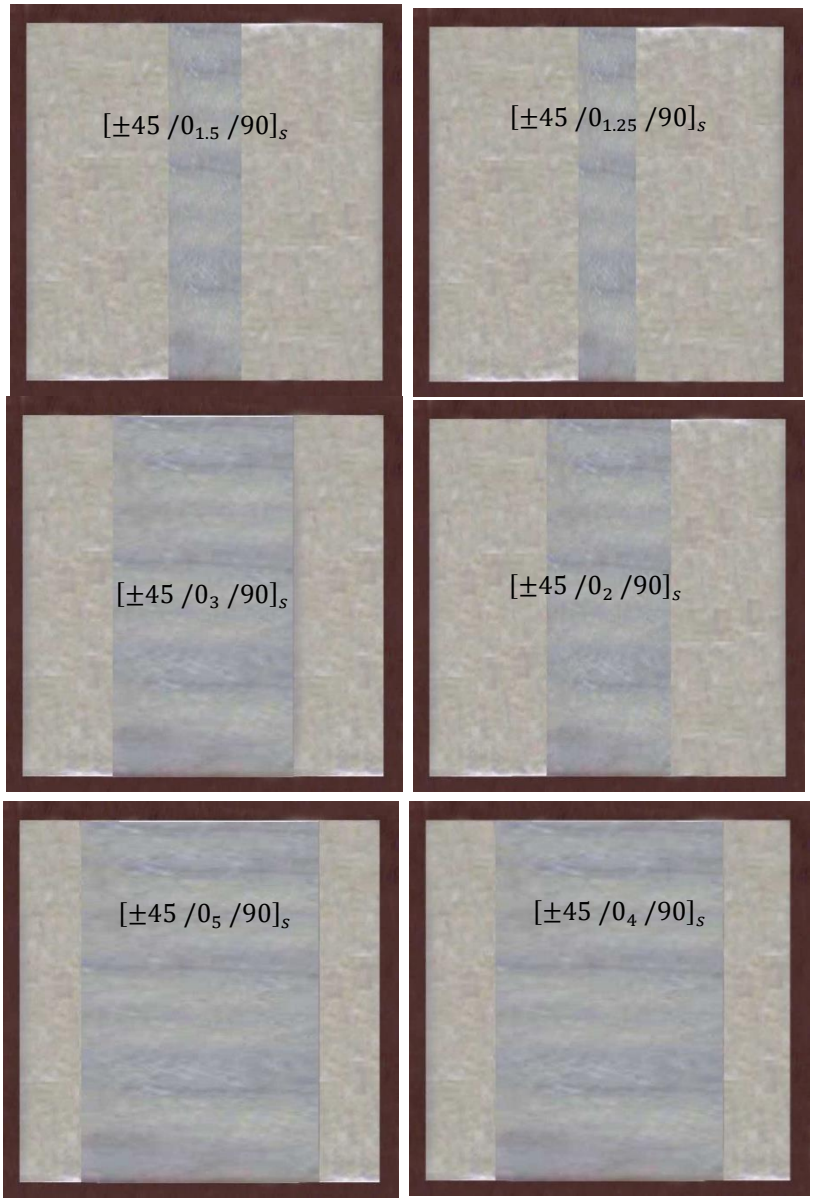
تم إجراء اختبارات تجريبية بتصنيع الصفائح المذكورة أعلاه مخبرياً وفق [2] و [3] مع مراعاة الأبعاد التي اعتمدناها وخواص الألياف المستخدمة والمادة الحاضنة حيث تم تصنيع ثلاث عينات لكل حالة، و استخدمنا مادة الإيبوكسي كمادة حاضنة والألياف الزجاجية كمادة مقوية والجدول(4) يوضح بعض الخواص الفيزيائية والمكانيكية لمادة التسليح والمادة الرابطة:

الجدول (4): خواص الألياف والمادة الرابطة

الخاصة	الواحدة	المادة الحاضنة المبلمرة BMS8-276 material	المادة المقوية(ألياف زجاج)
الكتلة النوعية	g/cm3	1.4	2.6
معامل المرونة على الشد	MPa	4500	25000
المقاومة على الشد	MPa	130	74000

