

Properties of Normative Behavior with Tension of the Light Locally Produced Sandwich Panels with Two Steel Faces and a Core of Polyurethane (PUR)

Dr. Akram Sakkour^{*}
Jalal Omran^{**}

(Received 18 / 9 / 2019. Accepted 12 / 7 / 2020)

□ ABSTRACT □

Light sandwich panels are increasingly employed in engineering facilities because of their high acoustic and thermal insulation, in addition to adapting its construction investment as elements of fast construction according to the materials used and production technology to work as walls and plates carrier internal and external, where they are able to receive the loading systems to which the facility is subjected of normal service loads, wind and snow and transport them via secondary beams to the other major carriers in the required facility.

Structural adaptation of these elements requires adequate knowledge of the behavior mechanism and mechanical properties of its materials to conduct the appropriate structural analysis of the maximum load limits which can be applied to this elements to prevent the risks of collapse, whether by shearing their core or wrinkling and buckling their face according to the structural system formed and the nature of loads affecting them, especially those properties related to core material, which often consists of foam rigid material adhered to the two thin steel faces.

Polyurethane PUR is one of the most used materials as filling to the locally produced sandwich panels with two faces of high- strength steel panels.

This paper seeks to introduce the tension testing system of the core sandwich panel and its adhesion to the face layer, and to derive empirically the standard core modulus of elasticity on tension and associated diagonal of strain-stress using an experimental apparatus specifically designed to test such material of locally produced sandwich panels with core of polyurethane, and generalization of its findings to form a basic database to analyze and design the components of the panels.

Keywords: Sandwich Panels, Flat Cover, Polyurethane Core, the standard core modulus of elasticity on tension, diagonal of normative behavior, Connection forces.

*Professor- Structural Engineering Department - Civil Engineering Faculty- Tishreen University- Lattakia - Syria.

**Postgraduate Student (PhD) - Structural Engineering Department - Civil Engineering Faculty- Tishreen University- Lattakia –Syria.

خصائص السلوك المعياري بالشد لمكونات العناصر السندويشية الخفيفة المنتجة محلياً بطبقتي تغطية معدنيتين ونواة من البوليوريثان /PUR/

د. أكرم صفور*

جلال عمران**

(تاريخ الإيداع 18 / 9 / 2019. قُبِلَ للنشر في 12 / 7 / 2020)

□ ملخص □

يتزايد توظيف العناصر السندويشية الخفيفة في المنشآت الهندسية يوماً بعد يوم نظراً لإمكانية تميزها بالعازلية العالية صوتياً وحرارياً علاوة على تكييف استثمارها إنشائياً كعناصر سريعة التشييد حسب المواد المستخدمة فيها، وتقنية إنتاجها لتعمل كجدران، وأسقف حاملة داخلية وخارجية قادرة على تلقي أنظمة التحميل التي تخضع لها المنشأة من حمولات الخدمة العادية، والرياح، والتلج، ونقلها عبر المدادات الثانوية إلى العناصر الرئيسة الحاملة الأخرى في المنشأة المطلوبة. يتطلب التكييف الإنشائي لهذه العناصر المعرفة الكافية بآلية سلوكها، والخصائص الميكانيكية لموادها لإجراء التحليل الإنشائي المناسب لها بحدود الحمل الأقصى الذي يمكن تطبيقه على هذه العناصر لدرء مخاطر انهيارها، سواء بالقص لنواتها، أو التجعيد والتحنيب لطبقتها حسب الجملة الإنشائية المشكلة منها وطبيعة الحمولات المؤثرة عليها، وخصوصاً تلك الخصائص المتعلقة بمادة النواة التي غالباً ما تكون مؤلفة من مادة رغوية متصلبة من الفوم ملتصقة بطبقتي تغطية معدنيتين رقيقتين.

تعد مادة البوليوريثان PUR أكثر المواد المستخدمة حشوة للألواح السندويشية المنتجة محلياً بطبقتي تغطية من صفائح الفولاذ العالي المقاومة.

تسعى هذه الورقة البحثية إلى التعريف بنظام اختبار الشد لنواة اللوح السندويشي ومادة التصاقها مع طبقة التغطية، والاشتقاق تجريبياً لمعامل مرونة النواة المعياري على الشد ومخطط الإجهاد التشوه التصميمي المرافق، وذلك باستخدام جهاز تجريب أعد خصيصاً لاختبار مثل هذه المادة من الألواح السندويشية المنتجة محلياً بنواة من البوليوريثان، وتعميم نتائجها لتشكيل قاعدة بيانات أساسية لإجراء التحليل والتصميم للعناصر المكونة من هذه الألواح.

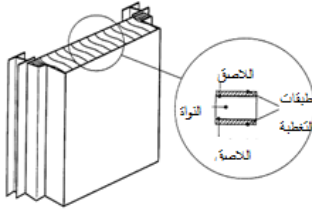
الكلمات المفتاحية: ألواح العناصر السندويشية، طبقة التغطية المستوية، نواة البوليوريثان، معامل مرونة النواة المعياري على الشد، مخطط السلوك المعياري، مقاومة الالتصاق.

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

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

مقدمة:

لقد تسارع محلياً وعالمياً في العقود الأخيرة إنتاج واستخدام الألواح السندوشية المكونة من مواد مختلفة تحاكي في خصائصها الميكانيكية والفيزيائية المستلزمات الوظيفية لها كعناصر إنشائية حاملة، أو عازلة حرارياً، وصوتياً في المنشأة الهندسية المطلوبة.



الشكل (1): اللوح السندوشي [1]



الشكل (2): Woolworth State Office south Australia [2]

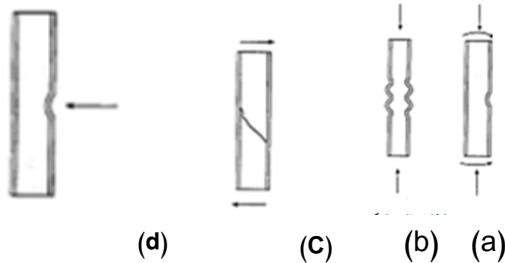


الشكل (3): سقف بألواح سندوشية لمعمل محلي

من هذه العناصر السندوشية المنتجة بالأطوال المطلوبة كعناصر جاهزة، والمستخدمه بشكلٍ واسع في مجال الهندسة المدنية تلك المؤلفه من طبقتي تغطية معدنيتين لنواة من مادة البوليوريثان polyurethane، كما هو مبين في الشكل (1)، يتزايد استخدام مثل هذه الألواح الخفيفة الوزن كجدران وأسقف حاملة إضافة لدورها العازل صوتياً وحرارياً.

يبين الشكل (2) أحد نماذج المنشآت الهندسية المشيد بسقفه وجدرانه الداخلية والخارجية من ألواح الصفائح السندوشية، والذي يمثل مبنى المكتب الدولي Woolworth بجنوب استراليا [2]، حيث يطلب من هذه العناصر السندوشية مقاومة كل من الحمولات الشاقولية وقوى دفع وسحب الرياح، إضافة لتلك الناتجة عن الفروقات الحرارية داخلياً وخارجياً.

أما الشكل (3) فيبين استخدام الألواح السندوشية في المنشآت الهندسية المحلية كسقف لأحد المعامل لتحمل الحمولات الشاقولية والتلجية أو حمولات الرياح، ونقلها إلى مدادات الجيزان الثانوية المعدنية.



الشكل (4): أنماط انهيار الألواح السندوشية [4]

يتفاوت نمط الانهيار لهذه العناصر السندوشية المنعطفة بين الانهيار بالتجعيد الموجي لطبقة التغطية المضغوطة نتيجة تأثير الحمولات عمودياً على مستوى اللوح، كما يبينه الشكل (4a,b)، والانهيار القصي لنواة اللوح حسب طبيعة الحمولات المؤثرة (شكل 4c)، دون أن نستثني من هذه الأنماط إمكانية التشوه الموضعي لنقاط ومواضع

تأثير الحمولات على اللوح السندوشي (شكل 4d)، وأنماط الانهيار هذه مبينة تجريبياً بالشكل (5a,b) للانهيار الموجي بالتجعيد، والشكل (5c) للانهيار القصي، والشكل (5d) للانهيار بالتحنيب، أو التشوه الموضعي [4].



d: صورة لعينة تظهر التشوه الموضعي الحاصل عند حدوث الانهيار مع انفصال لمادة النواة



c: انهيار قصي للنواة بزواوية 45 درجة



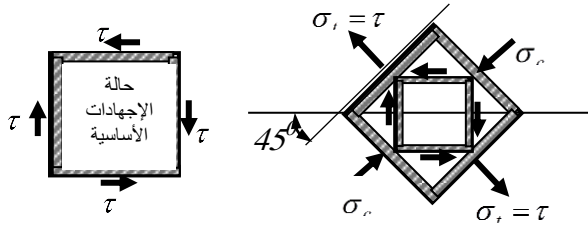
b: صورة لعينة توضح تمزق النواة وانفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحمولة



a: صورة لعينة توضح انفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحمولة

الشكل (5): أنماط انهيار عناصر الألواح السندوشية المنعطفة [4]

لقد أجمعت أغلب مراكز الأبحاث العالمية والمراجع العلمية المتوفرة في هذا المجال أن تقويم طاقة تحمل العنصر الإنشائي المكون من مثل هذه الألواح السندويشية نتيجة شد النواة قطرياً، كما يبينه الشكل (6) بتأثير إجهادات القص الأعظمية في أماكن انخفاض تأثير عزوم الانعطاف على مقطع اللوح، وتزايد تأثير القص على مقطع النواة



الشكل (6): الحالة الإجهادية لنقاط مقطع النواة الخالية من الإجهادات الناعمية الطولية

نتيجة إهمال دور طبقة التغطية في تحمل قوى القص المؤثرة تقريباً، حسب ما أجمعت عليه تحليلاً غالبية المراجع العلمية، والمؤيدة نتائجها إلى درجة كافية تجريبياً [1]، [3]، [5]، إنما يتم من خلال الخصائص الميكانيكية الفيزيائية على شد لمادة النواة، والتصاقها بطبقة التغطية، إذ كلما ازدادت مقاومة

الالتصاق للشد ازدادت مقاومة اللوح للانهياب بالتجعيد الموجي، وتقدم سيطرة ظاهرة الانهياب القصي.

$$\sigma_r = \tau \quad (1) \quad \text{يستنتج من الشكل أن إجهاد شد النواة القطري يساوي [6]:}$$

ترتبط مقاومة شد النواة وخصائصها الميكانيكية الفيزيائية على شد ببنية مادتها، وكثافتها، وتقنية إنتاجها. لذلك نتبين هذه الخصائص باختلاف مصادر الانتاج لها.

