

## تأثير كثافة نواة البوليوريثان /PUR/ للعناصر السندويشية بطبقتين

### معديتتين على تحمل إجهادات الضغط المباشر على سطح اللوح

د. أكرم صقور \*

م. محمد غانم \*\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/٢٧ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١٢/٢٤)

□ ملخص □

يتطلب توظيف العناصر السندويشية الخفيفة في المنشآت الهندسية توافر قاعدة بيانات أساسية بالموصفات الميكانيكية والفيزيائية لمكوناتها لضبط معايير التصميم الإنشائي لها. تسعى هذه الورقة البحثية إلى إبراز تأثير كثافة نواة الألواح السندويشية المنتجة محلياً بنواة من البوليوريثان على معاملات المرونة لها، ومستوى إجهادات الضغط التي يمكن تطبيقها على سطح اللوح بدون الإخلال بالأداء الوظيفي لهذه العناصر نتيجة التشوهات الموضعية التي ترافق تطبيق هذه الإجهادات. لقد أمكن من خلال هذا البحث توضيح هذا التأثير لكثافة النواة بصيغة مبسطة تساعد عند إجراء التطبيقات العملية على هذه العناصر السندويشية الخفيفة .

**كلمات مفتاحيه:** ألواح العناصر السندويشية، نواة البوليوريثان، كثافة النواة، معامل مرونة النواة.

\* أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - سوريا

\*\* طالب دراسات عليا (دكتوراه) في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - سوريا

## Effect of polyurethane (PUR) core density of sandwich elements with two metal layers on the resistance to direct compressive stresses at the panel surface

Dr. Akram Sakkour \*\*  
Eng. Mohammad Ghanem \*

(Received 27/10/2025 . Accepted 24/12/2025)

□ ABSTRACT □

The use of lightweight sandwich elements in engineering structures requires a basic database of mechanical and physical specifications of their components to determine their structural design criteria.

This research paper aims to highlight the effect of core density of locally produced sandwich panels with a polyurethane core on their elastic modulus and the level of compressive stresses that can be applied to the panel surface without compromising the functional performance of these elements due to local deformations that accompany the application of these stresses.

This research has made it possible to explain this effect of core density in a simplified form that is helpful when carrying out practical applications on these lightweight sandwich elements.

**Keywords:** sandwich elements panels, polyurethane core, core density, core elastic modulus.

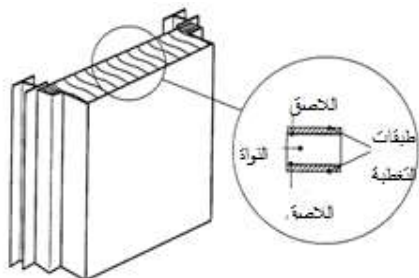
---

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

\*\* Graduate Student (PhD student) in Structural Engineering Department - Civil Engineering Faculty – Lattakia University-Syria

## ١ - 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 (١) 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

الشكل (١): اللوح السندويشي [1]

في المجالات الهندسية 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. سعيًا 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].

طالما أن توفير قاعدة البيانات هذه 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 الضغط المباشر.

## ٢ - أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من كونه يشكل حلقة لا بد منها للتأسيس لسلسلة البيانات اللازمة للتعريف بالسلوك الإنشائي لمنتجاتنا المحلية من الألواح السندويشية. و يهدف هذا البحث إلى الإحاطة بالدور الذي تلعبه كثافة النواة للوح السندويشي في مستوى إجهادات الضغط المباشر التي يمكن تطبيقها على اللوح للحد من مقدار التشوهات الموضعية المرافقة لها، والتي تشكل عاملاً مهماً من عوامل الاستقرار والاستثمار الوظيفي للوح.

## ٣ - طرائق البحث ومواده:

بنيت طرائق إجراء البحث على التحليل الرياضي للناتج 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 البوليوريتان [3].

