

## مساهمة في دراسة استقرار طبقات التغطية المعدنية المستوية أو شبه المستوية للعناصر السندويشية ذات نواة من مادة البوليوإيثان /PUR/

الدكتور أكرم صفور\*

جلال عمران\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 23 / 4 / 2014)

### □ ملخص □

يتنوع استخدام العناصر السندويشية في المنشآت الهندسية بتنوع وظائفها وخصائصها الفيزيائية والميكانيكية. من هذه العناصر المستخدمة بكثرة تلك المكونة من ألواح بطبقتي تغطية معدنيتين مستويتين أو شبه مستويتين ونواة من مادة البوليوإيثان. يتطلب إجراء التحليل الإنشائي لمثل هذه العناصر، ودراسة سلوكها توفر معطيات كافية بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمواد مكوناتها، التي ترتبط بالدرجة الأولى بجودة ومواصفات المنتج المحلي لكل بلد. يتم إنتاج مثل هذه الألواح السندويشية في بلدنا بنواة من مادة البوليوإيثان، أيضاً، لتستخدم غالباً كعناصر حاملة من دون توفر قيم التعريف الضرورية بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية لموادها التي تمكننا من تطبيق نظام حساب إنشائي لها وفقاً لنظام التحميل المؤثر عليها، بما يتوافق ومتطلبات النظريات، أو النظم والقوانين الإنشائية المتداولة عالمياً على هذا الصعيد. يتضمن هذا البحث بشكل جوهري إسهاماً مباشراً في التحديد تجريبياً للمواصفات الميكانيكية المتمثلة بشكل خاص بمعاملات مرونة مادة النواة للعناصر المنتجة في بعض مصانعنا المحلية، والاستنتاج بموجب ذلك لمعامل التباين العام بين النظريات التحليلية المرجعية لصيغة إجهاد التجعيد الحرج لطبقة التغطية لمثل هذه العناصر بموجب فرضيات النمذجة المعتمدة للدراسة، حيث تبين لنا أن أغلب هذه الصيغ قد تباينت فيما بينها بالمعامل  $\alpha$  في الصيغة العامة الآتية المتداولة للإجهاد الحرج الحسابي لطبقة التغطية:

$$\sigma_{cr} = \alpha \sqrt[3]{E_f E_c G_c}$$

خلصنا في ختام البحث إلى أهم النتائج والتوصيات التي تم التوصل إليها في هذا الإطار، ومنها، أن العلاقة تبقى خطية بين نظام القوى المطبقة على العينة النظامية أو شبه النظامية والانتقالات المرافقة لها إلى أن يتشكل على الأقل إجهاد التجعيد على طبقة التغطية العلوية المضغوطة، ولقد أمكن بموجب ذلك تحديد الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمواد العنصر السندويشي، واشتقاق قيمة المعامل  $\alpha$  وتحديد قيمة إجهاد التجعيد لمثل هذه العناصر المنتجة محلياً، الذي تبين أنها مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بجودة إنتاج العنصر السندويشي، وطبيعة تأثير التحميل الذي لا بد أن يأخذ في أبحاث لاحقة مدة تأثير هذا التحميل على العينات المجربة.

**الكلمات المفتاحية:** ألواح العناصر السندويشية، طبقة التغطية المستوية، نواة البوليوإيثان، إجهاد التجعيد الحرج.

\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - سورية.

\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - سورية.

## A Contribution to Studying the Stability of Flat and Lightly Profiled Faces of Polyurethane Cored Sandwich Panels

Dr. Akram Sakkour\*  
Jalal Omran\*\*

(Received 4 / 12 / 2013. Accepted 23 / 4 / 2014)

### □ ABSTRACT □

Using Sandwich Panels in Structures varies according to their functions and physical and mechanical properties. Such widely used panels contain two flat (or semi-flat) metallic covers with a core of polyurethane. To perform the structural analysis and study the behavior of such panels, mechanical and physical properties of the components should be available. Availability of these properties basically depends on the local production quality of each country. In our country, such sandwich panels are produced with a core of polyurethane to be used as bearing elements, where the basic data of their physical and mechanical properties help us to apply a defined structural analysis method according to the applied load that is compatible with theories and structural laws. Accordingly, this research basically includes a direct contribution to the experimental definition of these mechanical properties demonstrated by elasticity modulus of the core material for panels produced by some local factories, and then to the conclusion of the variance general coefficient between the referential analytical theories of the cover critical wrinkling stress formula according to the accredited modeling assumptions of this study. We found that most of these formulas varied in the coefficient  $\alpha$  in the following common general formula for the cover mathematical critical stress:

$$\sigma_{cr} = \alpha \sqrt[3]{E_f E_c G_c}$$

At the end of the research, we include the most important results and recommendations in this area of study. One of them is that the relationship between the forces applied on the regular or semi-regular samples and on the accompanying displacements remains linear till the upper pressed cover reaches, at least, the wrinkling pressure. Accordingly, we can specify the mechanical and physical properties of the sandwich panel, derive the value of modulus  $\alpha$  and determine the value of the wrinkling pressure for such local products. It is indicated that these results are intimately correlated with the production quality of the sandwich panel and the nature of the loading effect, which should consider the loading duration in prospective research.

**Keywords:** Sandwich Panels, Flat Cover, Polyurethane Core, Critical Wrinkling Stress.

---

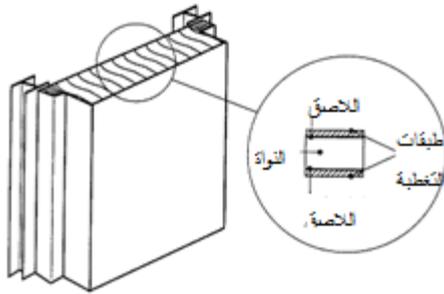
\*Associate Professor Structural Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Postgraduate Student, Structural Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

تتعدد المتطلبات من العناصر الإنشائية لتحقيق الأغراض التكنولوجية والإنشائية المختلفة، الأمر الذي جعل استخدام عناصر متعددة المواد أمراً ملحاً لتلبية هذه المتطلبات المختلفة في كثير من الأحيان. لذلك كان ضرورياً جمع عدة مواد لتكوين عنصر مركب يستثمر في تركيبته الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المميزة للمواد المكونة له، لتلبية الأغراض الوظيفية المتناسبة مع احتياجات الأبنية المتنوعة، والمركبات بأنواعها المختلفة.

جاء الاهتمام منذ عقود خلت بإنتاج ألواح سندويشية بمواد أولية متنوعة، لتلبي بخصائصها الميكانيكية والفيزيائية لمكوناتها المختلفة الاحتياجات الوظيفية والإنشائية المطلوبة.



