

## تأثير التحميل المباشر الموزع على السلوك المعياري لاستقرار العناصر السندويشية الخفيفة المنتجة محلياً بطبقتي تغطية معدنية ونواة من البوليوريثان /PUR/

د. أكرم صفور\*

جلال عمران\*\*

(تاريخ الإيداع 2 / 6 / 2020. قبل للنشر في 29 / 9 / 2020)

### □ ملخص □

يتزايد توظيف العناصر السندويشية الخفيفة في المنشآت الهندسية يوماً بعد يوم نظراً لإمكانية تميزها بالعازلية العالية صوتياً وحرارياً علاوة على تكبير استثمارها إنشائياً كعناصر سريعة التشييد حسب المواد المستخدمة فيها، وتقنية انتاجها لتعمل كجدران، وأسقف حاملة داخلية وخارجية، حيث تكون 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.

لا تتوفر لدينا حتى الآن مرجعيات علمية رسمية تتبنى تجهيزات معينة بألية اختبار مادة النواة لهذه الألواح بالدرجة الأولى، وإدراج مواصفاتها الميكانيكية والفيزيائية ضمن نظام حساب إنشائي محدد لضبط معايير التصميم الإنشائي لها من خلال التعريف بنظام سلوكها، ومعاملات مرونتها على الشد، والضغط، والقص، والالتصاق المتعلقة بالدرجة الأولى بجودة ومواصفات المنتج، سواء بالتحميل المباشر، أو الطويل الأمد لتحديد الحمل الأقصى التصميمي لهذه الألواح. تهدف هذه الورقة البحثية إلى التعريف بنظام اختبار تأثير التحميل الموزع تحميلاً استاتيكيماً مباشراً متبدلاً على اللوح السندويشي وآلية سلوكه، للاستدلال بمنهجية الاشتقاق تجريبياً لعلاقة السلوك المعياري التصميمي للمنتج المجرب كحمولة - انتقال، أو بالأحرى إجهاد- انتقال، 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 القصي، مخطط السلوك المعياري إجهاد- انتقال، تناوب التحميل الستاتيكي.

\* 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.

## **Effect of direct distributed load on the normative behavior to the stability of the light locally produced sandwich panels with two steel faces and a core of polyurethane (PUR)**

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

**(Received 2 / 6 / 2020. Accepted 29 / 9 / 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.

We do not have yet official scientific references that adopt certain equipment by the mechanism of testing the core material of these panels in the first place, and include their physical and mechanical properties within a specific structural calculation system to adjust the structural design criteria by defining its modulus of elasticity on tension, compression, shear and adhesion related primarily to the quality and specifications of the product, either direct or long term load to determine the maximum designed load of these panels.

This paper seeks to introduce a system to test the effect of distributed direct static load substituted on the sandwich panel and its behavioral mechanism, to infer the empirical derivation for the relationship of the designed normative behavior of the tested product as load-transition, or rather a stress-transition, by 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 panel.

**Keywords:** Sandwich Panels, Flat Cover, Polyurethane Core, Critical Wrinkling Stress, stress-strain diagram, Alternate static stress.

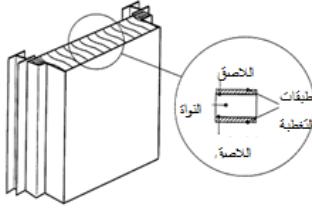
---

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

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

## مقدمة:

تسارع محلياً وعالمياً في العقود الأخيرة إنتاج واستخدام الألواح السندويشية 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 السندويشي [1]



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

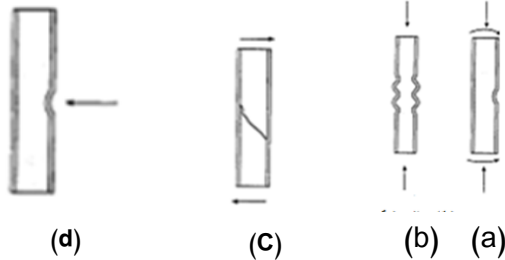


الشكل (3): سقف بألواح سندويشية لمعمل محلي

من هذه العناصر السندويشية المنتجة بالأطوال المطلوبة كعناصر جاهزة، والمستخدمة بشكلٍ واسع في مجال الهندسة المدنية تلك المؤلف 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 السندويشية، والذي يمثل مبنى المكتب الدولي Woolworth بجنوب استراليا [2]، حيث يطلب من هذه العناصر السندويشية مقاومة كل من الحملات الشاقولية وقوى دفع وسحب الرياح، إضافة لتلك الناتجة عن الفروقات الحرارية داخلياً وخارجياً.

أما الشكل (3) فيبين استخدام الألواح السندويشية في المنشآت الهندسية المحلية كسقف لأحد المعامل لتحمل الحملات الشاقولية والتلججية أو حملات الرياح، ونقلها إلى مدادات الجيزان الثانوية المعدنية.



الشكل (4): أنماط انهيار الألواح السندويشية [3]

يتفاوت نمط الانهيار لهذه العناصر السندويشية المنعطفة بين الانهيار بالتجعيد الموجي (Wrinkling) لطبقة التغطية المضغوطة نتيجة تأثير الحملات عمودياً على مستوى اللوح، كما يبينه الشكل (b-a-4)، والانهيار القصي لنواة اللوح حسب طبيعة الحملات المؤثرة (شكل 4-c)، دون أن نستثني من هذه الأنماط إمكانية التشوه الموضعي لنقاط ومواضع تأثير الحملات على اللوح السندويشي (شكل 4d)، وأنماط الانهيار هذه مبنية تجريبياً بالشكل (b-a-5) للانهيار الموجي بالتجعيد، والشكل (c-5) للانهيار القصي، والشكل (d-5) للانهيار بالتحنيب، أو التشوه الموضعي [4].



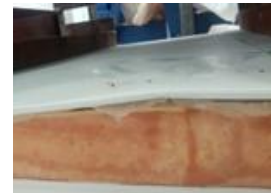
d



c



b

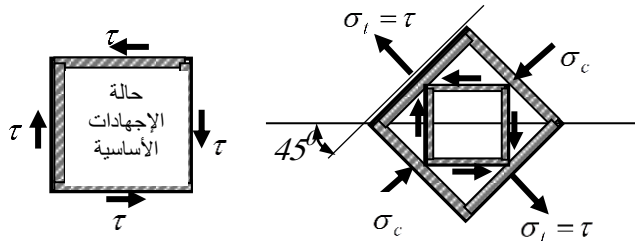


a

(a) صورة لعينة توضح انفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحملات، (b) صورة لعينة توضح تمزق النواة وانفصال طبقة التغطية بين نقطتي تطبيق الحملات، (c) انهيار قصي للنواة بزاوية 45 درجة، (d) صورة لعينة تظهر التشوه الموضعي الحاصل عند حدوث الانهيار مع انفصال لمادة النواة

الشكل (5): أنماط انهيار عناصر الألواح السندويشية 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 [3]، [5]، [6]، إنما يتم من خلال الخصائص الميكانيكية الفيزيائية على الشد لمادة النواة، والتصاقها بطبقة التغطية، إذ كلما ازدادت

مقاومة الالتصاق للشد ازدادت مقاومة اللوح للانهيال بالتجعيد الموجي، وتقدم سيطرة ظاهرة الانهيال القصي. يمكن أن تحدث أنماط الانهيال هذه بتأثير كلٍ من التحميل المباشر بالشدات الكافية لإحداثها، أو بالتحميل طويل الأمد للوح بشدات أقل نتيجة الزحف الذي تتعرض له مكونات اللوح بتغير أبعاد مقاطعه العرضية، وخصوصاً نواته بالدرجة الأهم التي تخضع لانتقالات قصية مستمرة تتقدم من خلالها إمكانية تشكل ظواهر التحنيب من موضعي، وتجعيد على حالة الانهيال القصي له.

