Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) (JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

الدراسات العددية حول أداء الانحناء لعوارض الصلب المشكلة على البارد المركبة والمملوءة بالخرسانة *(CFSB)*

محمد مفتاح محمد جرود
المعهد العالي للعلوم والتقنية ترهونة ـ ليبيا
mohammed.rarod@gmail.com

NUMERICAL STUDIES ON THE BENDING PERFORMANCE OF COLD-FORMED COMPOSITE CONCRETE-FILLED STEEL BEAMS (CFSB)

MOHAMED MIFTAH MOHAMED JAROUD
HIGHER INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, TARHUNA – LIBYA

تاريخ الاستلام: 2026/04/07 تاريخ المراجعة 05/09/ 2026 تاريخ القبول:2026/05/20- تاريخ النشر: 06/09/ 2026

الملخص

تم مؤخرًا إدخال المقاطع المركبة من الفولاذ المشكل على البارد (CFS) مع مواد أخرى كالخرسانة، والمثبتة بواسطة البراغي والمسامير، لتجنب مشكلة انبعاج مقاطع الفولاذ المشكل على البارد. يُعد تحليل الانحناء لعوارض الخرسانة المركبة من الفولاذ المشكل على البارد أكثر تعقيدًا من حيث التصميم ونمط الانهيار. لذلك، تقدم هذه الورقة مراجعة موجزة للدراسات العديدة لمقاطع الفولاذ المشكل على البارد، مع الخرسانة وبدونها، تحت تأثير حمل الانحناء. وعلى وجه الخصوص، تمت مراجعة أنماط انهيار انبعاج الفولاذ المشكل على البارد بشكل نقدي. ومع ذلك، نوقشت الاعتبارات المهمة مثل تعريف خصائص المواد والتفاعلات أثناء المحاكاة العددية. تُبرز المراجعة المقدمة في هذه الورقة إمكانات كبيرة حول كيفية تأثير اللاخطية في مادة الخرسانة، وتفاعل الفولاذ المشكل على البارد مع الخرسانة، وأنواع الوصلات، على مستوى دقة المحاكاة في التنبؤ بسلوك الانحناء للعوارض المركبة. بالإضافة إلى ذلك، تمت مراجعة نوع الوصلات وطرق واستراتيجيات المحاكاة اللاخطية والنتائج المتعلقة بسلوك الانحناء للخرسانة المركبة من الفولاذ المشكل على البارد. تم تحديد اتجاهات البحث المستقبلي من خلال الملاحظات والتوصيات الختامية لتحقيق دقة أعلى لنتائج المحاكاة بالإضافة إلى فلسفة تصميم أكثر فعالية في المستقبل لتعزيز استخدام عوارض CFS المركبة في صناعة البناء.

الكلمات الرئيسية :قطاعات الفولاذ المشكل على البارد، وصلات التثبيت، الخرسانة، سلوك الانحناء، التفاعلات، المحاكاة العددية.

Abstract

Cold-formed steel (CFS) composite sections have recently been introduced with other materials, such as concrete, and fastened with bolts and screws to avoid the buckling problem of the cold-formed steel sections. The flexural analysis of CFS concrete beams is more complex in terms of design and failure mode. Therefore, this paper provides a brief review of numerous studies of CFS sections, with and without concrete, under bending loads. In particular, the buckling failure modes of CFS are critically examined. Important considerations such as defining material properties and interactions during numerical simulations are also discussed. The review presented here highlights significant potential for understanding how nonlinearity in the concrete material, the interaction of CFS with concrete, and

connection types affect the simulation accuracy in predicting the bending behavior of composite beams. Furthermore, connection types, nonlinear simulation methods and strategies, and results related to the bending behavior of CFS concrete are reviewed. Future research directions were identified through concluding observations and recommendations to achieve higher accuracy in simulation results and a more effective design philosophy for the future to promote the use of CFS composite beams in the construction industry.
Keywords: Cold-formed steel sections, fastening connections, concrete, bending behavior, interactions, numerical simulation.

