

تأثير التقوية على متانة انبعاج الألواح في إنشاءات السفن

الدكتور غالب أحمد*

(تاريخ الإيداع 4 / 6 / 2009. قُبِلَ للنشر في 17/9/2009)

□ ملخص □

تقسّم الألواح في إنشاءات السفن إلى ألواح مستطيلة صغيرة باستخدام عناصر تقوية طولية أو عرضية. لهذه الألواح بعض القيود على أطرافها تقدّم من خلال صلابة الفتل لعناصر التقوية. يهدف هذا البحث إلى توضيح المعالم الرئيسية لانبعاج الألواح المقواة، وتقديم الطريقة العامة لحل معظم الحالات التي يمكن أن تستخدم أحمالاً متنوعة. استخدمت الطريقة التحليلية، لحل المعادلات التفاضلية التي تدير الانبعاج بالاستعانة بطاقة الانفعال. للحصول على فكرة عن مقدار إجهاد الانبعاج طبقاً للصيغ المعتبرة في البحث، تمّ دراسة تأثير كلّ من التقوية الطولية والعرضية على متانة انبعاج اللوح. بينت النتائج بأن قيمة متانة الانبعاج للوح باستخدام التقوية الطولية أكبر بحوالي أربع مرات بالمقارنة مع التقوية العرضية. وهذا يقدّم مزايا كبيرة للتقوية الطولية على التقوية العرضية في إنشاءات السفن.

الكلمات المفتاحية: متانة الانبعاج، الألواح المقواة، التقوية الطولية، التقوية العرضية.

* مدرس - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Influence of Stiffening on the Buckling Strength of Plating in Ship Structures

Dr. Ghaleb Ahmad*

(Received 4 / 6 / 2009. Accepted 17 / 9 / 2009)

□ ABSTRACT □

The Plating of the structure of a ship is divided into small rectangular plates, using Longitudinal and Transverse Stiffeners. These panels have some constraints at the edges, by the torsional rigidity of the Stiffeners.

The purpose of this research is to explain the principal features of stiffened panel buckling, to present the analytical method of solution for solving the governing differential equations .

To obtain some idea of the magnitude of the buckling stress according to the considered formulae here, an influence of longitudinal and transverse stiffeners on the buckling strength of plating is studied. The results show that the buckling strength of plating with longitudinal stiffening is nearly four times as a great as when transverse stiffening is employed. This presents the great advantages of longitudinal stiffening over transverse stiffening in ship structures.

Key words: Buckling strength, Stiffened panels, Longitudinal stiffening, Transverse Stiffening

*Assistant Professor at Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تشكل الألواح الجزء الأكبر من إنشاء السفينة، قد تكون الألواح غير مقواة، أو مقواة بمقاطع مدرفلة أو مثنوقة. من المعروف أنه يمكن اعتبار السفينة عارضة صندوقية، تتعرض لعزوم انحناء ينتج عن تأثيرها تقوس أو تدلي هذه العارضة. تتعرض الألواح لأحمال ضغط تسبب انبعاجاً للألواح الموجودة في السطح أو في القاع، ما لم تقوّ بطريقة ما تمنع هذا الانبعاج. يقسم اللوح في إنشاء السفينة إلى قطاعات مستطيلة صغيرة نسبياً، باستخدام عوارض طولية أو عرضية. تقيد هذه القطاعات عند حوافها من خلال صلابة الفتل لعناصر التقوية. سنناقش في هذا البحث انبعاج الألواح تحت تأثير أحمال ضغط في اتجاه واحد.

يمكن أن تتبعج الألواح وفق شكلين مختلفتين هما [1] :

- انبعاج كلي، تتبعج فيه عناصر التقوية مع الألواح.

- انبعاج موضعي، تتبعج فيه عناصر التقوية بشكل مسبق، بسبب عدم كفاية صلابتها، أو تتبعج قطاعات الألواح بين عناصر التقوية.

سيتم في هذا البحث توضيح المعالم الأساسية لانبعاج القطاع المقوى، ومناقشة تطبيقاته وحدوده بالنسبة لقطاعات ألواح السفن، وتقديم الحلول للحالات العامة. وسيتم استخدام الطرق التحليلية، في حل المعادلات التفاضلية التي تدير الانبعاج، لتحليل انبعاج الألواح المقواة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتعرض السفينة عند إبحارها لقوى وعزوم تسبب تقوساً وتدلياً للسفينة، مما يسبب تعرض ألواح السفينة لإجهادات شد وضغط تكون أعظمية في السطح والقاع [2]. وبما أن الألواح تشكل الجزء الأكبر في إنشاء السفينة، وتخضع لتأثير أحمال ضغط، فإنها تتعرض للانبعاج.

يهدف هذا البحث إلى دراسة متانة الانبعاج لألواح السفينة لتحديد ما يلي:

1- قيمة إجهاد الانبعاج في حالتها التقوية الطولية والعرضية.

2- تأثير عدد عناصر التقوية على متانة الانبعاج.

3- تأثير عزم عطالة عنصر التقوية على متانة الانبعاج.

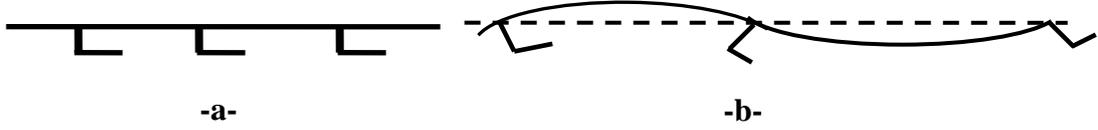
طرائق البحث ومواده:

لتحقيق الأهداف المذكورة أعلاه، تم في هذا البحث استخدام نماذج رياضية مناسبة لمحاكاة الحالات المتعددة لمتانة انبعاج الألواح المقواة، وقد تم حل المعادلات الناظمة لهذه الحالات من التقوية تحليلياً باستخدام برنامج حاسوبي يتيح حساب متانة الانبعاج للألواح المقواة.

