



كلية الهندسة - جامعة بغداد

## Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences

مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية

جمعية كليات الهندسة  
اتحاد الجامعات العربية

### تصميم مقاطع الأعمدة الخرسانية المسلحة المُطَوِّقة بمركبات CFRP

بيلسان محمد<sup>1</sup>، سليمان العامودي<sup>2</sup> \*<sup>1</sup> جامعة القلمون الخاصة، ريف دمشق، سوريا، Email: baylasan\_m@hotmail.com<sup>2</sup> قسم الهندسة الإنشائية، جامعة البعث، حمص، سوريا، Email: dr.s.amoudi.1@gmail.com

\* الباحث الممثل: بيلسان محمد، الإيميل: baylasan\_m@hotmail.com

نشر في: 31 كانون الأول 2021

**الخلاصة** – يكافئ تحليل الأعمدة الخرسانية المسلحة المُطَوِّقة بالبوليميرات المسلحة بألياف الكربون CFRP تحليل الأعمدة الخرسانية المسلحة التقليدية مع الاختلاف الجوهري الذي يتمثل باستعمال نموذج (إجهاد-انفعال) الخاص بالخرسانة المُطَوِّقة بمركبات CFRP. يستعرض هذا البحث طريقتين لإيجاد مخططات الترابط (P-M) لمقاطع الأعمدة الخرسانية المسلحة المُطَوِّقة بمركبات CFRP، الأولى شاملة باستعمال التكاملات العددية، والثانية مُبسطة باستعمال منهجية مقترحة سابقاً لإنشاء مخطط ترابط بسيط يتم التركيز فيه على المنطقة التي يحكمها الانهيار بالانضغاط، وبالنتيجة تم التحقق من مخططات (P-M) النظرية من خلال المقارنة مع نتائج الاختبارات في العديد من الدراسات السابقة. وتمت دراسة تأثير المعاملات المختلفة على مخطط الترابط كمقاومة الخرسانة، ونصف قطر تدوير زوايا مقطع العمود، وعدد طبقات التطويق الذي وضع المنطقة التي يبرز فيها أثر التطويق في مخطط الترابط، ومن أجل تطبيقات التصميم العملي تم استعراض مثال عددي في الملحق يوضح تصميم عمود خرساني مُسلح مطوق بمركبات CFRP.

**الكلمات الرئيسية** – مخطط ترابط، الأعمدة الخرسانية المسلحة، تطويق، البوليميرات المسلحة بألياف الكربون.

#### 1. المقدمة

المراد حساب قدرة التحمل عندها ليصبح مساوياً للصفر، وعند تحقيق ذلك عن طريق تغيير قيمة متغير التكامل  $y$  (ارتفاع المحور المحايد عن محور الإحداثيات) تُخزن قيمة  $N_{tot}$ ،  $M_{tot}$  الموافقتين لانفعال ما  $\epsilon_c$ ، بعدها تتم زيادة الانفعال بخطوة معينة وتعاد الحلقة حتى الوصول إلى قيمة الانفعال عند الانهيار  $\epsilon_{cu}$ . وبإيجاد أكبر قوة يتحملها المقطع وبحساب العزم الموافق يتم تحديد نقطة من مخطط الترابط موافقة لقيمة اللامركزية المقترضة. وهكذا يتم إيجاد مخطط الترابط (P-M) كاملاً بعدد نقاط كفي يحدده المصمم من أجل عدة قيم للامركزية تتراوح من الصفر (حالة الانضغاط المحوري) حتى قيم كبيرة (تصبح أقرب لحالة الانعطاف الصافي).

أما الطريقة الثانية [26] التي تمت المقارنة معها فتعطي مخطط ترابط مبسط (P-M) على هيئة سلسلة من الخطوط المستقيمة التي تربط قيم الحمل المحورية والعزم الموافقة بدلاً من المنحنى المستمر وذلك لخمس نقاط مميزة في جميعها يحصل انهيار المقطع بوصول الليف البيتوني الأقصى في منطقة الضغط لقيمة الانفعال الأعظم  $\epsilon_{cu}$  الذي يقابل مايلي:

- في النقطة A: يكون الانفعال محوري منظم على الضغط للخرسانة المُطَوِّقة  $\epsilon_{cu}$ .

- في النقطة B: انفعال صفري في طبقة التسليح الطولي القريب من الوجه المشدود.

- في النقطة C: وصول الانفعال إلى قيمته عند الخضوع  $\epsilon_{sy}$  في طبقة حديد التسليح الطولي قرب الوجه المشدود.

- في النقطة D: وصول الانفعال لحدود الانهيار على الشد (0.005) حسب (ACI 318-14) [2] عند طبقة حديد التسليح الطولي قرب الوجه المشدود.

- النقطة E: النقطة الموافقة للانعطاف الصافي بدون قوة محورية.

وبشكل عام تمتاز الطريقة الأولى (طريقة التكاملات العددية) بالدقة والسرعة وسهولة التطبيق بمجرد برمجتها بينما تشابه الطريقة الثانية مع طرق الحل اليدوي بخطواتها، وباستعراض الطريقتين يتم تقديم منهجية متكاملة للمصمم يتم فيها إدخال السلوك الفعلي للخرسانة المطوقة بمركبات CFRP.

**إشكالية البحث:** إن علاقات تصميم الأعمدة الخرسانية المسلحة الموجودة في كودات التصميم الإنشائي مستنتجة من مستطيل الإجهادات المكافئ الذي

قدمت الأبحاث [17,18,29] التي تم فيها التحري عن سلوك (إجهاد-انفعال) الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP عدة نماذج (إجهاد-انفعال) موجهة نحو التصميم ولكن أغفلت معظم الأبحاث ذات الشأن طرح منهجية عملية لاستخدام هذه النماذج عند تصميم المقاطع الإنشائية إذ لا توجد علاقات يمكن استخدامها مباشرة لتصميم مقاطع الأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP، فمن المعلوم أن الكود الأمريكي (ACI 318 2014) [2] يسمح باستبدال توزع الإجهاد في منطقة الضغط للخرسانة غير المُطَوِّقة بمستطيل الإجهادات المكافئ ذي الإجهاد الوسطي  $\alpha_1 f'_c$  (حيث أن  $0.85 = \alpha_1$ ) والعمق  $h_c \beta_1$  (حيث أن  $0.65 \geq \beta_1 \geq 0.85$  وفق العلاقة  $(\beta_1 = 0.85 - 0.008(f'_c - 30))$ ). لكن قيم  $\alpha_1, \beta_1$  وعلاقات تصميم الأعمدة المتوفرة مبنية ومستنتجة من منحنى (إجهاد- انفعال) الخرسانة غير المُطَوِّقة ومن الملاحظات التجريبية على الأعمدة الخرسانية غير المُطَوِّقة. وهي غير محققة مع منحنى (إجهاد - انفعال) الخرسانة المُطَوِّقة بمركبات CFRP الذي يتغير وفقاً لضغط التطويق الحاصل من قميص التطويق على اختلاف عد طبقات CFRP وخصائصها الميكانيكية وشكل وأبعاد المقطع العرضي. لذا يستعرض هذا البحث طريقتين يمكن استخدامها في تصميم وتحقيق الأعمدة الخرسانية المطوقة بمركبات CFRP الأولى مستنبطة من تكاملات Gauss (طريقة التكاملات العددية) تمتاز بالدقة والشمولية يتم تطبيقها من خلال إنشاء كود برمجي بسيط باستعمال وحدات Macro في Excel للتعويض بمخطط (P-M) للأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP من خلال تنفيذ حلقات متتالية بالاستناد إلى منحنى (إجهاد-انفعال) الخاص بها، حيث يتم أخذ عدد من الشرائح التكاملية في منطقة الضغط وحساب الإحداثيات الديكارتية لها حسب تكاملات Gauss [13]، ومن ثم حساب الانفعال والإجهاد الموافق حسب علاقة  $(\sigma - \epsilon)$  الفعلية للخرسانة المطوقة، يليه حساب القوة الضاغطة والعزم لكل شريحة، ليتم بعدها حساب حساب محصلة القوى الضاغطة (التابعة للخرسانة ولحديد التسليح) والشاهد (التابعة لحديد التسليح)  $N_{tot}$ ، ومحصلة عزوم القوى الضاغطة والشاهد  $M_{tot}$ . بعدها يتم استهداف الفرق بين اللامركزية المحسوبة واللامركزية

$\epsilon_l$ : الانفعال الجانبي الحاصل،  $t$ : السماكة الإسمية لطبقة الألياف،  $n$ : عدد طبقات الألياف،  $D$ : قطر الأسطوانة المطوقة. وبالتالي للتنبؤ بالتطويق الأعظمي:

$$f_l = \frac{2E_f \epsilon_f r_{rup} n.t}{D} = \frac{2f_{rup} n.t}{D} = \frac{1}{2} p_f f_{rup} \quad (12)$$

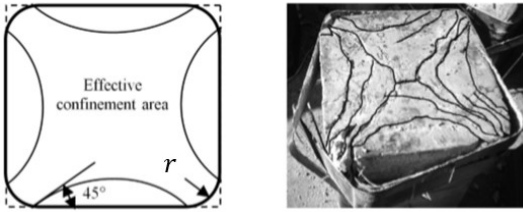
$f_{rup}$ : المقاومة القصوى للألياف على الشد،

$\epsilon_f$ : الانفعال الحدي (عند الانقطاع) للألياف على الشد.