يتم خلط مقدار وزني من الايبوكسي مع كمية من المقسي ويمزج جيداً(أي بنسبة **16**% من المقسي بالنسبة إلى الإيبوكسي). حيث تم إضافة المادة المحفزة مع مادة التقسية وهي كوبالت النفتانات Cobalt Naphthenate والتي تسهم في تسريع التفاعل المؤدي إلى تصلب المادة الرابطة مع الألياف. يتم تصنيع العينة الرئيسية ذات الثمان طبقات بالسماكة المحددة، ويتم وضع إما طبقة عازلة مثل الشمع أو وضع نايلون شفاف لمنع التصاق العينة مع طاولة التحضير وتدهن بطبقة من المادة الرابطة ثم بعد ذلك يتم تصنيع العينات الأخرى ذات السماكات المتدرجة للحواف. يتم وضع النسيج من النوع المراد تصنيع العينة منه فوق الحواف، يتم تحقيق الفراغ بين وسط العينة وسماكات الحواف في العينة الرئيسية بوضع طبقات من النايلون الشفاف بسماكة تتناسب مع سماكة الطبقات الخاصة بالأكتاف لتجنب حدوث انحناء في العينة وتدهن بالمادة الرابطة وتكرر العملية بعدد الطبقات المطلوبة بالنسبة للعينة للوصول إلى السماكة المطلوبة للأكتاف.





الشكل (15): أشكال العينات المصنعة وفق [2]

<u>ملاحظة:</u> بما أن الألياف بشكل عام تكون على شكل نسيج**(0،90)** فإننا نحصل على توجيه**(45±)** بتغيير زاوية توضع طبقة النسيج. كما أنه من أجل الحصول على طبقة بتوجيه مفرد وليكن **0** فقط فإننا نقوم بسحب الألياف ذات التوجيه **90** درجة من النسيج

بحيث يبقى عدد قليل منها في النسيج فيكون الغالب هو توجيه **0** درجة. بعد الانتهاء من وضع طبقات النسيج فوق بعضها تُترك العينة، لتبدأ بالدخول بالطور الجيلاتيني بعد انقضاء **15** دقيقة ثم تتقسى شيئا فشيئا نتركها لتجف تمامًا لمدة **24** ساعة قبل البدء باستخدامها. عند جفاف الصفيحة بالكامل يتم قص عينات الاختبار المطلوب بالأبعاد المطلوبة(وفق المواصفات القياسية الألمانية) (LN 29 971 UD) مع مراعاة الدقة في القص للحصول على حواف مستقيمة ولتجنب عملية تركيز الاجهادات في مكان ما.

اختبار العينات وفق Biggers:

قمنا بإجراء اختبار الضغط وتسجيل النتائج الوسطية لكل صفيحة وفق الجدول**(5)**:

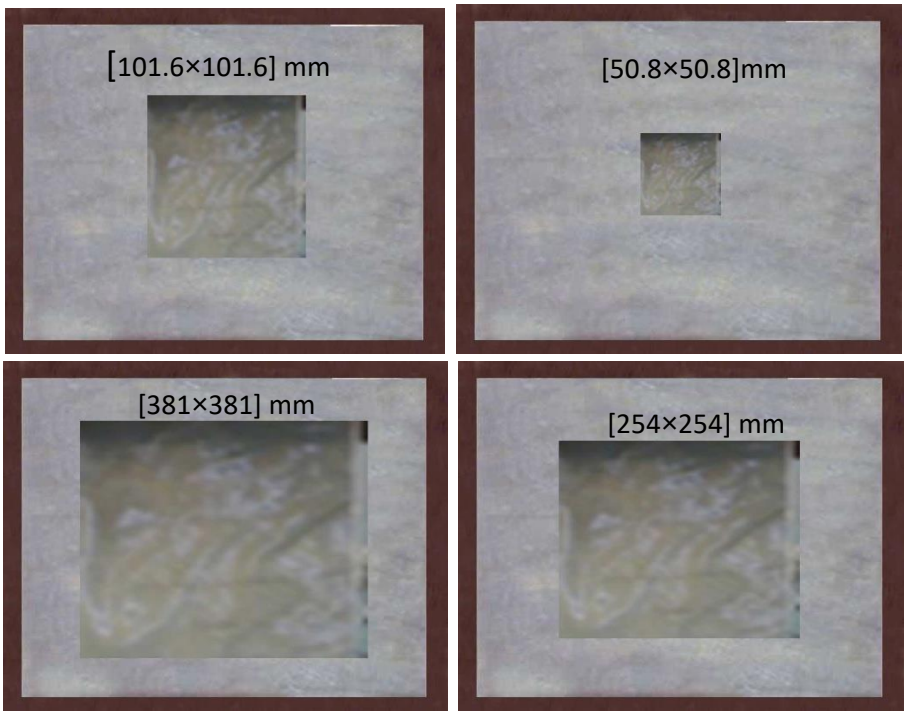
الجدول (5): نتائج الاختبارات التجريبية للعينات المصنعة