1- دراسة انبعاج لوح مستطيل ذي مساند بسيطة:

تقسم الألواح في إنشاء السفينة إلى قطاعات مستطيلة صغيرة نسبياً، باستخدام عوارض طولية أو عرضية. تقيد هذه القطاعات عند حوافها من خلال صلابة الفتل لعناصر التقوية. نأخذ مقطعاً من سطح سفينة مقوى عرضياً، كما

هو مبين بالشكل (1-a)، عندما يحدث انبعاج السطح، سيأخذ اللوح الشكل العام المبين بالشكل (1-b) وستقتل العوارض كما هو مبين بالشكل (1) [1].



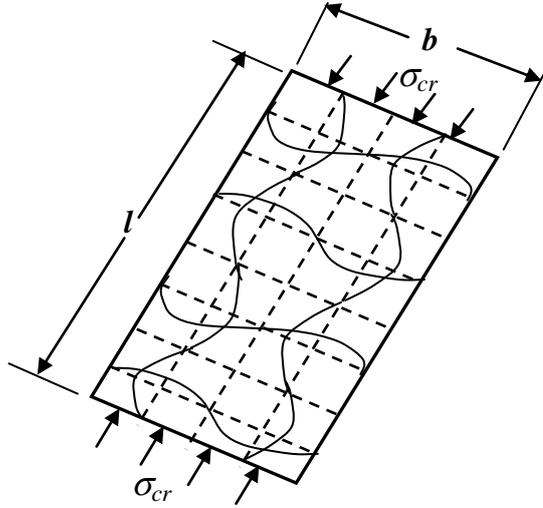
الشكل (1) مقطع عبر السطح قبل وبعد الانبعاج [1]

يقدم فتل العوارض عزم تقييد للحواف تابعاً لخواص فتل المقاطع المدرفلة. هذه المقاطع ضعيفة جداً لمقاومة الفتل، لذلك فعزم التقييد على النهايات صغير، وبالتالي ستكون درجة تثبيت حواف القطاع صغيرة. لذلك يمكن دراسة مشكلة انبعاج اللوح بإهمال عزوم التقييد ومعاملة القطاع بين عناصر التقوية كأنه ذو مساند بسيطة. سيعتمد هذا الافتراض فيما يلي، وستعتبر متانة الانبعاج للوح ذات المساند البسيطة [3].

يبين الشكل (2) قطاعاً لوحياً طوله l وعرضه b ذا مساند بسيطة، معرضاً لحمل بالاتجاه الطولي. يمكن افتراض شكل منحنى التشوه للقطاع عند حدوث الانبعاج من الشكل التالي [1]:

$$w = A \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

حيث، A = ثابت يتعلق بطبيعة الحمل المطبق على اللوح.



الشكل (2) شكل الانبعاج لقطاع طويل [1]

هذا يعني بأن اللوح سينبعج إلى m نصف موجة في الاتجاه الطولي و n نصف موجة في الاتجاه العرضي. تعطى طاقة الانفعال بسبب انحناء اللوح بالعلاقة:

$$E = \int_0^l \int_0^b \frac{D}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 dx dy$$

$$E = \frac{\pi^4 D b l A^2}{8} \left(\frac{m^2}{l^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad (2)$$

حيث، $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ صلابة الانحناء

=E معامل المرونة

=t سماكة اللوح

=v معامل بواسون

إذا كان σ_{cr} إجهاد الانبعاج، فالحمل على شريحة طولها l وعرضها dy هو $\sigma_{cr} t dy$ ، والعمل المنجز بواسطة هذا الحمل في الانبعاج هو:

$$W = \sigma_{cr} t dy \int_0^l \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 dx$$

يتم الحصول على العمل الكلي المنجز بإجراء التكامل لكافة الشرائح على كامل عرض اللوح، أي:

$$W = \sigma_{cr} t \int_0^l \int_0^b \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 dx dy$$

$$W = \frac{\pi^2 m^2 A^2 b \sigma_{cr} t}{8l} \quad (3)$$

بمساواة العمل المنجز في العلاقة (3) مع طاقة الانفعال للوح في العلاقة (2) نجد الإجهاد الحرج:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(m \frac{b}{l} + \frac{n^2 l}{m b} \right)^2 \quad (4)$$

من المطلوب أن يكون إجهاد الانبعاج أصغرياً، وهذا يقترن مع $n=1$ ، أي أن القطاع يجب أن ينبعج إلى نصف موجة واحدة باتجاه العرض، لذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة (4) كما يلي:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(m \frac{b}{l} + \frac{1 l}{m b} \right)^2 \quad (5)$$

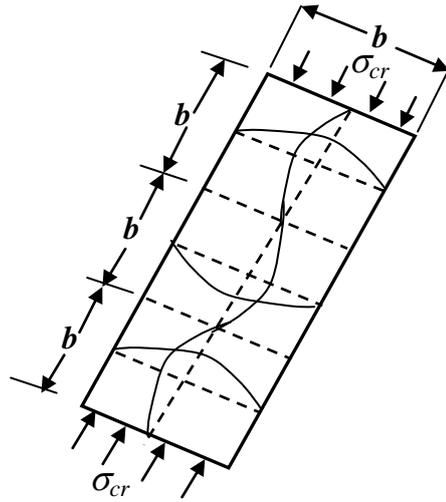
لذلك يجب إيجاد قيمة m في العلاقة (5) التي تجعل الإجهاد الحرج أصغرياً. بمفاضلة العلاقة (5) بالنسبة لـ

m ومساواتها بالصفر، نجد:

$$\frac{d\sigma_{cr}}{dm} = 2 \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(m \frac{b}{l} + \frac{1 l}{m b} \right) \left(\frac{b}{l} - \frac{1 l}{m^2 b} \right) = 0$$

$$\left(m \frac{b^2}{l^2} - \frac{1}{m} + \frac{1}{m} - \frac{l}{m^3} \frac{l^2}{b^2} \right) = 0 \Rightarrow m = \frac{l}{b} \quad (6)$$

