Effect of Polyurethane (PUR) Core Density of Sandwich Elements with Two Metal Layers on their Resistance to Tensile Stresses

Mohammad Ghanem [*]
Dr. Akram Sakkour [**]

(Received 24 / 2 / 2026. Accepted 24 / 5 / 2026)

□ ABSTRACT □

The use of lightweight sandwich elements in engineering structures requires the availability of a basic database of the mechanical and physical specifications of their components in order to adjust the structural design standards for tension, compression, and shear, taking into account the limits of accompanying deformations during the investment lifespan.

This research paper seeks to highlight the effect of the density of the core of locally produced sandwich panels with two metal coating layers on the elasticity coefficients of this polyurethane core, and the level of tensile stresses that can be subjected to without compromising the functional performance of these elements as a result of the local deformations that accompany the application of these stresses and the resulting collapse patterns of these panels.

It has been possible, through analyzing the experimental results obtained in this research in conjunction with the relevant results of previous research, to understand this effect of core density in a simplified form for practical applications that include some of these requirements, The quality of the adhesive between the core and the board's covering layer plays a key role in the degree to which this core can withstand tensile stresses, and in determining the board's failure pattern between the creasing of the covering layer or the shear failure of the core.

Keywords: Sandwich Elements Panels, Polyurethane Core, Core Density, Core Tensile Stress, Core Elastic Modulus.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

[*] **PhD Student – Department of Structural Engineering– Faculty of Civil Engineering– Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia- Syria. m7mdbg95@gmail.com**
[**] **Professor- Department of Structural Engineering - Faculty of Civil Engineering - Latakia University (formerly Tishreen)-- Latakia- Syria. akramalisakkour@outlook.com**

تأثير كثافة نواة البوليوريتان /PUR/ للعناصر السندويشية بطبقتين معدنيتين على تحملها لإجهادات الشد

محمد غانم*

د. أكرم صقور**

(تاريخ الإيداع 24 / 2 / 2026. قُبِل للنشر في 24/ 5 / 2026)

□ ملخّص □

يتطلب توظيف العناصر السندويشية الخفيفة في المنشآت الهندسية توافر قاعدة بيانات أساسية بالمواصفات الميكانيكية والفيزيائية لمكوناتها لضبط معايير التصميم الإنشائي لها على الشد والضغط، والقص أخذاً في الحسبان لحدود التشوهات المرافقة خلال العمر الزمني للاستثمار.

تسعى هذه الورقة البحثية إلى إبراز تأثير كثافة نواة الألواح السندويشية المنتجة محلياً بطبقتي تغطية معدنيتين على معاملات المرونة لهذه النواة من البوليوريثان، ومستوى إجهادات الشد التي يمكن إخضاعها لها بدون الإخلال بالأداء الوظيفي لهذه العناصر نتيجة التشوهات الموضعية التي ترافق تطبيق هذه الإجهادات وما تحدثه من أنماط انهيار لهذه الألواح.

لقد أمكن، من خلال تحليل النتائج التجريبية التي تم التوصل إليها في هذا البحث ربطاً باستثمار النتائج ذات الصلة لأبحاث سابقة، استيعاب هذا التأثير لكثافة النواة بصيغة مبسطة للتطبيقات العملية التي تتضمن بعضاً من هذه المتطلبات، والتي تلعب فيها جودة اللاصق بين النواة وطبقة تغطية اللوح دوراً اساسياً في درجة تفعيل دور هذه النواة على تحمل إجهادات الشد، وتحديد نمط انهيار اللوح بين التجعيد لطبقة التغطية أو الانهيار القصي للنواة.

الكلمات المفتاحية: ألواح العناصر السندويشية، نواة البوليوريثان، كثافة النواة، إجهاد شد النواة، معامل مرونة النواة.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **طالب دكتوراه - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية- سورية.**
m7mdbg95@gmail.com

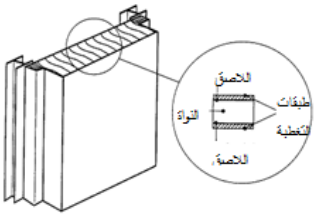
** **أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية- جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية- سورية.**
akramalisakkour@outlook.com

1- مقدمة:

تعرف الألواح السندويشية بأنها تلك التي تحتوي على نواة خفيفة الوزن ملصقة بإحكام إلى طبقتي تغطية من مادة بمواصفات ميكانيكية مرتبطة بالوظيفة المعدة لأجلها.

يبين الشكل (1) هذه البنية الأساسية للوح السندويشي الذي يتم إنتاجه بالأطوال المطلوبة كعناصر جاهزة للاستخدام في المنشآت الهندسية.

لقد انتشر مؤخراً إنتاج مثل هذه الألواح على الصعيد المحلي، كما العالمي، لاستخدامها في المجالات الهندسية



الشكل (1): اللوح السندويشي [1]

كعناصر إنشائية حاملة كأسقف، وبلاطات، وجدران، وذلك بتزويدها بطبقتي تغطية ذات مواصفات ميكانيكية عالية من الفولاذ المقاوم لتحمل الإجهادات الاستثمارية التي يمكن أن تخضع لها. إلا ان هذا الاستثمار المحلي لم يقترن بتوافر كاف لمعايير التصميم التي تحفظ لها وظيفتها المعدة لها.