ترتبط هذه الانتقالات القصية المستمرة وسرعتها بأبعاد العنصر وشدة التحميل المؤثرة عليه وطبيعة تأثيرها من جهة، وبالخصائص الميكانيكية الفيزيائية لبنية مادة نواة اللوح، وكثافتها، وتقنية إنتاجها من جهة ثانية. نسعى من خلال هذه الورقة العلمية بالدرجة الأولى إلى التعريف الأعمق هندسياً بآلية الاختبار لسلوك مثل هذه الألواح بنواة البوليوريثان المنتجة محلياً بتأثير التحميل الموزع المباشر حتى الانهيال مع إمكانية تبدل اتجاه التحميل ليؤدي إلى حدٍ كبيرٍ آلية عمل العناصر الإنشائية من الناحية العملية، وتحليل نتائج هذا الاختبار لصياغة السلوك المعياري للمنتج المستخدم، وذلك لرفد المعرفة المحلية بشروط التصميم اللازمة للعناصر الإنشائية المكونة من مثل هذا المنتج.

### 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، وآلية سلوكها منفردة أو مجتمعة.

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 البوليوريثان PUR. ونظراً لندرة المرجعيات والأبحاث العلمية المحلية حتى الآن التي تعرف بالسلوك الإنشائي لمنتجاتنا المحلية على الأقل، هذا البحث يهدف لتوطيد وسائل الاختبار المحلية 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 للوح السندويشي بحشوة البوليوثيريثان على التحميل المباشر الستاتيكي بحمولات موزعة بانتظام متبدلة اتجاه التأثير على طول نماذج من عينات اختبار عشوائية لمنتج محلي بوسائل اختبار، وآليات تحميل أعدت خصيصاً لهذا الغرض.

### طرائق البحث ومواده:

بنيت طرائق إجراء البحث على وقائع الدراسات المرجعية التحليلية والتجريبية للألواح والعناصر السندويشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين لحشوة من البوليوثيريثان، وشكلت الألواح المماثلة المنتجة محلياً مادة البحث التجريبي لإجراء اختبارات إجهادات الانهيار لهذه الألواح، وتحديد مخطط الحمولة انتقال، أو الإجهاد انتقال التجريبي، والمعيار لها، كأحد أهم مستلزمات الدراسة والتصميم بتأثير التحميل المباشر على هذه العناصر.

استحضرت لهذا الغرض إلى مخبر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين عينات عشوائية مغلقة من نماذج هذه الألواح المنتجة محلياً بسطحها المستوي، أو المقلم قليلاً. سماكة النموذج الكلية 81 ملم، ونواته من البوليوثيريثان 80 ملم، أما سماكة كل طبقة تغطية للنواة فهي 0.5 ملم، ومصنوعة من الفولاذ ST52 المحدد تجريبياً في مخبر البحث. نتيجة عدم توفر أجهزة اختبار مستقلة في المخبر لإجراء التجارب المطلوبة بالتحميل الموزع لمثل هذه الألواح لتوصيف السلوك الحقيقي للعينة المختبرة خلال مراحل التحميل والقياس، قمنا بإعداد أجهزة يدوية التحضير والتحميل لأداء المطلوب بتقنية يمكن رفع سويتها لاحقاً ليصبح العمل بها أكثر يسراً كأجهزة محلية من أجهزة المخبر الأساسية المخصصة لاختبار أمثال هذه الألواح شرائحياً بأبعاد مختلفة. صمم الجهاز الأول وفق خطة البحث المعدة بنموذجين من الساعات لتأمين مقارنة كبيرة لتأثير التحميل الموزع على شرائح كبيرة نسبياً من الألواح أبعادها  $d \times 1000 \times 2000$  mm، حيث  $d$  سماكة اللوح السندويشي.



الشكل (7): نموذج جهاز تحميل العينات الموزع بانتظام على كامل اللوح المنفذ مخبرياً

يبين الشكل (7) حوض التحميل المكون من مجموعة من الصفائح المعدنية الرقيقة المتوضعة بشكل منفصل جانب بعضها لتسمح باستمرارية التحميل الموزع على السطح العلوي لشريحة اللوح المختبرة عند ملء الحوض تدريجياً بالحصى الرملي معلوم الوزن لتحديد شدة الحمولة المطبقة على اللوح.

يلاحظ على الشكل أن اللوح مستنداً بسيطاً على مسندين طرفيين، ومزود في أسفله بجهاز قياس الانتقالات أسفل اللوح، مع مسطرة مدرجة مرافقة ومشعر معدني دقيق لقراءة هذه الانتقالات على المسطرة أيضاً.



الشكل (8): نموذج جهاز تحميل العينات الموزع بانتظام

على العينات الشرائحية المنفذ مخبرياً

أما الشكل (8) فإنه يبين الجهاز الثاني المؤلف من حوض التحميل الصفائحي المعدني الرقيق المملوء تدريجياً بالحصي الرملي المحدد الوزن مسبقاً لتحديد شدة الحمولة المطبقة على اللوح، وليسمح باستمرارية التحميل الموزع على السطح العلوي لشريحة اللوح المختبرة بأبعاد  $dx100X1000$  mm.

الحوض موضوع ضمن حاضنة معدنية تمنع تشكل مزدوجات قوى عمودية على طول اللوح يمكن أن تخل بالتأثير الشاقولي المركزي للحمولة.

يلاحظ على الشكل أن اللوح مستند، أيضاً، استناداً

بسيطاً على مسندين طرفيين، ومزود في أسفله بجهاز قياس الانتقالات أسفل اللوح، مع مسطرة مدرجة مرافقة ومشعر معدني دقيق لقراءة هذه الانتقالات على هذه المسطرة أيضاً.

يتم إجراء الاختبارات وفق المراحل الآتية:

- 1- وضع الشريحة اللوحية الكبيرة أو الصغيرة على مساندها.
- 2- تثبيت أجهزة قياس الانتقالات أسفل اللوح.
- 3- وضع الحوض المعلوم الوزن الحافظ للأحمال على الشريحة اللوحية مع تثبيت الحاضنة مانعة الدوران على الشريحة الصغيرة.

4- إفراغ الحمولات المطلوبة تدريجياً بالشكل الموزع بانتظام داخل الحوض وتسجيل الانتقالات المرافقة.

يهدف إجراء هذه الاختبارات إلى تحديد إجهادات الانهيار للوح من جهة، وإيجاد علاقة شدة التحميل أو إجهاد التحميل بالانتقال المرافق المرتبط ارتباطاً جوهرياً بمعامل القص لحشوة اللوح بالدرجة الأولى من جهة ثانية.

يتم الحصول على معامل القص الانعطافي المرافق للانتقالات الحاصلة في العينة من خلال استخدام علاقات السلوك المرن لانتقال الجيزان على الانعطاف والقص الخاضعة لحمولات موزعة بانتظام، إذ يتألف انتقال الجائز باللوحة السندويشي موضوع البحث، كما في الشكلين أعلاه، من مجموع انتقالين:

1- انتقال انعطافي بالدرجة الأولى لصفحتي اللوح مع إهمال تأثير الانتقال القصي لهما المنتهي إلى الصفر على دقة النتائج.

2- انتقال قصي بالدرجة الأولى لنواة اللوح مع إهمال تأثير الانتقال الانعطافي لها المنتهي إلى الصفر على دقة النتائج.