مقدمة

أدى التطور الأخير في قطاع البناء إلى توسيع آفاق المهندسين نحو استخدام مواد وتصاميم بديلة لتلبية احتياجات هذا القطاع. يُعدّ الفولاذ المشكّل على البارد (CFS) أحد هذه المواد التي تمّ إدخالها مؤخرًا إلى جانب مواد أخرى كالخرسانة. تاريخيًا، يعود استخدام الفولاذ المشكّل على البارد في منشآت الهندسة المدنية إلى خمسينيات القرن التاسع عشر في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة. إلا أنه ظلّ محدود الانتشار حتى ثلاثينيات القرن العشرين نظرًا لغياب قوانين البناء، وقلة المعرفة، وعدم فهم تصميم وسلوك هياكل الفولاذ المشكّل على البارد، ومع تطور قطاع البناء برزت أهمية الفولاذ المشكّل على البارد في هذا المجال لما يتميّز به من مزايا ملحوظة، كالتكلفة المنخفضة، وخفة الوزن، وسهولة التركيب، وقلة الصيانة، ومقاومة التآكل، وسهولة النقل، وإمكانية إعادة التدويروسهولة التصنيع. وقد تمّ إدخال الفولاذ المشكّل على البارد إلى قطاع البناء بفضل نسبة قوته العالية إلى وزنه، وتعدد استخداماته على المدى الطويل واستقراره وسلامته، وفعاليته من حيث التكلفة.[1]بالإضافة إلى ذلك من المعروف أن الخرسانة المسلحة بالألياف الزجاجية تساهم بشكل كبير في حماية البيئة والحفاظ على البناء الأخضر في إنشاء المباني السكنية منخفضة الارتفاع والمباني التجارية متوسطة الارتفاع.[2].

خُصصت العديد من الدراسات لقطاعات الفولاذ المجلفن على البرد والخرسانة كعناصر مركبة.

(Couchman، Smith))[3]أجرى الباحثون دراسة ركزت على قوة ومتانة وصلات القص ذات الرؤوس المثبتة داخل ألواح الصلب المشكّلة، ووجدوا أن مقاومة وصلة القص تزداد مع زيادة عمق البلاطة. وبالمثل، استنادًا إلى دراسات أجراها Pavlovićوآخرون (2013).[4]تم فحص سلوك موصلات القص المثبتة بمسامير وموصلات المسامير في اختبارات الدفع للخارج، وذلك لفهم أنماط فشل موصلات القص من أنواع مختلفة (مسامير ومسامير). مع ذلك، قام Wehbeوآخرون (2011) [5] تناولت الدراسة تطوير عناصر الانحناء المركبة من الخرسانة والفولاذ المشكل على البارد، وشملت خطوات تجريبية وتحليلية لتقييم الأداء الإنشائي وأنماط انهيار عوارض السكك الحديدية المركبة من الخرسانة والفولاذ المشكل على البارد. وقد طور الباحثون تصميمات مثلى لاستخدام الفولاذ ذي المقياس الخفيف في الإنشاءات.

تتراوح سماكة مقاطع الصلب المشكل على البارد (CFS) المصنوعة من شرائح الصلب المجلفن عادةً بين 0.9 مم، 3.2 مم [6]لذلك فإن هذه المقاطع شديدة الحساسية لتأثيرات الانبعاج الموضعي مقارنة بنظيراتها [7]بشكل أساسي، يمكن تصنيف فشل الفولاذ المشكل على البارد في مقاطع الكمرات أو الأعمدة إلى أربعة أنماط فشل هي الانبعاج الموضعي والانبعاج التشوهي والانبعاج الجانبي الالتوائي والانبعاج الكلي كما هو موضح في الشكل 1. وفقًا Dar وآخرون (2018).[8]يمكن معالجة أو القضاء على مشكلة انبعاج مقاطع الصلب المشكل على البارد من خلال تعديل مناسب للتصميم، وتحسين قوة وصلابة هذه المقاطع. تتطلب هذه المقاطع استخدام أنواع مختلفة من أدوات التثبيت كالمسامير والصواميل واللحام. ويتطلب الربط تقنية متطورة وخبرة عالية وللحصول على بناء أقوى، تُستخدم درجات حرارة أعلى في اللحام. كما أوصت الدراسات باستخدام طرق ربط أخرى، مثل اللحام بالليزر لتسريع عملية الربط.

