

أثر كثافة وتوزيع الثقوب التاجية على سلوك البلاطات المختلطة المعرضة لحمولات شاقولية ساكنة

صفا علي (1)

مؤيد صبح (2)

الملخص: استخدمت البلاطات المختلطة المكوّنة من الجزء البيتوني والصفيحة الفولاذية منذ القدم، والتي ترتبط مع بعضها من خلال عناصر اتّصال مختلفة تؤمّن العمل المشترك. يُقدّم هذا البحث تقنية ربط بوصلات تامة مبتكرة، وهي عبارة عن ثقوب أو نتوءات تاجية الشكل في أجساد الصفائح الفولاذية كبديل عن النقوش التقليدية، والتي كانت تؤمّن اتّصال جزئي بين البيتون والصفائح الفولاذية.

تمّ في هذه الدراسة استعمال طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method)، والتحليل اللاخطّي الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطيّة المادّة (Materially Non-Linear Analysis, MNA)، تمّت نمذجة موديل لجزء من عصب للبلاطة المختلطة ومن ثمّ تعميم النتائج على البلاطة المختلطة بشكل كامل، هذه العملية أبدت دقة عالية في مطابقة النتائج وبساطة في النمذجة وسرعة في التحليل. كما تمّ في هذا البحث دراسة أثر تغيير كثافة الثقوب على مقدرة البلاطات المختلطة تحت حمولات شاقولية مركّزة سناتيكية.

بيّن هذا البحث أنّ استبدال النقوش التقليدية بالثقوب تاجية الشكل يؤدي إلى رفع المقدرة الانعطافية والقصية للبلاطة المختلطة، كما أنّ هناك إمكانية لتقليل كثافة الثقوب في منطقة معينة من الصفيحة الفولاذية مع المحافظة على نفس السلوك للبلاطة المختلطة.

أثر كثافة وتوزيع الثقوب التاجية على سلوك البلاطات المختلطة المعرضة لحمولات شاقولية ساكنة

كلمات مفتاحية: بلاطات مختلطة - أحمال شاقولية - طريقة العناصر المحدودة - تحليل لا خطّي.

(1) طالبة ماجستير في قسم الهندسة الإنشائية في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

(2) أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

The effect of the density and distribution of crown shaped punches on the behavior of the composite slabs under static vertical loads

Ssafa Ali ⁽¹⁾

Moaid Subh ⁽²⁾

Abstract: The composite slabs consisting of the concrete part and the steel plate have been used since ancient times, which are connected with each other through various communication elements that secure joint work. This research introduces an innovative technology of connecting with innovative connections, which are very small cuttings in the bodies of steel plates as an alternative to the traditional embossments that were Provides partial contact between concrete and steel plates.

In this study, the finite element method and the nonlinear analysis that takes into account the nonlinearity of the material were used. A part of chord is modeled for the composite slab and then generalizing the results to the composite slab completely, this process showed high accuracy in matching the results, simplicity in modeling and speed in the analysis, the study also examined the effect of changing the density of punches on the ability of composite slabs under static concentrated vertical loads. This research shows that replacing traditional embossments with coronary punches leads to an increase in the bending and shear ability of the composite slab and that there is a possibility to

reduce the density of the punches in a certain area of steel plate while maintaining the same behavior for composite slab.

Keywords: Composite Slabs – Vertical loading – Finite Element Method – Non-Linear Analysis.

⁽¹⁾ Master Student at Structural Department in Faculty of Civil Engineering – Damascus University.

⁽²⁾ Assistant Professor at Structural Department in Faculty of Civil Engineering – Damascus University.

1. مقدمة Introduction

استخدمت البلاطات المختلطة بداية عام 1938م في الولايات المتحدة، على الرغم من أنّ الصفائح المشكّلة على البارد استخدمت كقوالب دائمة فقط.

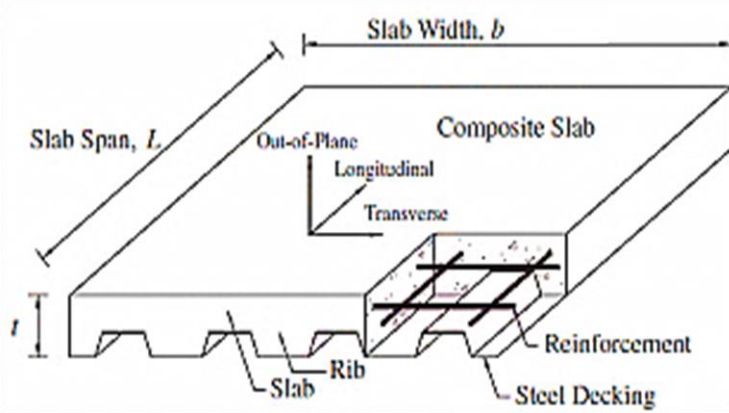
خلال عام 1960s، انتجت الصفائح الفولاذية المزودة بالنقوش وتطوّرت بشكل واسع، الصفائح أصبحت تشكّل تسليح الشدّ الأساسي للبلاطة، (Bridge & Patrick, 2002).

تستخدم صفائح الفولاذ المشكّلة على البارد مع النقوش (Embossments) بشكل واسع في أنظمة البلاطات المختلطة في الأبنية متعدّدة الطوابق، حيث تصبح جزء متكامل مع أنظمة الأرضيات.

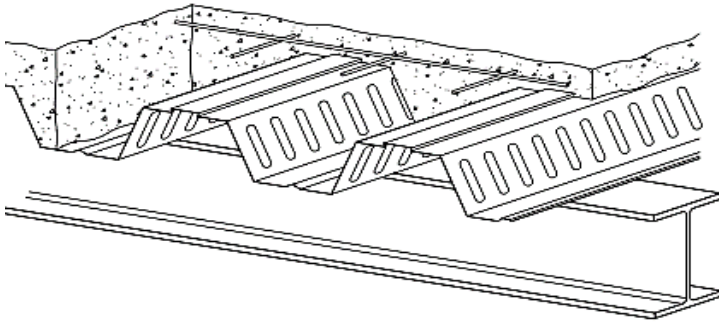
تعمل الصفائح المعدنية ككوفراج في مرحلة صبّ الخرسانة وكتسليح شدّ أساسي لاحقاً بعد التصلّب، فينتج لدينا بلاطات مختلطة ذات إنشاء سريع وأرضيات اقتصادية (الشكل 1).

تتهار البلاطات المختلطة بشكل عام نتيجة لقوى الفصل التي تحدث في المقطع نتيجة قوى القصّ الطولي. لضمان الفعل المختلط تحتاج لسطح ترابط قوي بين البيتون والصفحة الفولاذية.

تطور العجينة الإسمنتية سطح ترابط ضعيف وبالتالي غير كافية لتحفظ السلوك المختلط، لتأمين ذلك تمّ إيجاد وصلات قصّ موجودة بشكل طبيعي كجزء من الصفحة المعدنية وهي النقوش (Embossments) (الشكل 2).



الشكل 1 : بلاطة مختلطة مكوّنة من البيتون والصفحة الفولاذية [1]



الشكل 2 : بلاطة مختلطة مكوّنة من البيتون والصفحة الفولاذية المزودة بالنقوش

التقليدية (Embossments) [1]

إنّ نظام النقوش التقليدية المستخدم كنظام ربط في البلاطات المختلطة غير قادر على التغلّب على نماذج القصّ الطولي بغض النظر عن كل المحاولات لتحسين فعالية هذه النقوش (Embossments). اختبر نظام جديد يقدّم تقنية ربط بوصلات تامة مبتكرة، مكوّنة من عدد كبير من الثقوب التاجية الشكل (Punches) على جسد الصفائح الفولاذية كبديل عن أنظمة النقوش الشائعة. حصل هذا النظام على براءة اختراع من قبل جامعة بوليتكنيكا في كاتالونيا (Universitat Politècnica de Catalunya)، وكذلك

مكتب براءات الاختراع الأوروبية (European patent office EPO)، لذلك سمّي من قبل الباحثين نظام UPC (Ferrer & Marimon, 2018) [2] (الشكل 3).

