

تناوب الإجهاد الستاتيكي على قدرة تحمل واستقرار ألواح العناصر السندويشية بطبقتي تغطية معدنيتين تأثير ونواة من مادة البوليوإريتان /PUR/

الدكتور أكرم صفور*

(تاريخ الإيداع 5 / 5 / 2014. قُبل للنشر في 15 / 9 / 2014)

□ الملخص □

تُنتج محلياً ألواح سندويشية مؤلفة من طبقتي تغطية معدنيتين تفصلهما تصاقاً نواة سميكة من مادة رغوية متصلة من البوليوإريتان. يتوسع انتشار هذه الألواح يوماً بعد يوم كعناصر إنشائية تحاكي المستلزمات الوظيفية للمنشأة الهندسية.

استخدام هذه الألواح كعناصر إنشائية حاملة في منشآت جدارية أو سقفية يمكن أن ينجم عنه تبدل في طبيعة الإجهاد الناظمي المؤثر على مواد مقاطعها، وخصوصاً طبقتي التغطية فيها نتيجة لإمكانية تناوب انعطاف جزء اللوح استاتيكيًا، أو ديناميكيًا، سواء أكان التناوب ناتجاً عن تبدل اتجاه تأثير التحميل عليه، أم تناوب التحميل الإضافي على الفتحات المتجاورة للجمل المستمرة منه.

يجري تقييم قدرة تحمل واستقرار هذه الألواح السندويشية استناداً إلى قيمة الإجهاد الحرج المؤدي إلى تشكل أمواج التجعيد لطبقة التغطية المضغوطة للوح، والذي ترتبط قيمته بالدرجة الأولى بجودة وخصائص المنتج ميكانيكياً وفيزيائياً.

تناول البحث اختبار قدرة تحمل اللوح السندويشي المنتج محلياً واستقراره نتيجة التناوب استاتيكيًا في طبيعة إجهاده كعنصر إنشائي حامل في الجملة الإنشائية المشكّلة من مثل هذه الألواح.

لقد أظهرت نتائج البحث أن هذا اللوح المنتج محلياً يسلك سلوكاً خطياً، أيضاً، حتى في حال تبدل اتجاه انعطافه أو طبيعة إجهاد طبقة التغطية فيه، خصوصاً في مراحل التحميل المرافقة لتشكل إجهاد التجعيد الحرج على الأقل، بينما تنخفض قيمة هذا الإجهاد الحرج بمقدار 40% عن قيمته لحالة تحميل اللوح أو تعرضه لعزم انعطاف باتجاه واحد فقط.

الكلمات المفتاحية: ألواح العناصر السندويشية، طبقة التغطية المستوية، نواة البوليوإريتان، تناوب اتجاه الانعطاف، تناوب طبيعة الإجهاد، إجهاد التجعيد الحرج.

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

Influence of the static stress alternate on the sustaining capacity and stability of the sandwich elements panels of two flat metal faces and a core of Polyurethane /PUR/

Dr. Akram Sakkour*

(Received 5 / 5 / 2014. Accepted 15 / 9 / 2014)

□ Abstract □

Sandwich panels are locally produced with two faces of metal those which cover a hard adhesive and thick core of polyurethane. The widely extend of these panels increase day for day as structural elements imitating the function necessities of the engineering construction.

The use of those panels as carried structural elements in wall or ceiling structures can coincide with a submission of their sections materials, especially the two faces to the change in a nature of the normal stress acted on them due to the alternate of the panel part

bending statically or dynamically when the alternate was produced from the change of the loading acting direction it or from the alternate of the live loading on the adjacent fields of the continuous systems from it.

The evaluation of the sustaining capacity and stability of the sandwich elements consisted of such panels performs depended to the critical stress value led to arise of the wrinkling waves of the compressive face of the panel that its values depended first on the quality and properties of the production.

The research handled the testing of the sustainability and stability of the local produced sandwich panel due to the alternate in a nature of its stress statically as a carried structural element in the structural system built from such panels.

The conclusion of the research showed that this produced panel follows a linear behavior too even in the case of the change of its bending direction or stress nature of its face, especially in the loading steps coincided at least to the arising of the critical wrinkling stress, whereas the value of this stress decreases 40% from its value for the loading or bending case of the panel in only one direction.

Keywords: Sandwich panels, flat face, polyurethane core, bending direction alternate, stress nature alternate, critical wrinkling stress.

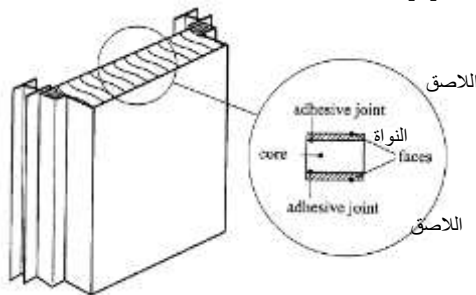
* Assistant Prof. in Structural Engineering Department - Civil Engineering Faculty- Lattakia University- Syria

مقدمة:

تسارع عالمياً 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): Woolworth State Office
وول ستيت أوفيس
south Australia [1]



الشكل (2): اللوح السندويشي



الشكل (3): أمواج تجعد الطبقة المضغوطة

يبين الشكل (1) أحد نماذج المنشآت الهندسية المشيد بسقفه وجدرانه الداخلية والخارجية من ألواح الصفائح السندويشية. إنه Woolworth State Office بجنوب استراليا [1]، حيث يطلب من العناصر السندويشية فيه مقاومة كل من الحمولات الشاقولية وقوى دفع وسحب الرياح، إضافة لتلك الناتجة عن الفروقات الحرارية داخلياً وخارجياً.

