

Effect of confinement using carbon fiber on carrying capacity of concrete columns

⁽¹⁾Eng. Manar Takla

⁽²⁾Dr. Ihssan Tarsha

1–PhD student at Structural Engineering Depart. Engineering Faculty of AL–Baath University.

Email: m.takla2015@hotmail.com

2–Professor at Structural Engineering Depart. Engineering Faculty of AL–Baath University.

Email: imtarsha@hotmail.com

Abstract

FRP reinforced polymers are widely accepted for use in civil engineering applications to strengthen constructions and application of confinement on the concrete columns, thereby increasing their ductility and increasing their carrying capacity as these materials are characterized by high tensile strength. With the development of computer simulation theories to study the behavior of elements and structures under the influence of different loads (static, dynamic, thermal, etc.), it is possible to study the behavior of concrete columns under the influence of axial vertical and non-axial structural loads, and compare the results with previous research, thus saving time, effort and cost instead Of laboratory testing. In this paper, an analytical study was conducted using the ANSYS Workbench method, which follows the finite element method, to determine the effect of confinement using CFRP on carrying capacity of concrete columns and to compare analytical results with experimental results.

Keywords: confinement, carbon fiber, ductility, ANSYS Workbench.

تأثير التطويق باستخدام ألياف الكربون على قدرة تحمل الأعمدة الخرسانية

م. منار تقلا (1) د. إحسان الطرشة (2)

1 - طالبة دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث.

Email: m.takla2015@hotmail.com

2 - أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث.

Email: imtarsha@hotmail.com

ملخص البحث :

تكتسب المواد البوليميرية المقواة بالألياف FRP قبولاً واسعاً للاستخدام في تطبيقات الهندسة المدنية لتدعيم المنشآت وتطبيق التطويق للأعمدة الخرسانية، وبالتالي زيادة مطاوعتها وزيادة قدرة تحملها باعتبار أن هذه المواد تتصف بمقاومة عالية على الشد. ولذلك ازدادت الحاجة للاهتمام بدراسة سلوك العناصر الإنشائية المقواة بألياف الكربون، ومع تطور نظريات المحاكاة باستعمال الحاسوب لدراسة سلوك العناصر والمنشآت تحت تأثير الأحمال المختلفة (ستاتيكية، ديناميكية، حرارية.. الخ)، أصبح بالإمكان دراسة سلوك الأعمدة الخرسانية تحت تأثير الأحمال الإنشائية الرأسية المحورية واللا محورية، ومقارنة النتائج التحليلية بنتائج تجريبية لأبحاث سابقة وهذا يؤدي لتوفير الوقت والجهد والتكلفة بدلاً من إجراء التجارب المخبرية. في هذا البحث تم إجراء دراسة تحليلية باستخدام برنامج ANSYS Workbench الذي يعتمد طريقة العناصر المحدودة، لمعرفة تأثير التطويق باستخدام ألياف الكربون CFRP على قدرة تحمل الأعمدة الخرسانية، ومقارنة النتائج التحليلية بالنتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: التطويق ، ألياف الكربون، المطاوعة، ANSYS Workbench

تأثير التطويق باستخدام ألياف الكربون على قدرة تحمل الأعمدة الخرسانية

1. مقدمة:

تتجلى أهم الإنجازات الهندسية الحديثة نسبياً في مجال المواد وطرائق تقوية المنشآت، في استعمال مركبات البوليمرات المسلحة بالألياف FRP، حيث تم التأكيد بأن قابلية ليونة جيدة وقوة ضغط إضافية ملموسة يمكن أن تُحسّن من فعالية الخرسانة المسلحة من خلال تأمين الضغط في الاتجاهات الجانبية أي تطبيق مبدأ التطويق، فظهرت البوليمرات المقواة بالألياف FRP لتكون مادة واعدة للغاية لتدعيم العناصر الإنشائية وبالتالي أصبح استخدام البوليمرات المسلحة بالألياف موضوعاً لدراسات عديدة في السنوات الأخيرة نظراً لميزاتها العديدة.

2. هدف البحث:

إن هدف البحث هو دراسة سلوك الأعمدة الخرسانية مربعة الشكل المحملة محورياً والمطوقة بألياف الكربون CFRP، من خلال بناء نموذج تحليلي باستخدام برنامج ANSYS Workbench، ومقارنة النتائج التحليلية بالمعطيات التجريبية، وبيان فعالية التطويق المنفذ.

3. التطويق باستخدام ألياف الكربون:

يبدو أن مواد ال FRP تم إعدادها لإحداث ثورة في الطريقة التي يتم بها بناء البنية التحتية للخرسانة المسلحة أو إصلاحها أو استبدالها. وبالتالي فإن التطورات الحديثة في معرفة وخصائص المواد البوليميرية وتكنولوجيا تطبيقها وكذلك الزيادة في استخدامها أدت إلى انخفاض تكلفة تدعيم المنشآت الخرسانية حيث أنه أدى إلى منع هدم المبنى بشكلٍ كامل وبالتالي إصلاح العناصر الإنشائية عن طريق الربط بين مادة ال FRP والعنصر

الإنشائي القديم. وهذه التقنية أصبحت الآن واسعة الانتشار ومعترفاً بها لفعاليتها وسهولة تطبيقها في تدعيم وتقوية العناصر الإنشائية، بدلاً من استخدام التقنيات الأخرى في التدعيم والتقوية كاستخدام الفولاذ مثلاً [1,2].

4. منحنى الإجهاد -التشوه للخرسانة ($\sigma - \epsilon$):

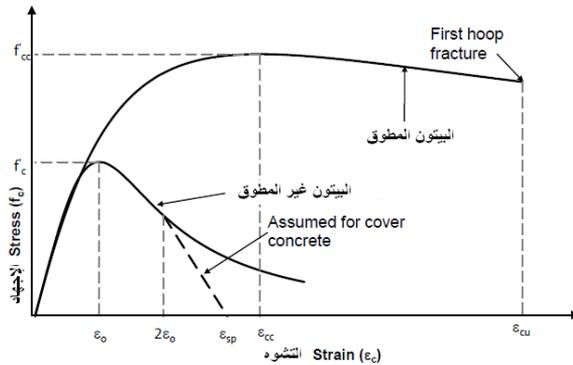
في الآونة الأخيرة ونتيجة الحاجة إلى زيادة مقاومة الخرسانة المسلحة، ازداد اهتمام المهندسين الإنشائيين لتقديم الحلول الملائمة لتحقيق ذلك، وقد جذبت مواد البوليمر المقوى بالألياف (FRP) الانتباه بسبب خصائصها الفائقة، مثل النسبة العالية للقوة إلى الوزن، وامتصاص الطاقة العالية ومقاومتها الممتازة للتآكل، والمقاومة العالية للشد. يتم تنفيذ التطويق باستخدام ألياف الكربون CFRP على محيط الأعمدة الخرسانية لتعزيز مقاومة ومطاوعة الأعمدة نتيجة ضغط التطويق المطبق الذي يحدث عادة بواسطة التسليح العرضي. إن تحليل الأعمدة يتطلب معرفة جميع العوامل المحتملة التي تساهم في قدرة التحمل النهائية للأعمدة، بما في ذلك تأثير التطويق. ولمعرفة قدرة تحمل الأعمدة هناك حاجة لتطوير نموذج تجريبي يتنبأ بسلوك الأعمدة نتيجة تطبيق التطويق المدمج الناتج من التسليح العرضي ومن تطبيق ألياف الكربون معاً، حيث أنه في الأعمدة المستطيلة يكون الضغط الجانبي مختلفاً بشكل عام في كلا الاتجاهين.