هكذا، فلأجل مقطع الشريحة اللوحية المعطاة في الشكلين (9،10) تحسب الانتقالات كما يلي [7] [8]:

الانتقال الانعطافي لصفحتي اللوح:

$$w_M = \frac{5ql^4}{384D} = \frac{5Fl^3}{384D} \quad (1)$$

حيث  $q = F/l$ ، و  $F$  الحمولة للوزن الكلي المحملة به عينة الاختبار،  $D = EI$  صلابة اللوح السندويشي.

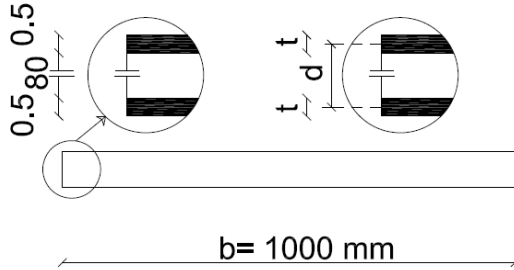
الانتقال القصي لحشوة اللوح:

$$w_Q = \frac{1.2 Fl}{8 G_c A} \quad (2)$$

لذلك تكون العلاقة بين انتقال العينة ومعامل قص النواة بالشكل:

$$G_c = \frac{1.2 Fl}{8 A w_Q} \quad (3)$$

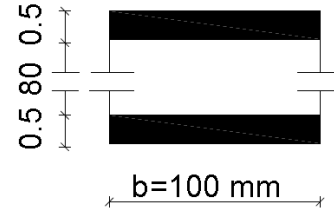
حيث  $w_Q = w - w_M$  للعينات المجرية، و  $w$  الانتقال المقاس للعينة عند كل مرحلة تحميل.



الشكل (10): المقطع العرضي للوح السندويشي

$$I = btd^2 / 2 = 16200625mm^4$$

$$A = bH = 1000 \cdot 81 = 81000mm^2$$



الشكل (9): المقطع العرضي للشريحة السندويشية المترية

$$I = btd^2 / 2 = 162006.25mm^4$$

$$A = bH = 100 \cdot 81 = 8100mm^2$$

يحسب إجهاد الضغط على مقطع طبقة التغطية بعد إهمال دور النواة في تحمل مثل هذا الإجهاد بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{ql^2}{8 I} \frac{d}{2} = \frac{Fl}{8 I} \frac{d}{2} \quad (4)$$

$$\tau_c = \frac{F t d}{2 I} \quad (5) \quad \text{أما إجهاد القص الأعظمي في النواة فيحسب بالعلاقة الآتية:}$$

لتحقيق الغاية المرجوة من هذه الورقة العلمية أجريت الاختبارات المطلوبة بالجهازين على عدد من شرائح العينات وبلغ مجموع التجارب المستثمرة في البحث 30 تجربة بالسطح المستوي لطبقة التغطية.

### النتائج والمناقشة:

أولاً: نماذج العينات الشرائحية  $81 \times 100 \times 1000mm$

تبين الصور في الشكل (11) بعضاً من نماذج شرائح العينات المجرية بالأبعاد  $81 \times 100 \times 1000mm$  حتى انهيارها، والتي يظهر من خلالها بشكل واضح نمط الانهيار القصي عند المسند اليساري للعينة رقم 1، إضافة لنمطي انهيار العينة رقم 4 في الصورة (4-a).



الصورة (2): العينة رقم 2 (تجربة 9)



الصورة (1): العينة رقم 1 (تجربة 5)



الصورة (4-a): العينة رقم 4 (تجربة 12)



الصورة (3): العينة رقم 3 (تجربة 11)



الصورة (5): العينة رقم 5 (تجربة 13)



انهيار بالتنفير وسط العينة



انهيار بالانضغاط والقص

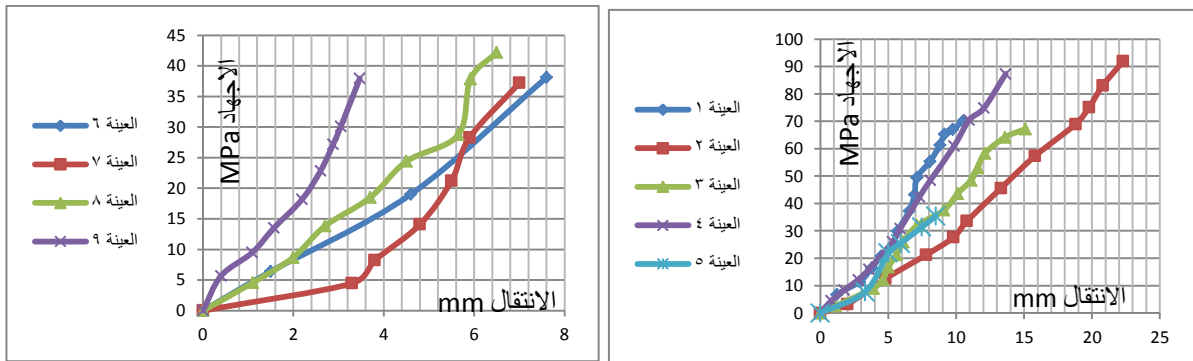
الصورة (4-b): أنماط انهيار العينة رقم 4 (تجربة 12)

الشكل (11): صور تبين نماذج شرائح العينات المجرية بالأبعاد 81×100×1000 mm حتى انهيارها

يجري اختبار العينة بتحميلها بحمولات متدرجة وتسجل الانتقالات المرافقة لها لتتم معالجة هذه النتائج تحليلياً بالعلاقين (4)، و (5)، وذلك لحساب إجهاد الضغط المطبق في صفيحة التغطية العلوية، وإجهاد القص في النواة لكل مرحلة تحميل.

تبين المخططات البيانية في الشكل (12) علاقة إجهادات ضغط صفيحة التغطية بالانتقالات المرافقة للعينات المختبرة حتى مراحل متقدمة للإجهاد المطبق. إذ يتضح من هذه المخططات انخفاض الانتظام في سلوك غالبية هذه العينات خلال مراحل الإجهاد المختلفة من جهة، ومدى تباين سلوكها فيما بينها من جهة ثانية.





b: مخططات إجهاد- انتقال العينات 6...9

a: مخططات إجهاد- انتقال العينات 1...5

الشكل (12): مخططات إجهاد الضغط- انتقال العينات المختبرة

يدل هذا التباين على مدى التآرجح في تقنية إنتاج اللوح السندويشي، وتراجع التجانس في بنية النواة والتصاقها بطبقتي التغطية، بغض النظر عن العيوب التجريبية الثانوية التي يمكن أن ترافق مراحل اختبار العينة. لقد لاحظنا أثناء اختبار العينات أن العينة تخضع عند مرحلة معينة من مراحل الإجهاد بالتحميل المباشر لتشوهات ذاتية (انتقالات ذاتية) دون زيادة التحميل لتعبر بذلك عن بدء المرحلة الأولى من تشكل حالة الانهيار للعينة المتمثلة بتراجع الترابط بين النواة وطبقة التغطية في مكان العزم الأعظمي وسط المجاز بسعي إجهادات ضغط الطبقة لإحداث تحنيط بالتجعيد لهذه الطبقة، أو نتيجة اقتراب إجهادات الشد القطري لمادة النواة قرب المساند من حدودها القصوى قبل انقطاع النواة قطعياً فيها.

