

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ وGFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM

*د.محمد عيسى ، **م. نادين بروجود

المخلص:

تناولت هذه الدراسة تحليلاً مقارناً للأداء الإنشائي للبلاطات الخرسانية العاملة باتجاهين عند تسليحها بقضبان البوليمر المقوى بالألياف الزجاجية (GFRP)، مقارنة بالبلاطات المسلحة تقليدياً بالفولاذ. يأتي هذا التقييم في إطار البحث عن حلول بديلة تسهم في تحسين ديمومة المنشآت المعرضة لظروف البيئية القاسية، لا سيما في حالات تعرض التسليح التقليدي للتآكل. اعتمدت منهجية البحث على إجراء تحليلين نظري واعددي لسلوك الانحناء للبلاطات تحت تأثير حملات ساكنة متزايدة، باستخدام نماذج حسابية لاحتماب عزم التشقق، الانحراف، وقدرة التحمل القصوى. أظهرت النتائج أن البلاطات المسلحة بقضبان (GFRP) سجلت قيم انحراف أعلى، إلا أن قدرتها على التحمل بعد بلوغ الحمل الأقصى شهدت انخفاضاً نسبياً مقارنة بالبلاطات المسلحة بالفولاذ، والتي أظهرت كفاءة أكبر في مقاومة القص الناتج عن الثقب لكنها انهارت نتيجة عزم الانحناء.

وفي المقابل أظهرت البلاطات المسلحة بقضبان (GFRP) أداءً آمناً في مقاومة الانحناء، لكنها كانت أكثر عرضة للانهياب بسبب القص بالثقب، وبناء عليه توصي الدراسات بإمكانية تحسين هذا النوع من البلاطات، من خلال زيادة مقاومة الخرسانة على الضغط وسماكة المقطع مما يعزز كفاءتها الإنشائية، تسهم هذه النتائج في تحديد استراتيجيات تصميم أكثر فعالية عند استخدام GFRP كتسليح بديل، مع الأخذ بعين الاعتبار متطلبات التصميم والجدوى الاقتصادية، وخاصة في المنشآت ضمن البيئات القاسية.

كلمات مفتاحية: (FRP) البوليمر المقوى بالألياف، قضبان الألياف الزجاجية GFRP ، تسليح تقليدي، بلاطة عاملة باتجاهين، الثقب.

*مدرس في قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حمص.

**طالبة ماجستير في قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حمص.

Comparative Study on the Performance of Two-Way Concrete Slabs Fully Reinforced with Steel and GFRP: Evaluation According to Syrian and American Codes Using FEM Modeling

***Dr. Mohamad Issa , **Eng. Nadine Brjoud**

ABSTRACT:

This study presents a rigorous comparative assessment of the structural performance of two-way reinforced concrete slabs, focusing on the use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars as an alternative to traditional steel reinforcement. The evaluation is motivated by the need for durable construction solutions in environments where corrosion of steel reinforcement compromises long-term structural integrity.

The research methodology incorporates both theoretical and numerical analyses to characterize flexural behavior under incrementally applied static loads. Advanced computational models were used to quantify key performance indicators, including cracking moment, mid-span deflection, and ultimate load-bearing capacity.

Experimental findings demonstrate that GFRP-reinforced slabs experience greater deflections than their steel reinforced counterparts. Although GFRP slabs exhibit reliable flexural performance, they are more susceptible to punching shear failure. In contrast, steel reinforced slabs display enhanced resistance to punching shear but tend to fail due to excessive bending moments.

To mitigate these shortcomings, the study proposes targeted design interventions namely, increasing concrete compressive strength and slab thickness to improve the structural performance of GFRP-reinforced systems. These recommendations contribute to the development of more robust design strategies, enabling the practical application of GFRP as a viable reinforcement material in aggressive environmental conditions where long term durability and structural resilience are critical.

Keywords: (FRP) fiber reinforced polymer, fiberglass rods, conventional reinforcement, two-way slab, punching.

1- مقدمة Introduction:

مع تطور العلوم و التقنيات في مجال الهندسة الإنشائية، تم ابتكار أنواع جديدة من مواد التسليح، كان من أبرزها قضبان البوليميرات المسلحة بالألياف FRP ، التي بدأت بالانتشار خلال العقد الماضي في أوروبا نظراً لامتلاكها خصائص ميكانيكية متميزة، أهمها ارتفاع نسبة قوتها إلى وزنها و عدم قابليتها للتآكل، هذه الخصائص جذبت اهتمام الباحثين و المهندسين لاستبدال نظام التسليح التقليدي المعتمد على الفولاذ العادي أو المسبق الإجهاد، خصوصاً في المنشآت المعرضة للظروف البيئية القاسية كالجسور و المنشآت البحرية و المنشآت التي تواجه تأثيرات الرطوبة و الحرارة و الأملاح ، حيث تؤدي هذه الظروف إلى تلف التسليح و تدهور أداء الخرسانة، مما يؤثر سلباً على عمرها واستثمارها الإنشائي[14].

في محاولة لتجاوز هذه التحديات، تم استخدام حلول جزئية كقضبان الفولاذ المغطاة بالإيبوكسي أو إضافات خاصة في الخلطة الخرسانية إلا أن هذه الإجراءات غالباً ما فشلت في الحد من مشكلة صدأ الحديد بشكل نهائي[14]. لذا ظهرت الحاجة إلى دراسة فعالية استخدام قضبان FRP كحل بديل واعد، مع مراعاة الحدود المسموحة لاستخدامه فيها نتيجة لعدة خصائص وسلوكيات ميكانيكية تختلف عن نظيراتها التقليدية.

وفي هذا السياق، تبرز أهمية مقارنة أداء البلاطات الخرسانية العاملة باتجاهين عند تسليحها بقضبان FRP مع تلك المسلحة بالفولاذ التقليدي، لاسيما أن هذا النوع من البلاطات يمتاز بقدرته على توزيع الأحمال بشكل متوازن في كلا الاتجاهين، مما يؤدي لتقليل الانحراف ويزيد من كفاءة التحمل مقارنة بالبلاطات ذات الاتجاه الواحد، كما أن مرونته التصميمية تجعله خياراً محبباً في المشاريع المعقدة والمباني التجارية ذات المساحات الواسعة المفتوحة.

تشير الدراسات الحديثة [2]، [3]، [16]، [17] إلى أن قضبان FRP تعد من البدائل الواعدة للفولاذ في تقوية الهياكل الخرسانية، وذلك لما لها من مزايا تشمل مقاومة التآكل، خفة الوزن، والخصائص الميكانيكية المميزة، ويتم تصنيعها من ألياف ذات مقاومة شد عالية، مثل الزجاج والكربون والبازلت والأراميد، المشبعة بالراتنجات البوليميرية، وتتميز هذه القضبان بأنها غير موصلة للكهرباء وتظهر سلوكاً مرناً خطياً دون نقطة خضوع، مع انخفاض في معامل المرونة مقارنة بالفولاذ [4]، [5]، [6]، [7]. لذا فإن دراسة السلوك الميكانيكي للبلاطات المسلحة بقضبان (FRP) بات ضرورياً لفهم آلية التسليح الأنسب وتحديد ظروف الاستخدام الأمثل.