$p_f$  تمثل النسبة الحجمية لقميص التطويق:

$$p_f = \frac{\pi D n t}{\pi D^2 / 4} = \frac{4 n t}{D} \quad (13)$$

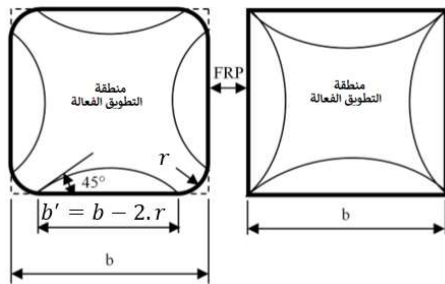
إذا كان المقطع المطوق بمركبات CFRP مربعاً فيُصبح عندئذ بتدوير الزوايا لتحسين فعالية التطويق بمركبات CFRP وتجنب انقطاع الألياف عند الزوايا الحادة نتيجة تركيز الإجهادات، ولكن غالباً ما يتم تقليص نصف قطر التدوير  $r$  إلى قيم صغيرة بسبب وجود حديد التسليح الداخلي. افترضت الدراسات المجراة على الخرسانة المطوقة بحديد الصلب [10,22] بأن تطويق الخرسانة يتم في المقطع المربع بواسطة التسليح العرضي من خلال الأفعال القوسية arching actions، حيث تكون الخرسانة المحصورة بين أربعة قطوع مكافئة من الدرجة الثانية مطوقة بشكل تام، وتتقاطع هذه القطوع المكافئة على الحواف بزواوية  $45^\circ$  كما هو مبين في الشكل 2، بينما يتضائل التطويق في بقية المقطع. ومع وجود اختلافات بين مركبات CFRP وحديد التسليح في توفير التطويق، إلا أن الافتراض السابق بخصوص الجزء المطوق بشكل فعال يبقى صالحاً عند التطويق بها.



شكل 2: فعل التطويق بمركبات FRP في المقاطع المربعة [29].

وبرغم انخفاض فعالية التطويق في المقاطع المربعة عن المقاطع الدائرية بينت النتائج التجريبية [25,20] حدوث الانهيار في العمود الخرساني المربع المطوق بسبب تمزق قميص CFRP أيضاً. في معادلة ضغط التطويق (11) يتم استبدال  $D$  بطول القطر في المقطع المربع، وبالنسبة للمقطع المربع ذي الزوايا المدورة، يمكن كتابة  $D$  على النحو الآتي:

$$D = \sqrt{2}b - 2.r(\sqrt{2} - 1) \quad (14)$$



شكل 3: اللب الخرساني المطوق في المقطع المربع

حساب ضغط التطويق الفعال في المقطع المربع:

$$f_{le} = k_e f_l \quad (15)$$

$$A_u = 4 \left( \frac{b^2}{6} \right) = 2 \frac{b^2}{3} \quad (16)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = \frac{(A_c - A_u)}{A_c} = 1 - \frac{A_u}{(A_g - A_s)} = 1 - \frac{A_u}{A_g(1 - \rho_g)} \quad (17)$$

يصبح غير محقق مع منحنى (إجهاد-انفعال) للخرسانة المطوقة بمركبات CFRP، وكثرت الأبحاث التي خرجت بعلاقات تنبؤاً بسلوك (إجهاد-انفعال) الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP لكنها لم تتناول انعكاس هذا السلوك الفعلي على تصميم المقاطع الإنشائية ولم تستعرض منهجية متكاملة لتصميم وتحقيق الأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP يسهل استخدامها من قبل المصممين.

**هدف البحث:** طرح منهجية متكاملة تساعد في تصميم الأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP من خلال إنشاء مخطط ترابط خاص بها (قوة محورية - عزم انعطاف) طالما لا توجد علاقات تصميم مباشرة في متناول المصممين.

## 2. الدراسات السابقة

### نماذج إجهاد-انفعال الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP:

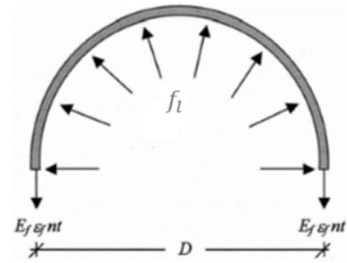
كثرت الأبحاث [29,18,17] التي تم فيها التحري عن منحنى (إجهاد-انفعال) للخرسانة المطوقة بمركبات CFRP والتي يمكن تصنيفها في فئتين:

1. نماذج موجهة نحو التصميم
2. نماذج موجهة نحو التحليل

وعادة ما تكون النماذج الموجهة نحو التصميم بشكل معادلات رياضية مستمدة مباشرة من نتائج الاختبار، وتتم فيها معالجة الخرسانة المطوقة بـ CFRP كمادة مركبة واحدة، مما يجعلها بسيطة الصيغة وسهلة التطبيق في التصميم. وقد اقترح الباحثون في هذا المنحى نماذجهم استناداً إلى برامج تجريبية مكثفة على الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP بشكل منتظم، والتي تم تطويرها فيما بعد لتشمل نماذج الخرسانة المطوقة في المقاطع المستطيلة حيث يكون ضغط التطويق غير منتظم. ويعتبر نموذج Lam and Teng [18,17] من أهم نماذج (إجهاد-انفعال) الموجهة نحو التصميم وأكثرها موثوقية ولاسيما مع الخرسانة بمقاومة عادية. يوضح الجدول (1) - في الملحق A- معادلات النموذج [18,17] ومعاملاته. إن فهم سلوك (إجهاد-انفعال) الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP يتطلب دراية تامة بمفهوم أساسي ألا وهو ضغط التطويق الحاصل من قميص التطويق على اختلاف عدد طبقات CFRP وخصائصها الميكانيكية وشكل وأبعاد المقطع العرضي.

### ضغط التطويق المبدول من قميص CFRP:

تخضع الخرسانة في الأعمدة الدائرية المطوقة بمركبات CFRP لضغط تطويق منتظم، وتتعلق قيمة ضغط التطويق المؤمن بكمية ومقاومة مركبات CFRP وقطر اللب الخرساني المطوق. يتم الوصول إلى القيمة القصوى لضغط التطويق المبدول عندما يصل الانفعال المحيطي في قميص CFRP إلى قيمة الانفعال الأقصى مما يسبب تمزق الألياف الذي يفود إلى انهيار هش للخرسانة.



شكل 1: مخطط الجسم الطليق للتطويق بمركبات FRP [11] (De Lorenzis,2003)

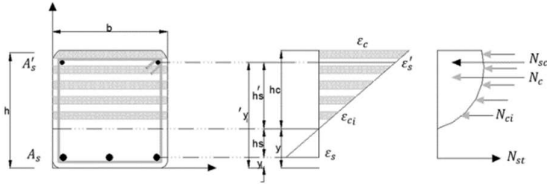
من معادلة توازن القوى المبينة في الشكل 1:

$$f_l = E_l \epsilon_l = E_l \epsilon_f \quad (9)$$

$$E_l = \frac{2E_f n.t}{D} \quad (10)$$

$$f_l = \frac{2E_f \epsilon_f n.t}{D} = \frac{2f_{frp} n.t}{D} \quad (11)$$

$E_f$ : معامل مرونة الألياف على الشد،  $\epsilon_f$ : الانفعال الحاصل للألياف نتيجة الشد،  $E_l$ : معامل مرونة طبقات الألياف على الشد بعد لفها على الأسطوانة،



شكل 4. توزيع الانفعال والإجهاد في المقطع العرضي.

6- إيجاد الانفعال والإجهاد والقوة الشادة أو الضاغطة والعزم الموافقة لكل مستوى تسليح، حيث تعطى للإجهادات الشادة إشارة سالبة. الجدول 3- في الملحق A-

7- حساب محصلة القوى الضاغطة (التابعة للخرسانة ولحديد التسليح) والشادة (التابعة لحديد التسليح)  $N_{tot}$ ، ومحصلة عزوم القوى الضاغطة والشادة حول محور الإحداثيات  $M_{tot}$ .

8- حساب اللامركزية عن محور الإحداثيات  $(e_s = M_{tot}/N_{tot})$ . ومن ثم اللامركزية الداخلية أي اللامركزية عن مركز المقطع  $(e_{o\text{inner}} = e_s - 0.5h)$ .

9 - إيجاد الفرق بين اللامركزية المحسوبة  $(e_{o\text{inner}})$  واللامركزية المراد حساب قدرة التحمل عندها  $e_o$ .

10- تعتبر قيمة  $y$  صحيحة إذا كانت القيمة  $(e_{o\text{inner}} - e_o)$  مساوية للصفر، وعند تحقيق ذلك عن طريق تغيير  $y$  تُخزّن قيمة  $M_{tot}$ ،  $N_{tot}$ ،  $e_{cu}$ ، بعدها تتم زيادة الانفعال بخطوة معينة وتعاد الحلقة حتى الوصول إلى قيمة  $e_{cu}$ .

11- وبايجاد أكبر قوة يتحملها المقطع وبحساب العزم الموافق يتم تحديد نقطة من مخطط الترابط موافقة لقيمة اللامركزية المقترضة  $e_o$ .

#### مقارنة مخططات الترابط مع نتائج الدراسات السابقة:

تعتبر الشواهد التجريبية على عينات اختبار (سواء أكانت أعمدة دائرية أو مستطيلة المقطع) ذات حجم حقيقي ضيقة النطاق، وغالباً ما تكون هذه الأعمدة معرضة لحمولة محورية ضاغطة بالإضافة إلى عزم انحناء تسببه حمولة جانبية [5-15-16-21-28] أو تطبيق الحمولة الضاغطة بشكل لامركزي [12] وقد تم جميع قاعدة البيانات تحت الشروط التالية:

- أعمدة خرسانية مسلحة بمقاطع مربعة ومستطيلة، مع اعتبار النسبة الجانبية لبعدى مقطع العمود  $(\frac{h}{b} \leq 2)$
- أعمدة خرسانية مسلحة مطوقة بمركبات FRP باتجاه عمودي على المحور الطولي للعمود.
- تم تجاهل نتائج التجارب على أنابيب FRP المملوءة بالخرسانة، والأعمدة المتضررة والمحملة قبل التقوية.
- لم يتم تضمين الأعمدة الخرسانية المسلحة التي تنهار على القص.

نظمت المعلومات في الجدول 4 - في الملحق A- على النحو الآتي: العمود الأول في الجدول يظهر المرجع الذي تعود إليه المجموعة التجريبية ورموز العينات، الشكل الهندسي وخصائص المواد موضحة في باقي الأعمدة، حيث تم عرض المعلومات وفق الترتيب الآتي:

البعد القصير (b) والبعد الطويل (h) والنسبة الجانبية (h/b)، H : ارتفاع العينة،  $f'_c$  : مقاومة الخرسانة غير المطوقة،  $f_y$  : إجهاد الخضوع لحديد التسليح الطولي،  $p_g$  : نسبة مساحة حديد التسليح الطولي إلى مساحة المقطع العرضي للعنصر،  $p_f$  : النسبة الحجمية لقيص التطويق،  $E_f$  : معامل مرونة على الشد لنسيج الألياف.