ركزت معظم الدراسات بشكل أساسي على أداء مقاطع الفولاذ المشكل على البارد من حيث الضغط، مع إهمال جانب الانحناء إلى حد كبير. والأهم من ذلك، أن تحليل انحناء عوارض الفولاذ المشكل على البارد

الشكل 1: أنماط الفشل للقطاع C المصنوع من الفولاذ المجلفن على البارد [14]

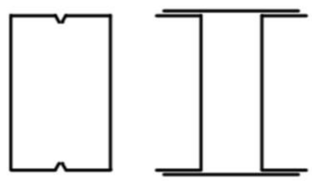
2. أنماط فشل الانبعاج في نظام CFS

عادةً، قد تتعرض مقاطع الفولاذ المشكل على البارد تحت تأثير قوى الضغط لثلاثة أنماط مختلفة من فشل الانبعاج وهي الانبعاج الموضعي والتشوهي.[15] كما هو موضح في الشكل 1. تُعدّ أنماط الفشل المحتملة هذه، إلى جانب أنواع الوصلات المختلفة لمقاطع الفولاذ المشكّل على البارد، بالغة الأهمية لفهمها، إذ تُشكّل أساس تحليل وتصميم عناصر الفولاذ المشكّل على البارد تحت ظروف تحميل مختلفة. قد تتعرض عناصر الفولاذ المشكّل على البارد لانبعاج موضعي نظرًا لرقّتها مقارنةً بعرضها، مما يؤدي إلى انبعاجها في مناطق موضعية عند إجهاد أقل من حدّ الخضوع، وذلك عند تعرّضها لأحمال ضغط أو انحناء أو قصّ خالصة، أو لمزيج منها. [16]من ناحية أخرى، يتميز فشل الانبعاج التشوهي بدوران عنصر الشفة عند نقطة اتصال الشفة بالشبكة مع صلابة الحافة، ويرتبط نمط الفشل هذا بوجود الدعامات.[17]لا يعتمد الإجهاد الحرج لفشل الانبعاج التشوهي على أبعاد المقطع العرضي للفولاذ المشكل على البارد فحسب، بل يعتمد أيضًا على نوع الحمل الذي يتعرض له.[18]يُعدّ هذا النمط من الانبعاج شائعًا في الأعمدة القصيرة. وللانبعاج الكلي ثلاثة أنماط للفشل، هي: الانبعاج الانحنائي، والانبعاج الالتوائي، والانبعاج الانحنائي الالتوائي. وترتبط هذه الأنماط بالأعمدة الطويلة. يتميز الانبعاج الانحنائي بالانحراف الناتج عن الانحناء، ويحدث عادةً حول المحور ذي النحافة الأكبر.[19]يُعدّ هذا النوع من الانهيار شائعًا في الأعمدة والجسور الطويلة. ونظرًا لطبيعة الجدران الرقيقة لمعظم عناصر الفولاذ المشكّل على البارد، والتي تُعرّضها لمشاكل الانبعاج، يبحث الباحثون في جميع أنحاء العالم عن طرق ومواد للحدّ من انهيار الانبعاج في هذه المقاطع.

3. أنواع CFS المركبة

يمكن أن تكون مقاطع الخرسانة المسلحة بالفولاذ (CFS) المركبة إما مفتوحة أو مغلقة، كما هو موضح في الشكل 2. ويمكن ربط هذه المقاطع المركبة معًا باستخدام طرق الربط التقليدية، مثل التثبيت بالمسامير واللحام القوسي، أو باستخدام طرق الربط طويلة الأمد، مثل المسامير أو البراغي ذاتية الحفر، أو البراغي ذاتية التثبيت. وقد أُجريت العديد من الدراسات حول سلوك أعمدة الخرسانة المسلحة بالفولاذ المركبة، كما هو موضح في الأعمال التي قام بها...[20]–[23]من ناحية أخرى، تم بحث سلوك الانحناء لعوارض المقاطع المركبة في بعض الدراسات مثل[24]–[27]ركزت هذه الدراسات بشكل أساسي على سلوك مقاطع الفولاذ المشكل على البارد المركبة تحت تأثير قوى الضغط، وكيفية الحد من مشاكل الانبعاج مقارنةً بالمقاطع المفتوحة المفردة. وكما ذُكر سابقًا، فإن صغر سُمك مقاطع الفولاذ المشكل على البارد مقارنةً بعرضها قد يجعلها أكثر مقاومةً للانبعاج. معرضة للانحناء الموضعي والعالمي، وبالتالي فإن الفولاذ المشكل على البارد لن يكون فعالاً في مقاومة الانحناء بمفرده.[28]لهذا السبب، تم إدخال قطاعات الفولاذ المشكل على البارد (CFS) مؤخرًا في صناعة البناء جنبًا إلى جنب مع مواد أخرى مثل الخرسانة أو التربة. في الكمرات المركبة من الفولاذ المشكل على البارد والخرسانة، يتميز الفولاذ المشكل على البارد بقوة شد عالية توفر مرونة جيدة، بينما توفر الخرسانة قوة ضغط ومقاومة للحريق وسطحًا مناسبًا للأرضيات.[29].