وقد تم تقديم نماذج رياضية عديدة لتوصيف منحنى الإجهاد-التشوه للخرسانة تشمل عدة حالات، نذكر منها دراسة تأثير التطويق بألياف الكربون على النماذج البيوتونية غير المسلحة كالنموذج المقدم من قبل Lam and Teng [3] واعتمده الكود الأمريكي ACI440.2R-08 [4]، دراسة قام بها باحثون آخرون كالنموذج المقدم من قبل park & kent لتوصيف معادلة منحنى الإجهاد-التشوه للخرسانة لمعرفة تأثير التسليح العرضي ودوره في التطويق في حال كان المقطع دائرياً ونماذج أخرى في حال كون المقطع

مستطياً، وهناك دراسة قام بها Mander et al [5] أخذت دور التطويق من خلال تأثير التسليح الطولي والعرضي معاً وذلك في حال كان المقطع دائرياً أو مستطياً. وبالتالي نلاحظ من جميع الدراسات السابقة أنه لم يتم الحصول على نموذج مشترك يدمج التسليح العرضي مع ألياف الكربون لبيان فعالية التطويق الناتج من تأثير وجود هذين العنصرين معاً في الأعمدة الخرسانية سواءً كانت ذات مقطع دائري أو مربع أو مستطيل، إلى أن قام الباحثان Ahmed and Hayder [6] بتقديم نموذج يجمع بين النموذج المقدم من قبل Mander [5] والنموذج المقدم من قبل Lam and Teng [3] ويأخذ بعين الاعتبار تأثير شكل المقطع، ولتوضيح هذا النموذج سيتم الشرح عن كل نموذج بشكل منفصل ومن ثم ندرج النموذج المشترك.

1.4 نموذج -Mander, Priestly and Park Curve 1988 [5]:

قام ماندر وآخرون بصياغة معادلات رياضية للتعبير عن منحنى الإجهاد - التشوه للخرسانة المطوقة، الشكل (1). ويأخذ هذا النموذج بعين الاعتبار النسبة بين المساحة المطوقة إلى المساحة الكلية لمقطع الخرسانة. ويستطيع هذا النموذج التمييز بين الخرسانة المطوقة بتسليح عرضي دائري وبين الخرسانة المطوقة بتسليح عرضي مستطيل وذلك من خلال تأثير المعامل (K_e) . كما يأخذ بعين الاعتبار خطوة التسليح العرضي ونسبة التسليح الطولي إلى إجمالي مساحة مقطع الخرسانة [5] ويمكن التعبير عن المنحنى بالعلاقة (1):



الشكل (1): منحنى الإجهاد - التشوه للخرسانة المطوقة وفق Mander 1988 [5]

$$\hat{f}_c = \frac{(f'_{cc}) \times (x) \times (r)}{r - 1 + (x)^r} \quad (1)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{ses}}$$

$$E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc}$$

$$A_{cc} = A_c \times (1 - \rho_{cc})$$

$$A_e = \left(b_c \times d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times b_c} \right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times d_c} \right)$$

$$K_e = \frac{(1 - \frac{S'}{2d_s})^2}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{للتسليح الحلقي}$$

$$K_e = \frac{1 - \frac{S'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{للتسليح الحلزوني}$$

$$K_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6 \times b_c \times d_c} \right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times b_c} \right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times d_c} \right)}{1 - \rho_{cc}}$$

$$f'_{lx} = f'_{ly} = K_e \times \rho \times f_{yh}$$

$$f'_{cc} = k \times \hat{f}_c$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{\hat{f}_c} - 1 \right) \right]$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$$

حيث:

$\varepsilon_{c0} = 0.002$ التشوه المقابل لمقاومة الضغط للخرسانة غير المطوقة.

ρ_{cc} - نسبة التسليح الطولي إلى مساحة النواة الخرسانية.

ρ - النسبة الحجمية للتسليح العرضي (عدد قضبان التسليح العرضي \times مساحة القضيب) $\rho = \frac{\text{عدد قضبان التسليح العرضي} \times \text{مساحة القضيب}}{s \times d_c}$

K_e - معامل تأثير نوع التسليح المستخدم حسب المقطع العرضي المستخدم.

f_c - المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة غير المطوقة (MPa).

f_{cc} - المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة (MPa).

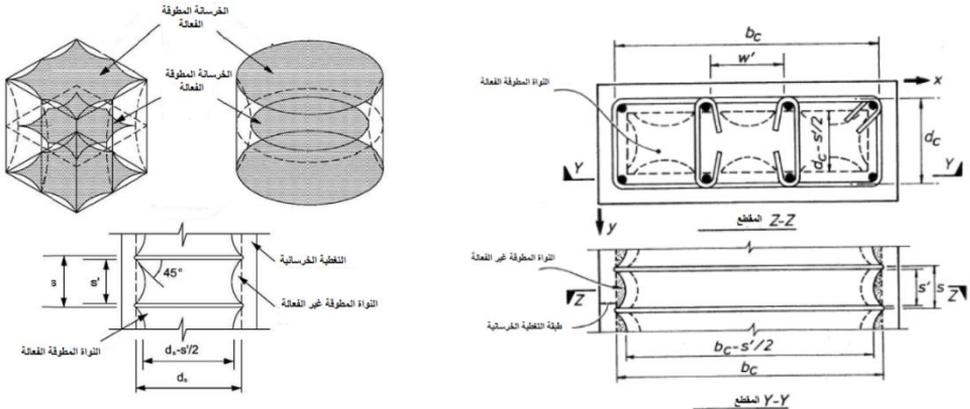
A_{cc} - مساحة الخرسانة ضمن المركز المحاطة بالتسليح الطولي (mm^2).

A_e - مساحة النواة الخرسانية المطوقة الفعالة (mm^2).

ε_{cc} - التشوه المقابل لمقاومة الضغط للخرسانة المطوقة.