$E_{fu}$  : الانفعال الأقصى لنسيج الألياف،  $t_f$  : السماكة الاسمية لنسيج CFRP بالطبقة الواحدة.

آخر عمودين في الجدول 4 - في الملحق A- يعبران عن الحمولة المحورية القصوى  $(p_{max})$ ، والعزم الأعظمي  $(M_{max})$  على التوالي. تتفاوت المقاومة على الضغط للعينات الموجودة في الجدول بين (1.1-21.1) MPa، لذا سيتم اعتماد نموذج (إجهاد- انفعال) المقترح بالأصل من قبل (Lam and Teng) [17] -الموضح في الجدول I في الملحق A- نظراً لملاءمته وحسن تمثيل معادلاته للبيانات التجريبية من أجل الخرسانة عادية المقاومة، ولكن بعد استعمال العلاقات المقترحة في عمل تجريبي [4] أعدت للتحري عن نماذج (إجهاد- انفعال) الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP وقد

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = 1 - \frac{2b^2}{3A_g(1-\rho_g)} \quad (18)$$

إذا كان المقطع مربعاً مع زوايا مدورة يُستبدل البعد  $b$  بالبعد  $b'$  الموضح في الشكل 3 لتصبح العلاقة (18) كما يلي:

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = 1 - \frac{2(b-2r)^2}{3A_g(1-\rho_g)} \quad (19)$$

وعندما يصبح المقطع مستطيلاً تساهم زيادة النسبة  $\frac{h}{b}$  بين بعدي المقطع في تخفيض ضغط التطويق المبذول لتصبح جدوى التطويق أقل [18]:

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = 1 - \frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2}{3A_g(1-\rho_g)} \quad (20)$$

$A_c$  : مساحة المقطع العرضي للخرسانة في العمود

$A_u$  : مساحة الجزء غير المطوق في المقطع العرضي

$A_g$  : المساحة الكلية للمقطع العرضي

$r$  : نصف قطر تدوير الزوايا للمقاطع غير دائرية

$p_g$  : نسبة مساحة حديد التسليح الطولي إلى مساحة المقطع العرضي

$k_e$  : معامل فعالية التطويق

### 3. منهجية البحث:

#### إنشاء مخطط ترابط (P-M) للأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP

##### A. إيجاد مخطط ترابط باستعمال التكاملات العددية

عند إنشاء مخطط ترابط للأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP تؤخذ الافتراضات الآتية بعين الاعتبار عند التحليل:

- (1) المقاطع المستوية تبقى مستوية.
- (2) مقاومة الخرسانة في الشد مهملة.
- (3) الربط التام بين حديد التسليح والخرسانة، و مركبات FRP والخرسانة. تتلخص طريقة إنشاء كود برمجي بسيط في Excel لإيجاد مخطط الترابط بالخطوات التالية:

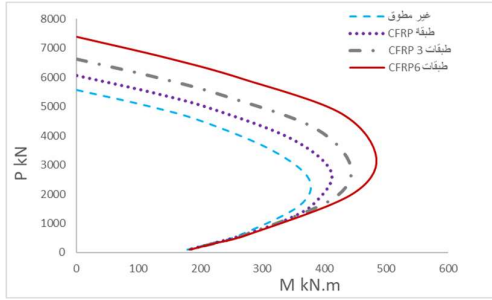
1- إدخال المعطيات المتمثلة بالأبعاد الهندسية للمقطع العرضي  $[a,b,h,d,r]$  التغطية البيتونية (a)، البعد القصير (b)، والبعد الطويل (h)، العمق الفعال (d)، نصف قطر تدوير الزوايا للمقاطع غير دائرية (r)، وخصائص المواد وتشمل خصائص الخرسانة :  $f'_{co}$ ،  $E_c$ ، وخصائص حديد التسليح:  $E_s$ ،  $f_y$ ، ومساحة التسليح في كل طبقة وبعدها الشاقولي عن محور الإحداثيات، وخصائص قميص التطويق CFRP:  $n$ ،  $t_f$ ،  $E_f$ ،  $E_{f,rup}$ .

2- حساب مساحة المقطع  $A_g$  ونسبة حديد التسليح  $\rho_g$  والمساحة الصافية للمقطع  $A_c$ ، ومعاملات نموذج (إجهاد - انفعال) الخرسانة المطوقة بمركبات CFRP: متمثلة بضغط التطويق  $f_l$ ، ومعاملات الفعالية  $k_a$ ،  $k_b$ ، الإجهاد الأقصى والانفعال الأقصى الموافق  $f_{cu}$ ،  $e_{cu}$ ، وميل الجزء الصاعد  $E_2$ ، والانفعال عند بداية المرحلة الانتقالية  $E_t$ .

3- إدخال قيمة اللامركزية المراد حساب قدرة التحمل عندها  $e_o$ .

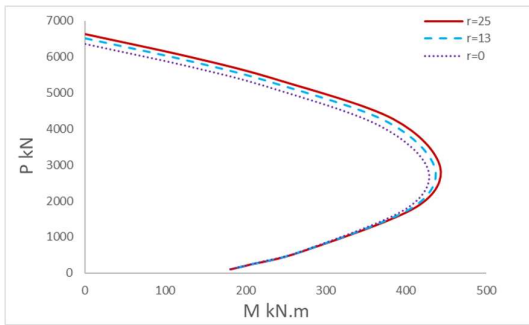
4- افتراض قيمة للانفعال  $e_c$  في أقصى ليف خرساني مضغوط، وارتفاع المحور المحايد عن محور الإحداثيات  $y$ ، والارتفاع الفعلي لمنطقة الضغط  $h_c$ .

5- أخذ عدد من الشرائح التكاملية في منطقة الضغط، كما في الشكل 4، وحساب الإحداثيات الديكارتية لها حسب تكاملات Gauss [13]، ومن ثم حساب الانفعال والإجهاد الموافق حسب علاقة  $(\sigma - \epsilon)$ ، يليه حساب القوة الضاغطة والعزم لكل شريحة، ليتم بعدها حساب القوة الكلية والعزم الكلي، مُفصل في الجدول 2- في الملحق A-



شكل 7: تأثير عدد طبقات التطويق عند إيجاد مخطط الترابط

(c) تأثير نصف قطر التدوير:



شكل 8: تأثير نصف قطر التدوير عند إيجاد مخطط الترابط

B. إيجاد مخطط ترابط تصميمي مبسط [26]

في المنهجية المقترحة [26] يتم إنشاء مخطط ترابط مبسط (P-M) على هيئة سلسلة من الخطوط المستقيمة التي تربط قيم الحمل المحورية والعزم الموافقة بدلاً من المنحني المستمر وذلك لخمس نقاط مميزة كالتالي [19]:  
- النقطة A: انفعال محوري منتظم على الضغط للخرسانة المطوقة  $\epsilon_{cu}$  أو  $(\epsilon_u)$ .

- النقطة B: توزع الانفعال الموافق لانفعال أعظم على الضغط  $\epsilon_{cu}$  أو  $(\epsilon_u)$  وانفعال صفري في طبقة التسليح الطولي القريب من الوجه المشدود.  
- النقطة C: توزع الانفعال وفقاً لانتهيار توازني مع انفعال أعظم على الضغط  $\epsilon_{cu}$  أو  $(\epsilon_u)$  والانفعال عند الخضوع على الشد  $\epsilon_{sy}$  في طبقة حديد التسليح الطولي قرب الوجه المشدود.

- النقطة D: توزع الانفعال وفقاً لحدود الانتهيار على الشد مع انفعال أعظم على الضغط  $\epsilon_{cu}$  أو  $(\epsilon_u)$ ، والانفعال على الشد (0.005) (ACI 318-14) [2] عند طبقة حديد التسليح الطولي قرب الوجه المشدود.

- النقطة E: النقطة الموافقة للانعطاف الصافي بدون قوة محورية.  
- تمثل النقطة A في مخطط الترابط حالة الضغط الصافي، أما بالنسبة للنقاط B, C, D فيتم حساب موقع المحور المحايد  $h_c$  مباشرة من تشابه المثلثات في مخطط توزع الانفعال الموافق لكل حالة، موضح في الشكل (9). يتم الحصول على موقع المحور المحايد في النقطة E التي تمثل حالة الانعطاف الصافي (قوة محورية صفرية) باستعمال نظريات العتبات الخرسانية المسلحة التقليدية، مفترضين عدم إسهام التطويق بـ CFRP، حيث لا يتغير الإجراء اللازم لحساب  $M_{max}$  [27].

طالما أن تعزيز قدرة التحمل معتبر إذا أثر التطويق بمركبات CFRP على خصائص الخرسانة، سيتم التركيز على المنطقة التي يحكمها الضغط من المخطط A, B, C.

يمكن إيجاد القوة المحورية الاسمية  $P_n$  الموافقة للنقطة A من المعادلة (25) حيث  $(0 = M_{nA})$ .

$$P_{n(A)} = [0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (25)$$

اقترح في علاقات أكثر ملاءمة للتنبؤ بالمقاومة القصوى والانفعال الأقصى المقابل للخرسانة المحلية المطوقة بمركبات CFRP، العلاقات (21)، (22).

$$f_{co} = \begin{cases} 1 + 2.2k_a \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right) & f_{co} \leq 40 \text{ MPa} \\ 1 + 2.2 \left(\frac{6.7 f_l^{-0.17}}{3.5}\right) k_a \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right) & f_{co} > 40 \text{ MPa} \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{co}} = 1.75 + 2.9k_b \cdot \rho_k^{0.7} \rho_e^{1.45} \quad (22)$$

$$\rho_k = \frac{2E_f n.t.}{(f'_{co}/\epsilon_{co}) \cdot D} \quad (23)$$

$$\rho_e = \frac{\epsilon_{f.rup}}{\epsilon_{co}} \quad (24)$$

معاملات  $k_a, k_b$  معاملات الفعالية تعبر عنها العلاقات (7,8) الموضحة في الجدول 1 - في الملحق A- من أجل المقطع المستطيل، ومن أجل المقطع الدائري تؤخذ مساوية لـ (1). تم ذكر نصف قطر تدوير الزوايا للعينات المقواة في الجدول 4- في الملحق A- فقد افترض نصف قطر أصغري لتدوير الزوايا حوالي (13 mm) كما هو معطى في (ACI440.2R-02) [1] في حال لم يتم التنويه عنه في المنشورات الأصلية.