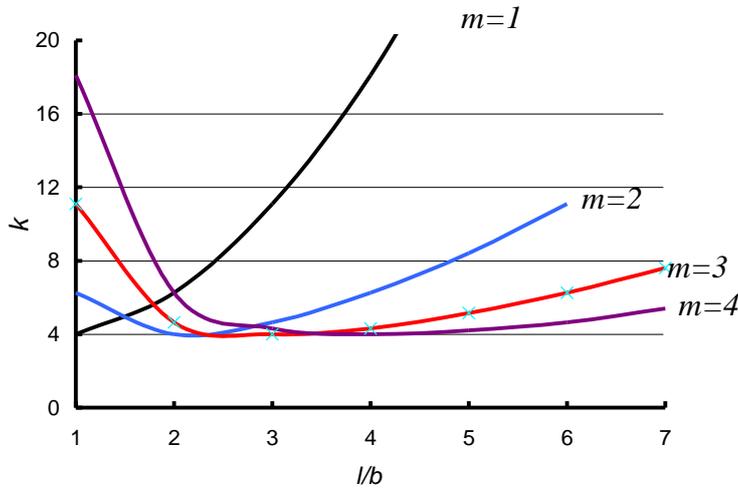
طول الموجة هو $b=l/m$ ، فالقطاع سينبعج إلى عدد من القطاعات المربعة، كما هو مبين بالشكل (3) [4].



الشكل (3) شكل الانبعاج لقطاع طويل بأقل إجهاد انبعاج [4]

تحدد قيم عديدة لـ m في العلاقة (5) . نفرض أن $K = \left(m \frac{b}{l} + \frac{1}{m} \frac{l}{b}\right)^2$ ، وأنّ العلاقة بين K و l/b من

أجل قيم ثابتة لـ m مبينة بالشكل (4).



$$\sigma_{cr} = 4 \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad \text{الشكل (4) قيم } k \text{ في العلاقة}$$

نلاحظ بأن كل المنحنيات تمس الخط $k=4$ ، لذلك فقيمة k التي تعطي إجهاد الانبعاج الأصغري هي 4 ، عند

ذلك يكون إجهاد الانبعاج الأصغري الحرج هو:

$$\sigma_{cr} = 4 \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad (7)$$

سيتم اختبار الحالة التي يكون فيها طول القطاع أصغر من العرض، لذلك فإن m يجب أن تساوي الواحد،

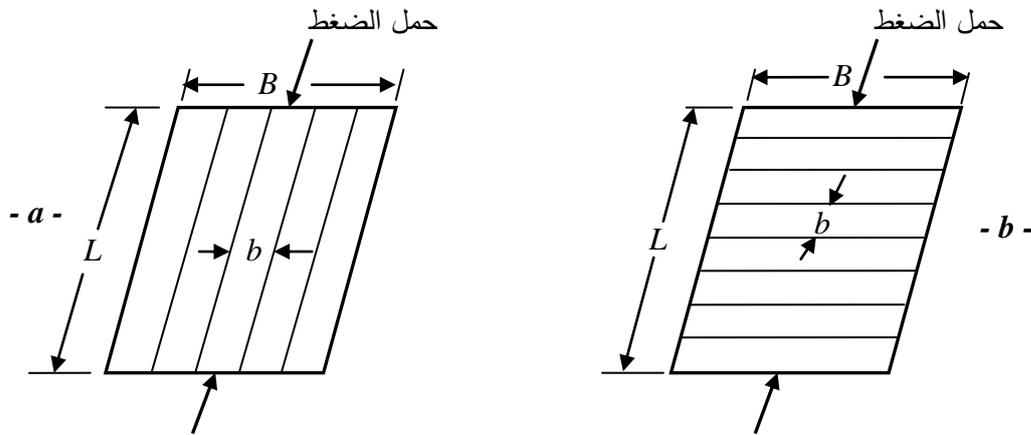
وتصبح العلاقة (5) كما يلي:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(\frac{b}{l} + \frac{l}{b} \right)^2$$

ويمكن أن تكتب بعد إعادة ترتيبها كما يلي:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l^2 t} \left(1 + \frac{l^2}{b^2} \right)^2 \quad (8)$$

لاختبار المزايا النسبية لتقوية صفيحة كبيرة في الاتجاه الطولي أو العرضي، نأخذ صفيحة كبيرة طولها L وعرضها B ، مقواة طولياً بعناصر تقوية متباعدة مسافة b كما هو مبين بالشكل (5-a)، وعرضياً بعناصر تقوية متباعدة مسافة b كما هو مبين بالشكل (5-b) [4].