سعياً وراء الإحاطة بمثل هذه المعايير يجري العمل على سلسلة من الإجراءات البحثية لاستكمال ما تم البدء فيه في أبحاث سابقة لتوفير قاعدة البيانات الأساسية لمستلزمات التصميم لهذه العناصر الإنشائية بناء على مكوناتها وبنيتها المختلفة لمنع حدوث أي نمط من أنماط الانهيار الممكنة في هذه المكونات كالتجعد الموجي لطبقة التغطية، وقص النواة ، والتشوه الموضعي في أماكن تطبيق الحمولات ونقاط الاستناد وسواها، حيث تضمنت أغلب المراجع أشكال أنماط الانهيار هذه، ومنها [2].

نبين في الشكل (2) صوراً لبعض من هذه الأنماط التي انعكست بشكلٍ جلي في الواقع التجريبي للبحث الذي أجراه Omran عام 2020 [3]. إذ تظهر الصورة الأولى انهيار لاصق طبقة التغطية والنواة بتأثير التجعيد الحاصل لهذه الطبقة، بينما توضح الثانية انهيار اللوح بالقص الانعطافي للنواة الحاصل جوار المسند نتيجة تجاوز إجهادات القص لإجهادات الشد التي تتحملها نواة اللوح.

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

b: صورة انهيار قصي للنواة بزاوية 45 درجة جوار المسند

الشكل (2): أنماط انهيار عناصر الألواح السندويشية المنعطفة[3]

لطالما أن توفير قاعدة البيانات المطلوبة يعتمد بالدرجة الأولى على المعطيات المتعلقة بالمواصفات الميكانيكية والفيزيائية لمكونات اللوح السندويشي، فإن هذه الورقة العلمية تسعى إلى الاستنتاج تجريبياً لتأثير كثافة

نواة اللوح على تحمل إجهادات الشد التي يمكن أن تخضع لها هذه النواة نتيجة تجعيد طبقة التغطية، أو إجهادات القص المؤثرة فيها.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث ضمن نطاق المساعي المبذولة للتأسيس لسلسلة البيانات اللازمة للتعريف بالسلوك الإنشائي لمنتجاتنا المحلية من الألواح السندويشية.

إنه يهدف إلى الإحاطة بالدور الذي تلعبه كثافة نواة اللوح السندويشي في مستوى إجهادات الشد التي يمكن تطبيقها على هذه النواة ولاصقها للحد من مقدار التشوهات المرافقة لها، والتي تشكل عاملاً مهماً من عوامل الاستقرار والاستثمار الوظيفي للوح لمنع حصول التجعيد لطبقته، أو القص لنواته.

3- طرائق البحث ومواده:

بنيت طرائق إجراء البحث على التحليل الرياضياتي للنتائج التجريبية على عينات من نموذجين من الألواح السندويشية المنتجة محلياً، والمكونة من طبقتي تغطية معدنيتين لحشوة من البوليوريتان لاستخلاص الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمادة النواة، وتحديد مخطط الإجهاد التشوه التجريبي، والمعياري لها، مع الأخذ في الحسبان لوقائع ونتائج الدراسات المرجعية التحليلية والتجريبية لنماذج أخرى من الألواح والعناصر السندويشية بالحشوة نفسها من البولوريتان [3].

لقد شكلت العينات المأخوذة عشوائياً من نموذجين من الألواح المنتجة محلياً بسطحها المستوٍ المحضرة إلى المخبر مادة هذا البحث.

النموذج الأول هو بسماكة كلية مقدارها 101 ملم، ومؤلفة من نواة من البوليوريتان بسماكة 100 ملم، وكثافة $\rho = 35kg/m^3$ مع طبقتي تغطية بسماكة 0.5 ملم لكلٍ منهما. والنموذج الثاني بسماكة كلية مقدارها 51 ملم، ومؤلفة من نواة من البوليوريتان بسماكة 50 ملم، وكثافة $\rho = 32kg/m^3$ مع طبقتي تغطية بسماكة 0.5 ملم لكلٍ منهما. أما طبقات التغطية للنموذجين فهي مصنوعة من الفولاذ ST52 المحدد تجريبياً في مخبر البحث.

لقد استخدمنا لإجراء الاختبارات اللازمة بالتحميل المباشر على العينات جهاز الاختبار غير الميكانيكي نفسه الذي أعد في الأبحاث السابقة، والذي أثبت فعاليته في التعريف شبه الدقيق للخصائص الميكانيكية بالضغط، والشد، والقص لمثل هذه المادة الحساسة [4].