2-دراسات مرجعية Literature Review:

يعد مرآب La Chancelière من أبرز الأمثلة الناجحة لبلاطة منفذة باستخدام قضبان GFRP [8] ، حيث أجريت دراسة لمعرفة تصميم وأداء الانحناء للبلاطات الخرسانية المسطحة في هذا المرآب بعد سنوات من الاستخدام و ذلك عند التسليح بقضبان GFRP للقضاء على التآكل الفولاذي الممتد ومشاكل التدهور ذات الصلة، من أجل تصميم خرسانة لا تحتاج إلى صيانة، حيث خلصت الدراسة إلى أن قضبان GFRP قدمت حلاً عملياً وفعالاً من حيث التكلفة للتغلب على مشاكل التآكل، كما أظهرت البلاطات المسطحة GFRP-RC أداءً إنشائياً طبيعياً من حيث الإجهاد والتشقق طوال 3.5 سنوات من ظروف الخدمة الحقيقية، لم تتجاوز التشوهات القصوى المقاسة في قضبان GFRP 20% من سعتها لكنها كانت أقل من التشوهات المتوقعة.

درس [9] Maher A. Adam et al أربع مجموعات من الألواح الخرسانية بأبعاد 700*1750 mm وسماكات مختلفة من 100mm إلى 150mm، جميع البلاطات المختبرة لها نفس قوة الضغط 60 MPa، اعتمد الباحث على نمذجة البلاطة باستخدام برنامج ANSYS2019-R1، وتوصل إلى أن سلوك الألواح المدعمة بألياف GFRP المختبرة كان مرناً ثنائي الخط حتى الانهيار وأن استخدام نسب تسليح قضبان GFRP أقل أو تساوي μ_b أدى إلى انهيار هش في قضبان GFRP وتحطم الخرسانة مع تمزق قضبان GFRP. أوضح الباحث Sukanta K

[10] Shill et al سلوك البلاطات المسلحة بقضبان الكربون والبازلت فقام بمقارنة نتائج السهوك الناتجة عن اختبار العينات مع نتائج العلاقات النظرية وخلص إلى أن قضبان FRP لا تتمزق بل تنهار العينات بالثقوب.

قام الباحث Minkwan Ju et al [11] بدراسة سلوك بلاطات عاملة باتجاهين بأبعاد 300*500*30mm باختلاف نسب التسليح، و قد قارن نتائج التجارب مع العلاقات الواردة في الكودات، انهارت جميع عينات الاختبار بالثقوب، أظهرت العينة المسلحة بالفولاذ سلوكاً أكثر صلابة حتى الانهيار مقارنةً بالعينات المسلحة بالفايبر التي تم تدعيمها باستخدام نسبة تسليح مكافئة، بالنسبة للحمل التشغيلي المختبر لعينات GFRP، كانت قدرة التحمل أعلى من حمولة الخدمة المصممة، بالإضافة إلى ذلك أظهرت النتائج التجريبية أن قدرة التحمل الإنشائية كانت كافية لمقاومة الحمل التصميمي المركز، على الرغم من أن كمية قضبان GFRP قد تم تصميمها باستخدام الحد الأدنى بالمقارنة مع الانحراف المسموح به عند حمل الخدمة التصميمي.

3 - مبررات البحث :Research Justification

على الرغم من التقدم في استخدام GFRP حول العالم، لا تزال الدراسات المتعلقة بسلوك البلاطات الخرسانية العاملة باتجاهين والمسلحة بهذه المادة محدودة، خصوصاً في السياق المحلي داخل الجمهورية العربية السورية، حيث تفتقر المخابر الجامعية الوطنية إلى بحوث تجريبية وتحليلية تعنى بهذا النوع من التسليح، وفي ظل غياب المقارنة الواضحة بين الكود السوري والكود الأمريكي ACI فيما يخص العلاقات التصميمية المرتبطة بتسليح GFRP، تظهر الحاجة إلى دراسة علمية متخصصة تسلط الضوء على الفروق التصميمية بين الكودين وتقييم أداء هذه البلاطات بشكل منهجي.

وعليه تبرر هذه الدراسة كونها تساهم في سد الفجوة البحثية المحلية، من خلال تحليل سلوك البلاطات العاملة باتجاهين المسلحة بقضبان GFRP، وتقديم إطار تصميمي قائم على أسس ومعايير علمية دقيقة، يعزز من فهم أداء هذا النوع من التسليح ويمهد لتطبيقه العملي في مشاريع البنية التحتية الحديثة

4 – أهداف البحث Research Objectives :

- تقييم قدرة التحمل النهائية للبلاطات لكل نوع من التسليح وتحديد آلية الانهيار المرافقة لها (قص بالتقرب، انحناء، تشقق).
- تحليل تأثير نوع التسليح (الفولاذ مقابل GFRP) على الانحراف النسبي تحت تأثير الحمولات المتزايدة.
- مقارنة نتائج الانحناء، التشقق الأولي، والعزوم النهائي بين البلاطات المسلحة بالأسلوبين وفقاً لمتطلبات الكود.
- تحليل مدى توافق العلاقات التصميمية الواردة في الكود السوري والكود الأمريكي ACI عند استخدام GFRP، واقتراح توصيات تصميمية عملية.
- اقتراح تحسينات تصميمية في البلاطات المسلحة ب GFRP لتقليل احتمالية الانهيار بالقص.

5 – مواد وطرق البحث Materials and Methodology:

البيانات التجريبية الواردة في هذا البحث لعينات من البلاطات الخرسانية العاملة باتجاهين والمستددة من الجهات الأربعة، الأولى مسلحة بالتسليح التقليدي Steel، والثانية مسلحة بقضبان الألياف الزجاجية GFRP، ناتجة عن تجارب مخبرية أصلية أجريت في إطار أطروحة الماجستير بقسم الهندسة المدنية (جامعة حمص)، عُرضت النتائج في سمنار إنهاء الأطروحة وهي حالياً قيد المناقشة النهائية، كما أُدرجت هذه البيانات كمادة داعمة في مخطوطة قيد التحكيم لمؤتمر هندسي، أُجريت الاختبارات وفق بروتوكول موثق يشمل توصيف العينات، إجراءات التحميل، أجهزة القياس، تكرار الاختبارات، ومعايرة الأجهزة. تتوفر البروتوكولات والبيانات الأولية، ونتائج معايرة الأجهزة، وصور الاختبارات للعرض على المحكمين أو المحرر عند الطلب.

وبالتالي ستم مقارنة نتائج الانحراف تحت الأحمال التجريبية مع النتائج النظرية للدراسة التحليلية وفق علاقات الكود الأمريكي ACI 440.1R-15 والكود السوري التي تمت برمجتها على برنامج

Excel، إضافة إلى نمذجة البلاطات المدروسة على برنامج Abaqus ومقارنة النتائج والتحقق منها.

استناداً إلى الاختبارات المخبرية وأوراق بيانات المنتج الخاصة بالشركة المصنعة، فإن الخواص الفيزيائية والميكانيكية لقضبان Steel و GFRP المستخدمة في هذه الدراسة مدرجة في الجدول 1.