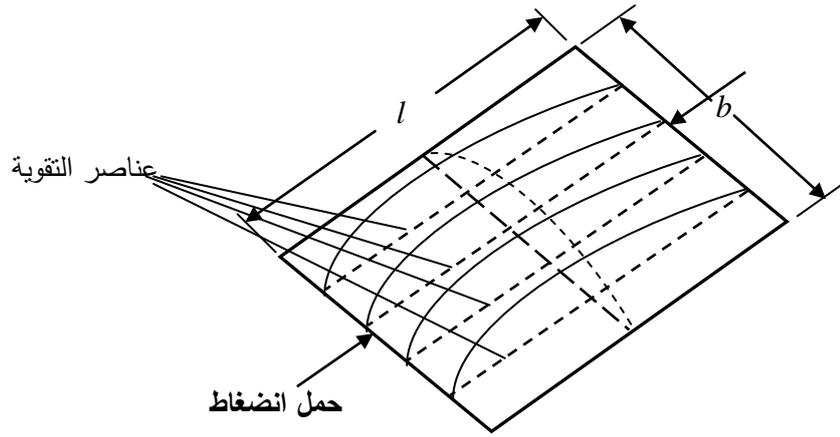


الشكل (5) صفيحة مقواة [4]

تعطى متانة انبعاج اللوح بين عناصر التقوية بالعلاقة {7}، بينما تعطى متانة الانبعاج للوح بين عناصر التقوية بالعلاقة (8) بوضع $l=b$ و $b=B$ ، أي تصبح العلاقة (8) كما يلي: $\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(1 + \frac{b^2}{B^2} \right)^2$. تبلغ النسبة b/B في إنشاءات السفن حوالي $1/6$ ، فالحد بين الأقواس لا يختلف عن الواحد. يمكن الاستنتاج بأن متانة الانبعاج للألواح في التقوية الطولية هي تقريبا أكبر بأربع مرات بالمقارنة مع التقوية العرضية. هذا يظهر الميزة الكبيرة للتقوية الطولية على العرضية في إنشاءات السفن، لذلك فإن الاتجاه في السفن الحديثة يقوم على تبني هذا النوع من التقوية في كل أنواع السفن تقريبا.

2- تأثير التقوية الطولية على متانة الانبعاج للألواح:

لتطوير المتانة الكلية للانبعاج لقطاع لוחي من لوح بين عناصر التقوية، من الضروري أن تبقى عناصر التقوية صلبة لتقدم الدعم للقطاعات الصغيرة. إذا اعتبرنا صفيحة كبيرة بعناصر طولية، فهناك احتمال انبعاج كامل الصفيحة، وسيتم اختبار هذا الاحتمال. نعتبر صفيحة بطول l وعرض b ذات مساند بسيطة حول حوافها، كما هو مبين بالشكل (6).



الشكل (6) انبعاث صفيحة مقواة طولياً [3]

تعطى معادلة انبعاث كامل سطح اللوح بالعلاقة التالية [3]:

$$w = A \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (9)$$

عند اعتبار مقطع عبر اللوح، يحتمل أن يكون منحنى التشوه أكثر دقة إذا مثل بخط منقط، كما هو مبين بالشكل (7)، بسبب تأثير عناصر التقوية في تقييد اللوح في مكان الاتصال بينهما.



الشكل (7) مقطع عبر اللوح المقوى المنبعج [3]

يستخدم منحنى التشوه ذو الشكل البسيط المعطى بالعلاقة (9) في التحليل. تتألف طاقة الانفعال لانحناء القطاع المقوى من طاقة الانفعال للوح وطاقة الانفعال لعناصر التقوية. هناك صعوبة في تحديد عزم العطالة I الممثل لصلابة عناصر التقوية، لكن سيفرض بأن هناك احتمالاً لوضع قيمة I تشمل بشكل حقيقي تأثير عرض محدد من اللوح الذي يتصل مع عنصر التقوية. بفرض I تمثل عزم العطالة الزائد المقدم بواسطة عنصر تقوية واحد، تعطى طاقة الانفعال لعنصر التقوية بالعلاقة:

$$\text{Strain Energy of Stiffener} = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{EI}{2} \int_0^l \frac{A^2 \pi^4}{l^4} \sin^2 \frac{\pi x}{l} \sin^2 \frac{\pi y}{b} dx = \frac{\pi^4 EIA}{4l^3} \sin^2 \frac{\pi y}{b}$$

يجب أن تتناسب قيمة y في العلاقة السابقة عنصر تقوية خاصاً، فإذا كان n عدد عناصر التقوية المتساوية

التباعد، فقيمة y لعنصر التقوية P^{th} يعطى بالعلاقة: $y_p = \frac{p^{th} b}{n+1}$ ، وطاقة الانفعال لعنصر التقوية هي:

$$\text{Strain Energy of Stiffener} = \frac{\pi^4 EIA^2}{4l^3} \sin^2 \frac{\pi p}{n+1}$$

للحصول على طاقة الانفعال الكلية يجب جمع طاقات الانفعال لكل عناصر التقوية كما يلي [1]:

$$\text{Strain Energy of Stiffeners} = \sum_{p=1}^{p=n} \frac{\pi^4 EIA^2}{4l^3} \sin^2 \frac{\pi p}{n+1}$$

يمكن أن نجد بأن: $\sum_{p=1}^{p=n} \sin^2 \frac{\pi p}{n+1} = \frac{n+1}{2}$

فطاقة الانفعال لعناصر التقوية هي [5]:

$$\text{Strain Energy of Stiffeners} = \sum_{p=1}^{p=n} \frac{\pi^4 EIA^2 (n+1)}{8l^3} \quad (10)$$

يجب أن تضاف طاقة انفعال انحناء اللوح المعطاة بالعلاقة (2) إلى العلاقة (10) . يعطى العمل المنجز بواسطة الحمل الحرج على اللوح بالعلاقة (3) ، حيث $m=1$ ، لكن يجب أن يضاف له العمل المنجز بواسطة الحمل على عناصر التقوية. إذا كانت a المساحة الإضافية المقدمة بواسطة عنصر تقوية، فإن:

$$\text{work done on one Stiffener} = \frac{\sigma_{cr} a}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx$$

$$\text{work done on one Stiffener} = \frac{\sigma_{cr} a}{2} \int_0^l \frac{A^2 \pi^2}{l^2} \cos^2 \frac{\pi x}{l} \sin^2 \frac{\pi y}{b} dx = \frac{\pi^2 \sigma_{cr} a A^2}{4l} \sin^2 \frac{\pi y}{b}$$

$$\text{work done for all Stiffeners} = \sum_{p=1}^{p=n} \frac{\pi^2 \sigma_{cr} a A^2}{4l} \sin^2 \frac{\pi p}{n+1} = \frac{\pi^2 \sigma_{cr} a A^2 (n+1)}{8l} \quad (11)$$