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

النموذج الأول هو بسماكة كلية مقدارها ١٠١ ملم، ومؤلفة من نواة من البوليوريثان بسماكة ١٠٠ ملم، وكثافة  $\rho = 35kg/m^3$  مع طبقتي تغطية بسماكة ٠,٥ ملم لكل منهما. والنموذج الثاني بسماكة كلية مقدارها ٥١ ملم، ومؤلفة من نواة من البوليوريثان بسماكة ٥٠ ملم، وكثافة  $\rho = 32kg/m^3$  مع طبقتي تغطية بسماكة ٠,٥ ملم لكل 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 اليدوي 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 بالضغط نبين في الشكل (٢) نموذجي العينات المختبرة، وتجربة الضغط المنفذة على العينة بالجهاز المذكور مع أنظمة التحميل والقياس للتشوهات، إذ تجرى الاختبارات على عينات بأبعاد  $d \times 100 \times 100$  mm، حيث  $d$  سماكة العينة، أو سماكة اللوح السندويشي المستخدم في البحث، حيث تطبق الإجهادات عمودياً على سطح طبقة التغطية، وفي اتجاه موازي لسماكة النواة، كما يظهر ذلك على الشكل (٢-a-b) نفسه.



الشكل (٢-a): نموذج العينة سماكة ١٠ سم المختبرة مع نظام تجريب ضغط العينة



الشكل (2-b): نموذج العينة سماكة ٥ سم المختبرة مع نظام تجريب ضغط العينة

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

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1) \quad \text{يحسب الإجهاد في العينات بالعلاقة الآتية:}$$

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

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

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

حيث تمثل  $\Delta t_c$  مقدار استطالة النواة التي تسجلها أجهزة القياس التجريبية.

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

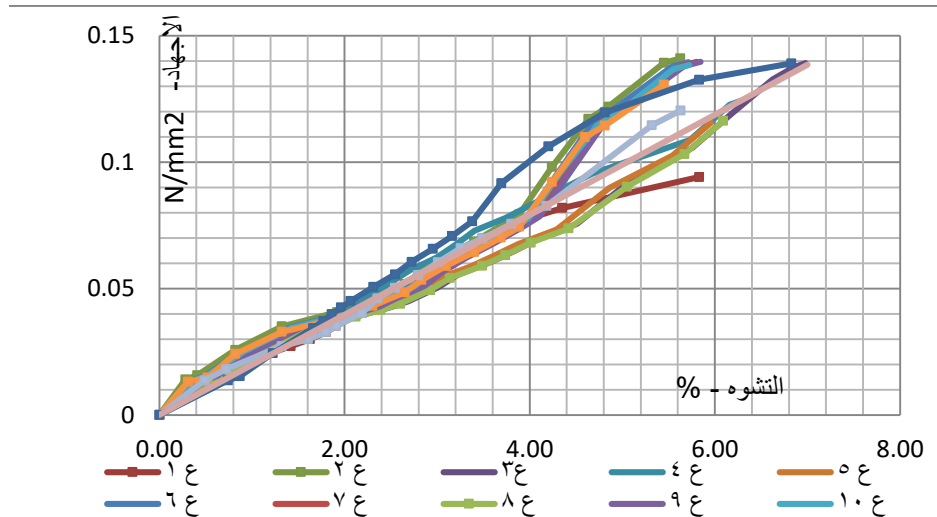
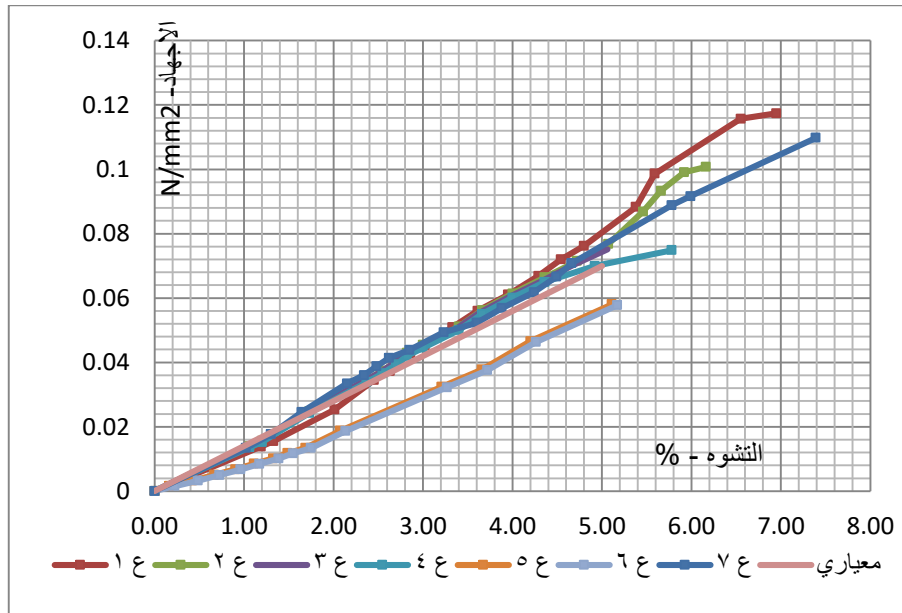
$$E_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} \quad (3)$$

هكذا، فقد أجرينا لدراسة السلوك بالضغط للمادة المختبرة اختبارات على ٢٠ عينة من النموذجين

المدرسين.