a) Open built-up sections



b) Closed built-up sections

الشكل 2:مقاطع CFS النموذجية المركبة[30]

تم إدخال مقاطع الخرسانة المسلحة بالفولاذ المجلفن على البارد مع مواد أخرى مثل التربة والخرسانة وخبث أفران الصهر المطحون، ثم تم فحصها تحت تأثير قوى الضغط أو الانحناء في دراسة M. S. H. Mohd Sani [31]تم فحص عمود فولاذي مُشكّل على البارد مُثبّت بمسامير ومملوء بالخرسانة تجريبياً، ووجد أن العمود الذي يحتوي على الخرسانة في أقصر مسافة بين مسامير التثبيت قد زادت قدرته على تحمل الأحمال بنسبة 68% إلى 78% مقارنةً بالعمود المقابل غير المملوء بالخرسانة. وفي دراسة M. S. H. Mohd Sani وآخرون...[32]قام كل من Grisilda and Ligoria بدراسة سلوك الانحناء لعتبة فولاذية مركبة مملوءة بتربة مدكوكة (CFSBCS) تحت اختبار الانحناء الرباعي، وأظهرت النتائج أن عتبة CFSBCS سجلت قيمًا أعلى لعزم الانحناء الأقصى مقارنةً بالعتبة الفولاذية غير المملوءة.[33]درس الباحثون تأثير ملء عوارض الصلب المشكلة على البارد بالخرسانة وتغليفها بألياف زجاجية مقواة بالبوليمر (GFRP) على سلوكها الانحنائي، ووجدوا أن العارضة المملوءة والمغلفة بألياف GFRP تتمتع بقدرة تحمل أفضل. وقد فتحت هذه الدراسات آفاقًا جديدة لاستخدام عوارض الصلب المشكلة على البارد المملوءة بمواد أخرى لتحسين أدائها وتقليل حالات فشل الانبعاج.

4. المحاكاة العددية لعتبة فولاذية مشكلة على البارد مملوءة بالخرسانة

يُعدّ نموذج العناصر المحدودة (FEA) أسلوبًا عدديًا يُستخدم لحلّ المسائل الهندسية والفيزيائية الرياضية. لذا، فإنّ نموذج العناصر المحدودة هي طريقة لحساب تقريب الحل الحقيقي للمعادلات التفاضلية الجزئية في نطاق محدود.[34].تُعدّ هذه الطريقة مفيدةً عند التعامل مع حلّ المسائل الهندسية ذات الأشكال الهندسية المعقدة، والأحمال، وخصائص المواد، والتي يتعذر الحصول على حلول تحليلية لها. تعتمد طريقة العناصر المحدودة على تقسيم الهيكل المادي إلى عناصر صغيرة متصلة ببعضها البعض عبر عقد مشتركة، وتُسمى هذه العناصر مع العقد بالشبكة. تُقارب هذه الشبكة هندسة الهيكل المادي. ويمكن حساب المتغيرات المحسوبة (مثل الإجهاد، والإزاحة، والقوى، إلخ) لكل عنصر من عناصر الجسم محليًا على كل عقدة، ثم تُجمع هذه القيم لكل متغير لجميع العناصر للحصول على الاستجابة الكلية للجسم.لا تزال نماذج العناصر المحدودة للعوارض المركبة من الخرسانة والفولاذ المجلفن على البارد محدودة للغاية. ولمحاكاة سلوك الانحناء لهذه العوارض عددياً، يجب مراعاة بعض الاعتبارات قبل البدء بعملية النمذجة، مثل البرنامج المستخدم، وتعريف خصائص المواد، وتفاعل الترابط بين الفولاذ والخرسانة، ونوع الحمل، والشروط الحدية، على سبيل المثال لا الحصر.

4.1 الاعتبارات المادية

في تحليل العناصر المحدودة غير الخطي، يلعب تعريف المواد دورًا بالغ الأهمية في تحقيق مستوى معقول من دقة المحاكاة. في النمذجة العددية للمقاطع المركبة من الفولاذ المجلفن على البارد والمملوءة بالخرسانة لمحاكاة سلوك الكمرات المركبة تحت تأثير أحمال الانحناء المتزايدة، اهتمام بالغ عند تعريف نماذج خصائص المواد للخرسانة والفولاذ. لذا، يهدف هذا القسم إلى تسليط الضوء على الاعتبارات ذات الصلة في نماذج مواد الخرسانة والفولاذ.