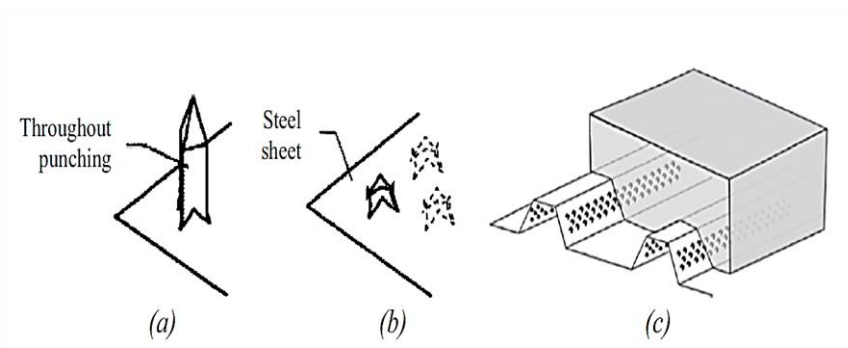


Fig. 7. a) Throughout square punching; b) Resulting cutting on steel sheet; c) Use on composite slab sheeting.

الشكل 3 : آلية تشكيل الثقوب التاجية الشكل على جسد الصفائح الفولاذية ومن ثم صبّ البيتون فوقها لتشكيل البلاطات المختلطة [2]

أجريت العديد من الدراسات والأبحاث المرجعية التي تتناول موضوع رفع مقدرة البلاطات المختلطة التي تتكوّن من البيتون والصفائح المعدنية وترتبط بينهما عناصر ربط مختلفة.

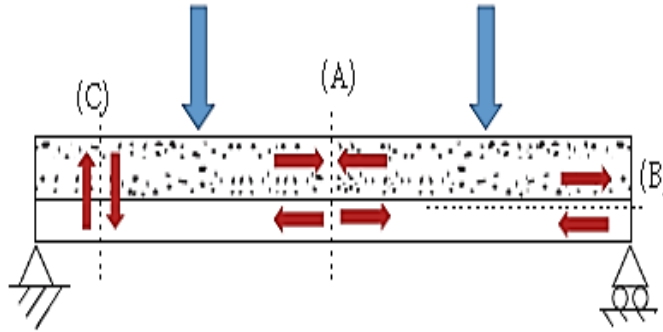
يعتمد التحليل الإنشائي للبلاطات المختلطة على أنماط انهيارها (Failure Modes).

نمط الانهيار الرئيسي للبلاطات المختلطة ينتج عن إجهادات الانعطاف والتراخي القصّي، حيث يوجد ثلاثة أنماط للانهيار [4] (Alvarez et al, 2016) (الشكل 4) وهي:

(A) نمط الانهيار الناتج عن الانعطاف وهو يتعلّق بمقاومة الانعطاف للبلاطات المختلطة، يسيطر هذا النمط على انهيار البلاطات المختلطة عندما إجهادات القصّ أقلّ من إجهادات الانعطاف، وهذا عملياً يتحقّق عندما لا يحدث انزلاق طولي بين البيتون والصفائح الفولاذية.

(B) نمط الانهيار الناتج عن القصّ الطولي وهو يتعلّق بالوصول لمقاومة القصّ الطولي للبلاطات المختلطة بين البيتون والصفحة الفولاذية نتيجة اتصالهما وذلك وفق عدّة طرق، عملياً يحصل الانهيار نتيجة حدوث انزلاق طولي بين البيتون والصفحة الفولاذية.

(C) نمط الانهيار الناتج عن القصّ الشاقولي وهو غير مسيطر غالباً بالمقارنة مع نمطي الانهيار الآخرين.



الشكل 4 : أنماط الانهيار للبلاطات المختلطة [4]

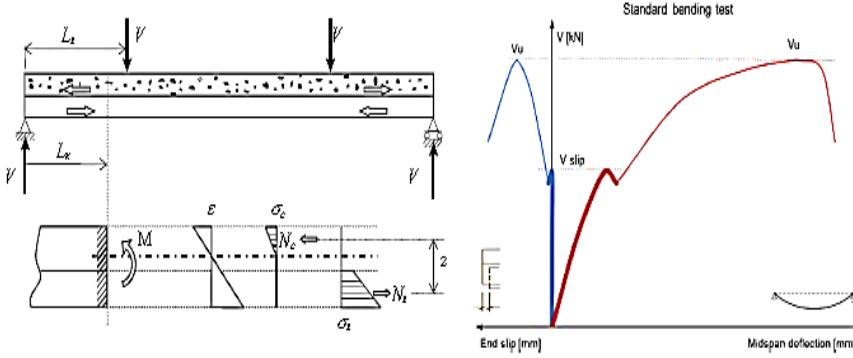
نظرية الوصلات في البلاطات المختلطة:

Theory of connection in composite slabs

1- الوصلات التامة: Full Connection

تنتقل قوى القصّ الطولي في هذه الحالة بشكل كامل، بالتالي استمرارية وخطية التشوهات في المقطع العرضي يمكن قبولها، حيث كلتا المادتين تعملان معاً كعنصر إنشائي واحد. بشكل عام تحفظ الوصلات التامة دائماً في مرحلة التحميل الأولي، بعد ذلك عندما تزداد الحمولة معظم البلاطات المختلطة ذات الصفائح الفولاذية المزودة بالنقوش التقليدية لا

تستطيع الاحتفاظ أكثر بمتطلبات نقل قوى القصّ الطولي، بالتالي الانزلاق الأول يحدث بين البيتون والصفائح الفولاذية حيث دخلنا بمرحلة الوصلة الجزئية (الشكل 5).



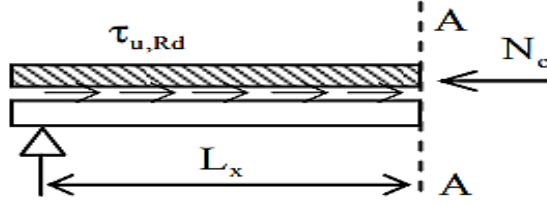
الشكل 5 : سلوك بلاطة مختلطة مكونة من البيتون والصفيحة الفولاذية في حالة الوصلة التامة [2]

2- الوصلات الجزئية: Partial Connection

في مرحلة الوصلة الجزئية، قوى القصّ الطولية بين المواد لا تستطيع أن تزيد عن قوى الربط المطلوبة، لذلك تبدأ الوصلات المشتركة بالتكسر على طول مجاز القصّ والانزلاق يبدأ بالنمو والتزايد.

نجد بأن استمرارية التشوهات في المقطع العرضي للبلاطة المختلطة لا يمكن قبولها، وسيتشكل محوران محايدان خلال المقطع العرضي للبلاطة المختلطة أحدهما من أجل مقطع الصفيحة الفولاذية، والذي يكون إما داخل أو خارج الصفيحة والمحور الآخر ضمن البيتون، ولكن خطية التشوهات لكل مادة وتساوي الانحناءات لازال يفترض (الشكل 7).

نتيجة للاتصال الجزئي بين البيتون والصفيحة الفولاذية، عملياً سطح الاتصال لن ينقل مقاومة البلاطة البيتونية على الضغط كاملة N_{cf} وإنما جزء منها يتعلق بدرجة القص η وهو NC ، كما بيّن الشكل (6).



الشكل 6 : آلية نقل مقاومة البلاطة البيتونية على الضغط إلى الصفيحة الفولاذية [3]

بحيث تحدّد قوّة القصّ الطولي المنقولة NC وفق العلاقة الآتية [3] (Eurocode 4, 2004):

$$N_c = \tau_{u,Rd} \cdot b \cdot L_x \leq N_{cf}$$

يتمّ تحديد إجهاد القصّ الطولي τ_u من تجارب الانعطاف بمقياس كامل، وذلك وفق العلاقة الآتية:

$$\tau_u = \frac{\eta_{test} N_{cf}}{b(L_s + L_0)}$$

حيث:

η_{test} : درجة وصلة القصّ N_c / N_{cf}

N_c : قوّة الضغط في الخرسانة.

N_{cf} : قوّة الضغط في الخرسانة في حالة الاتّصال التام.

b : عرض المقطع العرضي للبلاطة المختلطة.