نسعى من خلال هذه الورقة العلمية بالدرجة الأولى إلى التعريف الأعمق هندسياً بطرق الاختبار، وآلية السلوك بالشد لمادة البوليفوريتان المستخدمة في الألواح السندويشية المنتجة محلياً، وسبل الاشتقاق لمخطط الإجهاد التشوه المعياري لعينات هذه الألواح لرفد المعرفة المحلية بشروط التصميم اللازمة للعناصر الإنشائية المكونة منها.

أهمية البحث وأهدافه:

يقوم التحليل التوازني والمستقر لوصف سلوك العناصر، والجمل الإنشائية، ومكوناتها، كما هو معروف، على أسس ونظريات عامة مبنية على توفر الخصائص الهندسية لمقاطعها والموصفات الميكانيكية الفيزيائية لموادها. لذلك تشكل نتائج التجريب للمواد العمود الفقري الذي تبنى على أساسه النظريات التحليلية في التصميم الإنشائي المرن وغير المرن.

نتيجة اتساع مساحة الانتاج والاستثمار الهندسي عالمياً، ومحلياً للعناصر السندويشية المكونة من ألواح بطبقتي تغطية، غالباً، معدنيتين لحشوة من مادة رغوية متصلبة تكثر من بينها مادة البوليفوريتان PUR. ونظراً لندرة المرجعيات والأبحاث العلمية المحلية حتى الآن التي تعرف بالسلوك الإنشائي لمنتجاتنا المحلية على الأقل، وانطلاقاً من الحاجة لترسيخ التوطين لوسائل الاختبار محلياً لهذه المنتجات، وسبل معالجة نتائجها للحصول على قاعدة البيانات المعيارية الأساسية بالخصائص الميكانيكية والفيزيائية اللازمة لضبط معايير التصميم الإنشائي للعناصر الإنشائية المكونة منها، الذي يمكن استثمار نتائجه في عملية التحليل الإنشائي حيث يورد هذا المنتج، تأتي أهمية هذا البحث ليسهم في التعريف بالسلوك الميكانيكي المعياري لحشوة اللوح السندويشي من البوليفوريتان على الشد وشروط التصاقها بطبقة التغطية لتأمين العمل المشترك لهذا اللوح من خلال اختبار نماذج عينات عشوائية لمنتجات محليين بوسائل اختبار، وآليات تحميل أعدت خصيصاً لهذا الغرض.

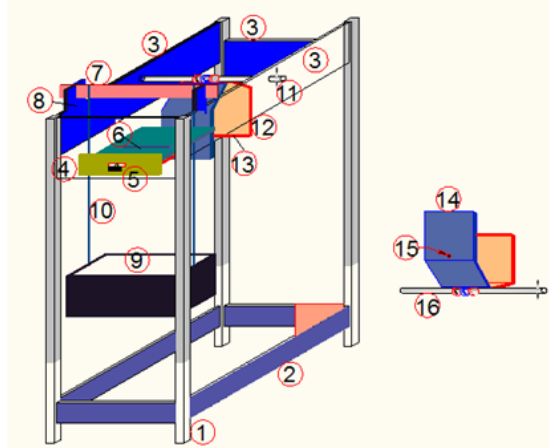
طرائق البحث ومواده:

بنيت طرائق إجراء البحث على وقائع الدراسات المرجعية التحليلية والتجريبية للألواح والعناصر السندوشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين لحشوة من البوليوريثان، وشكلت الألواح المماثلة المنتجة محلياً مادة البحث التجريبي لإجراء اختبارات الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمادة النواة، وتحديد مخطط الإجهاد التشوه التجريبي، والمعيار لها، كأحد أهم مستلزمات الدراسة والتصميم.

استحضرت لهذا الغرض إلى مخبر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين عينات عشوائية مغلقة لنموذجين من نماذج هذه الألواح المنتجة محلياً بسطحها المستوي، أو المقلم قليلاً. السماكة الكلية للنموذج الأول من الألواح 81 ملم، ونواتها من البوليوريثان 80 ملم، وسماكة النوع الثاني 51 ملم، ونواته 50 ملم، أما سماكة كل طبقة تغطية للنموذجين فهي 0.5 ملم، ومصنوعة من الفولاذ ST52 المحدد تجريبياً في مخبر البحث.

نتيجة عدم توفر جهاز اختبار مستقل في المخبر لإجراء التجارب المطلوبة بالتحميل المباشر لهذه المادة الحساسة، لتوصيف السلوك الحقيقي للعينة المختبرة خلال مراحل التحميل والقياس من جهة، قمنا بإعداد جهاز يدوي التحضير والتحميل لأداء المطلوب بتقنية يمكن رفع سويتها لاحقاً ليصبح العمل به أكثر يسراً كجهاز محلي من أجهزة المخبر الأساسية المخصصة لاختبار أمثال هذه المواد.

صمم هذا الجهاز ليكون متعدد الإمكانيات في إجراء اختبارات الضغط، والشد، والقص لعينات هذه المادة الحساسة وسواها، والتي يمكن أن تكون بحمولات متدرجة، أو صادمة، مباشرة، أو طويلة الأمد أيضاً، ويبينه الشكل (7) :



الشكل (7): جهاز التجريب متعدد الأغراض

- 1- أربعة قوائم حاملة 15- برغي شد الملقط على العينة
- 2- صفائح تثبيت وربط القوائم 16- قضيب من الفولاذ المقسى للملقط
- 3- صفائح تقوية وربط علوية للقوائم
- 4- صفيحة تثبيت حاملة للدرج وسكته
- 5- درج معدني متحرك ضمن سكتيه
- 6- شق إمرار طبقة التغطية
- 7- ذراع تطبيق الحمولات على العينات
- 8- سكة تحرك الذراع
- 9- حوض أو صفيحة وضع الحمولات
- 10- قضيب معدني لنقل التحميل
- 11- قضيب من الفولاذ المقسى حامل لملقط العينة
- 12- ملقط أو مقبض العينة
- 13- سكة إمساك طبقة تغطية العينة
- 14- ملقط أو مقبض ثانٍ للعينة

يلحق بالجهاز صفائح معدنية صلبة لتوضع العينة على الدرج مع مجموعة أوزان التحميل، وساعات القياس التي توضع على حواملها في الأماكن المناسبة حسب التجربة المطلوبة.

أكبر أبعاد عينات تجارب الضغط التي يمكن إجراؤها على هذا الجهاز هي بمقطع متوازي مستطيلات $dX100X100mm$ ، حيث d سماكة اللوح السندوشي.

أما تجارب الشد التي يمكن إجراؤها عليه، فقد شملت عينات بأبعاد منتظمة $dX100X100 mm$ ، وأخرى بمقاطع مخروطية أو متدرجة للنواة لبلوغ إجهاد انهيار العينة داخل مادة النواة قبل حصول الانهيار للعينة عند سطح اللاصق

مع طبقة التغطية من جهة، وللمفاضلة بينها في بلوغ الهدف المطلوب من جهة ثانية. سوف نُدرج لاحقاً في متن هذه الورقة العلمية على اصطلاح ما يسمى بانهييار اللاصق لكل أشكال الانهييار التي تتعلق باللاصق للنواة مع طبقة التغطية، سواء تَمَثَّل هذا الانهييار بانفصال اللاصق جزئياً أو كلياً عن طبقة التغطية، أو انقطاع النواة عن اللاصق عند سطح اللصق. بينا في ورقة علمية سابقة مراحل إجراء تجارب الضغط على هذا الجهاز، أما تجارب الشد للحشوة ذاتها، أو لالتصاقها بطبقة التغطية فهي تتم بموجب الشكل (8) وفق الآتي:



شكل (8): نظام تجريب شد العينة

1- تحضير العينة بالأبعاد المطلوبة للتجريب، وإدخال جهتي طبقة التغطية العلوية ضمن سكتي إمساك العينة في الملقط العلوي ثم شد برغي التثبيت.
2- تدلّي العينة المثبتة بالملقط العلوي نحو الأسفل، وتدخل جهتي طبقة التغطية السفلية إلى سكتي الإمساك في الملقط السفلي (لاحظ تعليق العينة).
3- يوضع جهاز قياس انتقالات أسفل ووسط العينة داخل الملقط السفلي كما هو مبين على الشكل لقياس استطالات العينة.
4- تبدأ التجربة بتعليق صفيحة التحميل على قضيب الفولاذ للملقط السفلي والتحميل التدريجي للأوزان، ليتم نقل تأثيرها عبر هذا الملقط إلى العينة (لاحظ الأوزان المحملة على الصفيحة التي يستمر تزايدها حتى نهاية التجربة). يبين الشكل (9) نماذج مقاطع النواة المستخدمة في اختبارات الشد، وأنماط انهيارها التي أجريت على الجهاز المبين.