لعل أكثر عناصر الألواح السندويشية انتشاراً في مجال الهندسة المدنية هي تلك المؤلفة من طبقتي تغطية معدنيتين لنواة ملتصقة بهما من مادة البولستر، أو البوليوريثان polyurethane كمواد منخفضة الكثافة، كما هو مبين في الشكل (2)، والمنتجة بالأطوال المطلوبة كعناصر جاهزة.

يؤدي بلوغ إجهاد الضغط لطبقة التغطية الناتج عن التحميل الموازي لمحور اللوح، أو العمودي عليه قيمة محددة إلى إمكانية إحداث التحنيب الموضعي لهذه الطبقة ارتباطاً بنسبة سماكتها إلى عرضها وسماكة النواة الملتصقة بها، أو تشوهها طولياً على شكل أمواج تسمى بأمواج التجعيد، كما هي مبينة في الشكل (3)، حيث يمثل تشكل هذا التجعيد أحد أهم أنماط الانهيار الممكنة، علاوة عن التحنيب العام والانهيار نتيجة حصول القص في النواة وغيره [1].

يتم استيعاب السلوك الإنشائي عملياً لمثل هذه الألواح السندويشية باستبعاد حصول التشوه أو التحنيب الموضعي لطبقة التغطية المضغوطة أولاً، لتعين بذلك طاقة التحمل للعناصر الإنشائية المكونة منها بموجب إجهاد الضغط الحرج σ_{cr} لتجعد هذه الطبقة، الذي يمكن تحديده محلياً بالتحري التجريبي على اللوح المنتج وتقنياته، أو حسابه من خلال الصيغ المشتقة تحليلياً لهذا الغرض من قبل العديد من العلماء والباحثين بافتراض السلوك المرن لمواد مكونات اللوح ضمن مجال محدد للإجهاد أو التحميل، وتوفر الالتصاق التام بين النواة وطبقة التغطية، ونمذجة نواة اللوح السندويشي بالاستناد المرن لطبقتي التغطية، سواءً أكان ذلك بإهمال تأثير صلابة القص للنواة ($G_c = 0$) على تشوهها عمودياً على طبقة التغطية، وفقاً لنموذج فتكلر (Winkler) المبسط للاستناد المرن، أم بالأخذ في الحسبان تأثير هذه الصلابة [2]، [3].

لقد تبين لنا من خلال الدراسة المرجعية أنه يمكن التعبير عن أغلب الصيغ المشتقة تحليلياً، أو تجريبياً لإجهاد التجعيد الحرج بالصيغة العامة الآتية:

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

حيث تمثل E_f, E_c, G_c الخصائص الميكانيكية لمواد اللوح، وهي على الترتيب معامل المرونة العرضاني (القصي) والطولي للنواة، ومعامل المرونة الطولي لطبقة التغطية.

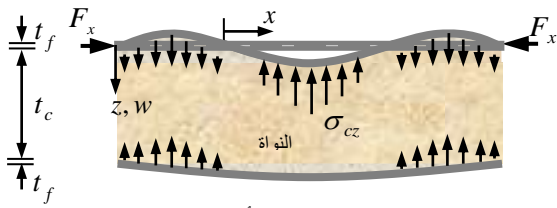
أما المعامل α فإن قيمته تقترب من القيمة الحقيقية أكثر كلما قاربت النمذجة التحليلية السلوك الحقيقي للوح السندويشي المنتج، أو ازداد توافق طريقة التحليل المستخدمة مع هذا السلوك الحقيقي، وتطابق تابع الانتقال المفترض لطبقة التغطية مع التشوه أو التجعد الحقيقي لها.

لذلك، تتباين قيم المعامل α بناءً على أسس اشتقاقها المعتمدة تحليلياً من قبل بعض العلماء أو الباحثين، كما يظهره الجدول (1).

الجدول (1): قيم المعامل α

المعامل α	0.823	0.91	0.851	0.825	0.78
الباحث	Chong –	Hoff–	Plantema	Timoshenko	Allen
المرجع	HartSock [4]	Mautner [5]	[6]	[7]	[7]

يقتضي أن يرافق التشوه الموجي لطبقة التغطية المضغوطة بإجهاد التجعيد الناتج عن تأثير عزوم انعطاف على



الشكل (4): إجهادات النواة لأموج التجعيد

اللوحة تشكل إجهادات ضغط وشد في النواة في اتجاه متعامد مع طبقتي التغطية ناجم عن تقعر وتحدب موجة التجعيد على الترتيب، كما يبينه الشكل (4)، حيث تمثل نواة اللوح مع طبقة التغطية المعرضة لإجهادات الشد المسند المرن المستمر للطبقة المتجعدة.

تلعب دقة نمذجة هذا الاستناد دوراً مهماً أيضاً في تحديد القيمة الحسابية لهذه الإجهادات تحليلياً، فنجد مثلاً، وفق نموذج فنكلر المذكور أعلاه، أنها ترتبط بالانتقالات الشاقولية المستقلة المرافقة لها بالعلاقة الآتية:

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

f : دالة طبقة التغطية. c : دالة النواة. w_f : تابع الانتقال الجببي المفترض لصفحة طبقة التغطية.