L_0 : المسافة من محور المسند إلى الطرف الحر للبلاطة.

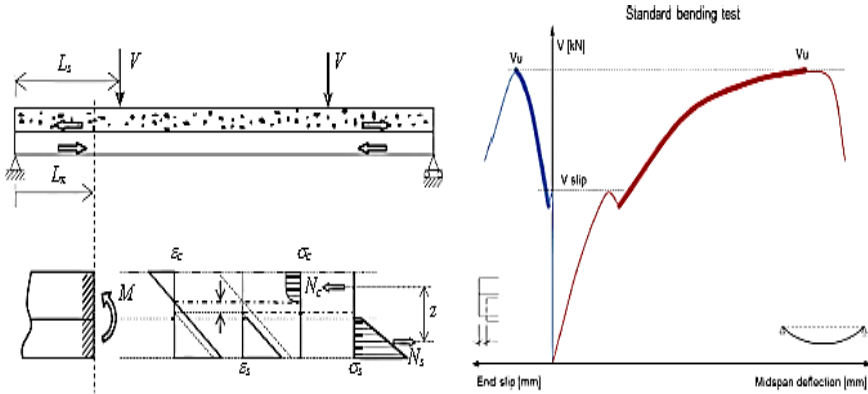
L_s : مجاز القص.

إذا تم أخذ مقاومة القص الطولية الإضافية الناتجة عن أخذ رد الفعل عند المسند في الاعتبار، تصبح المعادلة:

$$\tau_u = \frac{\eta_{test} N_{cf} - \mu V_t}{b(L_s + L_0)}$$

μ : معامل الاحتكاك (يؤخذ عادةً على أنه 0.5).

V_t : رد الفعل عند الاستناد.



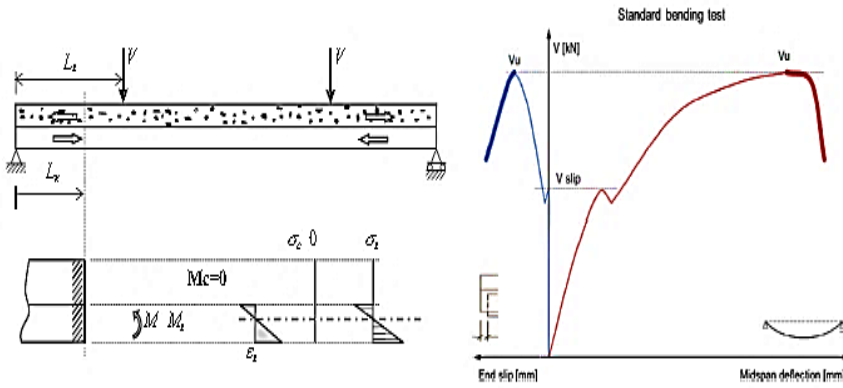
الشكل 7: سلوك بلاطة مختلطة مكونة من البيتون والصفحة الفولاذية في حالة

الوصلة الجزئية [2]

3- الوصلات المعدومة: Null Connection

في مرحلة الوصلة المعدومة، قوى القص الطولية بين المواد لا تنتقل نهائياً، بالتالي أصبحت البلاطة المختلطة عبارة عن مجموع عنصرين مستقلين يعملان بدون أي وصلات مشتركة.

فعلياً الصفيحة الفولاذية هي العنصر المقاوم الوحيد، حيث أنّ البيتون لا يستطيع أن يقاوم إجهادات الشدّ ويتشقق بالكامل، بالتالي الانهيار لمعظم تجارب الانعطاف يكون عند بدء مرحلة الوصلة المعدومة بسبب الانفصال الكامل بين البيتون والصفيحة الفولاذية. (الشكل 8).



الشكل 8 : سلوك بلاطة مختلطة مكوّنة من البيتون والصفيحة الفولاذية في حالة الوصلة المعدومة [2]

2. هدف البحث Objectives

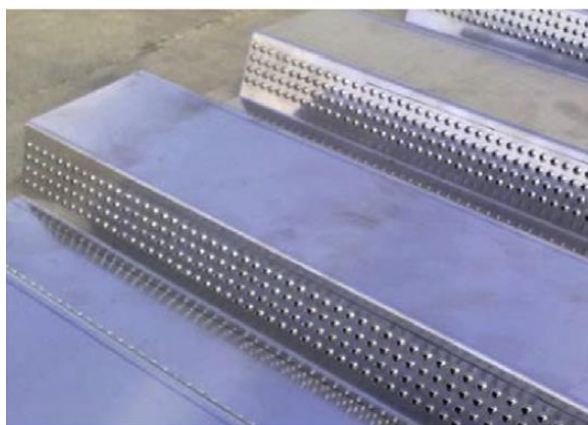
- أجريت دراسات على عينات عشوائية بكثافة منتظمة ومحدّدة للثقوب على كامل جسد الصفيحة مما يتطلّب جهد وإضعاف للكوفراج، لذلك تنصح هذه المقالة بدراسة التوزيع الأمثل اللازم لهذه الثقوب التاجية تحت حالات تحميل ستاتيكية معينة، بحيث نزيد من التفاعلية والانسجام بين البيتون والثقوب ومن مقاومة

المقطع في مرحلة صبّ الخرسانة، من خلال تقليل تركّز الإجهادات في منطقة الثقوب كنتيجة لتقليل عدد الثقوب.

- التحقّق من النموذج العددي من خلال المقارنة مع مقالة تجريبية (Ferrer& Marimon,2018)، وذلك باستعمال طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method ،FEM) وتحليل لا خطّي يأخذ بعين الاعتبار لا خطيّة المادة (Materially Non-linear Analysis ،MNA).

3. مواد وطرق البحث Materials and Methodology

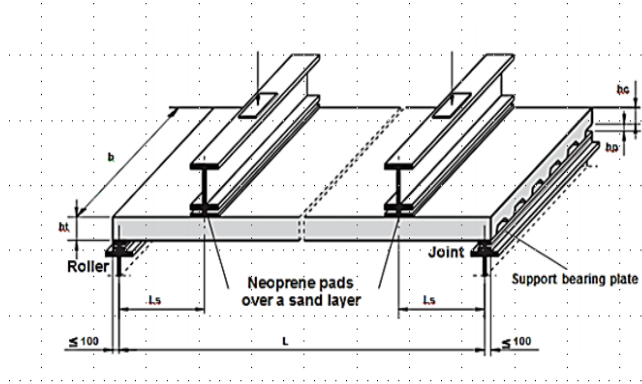
النموذج المدروس ضمن هذه المقالة هو بلاطة مختلطة، تتكوّن من البيتون والصفحة الفولاذية المزوّدة بالثقوب تاجية الشكل بتباعد بينها مقداره 20mm (الشكل 9)، كما تتكوّن البلاطة المختلطة من ثلاث أعصاب.



الشكل 9: الصفائح الفولاذية المزوّدة بالثقوب التاجية الشكل على جسدها [2]

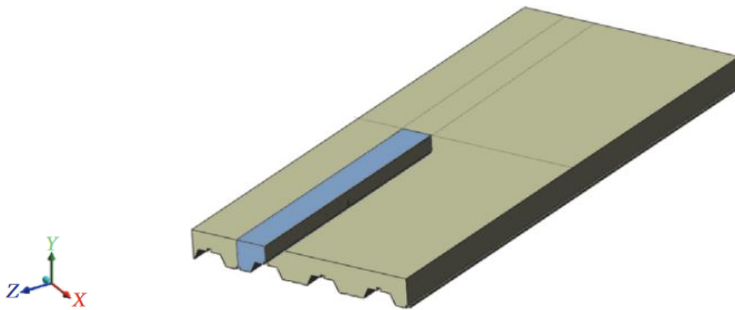
باستعمال طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) والبرنامج (ABAQUS -Ver 6.14.1)، تمّت نمذجة بلاطة مختلطة مكوّنة من قسمين هما البيتون والصفحة الفولاذية المزوّدة بالثقوب أو النتوءات تاجية الشكل (Punches) ،

وذلك تحت تأثير حمولات مركزة والمدروسة تجريبياً من قبل الباحثين (Ferrer & Marimon, 2018)، والمبين في الشكل (10).