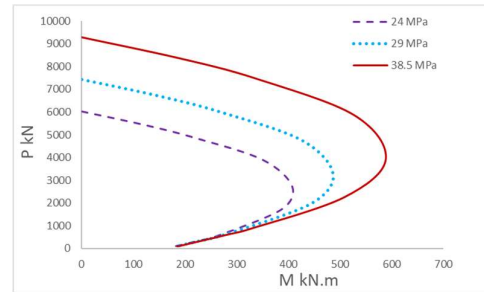
تم إيجاد مخططات الترابط للأعمدة المختبرة في الدراسات المرجعية السابقة [12-5-15-16-28-21] باستعمال طريقة التكاملات العددية، من أجل المقارنة مع نتائج الاختبار، الشكل 5.

كانت قيمة الخطأ مقبولة عند المقارنة مع معظم النتائج التجريبية كما يبين الجدول 5- في الملحق A- ماعدا العينة (BO3-b) (Bousias) [5] حيث انهيار العمود التجريبي عند قيمة للعزم أقل بحدود 18% وقد يعزى ذلك إلى ظروف التجربة أو انحراف بسيط في خصائص المواد أو مواصفات المقطع أو نصف قطر التدوير الفعلي التي أعطاهها المرجع.

تأثير المعاملات المختلفة على مخطط الترابط في الأعمدة الخرسانية المسلحة المطوقة بمركبات CFRP:

هناك العديد من المعاملات كمواصفات المقطع أو مواصفات مواد الإنشاء التي يمكن دراسة تأثيرها على مخطط الترابط لعمود خرساني مسلح مطوق بمركبات CFRP سيتم التركيز على بعضها كالمقاومة على الضغط  $f'_c$ ، عدد طبقات CFRP (n)، نصف قطر التدوير (r) من خلال طرح مثال لعمود مطوق مواصفاته موضحة في الجدول 6- في الملحق A-

(a) تأثير مقاومة الخرسانة وخصائصها:



شكل 6: تأثير مقاومة الخرسانة عند إيجاد مخطط الترابط

يبدو في الشكل 6 أثر مقاومة الخرسانة جلياً في المنطقة التي يحكمها الضغط، بينما يتضاءل تأثيرها تحت خط التوازن.

(b) تأثير عدد طبقات التطويق بمركبات CFRP:

تم إيجاد مخطط الترابط للخرسانة غير المطوقة باستعمال نموذج (إجهاد-انفعال) الذي اقترحه Carreira and Chu [8] والمستنتج بالأصل من قبل Popovics [23] وفق الخطوات نفسها المتبعة في طريقة التكاملات العددية.

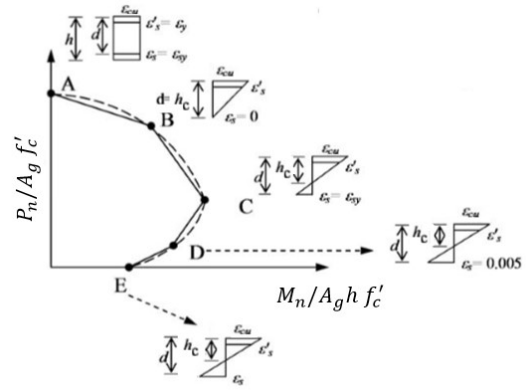
المحوري  $\epsilon_c$  عند أي نقطة من منطقة الضغط (من تشابه المثلثات) بدلالة متغير التكامل  $y$  الشكل 10.

يتم الحصول على المعادلات (28)، (29) من أجل الحملات المحورية والعزوم عند النقاط B,C على التوالي.

$$P_{n(B,C)} = \int_0^{y_t} \left[ E_c \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right) - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_c'} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right)^2 \right] b dy + \int_{y_t}^{h_c} \left[ f_c' + E_2 \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right) \right] b dy + \sum A_{si} f_{si} \quad (28)$$

$$M_{n(B,C)} = \int_0^{y_t} \left[ E_c \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right) - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_c'} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right)^2 \right] (b) \left( \frac{h}{2} - h_c + y \right) dy + \left[ f_c' + E_2 \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} y \right) \right] b \left( \frac{h}{2} - h_c + y \right) dy + \sum A_{si} f_{si} d_{si} \quad (29)$$

تمثل المسافة  $h_c$  المسافة بين الليف الأقصى المضغوط والمحور المحايد وتغطي بالمعادلة (30).



شكل 9: مخطط الترابط المبسط للأعمدة الخرسانية المسلحة [26].

يمكن حساب القوة المحورية الاسمية  $P_n$  وعزم الانعطاف الاسمي  $M_n$  عند النقاط B,C,D بتكامل الاجهادات عبر المقطع العرضي، وتغطي بالمعادلات (26a)، (26b) لحالة المقطع العرضي الدائري، وبالمعادلات (27a) (27b) لحالة المقطع غير الدائري.

$$P_{n(B,C,D)} = \int_0^{h_c} \left( 2 \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( y - \left( \frac{D}{2} - d' \right) \right)^2} \right) f_c(y) dy + \sum A_{si} f_{si} \quad (26 a)$$

$$M_{n(B,C,D)} = \int_0^{h_c} \left( 2 \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( y - \left( \frac{D}{2} - d' \right) \right)^2} \right) \left( \frac{D}{2} - h_c + y \right) f_c(y) dy + \sum A_{si} f_{si} d_{si} \quad (26 b)$$

$$P_{n(B,C,D)} = \int_0^{h_c} (b) f_c(y) dy + \sum A_{si} f_{si} \quad (27 a)$$

$$M_{n(B,C,D)} = \int_0^{h_c} (b) \left( \frac{h}{2} - h_c + y \right) f_c(y) dy + \sum A_{si} f_{si} d_{si} \quad (27 b)$$

يمثل الرمز  $h_c$  في التعبيرات اعلاه المسافة من المحور المحايد حتى الليف الأقصى المضغوط في المقطع العرضي.

الاجهاد في المقطع العرضي والى الاجهاد على التوالي لكل طبقة من حديد التسليح الطولي.

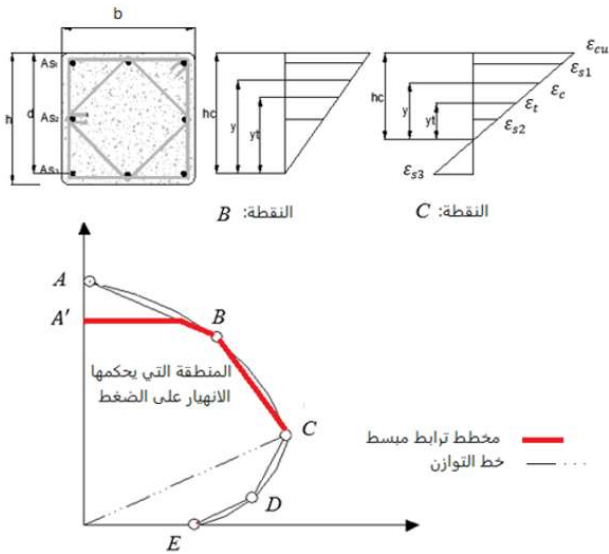
المسافة بين موقع حديد التسليح الطولي والمركز الهندسي للمقطع العرضي.

$y$ : متغير التكامل ضمن منطقة الضغط موضح في الشكل 10.  $f_c$  الاجهاد في الخرسانة وفقاً لنموذج (اجهاد-انفعال) الخرسانة المطوّقة بمركبات CFRP.

يمكن تمثيل مخططات ترابط مستقلة عن شكل المقطع العرضي وقياسه وعن المقاومة على الضغط (تمثيل لا بعدي) وذلك بتقسيم الحملات الاسمية  $P_n$  على  $(A_g h f_c')$  وتقسيم العزم الاسمي  $M_n$  على  $(A_g h f_c')$ .

في الطريقة المقترحة لإيجاد مخطط ترابط مبسط [26] يؤخذ تعزيز المقاومة في الحساب عند تطبيق حمولة محورية وعزم انعطاف على نقطة تقع إحداثياتها فوق الخط الواصل بين نقطة المبدأ ونقطة التوازن بمخطط الترابط للعناصر الإنشائية غير المطوّقة (المنطقة التي يحكمها الضغط). يفيد هذا التحديد كما وسبق الذكر بأن تأثير التقوية معتبر في العناصر التي يكون نمط الانهيار الحاكم فيها هو الانهيار على الضغط. للتبسيط ممكن إنقاص الجزء الموافق للانهيار المحكوم بالضغط من مخطط الترابط للخرسانة المطوّقة وغير المطوّقة إلى منحنى ثنائي الخطية من خلال النقاط المعرفة مسبقاً A,B,C.

تستخدم المعادلة (25) لحساب  $P_n$  الموافقة للنقطة A (حيث عزم الانعطاف  $M_n$  مساو للصفر) وذلك مهما كان شكل المقطع العرضي للعنصر الإنشائي. وعند حساب إحداثيات النقاط B,C سيتم التركيز على الأعمدة الخرسانية المسلحة ذات المقطع العرضي المستطيل حيث التكاملات أقل تعقيداً، وذلك باستبدال العلاقات الملائمة لنموذج (اجهاد-انفعال) الخرسانة المطوّقة بمركبات CFRP في المعادلات (27a)، (27b) حيث يتم التعبير عن الانفعال



شكل 10: توزع الانفعال الموافق للنقاط B,C في مخطط الترابط المبسط.

يمثل المتغير  $y_t$  الإحداثيات الشاقولية ضمن منطقة الضغط المقاسة من المحور المحايد والموافقة للانفعال  $\epsilon_t$  (بداية الجزء الخطي الصاعد) (العلاقة (31)، الشكل 10).

$$h_c = \begin{cases} d & \text{النقطة B} \\ d \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}} & \text{النقطة C} \end{cases} \quad (30)$$

$$y_t = h_c \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cu}} \quad (31)$$

بعد مكاملة وإعادة ترتيب الحدود يمكن إنقاص المعادلات (28)، (29) إلى التعبيرات (32)، (33) على التوالي حيث تغطي المعاملات A,B,C,D,E,F,G,H,I بالمعادلات (34).

$$P_{n(B,C)} = [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D] + \sum A_{si} f_{si} \quad (32)$$

$$M_{n(B,C)} = [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I] + \sum A_{si} f_{si} d_{si} \quad (33)$$

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f_c'} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} \right)^2 \quad (34a)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{h_c} \right) \quad (34b)$$

$$C = -b f_c' \quad (34c)$$

$$D = b h_c f_c' + \frac{b h_c E_2}{2} (\epsilon_{cu}) \quad (34d)$$

تم تطبيق مثال عملي- في الملحق A - لتصميم عمود خرساني مُسَلَّح مُطَوَّق بمركبات CFRP (وذلك باتباع اشتراطات ACI) وإنشاء مخطط ترابط مُبسَّط يشمل منطقة تأثير التطويق ومقارنته مع مخطط الترابط الناتج باستعمال التكاملات العددية.