D_f : الصلابة على الانحناء لوحدة عرض صفحة طبقة التغطية لوحدها.

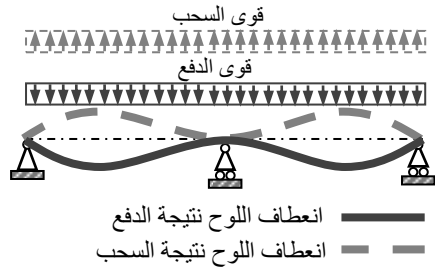
F_x : قوة الضغط المطبقة على وحدة عرض صفحة التغطية (محصلة إجهادات الضغط المؤثرة على وحدة العرض).

σ_{cz} : الإجهاد الناتج عن رد فعل النواة المرافق للتشوه الحاصل فيها نتيجة الانضغاط على اعتبار أن

عرض الشريحة في الاتجاه المتعامد مع اتجاه القوة هو واحدة الطول.

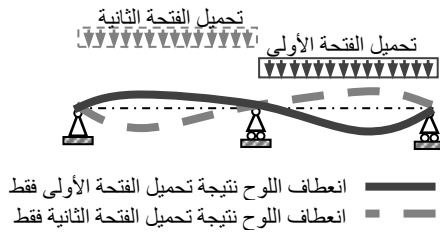
تؤدي إجهادات الشد المتشكلة إلى إحداث انفصال ما في الرابط القائم بين طبقتي التغطية عبر النواة نتيجة ضعف مقاومة مادة النواة أو التصاقها مع الطبقة على الشد، مما يفقد الطبقة استمرار استقرارها ضمن اللوح

السندويشي، ويسرع انهياره في اتجاه الانعطاف الحاصل، بينما سيلعب دور احتواء اللوح على عيوب تصنيعية لالتصاق النواة بالطبقة عند تبدل اتجاه انعطاف اللوح.



الشكل (5):تبدل اتجاه الانعطاف نتيجة سحب ودفع الرياح

قلما توظف العناصر الإنشائية المكونة من الألواح السندويشية بنواة من الفوم لتحمل حمولات ديناميكية ينتج عنها تبدل في اتجاه الانعطاف وتغير في طبيعة الإجهاد. إلا أن استخدام هذه الألواح كعناصر إنشائية في منشآت سقوية أو جدارية سينجم عنه تناوب في اتجاه تأثير التحميل الستاتيكي بفعل قوى الرياح كقوى دفع وسحب مؤثرة على هذه المنشآت (الشكل (5)).



الشكل (6):تبدل اتجاه الانعطاف نتيجة تناوب تحميل الفتحات

كما أن خفة وزنها سوف يؤدي لخضوعها إلى تبدل في إشارة الإجهاد نتيجة إمكانية تناوب تأثير الأحمال الحية على الفتحات التي تعمل فيها هذه الألواح كشرائح مستمرة، كما في الشكل (6).

أثبتت الدراسات التجريبية للمعايرة الحقيقية لسلك الألواح السندويشية المتباينة التركيب أن الصيغة العملية

لحساب إجهاد التجعيد الحرج لطبقة التغطية لا تتأثر، فقط، بأسباب التباين المذكورة أعلاه إضافة للخصائص الميكانيكية لمواد مكونات اللوح، وإنما، أيضاً، ببنية النواة، وكثافتها، وجودة التصاقها بطبقتي التغطية، ودرجة حرارة الوسط المحيط، وتقنية الإنتاج، ودرجة استواء طبقة التغطية، وزمن تأثير التحميل، بل يكاد يكون تأثير تبدل اتجاه التحميل، أو الانعطاف، وطبيعة الإجهاد، وشدته أهم هذه المؤثرات، حيث سينعكس تأثير ذلك كله على قيمة المعامل α في صيغ إجهاد التجعيد المشتقة تحليلياً [5]، [8].

لأجل ذلك كله ينصح الاهتمام دوماً بإجراء أبحاث تجريبية خاصة بأصناف منتجات كل بلد من الألواح السندويشية للأخذ في الحسبان دور هذه العوامل في المقارنة أكثر للقيمة الحقيقية للمعامل α المذكور.

لذلك، قادت نتائج البحث التجريبي الذي أجري عام 2013 في كلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين وفق نظم الاختبار البحثية المعتمدة عالمياً لهذا الغرض [9] إلى التعرف على قيم أهم الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمواد ألواح العناصر السندويشية المنتجة محلياً بطبقتي تغطية مستويتين من الفولاذ لنواة من البوليوريثان، واشتقاق قيمة المعامل α للإجهاد الحرج الذي يحدث تجعيداً في طبقة التغطية المضغوطة نتيجة التحميل المباشر للعينات المختبرة بدرجة حرارة المخبر [10].

اقتصر اشتقاق قيمة المعامل α للإجهاد الحرج في البحث المذكور على التحميل المباشر للوح باتجاه واحد يستوجب العمل على أن تستوعب هذه القيم، أيضاً، تأثير تبدل طبيعة الإجهاد نتيجة إمكانية تناوب اتجاه الانعطاف للأسباب المذكورة أعلاه. الأمر الذي سيمثل موضع اهتمام هذا البحث.