#### ٤ - النتائج والمناقشة:

لقد أجريت المعالجة التحليلية بالعلاقات (١)، و (٢)، و (٣) لمرحل التحميل المتتالي المطبق على كل عينة من العينات المجرية، ومثلت تخطيطياً في الشكلين (٣)، و (٤) العلاقة بين الاجهاد والتشوه لكافة مراحل التحميل المطبقة على العينات المختبرة من كل نموذج من نمودجي الألواح السندويشية المشمولة في البحث، بينما تم الاكتفاء بالإدراج في الجدولين (١)، و (٢) لتغير قيم معامل مرونة النواة مع قيمة الاجهاد المطبق على العينة لعشر مراحل متتوية 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.

شكل (٣): المخططات البيانية لسلوك عينات النموذج بسماكة نواة ١٠٠ مم وكثافة  $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$ شكل (٤): المخططات البيانية لسلوك عينات النموذج بسماكة نواة ٥٠ مم وكثافة  $\rho = 32 \text{ kg/m}^3$ الجدول (١): عينات النموذج الأول بسماكة نواة ١٠٠ مم وكثافة  $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$ 

عينة ٦		عينة ٥		عينة ٤		عينة ٣		عينة ٢		عينة ١	
$E_c$	$\sigma$ × 100	$E_c$	$\sigma$ × 100	$E_c$	$\sigma$ × 100	$E_c$	$\sigma$ × 100	$E_c$	$\sigma$ × 100	$E_c$	$\sigma$ × 100
	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
3.75	1.4	2.68	1.3	1.86	1.4	1.91	1.4	5.01	1.4	2.86	1.4
2.14	2.5	2.29	2.4	2.38	2.5	2.36	2.4	2.16	2.6	1.43	2.7
1.34	4.0	1.52	3.6	1.83	3.8	1.87	3.4	1.36	4.1	1.45	3.3
1.39	4.6	1.05	4.1	2.78	4.4	1.08	4.5	1.40	4.6	1.97	4.0
2.03	5.6	1.47	4.9	2.39	5.2	1.96	5.5	2.06	5.7	2.88	4.6
2.05	6.8	1.71	5.9	2.00	6.2	1.54	6.5	2.07	6.9	2.25	5.5
2.16	7.8	1.72	6.8	2.59	7.3	1.82	7.0	2.19	7.9	2.36	6.0

4.73	9.7	2.25	9.0	1.78	9.5	2.32	9.3	5.04	11.7	2.29	6.6
4.06	12.1	1.89	10.3	1.83	12.3	2.42	11.9	2.28	12.2	1.61	7.0
2.91	13.8	3.10	11.6	1.86	1.4	2.74	13.8	2.89	13.9	1.85	7.6

عينة ١٣		عينة ١٢		عينة ١١		عينة ١٠		عينة ٩		عينة ٨		عينة ٧	
$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$
	٠,٠		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
١,٨٥	١,٤	2.80	1.4	4.24	1.3	3.62	1.4	2.78	1.4	2.13	1.3	3.02	1.4
١,٨٢	٢,٧	1.62	2.7	2.15	2.4	2.12	2.5	2.14	2.5	2.31	2.4	2.14	2.5
٢,١٢	٣,٣	1.15	3.3	1.28	3.8	1.33	4.0	1.35	4.0	1.53	3.6	1.35	4.0
٢,٠٣	٤,٠	1.97	4.0	1.31	4.3	1.38	4.5	1.39	4.6	1.05	4.1	1.39	4.6
١,٩٥	٥,٠	2.76	5.0	1.93	5.3	2.02	5.6	2.04	5.6	1.48	4.9	2.04	5.6
٢,٠١	٦,٠	2.19	6.0	1.94	6.4	2.03	6.7	2.05	6.8	1.72	5.9	2.05	6.8
١,٩١	٧,٠	1.96	7.0	2.05	7.4	2.15	7.8	2.11	7.4	1.73	6.8	2.11	7.4
١,٩٩	٧,٦	1.85	7.6	4.99	9.2	4.92	11.5	4.18	9.7	1.39	7.4	2.25	7.9
١,٩٣	٨,٣	1.86	8.3	3.92	11.4	2.29	12.0	4.13	12.1	2.62	9.0	5.13	11.6
١,٨٦	١١,٥	2.80	11.5	2.54	13.1	2.90	13.7	2.68	13.8	2.08	10.3	2.15	12.1