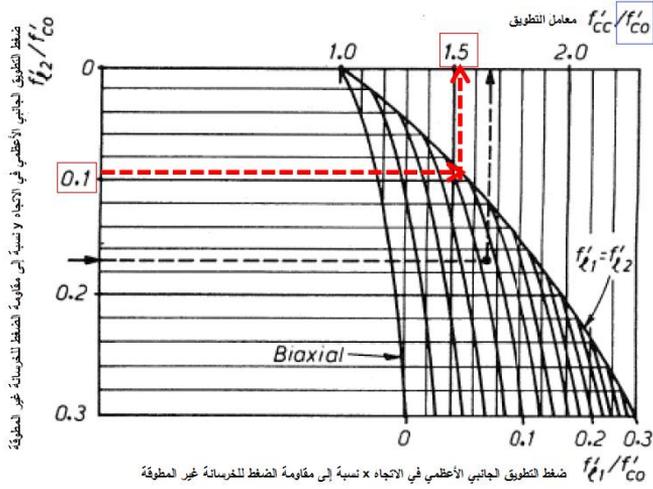
k - معامل التطويق.

يبين Mander في الشكل (2) المنطقة الفعالة المطوقة للأعمدة المستطيلة والدائرية يوضح من خلالها الأبعاد المستخدمة في العلاقات السابقة، ويوضح الشكل (3) كيفية استنتاج



قيمة معامل التطويق k .

الشكل (2): المنطقة الفعالة المطوقة للأعمدة المستطيلة والدائرية



الشكل (3): مخطط Mander لحساب قيمة معامل التطويق k

2.4 نموذج Lam and Teng [3]:

قام Lam and Teng بصياغة معادلات رياضية للتعبير عن منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون المطوق بألياف الكربون (لا يوجد أي نوع من التسليح)، الشكل (4)، فكان المنحني مؤلفاً من جزئين الجزء الأول قطع مكافئ والجزء الثاني خطي وفقاً لما يأتي:

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_c} \varepsilon_c^2 \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \quad (2)$$

$$f_c = \hat{f}_c + E_2 \varepsilon_c \quad \varepsilon'_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \quad (3)$$

حيث قام Lam and Teng بتحويل المقطع المستطيل إلى مقطع دائري مكافئ وذلك بإضافة عوامل الشكل (k_a, k_b) كما هو مبين في الشكل (5)، وتم حساب القطر المكافئ ومقاومة الضغط للبيتون المطوق كما يأتي:

$$E_c = 4730 \sqrt{f_c}$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2\hat{f}_c}{E_c - E_2}$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - \hat{f}_c}{\varepsilon_{ccu}}$$

$$f_{cc} = \hat{f}_c + \psi_f 3.3 k_a f_l$$

$$\varepsilon_{ccu} = \hat{\varepsilon}_c \left(A + 12 k_b \frac{f_l}{\hat{f}_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\hat{\varepsilon}_c} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01$$

$$\psi_f = \begin{cases} 1 & (\text{Lam and Teng}) \\ 0.95 & (\text{ACI440.2R - 08}) \end{cases}$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.586 \varepsilon_{fu}$$

$$A = \begin{cases} 1.75 & (\text{Lam and Teng}) \\ 1.5 & (\text{ACI440.2R - 08}) \end{cases}$$

$$D = \sqrt{b^2 + h^2}$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left(\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right)}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g}$$

$$f_l = \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{D}$$

حيث:

ψ_f : معامل انخفاض المقاومة.

f_l : الضغط الجانبي المطبق من خلال FRP في المقطع المكافئ للمقطع الدائري.

(k_a, k_b) : عوامل الشكل.

r_c : نصف قطر تدوير حواف المقطع العرضي (mm).

ρ_g : نسبة التسليح الطولي.

n : عدد طبقات ألياف الكربون.

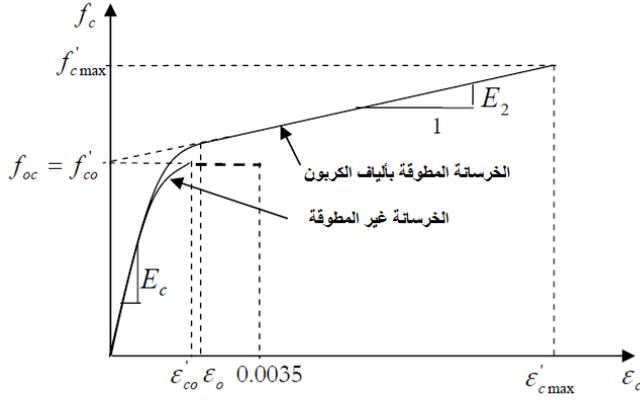
t_f : سماكة طبقة ألياف الكربون (mm).

E_f : معامل مرونة ألياف الكربون (MPa).

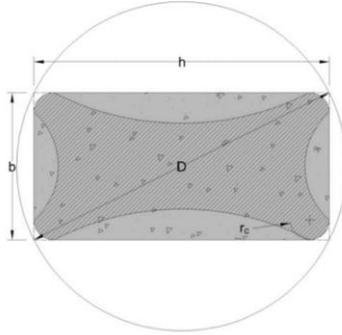
ϵ_{fe} : التشوه المكافئ لألياف الكربون.

D : القطر المكافئ.

ϵ_{fu} : التشوه الحدي عند الانقطاع لألياف الكربون.



الشكل (4): منحنى الإجهاد-التشوه للخرسانة المطوقة وغير المطوقة حسب Lam and Teng [3]

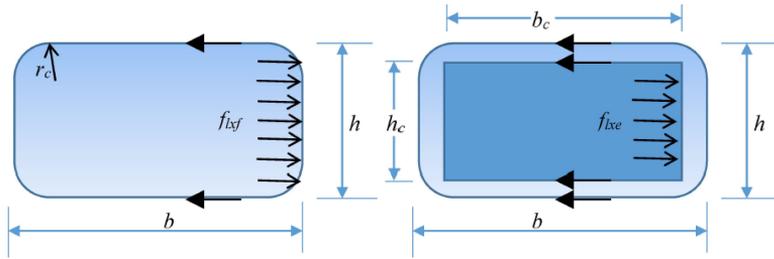


الشكل (5): مكافئة المقطع المستطيل بدائرة حسب Lam and Teng [3]

3.4 منحني الإجهاد - التشوه للخرسانة المطوقة بـ (ألياف الكربون FRP وفولاذ

التسليح) [6]:

كما ذكرنا سابقاً أنه تم تطوير نموذج Mander [5] للخرسانة المطوقة بالتسليح العرضي والطولي فقط، في حين تم تطوير نموذج Lam and Teng [3] للبيتون فقط (دون وجود أي نوع من التسليح) والمطوق بـ FRP فقط . ولكن في الأعمدة الخرسانية المسلحة يمكن أن تخضع هذه الأعمدة لنوعين من التطويق معاً، التطويق بالفولاذ وبالFRP. ولحساب تأثير نوعي التطويق معاً تم إضافة علاقات رياضية من قبل Ahmed and Hayder [6] يتم من خلالها حساب النسبة بين ضغط التطويق على المحيط وضغط التطويق داخل النواة، حيث تسمح هذه العلاقة بالتنبؤ بالقوة المطوقة للأعمدة الخرسانية المطوقة بكل من الفولاذ ولفافات FRP معاً وذلك اعتماداً على نموذج Mander والنموذج المقدم من قبل Lam and Teng، حيث أن مساهمة الفولاذ العرضي و FRP في التطويق داخل النواة (core) يرمز له بـ (f_{ie}) و على المحيط (cover) لدينا تأثير التطويق المقدم من ألياف الكربون فقط ويرمز له بـ (f_{lf}) ، كما هو موضح في الشكل (6)، حيث أنه إذا كانت النسبة $(\frac{f_{lf}}{f_c}) \leq 0.08$ يتم استخدام علاقة Lam & Teng وإلا يتم تطبيق علاقات Mander. وتم إدراج العلاقات المعبرة عن ذلك كما يلي:



الشكل (6): مساهمة ألياف الكربون والتسليح العرضي بالتطويق داخل النواة وعلى المحيط على التوالي

$$f_{ixf} = k_f \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{h}$$

$$f_{lyf} = k_f \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{b}$$

$$f_{ixe} = k_f \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{h} + K_e \times \rho_x \times f_{yh}$$

$$f_{lye} = k_f \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{b} + K_e \times \rho_y \times f_{yh}$$

$$k_f = \frac{1 - \frac{\left(\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2r_c)^2\right)}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g}$$

$$K_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6 \times b_c \times d_c}\right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times b_c}\right) \times \left(1 - \frac{S'}{2 \times d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}}$$

حيث:

n : عدد طبقات ألياف الكربون.

t_f : سماكة طبقة ألياف الكربون (mm).

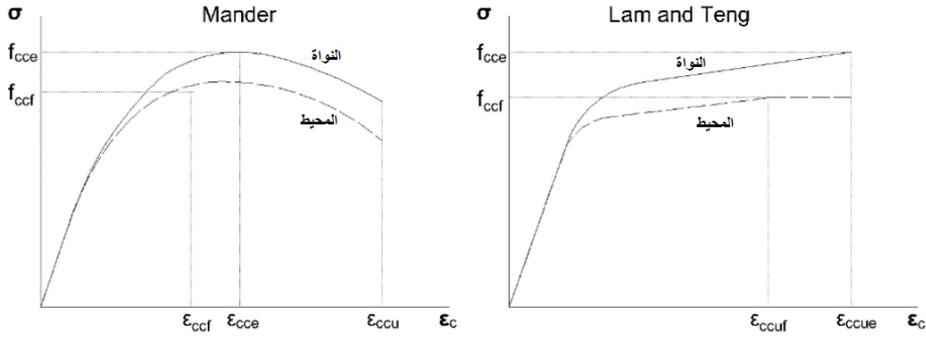
E_f : معامل مرونة ألياف الكربون (MPa).

ε_{fe} : التشوه المكافئ لألياف الكربون.

f_{ixf}, f_{lyf} : مساهمة ألياف الكربون في التطويق على المحيط في الاتجاه x, y .

f_{ixe}, f_{lye} : مساهمة ألياف الكربون والتسليح العرضي في التطويق داخل النواة في

الاتجاه x, y .



الشكل (7): نماذج التطويق للنواة والمحيط حسب Mander و Lam and Teng

❖ ولمعرفة فعالية التطويق بألياف الكربون مع التسليح العرضي سيتم بناء نموذج تحليلي باستخدام برنامج **ANSYS Workbench** الذي يتبع طريقة العناصر المحدودة، حيث سيتم إدخال منحنى الإجهاد-التشوه للخرسانة دون أخذ تأثير التطويق الناتج عن التسليح وطبقة ألياف الكربون.

5. بناء النموذج العددي باستخدام برنامج **ANSYS Workbench** [10]:

إن بيئة **ANSYS Workbench** بيئة منفصلة في الأوامر وهذا يؤدي إلى سهولة العمل حيث يمكن تعديل أو حذف أي معلومة تم إدخالها للبرنامج بخلاف التعامل مع **ANSYS GUI (Graphical User Interface)** ، حيث أن جميع الأوامر مترابطة مع بعضها البعض وأي خطأ يؤدي لإعادة العمل من البداية. إن بناء نموذج عددي باستخدام برنامج العناصر المحدودة **ANSYS Workbench**، يمر بالخطوات الآتية:

- 1- تعريف المواد المستخدمة باستخدام **Engineering Data**، الشكل (8).
- 2- نمذجة الشكل الهندسي **Geometry**، الشكل (9).
- 3- ضبط شروط التقسيم والاتصال بين العناصر باستخدام **MODEL**. بالضغط على أمر **MODEL** يقوم البرنامج بفتح نافذة يظهر فيها النموذج وتظهر قائمة منسدلة تحوي **Mesh**، **Connection**، يتم من خلالهما ضبط شروط التقسيم والاتصال بين العناصر المتولدة من التقسيم، الشكل (10)، مع ملاحظة أن البرنامج يقوم

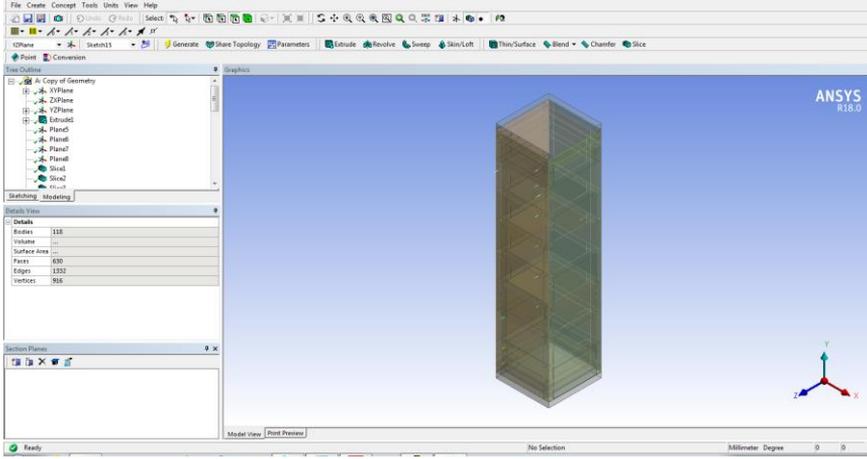
تلقائياً بالربط بين الفولاذ والبيتون من خلال ضبط شروط الاتصال من النافذة connection واختيار النمط bonded.

- 4- اختيار نوع العنصر الملائم Element type لنمذجة المواد المستخدمة.
- 5- تطبيق الحمولات وتعريف الشروط الطرفية الشكل (11)، (12) حيث تم تطبيق مبدأ coupling المتوفر في البرنامج والذي يربط عقد السطح بنقطة واحدة، حيث تم ربط جميع عقد السطح العلوي في نقطة وتطبيق الحمولة عند هذه النقطة، وربط عقد السطح السفلي في نقطة وتطبيق شروط الاستناد عند هذه النقطة.
- 6- ضبط خيارات التحليل solution control.