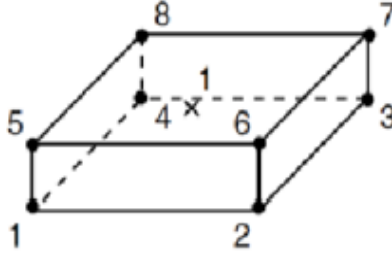
الشكل 10 : بلاطة مختلطة معرضة لتحميل سناتيكي [2]

عملية نمذجة البلاطات المختلطة بشكل كامل في دراسات سابقة كانت معقدة وبحاجة لوقت طويل للتحليل. قام الباحث [4] (Alvares et al, 2007) ورفاقه كنتيجة لتناظر البلاطة المختلطة بنمذجة ربع عصب من أعصاب البلاطة المختلطة، كما في الشكل (11) ومن ثمّ تعميم النتائج على البلاطة المختلطة بشكل كامل، هذه العملية أبدت دقة عالية في مطابقة النتائج وبساطة في النمذجة وسرعة في التحليل، وهذا تمّ اعتماده في النمذجة الحالية.



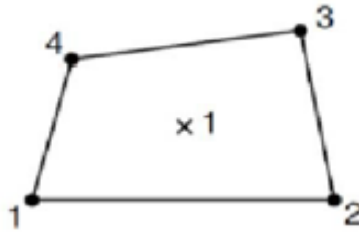
الشكل 11 : ربع عصب من بلاطة مختلطة المستخدم في النمذجة [4]

تم استخدام العنصر C3D8R(Solid element) لنمذجة الجزء البيتوني من البلاطة المختلطة، وهو عنصر صلب ثلاثي الأبعاد ذو ستة وجوه وبثمانية عقد لكل منها ست درجات حرية (ثلاثة انتقالات وثلاثة دورانات)، كما يبين الشكل (12) العنصر المستخدم في (Abaqus 6-14 Documentation, 2014) [7].



الشكل 12 : تمثيل العنصر C3D8R الفراغي ذي ثمانية عقد [7]

تم استخدام العناصر الصفائحية S4R (Shell element) لنمذجة الجزء الفولاذي من البلاطة المختلطة، وهو عنصر مساحي ثنائي البعد ذو أربع عقد، كما يبين الشكل (13) العنصر المستخدم في (Abaqus 6-14 Documentation, 2014) [7].

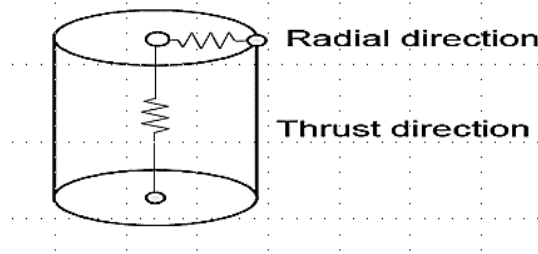


الشكل 13 : تمثيل العنصر الصفائحي S4R ذي أربع عقد [7]

والرمز R للدلالة على تخفيض نقاط غاوس لنقطة واحدة.

تمّ استخدام عناصر اتّصال (Radial-Thrust connector element) من النوع الضغطي-الشعاعي لتشكيل سطح التفاعل بين البيتون والصفحة، كما يبين الشكل (14) العنصر المستخدم في (Abaqus 6-14 Documentation, 2014) [7].

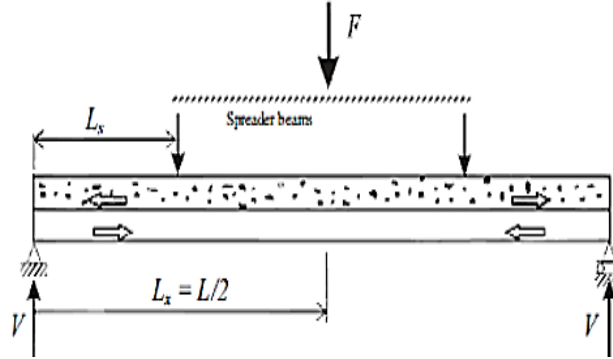
هو عبارة عن عنصر اتّصال يصل بين عقدتين متغير الصلابة باتجاهين، ويتمّ تمثيله بنابضين الأول يملك صلابة طولية، بالتالي يحكم سلوك القصّ بالاتجاه الطولي وهي الخاصية الأكثر الأهمية التي تتحكّم بسلوك البلاطات المختلطة (Radial direction)، والثاني يملك صلابة رأسية تعمل على تحقيق الترابط بين البيتون والصفحة الفولاذية بالاتجاه الرأسي (Thrust direction).



الشكل 14 : عنصر اتّصال من النوع الضغطي-الشعاعي لتمثيل الثقوب [7]

تمّ اعتماد شروط الاستناد للنموذج الممثل لربع عصب في البلاطة المختلطة المدروسة في التجربة (Ferrer & Marimon, 2018)، بحيث يكون متناظراً في المستوي Y-Z في كلا الجانبين بالاتجاه الطولي وفي المستوي X-Y في الطرف المقابل للمسند المتدرج، كما نفّذ المسند المتدرج في الطرف السفلي لنهاية الصفحة الفولاذية.

تمّ تطبيق حمولتين مركّزتين في التجربة المدروسة كما هو مبين في الشكل (15)، بالنسبة للنموذج العددي المعتمد كنتيجة للتناظر في التحميل أيضاً، تمّ تطبيق حمولة مركّزة واحدة تبعد ربع المجاز عن المسند لمتدرج، والتي تمّ تطبيقها في النمذجة عن طريق تطبيق انتقال بمكان وباتجاه الحمل وفق المحور y.



الشكل 15: بلاطة مختلطة معرّضة لعمولتين مركزتين [2]

تمّ استخدام طريقة (Concrete Damage Plasticity–CDP)، وهي إحدى ثلاث طرق تستخدم في برنامج ABAQUS لتعريف سلوك المواد والتي يوصف انهيارها بالمفاجئ أو الهشّ (Brittle)، إلا أنّ طريقة CDP تعتبر أفضل من بقية الطرق في أنّها تلحظ أثر التحميل الدوري (Cyclic loading) بعين الاعتبار، وتناقص مرونة المادّة بسبب التشوّهات اللدنة التي تحدث في المادّة، كما تلحظ هذه الطريقة أثر استرداد القساوة للمادّة الهشّة أو فيما يعرف بظاهرة اتساع وانغلاق الشقّ عند عملية الانتقال من الضغط إلى الشدّ أو من الشدّ إلى الضغط على التوالي عند أخذ حمولات دورية.

لتوصيف مادة البيتون في النموذج العددي ليحاكي الدراسة التجريبية المعتمدة (Ferrer & Marimon, 2018) [2]، حيث بلغت المقاومة المميزة على الضغط للبيتون 39Mpa، لا بدّ من تعريف علاقة إجهاد-تشوّه للمادّة أولاً، وبغياب المعلومات التجريبية تمّ الحصول على سلوك البيتون على الضغط بالاعتماد على المواصفة الأوروبية المخصّصة للبيتون العادي (Eurocode 2, 2004) [6]، حيث يسلك البيتون بدايةً سلوكاً مرناً ويتمّ تحديد حد المرونة كنسبة من المقاومة المتوسطة على الضغط للبيتون $(0.4F_{cm})$. عند هذا الحد تبدأ التشقّقات الدقيقة بالتشكّل ثمّ تأخذ العلاقة شكلاً لا مرناً حتّى الوصول للإجهاد الأعظمي الذي تتحمّله المادّة والذي يقابله التشوّه النسبي ϵ_{C1} . بعد هذه المرحلة تبدأ

مقاومة المادّة بالتناقص تدريجياً بسبب اتساع التشقّقات واتّصالها فيما بينها حتّى الوصول للانهيّار الكامل للمادّة عند التشوّه النسبي الحدّي للبيتون ϵ_{cu1} . بالتالي نجد العلاقة بين الإجهاد-التشوّه للبيتون حيث مجال التشوهات ($0 < \epsilon_c < \epsilon_{cu}$) حسب الكود الأوروبي [6] :

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$
$$k = 1.05 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}}, \quad \eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$$

F_{cm} : المقاومة المتوسطة على الضغط للبيتون بعد 28-يوم بشروط الحفظ النظامية وتقدر ب Mpa

F_{ck} : المقاومة المميزة على الضغط للبيتون عند عمر 28-يوم وتقدر ب Mpa، ووفقاً للكود الأوروبي [6] نجد العلاقة بينهما تعطى كما يلي:

$$F_{cm} = f_{ck} + 8$$

ولتحليل منحنى إجهاد-تشوّه يجب معرفة المقاومة المميزة على الضغط للبيتون والمساوية ل $f_{ck} = 39$ Mpa [1] ومعامل المرونة الطولي للبيتون E_{cm} .