#### 4. الاستنتاجات والتوصيات

1. تم استعراض طريقتين لإنشاء مخطط ترابط (P-M) للأعمدة الخرسانية المسلحة المُطَوَّقَة بمركبات CFRP، طريقة عددية تمتاز بالسرعة والدقة والشمولية، وأخرى مُبسَّطة يمكن اتباعها يدوياً.
2. تم التحقق الجزئي من مخططات P-M النظرية مع التجريبية، ولابد من تحقق إضافي بالمقارنة مع نتائج المزيد من الاختبارات التجريبية على الأعمدة ذات المقطع الهندسي والخصائص المشابهة لتلك الموجودة في الواقع العملي.
3. يتضاءل أثر التطويق مع اللامركزية الكبيرة ولكنه لا ينعقد، لذا لابد من التركيز على المنطقة A,B,C,D عند إنشاء مخطط ترابط تصميمي مُبسَّط بدلاً من التركيز فقط على المنطقة التي يحكمها الانهيار على الضغط A,B,C.

#### الملحق A:

- I. مثال عملي: لدينا عمود (450×450 mm)، المطلوب تقويته بمركبات CFRP ورسم مخطط الترابط التصميمي له حسب توصيات ACI ليتحمل قوة محورية ضاغطة تصل حتى  $P_u = 3100 \text{ kN}$ ، مع الأخذ في الحسبان إمكانية حصول لامركزية طارئة، مواصفات العمود المُطَوَّق وخصائص المواد في المثال العددي

جدول 7: مواصفات العمود المُطَوَّق وخصائص المواد في المثال العددي

B	450 mm	$f_y$	400 MPa
H	450 mm	$f'_c$	25 MPa
a	37 mm	$E_c$	28000 MPa
d	413 mm	$\psi_f$	0.95
r	20 mm	$E_f$	230000 MPa
$\rho_g$	0.01	$\varepsilon_f$	0.018
التسليح الطولي	8T18	$t_f$	0.131mm

- I. طريقة إنشاء مخطط ترابط مبسط للعمود مع اقتراح تقويته بـ 6 طبقات من CFRP

#### • إيجاد النقطة A'

$$P_{n(A')} = \phi 0.8 [0.85 f'_{cu} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

$$P_{n(A')} = \phi 0.8 [0.85 \times 30.419 \times (202500 - 2035.7) + 400 \times 2035.7] = \phi 4797.8 \text{ kN}$$

$$f'_{cu} = f'_{co} + 2.3 K_a f_l = 25 + 2.3 \times 0.44 \times 5.34 = 30.419 \text{ MPa}$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^2 = 0.44 \times (1)^2 = 0.425$$

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

$$\frac{A_e}{A_c} = 0.44$$

$$f_l = \frac{\psi_f 2 n t_f E_f E_{fu}}{\sqrt{b^2 + h^2}}$$

$$f_l = \frac{0.95 \times 2 \times 6 \times 0.131 \times 230000 \times 0.55 \times 0.018}{\sqrt{2 \times (450)^2}} = 5.34 \text{ MPa}$$

#### • إيجاد النقطة B:

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16 f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{h_c} \right)^2 \quad (34e)$$

$$F = b \left( h_c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12 f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{h_c} \right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{3} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{h_c} \right) \quad (34f)$$

$$G = - \left( \frac{b}{2} f'_c + b \left( h_c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{h_c} \right) \right) \quad (34g)$$

$$H = b f'_c \left( h_c - \frac{h}{2} \right) \quad (34h)$$

$$I = \frac{b h_c^2}{2} f'_c - b h_c f'_c \left( h_c - \frac{h}{2} \right) + \frac{b h_c^2 E_2}{3} (\varepsilon_{cu}) - \frac{b h_c E_2}{2} \left( h_c - \frac{h}{2} \right) (\varepsilon_{cu}) \quad (34i)$$

تحتسب قيم الإجهاد في حديد التسليح  $f_{si}$  من تشابه المثلثات وفقاً لتوزيع الانفعال الموافق للنقاط B,C، وتعتمد على موقع المحور المحايد  $h_c$ ، تكون إشارة  $f_{si}$  موجبة للضغط وسالبة للشد، تبعاً لفلسفة التصميم وفق ACI يتم إنقاص قدرة التحمل المحورية الإسمية في حالة التحميل الصافي (النقطة A من مخطط الترابط) للأعمدة الخرسانية المسلحة بأساور (كتسليح عرضي) إلى 80% لأخذ اللامركزية الطارئة في الحسبان [3] هذه النقطة أُشير إليها بالرمز A' في الشكل 10. يجب أن تؤخذ عوامل إنقاص المقاومة  $\phi$  للأعمدة الخرسانية المسلحة كما هو موصى ACI 318-14 [2]، ففي الجزء الذي يحكمه الضغط من مخطط الترابط فإن  $\phi = 0.65$ :

$$\phi P_n(A') = \phi 0.8 [0.85 f'_{cu} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (35)$$

#### ملاحظات واشتراطات عند التصميم

من المعروف أن منحنى (إجهاد- انفعال) الخرسانة المُطَوَّقَة المعتمدة مستنتج من المنحنيات التجريبية التي تبدي جزءاً صاعداً بعد تحفيز الألياف، فقد اقترح الباحثون [17,18] أصغر قيمة مسموحة للنسبة  $(f_l/f'_{co})$  بحدود 0.08 لضمان الجزء الصاعد، وذلك استناداً إلى الملاحظات التجريبية على عينات صغيرة من الخرسانة العادية مع نسب تطويق مختلفة من CFRP. كما بين الباحثون [14] أن هناك شرط آخر لضمان الشكل الصاعد في المنحني  $\lambda = \frac{f_l}{f'_{co}} > \lambda$

$E_f$  MPa:  $\sqrt{\frac{250}{E_f}}$ ، من أجل تطبيقات التصميم العملي يؤخذ

الانفعال الفعال  $\varepsilon_{fe}$  كنتاج جداء معامل الفعالية  $K_e$  بالانفعال الحدي للألياف على الشد،  $\varepsilon_{fe} = K_e \varepsilon_{f,rupt}$ ، يحسب معامل الفعالية نتيجة للفرق بين الانفعال الفعلي عند الانقطاع الملاحظ في عينات الخرسانة المُطَوَّقَة بـ CFRP الخاضعة للضغط المحوري والانفعال عند الانقطاع لمادة CFRP المحدد من اختبار الشد، ممكن أن يؤخذ المعامل  $K_e$  مساوياً إلى القيمة الوسطية 0.55 القريبة من القيم التي تم حسابها من قبل الكثيرين من الباحثين [6,7,17].

تُحدَّد قيمة الانفعال الفعال لنسيج الألياف عند الانهيار  $\varepsilon_{fe}$  في العناصر الخاضعة لضغط محوري وعزم انعطاف معاً بالقيمة الدنيا بين (0.004،  $K_e \varepsilon_{fu}$ ) وذلك لضمان السلامة على القص للخرسانة المُطَوَّقَة حسب توصيات ACI 440 [1] وبناءً على العمل التجريبي الذي قام (Priestley, M.J, 1996) [24].

استناداً إلى توصيات التقرير التقني لجمعية الخرسانة (Concrete Society Technical Report 55,2004) [9] تؤخذ قيمة الانفعال المحوري الحدي  $\varepsilon_{cu}$  للخرسانة المُطَوَّقَة بمركبات CFRP بحيث لا تتجاوز 0.01، وذلك في حالة العناصر الخاضعة لضغط صافي لمنع التشقق المفرط والذي ينتج عنه نقص في سلامة الخرسانة. عندما يتم إنقاص  $\varepsilon_{cu}$  إلى القيمة 0.01 فإن القيمة العظمى الموافقة ( $f'_{cu}$ ) يعاد حسابها من منحنى (الإجهاد- الانفعال).

$$f_{s3} = \epsilon_{s3} E_s = 0 \times 200000 \text{ MPa} = 0 \text{ MPa}$$

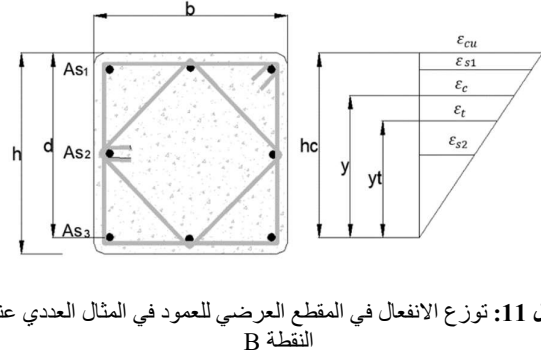
حساب عزم الانعطاف التصميمي:

$$M_{n(B.C)} = \phi [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I]$$

$$+ \sum A_{si} f_{si} d_{si}$$

$$M_{n(B)} = \phi [(-6.956 \times 10^{-5} (201)^4 + 54.73 \cdot 10^{-3} (201)^3 - 16.143 (201)^2 + 2115(201) + (1.04 \times 10^5) + 763.4 (400 \cdot 10^{-3})(188) + 508.9 (341 \cdot 10^{-3})(0) - 763 (0)(188)] = \phi 264.99 \text{ kN m}$$