يبين الجدول الآتي ملخص النتائج لاختبار العينات سواء بالإجهاد حتى الانهيار للعينات المختبرة 1...6، أو حتى حدود معينة لتوفير الإمكانية بإعادة تحميلها على وجهها الآخر للعينات 7..9، علماً أن معامل قص النواة  $G_c$  المعطى في الجدول قد تم حسابه بموجب العلاقة (3) المبينة أعلاه بعد الأخذ في الحسبان نتائج الحساب للانتقالات الانعطافية والقصية بالعلاقين (1)، و (2) على الترتيب.

الجدول (1): نتائج اختبار العينات الشرائحية 81×100×1000mm بالتحميل المباشر

موزع بانتظام			مستوي						حالة التحميل		
مستوي			مستوي						حالة سطح اللوح		
تحميل دون الوصول الى الانهيار			تحميل حتى الانهيار						نموذج التحميل		
9	8	7	6	5	4	3	2	1	رقم العينة		
23	16	15	14	13	12	11	9	5	رقم التجربة		
سليمة			سليمة						حالة العينة		
طولي			طولي						اتجاه العينة		
38.0	42.21	37.2	38.1	35.35	87.3	55.34	68.69	لم يراقب	$\sigma$	إجهاد التشوه	
0.076	0.084	0.074	0.076	0.071	0.175	0.111	0.138		$\tau$	الذاتي للعينة	
0.0035	0.0065	0.0071	0.0078	0.0085	0.0137	0.0122	0.0158		$\delta/l$ المرافق		
متوسط الإجهاد المطبق 39.13			56.96						$\sigma_{av}$	متوسط إجهاد	
متوسط الإجهاد المطبق 0.078			0.114						$\tau_{av}$	التشوه الذاتي	
									$MPa$		

0.0057	0.0116							متوسط $\delta/l$ المرافق	
4.47	3.11							معامل القص $G_{c,av}$ (MPa)	
	66.45	62.37	93.66	67.17	83.06	79.16	$\sigma_u$	إجهاد الانهيار	
	0.133	0.125	0.187	0.134	0.166	0.158	$\tau_u$		
	0.0140	0.0118	0.0169	0.0151	0.0208	0.0107	$\delta_u / l$		
	تشقق قصي	تشقق قصي	تجدد وتشوه موضعي للمسند وانضغاطه حوالي 12 مم	تشقق قصي	تشوه موضعي للمسند وانضغاطه حوالي 16 مم	قص وتجعيد	حالة الانهيار		
	75.31							$\sigma_{u,av}$	متوسط إجهاد الانهيار لتمائل حالة سطح العينة
	0.150							$\tau_{u,av}$	
	0.0149							متوسط $\delta_{u,av} / l$	
	3.22							المعامل $G_{cu,av}$ (MPa)	
$\delta$ : الانتقال المرافق لبدء التشوه الذاتي للعينة بالطول $l$ ، الانتقال المرافق للإجهاد المطبق. $\delta_u$ : الانتقال المرافق لإجهاد الانهيار $\sigma_u$ للعينة بالطول $l$ .								تعريف	

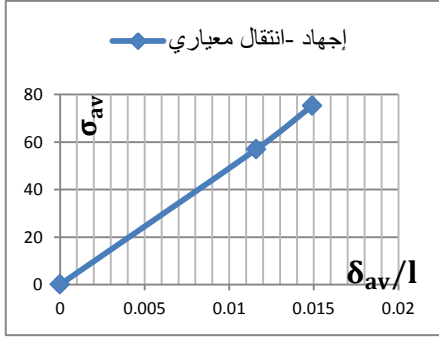
نبين بداية أن مناقشة نتائج الاختبار بالوسائل المعتمدة ستوجه لتسليط الضوء على توظيف هذه النتائج لتفي بغرض التوصيف بدقة كافية لآلية السلوك الميكانيكي الانعطافي القصي لمكونات الألواح المختبرة بخصائصها الميكانيكية الفيزيائية، والتي تشكل قاعدة البيانات الأساسية لتبيان آلية اشتقاق السلوك المعياري التصميمي وخصائصه، دون أن يشكل مستوى هذه الخصائص لنماذج ومصادر الألواح المشمولة بالبحث فارقة عامة بحد ذاتها، لأن هذا المستوى متبدل من مصدرٍ لآخر حسب مكونات اللوح ومواده.

لا يعد نتائج 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 موحد، 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 الانعطاف القصي للألواح السندويشية بشكلٍ جوهريٍّ بأمرين أساسيين:

1- علاقة الحملات المطبقة بالانتقالات المرافقة لها، أو بالأحرى علاقة إجهادات طبقات التغطية وقص النواة بالانتقالات الناجمة عن تطبيق الحملات على اللوح السندويشي.

2- معامل المرونة القصي لمادة النواة المتغير بتغير شدة الحملات المؤثرة على اللوح، أو الإجهادات المطبقة على مكونات اللوح، كما تبين ذلك من النتائج المدونة في الجدول السابق، نتيجة استمرار تغير البنية الداخلية للنواة باستمرار التغير لشدة هذه الإجهادات.



الشكل (13): المخطط البياني المعياري لعلاقة إجهاد - انتقال

يرتبط الأمران مع بعضهما ارتباطاً وثيقاً بالعلاقات المذكورة أعلاه، إذ أن تحديد أيٍ منهما يقود بالضرورة إلى الآخر عبر تلك العلاقات. لأجل ذلك مثلنا تخطيطياً في الشكل (13) القيم المتوسطة لإجهادات ضغط طبقة تغطية اللوح  $\sigma_{av}$  المبينة في الجدول السابق مع النسبة  $\delta_{av}/l$ ، إذ تتضح من هذا المخطط البياني إمكانية قبول الارتباط الخطي بينهما بدقة كافية حتى الاقتراب من

إجهادات الانهيار للعينة، نستنتج أن علاقة هذا الارتباط الخطي هي بالصيغة:

$$\sigma = 4910 \frac{\delta}{l} \quad (6)$$

تمثل هذه المعادلة الصيغة المعيارية لنتائج اختبار العينات.

**مثال 1:** إذا كان إجهاد الضغط المسموح تطبيقه على طبقة تغطية اللوح السندويشي المستند استناداً مفصلياً في طرفيه  $57MPa$ ، إذ إن طوله  $l=1000mm$ ، وعرضه  $b=500mm$ ، وسماكته  $8mm$ ، وهو من المنتج المحلي المختبر في هذه الورقة العلمية، ما هي قيمة الحمولة الموزعة المسموحة، وما هو الانتقال الحاصل، ومعامل القص المرافق.

نستنتج من الخصائص الهندسية لمقطع اللوح أن:  $I = 81003 \text{ mm}^4$

ونجد من العلاقة (4) أن:  $q = \frac{16\sigma I}{dl^2} = 9.18 \text{ N/mm}$ ، ومحصلتها:  $F = 9.18 \cdot 1000 = 9180 \text{ N}$

ونستخلص من العلاقة (6) أن:  $\delta = \sigma l / 491034 = 11.6 \text{ mm}$

أما الانتقال الانعطافي الناتج عن الحمولة فهو يساوي حسب العلاقة (1):

$$w_M = \frac{5ql^4}{384D} = \frac{5Fl^3}{384D} = \frac{5 \cdot 9180 \cdot 1000^3}{384 \cdot 81003 \cdot 210000} = 0.702 \text{ mm}$$

وبذا يكون الانتقال القصي:  $w_Q = w - w_M = 11.6 - 0.702 = 10.9 \text{ mm}$

ومعامل القص حسب العلاقة (5):  $G_c = \frac{1.2 \cdot 9180 \cdot 1000}{8 \cdot 81 \cdot 500 \cdot 10.9} = 3.11 \text{ MPa}$

فهذه النتائج هي نفسها التي حصلنا عليها بمعالجة نتائج التجريب كما يلاحظ في الجدول (1).