بمساواة العمل الكلي المنجز مع طاقة الانفعال الكلية، نحصل على العلاقة التي تعطي الإجهاد الحرج:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 (Dbl^2 (\frac{1}{l^2} + \frac{1}{b^2})^2 + \frac{EI(n+1)}{l^2})}{bt + a(n+1)} \quad (12)$$

من وجهة نظر الانبعاج ولأجل التصميم الاقتصادي، فالإجهاد الحرج المعطى بالعلاقة (12) يجب أن يساوي الإجهاد الحرج لقطاع من لوح بين عنصري تقوية. عرض قطاع اللوح الصغير هو $b/n+1$ ، وإجهاد الانبعاج الموافق هو:

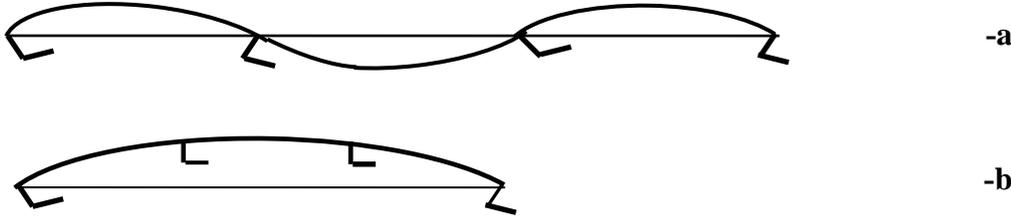
$$\sigma_{cr} = \frac{4\pi^2 D(n+1)^2}{b^2 t}$$

$$\frac{\pi^2 (Dbl^2 (\frac{1}{l^2} + \frac{1}{b^2})^2 + \frac{EI(n+1)}{l^2})}{bt + a(n+1)} = \frac{4\pi^2 D(n+1)^2}{b^2 t} \quad (13)$$

من الممكن تحديد n (عدد عناصر التقوية) للوح معطى أبعاده الرئيسية وسماكته. تشمل المعادلة السابقة مجهولين a و I ، يجب الحصول عليهما من المعادلة (13). ما لم توجد علاقة بين a و I ، فلا يوجد حل كامل لـ I . والطريقة الأفضل للتعامل مع هذه المسألة هو فرض a كنسبة مئوية من مساحة المقطع العرضي bt للوح.

3- تأثير التقوية العرضية على متانة انبعاج اللوح:

عند تقوية لوح بعناصر تقوية عرضية، في سطح سفينة مقواة عرضيا، فإن انبعاج اللوح لن يتبع التموج المبين بالشكل (8-a). ما لم تكن العوارض صلبة بشكل كاف، سينبعج اللوح ضمن مساحة أكبر، كما هو مبين بالشكل (8-b) [1].



الشكل (8) انبعاج لوح مقوى عرضيا [1]

بفرض أن S هي المسافة بين عناصر التقوية العرضية، وبفرض أن تشوه اللوح ذي المساند البسيطة عند حدوث الانبعاج يعطى بالعلاقة التالية [5]:

$$w = A \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{\pi y}{b} = A \sin \frac{\pi x}{mS} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (14)$$

حيث، m عدد الفراغات بين العوارض على امتداد حدوث الانبعاج. يحسب إجهاد انبعاج اللوح المقوى باستخدام طريقة طاقة الانفعال، بحيث تعتبر فقط طاقة انفعال الجوائز (عناصر التقوية العرضية)

$$\text{Strain Energy of Plate} = \frac{\pi^4 DmSbA^2}{8} \left(\frac{1}{m^2 S^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \quad (15)$$

$$\text{Strain Energy of one beam} = \frac{EI}{2} \int_0^b \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 dy = \frac{EI}{2} \int_0^b \frac{A^2 \pi^4}{b^4} \sin^2 \frac{\pi x}{mS} \sin^2 \frac{\pi y}{b} dy$$

$$\text{Strain Energy of one beam} = \frac{EI \pi^4 A^2}{8b^3} \sin^2 \frac{\pi x}{mS}$$

ومن أجل عارضة خاصة $x=qs$ ، حيث q العدد الكلي من 1 حتى $m-1$. تعطى طاقة الانفعال الكلية للجوائز بالعلاقة:

$$\text{Total Strain Energy of beamss} = \sum_{q=1}^{q=m-1} \frac{EI \pi^4 A^2}{4b^3} \sin^2 \frac{\pi q}{m} = \frac{EI \pi^4 A^2 m}{8b^3} \quad (16)$$

ويعطى العمل المنجز بواسطة الحمل بالعلاقة:

$$\text{The work done by the load} = \frac{\sigma_{cr} t}{2} \int_0^l \int_0^b \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{\sigma_{cr} t}{2} \int_0^l \int_0^b \frac{A^2 \pi^2}{m^2 S^2} \cos^2 \frac{\pi x}{mS} \sin^2 \frac{\pi y}{b} dx dy$$

$$\text{The work done by the load} = \frac{\pi^2 A^2 \sigma_{cr} t b}{8ms} \quad (17)$$

يتم تحديد الإجهاد الحرج بمساواة العمل المنجز مع طاقة الانفعال الكلية للوح ولعناصر التقوية العرضية، والإجهاد الحرج يعطى بالعلاقة:

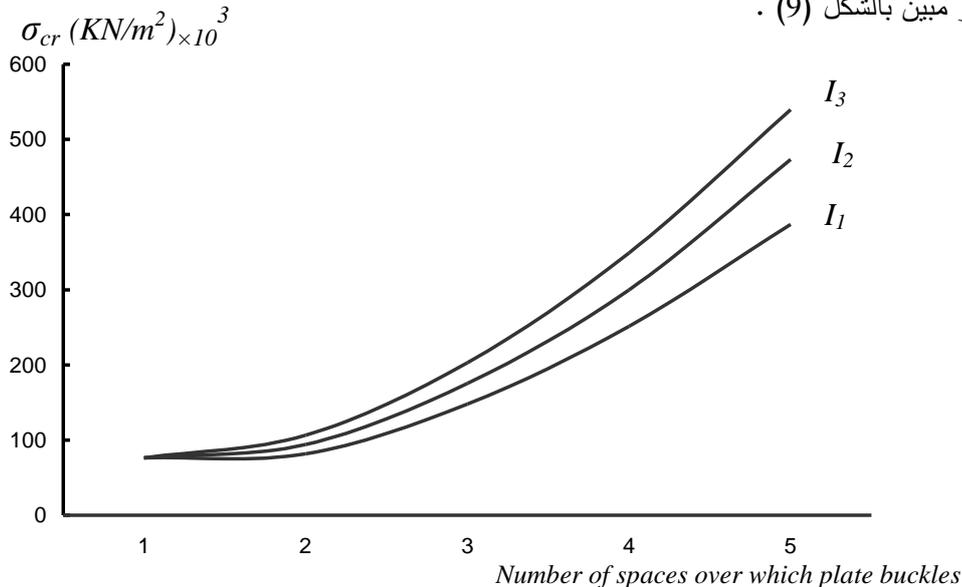
$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 (Dm^2 s^2 (\frac{1}{m^2 s^2} + \frac{1}{b^2})^2 + \frac{E \text{Im}^2 s}{b^4})}{t} \quad (18)$$

تطبق العلاقة السابقة للإجهاد الحرج من أجل $m > 1$ ، ومن أجل $m = 1$ ، ينبعج اللوح على فراغ واحد فقط وينعدم الحد الأخير فيها. لإيجاد إجهاد الانبعاج الأصغري، يجب مفاضلة العلاقة (18) بالنسبة لـ m ومساواتها بالصفر، كما يلي:

$$\frac{d\sigma_{cr}}{dm} = \frac{\pi^2}{t} Ds^2 2 \left(\frac{1}{m^2 s^2} + \frac{1}{b^2} \right) \left(-\frac{1}{m^2 s^2} + \frac{1}{b^2} \right) + \frac{\pi^2}{t} \frac{2E \text{Im} s}{b^4} = 0$$

$$m = \sqrt[4]{b^4 D / (s^3 \{Ds + EI\})} \quad (19)$$

لإيجاد إجهاد الانبعاج الأصغري، يجب تحديد قيم مختلفة لـ m من أجل أي قيمة معطاة لـ I ورسم المنحنيات كما هو مبين بالشكل (9).



الشكل (9) تأثير عزم عطالة عناصر التقوية العرضية على إجهاد الانبعاج

تبين هذه المنحنيات، بأنه ما لم تكن I ذات قيمة أصغرية، فإن إجهاد الانبعاج الأقل يقرب مع انبعاج اللوح على امتداد أكثر من فراغ واحد بين العارضتين. كقاعدة عمل عامة، يبدو من المعقول جعل إجهاد الانبعاج بين فراغي عارضتين مساوياً للفراغ من أجل عارضة واحدة، لذلك من الممكن اشتقاق القيمة الأصغرية لعزم العطالة للجوائز كما يلي:

$$\frac{\pi^2 Ds^2 (\frac{1}{s^2} + \frac{1}{b^2})^2}{t} = \frac{\pi^2 (4Ds^2 (\frac{1}{4s^2} + \frac{1}{b^2})^2 + \frac{4EIs}{b^4})}{t}$$

بحل هذه المعادلة نحصل على العلاقة التي تعطي قيمة I بالعلاقة التالية:

$$I = \frac{Dsb^4}{4E} \left(\frac{3}{4s^4} - \frac{3}{b^4} \right)$$

ويشكل لابعدي تصبح كما يلي:

$$\frac{I}{b^4} = \frac{D}{4Es^3} \left(0.75 - \frac{3s^4}{b^4} \right)$$

وبتعويض D بقيمتها نحصل على العلاقة التالية:

$$\frac{I}{b^4} = \frac{t^3}{48(1-\nu^2)s^3} \left(0.75 - \frac{3s^4}{b^4} \right) \quad (20)$$

يتضح من العلاقة (20) بأن الشكل اللابعدي تابع لنسبة المسافة بين الألواح، وسماكة الألواح S/t والنسبة b/S . من أجل القطاعات التي تكون فيها النسبة S/b صغيرة، يمكن إهمال الحد الأخير في العلاقة السابقة والنسبة اللابعدي I/b^4 تصبح تابعة فقط للنسبة S/t .

كما في حالة التقوية الطولية، تحدد أبعاد جوائز التقوية العرضية على أساس الحمل الجانبي الذي يتعرض له اللوح، لكن التحليل المعطى هنا يمكن المصمم من التأكد بأن الأبعاد المحسوبة مناسبة لمقاومة الانبعاج [6].