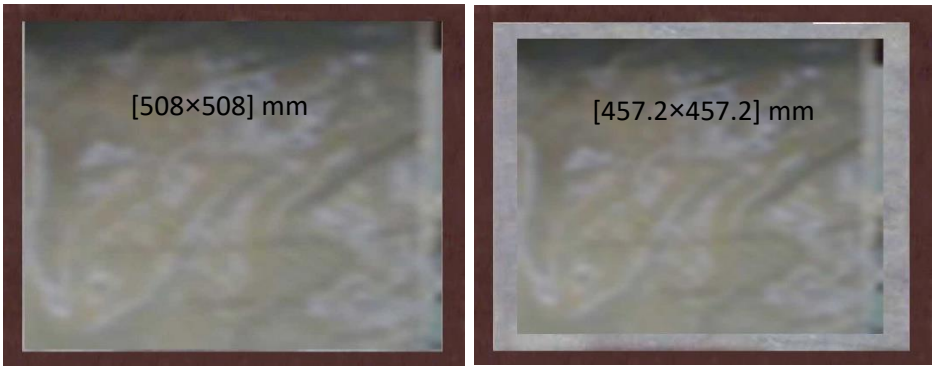
الصفيحة	التسلسل الطبقي	نسبة العرض $\bar{b} = {b_1}/{b}$	عدد الطبقات $n = {1}/{\bar{b}}$	الحمل الناتج (N/mm^2) N_x	الحمل الوسطي الناتج N/mm N_x (^{2})	الحمل النسبي $\bar{N}_x = \frac{N_x}{N_{uniform}}$
BP	$[\pm 45 /0 /90]_s$	1	1	685 675 681	681	1
P_{1st}	$[\pm 45 /0_{1.25} /90]_s$	0.8	1.25	743 746 742	744	1.09
P_{2nd}	$[\pm 45 /0_{1.5} /90]_s$	0.67	1.5	893 890 895	893	1.31
P_{3rd}		0.5	2	1110 1110	1110	1.63

		1108			$[\pm 45/0_2/90]_s$	
2.06	1402	1403 1400 1402	3	0.33	$[\pm 45/0_3/90]_s$	P_{4th}
2.44	1658	1657 1659 1658	4	0.25	$[\pm 45/0_4/90]_s$	P_{5th}
2.262	1541	1542 1540 1541	5	0.2	$[\pm 45/0_5/90]_s$	P_{6th}

اختبار العينات وفق Christos:

كما تم تصنيع واختبار العينات وفق كريستوس **[3]** بالأبعاد المحددة بالجداول السابقة





الشكل (16): أشكال العينات المصنعة وفق[3]

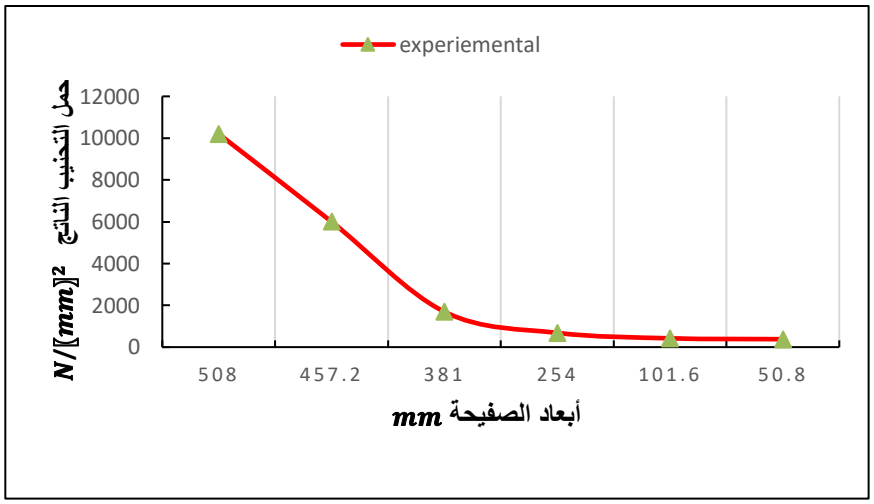
قمنا بإجراء اختبار الضغط وتسجيل النتائج الوسطية لكل صفيحة وفق الجدول(6):