النموذج الأول:
مقطع ثابت



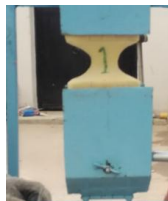
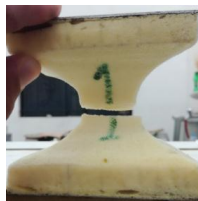
النموذج الثاني:
مقطع مستطيل
مندرج في اتجاه
واحد



النموذج الثالث:
مقطع مستطيل
مندرج في
الاتجاهين



النموذج الرابع:
مقطع ثابت في
الطرفين مع
أقسام داخلية
منحنية التدرج



شكل (9): نماذج مقاطع النواة المختبرة

في الاتجاهين تتم دراسة سلوك المادة المجربة، واشتقاق الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لها من خلال إيجاد مخطط الإجهاد التشوه للعينات المجربة على الشد حتى حصول الانهيار لها. نظراً لإمكانية حصول انهيار الالتصاق للعيينة إما بانهاير المادة اللاصقة نفسها، أو انهيار التصاقها بطبقة التغطية، أو انهيار تماسك النواة معها، سوف يتم حساب اجهاد شد الالتصاق المعبر عن أي من الحالات الثلاث المذكورة، طالما أن الهدف يتمثل بدراسة رابط الالتصاق المتوفر في العينة الذي يؤمن العمل المشترك للمقطع السندويشي، بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_{pa} = \frac{N}{A_{pa}} \quad (2)$$

تمثل A_{pa} مساحة سطح التصاق النواة بطبقة التغطية للعيينة المدروسة، و $N = F$ القوة المطبقة على العينة. أما حساب اجهادات الشد الأعظمي، والتشوهات المرافقة، ومعاملات مرونة النواة لكل مرحلة تحميل فيتم بالعلاقات الآتية حسب شكل مقطع نواة العينة المدروسة من العينات المبينة أعلاه، وذلك باشتراط السلوك المرن للعيينة ضمن مرحلة التحميل المدروسة [7] [8]:

أ- المقطع الثابت للنواة:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (3) \quad \text{يحسب الإجهاد في العينات لكل مرحلة تحميل بالصيغة:}$$

حيث تمثل A مساحة المقطع، و $N = F$ القوة المطبقة على العينة.

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_c}{t_c} \quad (4) \quad \text{أما التشوه الحاصل لكل مرحلة من مراحل التحميل فيحسب بالعلاقة:}$$

حيث تمثل t_c سماكة النواة، و Δt_c مقدار الاستطالة التي تسجلها أجهزة القياس التجريبية.

$$E_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} \quad (5) \quad \text{ليتم من خلال ذلك حساب معامل مرونة النواة في كل مرحلة تحميل بالمعادلة:}$$

ب- المقطع المتدرج في اتجاه واحد بمقطع مستطيل (شكل 10):

يحسب الاجهاد الأعظمي في العينة لكل مرحلة تحميل بالعينة:

$$\sigma_{\max_i} = \frac{N_i}{l b_m} \quad (6)$$

حيث تمثل l بعد العينة الثاني، و $N_i = F$ القوة المطبقة على العينة.

يتم حساب معامل مرونة النواة في كل مرحلة تحميل بالعلاقة:

$$E_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{\Delta t_{ci} - \Delta t_{ci-1}} \left(\frac{t_m}{l b_m} + \frac{2t}{l b_{eff}} \right) \quad (7)$$

حيث Δt_{ci} مقدار الاستطالة التي تسجلها أجهزة القياس التجريبية لمرحلة

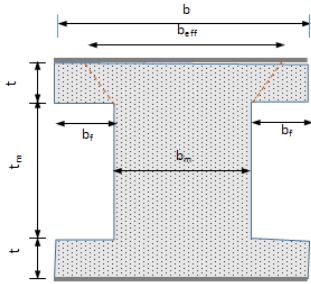
التحميل i ، و $b_{eff} = b_m + 1.16t$ حسب نتائج التجريب.

أما التشوه الحاصل في المقطع بالإجهاد الأعظمي لكل مرحلة من مراحل

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_{\max_i} - \sigma_{\max_{i-1}}}{E_i} + \varepsilon_{i-1} \quad (8) \quad \text{التحميل فيحسب بالعلاقة:}$$

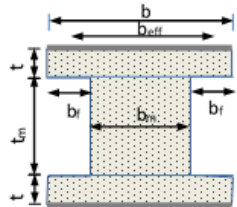
ج- المقطع المتدرج في اتجاهين بمقطع مستطيل (شكل 11):

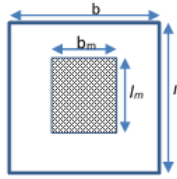
يحسب الأعظمي في العينة لكل مرحلة تحميل بالعلاقة:



الشكل (10): مقطع النواة المتدرج في

اتجاه واحد بمقطع مستطيل





الشكل (11): مقطع النواة المتدرج في

اتجاهين بمقطع مستطيل

$$E_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{\Delta t_{ci} - \Delta t_{ci-1}} \left(\frac{t_m}{l_m b_m} + \frac{2t}{l_{eff} b_{eff}} \right) \quad (10)$$

حيث $l_{eff} = l_m + 1.16t$ حسب نتائج التجريب.

أما التشوه الحاصل في المقطع بالإجهاد الأعظمي لكل مرحلة من مراحل التحميل فيحسب بموجب العلاقة:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_{\max i} - \sigma_{\max i-1}}{E_i} + \varepsilon_{i-1} \quad (11)$$

د- المقطع الثابت في طرفيه مع أقسام داخلية منحنية التدرج في الاتجاهين (شكل 12):

لأخذ في الحسبان انخفاض تقنية مجسم الانحناء بشكل منتظم، يمكن أن يقرب إلى جذع هرمي بدقة كافية، ليحسب

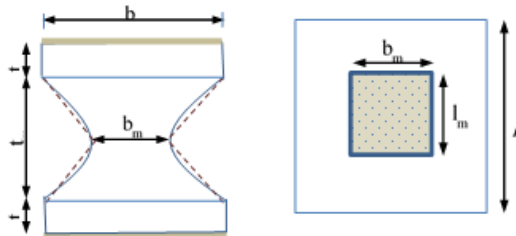
$$\sigma_{\max i} = \frac{N_i}{l_m b_m} \quad (12)$$

حيث تمثل l_m ، و b_m أبعاد مقطع المستطيل المتوسط للعينة، و $N_i = F$ القوة المطبقة على العينة.

$$E_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{\Delta t_{ci} - \Delta t_{ci-1}} \left[\frac{2t}{lb} + \frac{t_m}{lb - l_m b_m} \left(Ln \frac{lb}{l_m b_m} \right) \right] \quad (13)$$

أما التشوه الحاصل في المقطع بالإجهاد الأعظمي لكل مرحلة من مراحل التحميل فيحسب بموجب العلاقة:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_{\max i} - \sigma_{\max i-1}}{E_i} + \varepsilon_{i-1} \quad (14)$$



شكل (12): مقطع النواة المستمر الانحناء داخلياً بمقطع

مستطيل

لقد دأبنا لدراسة سلوك حشوة العينة على المعالجة المستقلة للنتائج التجريبية الخاصة بكل نموذج من النموذجين المذكورين أعلاه، بغية إظهار التباين بين نتائجها، والتعرف أكثر على الأسباب التي يمكن أن تؤدي إلى هذا التباين. إذ بلغ عدد العينات المجربة لتحقيق هذا الغرض لنموذجي الألواح السندويشية 26 تجربة.

النتائج والمناقشة:

ندرج فيما يلي جدولياً نتائج المعالجة التحليلية بالعلاقات (2)، و(3)، و...، و (14) لمصفوفة التحميل المتتالي لكل عينة من العينات المجربة، ومقاسات الاستطالة المقابلة لها، علماً أن هذه القيم المدرجة في الجداول قد اقتصر على تبيان نتائج 13 خطوة غير موحدة من خطوات تحميل العينة كحد أقصى، التي يمكن أن تكون خلالها بعض العينات قد دخلت مرحلة الانهيار حسب كبر قفزة التحميل المطبقة على العينة للاستقرار من خلالها قدرة تحمل النموذج المجرب، وبعضها مازال دون هذه المرحلة كثيراً، أو قليلاً، سواء باكتفائنا العرض لهذه النتائج في هذه الورقة العلمية حتى هذه المراحل الأولية من التحميل لكفاية الاستدلال بنتائجها، أم لأننا توقعنا عن تحميلها أكثر من ذلك لاستثمار هذا التوقف

لأغراض بحثية أخرى غير مشمولة بهذه الورقة البحثية. لذلك استعضنا عن العرض مصفوفياً لكافة نتائج مراحل التحميل المطبقة على كل عينة من العينات بالتمثيل البياني لها المرفق أدناه، بينما أشرنا بتظليل الخلية الجدولية إلى إجهاد الانهيار الذي تم بلوغه في العينات سواء بانهييار اللاصق، أو انهيار داخل النواة.