أهمية البحث وأهدافه:

يستوجب إنتاج الألواح السندويشية محلياً بطبقتي تغطية معدنيتين مستويتين لحشوة من البوليوثيرتان استكمال توفير المعطيات الأولية لقاعدة البيانات الأساسية لهذا المنتج المحلي اللازمة لضبط معايير التصميم الإنشائي للعناصر الإنشائية المكونة منه، الذي يمكن استثمار نتائجه في عملية التحليل الإنشائي، حيث يورد هذا المنتج، خصوصاً وأنه يمكن أن يتسارع انتشار توظيفها لدينا في المدى المنظور كعناصر إنشائية خفيفة وسريعة التركيب. تأتي أهمية هذا البحث في أنه يسعى إلى الأخذ في الحسبان لتأثير تبديل اتجاه الانعطاف أو التحميل السنتاتيكي المصادف غالباً في العناصر الإنشائية المكونة من مثل هذه الألواح على قدرة تحملها، وانعكاس ذلك على قيمة المعامل α في صيغة إجهاد التجعيد للانضغاط المتناوب لطبقتي التغطية.

طرائق البحث ومواده:

استندت طرائق إجراء البحث إلى وقائع التحري التجريبي نفسها المعتمدة في البحث المذكور أعلاه للتعريف بقيمة إجهاد التجعيد والخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمادة النواتم البوليوثيرتان لألواح العناصر السندويشية المنتجة لدينا بطبقتي تغطية معدنيتين مستويتين، حيث شكلت عينات الألواح نفسها المختبرة لتحديد إجهاد التجعيد بالتحميل في اتجاه واحد عمودياً على أحد وجهي اللوح المكون الأساس لمادة هذا البحث التجريبي، أيضاً، لاختبار تأثير تحميل اللوح على الوجه الآخر غير المحمل مسبقاً كحالة معبرة عن تأثير تبديل التحميل، أو الانعطاف السنتاتيكي على قدرة تحمل اللوح ومعامل إجهاد التجعيد له.

كانت قد أجريت الاختبارات اللازمة في البحث المذكور أعلاه لتحديد قيم التعريف لمادة النواة، وإجهاد التجعيد الحرج على عينات من مساطر الألواح المستقدمة عشوائياً من المعمل الحلبي المنتج لها في بلدنا، التي أبعادها $2500 \times 970 \times 81 \text{mm}$ ، وسماكة نواتها من البوليوثيرتان 80 ملم، وسماكة كل من طبقتي تغطيتها 0.5 ملم، وهي مصنوعة من الفولاذ ST52 المحدد تجريبياً في مخبر تجريب المواد بكلية الهندسة المدنية [10]. لقد أمكن الاستنتاج من خلال النتائج المخبرية لذلك البحث أن معاملات المرونة لمادة الفوم للعينات المجربة المعنية تقبل القيم الآتية:

$$E_c = 3.71 \text{Mpa} \quad ; \quad G_c = 1.75 \text{MPa} \quad ; \quad \nu_c = 0.06$$

حيث يمثل ν معامل التمدد العرضاني.

أما القيمة التجريبية المناسبة للمعامل α فقد قبلت على أنها مساوية إلى: $\alpha = 0.91$ ، حيث يبلغ لأجلها إجهاد التجعيد الحرج لطبقة التغطية القيمة $\sigma_{cr} = 100 \text{MPa}$.

لقد حدد إجهاد التجعيد σ_{cr} من خلال إجراء اختبار العينات المحضرة بنظام تحميل معد ليعمل على نقل الحمولة الكلية من جهاز التحميل المخبري المتوفر وتوزيعها إلى أربع حمولات مركزة متساوية القيمة لوحدة الطول من خط استناد النظام على عينة اللوح السندويشي، ويتباعد متساو بين خطوط الاستناد الأربعة على العينة المستندة بدورها استناداً بسيطاً على مسندين طرفيين يتباعد 2 م، كما في الشكل (7a)، حيث تطبق الحمولة الكلية P عبر جهاز التحميل المخبري وفقاً لما يبينه الشكل (7b). لذلك تعطى قيمة الإجهاد σ_{cr} بموجب العلاقة الآتية:

$$\sigma_{cr} = 40,25 \frac{M (N.mm)}{I (mm^4)} \quad ; \quad M = \frac{Pl}{8} \quad (3)$$

حيث إن:

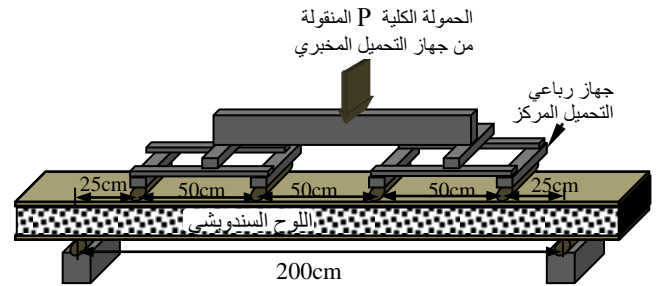
$$I = \frac{b t_f (d')^2}{2}$$

التغطية.

b : عرض العينة. t_f : سماكة طبقة التغطية. d' : البعد بين مركزي طبقتي التغطية العلوية والسفلية.