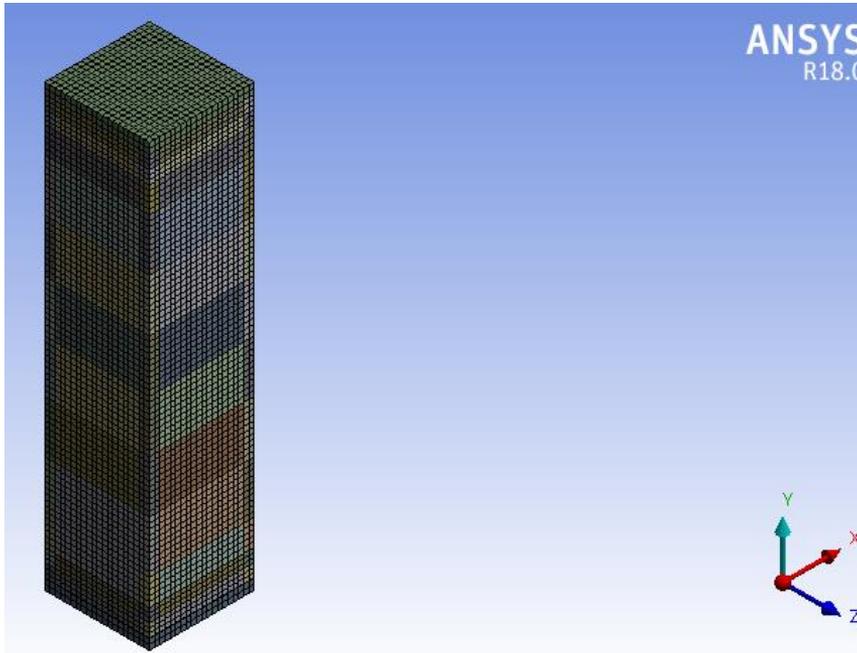
Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	cfrp				
4	Concrete				
5	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Structural Steel 2				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 4: Concrete					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2300	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	1E-05	K ⁻¹		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus...			
8	Young's Modulus	47925	MPa		
9	Poisson's Ratio	0.2			
10	Bulk Modulus	2.6625E+10	Pa		
11	Shear Modulus	1.9969E+10	Pa		
12	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular			
15	Tensile Yield Strength	0	Pa		
16	Compressive Yield Strength	79.5	MPa		
17	Tensile Ultimate Strength	7.95	MPa		
18	Compressive Ultimate Strength	7.95E+07	Pa		

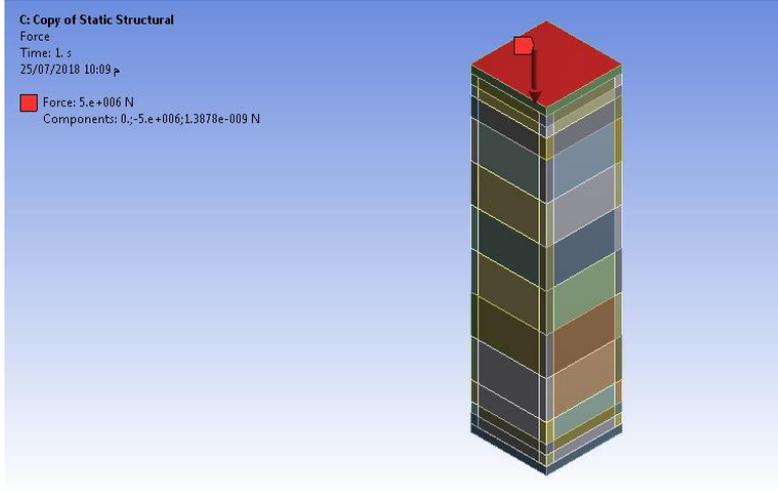
الشكل (8): تعريف المواد باستخدام Engineering Data



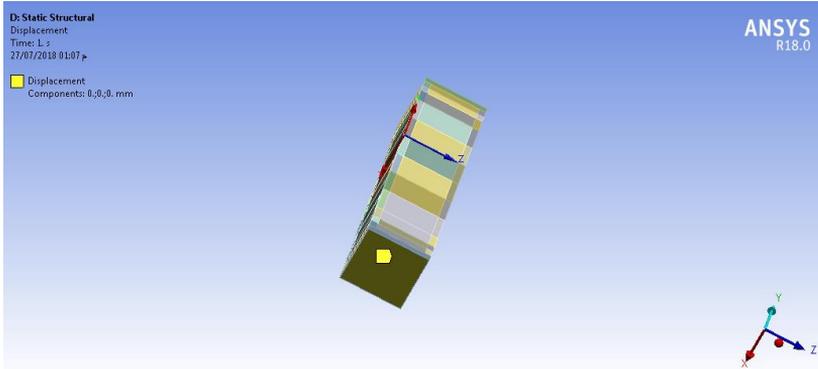
الشكل (9): بناء النموذج الهندسي Geometry



الشكل (10): تقسيم النموذج إلى عناصر محدودة باستخدام mesh



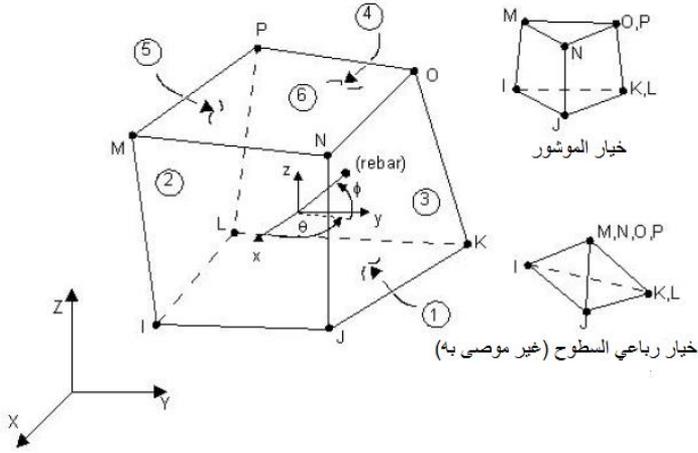
الشكل (11): تطبيق الحمولة المحورية



الشكل (12): تطبيق شروط استناد العمود (وثاقة من الأسفل)

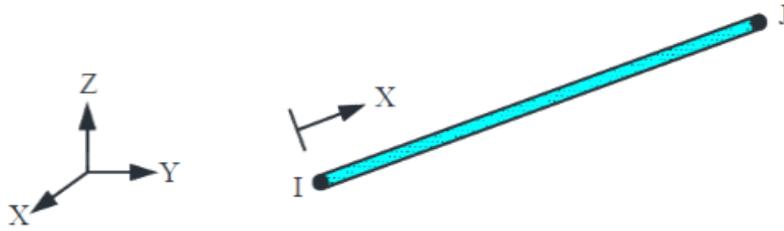
6. العناصر المستخدمة في النمذجة للتحليل الإنشائي [7-8-9-10]:

1- العنصر **Solid65**: يتم استخدام هذا العنصر لنمذجة البيتون. له ثماني عقد، لكل عقدة ثلاث درجات حرية، وهي انتقالات في الاتجاهات الثلاثة X, Y, Z . العنصر قادر على توقع التشوه اللدن، الزحف، التشقق في الشد وفق الاتجاهات الثلاثة المتعامدة، والتحطم في الضغط. ويبين الشكل (13) المواصفات الهندسية للعنصر المحدود **Solid65**.