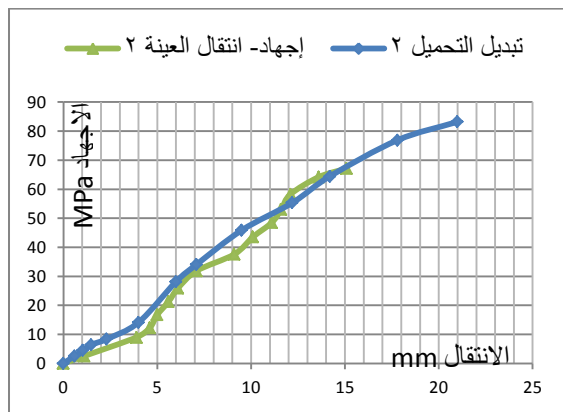
**مثال 2:** حساب الانتقال ومعامل القص للوح بمعطيات المثال 1، ولكن بتطبيق إجهاد  $40MPa$ .

باتباع التحليل وفق المثال 1 نجد أن:  $\delta = \sigma l / 491034 = 8.15 \text{ mm}$ ، وأن  $G_c = 3.11 \text{ MPa}$

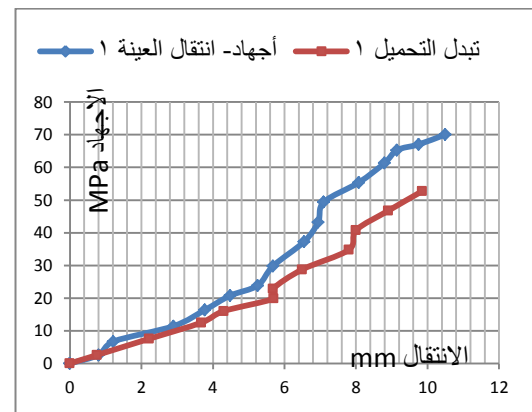
يستنتج من ذلك أن هذه النتائج تتوافق إلى حدٍ كبيرٍ مع ما يمكن استخلاصه من المخططات البيانية للعينات الست الأولى، بينما تختلف عما حصلنا عليه للعينات الثلاث المتبقية التي تمت معالجة نتائجها بمفردها كونها لم تحمل حتى مراحل العينات الأخرى.

لقد استندت النتائج المستخلصة التي تم الحصول عليها أعلاه على تعرض مكونات اللوح لنوع واحد من الإجهادات خلال مراحل التجريب حتى انهيار العينة، إلا أن إمكانية تبديل اتجاه التحميل، أو بالأحرى تبديل نوع الإجهادات التي يمكن أن تخضع لها المنشآت بالعناصر السندويشية يستوجب أخذ تأثيره في الحسبان على قيم التصميم المعيارية.

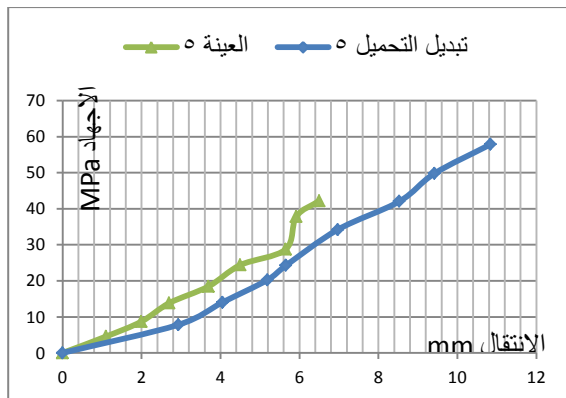
لقد أجرينا لهذا الغرض إعادة تحميل على الوجه الثاني للعينات الثلاث المحملة حتى الانهيار على وجهها الأول وهي العينات بأرقام التجارب 5، و 11، و 12 لاستخلاص أهمية الالتصاق الكامل للطبقة المشدودة بالنواة ودرجة تأثير ذلك على السلوك الميكانيكي للوح السندويشي، إضافة لإعادة تحميل العينتين برقم التجريب 15، 16 على وجههما الثاني أيضاً بعد أن كرر التحميل على وجههما الأول 6 أسابيع بشدات الإجهادات المبينة في الجدول السابق (1). تبين المخططات البيانية في الشكل (14) علاقة إجهادات ضغط صفيحة التغطية بالانتقالات المرافقة للعينات المختبرة على وجهيها. إذ يتضح من هذه المخططات انتظام سلوك العينات أكثر عند تبديل اتجاه التحميل الذي يمكن أن يكون ناجماً عن تطويع تحميل الوجه الأول لعيوب بنية النواة، فأصبحت بذلك أكثر تجانساً عند تحميلها على الوجه الثاني.



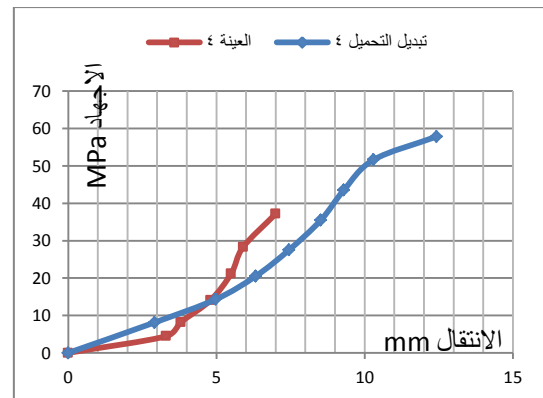
b: مخططات إجهاد- انتقال العينات 2



a: مخططات إجهاد- انتقال العينات 1



d: مخططات إجهاد- انتقال العينة 5



c: مخططات إجهاد- انتقال العينة 4

الشكل (14): مخططات إجهاد الضغط- انتقال العينات المختبرة بالتحميل على الوجهين

كما يلاحظ، أيضاً، أن الانتقالات المرافقة للإجهاد نفسه تكون، غالباً، أكبر لحالة التحميل على الوجه الثاني. لقد أدرجنا ملخصاً لنتائج التجريب الهامة على الوجهين في الجدول (2) الآتي:

الجدول (2): العينات الشرائحية 81×100×1000mm بالتحميل المباشر على الوجه الثاني (تبديل اتجاه التحميل)

موزع					حالة التحميل	
مستوي					حالة سطح اللوح	
5	4	3	2	1	رقم العينة	
16	15	12	11	5	رقم التجربة	
سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	حالة سطح العينة	
طولية	عرضية	طولية	طولية	عرضية	اتجاه العينة	
42.21	37.2	93.66	67.17	79.16	$\sigma$	إجهاد تحميل الوجه الأول
0.084	0.074	0.187	0.134	0.158	$\tau$	MPa
0.0065	0.0071	0.0169	0.0151	0.0107	$\delta/l$	
0.0142					$\delta_{av}/l$	
75.77	79.56	84.28	55.34	58.75	$\sigma$	إجهاد الوجه الثاني المنهار
0.152	0.159	0.169	0.111	0.118	$\tau$	MPa
>0.0128	>0.0139	>0.02	>0.0122	>0.0135	$\delta/l$	
تحقق	تحقق		حدوث تفكك تدريجي للطبقة العلوية مع استمرار الإجهاد حتى 99MPa وانضغاط المسند 26 مم	انهيار (تجعيد وقص)	حالة إجهاد الوجه الثاني	
77.67	66.12				$\sigma_{av}$	متوسط إجهاد الانهيار
0.156	0.133				$\tau_{av}$	MPa
>0.0133	>0.0152				متوسط $\delta/l$	
- تبديل وجه التحميل للعينتين 15، و 16 تم بعد 50 يوم من التحميل المستمر على الوجه الأول، ثم ستة أسابيع من التحميل وإفراغه لنفس الوجه الأول					ملاحظات	