تُعدّ الخرسانة من أكثر المواد تعقيدًا في النموذج، لا سيما تحت الأحمال الشديدة. ويعود ذلك إلى خصائصها غير الخطية، مثل التشققات الدقيقة، وانزلاق التماسك، وتصلب الشد، وتليين الضغط، والتهشيم.[35]–[37].فيعلى مدى العقود الأربعة الماضية، بُذلت جهودٌ جبارة لتطوير نماذج تحليلية قادرة على التنبؤ بسلوك الخرسانة تحت ظروف تحميل مختلفة. وقد استندت هذه النماذج التحليلية إلى ثلاث نظريات معروفة على نطاق واسع، وهي: اللدونة، والأساليب القائمة على الكسر، وميكانيكا أضرار الوسط المتصل.[35]استندت المرحلة المبكرة من هذه النماذج بشكل أساسي إلى نظرية اللدونة. وقد أُجريت بعض الأبحاث التي اعتمدت اللدونة في الخرسانة بواسطة[38]–[41]مع ذلك، لم تُجسّد هذه النماذج تدهور الصلابة. لذا، ولتحسين دقة النموذج، رُبطت اللدونة بنظرية آلية التلف لمعالجة أوجه القصور في نظرية اللدونة. وقد أخذت هذه النماذج في الاعتبار اللدونة مع التصلب المتساوي الخواص، وأُضيفت إليها إما معلمات تلف متساوية الخواص (كمية قياسية) أو معلمات تلف غير متساوية الخواص.[42]استخدم العديد من الباحثين في دراساتهم مفهوم التلف المتساوي الخواص المقترن باللدونة[43]–[46]من ناحية أخرى، تم تصنيف نماذج اللدونة والتلف مجتمعة إلى فئتين بناءً على طريقة صياغتها، وهما اللدونة المصاغة في فضاء الإجهاد الفعال واللدونة المصاغة في فضاء الإجهاد الفعال.[47]، [48]اللدونة المصاغة في فضاء الإجهاد [49]، [50].
في حزم برامج العناصر المحدودة التجارية، وخاصة برنامج Abaqus، تم تطوير نموذج اللدونة المتضررة للخرسانة (CDP) في البداية بواسطة Lubliner et al. (1989).[51] وتم تعديله بواسطة Fenves (1998)[48]يُعدّ نموذج Abaqus CDP أحد أكثر نماذج المواد استخدامًا في نمذجة الخرسانة. يُمكن استخدام هذا النموذج في التحليل الساكن والديناميكي، ويُمكنه تحديد تلف المادة بناءً على انخفاض مقاومتها للضغط والشد. على الرغم من مرونة نموذج Abaqus CDP، إلا أنه ليس سهل الاستخدام. أحد أسباب ذلك هو العدد الكبير من مُدخلات البيانات المطلوبة. بالإضافة إلى بيانات سلوك التصلب في الضغط والشد، هناك عدد من المُعاملات التي تُحدد شكل سطح الخضوع الأولي وجهد التدفق. على وجه الخصوص، لا تزال حساسية مُخرجات النموذج لنسبة خط الشد إلى خط الضغط وزاوية التمدد قيد البحث.[52].

من ناحية أخرى، يُعد الفولاذ المشكل على البارد من بين المواد القليلة، مثل سبائك الألومنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ، التي تُظهر استجابة إجهاد-انفعال دائرية عند تعرضها لاختبار الشد.[53]إن النموذج الأكثر شيوعًا المستخدم مؤخرًا لالتقاط استجابة الإجهاد والانفعال المستديرة لـ CFS والمواد الأخرى المماثلة هو نموذج لذي طوره Ramberg and Osgood (1943).[54]وتم تعديله بواسطة Hill(1944)[55]في الآونة الأخيرة، شاع استخدام نموذجRamberg and Osgood في تطبيقات العناصر المحدودة للحصول على محاكاة دقيقة لسلوك الفولاذ المشكل على البارد تحت ظروف تحميل مختلفة. يُعرَّف هذا النموذج عمومًا باستخدام ثلاثة معايير هي معامل يونغ (E)، وقوة خضوع المادة (f_y) وسلوك التصلب الإجهادي.