الجدول (6): نتائج اختبار العينات المصنعة

الحمل الوسطي (N/mm^2) N_x الناتج	الحمل N_x (N/mm^2) الناتج	أبعاد الصفائح mm	الصفائح المركزية المدروسة $(\pm45)_5/(0/90)_2/(\pm45)_5$
379	376	[50.8×50.8]	P_{1st}
	380		
	379		
422	410	[101.6×101.6]	P_{2nd}
	430		
	425		
682	678	[254×254]	P_{3rd}
	780		
	689		
1693	1670	[381×381]	P_{4th}
	1705		
	1703		

6002	6005	[457.2×457.2]	P_{5th}
	6003		
	5997		
10202	10210	[508×508]	P_{6th}
	10190		
	10205		

يبين الشكل **(17)** النتائج التي حصلنا عليها من خلال الاختبارات السابقة



الشكل (17): نتائج حياكة الصفائح تجريبياً[3]

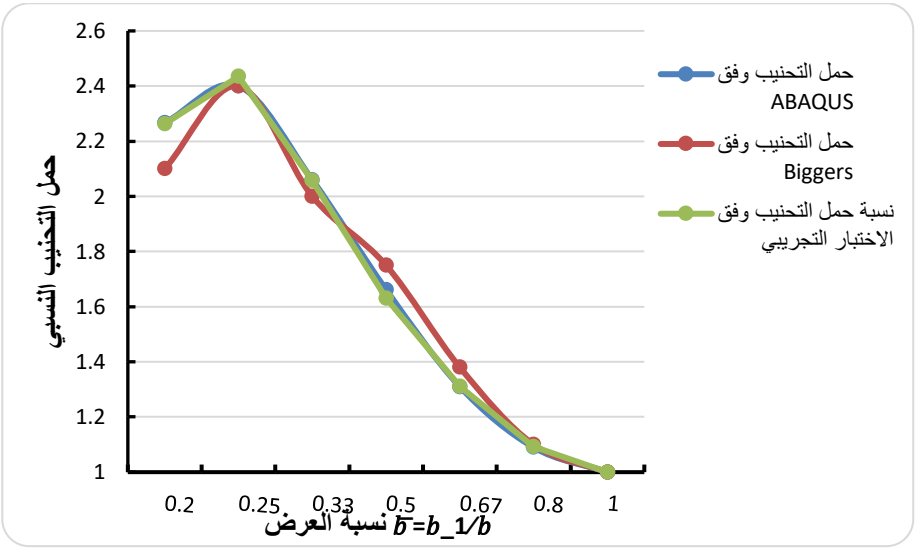
رابعاً مقارنة النتائج:

1- مقارنة النتائج التي حصلنا عليها وفق Biggers رقميا وتجريبياً

الجدول (7): الفروقات بين الدراسات الثلاث التجريبية والدراسة وفق ABAQUS والدراسة المرجعية وفق Biggers

الصفيحة	التسلسل الطبقي	الحمل(N/mm^2) N_x وفق Biggers	الحمل(N/mm^2) N_x الناتج عن الاختبار التجريبي	الحمل(N/mm^2) N_x وفق ABAQUS	الفرق بين Biggers وطريقة ABAQUS %	الفرق بين الاختبار التجريبي وطريقة ABAQUS%
BP	$[\pm 45/0/90]_s$	680	681	680	%0	0.15%
P_{1st}	$[\pm 45/0_{1.25}/90]_s$	748	744	743	−0.672%	-0.54%
P_{2nd}	$[\pm 45/0_{1.5}/90]_s$	918	893	893	−2.8%	−2.8%
P_{3rd}	$[\pm 45/0_2/90]_s$	1169.6	1110	1110	−5.37%	-5.37%
P_{4th}	$[\pm 45/0_3/90]_s$	1496	1402	1403	−6.63%	-6.7%
P_{5th}	$[\pm 45/0_4/90]_s$	1632	1658	1657	0.0009%	0.0009%
P_{6th}	$[\pm 45/0_5/90]_s$	1564	1541	1542	−1.43%	-1.5%