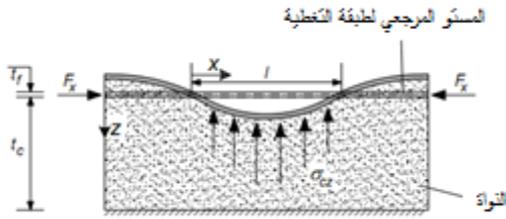
الشكل (1): اللوح السندويشي [1]

من هذه العناصر السندويشية المنتجة بالأطوال المطلوبة كعناصر جاهزة، والمستخدمه بشكل واسع في مجال الهندسة المدنية تلك المؤلفه من طبقتي تغطية معدنيتين لنواة من مادة البوليوريثان polyurethane، كما هو مبين في الشكل (1).

تبين من المراجع الكثيرة المتوفرة ومنها [3]، [4]، [7] أنه أجريت دراسات متعددة تحليلية لاستيعاب السلوك الإنشائي لمثل هذه الألواح السندويشية، والتعبير عنه بصيغ

رياضية مناسبة تساعد على تعيين طاقة التحمل للعناصر الإنشائية المكونة من هذه الألواح. تباينت نتائج هذه الدراسات بتباين حالة النمذجة الإنشائية المعتمدة لمواد مكونات اللوح، وخصائصها، والنظريات التحليلية المستخدمة. أما ضبط نتائج الدراسات النظرية بالدراسات التجريبية على الألواح السندويشية فقد ظل مرهوناً بالتقنيات المتوفرة في البلدان المنتجة لها. لذا كان من الأهمية بمكان، دوماً، ضرورة التحري التجريبي محلياً عن الخصائص المتوفرة في المواد المكون منها اللوح وتقنيات إنتاجه.

انطلاقاً من أهمية إجراء هذه الأبحاث التجريبية لتحديد الخصائص العملية ميكانيكياً وفيزيائياً وضبط معايير تقويم السلوك الإنشائي للعناصر السندويشية المسلم بها نظرياً بموجب الدراسات المرجعية المتوفرة، فقد أجرينا بحثاً تجريبياً على منتجاتنا المحلية من مثل هذه الألواح المحتوية على نواة من مادة البوليوريثان وطبقتي تغطية معدنيتين مستويتين، والتي تستخدم في مجالات الهندسة المدنية وسواها، وذلك لتحديد خصائصها وسلوكها، وإيجاد التجعيد الحرج لطبقتها المضغوطة كأحد أهم أنماط الانهيار لها، الذي شكل خلاصة الدراسات النظرية البحثية المرجعية السابقة كأساس لتقويم طاقة تحمل العنصر الإنشائي المكون من مثل هذه الألواح السندويشية.



الشكل (2): التجعيد الناتج عن تعرض طبقة التغطية لقوة ضغط [4]

بنت الكثير من الأبحاث المرجعية دراستها لإجهاد التجعيد على اعتبار نواة اللوح السندويشي وسطاً مرناً لاستناد طبقتي التغطية [4]، كما يبينه الشكل (2)، حيث يعرف هذا التجعيد بأنه تعرج محلي على شكل أمواج قصيرة الطول وظاهرة. ينتج عنها خضوع طبقة التغطية للوح العنصر السندويشي لإجهادات ضغط ناتجة عن تأثير عزوم انعطاف على اللوح.

أهملت بعض الأبحاث تأثير التشوهات الناتجة عن القص في النواة كاستناد مرن لطبقة التغطية، التي تم نمذجتها من خلال نوابض مرنة متوازية بموجب طريقة Winkler [5]، [7]. افترضت هذه النظرية وجود معامل مرونة للنواة  $E_c$  متعامد مع صفيحة طبقة التغطية، بينما أهملت تأثير الصلابة على القص، أي عدّ  $G_c = 0$ ، فأهمل تأثير الانتقال الناتج عن القص، وعدّ اللوح السندويشي جائزاً مستنداً بشكل مرّن على نواته، حيث تكون الإجهادات في هذه النوابض (النواة)  $\sigma_{cz}$  المتعامدة مع اتجاه التشوه الحاصل في صفيحة طبقة التغطية، كما يتبين ذلك في الشكل (2). ترتبط هذه الإجهادات بالانتقالات المرافقة بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_{cz} = D_f \frac{d^4 w_f}{dx^4} + F_x \frac{d^2 w_f}{dx^2} \quad (1)$$

$F$ : دالة طبقة التغطية.

$c$ : دالة النواة.

$w_f$ : الانتقال لصفيحة طبقة التغطية.

$D_f$ : الصلابة على الانحناء لوحدة عرض صفيحة طبقة التغطية لوحدها.

$F_x$ : قوة الضغط المطبقة على وحدة عرض صفيحة طبقة التغطية (محصلة إجهادات الضغط المؤثرة على وحدة عرض طبقة التغطية).

$\sigma_{cz}$ : الإجهاد الناتج عن رد فعل النواة المرافق للتشوه الحاصل فيها نتيجة الانضغاط على اعتبار أن عرض الشريحة في الاتجاه المتعامد مع اتجاه القوة هو وحدة الطول.

نتجت قوة التجعيد في هذه الحالة بقبول انتقال جيبّي للطبقة إلى:

$$F_{Winkler} = 0.577 \sqrt{\frac{E_f t_f E_c}{t_c (1 - \nu_f^2)}}$$

أخذت بعض الدراسات التحليلية للعديد من العلماء والباحثين في نمذجتها لنواة اللوح كوسط مستمر نصف مرّن تأثير القص على سلوك اللوح كجائز بسيط، أو كصفيحة كبيرة العرض، حيث ارتبطت قيمة إجهاد التجعيد ارتباطاً مباشراً بمعامل مرونة النواة القصي  $G_c$ . لذلك بيّن Chong، مثلاً، إلى أن إجهاد التجعيد لطبقة التغطية يأخذ الصيغتين الآتيتين [1]:

$$\sigma_{wr} = 0.823(E_f E_c G_c)^{1/3} \dots\dots\dots(half Space) \text{ (نصف مجال مرّن)} \quad (2)$$

$$\sigma_{wr} = 0.852(E_f E_c G_c)^{1/3} \dots\dots\dots(Simplified) \text{ (استناد بسيط)} \quad (3)$$

تبيّن من دراستنا لأعمال الكثير من العلماء والباحثين للتعبير عن صيغة إجهاد التجعيد في طبقة التغطية للوح السندويشي، أن هذه الصيغ قد تباينت في جُلّها بالثابت المضروب بالجذر التكعيبي لجداء الخصائص الميكانيكية لمواد

الوح  $E_f E_c G_c$ ، حيث ارتبط هذا التباين بنمذجة الوسط المرن للنواة، وتابع الانتقال لطبقة التغطية كتابع جيبي، أو سلسلة جيب مضاعفة، وبالطريقة المعتمدة في التحليل للحصول على هذه الصيغ، والتي يبين بعضها الجدول (1) الآتي:

الجدول (1): صيغ إجهادات تجعيد طبقة التغطية المستنتجة من قبل بعض العلماء والباحثين:

العلاقة	طريقة الاشتقاق	النظرية
$\sigma_{wr} = 0.823(E_f E_c G_c)^{1/3}$ .....(half – Space) $\sigma_{wr} = 0.852(E_f E_c G_c)^{1/3}$ .....(Simplified)	الطاقة	Chong – HartSock [1]
$\sigma_{cr} = 0.91\sqrt[3]{E_f E_c G_c}$	الطاقة	Hoff–Meitner [3]
$\sigma_{cr} = 0.85\sqrt[3]{E_f E_c G_c}$	الطاقة	Plantema [4]
$\sigma_{cr} = 0.825 (E_f E_c G_c)^{1/3}$	التحليلية	Timoshenko [4]
$\sigma_{cr} = 0.78\sqrt[3]{E_f E_c G_c}$	التحليلية	Allen [4]
$\sigma_{cr} = 0.96(E_f E_c G_c)^{1/3}$	التحليلية	Yusuff [4]

يستنتج من الجدول أنه يمكن احتواء الاختلاف بين هذه الصيغ بالصيغة العامة لإجهاد التجعيد الآتية:

$$\sigma_{cr} = \alpha(E_f E_c G_c)^{1/3} \quad (4)$$

حيث تقترب قيمة المعامل  $\alpha$  من القيمة العملية أكثر كلما قاربت النمذجة التحليلية السلوك الحقيقي للوح السندويشي.

لقد أثبتت الدراسات التجريبية للمعايرة الحقيقية لسلوك اللوح السندويشي أن إجهاد التجعيد يرتبط إلى حد بعيد بمادة النواة، وبنيتها، وكثافتها، وجودة التصاقها بطبقة التغطية، ودرجة حرارة الوسط المحيط، وتقنية الإنتاج، ودرجة استواء طبقة التغطية، وزمن تأثير التحميل [2]، [3]. ينعكس تأثير ذلك على قيمة المعامل  $\alpha$  في صيغ إجهاد التجعيد التحليلية. من هنا جاء الاهتمام بإجراء أبحاث تجريبية خاصة بمنتجات كل بلد من أصناف الألواح السندويشية.

هدفنا من خلال عملٍ بحثي قمنا به تجريبياً إلى التعريف بأهم الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لما ينتج في بلدنا من مثل هذه الألواح المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين لنواة من البولوريثان وفق نظم الاختبار البحثية العالمية، واشتقاق قيمة المعامل  $\alpha$  في صيغة إجهاد التجعيد الحرج نتيجة التحميل المباشر للعينات المختبرة بدرجة حرارة المخبر.

### أهمية البحث وأهدافه:

يقوم التحليل التوازني والمستقر لوصف سلوك العناصر والجمال الإنشائية ومكوناتها، كما هو معروف، على أسس ونظريات عامة مبنية على توفر خصائص هندسية وفيزيائية وميكانيكية معينة للمقاطع والمواد المكونة لها. هذا يعني أنّ تحقيق شروط التحليل يمكن أن يتباين باختلاف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، التي يمكن أن ترتبط عملياً ببنية المواد وطريقة إنتاجها.

تُستخدم في بلدنا حالياً عناصر إنشائية مكونة من ألواح سندويشية منتجة محلياً ومؤلفة من طبقتي تغطية معدنيتين مستويتين لحشوة من البوليوثيرتان من دون أن تتوفر بارامترات حقيقية بخصائصها الميكانيكية والفيزيائية لتحديد الإجهاد الحرج لحالة الانهيار الأكثر شيوعاً في هذه العناصر المتمثلة بتجعدها المضغوطة المسبب لانفصالها عن النواة الرابطة بينها نتيجة التحميل العرضي لها، مما يفقد اللوح السندويشي خصائصه المتمثلة بوصفه مقطعاً مركباً يؤدي عملاً مشتركاً لمكوناته، تأتي أهمية هذا البحث ليساهم في توفير معطيات أولية لقاعدة البيانات الأساسية للمنتج المحلي اللازمة لضبط معايير التصميم الإنشائي للعناصر الإنشائية المكونة منه، الذي يمكن استثمار نتائجه في عملية التحليل الإنشائي حيث يورد هذا المنتج.

### طرائق البحث ومواده:

بنيت طرائق إجراء البحث على وقائع الدراسات المرجعية التحليلية والتجريبية للألواح والعناصر السندويشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين لحشوة من مادة البوليوثيرتان، وشكلت الألواح المماثلة المنتجة لدينا مادة البحث التجريبي لإجراء اختبارات تحديد إجهاد التجعيد والخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمادة النواة.

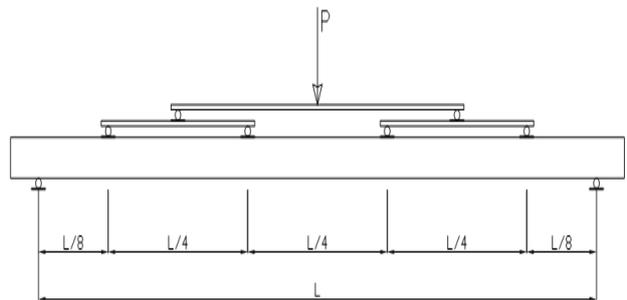
استحضرت لهذا الغرض إلى مخبر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين عينات عشوائية مغلقة من هذه الألواح المنتجة في المعمل الوحيد المنتج لهذه المادة في سوريا - عند إجراء البحث- والموجود في مدينة حلب بطول 2.5 م وبعرض 97 سم. كانت السماكة الكلية للعينة 81 ملم، وسماكة النواة من البوليوثيرتان 80 ملم، أما سماكة كل طبقة تغطية فهي 0.5 ملم، ومصنوعة من الفولاذ ST52 المحدد تجريبياً في مخبر البحث.

أعدّ لإجراء اختبارات إجهاد التجعيد  $\sigma_{cr}$  نظام تحميل ينقل الحمولات الأربعة المركزة المتساوية القيمة لوحدة الطول من خط استناد النظام على عينة اللوح السندويشي ويتباعد متساو بين خطوط الاستناد الأربعة، ليتوافق ذلك مع نظام التحميل المخبري المعتمد في مراكز الأبحاث العالمية الأخرى المتواجدة في دول أمثال كندا، ألمانيا، استراليا [4]، [6]، [7]، كما في الشكل (3a). حيث يتم نقل الحمولة الكلية من جهاز التحميل المخبري المتوفر إلى النظام المعد، ومنه إلى عينة اللوح السندويشي المستندة استناداً بسيطاً على مسندين طرفيين بتباعد 2 م، كما في الشكل (3b).