الجدول 1: الخواص الميكانيكية لقضبان التسليح والأقطار المستخدمة.

| نوع التسليح | | المعايير |
|-------------|-------|--------------------------------|
| GFRP | Steel | |
| 8 | 10 | d(mm) |
| 50.3 | 78.5 | A _b mm ² |
| 1000 | 400 | f _y MPa |
| 42 | 210 | E _s GPa |

1.5- الدراسة التحليلية الحسابية Analytical and Computational Study :

1.1.5-العلاقات العامة لتصميم البلاطة المسلحة بقضبان الفولاذ حسب الكود السوري [15]:

1-الحل باستخدام طريقة الشرائح لبلاطة مستندة من الجهات الأربعة استناد بسيط من أجل تحديد نسبة التسليح اللازمة:

| |
|--|
| $r = \frac{m \cdot L}{m \cdot B} = 1.5, m=0.76, L=1200\text{mm}, B= 800\text{mm}$ |
| $A_0 = \frac{M_u}{\Omega \cdot 0.85 \cdot f_c \cdot b \cdot d^2} = 0.128$ |
| $\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot A_0} = 0.137$ |
| $\alpha_{max} = 0.5 \cdot \frac{535.5}{630 + f_y} = 0.25 \Rightarrow \alpha < \alpha_{max} \dots OK$ |
| $\gamma = 1 - 0.5\alpha = 0.93$ |

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM

| | |
|--|--|
| $A_s = \frac{M_u}{\Omega * f_y * d * \gamma} = 548.4 \text{ mm}^2/\text{m}$ | |
| $A_{min} \geq \begin{cases} 0.002 * b * d \\ 0.0012 * b * t \end{cases} = 150 \text{ mm}^2/\text{m}$ | |
| $\rho = \frac{A_s}{b * d} = 0.006$ | |
| $M_{ult} = 0.85 * f'_c * b * y * \left(d - \frac{y}{2}\right) = 6.9 \text{ KN.m/m}$ | |
| Ω عامل تخفيض المقاومة | حيث: M_u العزم التصميمي KN.m |
| b : عرض القطاع المصمم للبلاطة mm | f'_c : مقاومة الخرسانة على الضغط MPa |
| α : معامل توزيع الإجهاد | d : العمق الفعال للمقطع mm |
| f_y : مقاومة الخضوع للحديد MPa | α_{max} : القيمة القصوى لمعامل توزيع الإجهاد |
| A_s : مساحة مقطع الحديد المطلوب mm^2 | γ : معامل التوزيع |
| t : سماكة البلاطة mm | A_{min} : مساحة التسليح الدنيا mm^2 |
| M_{ult} : العزم المقاوم الأقصى للخرسانة KN.m | A_{max} : مساحة التسليح العظمى mm^2 |
| ρ : نسبة التسليح | y : عمق كتلة الضغط المكافئة في الخرسانة mm |

2.1.5- العلاقات العامة لتصميم البلاطة المسلحة بقضبان الفولاذ حسب كود

: [12] ACI 318-14

1-علاقات العزوم لحمولة موزعة على مساحة صغيرة

$$M_x = \frac{P}{8\pi} \left[\left(2.4 * \text{Ln} \frac{4*k_1}{\pi\sqrt{1+k^2}} \right) + 4.4 - \frac{9.6+6.4\pi r}{e^{\pi r}-1} + \left(0.4k - \frac{2}{k} \right) \tan^{-1}k - \frac{k\pi}{5} \right] = 9.78 \text{ KN. m/m}$$

$$M_y = \frac{P}{8\pi} \left[\left(2.4 * \text{Ln} \frac{4 * k_1}{\pi\sqrt{1 + k^2}} \right) + 2.8 - \frac{9.6 + 6.4\pi r}{e^{\pi r} - 1} + \left(2k - \frac{0.4}{k} \right) \tan^{-1}k - k\pi \right] = 3.06 \text{ KN. m/m}$$

حيث:

$$r = \frac{L}{B} = 1.5 , k = \frac{v}{u} = 1, k_1 = \frac{B}{u} = 1.33$$

2-تحديد سماكة البلاطة

$$h_f = \frac{2(B+L)}{180} = 100\text{mm}$$

وإذا كانت أقل من 90mm تفرض 100mm

$$d = h - c - \frac{d_2}{2} = 75\text{mm}$$

$$\mu = \frac{f_y}{0.85 * f'_c} = 18.82$$

$$R_u = \frac{M_u}{0.9 * B * d^2} = 2.416 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1}{\mu} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 * R_u * \mu}{f_y}} \right] = 0.0062$$

$$A_s = \rho * B * d = 578.8 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$M_{ult} = \frac{2}{3} * f_{cu} * a * b * \left(d - \frac{a}{2} \right) = 6.75 \text{ KN. m/m}$$

$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.8} = 31.25 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = \frac{0.75 * f_{cb} * I_g}{y_t}$$

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM

| | |
|---|--|
| حيث: R_u : المقاومة للحظية المطلوبة KN | f_{cu} : مقاومة الضغط الحديدية للخرسانة MPa |
| f_{cb} : مقاومة الشد للخرسانة MPa. | I_g : عزم العطالة الاسمي للمقطع غير المتشقق mm ⁴ |

3.1.5-العلاقات العامة لتصميم البلاطة المسلحة بقضبان الفايبر حسب الكود السوري [14]:

سيتم التصميم على انهيار المقطع الخرساني على الضغط وذلك أفضل لأن العنصر يسلك سلوكاً لدناً أو بشكل جزئي عند الانهيار.

| |
|--|
| <p>- علاقة الإجهاد - التشوه خطية حتى الانهيار بفرض $\epsilon_{cu} = 0.003$ بفرض انهيار الخرسانة هش على الضغط</p> <p>$\mu_f \leq 1.4 * \mu_{fb}$</p> <p>حيث</p> <p>$\gamma_c = 1.7, \gamma_f = 1.7$</p> <p>$E_f = \frac{f_{fu}^*}{\epsilon_{fu}} = 42GPa$</p> $\sqrt{\frac{(E_f * \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.536 * f_{cu}}{\mu_f * \gamma_c} * E_f * \epsilon_{cu}} - 0.5 * E_f * \epsilon_{cu} \leq \frac{f_{fu}^*}{\gamma_f}$ <p>$\mu_{min} = 1.4 * \mu_{fb}$</p> <p>$\mu_f = \frac{A_f}{b * d} = 0.0043$</p> <p>$\mu_{fb} = 0.8 * \frac{0.67 * f_{cu}}{f_{fu}^*} * \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}^*} = 0.0033$</p> <p>حيث</p> <p>$f_{fu}^* = f_{fu} * C = 487.5 MPa$</p> |
|--|

| | |
|--|---|
| $\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{fu} * C = 0.0117 \text{ MPa}$ C = عامل يتعلق بالظروف البيئية يؤخذ 0.75 | |
| $M_u = \left(\frac{A_f f_{fe}^*}{\gamma_f} \right) \left(d - \frac{a}{2} \right) = 6.43$ | |
| ε_{fu}^* : التشوه الأقصى في قضبان الفايبر قبل الانهيار | حيث f_{fu}^* : المقاومة القصوى للفايبر MPa |
| ε_{cu} : التشوه النهائي الأقصى للخرسانة تحت الضغط | E_f : معامل مرونة الفايبر MPa |

4.1.5-العلاقات العامة لتصميم البلاطة المسلحة بقضبان الفايبر حسب الكود ACI
[1] 440.1R-15

| |
|---|
| $E_c = \gamma_c * 0.043 * \sqrt{f'_c} = 26875 \text{ MPa}$ $\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{if } f'_c = 27.58 \\ 1.05 - 0.05 * f'_c & \text{if } 27.6 < f'_c < 55.16 \\ 0.65 & \text{Otherwise} \end{cases}$ $\varepsilon_{co} = \frac{1.71 * f'_c}{E_c} = 0.0015$ $\sigma_c'' = 0.9 f_c'' = 3263.2 \text{ MPa}$ $\sigma_c(\varepsilon_c) = \frac{2 * \sigma_c'' * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2} = 2701.1 \text{ MPa}$ حيث E_c : معامل المرونة الانضغاطي MPa ، β_1 : عامل الإجهاد |
| 2-حساب الحمولات المطبقة: $W_u = TFL = 1.2DL + 1.6LL$ $W_s = SL = DL + LL$ |
| 3-حساب العزم التصميمي والعزم الاستثمائي تؤخذ من علاقات الحمولة الموزعة |
| 4-تصميم البلاطة على عزم الانحناء مع تحقيق القص: $f_{fu} = C_E * f_{fuu} = 551.6 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon_{fuu} = 0.0144 \text{ MPa}$ |

$$f_{f\text{-creep}} = k_{\text{creep}} * f_{fu} = 110.32 \text{ MPa}$$

$$d_{f1} = t - c_c - \frac{\phi_{f\text{-bar}}}{2} = 76 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = t - c_c - \frac{3 * \phi_{f\text{-bar}}}{2} = 68 \text{ mm}$$

$$V_{co} = \left(\frac{5}{2}k\right) * 2 * \sqrt{f'_c} * (1ft) * \min(d_{f1}, d_{f2}) = 6.88 \text{ KN}$$