B: نظام نقل التحميل واختبار
عينة اللوح



a: نظام نقل وتوزيع التحميل لتحديد إجهاد تجعيد عينة اللوح
السندويشي [9]

شكل (7): نظام تحميل واختبار عينة اللوح السندويشي لتحديد إجهاد التجعيد

يستنتج من مضمون صيغة العلاقة (3) أنها أهملت دور المقطع المركب للوح في مقاومة العزم المؤثر نظراً لقلّة دور صلابة انعطاف النواة في مقاومة الإجهادات الناظمية مقارنة مع صلابة طبقتي التغطية، حيث عدّ إجهاد التجعيد الناظمي الحرج للعينات المجربة بأنه الإجهاد الناتج عن العزم المسبب من قبل الحمولة المؤدية لتجعد طبقة التغطية وتفكك ترابطها مع النواة، والتي لاتزال لأجله العينة المجربة تسلك سلوكاً مرناً حتى بلوغ قيمة هذا الإجهاد الحرج على الأقل.

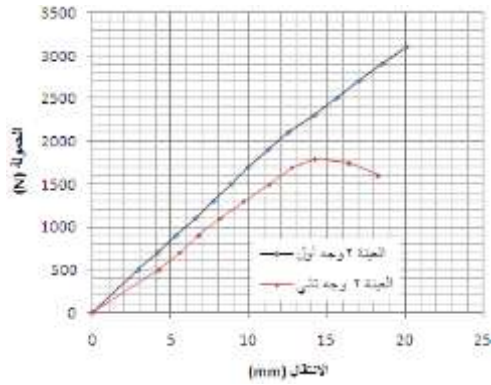
هكذا، فإن إجراء اختبارات إجهاد التجعيد σ_{cr} على الوجه الثاني للوح سيتم باستخدام نظام التحميل نفسه المستخدم لتحميل الوجه الأول، والمبين في الشكل (7). كما أن حساب قيمته للعينات المختبرة مجدداً سيتم، أيضاً، بموجب العلاقة (3).

لأجل هذا الغرض أعيد إجراء الاختبارات على الوجه الثاني لست من العينات السبع المجربة في المرحلة السابقة على وجهها الأول، بينما استبعدت العينة الخامسة من الاختبار مجدداً بسبب انهيارها النهائي على القص عند تحميلها في اتجاه تأثير التحميل الأول. كما اختبرت عينتان جديدتان بإخضاعهما أولاً على الوجه الأول لإجهاد مقداره 100 Mpa فقط كقيمة لإجهاد التجعيد المحدد أعلاه بموجب نتائج اختبارات المرحلة الأولى، ثم تحميلهما على الوجه الثاني حتى حصول الانهيار فيها.

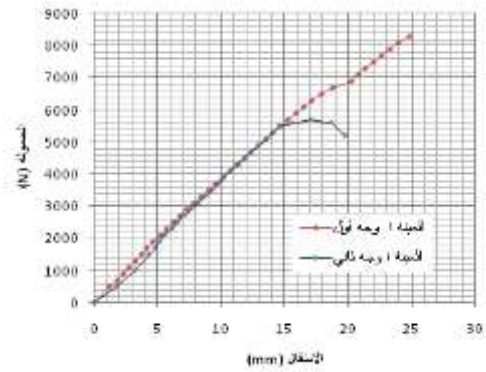
نفذت جميع الاختبارات بتطبيق تزايد متدرج في التحميل بسرعة $6,48 \text{ N/sec}$ حتى انهيار العينة مترافقاً ذلك مع قياس الانتقالات الأعظمية في وسط العينة المقابلة للحمولات المطبقة، ثم حسب الإجهاد الناظمي المتشكل في طبقتي التغطية عند كل مرحلة من مراحل تزايد الحمولة بموجب العلاقة (3) أيضاً.

النتائج والمناقشة:

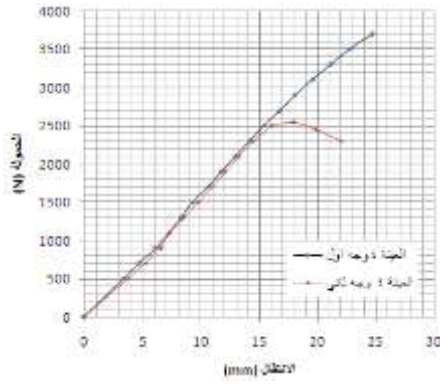
لقد عرضت علاقة الانتقال بالحمولة لنتائج اختبار كل عينة على وجهيها تخطيطياً في الشكل (8) لإظهار تأثير تبدل اتجاه التحميل على تحمل اللوح السندويشي، بينما يبين الجدول (2) الإجهادات المرافقة لبعض مراحل الدلالة الهامة لتزايد التحميل على هذه العينات المختبرة، وتمييز قيم إجهاد التجعيد لاختبار الوجه الأول والثاني للعينة على الضغط.