(b)

b: جهاز التحميل المخبري المعتمد للعينات المجرية في البحث



(a)

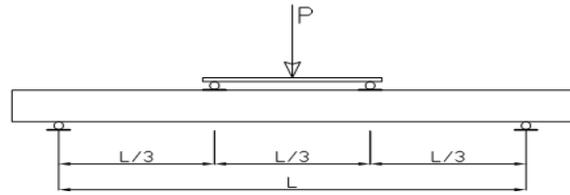
شكل (3): a: نظام التحميل المعتمد في مراكز الأبحاث لتحديد إجهاد التجعيد [6]

كما أُعدَّ لإجراء اختبارات معامل القص العرضاني للنواة  $G_c$  نظام تحميل ينقل حملتين مركزيين متساويتين في القيمة لكل وحدة طول من خط استناد النظام على عينة اللوح السندويشي، وبتباعد وسطي مساوٍ لثلث طول فتحة عينة الاختبار المساوية 1 م، كما في الشكل (4a). حيث يتم نقل الحمولة الكلية من جهاز التحميل المخبري المتوفر هذا النظام المعد، ومنه إلى عينة الاختبار المستندة استناداً بسيطاً على مسندين طرفيين بتباعد 1 م، كما في الشكل (4b).



(b)

b : جهاز التحميل المخبري المعتمد للعينات المجرية في هذا البحث



(a)

شكل (4): a : نظام التحميل المعتمد في مراكز الأبحاث لتحديد معامل القص العرضاني للنواة [6]

أما عينات اختبارات تحديد معامل مرونة النواة فقد جرى تحميلها بجهاز التحميل المخبري حتى الانهيار. تم تقويم سلوك العينات المختبرة من خلال الانتقالات المقاسة بجهاز قياس ملصق إلى العينة المختبرة في وسطها، كما يبينه الشكل (4)، والمراقبة لمراحل تزايد تطبيق التحميل. حُضرت لإجراء البحث:

7- عينات مناسبة لإجراء اختبارات تحديد إجهاد التجعيد لطبقة التغطية على طول فعال مقداره 2 م بين المسندين.

14- عينة بمقطع عرضي 10×8,1 سم وطول فعال مقداره 1 م بين المسندين لإجراء اختبارات تحديد معامل القص العرضاني للنواة.

40- عينة لإجراء اختبارات تحديد معامل مرونة النواة بأبعاد 5×5×8,1 سم وثلاث عينات بأبعاد 10×10×8,1 سم.

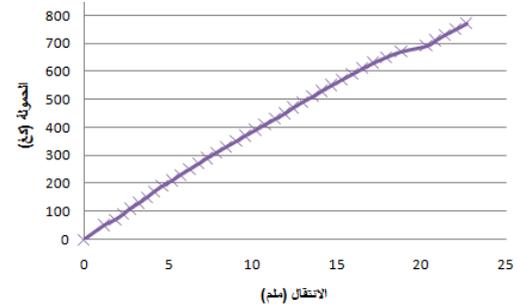
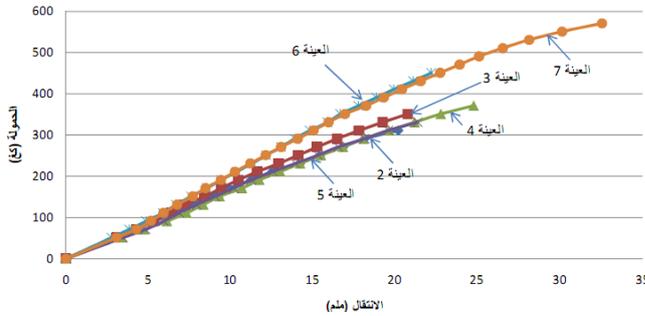
## النتائج والمناقشة:

### 1: اختبارات تحديد قيمة إجهاد التجعيد

لإجراء هذه الاختبارات على العينات السبع طبق تزايد متدرج في الحمولة حتى انهيار العينة، وقيست الانتقالات الأعظمية في وسط العينة المقابلة للحمولات المطبقة. ثم حسب الإجهاد الناظمي المتشكل في طبقتي التغطية عند كل مرحلة من مراحل تزايد الحمولة بموجب العلاقة الآتية، وذلك لصغر دور النواة في مقاومة الإجهادات الناظمية، حيث ينتهي معامل مرونة النواة إلى الصفر مقارنة مع معامل مرونة طبقتي التغطية:

$$\sigma = 40,25 \frac{M}{I} \frac{N.mm}{mm^4} \quad (5)$$

حيث ا : عزم العطالة مقطع العينة حول محور شعاع العزم المتعامد مع مستوي تطبيق التحميل.  
عرضت في الشكل (5) نتائج الاختبارات تخطيطياً لعلاقة الانتقال بالحمولة للعينات المختبرة بمراحل التحميل المختلفة، بينما يبين الجدول (2) الإجهادات المرافقة لمراحل تزايد التحميل على هذه العينات.



b: علاقة الحمولة بالانتقال للعينات 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 و 7

a: علاقة الحمولة بالانتقال للعينة الأولى

شكل (5): علاقة الحمولة بالسهم للعينات المختبرة

الجدول (2): الإجهادات المرافقة لمراحل تزايد التحميل على العينات المختبرة

الإجهاد ( N/mm2 )							الحمولة Kg
العينة 7	العينة 6	العينة 5	العينة 4	العينة 3	العينة 2	العينة 1	
بعرض 297 مم 19.40893	بعرض 295 مم 19.54052	بعرض 170 مم 33.28827	بعرض 170 مم 33.0936	بعرض 174 مم 32.52302	بعرض 158 مم 35.8165	بعرض 470 مم 12.04044	91.11
36.45113	36.69826	62.51735	62.15176	61.08017	67.26551	22.61266	171.11
44.97223	45.27713	77.1319	76.68083	75.35875	82.99001	27.89877	211.11
53.49333	53.856	91.74644	91.20991	89.63732	98.71452	33.18488	251.11
57.75388	58.14543	99.0537	98.47445	96.77661	106.5768	35.82794	271.11
62.01443	62.43487	106.361	105.739	103.9159	114.439	38.47099	291.11
66.27498	66.7243	113.6682	113.0035	111.0552	122.3013	41.11405	311.11
70.53553	71.01374	120.9755	120.2681	118.1945		43.7571	331.11
74.79608	75.30317		127.5326	125.3338		46.40016	351.11
79.05663	79.59261		134.7971			49.04321	371.11
87.57773	88.17148					54.32932	411.11
96.09883	96.75035					59.61544	451.11
100.3594						62.25849	471.11
113.141						70.18766	531.11
121.6621						75.47377	571.11
						96.61821	731.11
						101.9043	771.11
						107.1904	811.11
						109.8335	831.11

تشير القيم المظللة في الجدول (2) إلى القيم التي بدأ عندها ظهور تأثير تشكل تموجات التجعيد لطبقة التغطية العلوية، الذي ترافق مع إصدار العينة لأصوات دالة على تفكك طبقة التغطية عن النواة، إذ أصبح هذا التموج أكثر

وضوحاً ومرئياً مع استمرار زيادة الحمولة إلى أن ثبتت قيمة القوة مؤقتاً مع استمرار تزايد الانتقال وتشكل تشوهات موضعية كبيرة عند نقطة تطبيق الحمولة على العينة مشيرة إلى انهيار العينة تماماً.