$\sigma$ : الاجهاد ( $MPa$ )  $N/mm^2$  ،  $E_c$ : معامل مرونة النواة  $N/mm^2$

الجدول (٢): عينات النموذج الثاني بسماكة نواة ٥٠ مم وكثافة  $\rho = 32kg/m^3$

عينة ٧		عينة ٦		عينة ٥		عينة ٤		عينة ٣		عينة ٢		عينة ١	
$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$	$E_c$	$\sigma$ $\times 100$
	٠,٠		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
١,٣١	١,٣	0.69	0.2	0.94	0.2	1.28	1.4	1.34	1.4	1.31	1.4	1.16	1.4
١,٧٩	٢,٥	0.69	0.5	0.69	0.5	1.59	2.4	1.60	2.4	1.63	2.5	1.40	2.5
١,٦٥	٣,٦	0.78	0.8	0.78	0.9	1.50	3.7	1.51	3.7	1.54	3.7	1.93	3.7
١,٩٢	٤,١	0.87	1.2	0.87	1.2	2.00	4.2	2.01	4.2	2.05	4.3	2.37	4.3
١,٣	٤,٩	0.82	1.3	0.82	1.3	1.39	5.0	1.39	5.0	1.42	5.1	1.59	4.5
١,١٦	٥,٧	1.37	1.9	1.38	1.9	1.90	5.5	1.91	5.5	1.71	6.1	1.82	5.6
١,٣٧	٦,٢	1.20	3.2	1.20	3.2	1.49	6.0	1.50	6.0	1.39	6.6	1.59	6.7
١,٩٣	٦,٧	1.18	3.8	1.18	3.8	1.36	6.5	1.37	6.5	1.41	7.1	2.04	7.2
٢,٤٥	٧,١	1.61	4.6	1.62	4.7	0.89	7.0	1.39	7.0	1.51	7.7	1.63	7.6
١,٦١	٨,٩	1.26	5.8	1.26	5.8	0.57	7.5	1.30	7.5	2.59	8.7	2.08	8.8

$\sigma$ : الاجهاد ( $MPa$ )  $N/mm^2$  ،  $E_c$ : معامل مرونة النواة  $N/mm^2$

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

نبين فيما يلي عملية الحساب الرياضياتي لنهاية التوسيط المتتالي المعتمدة في المرجع [4]:

نفترض أن عدد مراحل التحميل التي تدخل في التقييم لإحدى العينات المجربة هي أربع، سوف تكون

معاملات المرونة لهذه المراحل هي  $E_1$  ،  $E_2$  ،  $E_3$  ،  $E_4$  ، التي

ستجري عملية التوسيط المتتالي لها حسب ما تبينه المصفوفة الآتية:

معاملات التجريب	التوسيط الأول المتتالي	التوسيط الثاني	التوسيط الثالث والأخير
$E_1$	-	-	-
$E_2$	$(E_1 + E_2)/2$	-	-
$E_3$	$(E_2 + E_3)/2$	$(E_1 + E_2 + E_2 + E_3)/(2 \cdot 2)$ $= (E_1 + 2E_2 + E_3)/2^2$	-
$E_4$	$(E_3 + E_4)/2$	$(E_2 + E_3 + E_3 + E_4)/(2 \cdot 2)$ $= (E_2 + 2E_3 + E_4)/2^2$	$(E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4)/(2 \cdot 2 \cdot 2)$ $= (E_1 + 3E_2 + 3E_3 + E_4)/2^3$

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

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

يلاحظ من هذه العلاقة أن القيم المتوسطة لمعاملات المرونة قد دخلت بثلاثة أمثالها في هذه العلاقة، بينما دخلت القيم الطرفية بمثل واحد. أما مقام هذه العلاقة فهو يمثل  $2^{n-1}$ ، حيث  $n$  عدد المعاملات الداخلة في التقييم، وهي هنا 4.