نظراً لاقتصار هذا البحث على نتائج سلوك نواة اللوح بالشد نبين في الشكل (3) تجربة الشد المنفذة على الجهاز مع أنظمة التحميل والقياس للتشوهات، إذ تجرى الاختبارات على عينات:

1- بمقطع ثابت للعينة dX100X100 mm لاختبار النواة واللاصق، كما في الشكل (3)، حيث d سماكة العينة أو سماكة اللوح السندويشي المستخدم في البحث.

الشكل (3): نظام التجريب للمقطع الثابت

2- بمقطع متدرج الانحناء باتجاه وسط النواة للعينة ليصبح مقطها في الوسط 30X30 mm لاختبار مقاومة النواة على الشد، كما في الشكل (4).

الشكل (4): نظام التجريب بالمقطع متدرج الانحناء

تتم دراسة سلوك المادة المجربة، واشتقاق الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لها من خلال إيجاد مخطط الإجهاد التشوه للعينات المجربة على الشد بالمقطع الثابت حتى حصول الانهيار لها.

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 للعينة ضمن مرحلة التحميل المدروسة:

$$\sigma = \frac{N}{A} \qquad (1)$$

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

أما التشوه الحاصل لكل مرحلة من مراحل التحميل فيحسب للعينة بالمقطع الثابت بموجب العلاقة:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_c}{t_c} \qquad (2)$$

حيث تمثل Δt_c مقدار استطالة النواة التي تسجلها أجهزة القياس التجريبية.

يتم حساب معامل الميول لمخطط الإجهاد التشوه لكل مرحلة من مراحل التحميل بالصيغة الآتية [5,6].

$$E_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\varepsilon_i} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} \qquad (3)$$

بالنظر إلى إمكانية حصول انهيار الالتصاق للعينة إما بانهيار 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:

$$\sigma_{pa} = \frac{N}{A_{pa}} \qquad (4)$$

تمثل A_{pa} مساحة سطح التصاق النواة بطبقة التغطية للعينة المدروسة، و $N = F$ قوة الشد المطبقة على العينة.

هكذا، فقد أجرينا لدراسة السلوك بالشد للمادة المختبرة اختبارات على 24 عينة من النموذجين المدروسين.

4- النتائج والمناقشة:

لقد أجريت المعالجة التحليلية بالعلاقات (1)، و (2)، و (3) لمراحل التحميل المتتالي المطبق على كل عينة من العينات المجربة، وتم الاكتفاء بالأدراج في الجدولين (1)، و (2) لتغير قيم معامل مرونة النواة مع قيمة الاجهاد المطبق على العينة لعشر مراحل متناوبة من حالات التحميل تغطي مجال التحميل المطبق على العينة حتى ما قبل حصول الانهيار فيها، والذي يتمثل بالتشوه السريع أو الذاتي بعد بلوغ الإجهاد المطبق قيمة معينة مرتبطة بالبنية الداخلية لكل عينة من العينات، بينما مثلت تخطيطياً في الشكلين (3)، و (4) العلاقة بين الاجهاد والتشوه لكافة مراحل التحميل المطبقة على العينات المختبرة من كل نموذج من نموذجي الألواح السندويشية المشمولة في البحث.

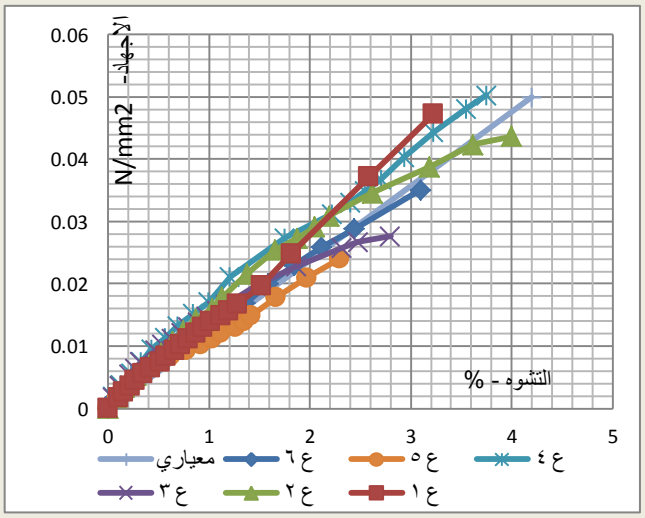
أما نتائج اختبار العينات بالمقطع المتدرج الانحناء لنواة العينة فقد بينت في الجدولين (3)، و (4).

الجدول (1): عينات المقطع الثابت لنموذج الألواح الأول A بسماكة نواة 100 مم وكثافة $\rho = 35kg/m^3$