E_{cm} : ميل الخط القاطع الواصل بين مبدأ الاحداثيات والنقطة على منحنى إجهاد-تشوّه الموافقة لإجهاد مساو ل $(0.4f_{cm})$ والذي يحدّد حسب الكود الأوروبي [6] من العلاقة الآتية:

$$E_{cm} = 22 * ((0.1 * f_{cm}) ^{0.3})$$

حيث تقدر f_{cm} ب Mpa و E_{cm} ب GPA، يحسب معامل المرونة الطولي للبيتون في الدراسة الحالية $E_{cm} = 34998.7$ Mpa

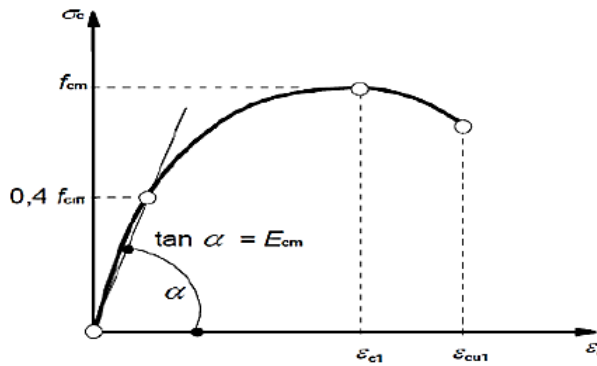
U : معامل بواسون يأخذ القيمة 0,2 حسب الكود الأوروبي (Eurocode 2, 2004).

K : في بعض المراجع يؤخذ كنسبة بين القساوة الابتدائية للبيتون E_{cm} والقساوة عند الإجهاد الأقصى E_{c1} .

ϵ_{c1} : التشوه النسبي عند الإجهاد الأقصى يحدّد ببعض المراجع بالقيمة 0.0022

ϵ_{cu1} : التشوه النسبي الأعظمي عند الانتهاء ويحدّد ب 0.0035

بالتالي تصبح علاقة الإجهاد - تشوه للبيتون على الضغط كما هو مبين بالشكل (16).



الشكل 16 : علاقة الإجهاد - تشوه للبيتون على الضغط [6]

في حالة الشد، سيتم الاعتماد على منحنى خطي لعلاقة إجهاد - تشوه للبيتون المبين في الشكل (17)، بالاعتماد على مقالة مرجعية (KMIECIK & KAMINSKI_2011) [8] والتي تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_t = f_{cm} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^n \quad \text{if } \epsilon_t > \epsilon_{cr},$$

n=0.5 حسب المرجع (KMIECIK & KAMINSKI_2011) [8].

يبدأ سلوك البيتون بشكل خطي مرن حتى الوصول إلى إجهاد الانتهاء الأعظمي على الشد والمقابل للتشوه النسبي الابتدائي للبيتون على الشد ϵ_{cr} الذي يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\varepsilon_{Cr} = \frac{F_{ctm}}{E_0}$$

Fctm: المقاومة الأعظمية على الشدّ حسب الكود الأوروبي.

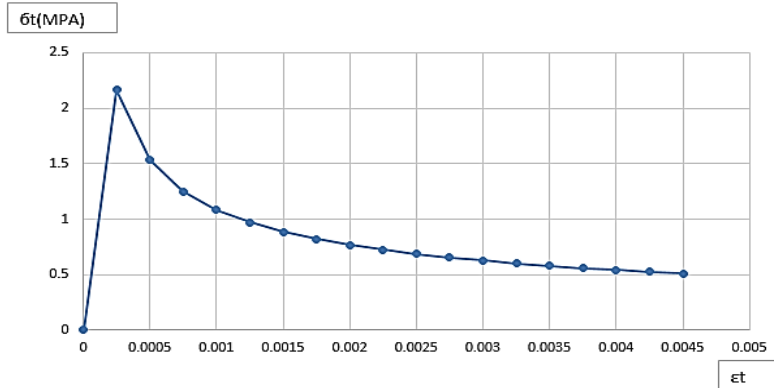
E0: معامل المرونة الابتدائي للمادة غير المتشققة.

والموافق لتشكّل أول شقّ دقيق في البيتون، بعدها يتوالى تشكّل الشقوق واتساعها وتتصل مع بعضها مترافقة مع انحدار في علاقة إجهاد-تشوّه وتسمّى هذه المرحلة مرحلة البيتون المتشقّق أو مرحلة تصلّب الشدّ (Tension stiffening).

مصطلح تشوّه التشقّق يستخدم في نموذج CDP، والهدف هو الأخذ بالحسبان ظاهرة تصلّب الشدّ (tension stiffening).

البيتون تحت الشدّ لا يعتبر جسماً مرناً بالتالي أي ظاهرة مثل تشابك الحصىات في الشق والتصاق البيتون والفولاذ بين الشقوق تؤخذ بالحسبان.

التشوّه بعد التشقّق ε_f^{ck} يحدّد كالفرق بين التشوّهات الكلية والتشوّه المرن للمادة غير المتضرّرة، وهو من المعطيات الأساسية لنمذجة مرحلة تصلّب الشدّ والتي تعطى بالعلاقة:



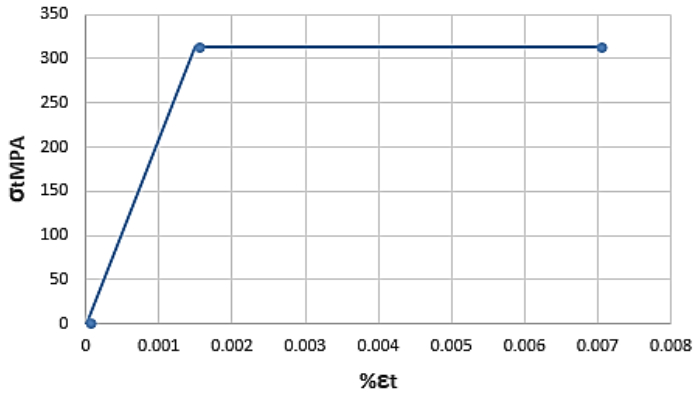
$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon t - \frac{\sigma t}{E0}$$

الشكل 17 : علاقة الإجهاد-التشوه النسبي لسلوك البيتون على الشد [6]

ينمذج الفولاذ كمادة مرنة لدنة تماماً الشكل (18)، حيث يبدأ سلوك الفولاذ مرناً خطياً حتى الوصول الى إجهاد الخضوع f_y ويساوي 313 MPa الذي يرافقه التشوه النسبي عند الخضوع ε_y وبحسب من العلاقة الآتية:

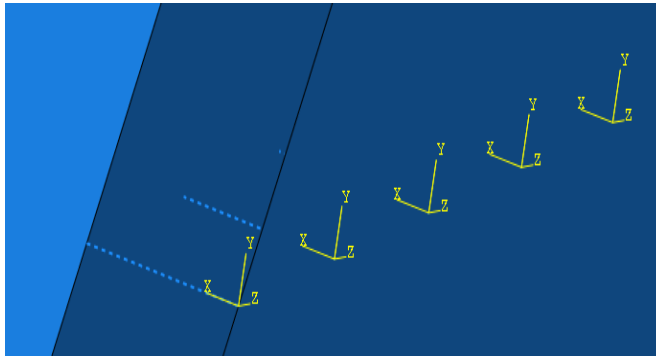
$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

E_s : معامل مرونة الحديد ويساوي 200 GPa، بعدها تم فرض سلوك الفولاذ لدناً مثالياً .Perfectly Plastic



الشكل 18 : مخطط الإجهاد - التشوه النسبي لفلواذ الصفيحة الفولاذية المعتمد في النمذجة

تمت الاستعانة ببرمجة (Python) لتنزيل المحاور عند العقد المتشكلة على كل من البيتون والصفيحة الفولاذية وذلك عند تقسيمها لعناصر محدودة، ومن ثم إنزال عناصر الاتصال التي تمثل الثقوب بين كل عقدتين، بحيث تقع إحداها على البيتون والثانية على الصفيحة الفولاذية، كما هو مبين في الشكلين (19) و (20).