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

لذلك، نلاحظ أن:

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

فلو عبر عن أمثال نهايات التوسيط المتتالي لعلاقات المصفوفة أعلاه، لوجدنا أنها تعطى بالمصفوفة التالية والتي يلاحظ أن قيم عناصر سطرها الأول، وقطرها هي الواحد:

تمثل عناصر كل عمود مصفوفة أمثال المعاملات

لنهاية عملية التوسيط المتتالي، بينما يشير السطر أعلى المصفوفة إلى الدلالة على عدد هذه المعاملات.

فإذا افترضنا أن عدد المعاملات هما اثنان، سوف تكون قيمة نهاية التوسيط المتتالي لهما هو جداء عناصر مصفوفة المعاملات بمقلوب مصفوفة عناصر الأمثال للعمود الثاني، وتقسيمها على  $2^{2-1}$ ، أي:

$$E = [E_1 \ E_2] \times [1 \ 1]^{-1} / 2^{2-1}$$

وقيمة نهاية هذا التوسيط لثلاثة معاملات بحسب عناصر الأمثال للعمود الثالث هي:

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

أما قيمة أي عنصر لعمود من مصفوفة الأمثال فإنه ينتج عن مجموع قيمتي العنصرين للعمود الذي يسبقه بالسطر نفسه، والسطر الذي يسبقه، أو أنه ينتج عن الجمع الدرجي لعناصر الأعمدة والأسطر التي تسبق العنصر المطلوب، كما يتبين على المصفوفتين الآتيتين.

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

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 & 10 & 15 & 21 & 28 & 36 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 10 & 20 & 35 & 56 & 84 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 15 & 35 & 70 & 126 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 6 & 21 & 56 & 126 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 7 & 28 & 84 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 8 & 36 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

هكذا، ستكون مصفوفة عناصر الأمثال لعشرة توسيطات متتالية مثلاً على النحو الآتي:

بما أنه سيتم الأخذ في الحسبان لعشر قيم من معاملات المرونة للتجربة الواحدة كما هي مبينة في الجدولين (١) و (٢)، سوف تكون الصيغة المصفوفية لحساب معامل المرونة لكل عينة بطريقة التوسيط المتتالي المذكورة أعلاه كما يلي:

$$\frac{[E_1 \ E_2 \ \dots \ E_{n-1} \ E_n]}{2^{n-1}} \times [1 \ 9 \ 36 \ 84 \ 126 \ 126 \ 84 \ 36 \ 9 \ 1]^{-1} \quad (٤)$$

حيث  $n=10$ .

هكذا نجد أن هذا المعامل المعياري لنتائج عينات النموذجين المدروسين هو المعطى في الجدول (٣)، والجدول (٤).

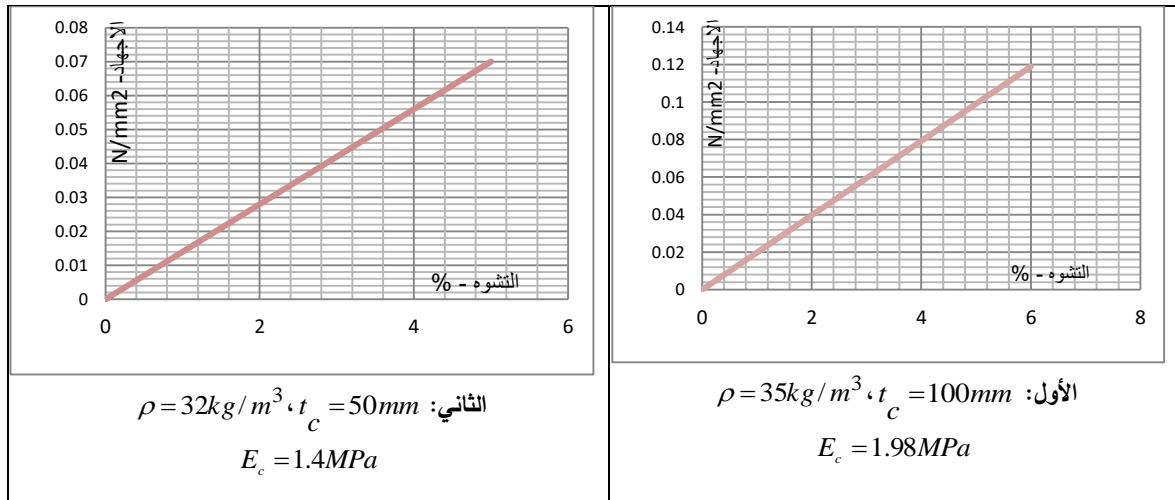
الجدول (٣): المعاملات المعيارية للنموذج الأول بسماكة نواة ١٠٠ مم وكثافة  $\rho = 35kg/m^3$