عينة 1 نموذج A			عينة 2			عينة 3		
الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2
0.0000	0.000		0.000	0.00		0.000	0.00	
0.0018	0.110	1.65	0.002	0.09	1.90	0.002	0.05	3.63
0.0037	0.220	1.70	0.005	0.28	1.89	0.006	0.21	2.31
0.0056	0.350	1.46	0.009	0.53	1.43	0.007	0.32	1.75
0.0074	0.520	1.09	0.013	0.75	1.65	0.010	0.54	1.28
0.0093	0.660	1.34	0.016	1.04	1.23	0.012	0.73	0.96
0.0112	0.800	1.32	0.022	1.38	1.62	0.014	0.89	1.14
0.0130	0.940	1.32	0.027	1.88	1.15	0.016	1.08	0.97
0.0148	1.120	1.02	0.031	2.19	1.17	0.020	1.47	1.03
0.0167	1.280	1.17	0.039	3.19	0.79	0.026	2.32	0.71
0.0248	1.820	1.50	0.042	3.62	0.83	0.027	2.48	0.57
0.0474	3.230	1.60	0.044	4.00	0.35	0.028	2.80	0.31
0.0507	انفصال اللاصق		0.049	انفصال اللاصق		0.031	انفصال اللاصق	

عينة 4 نموذج A			عينة 5			عينة 6		
الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_c N/mm^2
0.000	0.00		0.000	0.00		0.000	0.00	

2.30	0.12	0.003	1.82	0.10	0.002	3.87	0.05	0.002
1.58	0.24	0.005	1.57	0.22	0.004	2.11	0.23	0.006
1.22	0.39	0.006	1.92	0.32	0.006	1.89	0.43	0.009
0.90	0.60	0.008	0.93	0.52	0.007	1.45	0.69	0.013
1.18	0.76	0.010	0.72	0.78	0.009	1.25	1.00	0.017
1.02	0.95	0.012	0.70	1.04	0.011	1.36	1.75	0.027
1.20	1.11	0.014	0.79	1.27	0.013	0.88	2.40	0.033
1.16	1.27	0.016	1.30	1.42	0.015	1.19	2.71	0.037
1.26	1.59	0.020	1.19	1.67	0.018	1.46	3.23	0.044
1.14	2.12	0.026	1.01	1.97	0.021	1.17	3.55	0.048
0.92	3.10	0.035	0.94	2.30	0.024	1.05	3.75	0.050
إجهاد انفصال اللاصق		0.038	إجهاد انفصال اللاصق		0.028	إجهاد انفصال اللاصق		0.053

نمط الانهيار	انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل	انفصال طبقة التغطية متوسط إجهاد انهيار لاصق العينات: $\sigma_{pa} = 0.04\,MPa$	

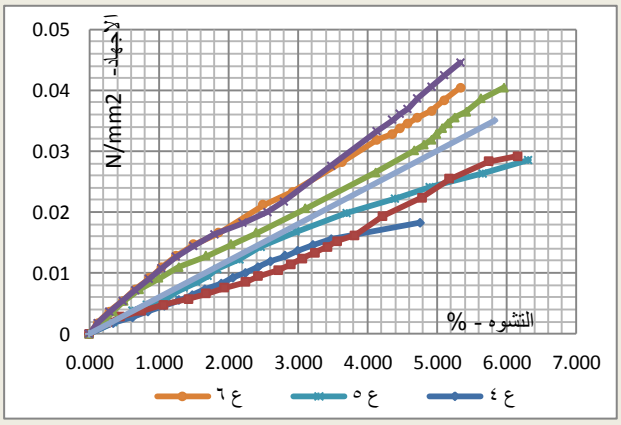
شكل(3): المخططات البيانية لسلوك عينات النموذج بسماكة نواة 100 مم وكثافة $\rho = 35kg/m^3$

الجدول (2): عينات المقطع الثابت لنموذج الألواح الثاني B بسماكة نواة 50 مم وكثافة $\rho = 32kg/m^3$

عينة 1 نموذج A			عينة 2			عينة 3		
الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2	الإجهاد σ N/mm^2	التشوه ε %	معامل مرونة النواة E_t N/mm^2
0.0000	0.000		0.0000	0.000		0.0000	0.000	
0.0018	0.120	1.47	0.0018	0.200	0.90	0.0019	0.260	0.71
0.0054	0.480	1.01	0.0055	0.500	1.22	0.0038	0.780	0.37
0.0090	0.860	0.95	0.0091	1.000	0.73	0.0057	1.440	0.29
0.0126	1.240	0.95	0.0128	1.680	0.54	0.0075	1.940	0.37
0.0164	1.800	0.67	0.0166	2.400	0.53	0.0095	2.420	0.40
0.0199	2.560	0.47	0.0265	4.120	0.57	0.0114	2.900	0.41
0.0276	3.480	0.84	0.0310	4.820	0.65	0.0134	3.240	0.57
0.0351	4.360	0.85	0.0328	5.000	0.99	0.0152	3.560	0.59

0.62	4.220	0.0193	1.11	5.160	0.0346	0.82	4.580	0.0369
0.64	5.180	0.0254	0.71	5.420	0.0364	1.09	4.920	0.0406
0.39	6.160	0.0292	0.73	5.960	0.0404	0.92	5.340	0.0445
انفصال اللاصق		0.0335	انفصال اللاصق		0.0445	انفصال اللاصق		0.0495