4.2 اعتبارات واجهة المستخدم

أولاً، تعتمد الرابطة بين الخرسانة والألواح الملساء على الالتصاق الكيميائي والاحتكاك والتشابك الميكانيكي الضئيل للغاية والذي يعود أساسًا إلى خشونة اللوح.[56]وفقًا لـ FIB (2011)[57]يمكن تصنيف التفاعل

بين الخرسانة والعناصر الفولاذية إلى أربع مجموعات كما يلي: (1) الالتصاق، الناتج عن رابطة قوية بين الخرسانة والفولاذ، (2) التداخل الاحتكاكي، الناتج عن الأشكال غير المنتظمة لسطح التماس، (3) التداخل الميكانيكي، الناتج عن هذه المعالجة والتشوه عند سطح التماس الفولاذي، (4) تأثير التثبيت، الذي توفره أجهزة وأنظمة التثبيت. مع ذلك، تُعدّ الرابطة والاحتكاك بين الفولاذ والخرسانة في غاية الأهمية، إذ تؤثران على استجابة العنصر المركبة، كما تُشكلان أساسًا لفهم آلية تحميل هذا العنصر تحت تأثير الحمل.[58]

يُعدّ الترابط والاحتكاك عاملين أساسيين يؤثران على استجابة التركيب، كما أنهما يشكلان الأساس لفهم آلية نقل الأحمال عبر سطح التماس بين المادتين. وفيما يتعلق بالهياكل المركبة المكونة من الخرسانة والصفائح المعدنية (مثل الفولاذ المشكّل على البارد)، فإن الترابط وحده لا يكفي لنقل قوى القص اللازمة لتطوير خصائص التركيب.[57]قد يؤدي التفاعل غير الكافي بين الفولاذ المشكل والخرسانة إلى انخفاض مقاومة الانحناء.[59]تعتمد محاكاة التفاعل المركب لسطح التماس بين الخرسانة والصفائح الفولاذية في طريقة العناصر المحدودة على التفاعل السطحي، حيث يوجد نموذج ضغط تلامس في الاتجاه العمودي واحتكاك كولوم في الاتجاه المماش.[60]استنادًا إلى نموذج احتكاك كولوم، يمكن نقل إجهاد القص عبر واجهتي المادتين حتى يصل إلى حد أقصى لإجهاد القص. τ_{cri} حيث سيحدث انزلاق الرابطة بين السطحين. τ_{cri} يمكن تحديد ذلك بناءً على المعادلة (1).

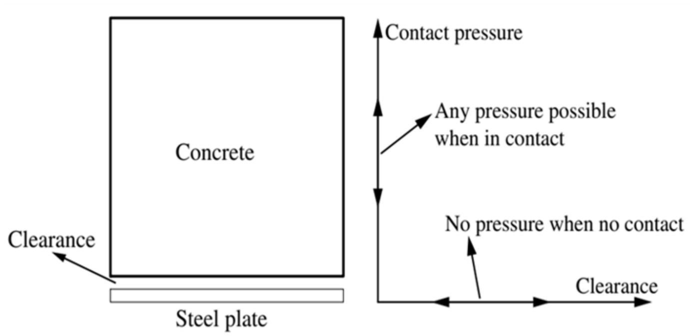
$$\tau_{crit} = \mu p \geq \tau_{bond} \qquad (1)$$

μ يمثل عامل الاحتكاك، p يمثل إجهاد الحصر بين الفولاذ ونواة الخرسانة. τ_{bond} هو متوسط إجهاد الترابط السطحي، ووفقًا لـ[61]، ويمكن تحديد ذلك بالنسبة لقطعة فولاذية مربعة الشكل مشكلة على البارد باستخدام المعادلة (2).

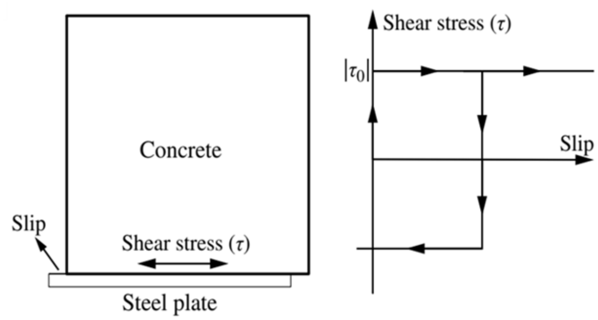
$$\tau_{bond} = 0.75\left[2.314 - 0.0195\left(B/t\right)\right] \qquad (2)$$

حيث أن B هو البعد الخارجي للأنبوب الفولاذي المربع t هو سمك الأنبوب الفولاذي.