يستنتج من المخططات البيانية لعلاقة الانتقال بالحمولة المعطاة في الشكل (5) وقيم الإجهادات في الجدول (2) المرافقة لها أن هذه العلاقة قد بقيت خطية تقريباً إلى أن بدء تشكل أمواج التجعيد في طبقة التغطية عند تراوح الإجهاد المطبق على العينات المختبرة قريباً من 100 Mpa، حيث تلا ذلك الانفصال التدريجي للطبقة عن مادة النواة للوح السندويشي.

لوحظ أن الاضطراب بمقدار  $\pm 4$  Mpa لقيمة إجهاد التجعيد للعينات المختلفة زيادة أو نقصاناً حول القيمة المذكورة قد ارتبط بجودة العينة المجربة، حيث ظهرت عيوب تصنيعية أكثر بشكل خاص في بعض العينات المجربة التي انخفضت



الشكل (6): صورة انهيار العينة رقم 6 نتيجة تأثير

لذلك، يمكن أن يقبل لإجهاد التجعيد الحرج بقايا النايلون على الالتصاق التام.

فيها قيمة هذا الإجهاد إلى حد ما عن القيمة المذكورة، لاسيما لأجل العينة السادسة، مما أدى إلى انهيارها المفاجئ عند بدء تشكل التجعيد في طبقة التغطية ببلوغ الإجهاد فيها حوالي 95 Mpa نتيجة احتواء النواة على بعض الفراغات وبقايا النايلون، بالإضافة لضعف التصاقها بطبقة التغطية، كما يظهره الشكل (6).

لطبقة التغطية القيمة  $\sigma_{cr} = 100 \text{ Mpa}$ .

## 2: اختبارات تحديد معامل القص العرضاني $G_c$

أجريت الاختبارات على العينات الأربع عشرة بتطبيق تزايد متدرج في الحمولة حتى انهيار العينة، وقيست الانتقالات الأعظمية في وسط العينة المقابلة للحمولات المطبقة. ثم حلت الانتقالات المقاسة إلى قسميها الناتجين عن الانعطاف والقص بموجب العلاقة الآتية [5]:

$$w = \frac{23Fl^3}{648D} + \frac{Fl}{3V} \quad (6)$$

يمثل الحد الأول من الطرف اليميني للعلاقة الانتقال الناتج عن الانعطاف بإهمال صلابة الانعطاف للنواة، بينما يعبر الحد الثاني عن الانتقال بتأثير قوة القص على مادة النواة فقط نتيجة إهمال صلابة القص لطبقتي التغطية، بحيث يقبل توزع ثابت لإجهاد القص على سماكة النواة نتيجة إهمال الإجهادات الناطمية التي يمكن أن تؤثر ضمن طبقة النواة.

تعني الرموز في العلاقة (6) الآتي:

$$w : \text{الانتقال الحاصل} . V = b.d.G_c : \text{صلابة القص} . D = E \frac{b t_c (d')^2}{2} : \text{صلابة الانعطاف} .$$

$$b : \text{عرض العينة} . d : \text{ارتفاع العينة} . t_c : \text{سماكة طبقة التغطية} .$$

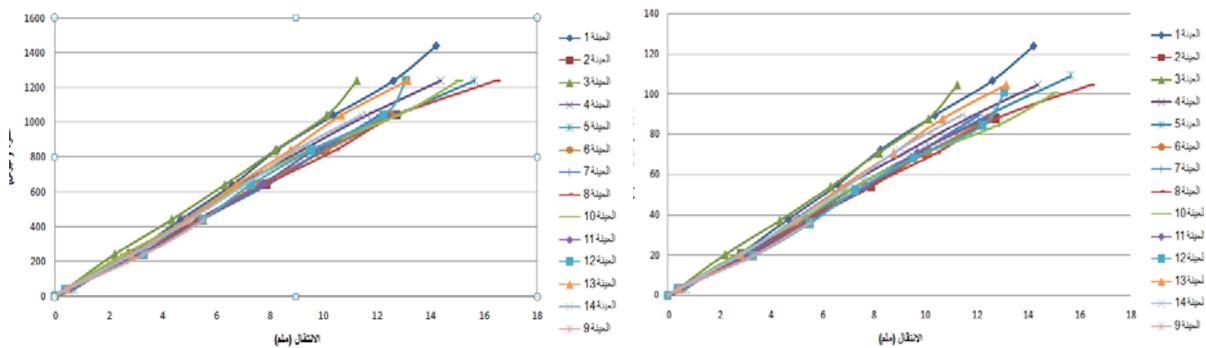
$d'$  : الارتفاع من منتصف طبقة التغطية العلوية إلى منتصف طبقة التغطية السفلية.

$F$ : القوة المطبقة حيث أن  $F = \frac{P}{2}$ .  $l$ : طول العينة.  $G_c$ : معامل القص العرضاني للنواة.

يمثل معامل القص العرضاني للنواة  $G_c$  المجهول الوحيد في المعادلة (6)، الذي تستنتج صيغته من إصلاح العلاقة (6) إلى الشكل:

$$G_c = \frac{6 D}{b d l^2 \left( \frac{18 w D}{F l^3} - \frac{23}{36} \right)} \quad (7)$$

لقد عرضت في الشكل (7) نتائج الاختبارات تخطيطياً لعلاقة الانتقال بالحمولة، والإجهاد بالانتقال للعينات المختبرة بمراحل التحميل المختلفة، بينما يبين الجدول (3) ملخص النتائج الكاملة التجريبية لقيم معامل القص العرضاني المحسوب بموجب العلاقة (7) المقابل للاجهادات المطبقة بين 20 و 37 Mpa.



b: علاقة القوة (N) بالانتقال (mm)

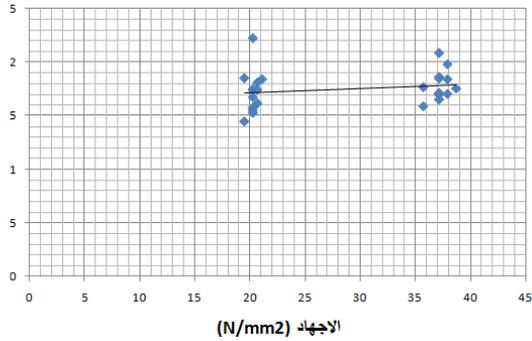
a: علاقة الإجهاد (Mpa) بالانتقال (mm)

الشكل (7): علاقة القوة والإجهاد بالانتقال للعينات الأربع عشرة المجربة

الجدول (3): ملخص نتائج قيم معامل القص العرضاني الموافق للاجهادات المطبقة.