عينة 6			عينة 5			عينة 4 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
	0.000	0.0000		0.000	0.0000		0.00	0.000
1.49	0.120	0.0018	0.54	0.340	0.0019	0.53	0.34	0.002
1.02	0.480	0.0055	0.68	0.620	0.0038	0.37	0.84	0.004
0.97	0.860	0.0091	0.38	1.120	0.0057	0.66	1.12	0.005
0.96	1.240	0.0128	0.78	1.360	0.0075	0.33	1.66	0.007
0.61	1.860	0.0166	0.57	1.700	0.0095	0.47	2.06	0.009
0.64	2.920	0.0233	0.61	2.160	0.0123	0.50	2.42	0.011
0.71	4.140	0.0319	0.56	2.960	0.0167	0.45	2.82	0.013
0.56	4.460	0.0337	0.38	4.400	0.0222	0.51	3.00	0.014
0.70	4.720	0.0355	0.37	4.900	0.0241	0.41	3.22	0.015
0.75	5.100	0.0384	0.30	5.660	0.0264	0.36	3.48	0.016
0.84	5.340	0.0404	0.32	6.320	0.0285	0.08	4.76	0.017
إجهاد انفصال اللاصق		0.0450	إجهاد انفصال اللاصق		0.0327	إجهاد انفصال اللاصق		0.029



شكل(4): المخططات البيانية لسلوك عينات النموذج بسماكة نواة 50 مم وكثافة $\rho = 32kg/m^3$

انفصال طبقة التغطية

متوسط إجهاد انهيار لاصق العينات:

$\sigma_{pa} = 0.04\,MPa$

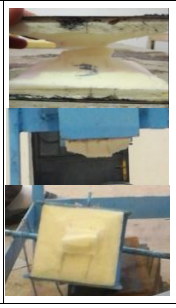
انفصال طبقة التغطية عن النواة وفق الشكل

نمط الانهيار

الجدول (3): عينات المقطع بالانحناء الداخلي المتدرج في اتجاهين لنموذج الألواح الأول بسماكة نواة 100 مم وكثافة $\rho = 35kg/m^3$

رقم العينة	1	2	3	4	5	6	7	المتوسط
إجهاد انهيار النواة σ N/mm^2	0.126	0.131	0.141	0.163	0.162	0.135	0.117	0.140
إجهاد اللاصق المطبق σ_{pa} N/mm^2	0.011	0.012	0.013	0.015	0.015	0.012	0.010	0.013
نمط الانهيار	انقطاع النواة في المستوي المتوسط لها تماماً وفق الشكل جانباً ليعبر بذلك عن الحالة الأمثل لاختبار مقاومة شد النواة							

الجدول (4): عينات المقطع بأجزاء الانحناء الداخلي المتدرج في اتجاهين لنموذج الألواح الثاني B بسماكة نواة 50 مم وكثافة $\rho = 32kg/m^3$

رقم العينة	1	2	3	4	5	6	7	المتوسط
إجهاد انهيار النواة σ N/mm^2	0.117	0.102	0.145	0.108	0.140	0.153	0.108	0.125
إجهاد اللاصق المطبق σ_{pa} N/mm^2	0.011	0.009	0.014	0.010	0.014	0.013	0.010	0.012
نمط الانهيار	انقطاع النواة في المستوي المتوسط لها تماماً وفق الشكل جانباً ليعبر بذلك عن الحالة الأمثل لاختبار مقاومة شد النواة							

نلاحظ من خلال المخططات البيانية لسلوك العينات المختبرة من نموذجي الألواح، وقيم معاملات المرونة لمراحل تحميل العينة أن هذا السلوك غير خطي ومتباين بين العينات حتى من النموذج نفسه.

ولطالما 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 إلى سلوك خطي حتى بدء تشكل إجهاد الانهيار فيها.

لأجل هذا الغرض وللأخذ 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 العملية الرياضياتية المعتمدة في المرجع [4]، والتي تتبنى إيجاد نهاية التوسيط المتتالي لعدد كافٍ من قيم معاملات المرونة للعينة المجربة لتخطي، على الأقل، مجالات مراحل التحميل الأولى لإعادة هيكلة النواة لبنيتها الداخلية وصولاً إلى قيمة بدء انخفاض هذا المعامل في مراحل التحميل الأخيرة للعينة، ولتأخذ في الحسبان التأثير الأكبر لقيم معاملات المرونة الداخلية لنتائج التجربة، ثم تحدد القيمة المرجعية النهائية للعينات المجربة بإيجاد المتوسط الحسابي لنتائج المعاملات الإفرادية.

بما أنه أثبت في هذه الطريقة أن الدقة الكافية يمكن أن تتحقق بالأخذ في الحسبان لعشر قيم من معاملات المرونة للتجربة الواحدة كما هي مبينة في الجدولين (1) و (2) لتشمل سلوكها ما قبل الانهيار، سوف تكون الصيغة المصفوفية لحساب معامل المرونة لكل عينة بطريقة التوسيط المتتالي المذكورة أعلاه هي:

$$\frac{[E_1 \;\; E_2 \;\; .....E_{n-1} \;\; E_n]}{2^{n-1}} \times [1 \;\; 9 \;\; 36 \;\; 84 \;\; 126 \;\; 126 \;\; 84 \;\; 36 \;\; 9 \;\; 1]^{-1} \qquad (4)$$

حيث $n = 10$.