أولاً: نتائج تجريب عينات نموذج الألواح الأول A

أ- عينات المقطع الثابت

الجدول (1): عينات المقطع الثابت لنموذج الألواح A

عينة 3			عينة 2			عينة 1 نموذج A			
معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	
	0.00	0.000		0.00	0.000		0.000	0.0000	
3.60	0.10	0.004	3.75	0.10	0.004	1.81	0.202	0.0037	
2.34	0.30	0.007	2.74	0.23	0.007	1.92	0.394	0.0074	
2.07	0.52	0.011	1.68	0.45	0.011	1.98	0.584	0.0111	
1.87	0.76	0.014	0.86	0.88	0.015	1.99	0.772	0.0148	
1.60	1.11	0.018	0.40	1.11	0.016	0.24	1.546	0.0167	
1.20	1.56	0.019	0.73	1.24	0.017	0.19	2.034	0.0177	
0.89	2.20	0.020		1.41	0.017	0.25	2.408	0.0186	
2.52	2.52	0.021	انفصال اللاصق			0.80	2.526	0.0196	
0.73	2.95	0.021				0.57	2.857	0.0214	
0.74	3.13	0.023				0.38	3.107	0.0224	
0.60	4.21	0.025				انفصال اللاصق		0.0261	
انفصال اللاصق		0.027							
<p>مخططات سلوك العينات</p>			<p>انفصال طبقة التغطية</p>			<p>نمط الانهيار</p> <p>انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل</p>			
عينة 6			عينة 5			عينة 4 نموذج A			
معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	
	0	0.000		0	0.000		0	0	
3.05	0.06	0.002	3.96	0.04	0.002	4.42	0.03	0.001	
2.76	0.08	0.002	3.87	0.06	0.002	4.38	0.05	0.002	
2.58	0.12	0.003	3.83	0.09	0.003	4.44	0.07	0.003	
2.44	0.15	0.004	2.73	0.12	0.004	4.46	0.09	0.004	
2.56	0.19	0.005	2.56	0.15	0.005	4.43	0.11	0.005	
2.33	0.23	0.006	2.49	0.19	0.006	4.30	0.13	0.006	
2.25	0.26	0.007	2.58	0.22	0.007	3.60	0.15	0.006	
2.23	0.31	0.008	2.94	0.25	0.008	3.13	0.18	0.007	
2.04	0.39	0.010	2.04	0.34	0.010	2.21	0.25	0.009	
1.91	0.48	0.011	1.91	0.43	0.011	1.96	0.34	0.011	
1.52	0.59	0.013	1.22	0.57	0.013	1.77	0.43	0.012	
إجهاد انفصال اللاصق		0.024	إجهاد انفصال اللاصق		0.027	إجهاد انفصال اللاصق			0.026

<p>مخططات سلوك العينات</p>			<p>نمط الانهيار</p> <p>انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل أعلاه</p>					
<p>عينة 9</p>			<p>عينة 8</p>			<p>عينة 7 نموذج A</p>		
معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N/mm^2
	0.00	0.0000		0.00	0.000		0.00	0.0000
3.08	0.05	0.0015	2.59	0.06	0.001	1.58	0.10	0.0016
3.77	0.10	0.0033	2.59	0.12	0.003	1.57	0.21	0.0033
3.58	0.15	0.0051	2.53	0.18	0.005	1.47	0.27	0.0042
2.98	0.21	0.0068	2.59	0.25	0.006	1.42	0.33	0.0050
2.46	0.28	0.0086	2.39	0.31	0.008	1.30	0.46	0.0068
2.46	0.35	0.0104	1.61	0.41	0.010	1.26	0.60	0.0085
1.83	0.45	0.0122	1.84	0.50	0.011	1.38	0.72	0.0102
2.10	0.53	0.0139	1.61	0.60	0.013	1.26	0.86	0.0119
1.83	0.63	0.0157	1.61	0.70	0.014	1.54	0.97	0.0137
1.83	0.73	0.0175	1.61	0.80	0.016	1.26	1.11	0.0154
2.46	0.80	0.0193	1.61	0.90	0.018	1.63	1.22	0.0171
إجهاد انفصال اللاصق		0.0315	إجهاد انفصال اللاصق		0.027	إجهاد انفصال اللاصق		0.036
<p>مخططات سلوك العينات</p>			<p>نمط الانهيار</p> <p>انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل أعلاه</p>					

ب- عينات المقطع المتدرج في اتجاه واحد ($b_m = 62mm$ للأولى، $b_m = 40mm$ للثانية، $t = 15mm$)

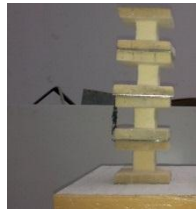
الجدول (2): عينات المقطع المتدرج في اتجاه واحد لنموذج الألواح A

<p>ملاحظة:</p> <p>قيمة إجهاد شد اللاصق في هذا الجدول حسبته لهاتين العينتين بالحدود الدنيا التي تقبل قدرة مقطع النواة المتوسط لهذا النمط من التدرج في المقطع على توزيع الإجهادات المنقولة مركزياً بانتظام عبر سطح تلاصق طبقة التغطية مع النواة محددة أبعاده بأكبر حدود انتشار لإجهادات الجسد عبر الجناح بزاوية 45^0 على الأفق، كما في الشكل (10)، علماً أن صورة</p>	عينة 2			عينة 1 نموذج A		
	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N/mm^2
		0.00	0.000		0.00	0.000
	2.69	0.30	0.008	2.74	0.18	0.005
	1.88	0.75	0.017	2.50	0.39	0.010
	1.81	1.20	0.025	2.02	0.73	0.015
	1.65	1.71	0.033	1.44	1.37	0.020
	1.64	2.21	0.041	1.30	1.90	0.025

<p>التجربة المرفقة بينت أن هذه الزاوية هي 60^0. أي:</p> $\min \sigma_{pa} = \frac{N}{(b_m + t)l}$ <p>حيث σ_{pa} إجهاد التلاصق.</p>	1.94	2.63	0.050	1.23	2.22	0.027
	إجهاد شد النواة عند الانهيار		0.053	1.18	2.41	0.028
				إجهاد شد النواة عند الانهيار		0.038
	إجهاد شد اللاصق		0.041	إجهاد شد اللاصق		0.031
<p>مخططات سلوك العينات</p>			<p>انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل جانباً مع انهيار قصي للجناح وتجاوز إجهاد الصفيحة حد المرونة</p>		نمط الانهيار	

ج- عينات المقطع المتدرج في اتجاهين

يبين الشكل (13) أربع من العينات المحضرة لتجريب النواة بهذا المقطع المتدرج، حيث أبعاد المقطعين الطرفين $100 \times 100 \text{ mm}$ ، والمتوسط $40 \times 40 \text{ mm}$ ، $t = 15 \text{ mm}$.



أما نتائج التجريب وإجهادات الانهيار، وأنماطها ومخططات سلوكها مبينة في الجداول الآتية:

شكل (13): عينات النواة بالمقطع المتدرج التغير في اتجاهين للنموذج A

الجدول (3): عينات المقطع المتدرج في اتجاهين لنموذج الألوام A

عينة 3			عينة 2			عينة 1 نموذج A		
معامل مرونة النواة E_c N / mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N / mm^2	معامل مرونة النواة E_c N / mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N / mm^2	معامل مرونة النواة E_c N / mm^2	التشوه ϵ %	الإجهاد σ N / mm^2
	0.00	0.000		0.00	0.000		0.00	0.000
2.13	0.44	0.009	2.70	0.41	0.011	3.27	0.14	0.005
2.00	0.70	0.015	2.40	0.66	0.017	2.36	0.34	0.009
1.70	1.01	0.020	2.17	0.94	0.023	1.57	0.64	0.014
1.68	1.33	0.025	2.06	1.23	0.029	1.61	0.94	0.019
1.77	1.63	0.031	1.93	1.55	0.035	1.68	2.04	0.037
1.95	2.67	0.051	1.88	1.87	0.041	1.80	3.06	0.056
2.48	3.10	0.061	2.09	2.16	0.047	2.03	4.01	0.075
2.52	3.52	0.072	2.04	2.46	0.053	1.93	4.26	0.080
2.03	4.04	0.083	2.78	2.67	0.059	2.12	4.48	0.085
1.33	4.44	0.088	2.48	2.92	0.065	1.93	4.72	0.089
3.37	4.60	0.093	2.79	3.14	0.072	إجهاد انهيار النواة في المقطع المتوسط		0.107
إجهاد انهيار النواة في المقطع المتوسط		0.104	إجهاد انهيار النواة في المقطع المتوسط		0.114			
						<p>انقطاع النواة هرمياً في أعلى المقطع المتوسط للنواة أو أسفله وفق الشكل جانباً</p>		نمط الانهيار

مخططات سلوك العينات			عينة 5			عينة 4		
			معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2
				0.00	0.000		0.00	0.000
			3.40	0.26	0.009	2.29	0.42	0.010
			6.44	0.33	0.014	3.28	0.58	0.015
			1.70	0.62	0.018	3.35	0.74	0.020
			7.25	0.68	0.023	2.42	0.95	0.025
			3.86	0.81	0.028	2.42	1.17	0.031
			6.44	0.88	0.033	2.63	1.37	0.036
			1.60	1.18	0.038	2.63	1.57	0.041
			4.83	1.28	0.042	2.72	1.77	0.046
			2.89	1.45	0.047	2.81	1.95	0.052
			2.89	1.61	0.052	2.81	2.14	0.057
				1.78	0.057	2.63	2.34	0.062
			إجهاد انهيار النواة في المقطع المتوسط		0.067	إجهاد انهيار النواة في المقطع المتوسط		0.105
<p>مخططات سلوك العينات</p>						<p>نمط الانهيار</p> <p>انقطاع النواة هرمياً في أعلى المقطع المتوسط للنواة أو أسفله وفق الشكل ملاحظة: يلاحظ أن مسار مخطط سلوك العينة 5 متبدل كثيراً وانهارت العينة باكراً لأنها كانت تحتوي نوعين المواد المتجاورة مع وجود خلل فيها</p>		

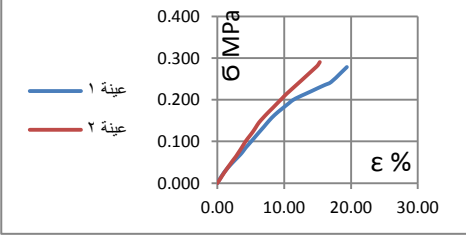

د- عينات المقطع بأجزاء الانحناء الداخلي المترج في اتجاهين:

الجدول (4): عينات المقطع بأجزاء الانحناء الداخلي المترج في اتجاهين لنموذج الألوام A

	عينة 2			عينة 1 نموذج A		
	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2
		0.00	0.000		0.00	0.000
	2.39	0.41	0.010	2.70	0.48	0.013
	2.52	0.62	0.015	2.39	0.78	0.020
	2.52	0.84	0.021	2.35	1.09	0.027
	2.42	1.06	0.026	1.95	1.45	0.034
	2.42	1.52	0.037	1.72	2.26	0.049
	2.20	1.77	0.042	1.67	2.69	0.056
	2.20	2.01	0.048	1.65	3.12	0.063
	2.20	2.26	0.053	1.69	3.55	0.070
	2.12	2.51	0.058	2.01	3.90	0.078
	2.09	2.77	0.064	2.15	4.24	0.085
	2.42	3.00	0.069	1.84	4.63	0.092
	2.42	3.22	0.075	1.84	5.02	0.099
	2.52	3.66	0.085	1.88	6.17	0.121
	2.58	3.87	0.091	1.83	6.95	0.135
	2.55	4.29	0.102	1.88	7.71	0.149
	2.10	4.80	0.112	0.00	7.85	0.149
	2.10	5.32	0.123	إجهاد انهيار النواة بالشد		0.278
	2.42	5.76	0.134			

ملاحظة:
قيمة إجهاد شد اللاصق في هذا الجدول حسبت لهاتين العينتين بالحدود الدنيا التي تقبل قدرة هذا النمط من التدرج المنحني في المقطع على توزيع الإجهادات المنقولة مركزياً بانتظام على كامل سطح تلاصق طبقة التغطية من النواة. أي:
$$\sigma_{pa} = \frac{N}{bl}$$

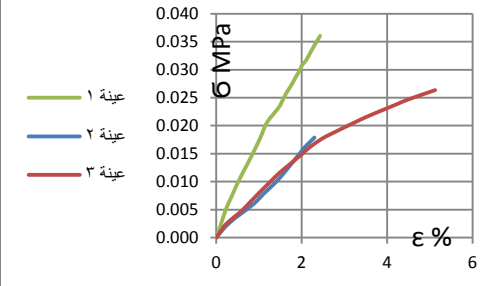

حيث σ_{pa} إجهاد التلاصق.

	2.47	6.20	0.145	إجهاد شد اللاصق	0.0329
	1.83	6.79	0.156		
	إجهاد انهيار النواة بالشد			0.290	
	إجهاد شد اللاصق			0.047	
 <p>مخططات سلوك العينات</p>			<p>انقطاع النواة في المستوي المتوسط لها تماماً وفق الشكل جانبياً ليعبر بذلك عن الحالة الأمثل لاختبار مقاومة شد النواة</p>		نمط الانهيار

ثانياً: نتائج تجريب عينات نموذج الألواح الثاني B المقلم

أ- عينات المقطع الثابت

الجدول (5): عينات المقطع الثابت لنموذج الألواح B

عينة 3			عينة 2			عينة 1 نموذج B		
معامل مرونة النواة E_t	التشوه ϵ	الإجهاد σ	معامل مرونة النواة E_t	التشوه ϵ	الإجهاد σ	معامل مرونة النواة E_t	التشوه ϵ	الإجهاد σ
N/mm^2	%	N/mm^2	N/mm^2	%	N/mm^2	N/mm^2	%	N/mm^2
	0.000	0.0000		0.000	0.0000		0.000	0.0000
1.08	0.142	0.0015	0.93	0.162	0.0015	2.16	0.074	0.0016
1.03	0.222	0.0024	0.78	0.279	0.0024	0.82	0.180	0.0025
0.69	0.342	0.0032	0.67	0.416	0.0034	1.43	0.243	0.0034
0.65	0.601	0.0048	0.59	0.888	0.0061	1.34	0.369	0.0051
0.79	0.811	0.0065	0.78	1.122	0.0079	1.14	0.448	0.0060
0.79	1.020	0.0081	0.72	1.376	0.0098	1.01	0.537	0.0069
0.75	1.240	0.0098	0.86	1.591	0.0116	1.07	0.625	0.0079
0.75	1.459	0.0114	0.94	1.785	0.0134	1.06	0.792	0.0097
0.64	1.719	0.0131	0.94	1.979	0.0153	0.96	0.972	0.0114
0.64	1.978	0.0147	0.94	2.076	0.0162	0.91	1.161	0.0131
	4.475	0.0246	انفصال اللاصق بالكامل عن طبقة التغطية وأصبحت ملساء			0.0179	انفصال اللاصق وانحناء طفيف للطبقة	
بقي بعض المادة معلقاً		0.026						
 <p>مخططات سلوك العينات</p>	 <p>انفصال طبقة التغطية</p>		<p>انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل</p>		نمط الانهيار			

ج- عينات المقطع المتدرج في اتجاهين:



شكل (14): عينات النواة بالمقطع المتدرج التغير في اتجاهين

لنموذج B

يبين الشكل (14) أربع من العينات المحضرة

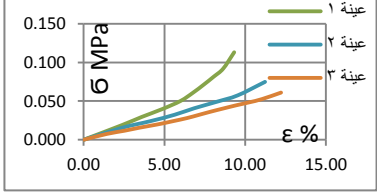

لتجريب النواة بهذا المقطع المتدرج، حيث أبعاد

المقطعين الطرفين 100x100mm، والمتوسط

30x30 mm. أما نتائج التجريب وإجهادات

الانهيار، وأنماطها فهي مدرجة في الجدول الآتي:

الجدول (6): عينات المقطع المتدرج في اتجاهين لنموذج الألواح B

عينة 3			عينة 2			عينة 1 نموذج B			
معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2	
	0.00	0.000		0.00	0.000		0.00	0.000	
0.53	1.43	0.008	0.88	2.07	0.016	0.80	2.37	0.019	
0.00	1.65	0.008	0.00	3.03	0.024	0.86	3.58	0.029	
0.47	2.52	0.012	0.00	3.19	0.024	0.80	4.88	0.040	
0.00	2.65	0.012	0.00	3.82	0.024	0.93	6.01	0.050	
0.49	3.49	0.016	1.02	4.63	0.032	1.38	6.76	0.061	
0.00	3.61	0.016	0.86	5.60	0.041	1.57	7.42	0.071	
0.42	4.58	0.020	1.33	6.23	0.049	1.89	7.98	0.081	
0.44	5.51	0.024	0.00	7.00	0.049	2.18	8.46	0.092	
0.00	5.60	0.024	1.40	7.60	0.057	انقطاع في النواة مباشرة		0.113	
0.52	6.39	0.028	0.35	10.00	0.065				
0.56	7.12	0.032	0.00	10.72	0.066				
انقطاع في النواة مباشرة		0.061	انقطاع في النواة مباشرة		0.083				
إجهاد شد اللاصق		0.022	إجهاد شد اللاصق		0.020	إجهاد شد اللاصق		0.027	
 <p>مخططات سلوك العينات</p>						<p>انقطاع النواة هرمياً في أعلى المقطع المتوسط للنواة أو أسفله وفق الشكل جانباً</p>			نمط الانهيار

د- عينات المقطع بأجزاء الانحناء الداخلي المتدرج في اتجاهين

أبعاد العينة للقسمين الطرفين 100x100 mm، ومقطع النواة الأوسط 30x30 mm.

الجدول (7): عينات المقطع بأجزاء الانحناء الداخلي المتدرج في اتجاهين لنموذج الألواح B

مخططات سلوك العينات		عينة 2			عينة 1 نموذج B		
		معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	التشوه ε %	الإجهاد σ N/mm^2
			0.00	0.000		0.00	0.000
		0.85	1.59	0.013	0.77	2.04	0.016
		0.69	2.65	0.021	1.08	2.84	0.024
		0.63	3.81	0.028	0.77	0.033 3.96	
		0.48	5.33	0.035	0.80	5.03	0.042
		0.00	5.78	0.035	0.80	6.11	0.050
		0.00	5.97	0.035	0.72	7.30	0.059
		0.49	7.46	0.043	0.70	8.54	0.067
		0.43	9.17	0.050	0.77	9.65	0.076
		0.00	9.54	0.050	0.72	10.85	0.085
		0.00	9.91	0.050	إجهاد انقطاع السطح المتوسط		0.188
		0.70	10.96	0.057			
		انقطاع في رأس العينة بجذع هرمي		0.156			
		إجهاد شد اللاصق		0.022	إجهاد شد اللاصق		0.027

مناقشة نتائج التجريب لنموذج الألواح الأول A:

نبين بداية أن هذه المناقشة ستوجه لتسليط الضوء على أدوات، ونماذج عينات الاختبار المناسبة لتقي بغرض التوصيف بدقة كافية لآلية السلوك الميكانيكي لنماذج مكونات الألواح المختبرة بخصائصه الميكانيكية الفيزيائية، والتي تشكل قاعدة البيانات الأساسية لتبيان آلية اشتقاق السلوك المعياري التصميمي وخصائصه، دون أن يشكل مستوى هذه الخصائص لنماذج ومصادر الألواح المشمولة بالبحث أهمية كبرى، لأن هذا المستوى متبدل من مصدرٍ لآخر حسب مكونات اللوح ومواده، إذ تدرج نتائج اختبار النموذجين المستثمرين في هذا البحث تحت هذا المفهوم.