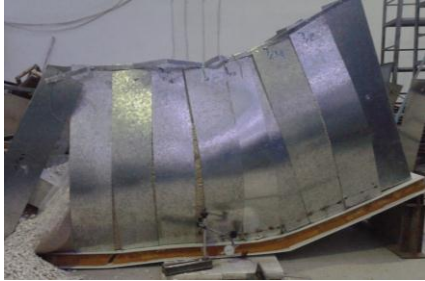
يستنتج من الجدول (2) أن الإجهاد المتوسط لانهيار الوجه الثاني لم يتغير سوى ما نسبته 12.2% رغم تضرر العينة عند تحميلها على الوجه الأول. إلا أن التشوه الكبير الذي حصل هو في انضغاط العينة عند المساند، إذ وصل هذا الانضغاط للعينة الثانية إلى 26 ملمتراً، كما هو مدون في الجدول، حيث أدى ذلك إلى ازدياد كثافة النواة عند المسند مما أحرّ تشكل الانهيار القصي للنواة، فازدادت النسبة  $\delta/l$  بمقدار 7%.

أما العينتان 4، و5 ذا الرقم التجريبي (15، و16)، اللتان حملتا، وأفرغتا مراراً على وجههما الأول بنسبة 69% من الإجهاد المسبب لبدء تشوه العينات ذاتياً، كما هو مبين في الجدول (1)، فإن إجهاد انهيارهما لم يتأثر بتبديل وجه التحميل إذا ما قورن ذلك بإجهاد انهيار مثيلاتها من عينات التحميل على الوجه الأول.

هذا يقودنا بالضرورة إلى إمكانية تعميم الاستنتاجات السابقة لتشمل كافة أشكال التحميل الموزع على العينات بالسطح المستوي، خاصة وأنه سيكون هناك عامل أمان في التصميم يأخذ في الحسبان أية اختلافات بسيطة يمكن أن تكون ناجمة عن تبدل وجه التحميل.

### ثانياً: نماذج العينات الشرائحية 81x1000x2000mm:

يبين الشكلان (15)، و (16) عينتي الشريحتين المختبرتين بالأبعاد 81×1000×2000mm حتى انهيارهما، والتي يظهر من خلالهما بشكلٍ واضحٍ نمط الانهيار بالتجعيد القصي للأولى، وبالتجعيد للثانية.

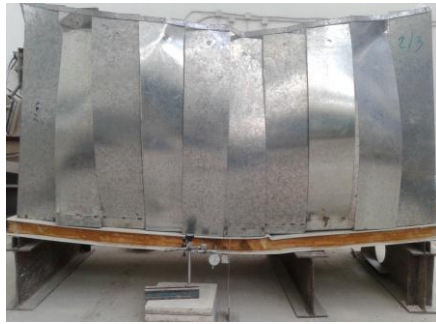


b: العينة بعد الانهيار



a: تشوه العينة عند التحميل المرحلي

الشكل (15): صور العينة رقم 1 (تجربة 4/1)



b: العينة بعد الانهيار



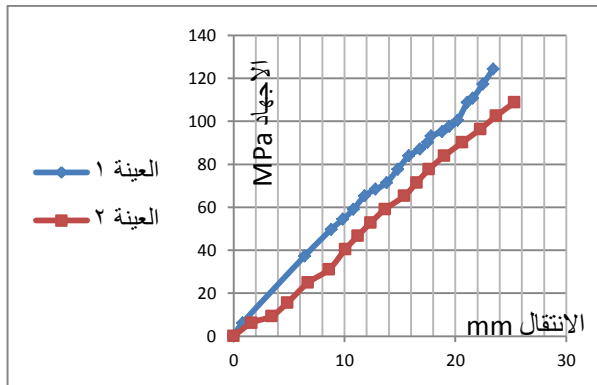
a: العينة المحضرة للتجريب

الشكل (16): صور العينة رقم 2 (تجربة 4/2)

حيث جرى اختبار العينة بتحميلها بحمولات متدرجة وتسجيل الانتقالات المرافقة لها لتتم معالجة هذه النتائج تحليلياً بالعلاقين (4)، و (5)، وذلك لحساب إجهاد الضغط المطبق في صفيحة التغطية العلوية، وإجهاد القص في النواة لكل مرحلة تحميل.

تبين المخططات البيانية في الشكل (17) علاقة إجهادات ضغط صفيحة التغطية بالانتقالات المرافقة للعينتين المختبرتين حتى الانهيار.

إذ يتضح من هذه المخططين ميل السلوك لأن يكون خطياً ضمن مراحل تحميل معينة.



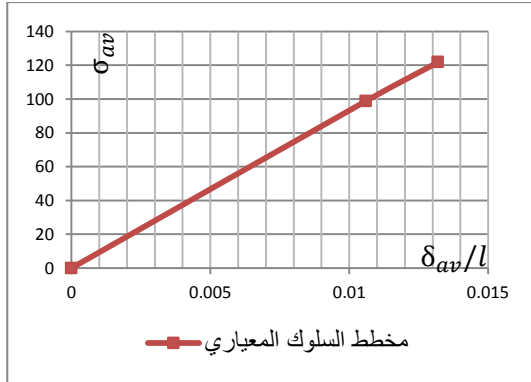
الشكل (17): مخططات إجهاد الضغط- انتقال العينات المختبرة

لقد لاحظنا أثناء اختبار العينات أن العينة تخضع عند مرحلة معينة من مراحل الإجهاد بالتحميل المباشر لتشوهات ذاتية (انتقالات ذاتية) دون زيادة التحميل لتعبر بذلك عن بدء المرحلة الأولى من تشكل حالة الانهيار للعينة المتمثلة بتراجع الترابط بين النواة وطبقة التغطية في مكان العزم الأعظمي وسط المجاز بسعي إجهادات ضغط الطبقة لإحداث تحنيب بالتجعيد لهذه الطبقة، أو نتيجة اقتراب إجهادات الشد القطري لمادة النواة قرب المساند من حدودها القصوى قبل انقطاع النواة قطعياً فيها. يبين الجدول الآتي ملخص النتائج الهامة لاختبار العينتين بإجهادهما حتى الانهيار فيهما، علماً أن معامل قص النواة  $G_c$  المعطى في الجدول قد تم حسابه بموجب العلاقة (3) المبينة أعلاه بعد الأخذ في الحسبان نتائج الحساب للانتقالات الانعطافية والقصية بالعلاقين (1)، و (2) على الترتيب.