تحقيق السماكة:

$$\phi_V = 0.75$$

$$\{OK, \text{if } \phi_V V_{co} > V_{umax}$$

$$\{ \text{Otherwise, Not OK}$$

حساب نسبة التسليح الدنيا:

$$\rho_{f\text{-tsMin}} = \left(0.0018 \frac{60}{f_{fu}} * \frac{29000}{E_f}, 0.0036\right)$$

$$\Rightarrow A_{f\text{-tsMin}} = \rho_{f\text{-tsMin}} * t$$

$$A_f = \frac{A_{f\text{-bar}}}{S_{f\text{-ts}}} = 314 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{f\text{-min}} = \left(\frac{4.9\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} \min(d_{f1}, d_{f2}), \frac{300}{f_{fu}} \min(d_{f1}, d_{f2})\right)$$

$$= 250 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$\{OK, \text{if } A_f > A_{f\text{-min}}$$

$$\{ \text{Otherwise, Not OK}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{\min(d_{f1}, d_{f2})} = 0.0042$$

$$\rho_{fb} = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'_c}{f_{fu}} * \frac{E_f * \epsilon_{cu}}{E_f * \epsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.0041$$

تحديد آلية الانهيار:

if $\rho_f > \rho_{fb}$ الانهيار في البيتون

if $\rho_f < \rho_{fb}$ الانهيار في قضبان الفايبر

$$x = \frac{A_f * E_f * \epsilon_f}{\alpha_1 * f'_c * \beta} = 13.7 \text{ mm}$$

$$M_n = \rho_f * f_{fu} * \left(1 - \frac{0.59 * f_{fu} * \rho_f}{f'_c}\right) * b * d_f^2$$

$$= 9.96 \text{KN.m/m}$$

$$M_{cr} = \frac{2 * f_{ct} * I_g}{t}$$

2.5- البارامترات الأساسية التي ستتم مقارنتها:

يعرض هذا القسم حمولات الانهيار- العزم المقاوم - العزم الحدي- الثقب في البلاطة بناءً على نتائج العلاقات السابقة عند تصميم البلاطة وفق الكود السوري والكود الأمريكي بطريقتي التسليح، وذلك تحت تحميل دوري متدرج.

1.2.5- قدرة التحمل Capacity :

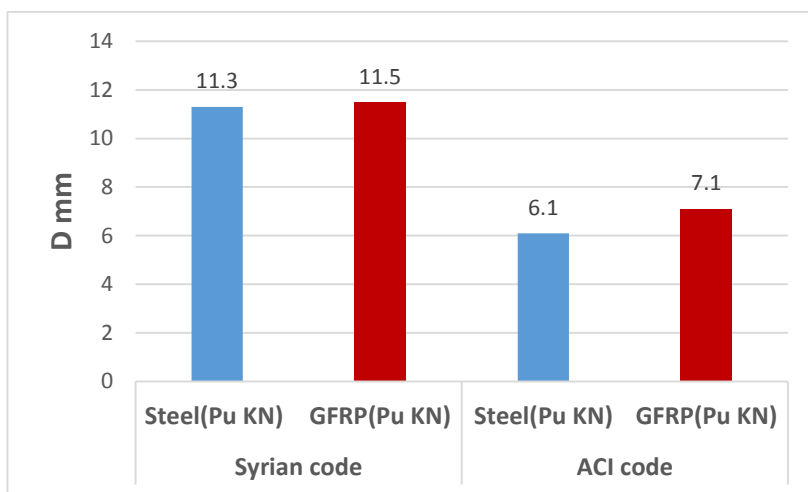
أظهرت النتائج أنه عند نسب التسليح الدنيا كانت قدرة تحمل البلاطة المسلحة بقضبان GFRP أكبر من قدرة تحمل البلاطة المسلحة بالفولاذ في حالة التحميل الساكن، وذلك نتيجة لتمتع قضبان GFRP بقوة شد عالية ومقاومتها للتآكل.

الجدول 2: يوضح نسب التسليح الدنيا وفق اتجاه عمل البلاطة، قيم حمولات وعزوم الانهيار، والعزم المقاوم وفق الكود الأمريكي والكود السوري.

| M_{ult} (KN.m/m) | P_{u-fail} (KN) | M_{u-fail} (KN.m/m) | ρ % | نوع البلاطة | الكود المستخدم |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------|-------------|-------------------|
| 6.75 | 90 | 9.7 | 0.006 | SL-Steel | ACI |
| 6.47 | 91 | 9.94 | 0.0042 | SL-GFRP | code |
| 6.9 | 89 | 9.63 | 0.006 | SL-Steel | Syrian |
| 6.43 | 90.5 | 9.86 | 0.0042 | SL-GFRP | code |

2.2.5- سلوك الانحراف Deviation Behavior:

نلاحظ أنه قبل حدوث التشقق تكون الاستجابة للحمل خطية، وأداء البلاطات بكلا نوعي التسليح متشابه، ومع زيادة التحميل تنهار العينة عند وصولها إلى الحمولة القصوى، تُظهر عينة GFRP انحرافاً أكبر من عينة Steel كما هو موضح في الشكل 1، ويرجع ذلك إلى انخفاض معامل المرونة في قضيب الفايبر مما يؤدي لزيادة التشوهات مقارنة بالفولاذ الذي يتمتع بصلابة أعلى.



الشكل 1: قيم السهوم وفق الكودات باختلاف نوع التسليح Steel/GFRP.

3.2.5 - سلوك التشقق Cracking Behavior:

ووفقاً لعلاقات الكودات، يحدث الانهيار في الخرسانة عندما تصل إلى أقصى قيمة إجهاد انضغاطية تبلغ 0.003، وأيضاً يحدث انهيار الخرسانة على الضغط إذا كان $\rho_f < \rho_{fb}$. وفي حالة أخرى يحدث تمزق لقضبان الفايبر، في هذه الدراسة كان السلوك مرناً خطياً قبل التشقق وعند بداية التشقق تظهر شقوق عمودية وتكون منتشرة أسفل عينة البلاطة، وبزيادة الحمل تظهر المزيد من التشققات الانشائية حتى يحدث الانهيار، تُظهر عينات SL-Steel شقوقاً أقل من عينات SL-GFRP.