* - شد اللاصق:

يلاحظ من نمط التجارب التي أجريت أن شد اللاصق والنواة قد تم بحالتين لتوزع وانتشار التأثير للإجهادات. الأولى طرفي باتجاه المركز متمثل بعينات المقطع الثابت، والثانية مركزي باتجاه الأطراف متمثل بباقي نماذج العينات مع أرجحية هذا التمركز أكثر كلما صغر مقطع النواة المتدرج في الاتجاهين.

لقد انعكس تأثير حالة توزع وانتشار الإجهادات على نتائج مقاومة انهيار شد اللاصق، إذ يلاحظ أنه بينما انخفضت قيمتها للعينات بمقطع ثابت ما دون $0.036 MPa$ ، وصلت قيمتها للعيونة الثانية للنموذج ب ذي المقطع المتغير باتجاه واحد إلى $0.041 MPa$ ، في حين وصلت قيمة إجهاد اللاصق في النموذج د للتغير بالتدرج المنحني في اتجاهين حتى $0.047 MPa$ دون أن يسجل أي انهيار للاصق فيها قبل انقطاع مقطع النواة الأصغري. يبين الجدول الآتي أوجه المقارنة بين نتائج اختبار العينات بالنماذج الثلاثة الأهم أ، ب، و د.

الجدول (8): مقارنة بين نتائج اختبار العينات بالنماذج أ، ب، و د لنموذج الألواح الأول A

د- ثنائي اتجاه التدرج بمنحني		ب- وحيد اتجاه التدرج		أ- مقطع ثابت							نموذج العينات	
2	1	2	1	9	8	7	6	-	3	2	1	رقم العينة
4.7	3.3	4.1	3.1	3.1	2.7	3.6	2.4		2.7	2.5	2.6	إجهاد اللاصق المطبق $\times 10^{-2} MPa$
				المتوسط = 2.77								
دون مؤشرات بعد	دون مؤشرات بعد	انهيار	انهيار	انهيار							حالة اللاصق	
داخلي	داخلي	داخلي	داخلي	طرفي باتجاه الداخل							حالة انتشار الإجهادات	
0.21	0.118	0.4	0.62	1							نسبة مقطع النواة المتوسط إلى سطح اللاصق (مركزية انتشار الإجهادات)	
عالية جداً	مؤشر العلو	عالية	أفضل	دنيا							مستوى النتائج	
انتشار أفضل لتوزع الإجهادات المنتظم على سطح اللاصق	انتشار أفضل لتوزع الإجهادات المنتظم على سطح اللاصق	انتشار أكثر مركزية للإجهادات من سابقتيهما على سطح اللاصق وانخفاض أكثر لمستوى تأثير الانحناء الطرفي للطبقتين	نتيجة انتشار أفضل للإجهادات داخل مستوي الالتصاق وانخفاض مستوى تأثير الانحناء الطرفي للطبقتين	بدء الانهيار المبكر للاصق في طرفي العينة لتفاضل الإجهادات فيهما عن الداخل نتيجة عدم قدرة طبقتي التغطية على فرض التوزع المنتظم للإجهادات على سطح اللاصق نظراً لقلّة صلابتهما على الانحناء، كما في الشكل.							الاسباب	
												

المزايا والعيوب	- سهولة تصنيع العينة، وإجراءات الاختبار، وصيغ التقييم. - انخفاض مستوى التأثير اللامركزي للتحميل. - عدم كفايتها لاختبار إجهاد انهيار شد النواة.		- تحتاج لعناية تصنيع وقياس أكثر من باقي نماذج العينات. - تحتاج لاهتمام أكثر لتخفيض مستوى التأثير اللامركزي. - يمكن تكييف أبعادها لاختبار إجهاد انهيار النواة أيضاً.	- تحتاج لعناية تصنيع وقياس أكثر من باقي نماذج العينات. - تحتاج لاهتمام أكثر من باقي النماذج لتخفيض مستوى التأثير اللامركزي. - مناسبة جداً لاختبار شدة إجهاد انهيار النواة بشكل أدق.
معامل تصحيح النتائج	1.8	1.6	1.22	1
إمكانيات تحسين الأداء دون معامل تصحيح يذكر	- تعديل جهاز الملاقط لإمسك العينة من الجهات الأربع. - أو تقوية صلابة طبقة تغطية العينة بصفحة معدنية كافية.		- مقطع متغير للجناح بسماكة اتصال كبيرة مع الجسد.	- نسبة مقطع متوسط أكبر لإحداث انهيار تام باللاصق.

نستنتج مما تقدم أنه يمكن إجراء اختبار مقاومة اللاصق باستخدام أي من نماذج العينات مع الأخذ في الحسبان العوامل المذكورة لكلٍ منها، شريطة ألا يقل عدد عينات الاختبار n عن 10 عينات لأي من النماذج المختبرة، حيث تقبل القيمة المتوسطة لنتائج هذه العينات كقيمة انهيار معيارية لللاصق وفق الصيغة الآتية:

$$\sigma_{pa,d} = \frac{\sum \sigma_{pa_i}}{n} \quad (15)$$

• مقاومة النواة على الانهيار بالشد

إذا كان اختبار العينات بالمقاطع الثابتة يقدم معطيات أولية هامة منخفضة الارتياب لسلوك النواة حتى مراحل تحميل محدودة ينهار اللاصق بتأثيرها، إلا أنها غير كافية لإحداث انهيار النواة بالشد لهذا المقطع المنتظم. إن ذلك لم يكن ليتحقق دون اللجوء إلى تصغير ابعاد المقطع الداخلي لنواة العينات بمقدار كافٍ يسمح باستمرار مقاومة اللاصق للإجهادات المطبقة عليه حتى ما بعد انهيار هذا المقطع الداخلي بقليل على الأقل، رغم ما يشوب ذلك من ارتياب في النتائج التجريبية مثل تأثير تركيز الإجهادات عليها، وسواها....الخ.

لذلك لجأنا في هذا البحث إلى النموذجين الملبين للغرض من التصغير في أبعاد المقطع، كما بينا أعلاه، اللذين كان أحدهما بالتصغير المفاجئ المحيطي لمقطع نواة العينة، والآخر بالتصغير المحيطي مستمر الانحناء حتى المستوى المتوسط لها، كما بينا أعلاه.

يلخص الجدول الآتي أوجه المقارنة بين نتائج النموذجين ج، و د.

الجدول (9): مقارنة بين نتائج اختبار العينات بالنماذج ج، و د لنموذج الألواح الأول A

نموذج العينات	ج- مقطع مترج في اتجاهين					د- ثنائي اتجاه التدرج بمنحني	
رقم العينة	1	2	3	4	5	1	2
إجهاد انهيار النواة	1.07	1.14	1.04	1.05	0.67	2.78	2.9
$\times 10^{-1} MPa$	المتوسط للعينات الأربع الأولى = 1.075					المتوسط = 2.84	
نمط الانهيار	انقطاع النواة هرمياً في أعلى المقطع المتوسط للنواة أو أسفله					انقطاع السطح المتوسط	
مستوى النتائج	دنيا					عالية مثالية مع تبيان كافة مراحل السلوك	
الاسباب	بدء الانهيار المبكر نتيجة تركيز الإجهادات في مستوى سطح التغير المفاجئ.					حالة إجهاد مثالية نتيجة التغير المستمر للمقطع وانخفاض مستوى تركيز الإجهادات إلى القيم التي يمكن إهمال تأثيرها.	
معامل تصحيح النتائج (معامل تركيز الإجهادات)	2.64					1	

تتوافق قيمة معامل تركيز الإجهادات بدقة كبيرة جداً مع المعطيات المتوفرة في المرجع [2]. نستنتج مما تقدم أنه يمكن إجراء اختبار مقاومة مادة النواة باستخدام أي من نموذجي العينات مع الأخذ في الحسبان العوامل المذكورة، ومزايا وعيوب كلٍ منهما، شريطة ألا يقل عدد عينات الاختبار n عن 10 عينات لأي من النماذج المختبرة، حيث تقبل القيمة المتوسطة لنتائج هذه العينات كقيمة انهيار معيارية لمادة النواة وفق الصيغة الآتية: (16)

$$\sigma_{t,d} = \frac{\sum \sigma_{t_i}}{n}$$

• نمذجة السلوك المعياري لعينات النموذج:

لا يعد بنتائج التجريب المبعثرة قليلاً أو كثيراً للسلوك الميكانيكي للمادة في عملية التحليل الإنشائي لتصميم العناصر الإنشائية بل يتم ذلك استناداً للخصائص الميكانيكية الفيزيائية المشتقة للمادة المكون منها العنصر بإرجاع السلوك المتبعثر للعينات المجربة إلى سلوك ميكانيكي معياري، غالباً خطي، ضمن مجال محدد للتحميل ليلبي شروط التحليل والتصميم بنظرية المرونة بمقدار كافٍ، وأخذاً في الحسبان تقنية إنتاج المادة، وظروف تحميلها، واختبارها.

تتمثل عوامل الإرجاع المعيارية لتجارب الشد بثلاثة عوامل جوهرية، الإجهاد، والتشوه، ومعامل المرونة. هذا الأمر ينطبق أيضاً على المادة المختبرة في هذه الورقة العلمية، إذ لاحظنا من خلال المخططات البيانية لسلوك العينات المختبرة أن غالبيتها يتجه للسلوك الخطي المتقارب فيما بينها ضمن مراحل تحميل معينة كلما كانت بنية نواتها أكثر تجانساً، كما بدى تأثير ذلك بعد مراحل التحميل الأولى.

فطالما يقتصر تصميم العناصر الإنشائية المكونة من مثل هذه الألواح السندويشية على قيم معاملات المرونة لمادة النواة وإجهاد انهيارها لسلوكها الخطي، سوف نسعى بدورنا إلى إرجاع سلوك العينات هذه المجربة بالشد من النموذج نفسه وعلى الجهاز نفسه إلى سلوك خطي حتى بدء تشكل إجهاد الانهيار فيها.