معامل القص العرضاني	الإجهاد المطبق	العينة	معامل القص العرضاني	الإجهاد المطبق	العينة
$N / mm^2$	$N / mm^2$		$N / mm^2$	$N / mm^2$	
1.548	20.25	8	1.811	20.66	1
1.712	37.12		1.982	37.87	
1.852	19.47	9	1.737	20.25	2
1.766	35.69		1.696	37.12	
شاذة وأهملت	شاذة وأهملت	10	2.228	20.25	3
			2.089	37.12	
1.524	20.25	11	1.673	20.25	4
1.650	37.12		1.863	37.12	
1.444	19.47	12	1.842	21.09	5
1.587	35.69		1.754	38.66	

1.750	20.25	13		1.573	20.25	6
1.848	37.12			1.703	37.12	
1.742	20.66	14		1.615	20.66	7
1.841	37.87			1.702	37.88	



الشكل (8): الخط المقارب لعلاقة معامل القص العرضاني بالاجهاد

لقد سمح التمثيل البياني للقيم الجدولية المبينة لعلاقة القص العرضاني  $G_c$  بالإجهاد الناظمي المطبق بتحديد المستقيم المقارب لهذه العلاقة، كما يظهره الشكل (8). يستنتج من مقارنة النتائج أنه يمكن القبول بقيمة للمعامل  $G_c$  مساوية إلى:

$$G_c = 1.75128 \approx 1.75 \text{ N/mm}^2$$

أظهرت أغلب العينات المجربة أن وضوح تشكل تجعيد طبقة التغطية المضغوطة قد ارتبط إلى حدٍ كبيرٍ بالتشوهات، أو الإجهادات الموضعية التي أحدثتها الحمولات المطبقة في مواضع تطبيقها، حيث ازداد هذا التشكل وضوحاً كلما قلت إمكانية القوى المركزة المنقولة على سرعة إحداث التشوهات الموضعية في أماكن تطبيقها على العينات المجربة، والتي ارتبطت على ما يبدو بجودة مادة النواة المصنعة، كما أظهرته الصورة المأخوذة للعيينة رقم (2) المجربة والموضحة في الشكل (9a)، الذي يبين أن التشوهات الموضعية قد تشكلت بشكلٍ أسرع نتيجة وضوح سوء التصنيع.



c: صورة للعيينة رقم (10) توضح انفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحمولة



b: صورة للعيينة رقم (8) توضح انفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحمولة



a: صورة للعيينة رقم (2) تظهر التشوه الموضعي الحاصل عند حدوث الانهيار مع انفصال مادة النواة عن بعضها

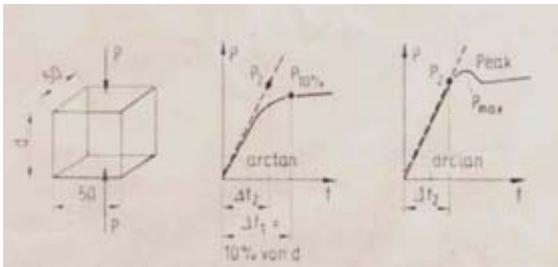
الشكل (9): تأثير عيوب التصنيع على سلوك الألواح السندويشية

كما يوضح الشكل (9b) انفصال طبقة التغطية العلوية في العينة رقم (8) التي تشكلت فيها أمواج التجعيد وانفصالها التام عن نواة الفوم، بينما يبين الشكل (9c) انهيار العينة رقم (10)، الذي تم بانفصال طبقة التغطية العلوية من دون حدوث تشوهات موضعية عند نقطتي تطبيق الحمولة نتيجة جودة النواة وعدم الالتصاق التام بين المادتين.

علماً أننا نشير، أيضاً، إلى أنّ العينة رقم (10) المستثناة نتائجها من البيانات المذكورة قد انهارت بشكل مفاجئ عند قيمة منخفضة كثيراً للقوة المطبقة، إذ انفصلت طبقة التغطية العلوية بشكل كامل عن النواة لعدم الالتصاق التام بينهما، ولوجود بقايا نايلون بين المادتين.

### 3: مقاومة الضغط ومعاملات المرونة لمادة النواة

قبلت في المصادر ذات الصلة قيمة مقاومة الضغط لمادة النواة [6]، بأنها قيمة الذروة لإجهاد الضغط المسجل على العينة المختبرة، أو المقابلة لتشوه مقداره  $\varepsilon = 10\%$  كقيمة مُحدّدة لانتهاؤ مرحلة السلوك المرن، كما يبينه المخطط البياني في الشكل (10)، الذي يمثل العلاقة بين الانتقالات والحمولات المطبقة على العينة المختبرة حتى انهيارها.



الشكل (10): علاقة الانتقالات بالحمولات المطبقة على العينة المختبرة حتى انهيارها [6]

F: الانتقال، p: الحمولة، Peak: الذروة، Pmax: الحمولة الأعظمية

يتضح من هذا المخطط، أنه عند عدم تشكل واضح لقيمة الذروة لحمولة التجريب، فيصطلح أنها القيمة المقابلة لتشوه مقداره 10%. إذ لوحظ أنه نادراً ما تتشكل القيمة الأعظمية للإجهاد قبل بلوغ التشوه  $\varepsilon = 10\%$  في مادة البوليوإيثان المستخدمة في العناصر السندويشية.

يحدد معامل مرونة الضغط بشكل عام بميل المستقيم المعين كعماس لبداية مخطط الإجهاد التشوه للعينة المجربة، وهذا يتطابق إلى حد كبير مع القيمة المستنتجة بموجب التغير في المجال المرن لطول

العينة المجربة المحسوب بموجب العلاقة:

$$\Delta l = \frac{P l}{E A} \quad (8)$$

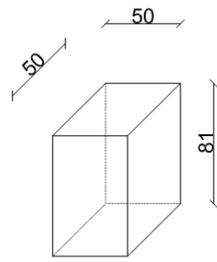
ومنه يستنتج أن معامل المرونة للنواة هو:

$$E_c = \frac{P l}{\Delta l A} = \sigma \frac{l}{\Delta l} \quad (9)$$

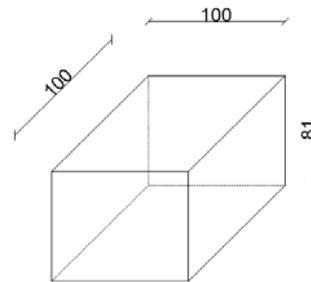
إذا قبلنا بهذا السلوك المرن لمادة النواة ضمن مجال محدد للتحميل، فإنه يمكن استخدام العلاقة المعروفة لمعامل بواسون لتحديد هذا المعامل لمادة النواة، حيث إنّ:

$$\nu = \frac{E_c}{2G_c} - 1 \quad (10)$$

أجرينا لتحديد معاملات المرونة المذكورة، تجارياً على 40 عينة بأبعاد  $8.1 \times 5 \times 5$  سم، وثلاث عينات بأبعاد  $8.1 \times 10 \times 10$  سم.