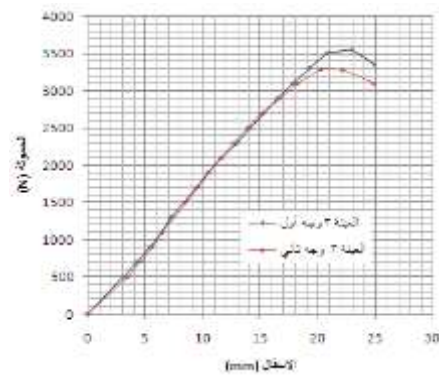
2: العينة b



1: العينة A

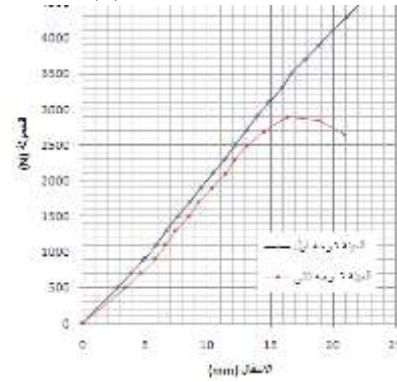
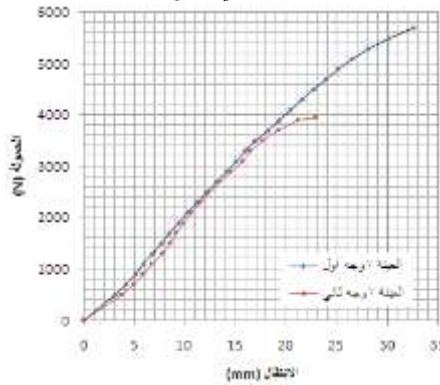


4: العينة D

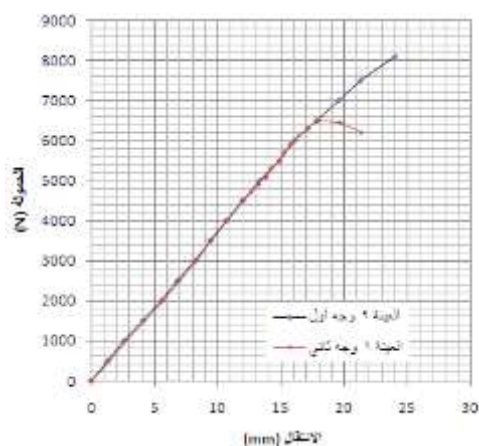


3: العينة C

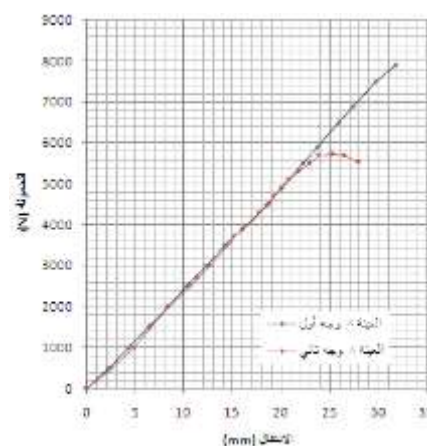
شكل (8): علاقة الحمولة بالانتقال للعينات المختبرة على وجهي اللوح



F: العينة 7



E: العينة 6



h: العينة 9

g: العينة 8

(تابع شكل (8): علاقة الحمولة بالانتقال للعينات المختبرة على وجهي اللوح

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

الإجهاد (N/mm ²)								الحمولة N
العينة 9	العينة 8	العينة 7	العينة 6	العينة 4	العينة 3	العينة 2	العينة 1	
بعرض 500 مم	بعرض 490 مم	بعرض 297 مم	بعرض 295 مم	بعرض 171 مم	بعرض 174 مم	بعرض 158 مم	بعرض 470 مم	
-	11.41	18.82	18.95	32.69	32.13	35.38	12.04	900
18.63	19.01	31.37	31.58	54.48	53.54	58.97	19.82	1500
-	-	35.86	36.10	61.75	60.69	66.33	22.61	1700
-	-	44.38	44.58	76.48	74.96	82.55	27.90	2100
31.06	31.69	52.90	53.26	90.80	89.24	98.28	33.18	2500
-	-	57.16	57.77	98.07	96.38	106.14	35.82	2700
-	-	61.42	61.84	105.33	103.52	114.00	38.47	2900
-	-	65.68	66.13	112.60	110.66	121.86	41.11	3100
-	-	69.94	70.42	119.87	117.80		43.75	3300
43.48	44.37	74.20	74.71	127.13	124.94		46.40	3500
-	-	78.46	79.00	134.39			49.04	3700
-	-	86.98	87.58				54.32	4100
55.90	57.04	94.50	96.16				59.61	4500

58.39	59.58	99.76					62.11	4700
65.84	67.20	112.55					70.18	5300
70.81	-	121.07					75.47	5700
-	-						96.61	7300
-	-						101.90	7700
-	100.14						104.40	7900
100.62							107.19	8100
							109.83	8300

تشير الخلايا المظلمة في الجدول (2) إلى القيم التي بدأ عندها ظهور تأثير تشكل تموجات التجعيد لطبقة التغطية المضغوطة على الوجه الأول للعينه المجربة في المرحلة الأولى، بينما تبين الخلايا السميكة التأطير القيم التي بدأ عندها أيضاً تشكل تموجات التجعيد لطبقة التغطية المضغوطة على الوجه الثاني للعينه المجربة في المرحلة الثانية، حيث ترافق تشكل التموجات للمرحلتين مع إصدار العينه لأصوات دالة على تفكك طبقة التغطية عن النواة، إذ أصبح هذا التموج أكثر وضوحاً، ومريئاً مع استمرار زيادة الحمولة إلى أن ثبتت قيمة القوة مؤقتاً مع استمرار تزايد الانتقال وترافقه مع تشكل تشوهات موضعية كبيرة عند أماكن تطبيق الحمولة على الوجه الأول للعينه مشيرة إلى انهيارها تماماً، بينما لم نلاحظ أثناء الاختبار على الوجه الثاني وضوح تشكل لتشوهات موضعية مرافقة لأماكن تركيز التحميل على الوجه الثاني للعينه المجربة نظراً لعدم قدرتها على الصمود طويلاً بعد تشكل إجهاد التجعيد لهذا الوجه، الذي سيعني أن وجهي التغطية قد تفككا بذلك عن النواة الرابطة، الأمر الذي سيسرع بانهيائها قبل أن تصل شدة الإجهادات المركزة إلى إحداث مثل هذه التشوهات الموضعية.