الجدول 3: يوضح قيم حمولات وعزوم التشقق، وعزوم الاستثمار مقارنة بالحمولات والعزوم الحدية.

| M_{u-fail} (KN.m/m) | P_{u-fail} (KN) | M_s (KN.m/m) | M_{cr} (KN.m/m) | P_{cr} (KN) | نوع البلاطة |
|--------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------------|----------------|
| 97 | 90 | 2.19 | 5.55 | 82.6 | Steel |
| 9.94 | 91 | 1.47 | 1.49 | 84 | GFRP |

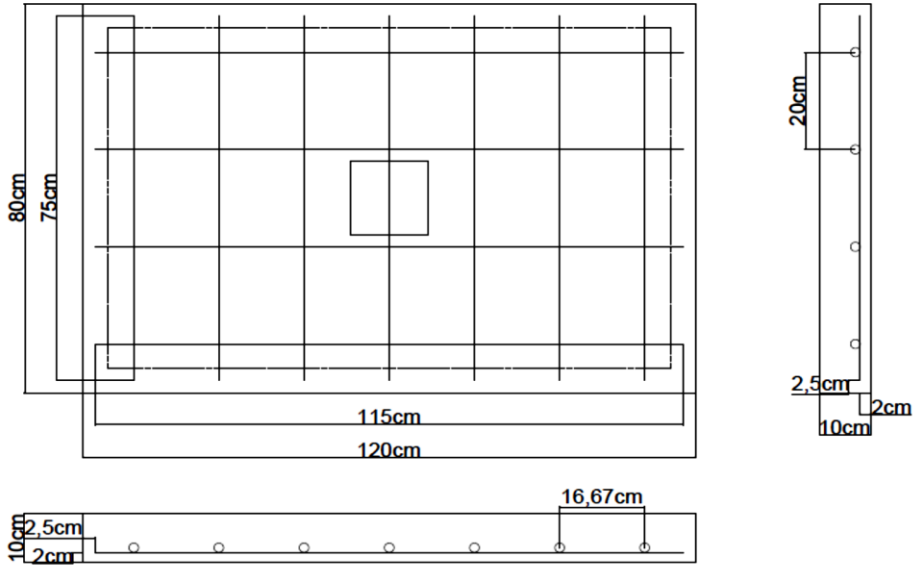
3.5- الدراسة العددية :Numerical Study

تمت دراسة البلاطة بأبعاد $1200*800*100$ mm ، ومسلحة في الجزء السفلي (منطقة الشد)، يوضح الجدول 4 نوع التسليح ومساحة المقطع العرضي، نسبة التسليح وقوة انضغاط الخرسانة لكل عينة بلاطة.

الجدول 4: يوضح العمق الفعال وتفاصيل ونسب التسليح الدنيا المسموحة.

| ρ_f % طولي | ρ_f % عرضي | D_f (mm) | A_f (mm ²) | f'_c (MPa) | العينة المدروسة |
|--------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| 0.0030 | 0.006 | 75 | 550 | 25 | Steel |
| 0.0027 | 0.0042 | 77 | 352 | 25 | GFRP |

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM



الشكل 2: المسقط الأفقي والمقاطع العرضية للبلاطة إضافة إلى أبعادها والتباعد بين قضبان التسليح.

تمت نمذجة عينات من البلاطات المدروسة في هذا البحث باستخدام برنامج Abaqus وفق كودات التصميم المستخدمة، حيث تم تعريف خصائص المواد (البيتون وقضبان التسليح) كما هو موضح في الجداول 5-6، وطبقت الأحمال في منتصف البلاطة على صفيحة أبعادها 15*15cm وبسماكة 2cm ويوضح الشكل 2 نموذج للبلاطة المدروسة.

الجدول 5: المعاملات المدخلة على البرنامج الخاصة بمادة البيتون، الوزن الحجمي، معامل المرونة، معامل بواسون.

| بلاطة SL-GFRP& SL-Steel | المعاملات المدخلة |
|-------------------------|-------------------------|
| 25 | $f_c \text{ N/mm}^2$ |
| 25 | $\gamma \text{ KN/m}^3$ |

| | |
|----------|--------------|
| 28960.41 | $E_c N/mm^2$ |
| 0.2 | ν |

الجدول 6: المعاملات المدخلة على البرنامج الخاصة بالتسليح.

| SL-GFRP | SL-Steel | المعاملات المدخلة |
|---------|----------|-------------------------|
| 17.6 | 78.6 | $\gamma KN/m^3$ |
| 1000 | 400 | $f_y N/mm^2$ |
| 42000 | 210000 | $E_s N/mm^2$ |
| 0.25 | 0.3 | ν |
| 0 | 0.053 | Plastic strain N/mm^2 |

الجدول 7: المعاملات الخاصة بنموذج concrete_damage_plasticity.

| μ | k_c | F_{b0}/F_{c0} | e | ψ | المعيار |
|--------|-------|-----------------|-----|--------|---------|
| 0.0005 | 0.667 | 1.16 | 0.1 | 36 | القيم |

1.3.5 - خطوات النمذجة :

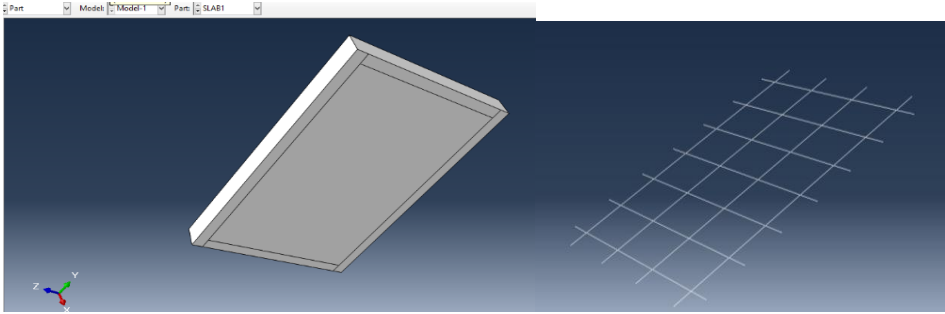
تم استخدام عناصر C3D8R لتمثيل جسم البلاطة، وعناصر T3D2 لتمثيل قضبان التسليح (الشكل 3)، ضمن شبكة غير منتظمة (unstructured mesh) مع مناطق تحسين محلي (refinement) حول مناطق التحميل، حجم العنصر النهائي بلغ 8mm بعد إجراء دراسة تقارب الشبكة (Mesh Convergence) أظهرت استقرار النتائج عند هذا الحجم (الشكل 6).

شروط الاستناد تم تمثيلها بقيود كاملة على الحواف الأربعة، مع السماح بالحركة الرأسية في نقاط التحميل، تم تمثيل التماسك بين الخرسانة والتسليح باستخدام تقنية embedded region (الشكل 5) دون افتراض perfect bond.

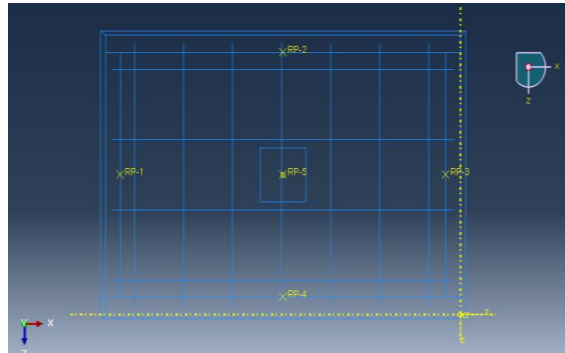
نموذج الضرر المستخدم للخرسانة هو Concrete Damage Plasticity (CDP)، وتم إدخال منحنيات الإجهاد-تشوه للضغط والشد بناءً على بيانات مخبرية، تم تتبع تطور التشققات من

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM

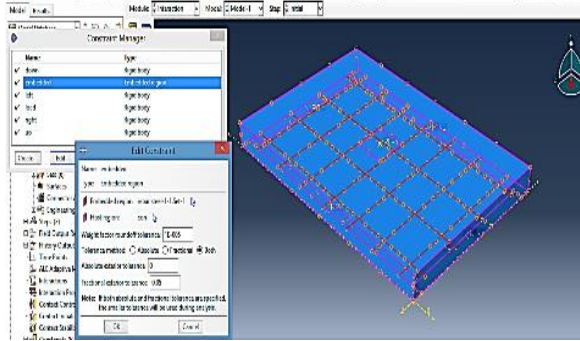
خلال توزيع الضرر داخل العناصر، دون استخدام فصل فعلي للعناصر، تم تطبيق الحمل باستخدام displacement control عبر صفيحة تحميل صلبة (الشكل 7)، وتم تمثيل التلامس باستخدام contact pair بين الصفيحة و سطح البلاطة.