رقم العينة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢
Eci المعياري	42.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$E_c$ المعياري النهائي	$E_c = \sum E_{ci} / 12 = 23.79 / 12 = 1.98MPa$											

الجدول (٤): المعاملات المعيارية للنموذج الثاني بسماكة نواة ٥٠ مم وكثافة  $\rho = 32kg/m^3$

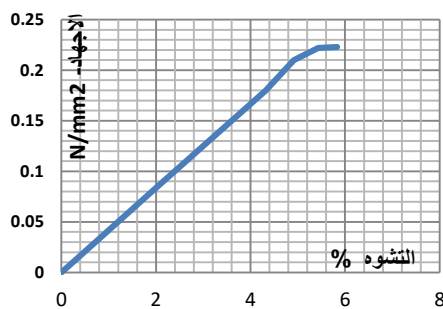
رقم العينة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧
Eci المعياري	1.32	1.60	1.65	1.63	1.07	1.06	1.47
$E_c$ المعياري النهائي	$E_c = \sum E_{ci} / 7 = 9.8 / 7 = 1.4MPa$						

بذلك، يكون مخطط السلوك المعياري لكل من النموذجين هو المبين على المخططات البيانية لهما في الشكلين (٣)، و (٤)، والتي يستنتج من خلالها أنه عند قبول بقاء تشوه في العينة مقداره حوالي ٥%، فإن النموذج الأول يتحمل إجهادات تصل إلى  $0.1MPa$ ، وتصل في الثاني إلى  $0.075MPa$ . لذلك، إذا اقتصرنا على الجانب العملي من السلوك المعياري للنموذجين، فإن هذين المخططين بينهما الشكل (٥).



شكل (٥): مخطط السلوك المعياري بالضغط لنموذجي الألواح المختبرة

يستنتج من خلال هذين المخططين للسلوك المعياري الدور الذي تلعبه كثافة نواة اللوح في تحمل إجهادات الضغط المؤثرة عليه، ويصبح الأمر جلياً أكثر إذا أقرن ذلك مع ما تم الحصول عليه من مخطط معياري لنموذج آخر من نماذج الألواح السندويشية تضمنه بحث الدكتوراه الذي أجري عام ٢٠٢٠ [3]، والذي نبينه في الشكل (٦).



أقترن ذلك مع ما تم الحصول عليه من مخطط معياري لنموذج آخر من نماذج الألواح السندويشية تضمنه بحث الدكتوراه الذي أجري عام ٢٠٢٠ [3]، والذي نبينه في الشكل (٦).

شكل (٦): مخطط السلوك المعياري بالضغط لنموذج من

الألواح بسماكة للنواة  $t_c = 80mm$ ، وكثافة

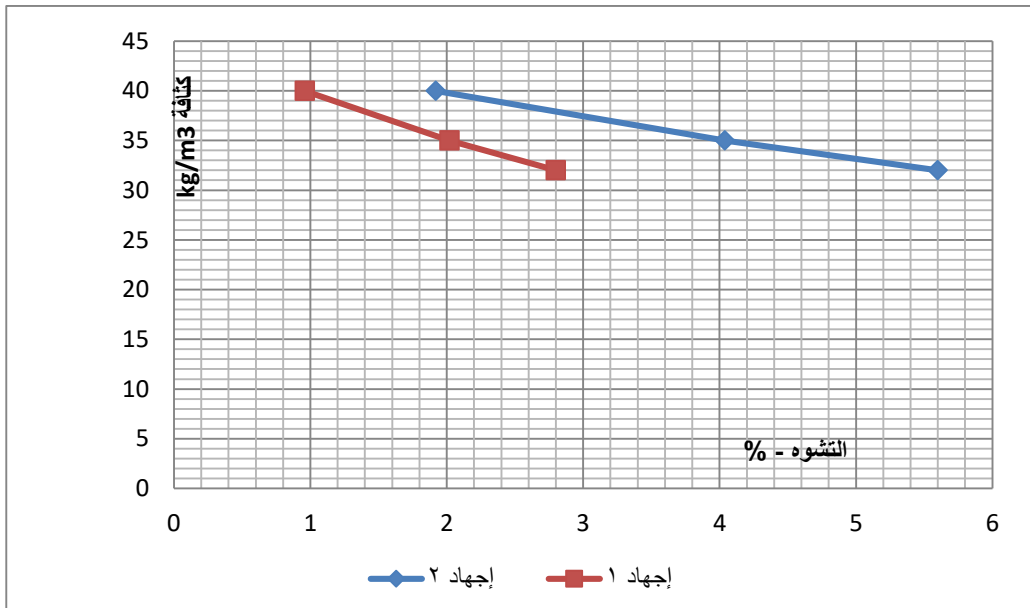
$$E_c = 4.2MPa \text{ [3]} \text{ ، ومعامل مرونة } \rho = 40kg/m^3$$