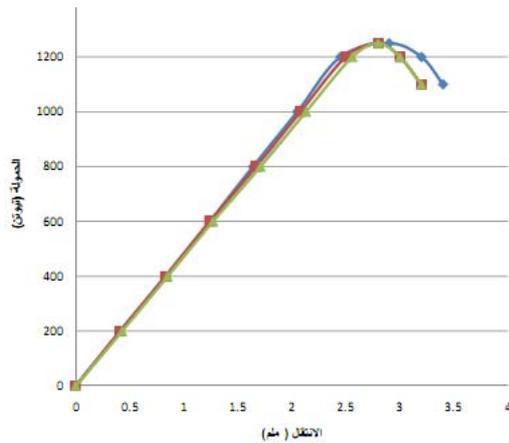
b: عينة بأبعاد  $8.1 \times 5 \times 5$  سم



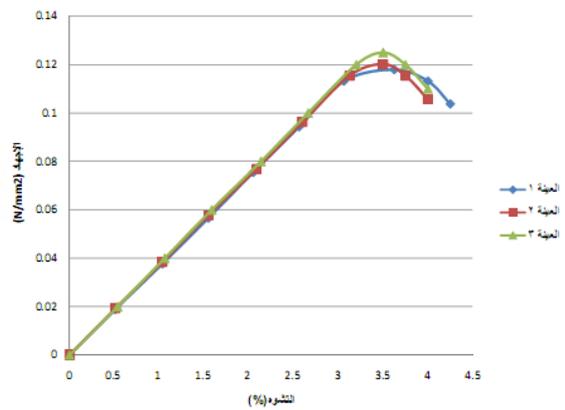
a: عينة بأبعاد  $8.1 \times 10 \times 10$  سم

الشكل (11): نماذج العينات المختبرة لتحديد معامل مرونة النواة

تبين من النتائج التي تم الحصول عليها لعينات الاختبار بأبعاد  $8.1 \times 5 \times 5$  سم أنها متوافقة إلى حد كبير مع تلك الناتجة عن اختبار العينات من النمط الثاني. لذلك اقتصرنا في عرضنا للنتائج وتقويمها على تلك المرتبطة بالعينات الثلاث المختبرة بأبعاد  $8.1 \times 10 \times 10$  سم، التي مكنت من إجراء قراءة أوضح لنتائج الاختبارات، حيث مثلت النتائج تخطيطياً في الشكل (11) الذي يظهر علاقة الانتقال بالحمولة، والتشوه بالإجهاد لنتائج اختبار هذه العينات الثلاث المدونة في الجدول (4).



b: علاقة الحمولة (N) بالانتقال (mm)



a: علاقة التشوه بالإجهاد (Mpa)

الشكل (12): مخططات بيانية للقوة- انتقال، والتشوه- إجهاد للعينات المختبرة

الجدول (4): نتائج اختبار العينات بأبعاد  $8.1 \times 10 \times 10$  سم

معامل مرونة النواة	التشوه	الإجهاد	الانتقال	القوة	سماكة النواة	الأبعاد			العينة
						الارتفاع	العرض	الطول	
$N/mm^2$	%	$N/mm^2$	mm	N	mm	mm	mm	mm	1
0	0	0	0	0	80	81	106	100	
3.682	0.5125	0.019	0.41	200	80	81	106	100	
3.637	1.0375	0.038	0.83	400	80	81	106	100	
3.652	1.55	0.057	1.24	600	80	81	106	100	

3.682	2.05	0.076	1.64	800	80	81	106	100	2
3.682	2.5625	0.094	2.05	1000	80	81	106	100	
3.697	3.0625	0.113	2.45	1200	80	81	106	100	
0	0	0	0	0	80	81	104	100	
3.752	0.5125	0.019	0.41	200	80	81	104	100	
3.707	1.0375	0.038	0.83	400	80	81	104	100	
3.722	1.55	0.058	1.24	600	80	81	104	100	
3.685	2.0875	0.077	1.67	800	80	81	104	100	
3.698	2.6	0.096	2.08	1000	80	81	104	100	
3.692	3.125	0.115	2.5	1200	80	81	104	100	
0	0	0	0	0	80	81	100	100	3
3.721	0.5375	0.02	0.43	200	80	81	100	100	
3.765	1.0625	0.04	0.85	400	80	81	100	100	
3.780	1.5875	0.06	1.27	600	80	81	100	100	
3.743	2.1375	0.08	1.71	800	80	81	100	100	
3.756	2.6625	0.1	2.13	1000	80	81	100	100	
3.750	3.2	0.12	2.56	1200	80	81	100	100	

نلاحظ من النتائج الجدولية للعينات المجربة أو المخططات البيانية أن حمولة الذروة، أو بالأحرى إجهاد الذروة قد تشكل في هذه العينات المحلية عند قيمة تشوه أقل بكثير من 10%.

يمكن أن نستنتج من نتائج هذه الاختبارات والمخطط البياني للإجهاد التشوه أن معامل مرونة النواة المثالي هو:

$$E_c = 3.71064 \approx 3.71 N / mm^2$$

وبذلك ينتج معامل التمدد العرضي لبواسون بحسب العلاقة (10)، حيث إن  $G_c = 1.75 Mpa$ ، إلى:

$$\nu_c = 0.059 \approx 0.06$$

نشير هنا إلى أن قيم معاملات المرونة ترتبط ارتباطاً مباشراً بكثافة مادة النواة، حيث تبين لنا مخبرياً أن كثافة النواة هي حوالي  $35 \text{ Kg/m}^3$ .