النتائج والمناقشة:

توضّح الدراسة التحليلية التي تم القيام بها لمتانة انبعاج الألواح ، أنه ومن أجل لوح فولاذي طوله $4.5 m$ وعرضه $6 m$ وسماكته $15 mm$ مقوى طوليا بعناصر تقوية بتباعد مقداره $0.75 m$ وعرضيا بنفس التباعد بين عناصر التقوية، معامل مرونة مادة اللوح $E=205275 N/mm^2$ ، معامل بواصون $\nu=0.3$ ما يلي:

1- قيمة الإجهاد الحرج وعزم عطالة عنصر التقوية. يبين الجدول (1) قيمة الإجهاد الحرج الذي يمكن أن يتحملة اللوح وقيمة عزم العطالة الضروري لعنصر التقوية.

الجدول (1) قيمة الإجهاد الحرج المؤثر على اللوح وعزم العطالة لعنصر التقوية.

البارامتر	التقوية الطولية	التقوية العرضية
$\sigma_{cr} (KN/m^2) \times 10^3$	296.4	76.45
$I (m^4) \times 10^{-5}$	4.17	18.6

نلاحظ بأن متانة اللوح في حالة التقوية الطولية أكبر بحوالي أربع مرات من متانته في حالة التقوية العرضية، كما أنّ عزم العطالة لعنصر التقوية الطولية أقل بحوالي 4.5 مرة منه في حالة التقوية العرضية.

2- تأثير عدد عناصر التقوية وعزوم عطالتها.

a- حالة التقوية الطولية: يبين الجدول (2) قيم الإجهاد الحرج من أجل قيم مختلفة لعزوم العطالة وعدد عناصر التقوية.

الجدول (2) قيمة الإجهاد الحرج من أجل قيم مختلفة لعزوم العطالة وعدد عناصر التقوية.

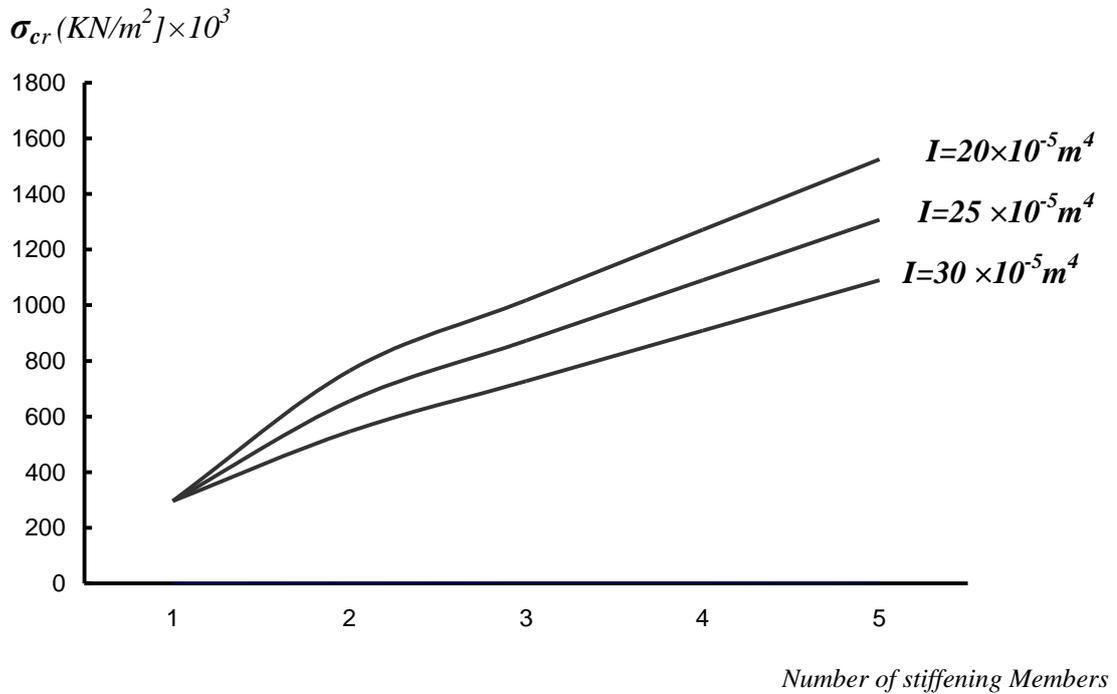
عدد عناصر التقوية	$I=20 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$	$I=25 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$	$I=30 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$
1	296.4×10^3	296.4×10^3	296.45×10^3
2	546.6×10^3	655.65×10^3	764.25×10^3
3	727.5×10^3	872.8×10^3	1017.64×10^3
4	908.96×10^3	1089.84×10^3	1270.72×10^3
5	1089.84×10^3	1307.2×10^3	1524.25×10^3

b- حالة التقوية العرضية: يبين الجدول (3) قيم الإجهاد الحرج من أجل قيم مختلفة لعزوم العطالة وعدد عناصر التقوية.

الجدول (3) قيمة الإجهاد الحرج من أجل قيم مختلفة لعزوم العطالة وعدد عناصر تقوية مختلفة.

عدد عناصر التقوية	$I=20 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$	$I=25 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$	$I=30 \times 10^{-5} m^4$ $\sigma_{cr}(KN/m^2)$
1	76.456×10^3	76.456×10^3	76.456×10^3
2	81.93×10^3	94.08×10^3	106.4×10^3
3	148×10^3	175.45×10^3	202.92×10^3
4	251.25×10^3	300×10^3	348.84×10^3
5	387×10^3	463.3×10^3	539.6×10^3