يستنتج من المخططات البيانية لعلاقة الانتقال بالحمولة المعطاة في الشكل (8) أن سلوك العينات الست الأولى في الحالة الثانية للاختبار قد انحرف قليلاً أو كثيراً في مراحل بداية الاختبار عن الحالة الخطية تقريباً التي ميزت سلوك العينه عند تحميلها باتجاه التحميل الأول، ليعود بعد ذلك إلى السلوك الخطي، أيضاً، حتى بدء تشكل إجهاد التجعيد لهذا الوجه الثاني للعينه الذي تلاه الانفصال التدريجي للطبقة عن مادة النواة للوح السندويشي. إذ يمكن إرجاع التباين الأكبر لاختلاف انتقالات العينه في المراحل الأولى لحالة التحميل الثانية عن تلك المقابلة لها في حالة التحميل الأولى إلى أمرين أساسيين:

1- التشوهات الموضعية المتشكلة في العينه المجربة عند أماكن انتقال الحمولات عليها في حالة التحميل الأولى.

2- بقاء انحناء نهائي في العينه بعد انتهاء تحميلها على الوجه الأول بمراحل تجاوزت مرحلة السلوك

المرن.

إن الأمر الأكثر أهمية، أيضاً، الذي يمكن استنتاجه بوضوح من المخططين البيانيين المعروضين للعينتين 8 و 9 اللتين حُمّلتا على الوجه الأول حتى قيمة إجهاد التجعيد الحرج فقط، المحدد مقدارها 100 Mpa بموجب تقويم نتائج اختبار العينات المبينة في البند الأول بالتحميل على وجه واحد حتى الانهيار، هو أن سلوك كل منهما بقي في حالة التحميل على الوجه الثاني خطياً، أيضاً، ومطابقاً تماماً في انتقالاته لذلك الناتج عن التحميل على الوجه الأول إلى أن

تم تجاوز إجهاد التجعيد لتحميل الوجه الثاني بقليل. إن هذا التطابق ناجم بكل تأكيد عن عدم تجاوز التحميل المطبق على الوجه الأول حد السلوك الخطي لعينة اللوح السندويشي المجرب، مما يعني أن اللوح يعود لسلوك نفسه عند تحميله للمرة الثانية حتى انتهاء مرحلة السلوك الخطي له.

يلاحظ من قيم إجهاد التجعيد الحرج لتحميل الوجه الثاني للعينات المجربة المشار إليها في الجدول (2) أنها تتراوح لأغلب العينات حول 60 Mpa مع تميز قيمته للعينة 3 بحوالي 50% زيادة عن القيمة المذكورة، التي أبدت، أيضاً، في الحالة الأولى قيمة مميزة أكثر من بقية العينات، إذ يمكن إرجاع ذلك إلى تميز هذه العينة بجودة خاصة من تقانة الالتصاق بين النواة ووجهيها من جهة، واكتناز أكثر للنواة بحد ذاتها من جهة ثانية، مما حد من تأثير نتائج تحميل الوجه الأول على قدرة مقاومة العينة لتشكيل إجهاد التجعيد عند التحميل على الوجه الثاني.

إن الأمر المفيد الإشارة إليه هو أن الاكتفاء بتحميل الوجه الأول للعينة بالحمولة المؤدية لبلوغ إجهاد التجعيد فقط، كما الحال عليه للعينتين 8 و9، أو الاستمرار بهذا التحميل حتى الانهيار، كما حصل لبقية العينات، لم يؤدي إلى تباين مهم بقدرة مقاومة العينة لتشكيل إجهاد التجعيد للوجه الثاني عند تبديل اتجاه التحميل، إذا استثنينا الزيادة الطفيفة المسجلة لإجهاد التجعيد للوجه الثاني للعينة 9 عن قيمته للعينات الأخرى باستثناء العينة 3.

لذلك، نستطيع أن نستخلص أن تبديل اتجاه التحميل استراتيجياً يؤدي إلى انخفاض إجهاد التجعيد بنسبة 40% عن إجهاد التجعيد لتحميل اللوح السندويشي باتجاه واحد، مع استثناء نتائج العينة 3 واعتبارها على جانب احتياطي من الأمان الإضافي.

هذا يعني أن قيمة المعامل α في العلاقة (1) ستخف عند الأخذ في الحسبان وجود تبديل في اتجاه تأثير التحميل الستاتيكي إلى:

$$\alpha = 0.91 \cdot 0.6 \approx 0.55 (4)$$

لتأخذ علاقة إجهاد التجعيد الحرج الصيغة:

$$\sigma_{cr} = 0.55(E_f E_c G_c)^{1/3} (5)$$

بذلك، يتم تحقيق قدرة التحمل للوح السندويشي بتقسيم القيمة على معامل التصميم المعتمد في الأنظمة والكودات المختلفة، لاسيما الأوروبية منها، على أنه مساوٍ إلى $\nu = 1.1$ [8].