#### 4: اشتقاق قيمة المعامل $\alpha$ لعلاقة الإجهاد الحرج

وجدنا بحسب العلاقة (4) أن:

$$\sigma_{cr} = \alpha \sqrt[3]{E_c G_c E_f}$$

تنتج من ذلك صيغة المعامل  $\alpha$  إلى:

$$\alpha = \frac{\sigma_{cr}}{\sqrt[3]{E_c G_c E_f}} \quad (11)$$

يبين الجدول (5) نتائج حساب قيمة المعامل  $\alpha$  للعينات السبع المجربة على الانعطاف المبينة في الفقرة (1-4). إذ يمكن الاستنتاج بموجب هذه النتائج، بأن القيمة التجريبية المناسبة للمعامل  $\alpha$  يمكن أن تقبل على أنها

$$\alpha = 0.91 \quad \text{مساوية إلى:}$$

إن القبول بهذه القيمة المذكورة للمعامل  $\alpha$  لا يعني إهمال إمكانية شذوذ سلوك بعض عينات الألواح المستثمرة عن الحالة النظامية، الذي يمكن أن يراعى من خلال عامل أمان يأخذ في الحسبان جميع المؤثرات المذكورة سابقاً على هذا السلوك للعناصر السندويشية المكونة من مثل هذه الألواح.

الجدول (5): قيم المعامل $\alpha$ للعينات المجرية على الانعطاف						
ملاحظات	قيمة المعامل	معامل القص العرضاني للنواة	معامل مرونة النواة	معامل مرونة طبقات التغطية	الإجهاد الحدي	العيينة
	$\alpha$	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
	0.911	1.75	3.71	210000	101	1
	0.911	1.75	3.71	210000	101	2
	0.920	1.75	3.71	210000	102	3
	0.902	1.75	3.71	210000	100	4
	0.929	1.75	3.71	210000	103	5
شاذة بسبب انهيار العينة مباشرة بعد الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي	0.857	1.75	3.71	210000	95	6
	0.938	1.75	3.71	210000	104	7

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

- 1- تتحمل طبقتا التغطية في العناصر السندويشية بنواة من مادة البوليأوريثان إجهادات الانعطاف المتشكلة نتيجة التحميل العرضي، بينما تتحمل النواة إجهادات القص بشكل مباشر.
- 2- تتوقف نهاية السلوك المرن وانهايار هذا النوع من العناصر السندويشية على بلوغ إجهاد الضغط لطبقة التغطية المضغوطة إجهاد التجعيد الحرج  $\sigma_{cr}$  المؤدي إلى تشكل أمواج التجعيد في هذه الطبقة وانفصالها عن النواة.
- 3- بينت النتائج التجريبية أن العلاقة تبقى خطية بين نظام القوى المطبقة على العينة النظامية أو شبه النظامية والانتقالات المرافقة لها إلى أن يتشكل على الأقل إجهاد التجعيد على طبقة التغطية العلوية المضغوطة. الأمر الذي يسمح بحساب الانتقالات في مثل هذه العناصر بموجب العلاقات المعروفة للخط المرن للعناصر الطولية.
- 4- ترتبط قيمة إجهاد التجعيد الحرج  $\sigma_{cr}$  بالخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمواد العنصر السندويشي وطبيعة التحميل المؤثر عليها، حيث تقبل الصيغة العامة  $\sigma_{cr} = \alpha \sqrt[3]{E_c G_c E_f}$ .
- 5- تتأثر قيمة المعامل  $\alpha$  بجودة إنتاج العنصر السندويشي، وتلاصق نواته مع طبقتي التغطية، وكثافة هذه النواة وطبيعة التحميل، والتشوهات، أو الإجهادات الموضعية التي تحدثها القوى المركزة المنقولة إلى العنصر، حيث ازداد وضوح تشكل تجعيد طبقة التغطية العلوية المضغوطة، وقيمة إجهاد التجعيد كلما قلت سرعة إحداث التشوهات الموضعية في أماكن تطبيق القوى المركزة على العينات المجرية.

- 6- ارتبطت قيمة المعامل  $\alpha$  بالمنتج المحلي المجرب، حيث قبلت أغلب المصادر العالمية القيمة  $\alpha \approx 1$ ، بينما أظهرت اختبارات منتجاتنا المحلية من مثل هذه العناصر السنويشية أنه يقبل القيمة  $\alpha \approx 0.91$ .
- 7- بحسب النتائج المخبرية التي توصلنا إليها يمكن أن تقبل معاملات المرونة لمادة الفوم في العناصر السنويشية المختبرة القيم الآتية:

$$E_c = 3.71 \text{ Mpa} \quad G_c = 1.75 \text{ Mpa} \quad \nu = 0.06$$

وبذلك يكون إجهاد التجعيد الحرج:

$$\sigma_{cr} = 0.91(3.71 \times 1.75 \times 210000)^{(1/3)} \approx 100 \text{ Mpa}$$

#### التوصيات:

- 1- إجراء أبحاث تجريبية تحليلية لاحقة على الألواح السنويشية المنتجة محلياً عند توفر إمكانية اختبارها بعرضها الكامل، الذي يمكن أن يقدم نتائج أكثر دقة لوصف السلوك الحقيقي لها ومدى تأثير ذلك على النتائج المشتقة في هذا البحث.
- 2- إجراء أبحاث تجريبية لاحقة للتأثير الحراري على سلوك مثل هذه الألواح بفروقات حرارية مختلفة زيادة أو نقصاناً عن درجة حرارة المخبر.
- 3- إجراء أبحاث تجريبية لاحقة لانهياب مثل هذه العناصر بإخضاعها لنظم تحميل متنوعة ولمدد أطول زمنياً من زمن نظام التحميل التجريبي المعتمد في هذا البحث.
- 4- ضرورة ارتباط استثمار هذه الألواح المنتجة محلياً في العناصر الإنشائية بمعايير مراقبة جودة تحقيقها للمتطلبات التصميمية، التي مثلت نتائج هذا البحث بعض أركانها.

#### المراجع:

- [1] Davies, J.M. : Sandwich panels , Thin-Walled Structure , Vol.16 , 179-198, 1993.
- [2] CIB2000, International Council for Building Research, Studies and Documentation " European Recommendations for Sandwich Panels, Part 1,Design",CIB Publication, 1-900.
- [3] Ley,R.P., Lin, W., and Mbanefo, U.: Face sheet wrinkling in sandwich structure. NASA: Langley Research Center, 1-30, 1999.
- [4] Fagerberg,L: Wrinkling of sandwich panel for marine application .PhD thesis, ISSN 1651-7660,KTH Aeronautical and Vehicle Engineering , Stockholm, Sweden,pp.1-180, 2003.
- [5] Sakkour, Akram: Mechanics of Materials, Bd. 2, Tishreen University, 1-700,2011. صفور، أكرم: ميكانيك المواد، الجزء 2، جامعة تشرين، 2011، 1-700.
- [6] S. Burkhardt: Tragfähigkeitsermittlung von Sandwichelementen mit ebenen und schwach profilierten Deckschichten, Wilhelm Ernst & sohn Verlag für Architektur und teschnische wissenschaften, Berlin, 23-27, 1989.
- [7] Zenkert, D. : An introduction to sandwich construction, Engineering Materials Advisory Services Ltd, Solihull, UK, 1-60, 1995.