هكذا، سنجد أن هذا المعامل المعياري لنتائج عينات النموذجين المدروسين هو المعطى في الجدول (5)، والجدول (6).

الجدول (5): المعاملات المعيارية للنموذج الأول بسماكة نواة 100 مم وكثافة $\rho = 35kg/m^3$

رقم العينة	1	2	3	4	5	6
Eci المعياري	1.28	1.39	1.14	1.32	0.91	1.11
E_t المعياري النهائي	$E_t = \sum E_{ii}/6 = 7.15/6 = 1.192MPa$					

الجدول (6): المعاملات المعيارية للنموذج الثاني بسماكة نواة 50 مم وكثافة $\rho = 32kg/m^3$

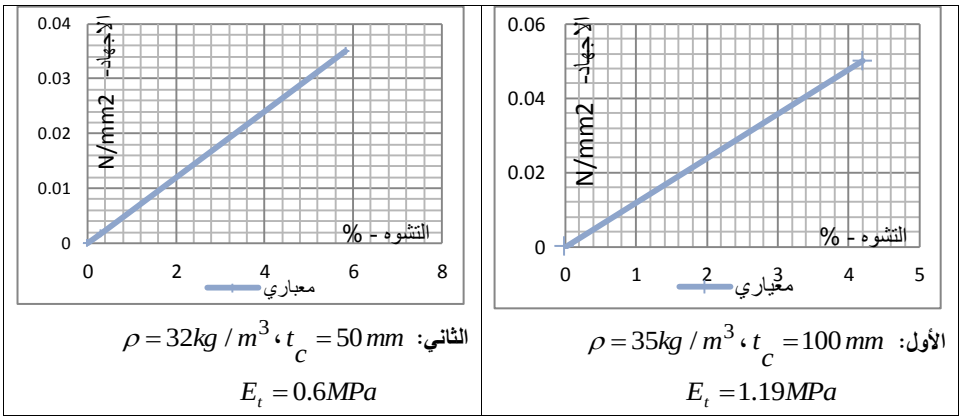
رقم العينة	1	2	3	4	5	6
Eci المعياري	0.74	0.63	0.45	0.46	0.58	0.72
E_t المعياري النهائي	$E_t = \sum E_{ti}/6 = 3.58/6 = 0.6MPa$					

لقد بينا في الجدولين (1)، و (2) أن لاصق النموذجين سينهار عند إجهاد شد يقارب $\sigma_{pa} = 0.04\,MPa$ ، بينما نلاحظ من الجدولين (5)، و (6) أن تحمل مادة النواة على الشد يصل في النموذج الأول إلى $0.14\,MPa$ ، وفي الثاني إلى $0.125\,MPa$.

هذا يعني أن المخطط المعياري لسلوك النواة على الشد المباشر محكوم بإجهاد انهيار اللاصق من جهة، والحدود الاستثمارية لتشوهات النواة المرافقة لإجهاد اللاصق من جهة أخرى.

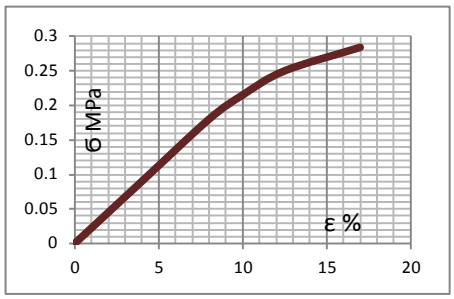
بذلك، يكون مخطط السلوك المعياري لكل من النموذجين هو المبين على المخططات البيانية لهما في الشكلين (3)، و (4)، والتي يستنتج من خلالها أنه عند قبول بقاء تشوه في العينة مقداره حوالي 4% كحد أقصى لعدم الإضرار بالوظيفة الاستثمارية للوح، فإن النموذج الأول يتحمل إجهادات تصل إلى $0.048\,MPa$ ، وتصل في الثاني إلى $0.028\,MPa$.

لذلك، إذا اقتصرنا على الجانب العملي من السلوك المعياري للنموذجين، فإن هذين المخططين يبينهما الشكل (5).



شكل (5): مخطط السلوك المعياري العملي بالشد لنموذجي الألواح المختبرة

يستنتج من خلال هذين المخططين للسلوك المعياري الدور الذي تلعبه كثافة نواة اللوح في تحمل إجهادات الشد المؤثرة عليه، ويصبح الأمر جلياً أكثر إذا أقترن ذلك مع ما تم الحصول عليه من مخطط معياري لنموذج آخر من نماذج الألواح السندويشية التي تضمنها بحث الدكتوراه الذي أجري عام 2020 [3]، والذي نبينه في الشكل (6).