الاستنتاجات والتوصيات:

يسمى إجهاد الضغط الناظمي على مقطع طبقة تغطية اللوح السندويشي بنواة من الفوم المؤدي إلى إحداث تجعيد موجي لطبقة التغطية نتيجة تحميل اللوح عمودياً على محوره بإجهاد التجعيد الحرج. تمثل قيمة هذا الإجهاد واحدة من أهم البيانات التصميمية لتحديد قدرة تحمل واستقرار العناصر السندويشية المركبة من مثل هذه الألواح. لقد أظهر التحري التجريبي في هذا البحث عن قدرة تحمل ألواح العناصر السندويشية المنتجة محلياً بطبقتي تغطية معدنيتين ونواة من البوليوريثان أن قيمة إجهاد التجعيد الحرج تتأثر تأثيراً كبيراً بتبديل اتجاه الانعطاف أو تأثير التحميل الستاتيكي الذي غالباً ما يخضع له اللوح السندويشي المستثمر كعنصر إنشائي، حيث تبين أن قيمته قد انخفضت نتيجة هذا التبديل في اتجاه التحميل بحوالي 40% عن حالة عدم التبديل، إذ يمكن التعبير عن هذا الانخفاض من خلال قيمة المعامل α في الصيغة العامة لإجهاد التجعيد الحرج σ_{cr} ، كما تبينه العلاقة (1)،

حيث استنتج بموجب الوقائع التي وفرتها تقنيات الاختبار أن المعامل α يقبل للألواح السنديشية المنتجة محلياً القيمة 0,91 لأجل تأثير التحميل في اتجاه واحد، بينما تنخفض هذه القيمة لأجل التأثير المتبادل استاتيكيّاً لاتجاه التحميل لتصبح 0,55، وليكون معها الإجهاد الحرج σ_{cr} مساوياً إلى 60 Mpa.

يستخلص، مما أظهرته العينات المختبرة من عودتها إلى السلوك الخطي بعد المراحل الأولى لتبدل اتجاه التحميل، واحتفاظها بهذا السلوك حتى بلوغ قيمة إجهاد التجعيد الحرج على الأقل، بأنه يمكن حساب الانتقالات المتشكلة في مثل هذه العناصر بدقة كافية لكل من اتجاهي التحميل بموجب علاقات التعريف بالخط المرن للعناصر الطولية، حيث تمثل هذه الانتقالات تلك الناتجة عن الانعطاف لطبقتي التغطية، والقص لنواة اللوح السنديشي، شرط عدم تجاوز الإجهاد الناظمي المطبق على مقطع طبقة التغطية إجهاد التجعيد الحرج.

إن اقتصار النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث على حالة التحميل المباشر للعينات المختبرة يقتضي السعي للأخذ في الحسبان لاحقاً لتأثير التحميل الطويل الأمد على قيم المعامل α المشتقة، وحدود الانتقالات المسموحة في العناصر المكونة من هذه الألواح السنديشية، سواء أكان ذلك لأجل تأثير التحميل باتجاه واحد أم لتأثيره باتجاهين متبدلين، مع تفضيل أن يجري ذلك بتوفير نظام تحميل مناسب لاختبار اللوح السنديشي بعرضه الكامل، وعلى عدد أكبر من العينات التي يمكن استحضارها لاحقاً من مصدرها.

المراجع:

- [1] Pokharel, Narayan: Docturate Thesis, Behavior and Design of Sandwich Panels Subjected to Local Bucling and Flexural Wrinkling Effects, Queensland University 2003, Australia.
- [2] Sakkour, Akram: Mechanics of Materials, Bd. 2, Tishreen University, 2011.
صقور، أكرم: ميكانيك المواد، الجزء 2، جامعة تشرين، 2011.
- [3] Zenkert, D. : An introduction to sandwich construction, Engineering Materials Advisory Services Ltd, Solihull, UK, pp.1-60, 1995.
- [4] Davies, J.M. : Sandwich panels , Thin-Walled Structure , Vol.16 , pp. 179-198, 1993.
- [5] Ley,R.P., Lin, W., and Mbanefo, U.: Face sheet wrinkling in sandwich structure. NASA: Langley Research Center, pp.1-30, 1999.
- [6] Plantema, F. J.: Sandwich Construction. The Bending and Buckling of Sandiwch Beams, Plates and Shells. Johnwiley and Sons Inc., Newyork, London, Sydney,1966.
- [7] 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.

- [8] CIB2000, International Council for Building Research, Studies and Documentation "European Recommendations for Sandwich Panels, Part 1, Design", CIB Publication, pp.1-900.
- [9] S. Burkhardt: Tragfähigkeitsermittlung von Sandwichelementen mit ebenen und schwach profilierten Deckschichten, Wilhelm Ernst & sohn Verlag für Architektur und technische wissenschaften, Berlin, pp.23-27, 1989.
- [10] عمران، جلال: مساهمة في دراسة استقرار طبقات التغطية المعدنية المستوية أو شبه المستوية للعناصر السندوبيشية ذات نواة من مادة البوليوريثان /PUR/، بحث ماجستير 2013.