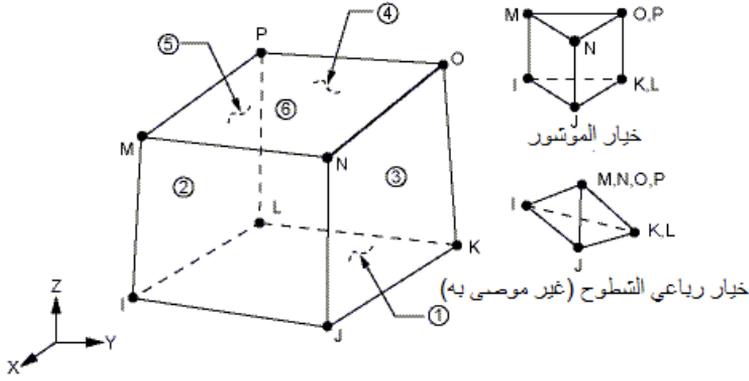
الشكل (13): عنصر البيتون 3D- Solid65

2- **العنصر Link180**: تمّ استخدام هذا العنصر لنمذجة فولاذ التسليح، حيث يُعدّ الفولاذ نحيفاً وقادراً على نقل القوى المحورية فقط، لذلك تمّ استخدام هذا العنصر في النمذجة. لهذا العنصر عقدتان، ولكل عقدة ثلاث درجات حرية، وهي انتقالات وفق المحاور الثلاثة X, Y, Z ، العنصر قادر على توقع التشوه اللدن، الشكل (14).



الشكل (14): عنصر فولاذ التسليح Link180-3D spar

3- **العنصر Solid185**: تمّ استخدام هذا العنصر، الشكل (15)، لتجنب مشاكل تركيز الإجهادات ومنع التحطم الموضعي للعناصر البيتونية بالقرب من نقاط الاستناد ونقاط تطبيق الحمولة، مما يؤمن توزيعاً أكثر انتظاماً للإجهادات (حسب مبدأ سان فينان) هذا العنصر يحدد بثمانية عقد، لكل عقدة ثلاث درجات حرية وهي انتقالات وفق المحاور الثلاثة X, Y, Z .



الشكل (15): العنصر solid185

لمعرفة تأثير التطويق بألياف الكربون على قدرة تحمل الأعمدة الخرسانية تم إنشاء نموذج تحليلي باستخدام برنامج Ansys workbench يحاكي النموذج التجريبي الوارد في البحث التجريبي:

Axial and Flexural Performance of Square RC Columns Wrapped with CFRP under Eccentric Loading [11]

حيث أنه في هذا البحث تم إعداد نموذج تجريبي لعمود خرساني غير مطوق بألياف الكربون ونموذج آخر تم تطويقه بطبقة واحدة من ألياف الكربون بسماكة (0.45 mm) لألياف الكربون، معامل المرونة الطولي على الشد لا CFEP (75.4 GPa)، مقاومة الشد لا CFRP (1399 MPa). ويوضح الجدول (1) مواصفات النموذج المدروس، وفي الجدول (2) تم إدراج الخواص الفيزيائية لمادة الخرسانة المستخدمة واللازمة للتحليل الإنشائي.

الجدول (1): مواصفات النموذج المدروس

مواصفات النموذج المدروس	
أبعاد المقطع العرضي (mm)	(200 × 200 × 800)
مقاومة الضغط للبيتون (MPa)	79.5
سماكة طبقة التغطية (mm)	20
إجهاد الخضوع للتسليح الطولي (MPa)	564
إجهاد الخضوع للتسليح العرضي (MPa)	516
قطر التسليح الطولي (mm)	12
قطر التسليح العرضي (mm)	8

الجدول (2): خصائص الخرسانة المستخدمة

خصائص الخرسانة المستخدمة $f_c=79.5 \text{ MPa}$	
Linear Isotropic	
معامل مرونة EX (MPa)	47925
معامل بواسون PRXY	0.2
Multilinear Isotropic	
التشوه Strain (mm/mm)	الإجهاد Stress (Mpa)
0.0004976	23.85
0.0007	33.52
0.0013	61.29
0.0015	69.25
0.0018	77.65
0.002	79.5
Concrete	
معامل القص للشقوق المفتوحة SheCf-Op	0.3
معامل القص للشقوق المغلقة SheCf-CI	0.8
إجهاد الشد المحوري (UnTensSt (Mpa)	7.95
إجهاد التحطم المحوري (Uniaxial crushing stress)	-1
إجهاد التحطم ثنائي المحور	0
حالة الإجهاد الهيدروستاتيكي المحيط	0
إجهاد التحطم ثنائي المحور تحت تأثير حالة الإجهاد الهيدروستاتيكي	0
إجهاد التحطم أحادي المحور تحت تأثير حالة الإجهاد الهيدروستاتيكي	0
معامل تخفيض الصلابة	0.6

7. نتائج التحليل باستخدام ANSYS Workbench:

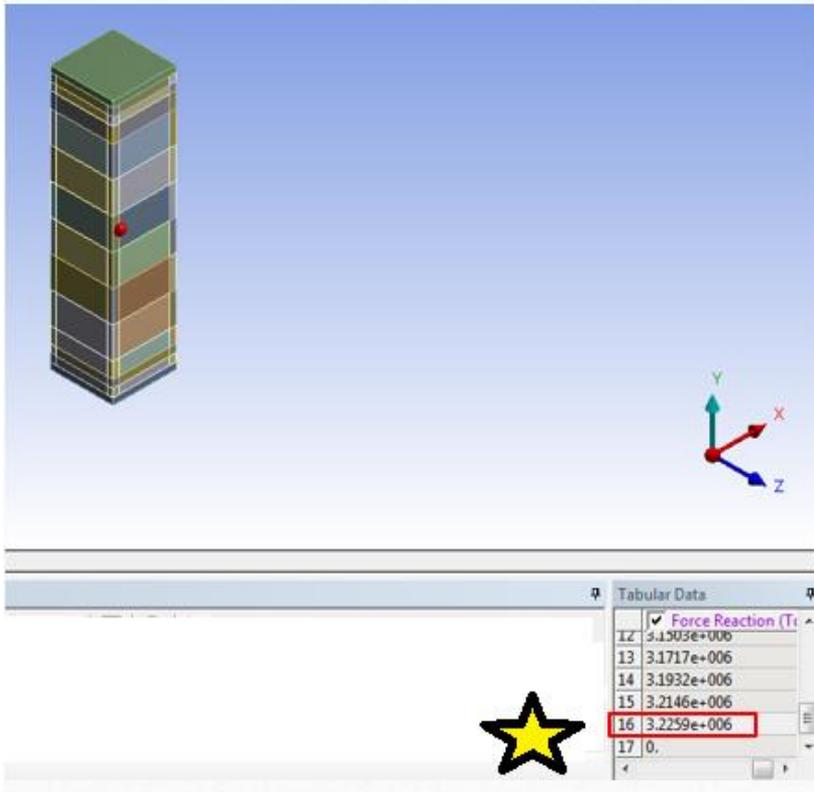
أدرجت نتائج التحليل في الجدول (3) حيث تم أيضاً إجراء تحليل آخر للنموذج بوجود تسليح طولي فقط دون وجود أساور وذلك لحساب قيمة المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f_{cc} . ويوضح الشكل (16) قيمة حمولة الانهيار للعمود الخرساني غير المطوق، أما الشكل (17) فيوضح قيمة حمولة الانهيار للعمود الخرساني المطوق بطبقة واحدة من ألياف الكربون،

الجدول (3) نتائج التحليل باستخدام برنامج ANSYS Workbench :

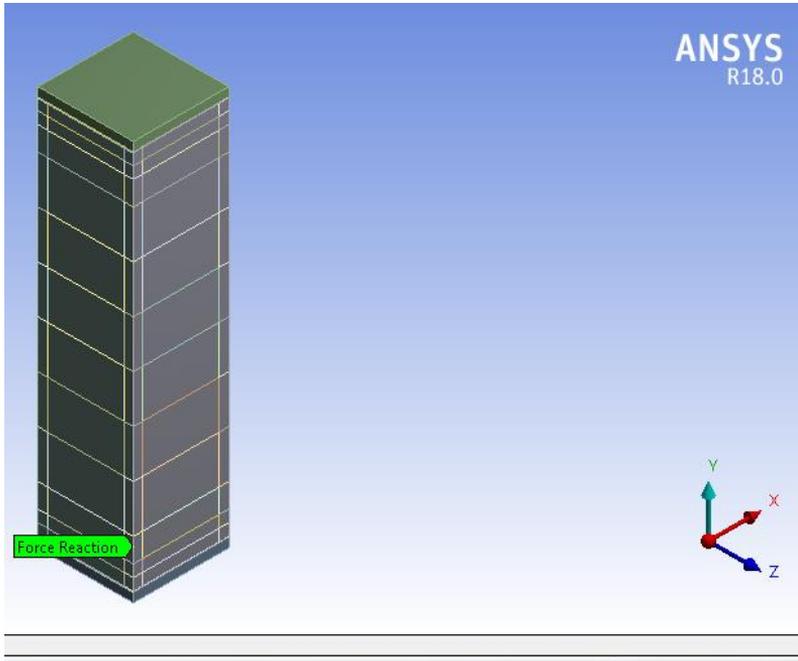
حمولة الانهيار (KN)		النموذج المدروس
النتائج التحليلية باستخدام ANSYS Workbench	النتائج التجريبية	
3160	-----	C79.5-L12
3225.9	3248	C79.5-L12-S8
3287.5	3279	C79.5-L12-S8+1CFRP

C –concrete; L – longitudinal reinforcement; S – stirrups reinforcement

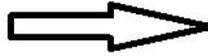
C –البيتون; L – التسليح الطولي – S – التسليح العرضي



الشكل (16): حمولة الانهيار التحليلية باستخدام برنامج ANSYS Workbench للنموذج دون تطويق



Tabular Data	
	Force Reaction (Tc
30	3.26e+006
31	3.265e+006
32	3.2724e+006
33	3.2774e+006
34	3.2824e+006
35	3.2875e+006



الشكل (17): حمولة الانهيار التحليلية باستخدام برنامج ANSYS Workbench للنموذج المطوق بطبقة واحدة من ألياف الكربون CFRP

❖ في الجدول (4)، تم إدراج قيمة المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f_{cc} وذلك حسب العلاقات المقدمة من قبل (Mander, Lam & Teng,) وفي الجدول (5) تم إدراج قيمة المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f_{cc} حسب العلاقات الواردة في الملحق (4) للكود العربي السوري [12]، حيث تم إدخال العلاقات ومعالجتها ضمن برنامج جدول البيانات EXCEL ومقارنتها مع النتائج التحليلية باستخدام برنامج ANSYS Workbench والواردة في الجدول (6).

الجدول (4): قيمة المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f'_{cc} حسب العلاقات المقدمة من قبل (Mander, Lam & Teng, Ahmed & Hayder)

Ahmed & Hayder				Lam & Teng		Mander	
cover		core		$h(mm)$	200	$d_c(mm)$	152
K_f	0.706	K_e	0.289	$b(mm)$	200	$b_c(mm)$	152
$f_{lxf}=f_{lyf}$	2.23	$f_{lxe}=f_{lye}$	3.219	$r(mm)$	34	$d_t(mm)$	12
f_{lf}/f_c	0.028	-----		$D(mm)$	282.8	$d_h(mm)$	8
$\frac{f_{lf}}{f_c} = 0.028 < 0.08 \Rightarrow$ نستخدم Mander حسب التعديل المقترح من قبل Ahmed & Hayder بما أن النسبة $\frac{f_{lf}}{f_c}$ كانت أصغر من 0.08 فإنه تم استخدام علاقة Mander وتعويض قيمة $f'_{lx} = 0.989$ الموجودة في علاقة Mander بالقيمة الجديدة التي نحصل عليها من تطبيق علاقة Ahmed & Hayder $f_{lxf}=2.23$ فتكون قيمة معامل التطويق من الشكل (3)، $(k=1.2)$				n	1	ρ_{cc}	0.0195
				$t_f(mm)$	0.45	A_{cc}	22651.6 1
				$E_f(GPa)$	75.4	A_e	6567.3
				$E_c(MPa)$	4792 5	K_e	0.289
				ψ_f	0.95	$f'_{lx} = f'_{ly}$	0.989
				ϵ_{fe}	0.009	f'_{lx}/\hat{f}_c	0.0124
				f_{IFRP}	2.23	k	1.09
$f'_{cc}(MPa)$	95.4		$f'_{cc}(MPa)$	84.44	$f'_{cc}(MPa)$	86.6	