المسافة بين مركز التسليح في كل طبقة إلى المركز الهندسي للمقطع العرضي:  $d_{si}$



شكل 11: توزيع الانفعال في المقطع العرضي للعمود في المثال العددي عند النقطة B

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2 (\epsilon_{cu})^2}{16f'_c} = \frac{-450(28000 - 584.5)^2 (3.74 \times 10^{-3})^2}{16 \times 25} = -6.956 \times 10^{-5} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

$$F = b \left( h_c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2 (\epsilon_{cu})^2}{12f'_c} + \frac{b(E_c - E_2) (\epsilon_{ccu})}{3} = 450 (413 - 225) \frac{(28000 - 584.5)^2 (3.74 \times 10^{-3})^2}{12 \times 25} + \frac{450(28000 - 584.5)}{3} \times \left( \frac{3.74 \times 10^{-3}}{413} \right)^2 = 54.73 \text{ MPa}$$

$$G = - \left( \frac{b}{2} f'_c + b \left( h_c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2) (\epsilon_{cu})}{2} \right) = - \left[ 25 \times 225 + 450(413 - 225) \times \left( \frac{28000 - 584.5}{2} \right) \left( \frac{3.74 \times 10^{-3}}{413} \right) \right] = -16.143 \text{ kN/mm}$$

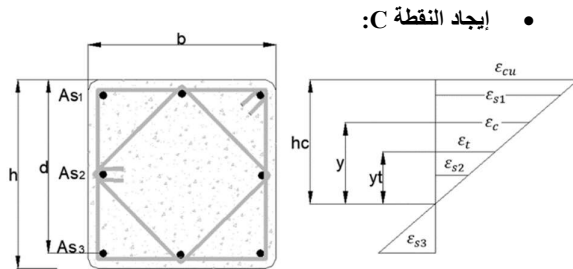
$$H = b f'_c \left( c - \frac{h}{2} \right) = 25 \times 450(413 - 225) = 2115 \text{ kN}$$

$$I = \frac{bh_c^2}{2} f'_c - bh_c f'_c \left( h_c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bh_c^2 E_2 (\epsilon_{cu})}{3} - \frac{bh_c E_2}{2} \left( h_c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{cu}) = 25 \cdot 10^{-3} \times 450 \frac{(413)^2}{2} - 25 \cdot 10^{-3} (413 - 225)(413)(450) + 584.5 \cdot 10^{-3} \times 450 \times \frac{(413)^2}{3} (3.74 \times 10^{-3}) - 584.5 \cdot 10^{-3} \times 450 \times \frac{413}{2} (413 - 225)(3.74 \times 10^{-3}) = 104000 \text{ kN mm}$$

المسافة من كل طبقة من حديد التسليح حتى المركز الهندسي للمقطع العرضي مبينة أدناه:

$$d_{s2} = 0 \text{ mm}$$

$$d_{s1} = d_{s3} = 188 \text{ mm}$$



شكل 12: توزيع الانفعال في المقطع العرضي للعمود

تصميم قدرة التحمل المحورية:

$$P_{n(B)} = \phi [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D] + \sum A_{si} f_{si}$$

$$P_{n(B)} = \phi [(-9.274 \times 10^{-5} (201)^3 + 55.946 \cdot 10^{-3} (201)^2 - 11.250(201) + 4849.72) + 763 \times 400 \cdot 10^{-3} + 508.9 \times 341 \cdot 10^{-3} + 763 \times 0]$$

$$P_{n(B)} = \phi 4573.8 \text{ kN}$$

حيث:

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2 (\epsilon_{cu})^2}{12f'_c} = \frac{-450(28000 - 584.5)^2 (3.74 \times 10^{-3})^2}{12 \times 25} = -9.274 \times 10^{-5} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^3}$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2) (\epsilon_{cu})}{2} = \frac{450(28000 - 584.5)}{2} \left( \frac{3.74 \times 10^{-3}}{413} \right) = 55.94692 \text{ MPa}$$

$$C = -b f'_c = -450 \times 25 = -11.250 \text{ kN/mm}$$

$$D = bh_c f'_c + \frac{bh_c E_2}{2} (\epsilon_{cu}) = 450 \times 413 \times 25 + \frac{450 \times 413 \times 584.5}{2} (3.74 \times 10^{-3}) = 4849.720 \text{ kN}$$

ولحساب هذه الحدود لابد من إيجاد معاملات نموذج (الإجهاد-الانفعال):

$$y_t = h_c \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cu}} = 413 \times \frac{1.82 \times 10^{-3}}{3.74 \times 10^{-3}} = 201 \text{ mm}$$

$$h_c = 413 \text{ mm}$$

$$\epsilon_t = \frac{2f'_{co}}{E_c - E_2} = \frac{2 \times 25}{(28000 - 584.5)} = 1.82 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$$

$$E_2 = \frac{f'_{cu} - f'_c}{\epsilon_{cu}} = \frac{(27.18 - 25)}{3.74 \times 10^{-3}} = 584.5 \text{ MPa}$$

$$f'_{cu} = f_{co} + 2.3k_a f_l \quad f_{co} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$f'_{cu} = 25 \text{ MPa} + 2.3(0.44)(2.15) = 27.18 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{ccu} = 0.0017(1.75 + 2.9k_b \cdot \rho_k^{0.7} \rho_e^{1.45})$$

$$\rho_k = \frac{2E_f n_t}{2E_f n_t + \sqrt{b^2 + h^2}} = \frac{2 \times 230000 \times 6 \times 0.131}{(0.0017) \cdot \sqrt{2 \times (450)^2}} = 0.0386$$

$$\rho_e = \frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon_{co}} = \frac{0.004}{0.0017} = 2.353$$

$$f_l = \frac{\psi_f 2n_t f_e f_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}}$$

$$f_l = \frac{0.95 \times 2 \times 6 \times 0.131 \times 230000 \times 0.004}{\sqrt{2 \times (450)^2}} = 2.15 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{fe} = \min [0.004(K_\epsilon \epsilon_{frup} = 0.55 \times 0.018)]$$

التأكد من نسبة التطويق الدنيا لضمان الجزء الصاعد:

$$\frac{f_l}{f'_c} = \frac{2.15}{25} = 0.086 \geq 0.08 \text{ ok}$$

يتم تحديد الانفعال في كل طبقة من طبقات حديد التسليح من تشابه مثلثات توزيع الانفعال. والإجهادات الموافقة يتم حسابها كالاتي:

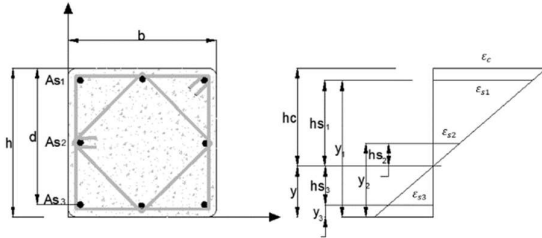
$$f_{s1} = \epsilon_{s1} E_s = 0.00341 \times 200000 = 682 \text{ MPa} \leq 400$$

$$f_{s2} = \epsilon_{s2} E_s = 0.001705 \times 200000 = 341 \text{ MPa}$$

$$M_{n(D)}: \emptyset 379.23 \text{ kN.m}$$

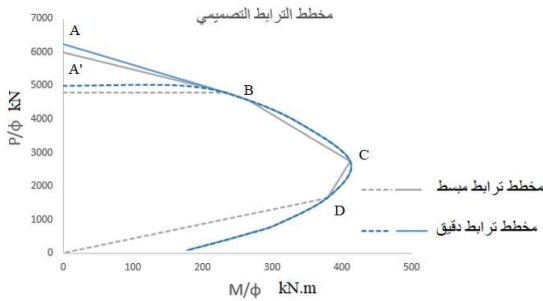
## II. طريقة التكمالات العددية:

بإدخال مواصفات العمود وقميص التطويق ومنحني (إجهاد-انفعال) الفعلي يتم إنشاء مخطط الترابط التصميمي الدقيق للعمود، حيث يتم تحديد نقطة الضغط المحوري الصافي من أجل قيمة  $[\epsilon_{fe} = 0.55 \times 0.018]$ ، وفي باقي النقاط يُؤخذ  $[\epsilon_{fe} = 0.004]$ . كما يوضح الشكل 14 يمثل  $y$  ارتفاع المحور المحايد عن محور الإحداثيات، والارتفاع الفعلي لمنطقة الضغط  $h_c$ .



شكل 14: توزيع الانفعال في المقطع العرضي للعمود

يوضح الشكل 15 مقارنة بين مخطط الترابط التصميمي الدقيق الذي حصلنا عليه بطريقة التكمالات العددية، وبين الطريقة اليدوية لإنشاء مخطط ترابط تصميمي مبسط.



شكل 15: مخطط الترابط الدقيق والمبسط (A,B,C) للعمود المقوى.

في هذا المثال العددي المراد التحقق من فعالية التقوية ليتحمل العمود قوة محورية ضاغطة تصل حتى  $P_u = 3100 \text{ kN}$  مع أخذ اللامركزية الطارئة في الحسبان، في هذه الحالة تؤخذ  $\emptyset = 0.65$  حسب ACI كما يوضح الجدول 8، وهذا يوافق النقطة  $A'$  في مخطط الترابط التصميمي وبالتالي تكون قدرة تحمل العمود المقوى كالتالي:

$$P_{n(A')} = 0.65 \times 4797.8 = 3118.57 \text{ kN}$$

والتصميم المقترح بست طبقات CFRP مقبول.