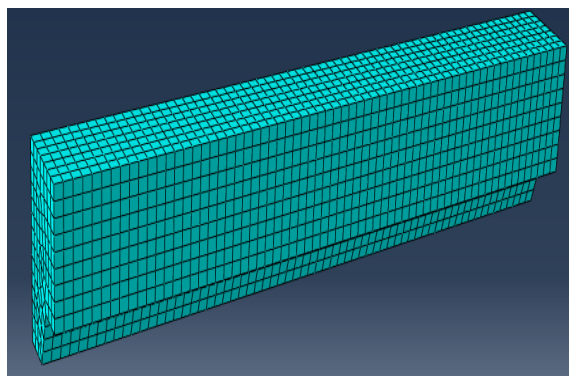


الشكل 19 : تشكيل المحاور عند العقد [7]



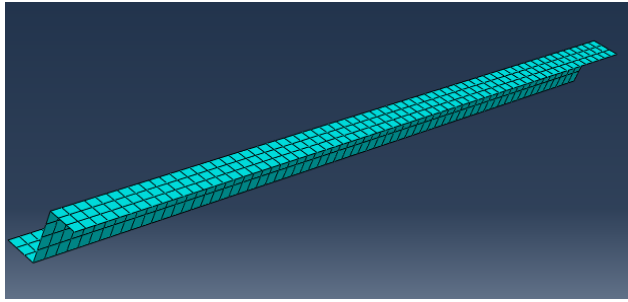
الشكل 20 : تشكيل عناصر الاتصال [7]

بما أنّ طريقة العناصر المحدودة هي طريقة عددية (Numerical Method)، تمّ تقسيم كل من البيتون والفولاذ لعناصر محدودة ب حجم 20mm كما في الشكلين (21) و(22)، بحيث يستفاد من هذا التقسيم في تشكيل العقد والتي سيتم إنزال عناصر الاتصال فيما بينها.



الشكل 21 : النموذج الفراغي المدروس ويظهر عليه تقسيم ربع عصب من الجزء

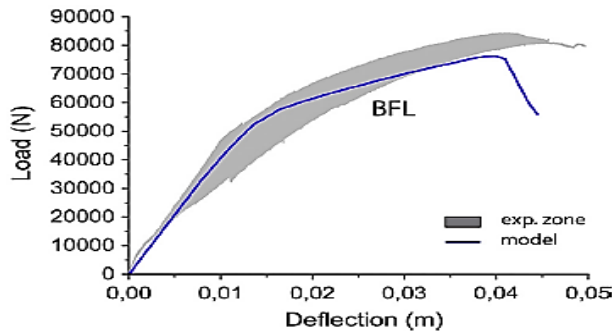
البيتوني للبلاطة المختلطة [7]



الشكل 22 : النموذج الفراغي المدروس ويظهر عليه تقسيم ربع عصب من الصفيحة الفولاذية للبلاطة المختلطة [7]

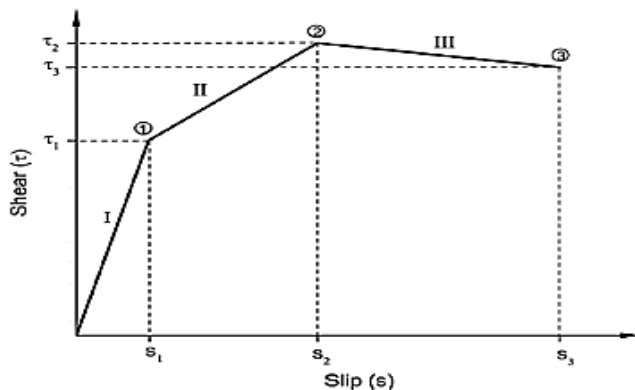
إنّ سلوك البلاطة المختلطة بالاتجاه الطولي من حيث شكل علاقة إجهاد القصّ-انزلاق لعنصر الاتّصال مشابه لشكل العلاقة بين القوّة-انتقال التجريبي تقريباً. (Martinez [5] etal, 2017)

حيث تمرّ البلاطة المختلطة بثلاثة أقسام خطية، القسم الأول يوافق اتّصلاً تاماً بين الصفيحة الفولاذية والبيتون وهذا يقابل درجة قصّ مساوية للواحد، والقسم الثاني يوافق اتّصلاً جزئياً ويقابل درجة قصّ بين الصفر والواحد، بينما القسم الأخير يعبر عن شكل الانهيار بعد الذروة فقط، بالتالي القسمان الأول والثاني هما المهمان في تحديد سلوك القصّ لعنصر الاتّصال، كما في الشكلين (23) و(24).



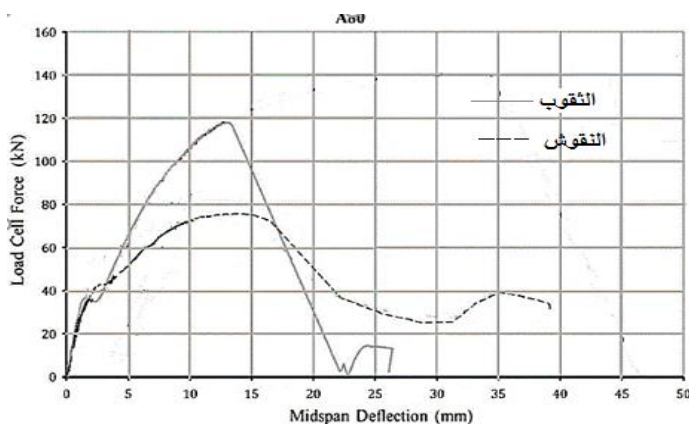
الشكل 23 : العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) والانتقال بمنتصف المجاز (المحور

الأفقي) [5]

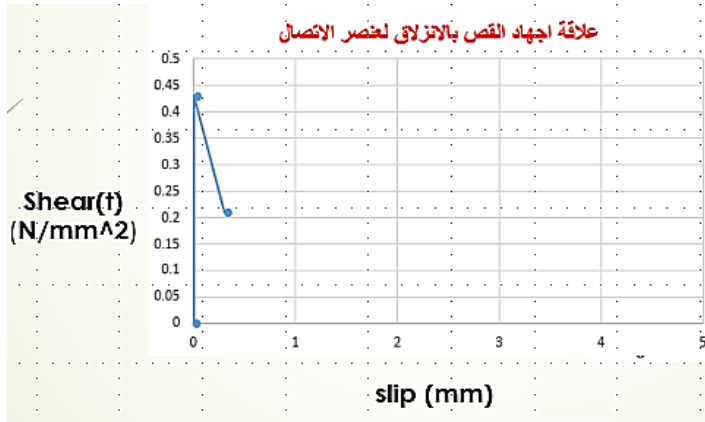


الشكل 24 : علاقة إجهاد القص-انزلاق لعنصر الاتّصال [5]

نجد البلاطة المختلطة المدروسة من حيث النتائج التجريبية تشكّل اتّصلاً تاماً حتى يحدث الانهيار عند الذروة كنتيجة لانزلاق طولي مفاجئ، بالتالي نجد علاقة إجهاد القص لعنصر الاتّصال المدروس مرّت بقسمين هما الاتّصال التام والانهيار، أي سلوك القصّ كان تقريباً خطياً حتى الانهيار، وهذا يتوافق مع شكل العلاقة بين القوّة-انتقال للعينة المدروسة، كما في الشكلين (25) و(26).