يستخلص من هذا المخطط أن الألواح السندويشية المنتجة من هذا النموذج بالكثافة للنواة  $\rho = 40kg/m^3$  تتحمل إجهادات ضغط مباشر تتجاوز  $0.2MPa$  لإحداث تشوه في النواة واللوح مقداره ٥%. أي أنه يتحمل ضعفي ما يتحملة اللوح بالكثافة لنواته  $\rho = 35kg/m^3$ ، وثلاثة أضعاف تقريباً للوح لأجل  $\rho = 32kg/m^3$ . بالتالي، لإبراز تأثير كثافة النواة على تحمل إجهادات الضغط على النواة وعلاقة هذه الكثافة بمعامل مرونة النواة أدرجنا في الجدول (٥) القيم التي تمكنا من التمثيل البياني لهذا التأثير عند مستويين من الإجهاد  $\sigma_c = 0.04MPa$ ، و  $\sigma_c = 0.08MPa$ .

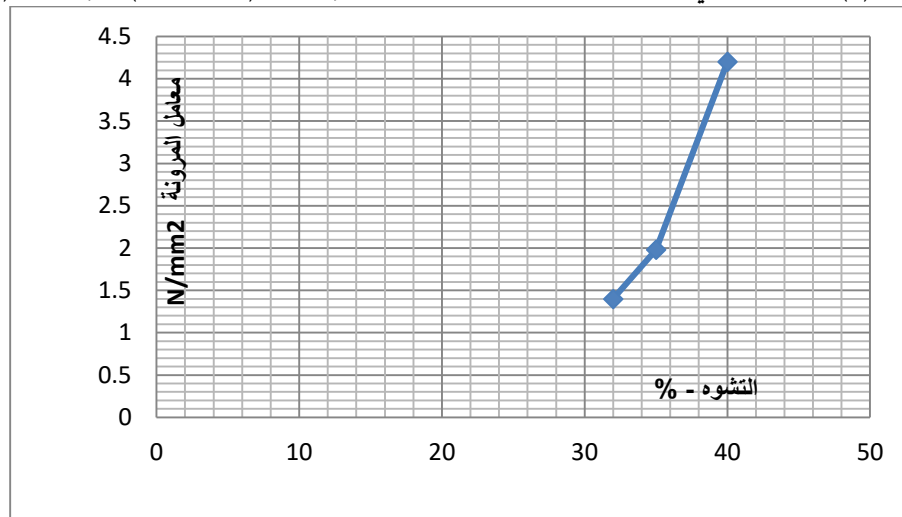
الجدول (٥): قيم التشوهات لنماذج الألواح بالكثافات الثلاث عند مستويين من الإجهاد

الإجهاد ( $MPa$ ) $\sigma_c$	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08
الكثافة ( $kg/m^3$ ) $\rho$	٣٢	٣٥	٤٠	٤٠	٣٢	٣٥	٤٠
معامل $E_c$ ( $MPa$ )	1.4	1.98	4.2	4.2	1.4	1.98	4.2
التشوه %	2.8	2.02	0.96	0.96	2.8	4.04	1.92

لقد بينا في الشكلين (٧)، و (٨) التمثيل البياني لقيم الجدول (٥).