لأجل هذا الغرض وللاخذ في الحسبان أن يشمل معامل المرونة المرجعي التغير المتدرج في قيمه خلال تزايد التحميل الذي يتوافق عملياً مع تدرج تحميل العناصر الإنشائية، لجأنا إلى تحديد قيمة هذا المعامل المرجعي استناداً إلى عملية رياضية تتبنى إيجاد نهاية التوسيط المتتالي لعدد كافٍ من قيم معاملات المرونة للعينات المجربة لتخطي، على الأقل، مجالات مراحل التحميل الأولى لإعادة هيكلة النواة لبنيتها الداخلية وصولاً إلى قيمة بدء انخفاض هذا المعامل في مراحل التحميل الأخيرة للعينات، ولتأخذ في الحسبان التأثير الأكبر لقيم معاملات المرونة الداخلية لنتائج التجربة، على ألا تقل مراحل تحميل العينة الواحدة عن مرحلتين. ثم تحدد القيمة المرجعية النهائية للعينات المجربة بإيجاد المتوسط الحسابي لنتائج معاملات الإفرادية.

لتوضيح عملية الحساب الرياضياتي هذه ندرج المثال الآتي:

نفترض أن عدد مراحل التحميل التي تدخل في التقييم لإحدى العينات المجربة هي أربع، سوف تكون معاملات المرونة لهذه المراحل هي E_1 ، E_2 ، E_3 ، E_4 ، التي ستجري عملية التوسيط المتتالي لها حسب ما تبينه المصفوفة الآتية:

معاملات التجريب	التوسيط الأول المتتالي	التوسيط الثاني	التوسيط الثالث والأخير
E_1	-	-	-
E_2	$(E_1 + E_2) / 2$	-	-
E_3	$(E_2 + E_3) / 2$	$(E_1 + E_2 + E_2 + E_3) / (2 \cdot 2)$ $= (E_1 + 2E_2 + E_3) / 2^2$	-

$(E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4)/(2 \cdot 2 \cdot 2)$ $= (E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4)/2^3$	$(E_2 + E_3 + E_3 + E_4)/(2 \cdot 2)$ $= (E_2 + 2E_3 + E_4)/2^2$	$(E_3 + E_4)/2$	E_4
--	---	-----------------	-------

بذلك يكون معامل المرونة المرجعي للسلوك المعياري للعينة مساوياً حسب التوسيط الثالث والأخير:

$$E = (E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4)/2^3$$

يلاحظ من هذه العلاقة أن القيم المتوسطة لمعاملات المرونة قد دخلت بثلاثة أمثالها في هذه العلاقة، بينما دخلت القيم الطرفية بمثل واحد. أما مقام هذه العلاقة فهو يمثل 2^{n-1} ، حيث n عدد القيم الداخلة في التقييم.

لنفترض أن عينة أخرى ممثلة بمرحلتين بمعاملتي مرونة E_1, E_2 ، سوف يساوي معامل المرونة المعياري:

$$(E_1 + E_2)/2$$

أما لو افترضنا أن عينة أخرى ممثلة بمراحل تحميل ثلاث وبمعاملات مرونة E_1, E_2, E_3 ، سوف يساوي معامل

$$E = (E_1 + 2E_2 + E_3)/2^2$$

المرونة المعياري:

يلاحظ من هذه العلاقة أن القيمة المتوسطة لمعاملات المرونة E_2 قد دخلت بمثلين في هذه العلاقة.

فهكذا تبرز هذه العملية التوسيطية المتتالية دور القيم المتوسطة أكثر في التأثير على قيم معامل المرونة المعياري للعينة.

يلاحظ من خلال هذه المصفوفة أن عناصرها القطرية تمثل دوماً النتائج المطلوبة لمعامل المرونة المرجعي للسلوك المعياري.

كوميوترياً لا توجد صعوبات تذكر في الحساب المتتالي لهذه المتوسطات وصولاً إلى القيمة النهائية المطلوبة.

أما يدوياً فإن ذلك سيستغرق وقتاً ليس بقليل إذا لم يتم اتباع السبل المبسطة لهذا الحساب، خصوصاً عندما يكون عدد القيم الداخلة في التوسيط كبيراً.

$$\begin{bmatrix} \downarrow & \downarrow & 1 & 1 \\ 0 & \blacktriangleright & 2 & 3 \\ 0 & 0 & \downarrow & 3 \\ 0 & 0 & 0 & \blacktriangleright 1 \end{bmatrix}$$

طالما أن المهم من بين عناصر المصفوفة هي عناصر نهاية التوسيط التي تمثلها العناصر القطرية للمصفوفة، لذلك بتحليل حدود هذه العناصر نجد أن ترتيب أمثالها يشكل مصفوفة، عناصر سطرها الأول وقطرها تساوي 1، وهي من الشكل:

$$\frac{[E_1 \ E_2]}{2^{2-1}} \times [1 \ 1]^{-1} = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

بالتالي، نهاية التوسيط لمعامل مرونة يساوي:

$$\frac{[E_1 \ E_2 \ E_3]}{2^{3-1}} \times [1 \ 2 \ 1]^{-1} = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3}{2^2}$$

ونهاية التوسيط لثلاثة عوامل مرونة يساوي:

$$\frac{[E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4]}{2^{4-1}} \times [1 \ 3 \ 3 \ 1]^{-1} = \frac{E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4}{2^3}$$

ونهاية التوسيط لأربعة عوامل مرونة يساوي:

$$\frac{[E_1 \ E_2 \ \dots \ E_{n-1} \ E_n]}{2^{n-1}} \times [1 \ (n-1) \ \dots \ (n-1) \ 1]^{-1}$$

ونهاية التوسيط لعدد n من عوامل المرونة يساوي:

أي أن نهاية التوسيط لعدد n من عوامل المرونة يساوي جداء المصفوفة السطرية لقيم المعاملات بقيم عناصر العمود رقم n من مصفوفة الأمثال مقسوماً على 2^{n-1} .

أما عناصر مصفوفة الأمثال فهي تنتج عن الجمع الدرجي لعناصر الأعمدة والأسطر التي تسبق العنصر المطلوب، كما يتبين على المصفوفة المعطاة أعلاه.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	1	3	6	10	15	21	28	36
0	0	0	1	4	10	20	35	56	84
0	0	0	0	1	5	15	35	70	126
0	0	0	0	0	1	6	21	56	126
0	0	0	0	0	0	1	7	28	84
0	0	0	0	0	0	0	1	8	36
0	0	0	0	0	0	0	0	1	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

عندما لا يتجاوز عدد قيم معاملات المرونة عشر قيم نعطي تسهياً للعمل مصفوفة الأمثال الآتية. إذ يمثل السطر العلوي المسطر فيها أرقام أعمدة المصفوفة.

مثال: إذا أدخلنا في حساب معامل المرونة المعياري للعينه 1 بالمقطع الثابت القيم الأربع الأولى نجد أن نهاية التوسيط لهذه القيم هي:

$$\frac{E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4}{2^{4-1}} = \frac{[1.81 + 3 \cdot 1.92 + 3 \cdot 1.98 + 1.99]}{2^3} = 1.94 \text{ MPa}$$

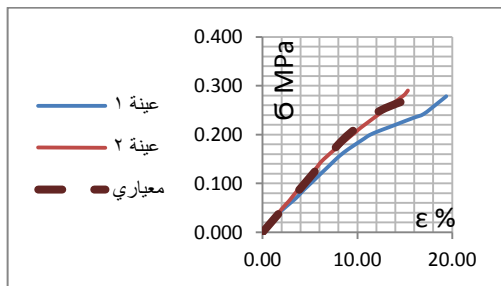
هكذا نجد أن هذا المعامل المعياري لنتائج عينات النموذج بالمقاطع المختلفة هو:

الجدول (10): قيمة المعامل المعياري لنتائج العينات بالمقاطع المختلفة للنواة لنموذج الألواح الأول A

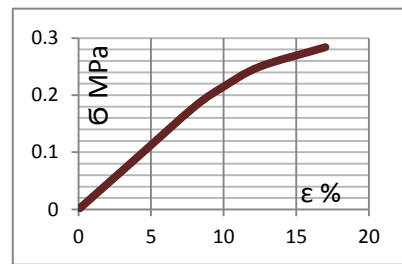
التمذج		عينات المقطع الثابت								تدرج واحد		تدرج باتجاهين				تدرج منحنى	
رقم العينة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	1	2	3	4	5	
عدد المعاملات المشمولة	4	3	4	9	9	9	14	5	8	3	6	10	16	11	16	6	
المعامل المعياري E_t	1.94	2.73	2.34	4.27	2.78	2.44	1.36	2.56	2.83	2.44	1.72	1.79	2.34	2.05	2.71	3.48	
المجموع	20.42		4.16		8.89		4.06										
E_t المعياري النهائي	$E_t = 20.42/9 = 2.27 \text{ MPa}$		2.08		2.22		2.03										

يستنتج من هذا الجدول أن معامل مرونة النواة المعياري متقارب جداً لجميع النماذج مع ترجيح دقة النموذج الثابت لعدم خضوع سلوكه لمؤثرات التدرج ودقة تصنيعها.