الشكل 25 : علاقة قوّة-انتقال [2]



الشكل 26 : علاقة إجهاد القص-انزلاق لعنصر الاتّصال

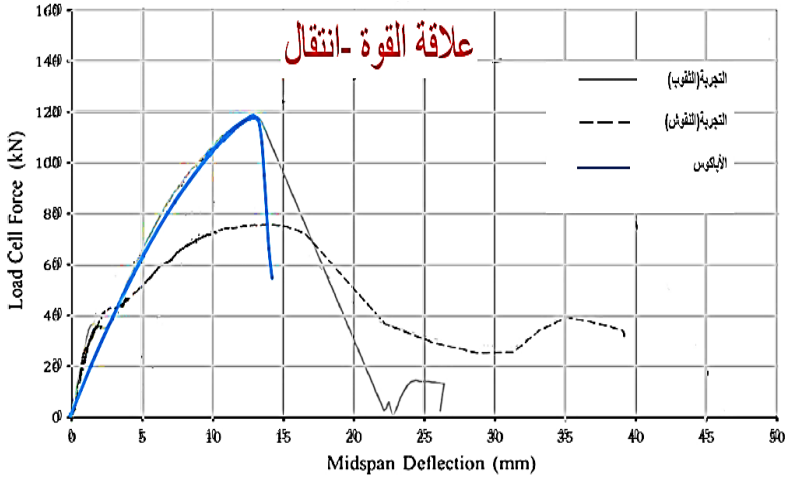
نستنتج ممّا سبق أنّ سلوك عنصر الاتّصال بالاتجاهين الرأسي والطولي هو سلوك خطّي حتى الانهيار، وكنتيجة لعدم وجود دراسة تجريبية لسلوك الثقب، حيث أنّ الدراسة المعتمدة حديثة وتمّت عملية التثقيب بشكل عشوائي لجسد الصفيحة، اعتمد في الدراسة الحالية على بيانات تجريبية للحصول على قيمتي الصلابة المرنة الخطيّة بالاتجاهين الممثلة لسلوك عنصر الاتّصال، بحيث تؤدّي لتطابق كبير مع نتائج العينة المدروسة لعلاقة قوّة-انتقال التجريبية.

تمّت عملية تشكيل الثقوب في منطقة الجسد للصفحة الفولاذية، بالتالي هذا يؤدّي لإضعاف هذه المنطقة وهذا يعني انخفاضاً بقيمة إجهاد السيلان في النمذجة.

تبيّن وفقاً لدراسات تجريبية أنّ معامل تخفيض قيمة إجهاد السيلان الذي يؤدّي لنتائج عديدة مطابقة للتجربة، يكون تقريباً نصف القيمة المعتمدة للمناطق دون نقوش $M=0.5$ ، أو يبلغ القيمة $M=0.47$ ، وبكل الأحوال يتم تحديد هذه القيمة عن طريق التجريب حتى تتطابق النتائج (Ríos et al, 2017) [5]. ضمن هذه النمذجة وجد أنّ القيمة $M=0.47$ تؤدّي لضبط النموذج.

4. النتائج ومناقشتها Results and Discussion

يبين الشكل (27) مقارنة الدراسة الحالية مع الدراسة التجريبية من حيث العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) والانتقال بمنتصف المجاز (المحور الأفقي)، (Ferrer & Marimon, 2018) [2] ، والتي تم الحصول فيها على قيمة عظمى مقدارها 118.08kN وهي قريبة جداً من القيمة التي أعطتها الدراسة الحالية، بالتالي تم الحصول على توافق كبير بين الدراسة التجريبية والتحليلية حتى نقطة الانهيار، يمكن أن يرجع ذلك إلى الاتصال التام الحاصل بين البيتون والصفحة الفولاذية، حيث يتقارب السلوك العملي (التجريبي) تقريباً مع السلوك النظري، الذي يفترض السلوك المرن الخطي حتى الوصول للمقاومة الحدية الأعظمية، والتراخي القصي أثناء التحميل وحتى بلوغ الحمولة العظمى مهملاً، ثم حدث انزلاق طولي مفاجئ للصفحة الفولاذية، بالتالي الانهيار حدث على الانعطاف والقص معاً.



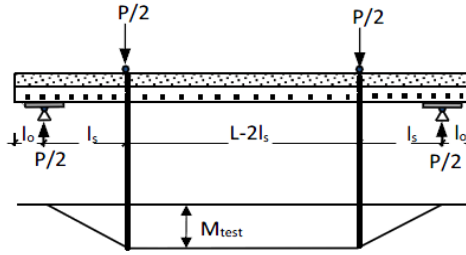
الشكل 27 : علاقة (القوة - انتقال) للبلطة المدروسة في الدراسة التجريبية [2]

والدراسة التحليلية

دراسة أثر تغيير كثافة الثقوب على سلوك البلاطة المختلطة:

The effect of change the density of crowns shaped punches UPC
on composite slab capacity

تمت زيادة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل مع تثبيت المسافة بين الثقوب من نقطة المسند حتى نقطة تطبيق كلا الحملين للقيمة (20mm) الشكل (28).

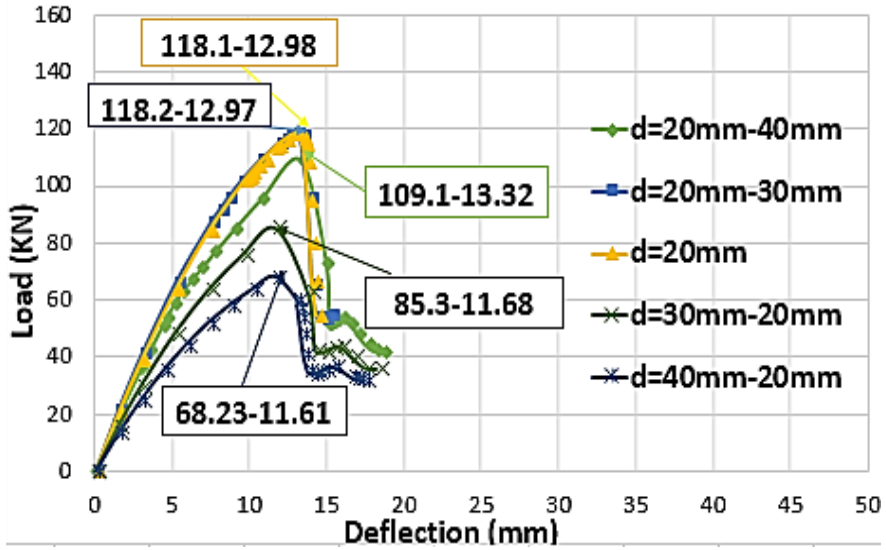


الشكل 28 : مخطط العزم في حال تطبيق حملتين مركّزتين

بيّن الشكل (29) علاقة القوّة - الانتقال والتي تمّ الحصول عليها نتيجة هذه التعديلات على النموذج. تمّ الاستنتاج بأنّ زيادة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل حتى (30mm) لا تؤثر على سلوك البلاطة المختلطة، بينما زيادة المسافة حتى (40mm) يؤدي لانخفاض قوّة التحمّل بمقدار 8% (109.1 KN)، بالتالي الكثافة المثالية للحالة المدروسة هي (20mm) من نقطة المسند حتى نقطة تطبيق كلا الحملين و (30mm) بين نقطتي تطبيق الحمل.

نجد عند زيادة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل يوجد ثبات في مخطط العزم، بالتالي القصّ الطولي أصغري(مهم)، ودور الثقوب التاجية يقتصر على ضبط العمل المشترك بين الصفيحة الفولاذية والبيتون وربطهما.

للتحقّق مما سبق تمّت زيادة المسافة بين الثقوب من نقطة المسند حتى نقطة تطبيق كلا الحملين مع تثبيت المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل للقيمة (20mm)، ممّا يؤدي إلى انخفاض قدرة التحمّل عند المسافة (30mm) بمقدار 28% (85.3 KN) للقوّة وبمقدار 10% (11.6 mm) للانتقال وحصل تراخي قصّي، بالتالي حدث الانهيار نتيجة القصّ الطولي، كذلك عند المسافة (40mm) حصل انخفاض بمقدار (68.2 KN) 43% للقوّة وبمقدار 10% (11.6 mm) للانتقال، وحصل تراخي قصّي، بالتالي حدث الانهيار نتيجة القصّ الطولي.