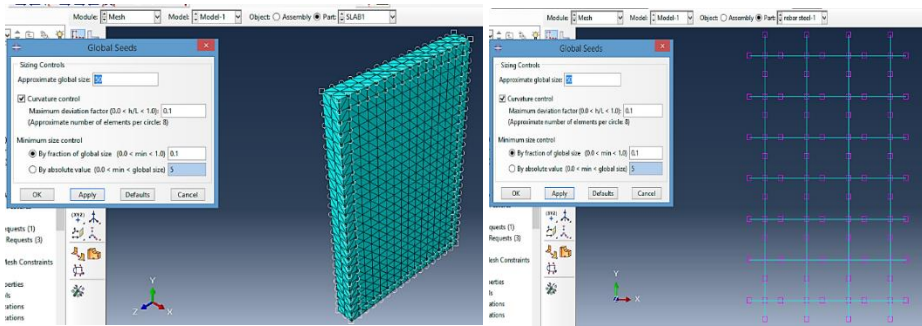
الشكل 3: تصميم البلاطة وشبكة التسليح وإسناد المواد الخاصة بهما.



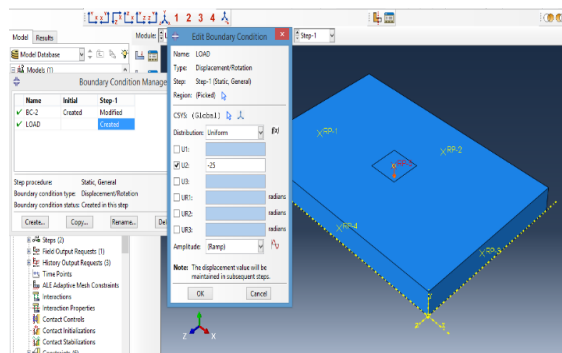
الشكل 4: المسقط الأفقي للبلاطة بعد دمج شبكة التسليح وتحديد موقع صفيحة التحميل.



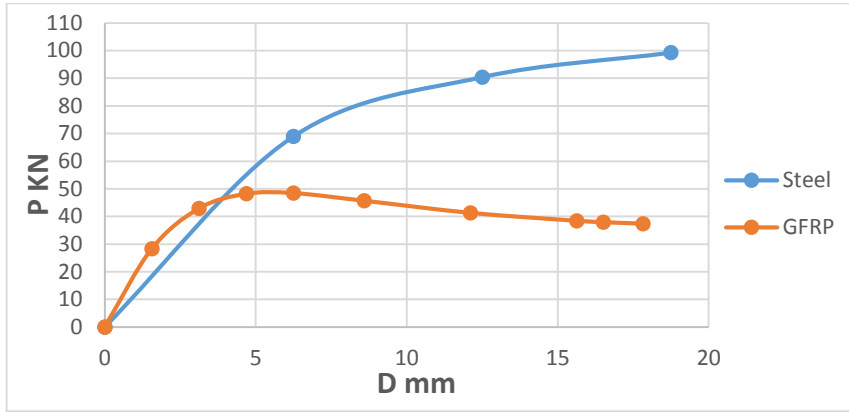
الشكل 5: طريقة التقيد المضمنة لتسليح الفولاذ و GFRP.



الشكل 6: تطبيق الشبكة النمذجية mesh على البلاطة الصلبة وشبكة التسليح المصنوعة من الفولاذ و GFRP.



الشكل 7: تطبيق الإزاحة عند نقطة التحميل.



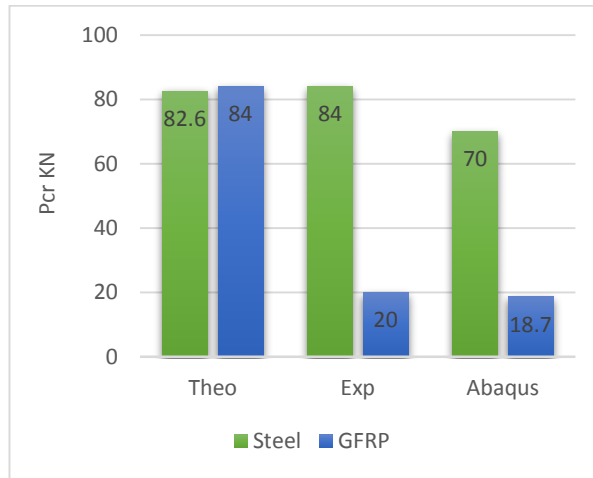
الشكل 8: علاقة الحمل والانتقال الموافقة لنتائج برنامج Abaqus في البلاطة المسلحة بقضبان Steel/GFRP.

6 - النتائج التحليلية مقارنة بالتجريبية Analytical results compared to experimental results

تُظهر البلاطات المسلحة بالفولاذ توافقاً جيداً بين النتائج النظرية (وفق الكود الأمريكي ACI 318) والنتائج التجريبية، نظراً لتقارب آلية الانهيار المفترضة (انحناء مرن) مع ما تم رصده فعلياً في التجربة، أما البلاطات المسلحة بقضبان GFRP، فقد أظهرت اختلافاً واضحاً في حمولة الانهيار، حيث افترض الكود انهياراً بالانحناء، بينما أظهرت التجربة انهياراً بالتقرب، وهو ما يتفق مع ما ورد في المراجع [1]، [11]، ويُعزى ذلك إلى انخفاض صلابة GFRP في مناطق التركيز وسلوكه الهش نسبياً في منطقة التقرب، كما أن العوامل التشغيلية مثل التماسك الفعلي بين الخرسانة والتسليح، وتوزيع التشققات، تؤثر على النتائج التجريبية ولا تُؤخذ بالكامل في الحسابات النظرية. في المقابل، أظهرت نتائج المحاكاة العددية باستخدام برنامج Abaqus توافقاً جيداً مع التجربة، نتيجة تمثيله لآلية الانهيار الواقعية وتضمينه لنموذج الضرر للخرسانة (CDP) الذي يسمح بتمثيل المرونة بعد التشقق، كما هو موضح في الجدول 8.