شكل (6):
مخطط السلوك المعياري بالشد لنموذج من الألواح بسماكة للنواة $t_c = 80\,mm$، وكثافة $\rho = 40kg/m^3$، ومعامل مرونة $E_c = 2.27MPa$ [3]

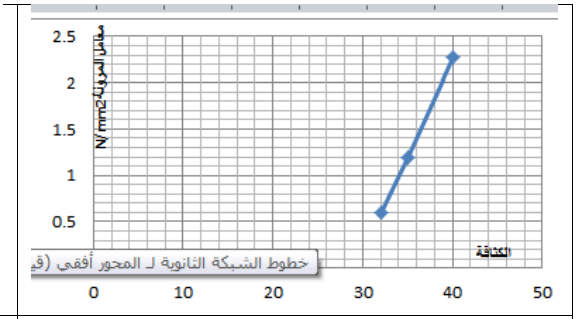
يستخلص من هذا المخطط أن الألواح السندويشية المنتجة من هذا النموذج بالكثافة للنواة $\rho = 40kg/m^3$ تتحمل إجهادات شد مباشر تتجاوز $0.09MPa$ لإحداث تشوه في النواة واللوح مقداره 4%. أي أنه يتحمل ضعفي ما يتحمله اللوح بالكثافة لنواته $\rho = 35kg/m^3$، وثلاثة أضعاف تقريباً للوح لأجل $\rho = 32kg/m^3$.

بالتالي، لإبراز تأثير كثافة النواة على تحمل إجهادات الشد فيها، وعلاقة هذه الكثافة بمعامل مرونة النواة أدرجنا في الجدول (7) القيم التي تمكنا من التمثيل البياني لهذا التأثير عند مستويين من الإجهاد $\sigma_c = 0.04MPa$، و $\sigma_c = 0.06MPa$.

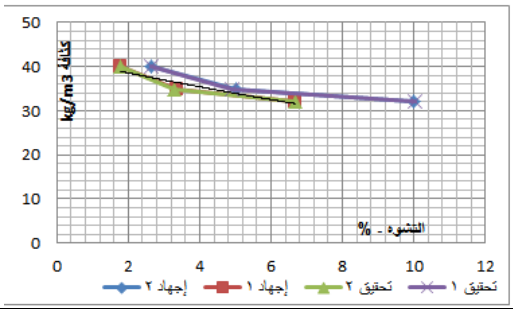
الجدول (7): قيم التشوهات لنماذج الألواح بالكثافات الثلاث عند مستويين من الإجهاد

الإجهاد σ_t (MPa)	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06
الكثافة ρ (kg/m^3)	32	35	40	32	35	40
معامل E_t (MPa)	0.6	1.19	2.27	0.6	1.19	2.27
التشوه %	6.67	3.36	1.76	10.0	5.03	2.64

لقد بينا في الشكلين (7)، و (8) التمثيل البياني لقيم الجدول (7).



شكل (7): المخطط البياني لعلاقة كثافة النواة بمعامل مرونتها



شكل (8): المخطط البياني لعلاقة كثافة النواة بالتشوه عند مستوي الإجهاد 1 (0.04 MPa)، والإجهاد 2 (0.06 MPa)

يستنتج من المخططات البيانية في الشكل (7) أن العلاقة بين معامل المرونة وكثافة النواة، أو تشوهات نواة اللوح وكثافتها، إن لم تكن خطية تماماً ربما بسبب عيوب الانتاج والاختبار، فهي شبه خطية حتماً.

لذلك، بحثنا لأجل التطبيقات العملية عن الصيغة الأمثل لتدوير شبه الخطية لهذه العلاقة إلى الخطية بالأخذ في الحسبان قيمة الإجهاد المطبق، فاستنتجنا أنها لأجل معامل المرونة ستأخذ الصيغة:

$$E_t = 0.209\rho - 6.09 \quad : \ \rho \in [30,50] \qquad (5)$$

بالتالي، فإن الإجهاد، والتشوه سيعطيان بالصيغتين:

$$\sigma_t = E_t \, \varepsilon_t \qquad (6)$$

$$\varepsilon_t = \sigma_t / (0.209\rho - 6.09) \quad : \ \rho \in [30,50] \qquad (7)$$

تعطي هذه العلاقات قيماً كافية عملياً من حيث الدقة ضمن المجال المحدد للكثافة أياً تكن قيمة إجهاد الشد المطبق على نواة اللوح حتى نهاية مرحلة سلوكها المرن المعياري، والذي يرتبط بتحمل اللاصق بالشد المباشر عمودياً في اتجاه سماكة اللوح، وبتحمل اللاصق والنواة نفسها في الشد غير المباشر نتيجة انعطاف اللوح.

فإذا افترضنا أن الإجهاد المطبق هو $\sigma_t = 0.06MPa$ مثلاً، سوف تكون قيم التشوهات ومعامل مرونة النواة هي وفقاً لما هو مبين في الجدول (8) التالي:

الجدول (8): قيم التشوهات ومعاملات المرونة لنماذج الألواح بالكثافات الثلاث عند إجهاد $0.06MPa$

الإجهاد σ_t (MPa)	**0.06**	**0.06**	**0.06**
الكثافة ρ (kg/m^3)	**32**	**35**	**40**
معامل E_t (MPa)	**0.6**	**1.19**	**2.27**
التشوه %	**10.03**	**4.90**	**2.64**

يلاحظ من القيم الحسابية لهذا الجدول أنها بدقة مقبولة عملياً مقارنة بالقيم المخبرية المعطاة في الجدول (7). وكذلك الأمر، إذا ما قارنا قيم التشوهات الحسابية الناتجة بقيمها الفعلية على مخططات السلوك المعياري (5)، و (6) سوف نجد أنها متطابقة إلى حد بعيد.