الجدول (3) نتائج عينات اختبار شرائح الألواح  $81 \times 1000 \times 2000 \text{mm}$  حتى الانهيار (زمن التحميل حوالي ساعة)

موزع، واتجاه اختبار اللوح طولي		حالة التحميل	
مستوي		حالة سطح اللوح	
2	1	رقم العينة	
4/2	4/1	رقم التجربة	
سليم	سليم	حالة سطح العينة	
طولي	طولي	اتجاه العينة	
102.5	95.03	$\sigma$	إجهاد الانهيار الأولي الظاهر
0.103	0.096	$\tau$	$MPa$
0.0118	0.0094	$\delta / l$	
تفكك أولي وتجعيد	تفكك أولي وتجعيد	حالة الانهيار الأولي	
98.8		$\sigma_{av}$	متوسط إجهاد الانهيار الأولي
0.0988		$\tau_{av}$	$MPa$
0.0106		متوسط $\delta / l$	
3.6		معامل القص $G_{c,av}$ (MPa)	
118.6	125.00	$\sigma_u$	إجهاد الانهيار النهائي
0.119	0.125	$\tau_u$	
0.014	0.0123	$\delta_u / l$	
تجعيد	تجعيد قصي	حالة الانهيار الظاهر	
121.8		$\sigma_{u,av}$	متوسط إجهاد الانهيار لتمام حالة العينة
0.122		$\tau_{u,av}$	
0.0132		متوسط $\delta_{u,av} / l$	
3.56		معامل القص $G_{cu,av}$ (MPa)	

تتم معالجة هذه النتائج بشكلٍ مماثلٍ للعينات الشرائحية في البند أولاً لصياغة السلوك الميكانيكي للعينتين بسلوك معياري موحد، غالباً خطي كما ذكر أعلاه، ضمن مجال محدد للتحميل ليبي شروط التحليل والتصميم بنظرية المرونة بمقدار كافٍ، وأخذاً في الحسبان تقنية انتاج المادة، وظروف تحميلها، واختبارها.



الشكل (18): المخطط البياني المعياري لعلاقة إجهاد - انتقال

لأجل ذلك مثلنا تخطيطياً في الشكل (18) القيم المتوسطة لإجهادات ضغط طبقة تغطية اللوح  $\sigma_{av}$  المبينة في الجدول السابق مع النسبة  $\delta_{av}/l$ ، إذ تتضح من هذا المخطط البياني إمكانية قبول الارتباط الخطي بينهما بدقة كافية حتى الاقتراب من إجهادات الانهيار للعيينة، لنستنتج أن علاقة هذا الارتباط الخطي هي بالصيغة:

$$\sigma = 9320 \frac{\delta}{l} \quad (7)$$

تمثل هذه المعادلة الصيغة المعيارية لنتائج اختبار العينتين.

بما أن  $l=2000mm$  للعينتين نستنتج أن  $\sigma = 4660 \frac{\delta}{1000}$ ، وهي الصيغة نفسها تقريباً التي حصلنا عليها للعينات بالطول  $l=1000mm$ .

لذلك إذا أخذنا في الحسبان أن دقة النتائج راجحة أكثر للشرائح بالأبعاد الأكبر رغم اقتصرها على تجربتين فقط، نظراً لما يرافق تحضير العينات الشرائحية بالأبعاد  $81 \times 100 \times 1000mm$  من عيوب طولاً وعرضاً، فإننا نستطيع أن نخلص إلى أن العلاقة المعيارية للإجهاد - انتقال لعناصر الألواح السندويشية المستندة استناداً بسيطاً في طرفيها هي بدقة كافية:

$$\sigma = 4.66\delta \quad (8)$$

**مثال:** إذا كان إجهاد الضغط المسموح تطبيقه على طبقة تغطية اللوح السندويشي المستند استناداً مفصلياً في طرفيه  $57MPa$ ، إذ إن طوله  $l=1000mm$ ، وعرضه  $b=500mm$ ، وسماكته  $81mm$ ، وهو من المنتج المحلي المختبر في هذه الورقة العلمية، ما هو الانتقال الحاصل، وما هي قيمة الحمولة الموزعة المسموحة، ومعامل القص المرافق لأجل الشريحتين بالأبعاد  $81 \times 500 \times 1000mm$ ، و  $81 \times 500 \times 2000mm$ .

ونستخلص من العلاقة (8) أن انتقال الشريحتين هو:  $\delta = \sigma / 4.66 = 12.23mm$

كما نستنتج من الخصائص الهندسية لمقطع اللوح لكلتا الشريحتين أن:  $I = 810031mm^4$

ونجد من العلاقة (4) أن:  $q_1 = \frac{16\sigma I}{dl_1^2} = 9.18N/mm$ ، ومحصلتها:  $F_1 = 9.18 \cdot 1000 = 9180N$

وأن:  $q_2 = \frac{16\sigma I}{dl_2^2} = 2.294N/mm$ ، ومحصلتها:  $F_2 = 2.294 \cdot 2000 = 4588N$

أما الانتقال الانعطافي الناتج عن الحمولة فهو يساوي حسب العلاقة (1):

$$w_{M1} = \frac{5 \cdot 9180 \cdot 1000^3}{384 \cdot 810031 \cdot 210000} = 0.702mm$$

$$w_{M2} = \frac{5 \cdot 4588 \cdot 2000^3}{384 \cdot 810031 \cdot 210000} = 2.810mm$$

$$w_{Q1} = 12.23 - 0.702 = 11.53mm$$

$$w_{Q2} = 12.23 - 2.810 = 9.42mm$$

وبذا يكون الانتقال القصي:



$$G_{c1} = \frac{1.2 \cdot 9180 \cdot 1000}{8 \cdot 81 \cdot 500 \cdot 11.53} = 2.95 \text{ MPa}$$

ومعامل القص حسب العلاقة (5):

$$G_{c2} = \frac{1.2 \cdot 4588 \cdot 2000}{8 \cdot 81 \cdot 500 \cdot 9.42} = 3.6 \text{ MPa}$$

لتوثيق تعميم العلاقة (8) دوناً في الجدول (4) قيم الانتقالات التجريبية لعشر عينات مختبرة  $81 \times 1000 \times 2000 \text{ mm}$  عند مستوى إجهاد محدد مع نتائج الحساب بالعلاقة المشتقة.

الجدول (4): قيم الانتقالات التجريبية لعشر عينات مختبرة  $81 \times 1000 \times 2000 \text{ mm}$  عند مستوى إجهاد محدد

موزع، واتجاه اختبار اللوح طولي										حالة التحميل
مستوي										حالة سطح اللوح
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	رقم العينة
10/2	10/1	9/3	6/2/2	6/2/1	6/1	5/2	5/1	4/2	4/1	رقم التجربة
سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	سليم	حالة سطح العينة
طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	طولي	اتجاه العينة
68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	$\sigma$
0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	$\tau$
0.0074	0.0107	0.0076	0.0074	0.0087	0.006	0.0068	0.0063	0.008	0.0064	$\delta / l$
0.00753										متوسط $\delta / l$
15.06										$\delta_{av}$ (mm)
3.46										$G_{c,av}$ (MPa)
$\delta = 68 / 4.66 = 14.60 \text{ mm}$										$\delta$ للعلاقة (8)
3.60										$G_c$ (MPa)

إن إجراء المقارنة بين النتيجتين يظهر أن الاختلاف في النتائج لا تتعدى نسبته 3%. وهذه النسبة منخفضة جداً، وقليلة الأثر في عملية التصميم الإنشائي، طالما هناك عامل أمان سيؤخذ في الحسبان لإجراء مثل هذا التصميم. كذلك، وللاخذ في الحسبان تأثير إمكانية تبدل اتجاه التحميل على العنصر السندويشي (تبدل نوع الإجهاد) عند الاستثمار، فقد أجرينا اختبارات بالتحميل على الوجه الثاني لأربعة عينات من الشرائح بالأبعاد  $81 \times 1000 \times 2000 \text{ mm}$  بعد أن أجهدت على وجهها الأول حتى مستوى إجهاد معين لكلٍ منها. إذ يبين الشكل (19) العينات المختبرة على تبدل وجه التحميل.



b: العينة 2 عند التحميل المرحلي قبل الانهيار



a: العينة 1 بعد الانهيار



b: العينة 4 بعد الانهيار



a: العينة 3 عند التحميل المرحلي

الصورة (19): العينات المختبرة على تبديل وجه التحميل

أما ملخص نتائج اختبار هذه العينات فهو مبين في الجدول (5) الآتي:

الجدول (5): نتائج اختبار تأثير تبديل اتجاه التحميل على عينات شرائح الألواح بالأبعاد 81×1000×2000mm

موزع، واتجاه اختبار اللوح طولي				حالة التحميل	
مستوي				حالة سطح اللوح	
4	3	2	1	رقم العينة	
9/3	9/2	6/1	5/1	رقم التجربة	
سليم	سليم	سليم	سليم	حالة سطح العينة	
طولي	طولي	طولي	طولي	اتجاه العينة	
68.38	87.89	87.89	56.21	$\sigma$	إجهاد تحميل الوجه الأول MPa
0.068	0.088	0.088	0.057	$\tau$	
0.0077	0.0077	0.0068	0.0051	$\delta / l$	
115.9	128.9	128.9	78.88	$\sigma$	إجهاد الوجه الثاني المنهار MPa
0.117	0.13	0.13	0.079	$\tau$	
0.0147	0.0145	0.015	0.0099	$\delta / l$	
تحقق	تحقق	تحقق	انهيار (تجميد وقص واضح)	حالة إجهاد الوجه الثاني	
113.15				$\sigma_{av}$	متوسط إجهاد الانهيار MPa
0.1132				$\tau_{av}$	
0.0135				متوسط $\delta / l$	
العينة 1:				ملاحظات	
- بدل وجه التحميل للعينة 1 بعد إجهادها على الوجه الأول مدة 71 يوماً مستمراً، إذ انضغطت نتيجة ذلك عند المسند بمقدار 3mm.					
- بدء تشوه العينة ذاتياً عند إجهاد 68 MPa تقريباً حيث ازداد الانتقال خلال ساعتين بمقدار 1.37mm قبل أن يتم زيادة التحميل حتى حصول الانهيار.					
العينة 2:					
- بدل وجه التحميل للعينة 2 بعد إجهادها على الوجه الأول مدة 107 أيام مستمراً.					
- بدء تشوه العينة ذاتياً عند إجهاد 105 MPa تقريباً.					
- بلغ انضغاط العينة عند المسند بمقدار 3mm لحظة الانهيار.					
العينة 4:					
- بدء تشوه العينة ذاتياً عند إجهاد 90 MPa تقريباً وظهور انفصال للطبقة.					
- بلغ انضغاط العينة عند المسند بمقدار 3mm لحظة الانهيار.					

يستنتج من مقارنة نتائج هذا الجدول مع نتائج اختبار العينتين في الجدول (3) أن إجهاد الانهيار لم ينخفض عند تبديل وجه التحميل سوى بمقدار 7,1% رغم أن الاختبار على الوجه الثاني للعينتين 1، و 2 قد أجري بعد استمرار تأثير التحميل على وجههما الأول 71 يوماً للعيينة الأولى، و 107 أيام للعيينة الثانية، كما بيّن ذلك في الملاحظات المدونة في الجدول (3).

أما اختلاف الانتقالات بين تحميل الوجهين فقد كان قليل الأثر تماماً في عمليات التصميم الإنشائي، كما يلاحظ ذلك من النتائج المدونة في الجدولين للنسبة النهائية  $\delta/1$ ، وهذا ما كان الحال عليه، أيضاً، لأجل الشرائح بالأبعاد  $81 \times 100 \times 1000 \text{mm}$ ، كما ذكرنا ذلك في البند أولاً.

تؤكد هذه النتائج على صلاحية تعميم العلاقة (8) المشتقة تجريبياً لأي من حالي الإجهاد التي يمكن أن تخضع لها طبقة تغطية اللوح السندويشي، خاصة وأن التصميم سيتم حتماً عند قيم للإجهاد أخفض بكثير من إجهاد الانهيار.

### الاستنتاجات والتوصيات:

#### النتائج:

- 1- يتم تصميم العناصر الإنشائية بالألواح السندويشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين وحشوة بينهما من مادة البوليفوريتان باشتراط 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 قيم الإجهادات المميزة للنواة، ومعاملات مرونتها، وشروط انتقالها.
- 3- 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.
- 4- تباين تقنية إنتاج الألواح السندويشية يتطلب إيجاد مخطط سلوك معياري تصميمي لنواتها مبني على نتائج اختبار عينات عشوائية من الألواح المستخدمة في المنشأة الهندسية، إذ يفضل ألا يقل عددها عن عشر عينات لأي خاصة منفصلة.
- 5- العلاقة المعيارية التصميمية للإجهاد- انتقال المشتقة للمنتج المستخدم في هذه الورقة العلمية بتأثير التحميل الموزع هي  $\sigma = 4660\delta/1$ ، حيث  $\sigma$  إجهاد ضغط صفيحة طبقة تغطية النواة،  $\delta$  الانتقال الأعظمي للوح.
- 6- لا يؤثر جوهرياً تتأوب نوع الإجهاد الستاتيكي المطبق (تتاوب اتجاه التحميل) على طبقة التغطية على صيغة العلاقة المشتقة.
- 7- تمكن هذه العلاقة المهندس المصمم للعنصر الإنشائي باللوح السندويشي من المنتج المدروس من تحديد الحمولة التصميمية المسموحة على اللوح المستخدم استناداً للانتقال الأعظمي المسموح، وإجهاد التععيد الأمين لطبقة التغطية، على ألا يحصل انهيار لنواة اللوح نتيجة تجاوز إجهادات الشد القطري فيها لقيم تحمل النواة على الشد.
- 8- يمكن أن تمثل هذه العلاقة المشتقة أساساً يبني عليه تقييم حالة أي منتج آخر يراد استثماره هندسياً.
- 9- يؤكد تقارب النتائج التي تم الحصول عليها للشرائح الصغيرة والكبيرة فعالية أجهزة التجريب المستخدمة في متن هذه الورقة العلمية لإجراء الاختبارات اللازمة على نواة اللوح السندويشي، لاسيما بإدخال تحسينات تقنية أكثر على أدائها للحصول على نتائج تجريبية أكثر دقة.
- 10- نظراً للدقة الكافية التي قدمتها اختبارات الشرائح الصغيرة يمكن لمهندس التصميم الإنشائي في التطبيقات العملية الاكتفاء بنتائج هذه الشرائح الصغيرة لتحقيق شروط التصميم المطلوبة، وخاصة عند اعتماد تقنيات الاختبار المناسبة، دون الحاجة لإجراء تجارب بأطوال شرائح أكبر.

11- تدل درجة عدم انتظام مخططات السلوك التجريبية على مدى انخفاض التجانس في البنية الداخلية للوح المنتج.  
**التوصيات:**

- 1- الاهتمام مستقبلاً باستمرار إجراء أبحاث علمية تجريبية تحليلية على مثل هذه الألواح السندويشية لتوطيد توطين استثمار منتجاتها المحلية علمياً أكثر.
- 2- يفضل أن يستخدم في أية أبحاث لاحقة طول شريحة ثالث مختلف عما ورد في هذه الورقة العلمية لتوثيق النتائج التي تم التوصل إليها أكثر، مع ضرورة زيادة عدد العينات المختبرة.
- 3- إجراء أبحاث أكثر على النموذج المقلم بشروط الاختبار المذكورة أعلاه.
- 4- 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.
- [7] Sakkour, Akram: *Mechanics of Materials*, Bd. 1, Tishreen University, pp. 1-700, 2016.
- [8] Sakkour, Akram: *Mechanics of Materials*, Bd. 2, Tishreen University, pp. 1-710, 2012.