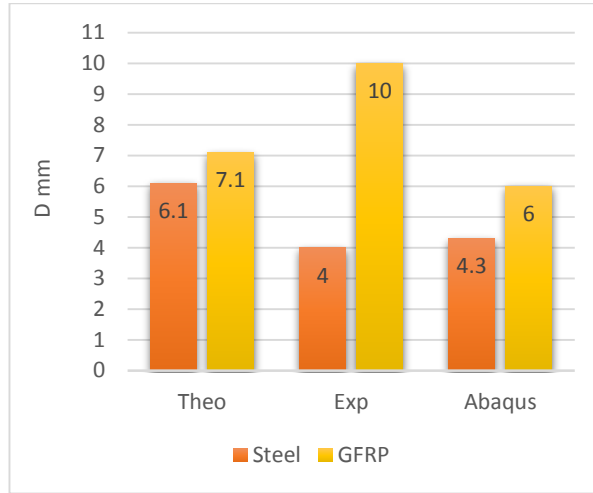
الجدول 8: يوضح المقارنة بين قيم حمولات الانهيار وحمولات التشقق والسهم الناتجة عن الحسابات باستخدام علاقات الكودات ونتائج التجارب وبرنامج Abaqus

| GFRP | | | Steel | | | |
|--------|-----|------|--------|-------|------|--------------------|
| Abaqus | Exp | Theo | Abaqus | Exp | Theo | |
| 18.7 | 20 | 84 | 70 | 84 | 82.6 | P_{cr} KN |
| 49.8 | 50 | 91 | 91 | 90.46 | 90 | P_{u-fail} KN |
| 6 | 10 | 7.1 | 4.3 | 4 | 6.1 | D mm |

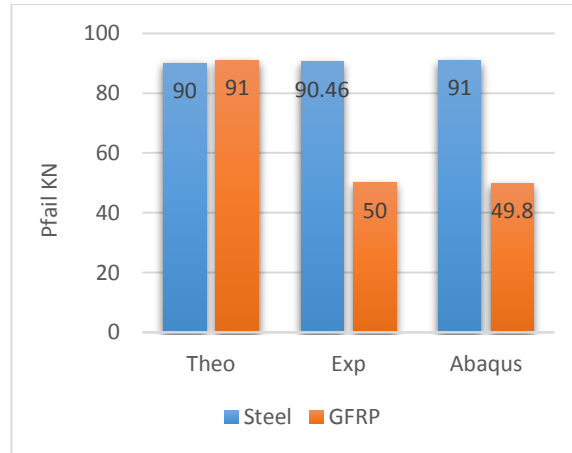


الشكل 9: قيم حمولة التشقق وفق طرق الحساب الثلاث باختلاف نوع التسليح Steel/GFRP.

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM



الشكل 10: قيم السهوم وفق طرق الحساب الثلاث باختلاف نوع التسليح Steel/GFRP.



الشكل 11: قيم حمولة الانهيار وفق طرق الحساب الثلاث باختلاف نوع التسليح Steel/GFRP.

• تم حساب الخطأ النسبي لنتائج حمولة الانهيار (Pu) باعتبارها المؤشر الأساسي للسلوك

الإنشائي كما هو موضح في الجدول 9.

الجدول 9: الخطأ النسبي لحمولة الانهيار بين النتائج التجريبية والنظرية (الكود) والعديدية (Abaqus).

| GFRP | | Steel | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| Diff ₂ % | Diff ₁ % | Diff ₂ % | Diff ₁ % | |
| 0.4 | 82 | 0.59 | 0.5 | P _{u-fail} KN |

حيث

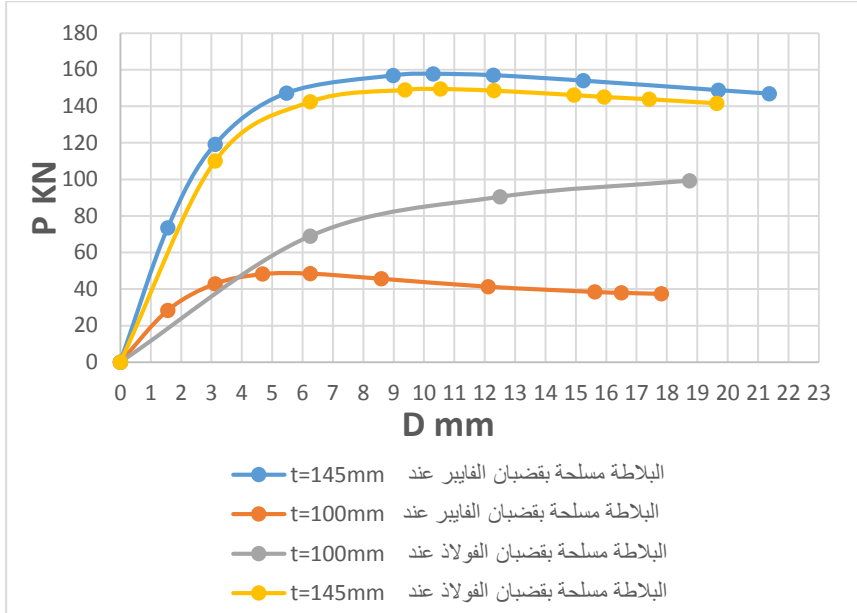
$$\text{Diff}_1 = \text{Diff}_{\text{code-exp}} = \frac{|P_{u\text{code}} - P_{u\text{exp}}|}{P_{u\text{exp}}} \times 100$$

$$\text{Diff}_2 = \text{Diff}_{\text{Abaqus-exp}} = \frac{|P_{u\text{Abaqus}} - P_{u\text{exp}}|}{P_{u\text{exp}}} \times 100$$

بلغ الخطأ النسبي بين نتائج الكود الأمريكي ACI 318 والتجربة المخبرية في البلاطة المسلحة بقضبان GFRP 82%، يُعزى هذا التباين إلى اختلاف آلية الانهيار إضافة إلى الأسباب الواردة في بداية الفقرة 6، وهذه الحالة تستدعي تعديل النموذج التصميمي أو إدخال معاملات تصحيحية لتكون قيمة الخطأ ضمن الحدود المسموحة.

من أجل تلافي مشكلة الثقب، قمنا بإعادة نمذجة البلاطة بواسطة برنامج Abaqus بزيادة سماكتها إلى 145mm حسب الشرط الوارد في الكود الأمريكي واستخدام قضبان بقطر $\varphi=10\text{mm}$ ، أظهرت نتائج المحاكاة تحسناً ملحوظاً في الأداء حيث انخفضت قيم الانتقال وزادت مقاومة البلاطة للقص الثاقب.

دراسة مقارنة لأداء البلاطات الخرسانية ثنائية الاتجاه تحت أنظمة تسليح كاملة بالفولاذ و GFRP: وفق الكودين السوري والأمريكي ونمذجة FEM



الشكل 12: علاقة الحمل والانتقال الموافق لنتائج برنامج Abaqus في البلاطة المسلحة

بقضبان الفايبر عند $f'_c = 25\text{MPa}$

بزيادة السماكة تزداد قيمة العمق الفعال مما يزيد مقاومة الثقب ويقلل تركيز الإجهاد حول محيط تطبيق القوة، وبالتالي تحسين الأداء في مرحلة الخدمة من حيث الانحرافات والتشققات.

العلاقة المقترحة لتحديد السماكة اللازمة:

$$V_u \leq \phi * V_{cr} = \phi * 4 * \sqrt{f'_c} * b_0 * d$$

ومنها تستخرج قيمة d المطلوبة وبالتالي نحصل على قيمة السماكة الإجمالية للبلاطة.

$$h_{req} = d + c + \frac{\phi_{bar}}{2}$$

7- دراسة الجدوى الاقتصادية:

- أظهرت الحسابات أن الكلفة الأولية للبلاطة المسلحة بقضبان الفولاذ أقل بنسبة 9.69%. مقارنة بالبلاطة المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية (GFRP)، وذلك ضمن نفس الشروط الهندسية، كما تبين أن زيادة سماكة البلاطة المسلحة بقضبان GFRP أدت إلى ارتفاع الكلفة بنسبة 45%، وهو ما يعكس حساسية الكلفة الأولية تجاه التعديلات التصميمية.
- في المقابل، تشير دراسة منشورة من قبل شركة [13] (Unicomposite (2025) إلى أن استخدام GFRP يمكن أن يوفر ما يصل إلى 50% من الكلفة الكلية خلال دورة حياة المنشأ، هذا التناقض الظاهري يُفسر هندسياً من خلال التمييز بين الكلفة الأولية والكلفة الكلية طويلة الأمد.
- الكلفة التي حسبناها تمثل فقط كلفة التنفيذ المباشر (مواد، صب، تسليح)، بينما تحليل Unicomposite يشمل أيضاً:
 - كلفة الصيانة الدورية للفولاذ (إزالة الصدأ، إعادة الطلاء، إصلاح التشققات).
 - كلفة التعطل أو الإغلاق الجزئي للمنشأة أثناء الإصلاح.
 - كلفة إعادة التأهيل بعد التآكل في البيئات البحرية أو الصناعية.
- تُظهر الدراسة أن كلفة صيانة الفولاذ خلال 30-50 سنة في البيئات القاسية قد تصل إلى 25-40% من كلفة التنفيذ الأصلية، بينما لا تتطلب GFRP أي تدخلات صيانة مرتبطة بالتآكل، وبالتالي رغم أن GFRP يبدو أعلى كلفة في البداية، إلا أن تحليلات دورة الحياة تُظهر تفوقه الاقتصادي على المدى الطويل، خاصة في المنشآت ذات عمر استثماري ممتد أو في ظروف بيئية قاسية.