الشكل(18) المخطط التالي يبين مقارنة بين الدراسة الرقمية ABAQUS والدراسة التجريبية والدراسة التي قام بها **Biggers**

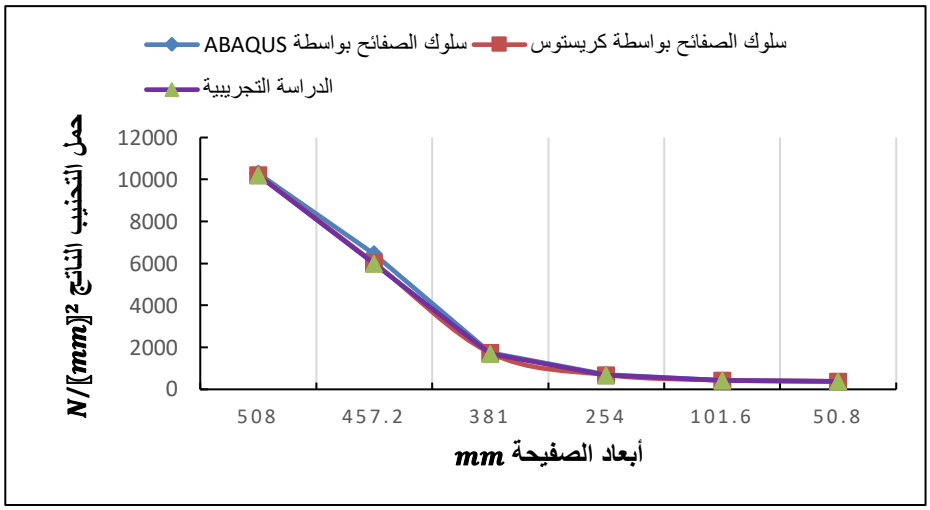


الشكل (18): المقارنة بين الدراسات الثلاث

1- مقارنة النتائج التي حصلنا عليها وفق Christos رقميا وتجريبياً:

الجدول(8) الفروقات بين الدراسات الثلاث التجريبية والدراسة وفق ABAQUS والدراسة المرجعية وفق Christos

أبعاد الصفيحة المركزية المربعة mm	الحمل باستخدام Abaqus(N/m)	الحمل باستخدام Rayleigh–Ritz	الحمل باستخدام الدراسة التجريبية	الفرق بين الطريقتين%
[50.8×50.8]	385	379.8	379	1.35+
[101.6×101.6]	436.1	424.6	422	2.64+
[254×254]	693	693.3	682	0.04-
[381×381]	1739	1748.1	1693	0.52-
[457.2×457.2]	6025	6459.2	6002	7.21-
[508×508]	10220	10288	10202	0.67-



الشكل (19): المقارنة بيانياً حسب مواصفات التي اعتمدها[3]

تبين لدينا من خلال المخططات الثلاث وجود تقارب في القيم، وكذلك هناك بعض الاختلاف بالنسبة للاختبارات التجريبية ويعود السبب إلى ظروف التصنيع التي تمت بالنسبة للعينات ووجود بعض العيوب البسيطة كانفصال في بعض الطبقات خصوصاً في المنطقة الانتقالية لتغيّر السماكة.

نلاحظ من خلال النتائج وجود تطابق في بعض النقاط بين الطرق الثلاث، إن الاختلاف بين القيم غير ظاهر في حالة أن الصفيحة المركزية صغيرة جداً أو عندما تشكل جزء كبير من الصفيحة الرئيسية، إن أكبر فرق بين الطريقتين هو **7.21%**.

3- النتائج والمناقشة:

1- أظهرت الدراسات في هذا البحث وجود طرق متعددة لحياكة الصلابة البسيطة لأجل تحسين حمل التحنيب من خلال تغيير سماكة بإضافة طبقات بتوجيه **0** درجة، وهذا ما أدى لزيادة في الحمل بنسبة تفوق **200%** مقارنة بالصفيحة الرئيسية.