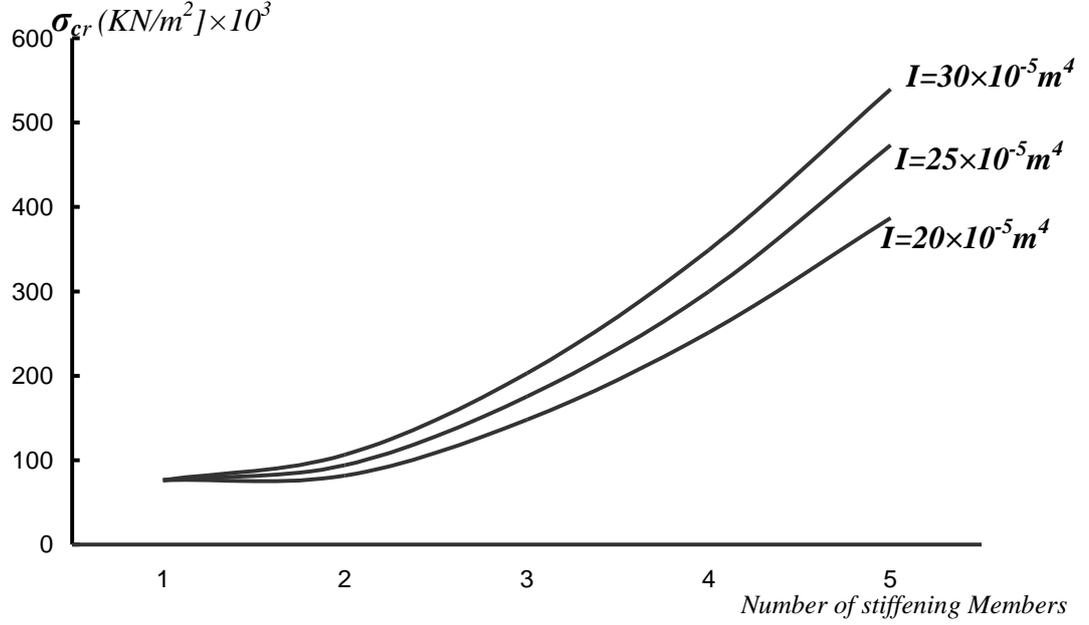
يبين الشكل (10) تأثير كل من عدد عناصر التقوية وعزم العطالة على قيمة إجهاد الانبعاج الحرج لحالة التقوية الطولية.



الشكل (10) تأثير عدد عناصر التقوية وعزم العطالة على إجهاد الانبعاج الحرج للوح مقوّ طولياً.

يبين الشكل (10) بأن متانة الانبعاج للوح مقوّ طوليا تتزايد بتزايد عدد عناصر التقوية، وأيضاً بتزايد عزم عطالة عناصر التقوية.

يبين الشكل (11) تأثير كل من عدد عناصر التقوية وعزم العطالة على قيمة إجهاد الانبعاج الحرج لحالة التقوية العرضية.



الشكل (11) تأثير عدد عناصر التقوية وعزم العطالة على إجهاد الانبعاج الحرج للوح مقوّ عرضياً.

يبين الشكل (11) أن متانة الانبعاج للوح مقوّ عرضياً تتزايد بتزايد عدد عناصر التقوية، وبتزايد عزم العطالة لعناصر التقوية كما في حالة التقوية الطولية.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث استنتاج العلاقات التي تستخدم في حساب إجهاد الانبعاج الحرج لحالتي التقوية الطولية والعرضية تحت تأثير أحمال ضغط في اتجاه واحد. كما تم حساب قيمة إجهاد الانبعاج الأصغري الذي يمكن أن يتحملة اللوح كي يبدأ بالانبعاج. تمت الدراسة على لوح فولاذي أبعاده $4.5 \times 6 \times 0.015m$ ، ونتيجة الحسابات تم الحصول على النتائج التالية:

- 1- قيمة إجهاد الانبعاج للوح المقوّ طولياً أكبر بأربع مرات منه في حالة التقوية العرضية، أي أن اللوح المقوّ طولياً يتحمل إجهادات أكبر بأربع مرات من اللوح المقوّ عرضياً.
- 2- تزداد قيمة الإجهاد الحرج بزيادة عزم العطالة لعناصر التقوية.
- 3- تزداد قيمة الإجهاد الحرج بزيادة عدد عناصر التقوية.
- 4- إن الإجهاد الحرج في حالة التقوية الطولية أكثر حساسية لعزوم العطالة وعدد عناصر التقوية منه في حالة التقوية العرضية، وهذا ما يفسر الاتجاه نحو تبني هذا النوع من التقوية في بناء السفن الحديثة كي تكون أقل عرضة للانبعاج.

سيتم متابعة البحث في هذا المجال لاستنتاج العلاقات التي تستخدم في حساب متانة الانبعاج للألواح المقواة المعرضة لأحمال ضغط في اتجاهين وأحمال عرضية، وتطوير برنامج حاسوبي لدراسة متانة الانبعاج تحت تأثير هذه الأحمال. ويمكن إيجاد العرض الفعال للوح الذي يقاوم إجهادات الانبعاج.

المراجع:

- 1- WILLIAM, M. *Strength of Ship's Structures*, Edward Arnold(Publishers) Ltd. London, first Published 1967.
- 2- BONG, J. K. ; JUNG K. S. *Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped offshore Structures: Part III- Hull Girder*, Ocean Engineering, volume 35, Issue 2, February 2008, 281-286.
- 3- BONG, J. K. ; JUNG, K. S. *Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped offshore Structures: Part I- Unstiffened Plates*, Ocean Engineering, volume 35, Issue 2, February 2008, 261-270.
- 4- OWEN, F.; HUGHES. *Ship Structural Design- A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach*, Published by the Society of Naval Architects and Marine Engineers 601 Pavonia Avenue Jersey City, New Jersey 07306-1988.
- 5- BONG, J. K.; JUNG, K. S. *Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped offshore Structures: Part II- stiffened Panels*, Ocean Engineering, volume 35, Issue 2, February 2008, 271-280.
- 6- JEOM, K. P. ; JUNG, K. S. *Ultimate Limit State Assessment of Ship Structures*, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2005.