❖ وقد تم حساب المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f'_{cc} وفق علاقات الملحق (4) للكود العربي السوري كما يأتي:

$$f'_{cc} = \alpha_{1rec} \cdot \alpha_{2rec} \cdot \hat{f}_c$$

$$\alpha_{1rec} = \left[1.8 \times \sqrt{\left(1 + 7.94 \times \frac{f'_{1max}}{\hat{f}_c} - 1.6 \times \frac{f'_{1max}}{\hat{f}_c} - 1\right)} \right]$$

$$\alpha_{2rec} = \left[\left(1.4 \frac{f'_{1min}}{f'_{1max}} - 0.6 \times \left(\frac{f'_{1min}}{f'_{1max}}\right)^2 - 0.8\right) \times \sqrt{\frac{f'_{1max}}{\hat{f}_c}} + 1 \right]$$

$$f'_{1min} = \min(f'_{1x}, f'_{1y})$$

$$f'_{1max} = \max(f'_{1x}, f'_{1y})$$

$$f'_{1x} = \rho_{fx} \times f_f$$

$$f'_{1y} = \rho_{fy} \times f_f$$

$$\rho_{fx} = \frac{2 \times t_f}{h_y}$$

$$\rho_{fy} = \frac{2 \times t_f}{h_x}$$

حيث:

f'_{cc} : المقاومة المميزة الاسطوانية على الضغط للخرسانة المطوقة.

f'_c : المقاومة المميزة الاسطوانية على الضغط للخرسانة غير المطوقة.

α_{1rec} : عامل زيادة المقاومة، الذي يأخذ تأثير الضغط ثنائي المحور على الخرسانة للمقاطع المستطيلة.

α_{2rec} : عامل تخفيض يأخذ تأثير انحراف القيم النظرية عن مبدأ الضغط ثنائي المحور للمقاطع المستطيلة.

f'_{1min}, f'_{1max} : الإجهادات الجانبية العظمى والصغرى، التي يقدمها التطويق الجانبي بالألياف الكربونية بالاتجاهين X, Y،

ρ_{fx}, ρ_{fy} : نسبة الحصر في الاتجاهين X, Y.

h_x, h_y : أبعاد المقطع العرضي.

t_f : سماكة ألياف الكربون.

f_f : مقاومة الشد لألياف الكربون.

الجدول (5): قيمة المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة f_{cc} حسب العلاقات الواردة في الملحق (4) للكواد العربي السوري [12]

حساب المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة وفق علاقات الملحق (4) للكواد العربي السوري [9]	
\hat{f}_c (MPa)	79.5
h_x (mm)	200
h_y (mm)	200
t_f (mm)	0.45
f_f (MPa)	1399
ρ_{fx}	0.0045
ρ_{fy}	0.0045
\hat{f}_{1x}	6.2955
\hat{f}_{1y}	6.2955
\hat{f}_{1min}	6.2955
\hat{f}_{1max}	6.2955
α_{1rec}	1.17
α_{2rec}	1
\hat{f}_{cc} (MPa)	93.06

الجدول (6): النتائج التحليلية حسب ANSYS Workbench

النتائج التحليلية حسب ANSYS Workbench		
النموذج المدروس	حمولة الانهيار (KN)	المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة (f_{cc}) (MPa)
C79.5-L12	3160	85.13
C79.5-L12-S8	3287.5	

❖ تم الحصول على المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة (f_{cc}) كالتالي:

$$f_{cc} = \frac{N_{cr}(C79.5 - L12 - S8) - N_{cr}(C79.5 - L12)}{A_{cc}} + \hat{f}_c$$

حيث:

N_{cr} : حمولة الانهيار.

f_c : المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط للخرسانة غير المطوقة.

A_{cc} : مساحة الخرسانة ضمن المركز المحاطة بالتسليح الطولي (mm^2).

8. الاستنتاجات:

1- أعطت النتائج التحليلية قيم قريبة جداً عند حساب المقاومة المميزة على الضغط للخرسانة المطوقة ومقارنتها مع العلاقات النظرية للملحق (4) للكود العربي السوري، والعلاقات النظرية المقدمة من قبل (Mander, Lam &Teng, Ahmed &Hayder).

2- إن ألياف الكربون ساهمت في زيادة قدرة تحمل الأعمدة وبالتالي زيادة مطاوعتها، حيث أنه باستخدام التسليح العرضي فقط ازدادت قدرة تحمل الأعمدة بمقدار (2.08%) وعند استخدام ألياف الكربون مع التسليح العرضي ازدادت قدرة تحمل الأعمدة بمقدار (4.034%) بالنسبة للعمود بوجود تسليح طولي فقط.

3- الفارق بين قيمتي حمولة الانهيار التحليلية والتجريبية للنموذج غير المطوق بألياف الكربون (0.68%)، وللنموذج المطوق بألياف الكربون CFRP (0.259%). مما يعني أن النموذج التحليلي قادر على توصيف أي نموذج تجريبي وهذا يؤدي إلى توفير في الوقت والجهد والكلفة.

9. التوصيات:

يوصى بإجراء دراسات تجريبية وتحليلية لاحقة لمعرفة تأثير وجود أكثر من طبقة من ألياف كربون، وكذلك تأثير التطويق بألياف الكربون FRP ذات الأشكال المختلفة كالشرائط أو القضبان.

References

- 1- Ershad, Behaviour OF Fiber Reinforced Polymer Confined Reinforced Concrete Columns Under Fire Condition.
- 2- Omar Ch. Mohsen Sh, AdnanAI-Saad. Behavior of axially loaded short rectangular columns strengthened with CFRP composite wrapping. Structures Research Center.2000
- 3- Lam, L.; Teng, J.G. Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete in Rectangular Columns.J. Reinf. Plast. Compos. 2003, 22, 1149–1186
- 4- ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures; ACI 440.2R-08; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2008.
- 5- Mander, J.B.; Priestley, M.J.N.; Park, R. Seismic design of bridge piers; Research Report No. 84–2; University of Canterbury: Christchurch, New Zealand, 1984.
- 6- Ahmed, Al-R.; Hayder R. Combined Transverse Steel-External FRP Confinement Model for Rectangular Reinforced Concrete Columns. MDPI, Basel, Switzerland,2016
- 7- Manar Takla, Behavior of Concrete Columns subjected to ASTM-E119 fire, Journal of Al- Baath University, Vol.39, 2017.
- 8- Ihsan Tarsha, Manar Takla, Effect of Fire on Confined Concrete Columns under Axial Loading, IISTE: International Knowledge Sharing Platform, Vol.9, No.9, 2017.
- 9- Manar Takla, Effect of confined on load carrying capacity of concrete columns, Journal of Al- Baath University, Vol.40,No.4, pp.33-48, 2018.
- 10- ANSYS. Manuals, 2015.
- 11- M. W. Hadi, "Axial and flexural performance of square RC columns wrapped with CFRP under eccentric loading," Journal of Composites for Construction , vol. 16, no. 6, pp. 640-649, 2012.

12- الملحق (4) للكوود العربي السوري لتصميم المنشآت وتنفيذها بالخرسانة المسلحة ، دمشق 2016، نقابة المهندسين، الطبعة الأولى