2- إن نسبة $\bar{b}$ المثالية في دراستنا الموافقة لـ Biggers تتراوح بين **0.25-0.5** وهذا التحسن المقابل يؤدي إلى كبح دوران حواف الصفائح.

3- إن نسبة طول الصفيحة إلى عرضها ليس لها أثر كبير على عملية الحياكة.

4- نلاحظ من خلال مخطط العلاقة بين حمل التحنيب وقيمة العرض الوسطية $\bar{\mathbf{b}}$ أن قيم $\bar{\mathbf{b}}$ أصغر من **0.25** غير مجدية رغم أن قيمة حمل التحنيب النسبي لا زالت مفيدة عند هذا الحد.

5- تبين بالدراسة المستندة لطريقة Christos وجود تحسن واضح في حمل التحنيب بوجود منطقتين مختلفتين على الصفيحة الواحدة المشكلة من المواد المركبة، سواء أكانت المنطقة المركزية لا تصل لحواف الصفيحة الأساسية، أو أنها تغطي كامل الصفيحة الأساسية

6- يمكن من خلال خصائص الصلابة التي حصلنا عليها في هذا النوع من الحياكة أن نستفيد من ذلك في تحليل ودراسة المثبتات على حواف الصفيحة أو في وسط الصفيحة والتنبؤ المسبق بتأثير وجودها على الصفيحة

7- إن حياكة صفائح المواد المركبة بتغيير السماكة أظهر تأثيراً واضحا لتغيّر صلابة الصفائح ويتيح ذلك إمكانية استخدام هذه الخاصية في عمليات التصنيع.

8- بالنسبة لسماكة الصفيحة فقد تم أخذه بعين الاعتبار من خلال برامتر النسبة الهندسية $\bar{b}$ وارتباطها بالقيمة **n** التي تمثل عدد الطبقات الصفرية $n = {}^{1}/_{\bar{b}}$ و التي تؤدي إلى زيادة سماكة الصفيحة.

9- يعود عدم التناظر في نتائج صيغة التحنيب للصفائح إلى تطبيق حمولة من طرف واحد وبالتالي حصول انزياح أقرب لمنطقة تطبيق الحمولة. حيث يظهر في الشكل **13** أن تركيز الإجهادات حصل في المناطق المحيطية البعيدة عن الصفيحة المركزية، وهناك تناظر في توزع تركيز الاجهادات.

4- التوصيات والمقترحات:

1- التوسع في دراسة وتحليل صفائح المواد المركبة تحت تأثير حمولات الشد والضغط وخصوصاً الصفائح المعرضة لعمليات التشغيل بسبب مجال استخدامها الواسع.

2- إجراء دراسات ومقارنات بين وصلات صفائح المواد المركبة التي يتم تشكيلها باستخدام عمليات التشغيل والثقب باستخدام عدة برامترات كسرعة دوران ريشة الثقب وقوة اختراق الريشة للصفيحة، وبين وصلات الصفائح التي يتم تشكيلها أثناء التنضيد والتصنيع.

3- إجراء دراسة لصفائح المواد المركبة السابقة تجريبياً مع اختلاف طرق التصنيع.

المراجع:

[1] D.Dai, M.Fan, Natural**, Fiber Composites, Materials,** Processes and Applications, 2014, Pages 3-65**,** Brunel University, UK**.**

[2] S.Biggers, S. Srinivasan, **Compression Buckling Response of Tailored Rectangular Composite Plates,** AIAA JOURNAL**,** Vol. 31, No. 3, March 1993**,** Clemson University, Clemson, South Carolina 29634**.**

[3] C.Kassapoglou, **Composite plates with two concentric layups under compression,** Composites Consultant, Part A 39 (2008) 104–112, 168 El. Venizelou Street, Kastri, 14671 Athens, Greece**.**

[4] N Efimov-Soini[1], M Kiauka[1] and A Borovkov[1], **The method of RTM process modeling using porous medium,** Materials Science and Engineering, Volume 986, III Quality Management and Reliability of Technical Systems 27-29 August 2020, St Petersburg, Russian Federation**.**

[5] Ward RC. **An extension of the QZ algorithm for solving the generalized matrix eigenvalue problem**. NASA TN D-7305, 1973.

[6] Moler CB, Stewart GW. **An algorithm for generalized matrix eigenvalue problems**. SIAM J Numer Anal 1973;10:241–56.