في المحاكاة العددية للتفاعل بين الفولاذ المشكل على البارد والخرسانة، فإن الطريقة الأكثر شيوعًا المستخدمة هي التفاعل القائم على السطح مع نموذج التلامس الصلب في الاتجاه العمودي ونموذج الاحتكاك في الاتجاه المماسي كما هو موضح في الشكل 3. ويعود فعل التفاعل العمودي إلى الحمل العمودي على السطح، بينما يعود التفاعل المماسي إلى الانزلاق النسبي المحتمل بين السطحين المتجاورين.



a) Hard Contact Model



b) Penalty Friction Model

الشكل 3:نماذج التفاعل بين الفولاذ المشكل على البارد والخرسانة[13]

4.3 دراسات عديدة حول الخرسانة المملوءة بالفولاذ المجلفن على البارد.

تُعدّ الدراسات المنشورة حول التحليل العددي لسلوك الانحناء في عوارض المقاطع المركبة من الفولاذ المجلفن على البارد، سواءً مع أو بدون خرسانة داخلية، محدودة للغاية. يلخص الجدول واحد عشر دراسات عددية منشوره حول مقطع الفولاذ المجلفن على البارد تحت تأثير حمل الانحناء خلال الفترة من 2013 إلى 2019. بلغ إجمالي عدد الدراسات سبع (7) دراسات.[10]، [25]، [62]–[66]ركزت الدراسات بشكل أساسي على قدرة الانحناء للمقاطع المفتوحة و المغلقة المركبة، المتصلة ببعضها عبر الألواح أو الحواف باستخدام البراغي والصواميل. كانت معظم مقاطع الفولاذ المجلفن على البارد في الدراسات المذكورة أعلاه على شكل مقاطع I و U و C لتسهيل عملية بناء المقاطع المفتوحة أو المغلقة المطلوبة. توافقت معظم النتائج العددية لهذه الدراسات بشكل مقبول مع النتائج التجريبية. وكخلاصة عامة، تبين أن قدرة المقاطع المركبة تتأثر بشكل رئيسي بترتيب البراغي.

من ناحية أخرى، تم استخدام مقاطع الفولاذ المشكل على البارد مع مواد أخرى مثل الخرسانة لتجنب مشاكل الانبعاج. وهناك ثلاث (3) دراسات[33]، [67]، [68]باستخدام مقطع واحد من الفولاذ المجلفن على البارد وملء بالخرسانة.Palanivelu Sudharsan and Vinoth Kumar [67] (2019) (2018)[68]استُخدمت موصلات القص لتقوية الرابطة بين الخرسانة والفولاذ المجلفن على البارد. وأكدت الدراسات العددية والتجريبية أن موصلات القص تُحسّن أداء الكمرة المركبة من الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة تحت اختبار الانحناء. مع ذلك، لم يُنشر في الأدبيات العلمية سوى دراسة واحدة فقط حول

المقطع المركب من الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة.[65]حيث تم ملء الجزء المبني بخرسانة مجمعة من البوليسترين وتم تثبيته بواسطة مسامير.

ذلك من منظور أساليب التحليل العددي، استخدمت جميع الدراسات المُلخّصة تحليل العناصر المحدودة غير الخطي لتقييم سلوك الانحناء والتحقق من صحة النتائج التجريبية. كما أن خمسة من أصل عشر دراسات... [10]، [25]، [62]، [64]، [66]استُخدم برنامج Abaqus كأداة لإجراء تحليل العناصر المحدودة، بينما استُخدم برنامج Ansys في الدراسات المتبقية. أما بالنسبة لنوع العنصر، فقد تم نمذجة المقاطع المفردة أو المركبة من الفولاذ المجلفنة على البارد كعنصر قشري في بعض الدراسات، مثل:[10]، [25]، [62]–[64]، [66]من ناحية أخرى، قام بعض الباحثين بدراسة الفولاذ المجلفن على البارد المملوء بمواد مثل الخرسانة، واستخدموا عنصرًا صلبًا ثلاثي الأبعاد لتقسيم الخرسانة المجلفنة على البارد أثناء عملية النموذج.[33]، [65]، [67]، [68]وخلاصة القول، فإن معظم الدراسات قامت بنموذج الفولاذ المشكل بالدرفلة على شكل غلاف أو عناصر صلبة بينما يتم نمذجة الخرسانة فقط كعنصر صلب.
في نموذج التفاعل بين مقاطع الفولاذ المجلفن على البارد (CFS) ومقاطع الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة، استخدمت معظم الدراسات طريقة السطح، مع افتراض احتكاك في الاتجاه الأفقي وتلامس صلب في الاتجاه العمودي. أما بالنسبة للمقاطع المركبة من الفولاذ المجلفن على البارد، فقد تم نمذجة البراغي أو المسامير المستخدمة لربط هذه المقاطع معًا كعناصر توصيل، وفقًا لدراسة أجراها آخرون (2018).[69]أو طريقة الاقتران وفقًا الدراسة Manikandan and S. Sukumar [25].