شكل (٧): المخطط البياني لعلاقة كثافة النواة بالتشوه عند مستوي الإجهاد ١ (0.04 MPa)، والإجهاد ٢ (0.08 MPa)



شكل (٨): المخطط البياني لعلاقة كثافة النواة بمعامل المرونة للنواة

يستنتج من المخططات البيانية في الشكل (٧) أن العلاقة بين تشوهات نواة اللوح وكثافتها إن لم تكن خطية تماماً ربما بسبب عيوب الاختبار، فهي شبه خطية حتماً. لذلك، بحثنا عن الصيغة الأمثل لتدوير شبه الخطية لهذه العلاقة إلى الخطية بالأخذ في الحسبان قيمة الإجهاد المطبق، فاستنتجنا أنها:

$$\varepsilon_c = (-5.52\rho + 245)\sigma_c \quad (\%) \quad : \rho \in [20, 42] \quad (٥)$$

تعطي هذه العلاقة قيمة كافية عملياً من حيث الدقة ضمن المجال المحدد للكثافة أيأ تكن قيمة إجهاد الضغط المطبق على سطح اللوح.

فإذا افترضنا أن الإجهاد المطبق هو  $\sigma_c = 0.06 MPa$  مثلاً، سوف تكون قيم التشوهات ومعامل مرونة النواة هي وفقاً لما هو مبين في الجدول (٦) التالي:

الجدول (٦): قيم التشوهات ومعاملات المرونة لنماذج الألواح بالكثافات الثلاث عند إجهاد  $0.06MPa$

0.06	0.06	0.06	الإجهاد $\sigma_c (MPa)$
٤٠	٣٥	٣٢	الكثافة $\rho (kg/m^3)$
1.45	3.1	4.1	التشوه %
4.14	1.94	1.46	معامل $E_c (MPa)$

يلاحظ من قيم هذا الجدول لقيم معاملات المرونة الحسابية أنها بدقة مقبولة عملياً مقارنة بالقيم المخبرية المعطاة في الجدول (٥). وكذلك الأمر، إذا ما قارنا قيم التشوهات الحسابية الناتجة بقيمها الفعلية على مخططات السلوك المعياري (٥)، و (٦) 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 الإجهادات التي يمكن تطبيقها على سطح اللوح كي لا تتجاوز التشوهات الموضعية فيها مقداراً مقترضاً بحسب أهمية الوظيفة الاستثمارية التي تؤديها. نستنتج من العلاقة (٥) أن الإجهاد يعطى بالصيغة:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (٦)$$

$$E_c = 100 / (-5.52\rho + 245) \quad (٧)$$

فإذا افترضنا أن قيمة التشوه المسموحة لا تتجاوز ٥% في اللوح الذي كثافة نواته  $\rho = 40kg/m^3$ ، فإن

الإجهاد الذي يمكن تطبيقه على سطح اللوح هو بحسب العلاقة (٦):

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = 100 / (-5.52 \cdot 40 + 245) \cdot 0.05 = 0.21 MPa$$

ولنواة كثافتها  $\rho = 32kg/m^3$ :

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = 100 / (-5.52 \cdot 32 + 245) \cdot 0.05 = 0.07 MPa$$

بالتالي، سوف تكون التشوهات الموضعية في اللوح، الذي سماكة نواته  $t_c = 80mm$  مثلاً، لأماكن تطبيق

الحمولات، أو نقاط استناده التي تصل فيها الإجهادات إلى هذه القيم المحسوبة هي 4mm.

## ٥: الاستنتاجات والتوصيات

### ٥-١: النتائج:

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

٢- بناء على كثافة نواة اللوح تساعد العلاقات (٥)، (٦)، و (٧) في الحساب الدقيق عملياً لقيم التشوهات والإجهادات، ومعاملات المرونة التي يتم بموجبها تحديد التشوه الموضعي في عملية التحليل الإنشائي لعناصر الألواح السندويشية.

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

#### ٥-٢: التوصيات

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

#### ٦: المراجع:

- [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] Omran,J: *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] Omran,J & Sakkour, A: *Properties of normative behavior with compressive of the light locally produced sandwich panels with two steel faces and a core of polyurethane (PUR), Journal of Al Baath University, Vol. (42), 2020, Syria.*
- [5] Sakkour, Akram: *Mechanics of Materials, Bd. 1, Tishreen University, pp. 1-700, 2016.*
- [6] Sakkour, Akram: *Mechanics of Materials, Bd. 2, Tishreen University, pp. 1-710, 2012.*