تقودنا هذا النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث إلى أنه يمكن في الدراسات الهندسية للعناصر الإنشائية من مثل هذه الألواح السندويشية أن تقتصر اختبارات مطابقة الجودة لها إلى حد كبير على ما يتعلق بجودة كثافة النواة لهذه الألواح، ليتم بموجبها تحديد قيمة إجهادات الشد التي يمكن تطبيقها كي لا تتجاوز التشوهات الموضعية فيها مقداراً مفترضاً بحسب أهمية الوظيفة الاستثمارية التي تؤديها.

فإذا افترضنا أن قيمة التشوه المسموحة للنواة لا تتجاوز 3%، فإن إجهاد الشد الذي يمكن تطبيقه على نواة اللوح بكثافة $\rho = 40kg/m^3$ سيكون بحسب العلاقة (6):

$$\sigma_t = E_t \, \varepsilon_t = (0.209 \cdot 40 - 6.09) \cdot 0.03 = 0.068 \, MPa$$

ولنواة كثافتها $\rho = 35kg/m^3$ هو $\sigma_t = 0.038\,MPa$ ، ولنواة كثافتها $\rho = 32kg/m^3$ هو $\sigma_t = 0.018\,MPa$.

بالتالي، عندما تصل التشوهات الموضعية في اللوح المنعطف إلى 3%، سوف ينفصل اللاصق ويتشكل التجعيد لطبقة التغطية في اللوح بالكثافة للنواة $\rho = 40kg/m^3$ نتيجة تجاوز الإجهاد فيها إجهاد تحمل اللاصق، كما يظهر ذلك في الشكل (2a)، بينما تتحمل الألواح بالكثافات $\geq 35kg/m^3$ هذه التشوهات بدون أن تنفصل طبقة التغطية، على اعتبار ان تحمل اللاصق $0.04\,MPa$.

إلا أن عدم انهيار اللاصق قد يترافق بتشكل إجهادات قص في مركز النواة مساوية لإجهادات تحملها على الشد فيحصل الانهيار القصي للوح المنعطف، كما يبينه الشكل (2b).

5. الاستنتاجات والتوصيات:

5-1: الاستنتاجات:

1- تلعب كثافة نواة اللوح السندويشي دوراً مهماً في مستوى إجهادات الشد المباشر الذي يمكن تطبيقه على اللوح عند التصميم الإنشائي لعناصر الألواح السندويشية المكونة من طبقتي تغطية معدنيتين وحشوة بينهما من البوليؤريتان.

2- بناء على كثافة نواة اللوح تساعد العلاقات (5)، (6)، و (7) في الحساب الدقيق عملياً لقيم التشوهات، والإجهادات، ومعاملات المرونة التي يتم بموجبها تحديد تشوه الشد الموضعي، وإجهاد انهيار النواة في عملية التحليل الإنشائي لعناصر الألواح السندويشية.

3- تلعب جودة اللاصق بين النواة وطبقة تغطية اللوح دوراً اساسياً في درجة تفعيل دور النواة على تحمل إجهادات الشد، وتحديد نمط انهيار اللوح بين التجعيد لطبقة التغطية أو الانهيار القصي للنواة.

3- يساعد التحقق من جودة كثافة نواة اللوح، وجودة اللاصق على التقليل من عدد الاختبارات اللازمة للضبط المعياري لمستلزمات التصميم الإنشائي لعناصر الألواح السندويشية.

5-2: التوصيات

1- إمكانية إجراء أبحاث أخرى تتناول كثافات لنواة الألواح مختلفة عن تلك المشمولة في البحث للضبط أكثر لدقة العلاقات المستنتجة في متن هذا البحث.

2- إمكانية استثمار الشركات المنتجة للألواح لنتائج البحث في ضبط جودة النواة واللاصق لتحسين تحمل إجهادات التشغيل المطلوبة.

References:

[1] J.M Davies,. 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] J. Omran,: Doctorate Thesis, Study of long-term and thermal loading effect on the mechanical properties and resistance of local produced sandwich panels of a Polyurethane core /PUR/, Tishreen University, PP. 1-282, 2020, Syria.

[4] J . Omran & A. Sakkour,: Properties of normative behaviour with tension of the light locally produced sandwich panels with two steel faces and a core of polyurethane (PUR), Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (41) No. (4), 2020, Syria.

[5] A. Sakkour: Mechanics of Materials, Bd. 1, Tishreen University, pp. 1-700,2016.

[6] A. Sakkour: Mechanics of Materials, Bd. 2, Tishreen University, pp 1-710, 2012