فنتظراً لأن اختبارات النموذج الرابع بالتغير المنحني المستمر قد أظهرت جميع مراحل السلوك حتى تشكل إجهاد الانهيار، والذي لوحظ من خلاله أن التشوه الذاتي البين للنواة قد بدأ تشكله عند إجهاد يقارب 0.2 MPa ، وتشوه مقداره حوالي 8%، ليصل التشوه عند إجهاد الانهيار إلى 17%، يكون مخطط السلوك المعياري التصميمي للشد كما هو مبين في الشكل (15)، إذ تسلك النواة سلوكاً خطياً حتى بلوغ الإجهاد 0.19 MPa ، بمعامل مرونة 2.25 MPa ، بينما يظهر الشكل (16) موضع هذا المخطط المعياري مع المخططين البيانيين لسلوك عيني النموذج د بالتدرج المنحني.



شكل (16): مخطط السلوك المعياري وعيني النموذج د



شكل (15): مخطط السلوك المعياري لألواح النموذج A

مناقشة نتائج التجريب لنموذج الألواح الثاني B المقدم

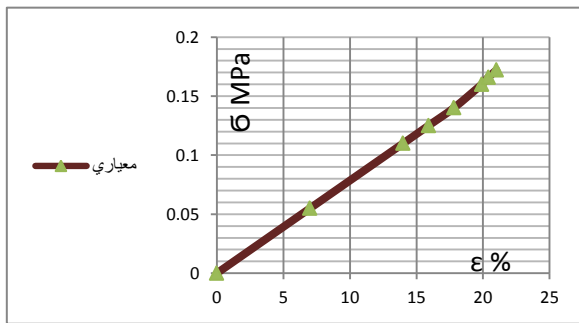
لم يعد هناك ضرورة من مناقشة نتائج التجريب لنموذج الألواح الثاني B لإعادة تسليط الضوء على كل ما ذكر من أدوات، ووسائل، واسس اشتقاق السلوك المعياري التصميمي وخصائصه، بل تأتي أهمية هذا الأمر لتأكيد المؤكد أن ما تم معالجته واستنتاجه يسري أيضاً على أي مصدر آخر من مصادر الألواح السندويشية، أياً تكن مكوناتها وأبعادها

عندما يتم اختبارها بتقنيات مناسبة. من بين هذه التقنيات المضافة إلى ما ذكر أعلاه هي ضرورة تثبيت العينة المقلمة ضمن الملاقط باتجاه التقليل، الذي يكسب طبقة التغطية صلابة أكبر أثناء الاختبار، فينعكس تأثيرها إيجاباً على نتائج الاختبار. لذا يبين الجدول الآتي تأثير انخفاض إمكانية تقنية تصنيع العينات على نتائج اختبارات شد النواة بالنموذجين ج، و د لمثل هذا النوع من الألواح ذي السماكة المنخفضة نسبياً، ووسائل معالجتها.

الجدول (11): تأثير انخفاض إمكانية تقنية تصنيع العينات على نتائج اختبار شد النواة بالنموذجين ج، و د لنموذج الألواح الأول B

د- ثنائي اتجاه التدرج بمنحني		ج- مقطع مترج في اتجاهين			نموذج العينات
2	1	3	2	1	رقم العينة
1.56	1.88	0.6	0.83	1.13	إجهاد انهيار النواة $\times 10^{-1} MPa$
المتوسط = 1.72		المتوسط للعينات الثلاث = 0.85			
انقطاع السطح المتوسط للأولى، وهرمي للثانية نتيجة انخفاض دقة التدرج المنحني فيها		انقطاع النواة هرمياً في أعلى المقطع المتوسط للنواة أو أسفله			نمط الانهيار
عالية مثالية لتبيان كافة مراحل السلوك		دنيا			مستوى النتائج
1		2.03			معامل تصحيح النتائج (معامل تركيز الإجهادات)
- إن انخفاض معامل تركيز الإجهادات لا يعني اختلاف النتائج عن النموذج A، وإنما يكمن سبب ذلك في الصعوبة الكبيرة لتصنيع العينة بالتدرج المنحني لصغر ارتفاع العينة، كما يبدو ذلك من الصور الجدولية، مما أدى، أيضاً، إلى تأثير تركيز إجهادات بحدود دنيا على سلوكها وإجهاد انهيارها.		- لذلك يفضل للألواح بالسماكات الصغيرة أن تحضر عينات اختبار بأجنحة متغيرة المقطع خطأً عوضاً عن التدرج المنحني لضبط تقنية عمل العينة أكثر.			ملاحظات
- يفضل تثبيت العينة المقلمة ضمن الملاقط باتجاه التقليل.					

من ناحية أخرى نذكر اختصاراً أن معالجة نتائج الاختبار الأخرى لهذا النموذج من الألواح بالطرق الرياضية المبينة



شكل (17): مخطط السلوك المعياري لألواح النموذج B المقلمة

أعلاه قد نتج عنها أن إجهاد انهيار اللاصق للعينات بالمقطع الثابت هو $\sigma_{pa} = 2.2 \cdot 10^{-2} MPa$ ، وأن معامل المرونة المعياري التصميمي يساوي $E_t = 0.85 MPa$. بذلك يكون مخطط السلوك المعياري التصميمي كما في الشكل (17)، الذي يبقى خلاله هذا السلوك خطياً تماماً حتى الإجهاد $\sigma_t = 1.1 \cdot 10^{-1} MPa$.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- يتم تصميم العناصر الإنشائية بالألواح السندويشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين وحشوة بينهما من مادة البوليوثيرتان باشرط خصائص السلوك المرن التي تتمتع بها هذه المكونات.
- 2- يشترط التحليل الإنشائي تحقيق مكونات اللوح المستخدم للخصائص الميكانيكية والفيزيائية الداخلة في قوانين التصميم، وفي مقدمها إجهاد شد النواة، ومعامل مرونتها.

- 3- هدف البحث توطین أدوات، ووسائل التجريب، وأسس معالجة نتائجها لاشتقاق القيم المعيارية التصميمية لمكونات مثل هذه الألواح.
- 4- تحديد الخصائص الميكانيكية المتجانسة لطبقة التغطية المعدنية يمكن أن يتم من خلال اختبار عدد محدود من العينات بالأجهزة المخصصة لهذا الغرض، وبالأبعاد المناسبة لإجراء الاختبار.
- 5- تباين تقنية إنتاج الألواح السندويشية يتطلب إيجاد مخطط سلوك معياري تصميمي لنواتها مبني على نتائج اختبار عينات عشوائية من الألواح المستخدمة في المنشأة الهندسية لا يقل عددها عن اثنتي عشر عينة.
- 6- تزداد دقة خصائص السلوك المعياري لنواة اللوح السندويشي أكثر كلما ازداد عدد العينات المختبرة.
- 7- تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها فعالية جهاز التجريب المستخدم في متن هذه الورقة العلمية لإجراء الاختبارات اللازمة على نواة اللوح السندويشي، لاسيما بإدخال تحسينات تقنية أكثر على أدائه.
- 8- يمكن إجراء اختبار اللاصق باستخدام أحد نماذج العينات الأربع المدرجة في متن هذا البحث شرط تصحيح النتائج بالمعاملات المشتقة المقابلة للعينة المستخدمة.
- 9- أفضل نماذج هذه العينات لاختبار سلوك الشد، وإجهاد انهيار اللاصق هو النموذج د بنسبة مساحة للمقطع المتوسط لا تزيد عن 20% من سطح الالتصاق لأجل اختبارات الشد، ولا عن 30% لاختبار اللاصق لعدم الحاجة لتصحيح النتائج.
- 10- أفضل نماذج الاختبار لتحديد معامل مرونة النواة خلال مراحل تحميل منخفضة هو النموذج أ بالمقطع الثابت.
- 11- يفضل تثبيت عينة الاختبار المقلمة داخل الملاقط في اتجاه التقليل للحصول على نتائج اختبار أكثر دقة.
- 12- يحدد معامل المرونة المعياري التصميمي للعينات المجربة بإيجاد متوسط نهايات التوسيط لمعاملات المرونة للعينات المجربة بالطريقة الرياضية المعرف عنها في متن هذا البحث.
- 13- يحدد إجهاد انهيار شد النواة بالقيمة المقابلة لانقطاع العينة بسبب استمرار تزايد الإجهاد والتشوه حتى تلك القيمة.

التوصيات:

- 1- الاهتمام مستقبلاً باستمرار إجراء أبحاث علمية تجريبية تحليلية على مثل هذه الألواح السندويشية لتوطيد توطین استثمار منتجاتها المحلية علمياً أكثر.
- 2- يفضل إجراء الاختبارات المستقبلية إما تقوية صفيحة تغطية العينة بصفيحة صلبة، أو تطوير ملاقط الجهاز المستخدم لإمسك العينة من جهاتها الأربع.
- 3- العمل على تزويد مخبر الكلية مستقبلاً بجهاز خاص لاختبار مثل هذه المواد الحساسة جداً، أو دعم تحسين تقنيات الجهاز المصنع للبحث لتعميم نتائجها العلمية على الأوساط الهندسية الأخرى.

References:

- [1] Davies, J.M.: *Sandwich panels, Thin-Walled Structure*, Vol.16, pp. 179-198, 1993.
- [2] Pokharel, Nayrayan: Doctorate Thesis, *Behavior and design of sandwich panel subject to local buckling and flexural wrinkling effects*, Queensland university, PP. 1-305, 2003, Australia.
- [3] CIB2000, International Council for Building Research, Studies and Documentation " European Recommendations for Sandwich Panels, Part 1, Design", CIB Publication, pp.1-900.
- [4] Omran, J & Sakkour, A: *A Contribution in studying the stability of the flat and lightly profiled faces of polyurethane cored sandwich panel*, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (2), pp. 353-368, 2014

- [5] 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.
- [6] Zenkert, D.: *An introduction to sandwich construction*, Engineering Materials Advisory Services Ltd, Sol hull, UK, pp.1-60, 1995.
- [8] Sakkour, Akram: *Mechanics of Materials*, Bd. 2, Tishreen University, pp. 1-710, 2012.