في المثال العددي عند النقطة C

باتباع نفس الإجراء كما في النقطة B، تكون قدرة التحمل التصميمية كالتالي:

$$P_{n(C)}: \emptyset 2732.7 \text{ kN}$$

$$A = -2.18 \times 10^{-4} \text{ kN/mm}^3$$

$$B = 85.8 \text{ MPa}$$

$$C = -11.25 \text{ kN/mm}$$

$$D = 3161.639 \text{ kN}$$

ولحساب المعاملات أعلاه لا بد من إيجاد معاملات نموذج إجهاد-انفعال:

$$y_t = 131 \text{ mm}, \epsilon_t = 0.00182$$

$$h_c = 269.2 \text{ mm}$$

قيم الانفعال في كل طبقة من حديد التسليح يتم تحديدها من تشابه مثلثات توزع الانفعال، تعطى بعدها الإجهادات الموافقة كالتالي:

$$f_{s1} = \epsilon_{s1} E_s = 0.00323 \times 200000 = 646 \text{ MPa} \leq$$

$$400 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = \epsilon_{s2} E_s = 0.000616 \times 200000 = 123 \text{ MPa}$$

$$f_{s3} = \epsilon_{s3} E_s = -0.002 \times 200000 = -400 \text{ MPa}$$

ويكون عزم الانعطاف التصميمي:

$$M_{n(C)}: \emptyset 412.15 \text{ kN.m}$$

$$E = -16.366 \times 10^{-5} \text{ kN/mm}^3$$

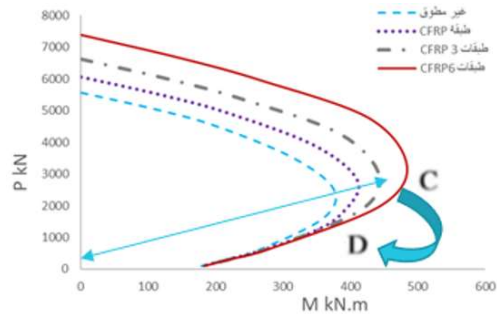
$$F = 66.86 \text{ MPa}$$

$$G = -9.4219 \text{ kN/mm}$$

$$H = 497.741 \text{ kN}$$

$$I = 292000 \text{ kN mm}$$

ملاحظة: على الرغم من أن الطريقة المقترحة لإيجاد مخطط ترابط مبسط تركز على المنطقة التي يحكمها الانهيار على الضغط (A,B,C)، نجد أن النقطة D لا بد من حسابها إذ يتضاءل أثر التطويق مع اللامركزية الكبيرة ولكنه لا ينعدم، كما يوضح الشكل 13:



شكل 13: امتداد أثر التطويق تحت خط التوازن.

### • إيجاد النقطة D:

باتباع نفس الخطوات نوجد النقطة D:

$$P_{n(D)}: \emptyset 1654.61 \text{ kN}$$

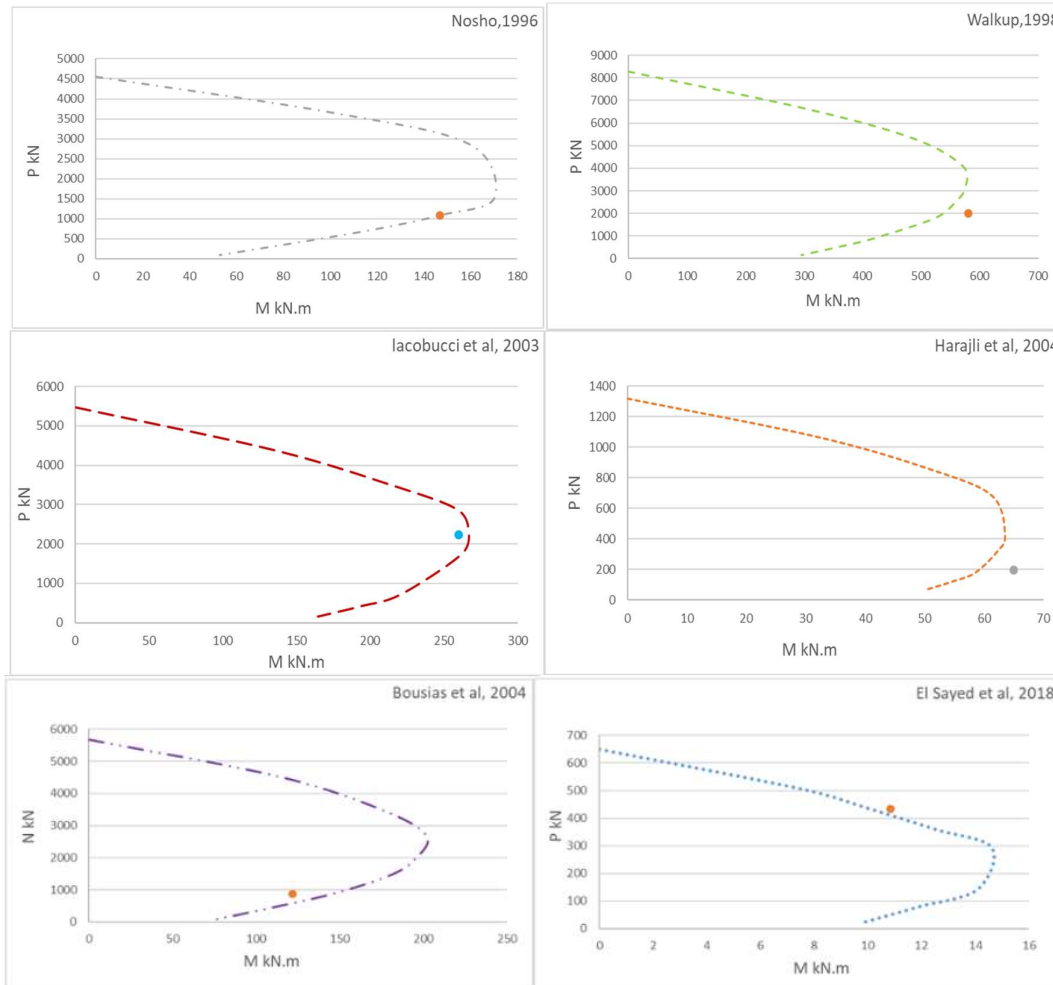


جدول 8: معامل إنقاص المقاومة  $\phi$  حسب ACI 318 [2]

		$\phi$	
		نوع التسليح العرضي	
$\epsilon_t$	نوع الانهيار الحاكم بمخطط الترابط التثوية على الشد في أقصى طبقة تسليح $\epsilon_t$	حلزوني	غير ذلك
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Compression-controlled	0.75	0.65
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0.005$	Transition	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.005 - \epsilon_{ty})}$	$0.65 + 0.25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.005 - \epsilon_{ty})}$
$\epsilon_t \geq 0.005$	Tension-controlled	0.90	0.90

هذا الجدول معتمد للأعمدة في كودات ACI (ACI 318-02، ACI 318-05، ACI 318-08، ACI 318-11، ACI 318-14)

شكل 5، جدول: 1، 2، 3، 4، 5، 6



شكل 5: مقارنة مخططات الترابط والنتائج التجريبية للأعمدة المختبرة في الدراسات السابقة.

جدول 1: نموذج (إجهاد-انفعال) للخرسانة المُطَوَّقَة بمركبات CFRP

(Lam L, Teng J,2003) [17,18]	النموذج المُوجَّه نحو التصميم
	$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} (\varepsilon_c)^2 \quad 0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_t \quad (1)$
	$f_c = f'_c + E_2 \varepsilon_c \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \quad (2)$
	$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (3)$
	$\varepsilon_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (4)$
	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 3.3k_a \left( \frac{f_l}{f'_l} \right) \quad (5)$
	$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{f,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \quad (6)$
	<p>حيث أن معاملات الفعالية: <math>k_a = k_b = 1</math> في المقطع الدائري ومن أجل المقطع المستطيل:</p>
	$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^2 \quad (7)$
$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{h}{b} \right)^{0.5} \quad (8)$	

جدول 2: حساب القوة الضاغطة والعزم حول محور الإحداثيات لمنطقة الضغط في المقطع الخرساني.

Point ID	$\xi_i$	$w_i$	$y_i$	$\varepsilon_{ci}$	$\sigma_{ci}$	$N_{ci}$	$M_{ci}$
$i: 1 \rightarrow ?$ يتعلق عددها بدرجة علاقة (إجهاد-انفعال)	الإحداثي النسبي لشراخ التكامل	الوزن التكامل ثابت لكل شريحة تكامل يتعلق بعدد الشراخ	$\frac{h+y}{2} + \frac{h-y}{2} \xi_i$	$(y_i - y) \times \frac{\varepsilon_c}{h_c}$	من معادلة $\sigma - \varepsilon$	$\sigma_c \times w_i \times \left( \frac{h-y}{2} \right) \times b$	$N_{ci} \times y_i$
						$N_{c\ tot} = \sum N_{ci}$	$M_{c\ tot} = \sum M_{ci}$

جدول 3: حساب القوة الضاغطة والقوة الشادة والعزم الموافقة لحديد التسليح حول محور الإحداثيات.

ID طبقة التسليح	$A_s$	$y_i$	$H_s$	$\varepsilon_{si}$	$\sigma_{si}$	$\sigma_{sif}$	$N_{si}$	$M_{si}$
$i: 1 \rightarrow ?$	مساحة التسليح عند كل طبقة تسليح	البعد الشاقولي لمركز ثقل حديد التسليح عن محور الإحداثيات	$ y - y_i $	$\frac{\varepsilon_c}{h_s} \times \frac{\varepsilon_c}{h_c}$	$E_s \times \varepsilon_{si} \leq f_y$	$(y_i \leq y) \text{ then } (-\sigma_{si}) \text{ else } (\sigma_{si})$ تعطى الإشارة السالبة للتشد	$\sigma_{sif} \times A_{si}$ $N_{si} > 0 \text{ then } N_{si} = N_{sc} \text{ else } = N_{st}$	$N_{si} \times y_i$
						$N_{sc\ tot} = \sum N_{sci}$	$M_{sc\ tot} = \sum M_{sci}$	

$$N_{st\ tot} = \sum N_{sti} \quad M_{st\ tot} = \sum M_{sti}$$

جدول 4: مواصفات ونتائج اختبار الأعمدة الخرسانية المسلحة المُطَوِّقة بمركبات CFRP في الدراسات السابقة

المرجع رمز العينة	b mm	h mm	H(m)	h/b	r mm	$\rho_g\%$	$\rho_f\%$	$f'_c$ MPa	$f_y$ MPa	$E_f$ MPa	$\varepsilon_{f,rup}\%$	$t_f$ mm	$p_{max}$ kN	$M_{max}$ kN m
Nosho NO2[21]	280	280	2.36	1.00	13	1.02	0.94	41.6	407	261484	1.6	0.17	1087	147
Walkup WA2[28]	458	458	3.05	1.00	51	1.48	0.86	22.7	460	230303	1.5	0.17	1999	581
Lacobucci ASC-3[16]	305	305	1.47	1.00	16	2.58	3.93	36.9	465	76350	1.26	1.00	2237	260
Harajli HR2-a[15]	150	300	1.12	2	13	1.5	0.26	21.1	534	230000	1.5	0.13	196	65
Bousias BO3-b[5]	150	150	0.8	1	20	2	1	26.8	500	67000	2.5	0.17	865	122
Elsayed CO3 [12]	100	150	1.3	1.5	25	3	0.7	26	414	240000	1.55	0.112	434	10.85