الشكل 29 : علاقة القوّة المطبّقة - الانتقال تحت تأثير تغيير كثافة الثقوب

d : يرمز للمسافة بين الثقوب

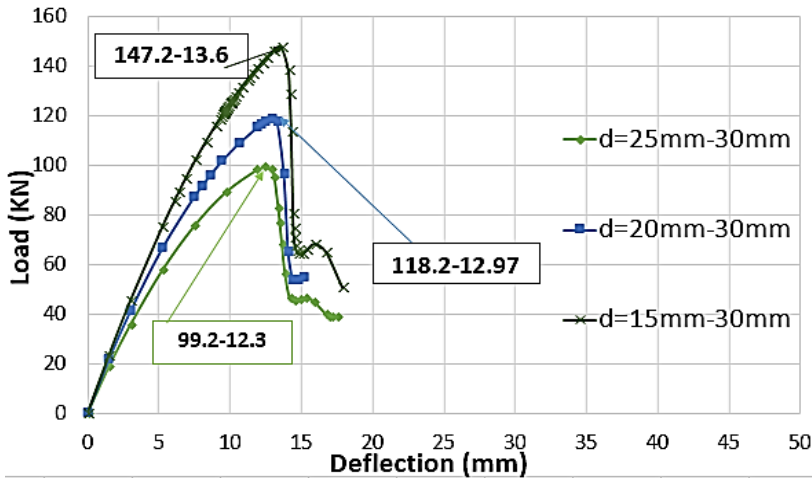
الرقم الأول: قيمة المسافة بين الثقوب من نقطة تطبيق الحمل إلى المسند

الرقم الثاني: قيمة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل

كما بيّن الشكل (30) علاقة القوّة - الانتقال التي تمّ الحصول عليها نتيجة تثبيت المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل للقيمة (30mm)، بينما تمّت زيادة المسافة

بين الثقوب من نقطة تطبيق الحمل إلى المسند في الحالة الأولى إلى (25mm)، بهذه الحالة لوحظ انخفاض قوّة التحمّل بمقدار 16% (99.2 KN) والانتقال بمقدار 5% (12.3 mm) ولا يوجد تراخي قصّي أثناء التحميل وحتى بلوغ الحمولة العظمى، ثمّ حدث انزلاق طولي مفاجئ للصفحة الفولاذية، بالتالي الانهيار حدث على الانعطاف والقصّ معاً.

بينما في الحالة الثانية خفّضنا المسافة إلى (15mm)، بهذه الحالة لوحظ ارتفاع قوّة التحمّل بمقدار يصل 25% (147.2 KN) والانتقال بمقدار 5% (13.6 mm)، ولا يوجد تراخي قصّي أثناء التحميل وحتى بلوغ الحمولة العظمى، ثمّ حدث انزلاق طولي مفاجئ للصفحة الفولاذية، بالتالي حدث الانهيار على الانعطاف والقصّ معاً.



الشكل 30 : علاقة القوّة المطبّقة - الانتقال تحت تأثير تغيير كثافة الثقوب

d : يرمز للمسافة بين الثقوب

الرقم الأول: قيمة المسافة بين الثقوب من نقطة تطبيق الحمل إلى المسند

الرقم الثاني: قيمة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل

5. الاستنتاجات والتوصيات Conclusions and Recommendations

تمت في هذه المقالة دراسة تصرف بلاطة مختلطة مكونة من الجزء البيتوني والصفحة الفولاذية، والذان يتصلان بدورهما من خلال ثقوب تاجية الشكل تحت تأثير أحمال شاقولية مركزة، حيث تمت الدراسة باستخدام طريقة العناصر المحدودة، مع أخذ لا خطية المادة بعين الاعتبار، كما تم في هذه المقالة نمذجة ربع عصب من أعصاب البلاطة المختلطة، ومن ثم تعميم النتائج على البلاطة المختلطة بشكل كامل، هذه العملية أبدت دقة عالية في مطابقة النتائج وبساطة في النمذجة وسرعة في التحليل.

تم دراسة أثر تغيير كثافة الثقوب على تصرف البلاطة المختلطة من حيث المقاومة والانتقال وشكل الانهيار. نبين فيما يلي النتائج التي تم التوصل إليها في نهاية المقالة:

- تنهار البلاطات المختلطة المكونة من الجزء البيتوني والصفحة الفولاذية المزودة بالثقوب التقليدية عادةً على القص الطولي، ولكن مع استبدال الثقوب التقليدية بالثقوب تاجية الشكل أصبح انهيار البلاطات المختلطة على الانعطاف أو الانعطاف والقص معاً.
- عندما كانت المسافة بين الثقوب ثابتة على كامل مجاز البلاطة، استطعنا زيادة المسافة بين الثقوب بين نقطتي تطبيق الحمل، أي إمكانية تقليل كثافة الثقوب في المنطقة بين القوتين بنسبة (33%) حيث القص الطولي مهم، مع المحافظة على نفس السلوك للبلاطة المختلطة، بالتالي التقليل من كمية الإضعاف الحاصل في الصفحة الفولاذية كنتيجة لتقليل كمية الثقوب.
- زيادة كثافة الثقوب من نقطة تطبيق الحمل إلى المسند بنسبة (33%) يحدث ارتفاع في مقاومة البلاطة المختلطة بنسبة (25%)، وتخفيض كثافة الثقوب من نقطة تطبيق الحمل إلى المسند بنسبة (20%) يحدث انخفاض في مقاومة البلاطة المختلطة بنسبة (16%)، وهذا يتوافق مع السلوك الفعلي للبلاطة

المختلطة، حيث يوجد قوى قصّ طولي في هذه المنطقة، بالتالي تقليل كثافة الثقوب يمنع من مقاومة قوى القصّ الطولي وزيادتها يزيد من ذلك.

المقترحات والتوصيات

- دراسة أثر العلاقة بين سماكة الصفيحة الفولاذية وكثافة الثقوب على سلوك البلاطة المختلطة.
- دراسة أثر التحميل الديناميكي.
- دراسة أثر ارتفاع الصفيحة الفولاذية على سلوك البلاطة المختلطة.
- دراسة أثر المقاومة المميزة للبيتون على سلوك البلاطة المختلطة.

6. المراجع References

1. Bridge, R. Q., & Patrick, M. 2002 – Innovations in composite slabs incorporating profiled steel sheeting. ***Advances in Building Technology***, Vol. 1, 191-198.
2. Ferrer, M., Marimon, F., & Casafont, M. 2018 – An experimental investigation of a new perfect bond technology for composite slabs, ***Construction and Building Materials***, Vol. 166, 618–633.
3. Eurocode 4, 2004 – ***Design of composite steel and concrete structures: Part 1.1 General rules and rules for buildings***. European Committee for Standardization (CEN), 118p.
4. Álvarez Rabanal, F. P., Guerrero–Muñoz, J., Alonso–Martinez, M., & Martinez–Martinez, J. E. 2016 – Bending and shear experimental tests and numerical analysis of composite slabs made up of lightweight concrete. ***Journal of Engineering***, Vol. 2016, 10p.
5. Ríos, J. D., Cifuentes, H., Martínez–De La Concha, A., & Medina–Reguera, F. 2017 – Numerical modelling of the shear–bond behavior of composite slabs in four and six–point bending tests. ***Engineering Structures***, Vol. 133, 91–104.
6. Eurocode 2, 2004 – ***Design of concrete structures: Part 1.1 General rules and rules for buildings***. European Committee for Standardization (CEN), 270p.
7. ABAQUS, Version 6.14, 2014 – ***ABAQUS/Standard User's Manual, ABAQUS Inc.***, USA, 281p.
8. Kmiecik, P., & Kamiński, M. 2011 – Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, ***Archives of civil and mechanical engineering***, Vol. 11, No. 3, 623–636.