8- الاستنتاجات Conclusions:

- عند تسليح البلاطة المدروسة بنسبة التسليح الدنيا في الاتجاه العرضي القصير حيث العزوم الأعظمية، وجد حسابياً أن البلاطة المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية تتحمل حمولة

وعزم أكبر بمقدار 1.2% من البلاطة المسلحة بقضبان الفولاذ، ومع ذلك لم تصل البلاطة المسلحة بقضبان GFRP إلى هذه الحمولة في الواقع بسبب حدوث الثقب عند الحمولة 50KN، وذلك لأن سماكة البلاطة غير كافية.

• قيم السهوم في البلاطة المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية أكبر من سهوم البلاطة المسلحة بقضبان الفولاذ بمقدار 27.3%، ويعزى ذلك إلى أن معامل مرونة GFRP أقل بحوالي 5 مرات من معامل مرونة الفولاذ.

• عند تسليح البلاطة بقضبان الألياف الزجاجية بنسبة تسليح تساوي نسبة التسليح التوازنية، يكون هناك احتمال أكبر لانتهيار البلاطة بالثقب لذا يجب أن تكون أكبر من هذه القيمة.

• أظهرت علاقات الكود السوري توافقاً نسبياً مع علاقات الكود الأمريكي لكن الأخير كان أكثر وضوحاً، فوجب التنويه إلى ضرورة إدخال معامل مرونة قضبان التسليح E كنطاق متغير عند حساب السهوم وفق الكود السوري وتطبيق معامل تعديل لتأثير الزمن.

• قورنت النتائج التجريبية بالحسابات التحليلية للمعايير الدولية، ونظراً لعدم تضمين التحليل التجريبي جميع المعاملات في التعبيرات الرياضية، كان من المتوقع أن تتفوق النتائج التجريبية على الحسابات التحليلية، وقد أثبتت نتائج هذه الدراسة ذلك بشكل صحيح.

9- التوصيات Recommendations:

• استناداً إلى النتائج التحليلية وجد أنه يجب اعتماد القص الثاقب شرط التحكم الأول في تصميم وتدقيق البلاطات المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية تحت الأحمال المركزة على صفائح صغيرة، حيث يجب استهداف آلية الفشل مباشرة عبر تدابير محلية تشمل زيادة سماكة البلاطة أو السماكة حول منطقة التحميل.

• بناءً على النتائج التجريبية و النمذجة العددية، يُوصى باستخدام قضبان GFRP في تسليح البلاطات العاملة باتجاهين ضمن المنشآت المعرضة للرطوبة والبيئات الكيميائية، شريطة تعديل السماكة التصميمية بزيادتها بنسبة تتراوح بين 40-45%

عن البلاطات التقليدية عند استخدام الحد الأدنى من التسليح، وذلك لتعويض انخفاض مقاومة القص الثاقب الناتج عن ضعف الصلابة النسبية لقضبان GFRP مقارنة بالفولاذ.

- نظراً لما أظهرته التجربة من فشل موضعي في منطقة التحميل للبلاطة المسلحة بقضبان GFRP، يُوصى بدراسة تأثير تحسين التماسك بين الخرسانة وقضبان GFRP باستخدام تقنيات مثل تعديل سطح القضيبي (Sand Coating) أو استخدام إضافات معدّلة للخلطة الخرسانية، وذلك بهدف تقليل التشوهات الموضعية وزيادة مقاومة القص الثاقب.

: 10-المراجع References

- [1]. ACI 440.1R-15 (2015) - **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced-Polymer (FRP) Bars**. American Concrete Institute, 88p.
- [2]. ALJAZAERI, Z et al (2020) – **Effectiveness of Using Carbon Fiber Grid Systems in Reinforced Two-Way Concrete Slab System**. ACI Structural Journal, Vol. 117, pp. 81–89 .
- [3]. ERFAN, A.M et al (2021) – **Flexural behavior of HSC one way slabs reinforced with basalt FRP bars**. Case Studies in Construction Materials, Vol. 14, pp. e00513.
- [4]. WANG, X et al (2020) – **Punching shear behavior of two-way coral-reef-sand concrete slab reinforced with BFRP composites**. Construction and Building Materials, Vol. 231, pp. 117113.
- [5]. BANTHIA, N et al (1995) – **Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Plastic Grid**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, pp. 252–257.
- [6]. MICHALUK, C.R et al (1998) – **Flexural behavior of one-way concrete slabs reinforced by fiber reinforced plastic reinforcements**. ACI Structural Journal, Vol. 95, pp. 353–365.
- [7]. TAERWE, L (2014) – **Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures**. CRC Press, Boca Raton, FL, 2nd ed., 456p.

[8]. AHMED, E.A et al (2017) – Case study: Design, construction, and performance of the la Chancelière parking garage’s concrete flat slabs reinforced with GFRP bars. Journal of Composites for Construction, Vol. 21, pp. 1–9.

[9]. ADAM, M.A et al (2021) – Structural behavior of high-strength concrete slabs reinforced with GFRP bars. Polymers, Vol. 13(17), pp. 2997.

[10]. SHILL, S.K et al (2022) – Performance of two-way concrete slabs reinforced with Basalt and carbon FRP Rebars. Journal of Composites Science, Vol. 6(3), pp. 74.

[11]. JU, M et al (2018) – Punching shear behavior of two-way concrete slabs reinforced with glass-fiber-Reinforced polymer (GFRP) bars. Polymers, Vol. 10(8), pp. 893.

[12]. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI (2014) - Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14). Farmington Hills, Mich. ACI Committee 318.USA.

[13]. UNICOMPOSITE COMPOSITE MATERIALS CO. (2025) – Fiberglass (GFRP) Rebar vs. Steel Rebar: Complete Guide to Performance, Cost & Applications. Unicomposite Composite Materials Co., 2025.

(In Arabic)

[14]. Syrian Code for Designing and Implementing Structures, Addition No.18 : Fiber Reinforced Polymer Bars (2018). Syrian Engineers Syndicate, 102p.

[15]. Syrian Arab Code for design and implementation of structures with reinforced concrete (2012). Syrian Engineer Candidate, 404p.

[16]. MIHOUB, A.M., HESHM, M.H (2024) – An experimental and analytical study of the performance of concrete beams reinforced with glass fiber bars (GFRP). Journal of Homs University, Vol. 64, No. 2, Homs, 22p.

[17]. ALMOUSADDI, M.R., ALAMODI, S.A (2024) – Experimental Study on Deflection Due to Bending in Concrete Beams Reinforced by BFRP Bars. Journal of Homs University, Vol. 64, No. 2, Homs, 34p.