جدول 5: مقارنة نتائج مخططات الترابط مع النتائج التجريبية

المرجع رمز العينة	Experimental		P-M interaction diagram		Error% $(M_{max} - M)/M_{max} \times 100$
	$p_{max}$ kN	$M_{max}$ kN m	$P$ kN	$M$ kN m	
Nosho NO2[21]	1087	147	1087	147	0.00
Walkup WA2[28]	1999	581	1999	539	7.22
Lacobucci ASC-3[16]	2237	260	2237	266.7	-2.57
Harajli HR2-a[15]	196	65	196	59.5	8.46
Bousias BO3-b[5]	865	122	865	144	-18.03
Elsayed CO3 [12]	434	10.85	434	10.07	7.18

جدول 6: المعاملات المتغيرة عند إيجاد مخطط الترابط لعمود خرساني مسلح مطوق بمركبات CFRP

المعاملات المتغيرة	h mm	b mm	h/b	r mm	$\rho_g\%$	$f'_c$ MPa	$f_y$ MPa	$E_f$ MPa	$t_f$ mm	$\varepsilon_{f,rup}\%$	عدد طبقات (n) CFRP
مقاومة الخرسانة	450	450	1.00	25	1	?	400	230000	0.131	1.8	3
عدد طبقات CFRP	450	450	1.00	25	1	25	400	230000	0.131	1.8	?
نصف قطر التدوير	450	450	1.00	?	1	25	400	230000	0.131	1.8	3

جدول الرموز:

$A_c$ : مساحة المقطع العرضي للخرسانة في العمود

$A_e$ : المساحة المُطَوِّقة بشكل فعال

$A_u$ : مساحة الجزء غير المُطَوَّق في المقطع العرضي

$A_g$ : المساحة الكلية للمقطع العرضي

$A_s$ : مساحة حديد التسليح

$A_{si}$ : مساحة المقطع العرضي لكل طبقة من حديد التسليح الطولي

- $b$  : البعد الجانبي الأقصر للمقطع العرضي المستطيل
- $d_{si}$  : البعد من موضع طبقة حديد التسليح حتى المركز الهندسي للمقطع العرضي
- $e$  : لامركزية الحمولة المحورية
- $E_2$  : ميل الجزء الخطي لمنحني إجهاد-انفعال الخرسانة المُطَوَّقة بعد تحفيز الألياف
- $E_f$  : معامل مرونة الألياف على الشد
- $f_{si}$  : الإجهاد في كل طبقة من حديد التسليح الطولي
- $f_l$  : ضغط التطويق العائد لقميص CFRP
- $f'_{co}$  : المقاومة القصوى على الضغط عند تسجيل منحني إجهاد-انفعال للخرسانة غير المطوقة
- $f_t$  : الإجهاد في منحني إجهاد-انفعال الخرسانة المُطَوَّقة عند النقطة الانتقالية التي تفصل الجزء القطعي عن الخطي
- $f'_{cc}$  : المقاومة القصوى على الضغط للخرسانة المُطَوَّقة
- $f_{urup}$  : المقاومة القصوى للألياف على الشد
- $f'_{cu}$  : المقاومة الحدية عند الانهيار للخرسانة المُطَوَّقة ومع المنحني الصاعد
- $k_a$  : معامل كفاءة التطويق بقميص CFRP في علاقة المقاومة الحدية  $f'_{cu}$  ويتعلق بالمقطع الهندسي
- $k_b$  : معامل كفاءة التطويق بقميص CFRP في علاقة  $\epsilon_{cu}$  ويتعلق بالمقطع الهندسي
- $k_e$  : معامل فعالية التطويق
- $M_n$  : قدرة التحمل الإسمية على الانعطاف للأعمدة الخرسانة المسلحة
- $P_n$  : قدرة التحمل الإسمية للأعمدة الخرسانية المسلحة
- $r$  : نصف قطر تدوير الزوايا للمقاطع غير دائرية
- $t_f$  : السماكة الإسمية لطبقة الألياف
- $p_g$  : نسبة مساحة حديد التسليح الطولي إلى مساحة المقطع العرضي
- $\epsilon_{fe}$  : الانفعال الفعال لمركبات CFRP عند الانهيار
- $\epsilon_{frup}, \epsilon_{fu}$  : الانفعال الحدي على الشد (عند الانقطاع) لمركبات CFRP
- $\epsilon_t$  : الانفعال في منحني إجهاد-انفعال الخرسانة المُطَوَّقة عند النقطة الانتقالية التي تفصل الجزء القطعي عن الخطي
- $\epsilon_{cc}$  : الانفعال المحوري الموافق للمقاومة القصوى للخرسانة المُطَوَّقة
- $\epsilon_{ccu}$  : الانفعال المحوري الحدي عند الانهيار للخرسانة المُطَوَّقة ومع المنحني الصاعد يمكن التعبير عنه بالرمز  $\epsilon_{cc}$ .

engineering, Ibaraki university, Hitachi (2005)316-851.

المصادر

- [15] Harajli M, Rteil A. Effect of confinement using fiber-reinforced polymer or fiber-reinforced concrete on seismic performance of gravity load-designed columns. *ACI Struct J* 2004; 101 (1):47-56.
- [16] Lacobucci R, Sheikl S, Bayrak O. retrofit of square concrete columns with carbon fibre – reinforced polymer for seismic resistance. *ACI Struct J* 2003;100(6):785-794.
- [17] Lam, L., and Teng, J.G. (2003). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 471-489.
- [18] Lam, L. and Teng, J.G (2003b). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(13): 1149-1186.
- [19] MacGregor J. Reinforced concrete mechanics and design. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Inc.; 1997.
- [20] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., and El Echary, H. (1998). Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 2(4), 175-185.
- [21] Nosho KJ. Retrofit of rectangular reinforced concrete columns using carbon fiber. Master,s Thesis. Seattle, WA, USA: University of Washington; 1996
- [22] Park, R., and Paulay, T. (1975). Reinforced concrete structures. John Wiley and Sons, N.Y., U.S.A. 800 p.
- [23] Popovics, S. (1973) .A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, pp. 583-599.
- [24] Priestley, M.J., Seible, F. and Calvi, G.M. (1996) *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York, USA: John Wiley & Sons; 1996
- [25] Rochette, P., and Labossière, P. (2000). Axial testing of rectangular column models confined with composites. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 4(3), 129-136
- [26] Silvia Rocca, Nestore Galati, Antonio Nanni. Interaction diagram methodology for design of FRP-confined reinforced concrete columns *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1508–1520.
- [27] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP strengthened RC structures. West Sussex, UK: John Wiley and Sons; 2002.
- [28] Wallkup S. Rehabilitation of non –ductile reinforced concrete building columns using fiber reinforced polymer jackets. Master,s Thesis. Bethlehem, PA, USA: Lehigh University; 1998.
- [29] Youssef, M.N., Feng, M.Q., and Mosallam, A.S. (2007). Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites: Part B*, 38, 614-628.
- [1] American Concrete Institute, ACI 440.2R, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 2002.
- [2] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA; 2014.
- [3] Bank LC. Composites for construction: structural design with FRP materials. Hoboken, N.J. NJ, USA: John Wiley and Sons; 2006.
- [4] Baylasan Mohamad. A Study of Confinement Effect in the Stress- Strain Curve of Ready Mix Concrete in the Central Area and its Reflection on Sections Design, PhD thesis, al Baath University, Syria, pp. 62-74, (2019).
- [5] Bousias S, Triantafillou T, Fardis M, Spathis L, O'Regan B. Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion. *ACI Structural Journal* 2004; 101 (4): 512-520
- [6] Carey SA, Harries KH, The effect of shape, Gap, and scale on the behaviour and modeling of variably confined concrete. Report No. STO3-05. Columbia, SC, USA: University of South Carolina; 2003.
- [7] Carey SA, Harries KH, Axial behavior and modeling of small, medium and large scale circular sections confined with CFRP jackets. *ACI Struct J* 2005; 102(4): 596-604.
- [8] Carreira, D.J. and Chu, K.D., Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression, *ACI Journal*, Proc. 82(6): 797-804 (1985).
- [9] Concrete Society. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material. Technical Report 55. Crowthorne, UK; 2004
- [10] Cusson, D., and Paultre, P. (1995). Stress-strain model for confined high-strength concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 121(3), 468-477.
- [11] De Lorenzis, L. and Tefers, R. (2003). “Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber-reinforced polymer composites”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 7(3): 219-237
- [12] Elsayed M, Ellassaly M, Esmail W. Behavior of Eccentrically Loaded R.C. Columns Confined with CFRP Composites. *IRJET* 2018; 11(5):1336-1343
- [13] Gouri Dhatt, Gilbert Touzot. une presentation de la Méthode des éléments finis, deuxième édition; Mloines. A. editeur Paris 1987.
- [14] G.W U, Z. T. LU, Z.S WU. Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites. Department of urban and civil

## Section Design of Reinforced Concrete Columns Confined by CFRP

*Baylasan mohamad*<sup>1</sup>, *Soleman Alamoudi*<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> University of Kalamoon, Rif Dimashq, Syria, E-mail: Baylasan\_m@hotmail.com

<sup>2</sup> Department of structural engineering, Al-Baath University, Homs, Syria, E-mail: dr.s.amoudi.1@gmail.com

\*Corresponding author :Baylasan Mohamad, E-mail: Baylasan\_m@hotmail.com

Published online: 31 December 2021

**Abstract**— Analysis of reinforced concrete (RC) columns confined by CFRP is equivalent to the analysis of conventional RC columns with the fundamental difference of using stress-strain model of concrete that confined by CFRP. This paper presents two methods to find P-M interaction diagrams for CFRP –confined RC columns, the first is comprehensive using numerical integrations, and the second is simplified using a previously proposed methodology to create a simplified interaction diagram that focuses on region where compression is the controlling failure mode, and as a result theoretical (P-M) diagrams have been verified by comparison with experimental test results in many previous studies. The effect of different coefficients on the interaction diagram was studied such as the concrete strength, the radius of the rounded corners of the column section, and the number of CFRP layers that illustrated the region in (P-M) diagram that affected by confinement. For practical design applications an example illustrates the above-mentioned design methods of RC column confined by CFRP has been reviewed in Appendix.

**Keywords**—: interaction diagram, reinforced concrete columns, confinement, CFRP.