استنادًا إلى التحليل العددي في جميع الدراسات المنشوره سابقًا، يتضح وجود نقص في تعريف خصائص المواد لكل من الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة. علاوة على ذلك، يفتقر النماذج العددية للتفاعل بين الخرسانة ومقطع الفولاذ المجلفن على البارد تحت تأثير الانحناء في هذه الدراسات إلى المعرفة الكافية حول كيفية تأثير سلوك التفاعل.
يؤثر ذلك على آلية نقل الأحمال. وبالتالي، فإنه يحد من استكشاف استخدام الهياكل الخرسانية المملوءة بالفولاذ المشكل على البارد كعناصر مقاومة للانحناء.

5. الخاتمة

1. تقدم هذه الورقة البحثية مراجعة شاملة لأحدث نتائج الأبحاث المتعلقة بالمحاكاة العددية للمقاطع الخرسانية المفردة والمركبة على البارد، مع تحليل الخرسانة غير الخطي وبدونه. وفيما يلي ملخص لبعض الاستنتاجات والتوصيات:
2. ركزت معظم الدراسات بشكل أساسي على أداء مقاطع الفولاذ المشكل على البارد من حيث الضغط، مع تجاهل جانب الانحناء إلى حد كبير.
3. كانت مقاطع الفولاذ المشكل على البارد المركبة تُربط في الغالب باستخدام البراغي والمسامير. استُخدمت هذه الوصلات لربط الألواح المتقابلة أو الحواف لتشكيل مقاطع مركبة مفتوحة أو مغلقة، بهدف تحسين قدرة تحمل الانحناء. مع ذلك، توفر مقاطع الفولاذ المشكل على البارد المركبة والمملوءة بالخرسانة العديد من المزايا من حيث القوة والمتانة. كما أنها قادرة على الحد من الانبعاج ، وتتميز بانخفاض تكلفة المواد وإنتاج الهيكل، بالإضافة إلى مقاومتها للحريق. مع ذلك، فإن نقص المعرفة حول الوصلة المناسبة بين الخرسانة والفولاذ في عوارض الفولاذ المشكل على البارد المملوءة بالخرسانة، فيما يتعلق بأدائها في الانحناء، قد أعاق استخدامها في قطاع البناء. لذلك، يُوصى بإجراء المزيد من الأبحاث حول أنواع الوصلات وتكويناتها لتوفير فهم أفضل لسلوك الانحناء لعوارض الفولاذ المشكل على البارد المملوءة بالخرسانة، وتأثير تكوين الوصلة على الأداء العام لهذه العوارض.
4. تُعدّ الدراسات غير الخطية باستخدام طريقة العناصر المحدودة لدراسة سلوك الانحناء في المقاطع المركبة من الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة محدودة للغاية. ويعود ذلك أساسًا إلى الخصائص غير الخطية المعقدة لمادة الخرسانة (مثل التشققات الدقيقة، والتشققات، وتقوية الشد،

وتليين الضغط، والتهشيم)، واحتمالية الانزلاق العالية بين مقاطع الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة المصبوبة تحت تأثير حمل الانحناء، بالإضافة إلى تفاعل الوصلات. لذا، يُعدّ التحديد الدقيق لنموذج مادة الخرسانة وتفاعلات الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة من الخطوات الأساسية في تطبيق تحليل العناصر المحدودة في عوارض الفولاذ المجلفن على البارد والخرسانة تحت تأثير حمل الانحناء.

5. يجب إجراء المزيد من البحوث حول تأثير استخدام وصلات البراغي للأجزاء المغلقة من الفولاذ المجلفن على البارد والمملوءة بالخرسانة في آلية نقل الأحمال وفي التحكم في الخرسانة المتصلبة من التشقق الهش المحتمل أو الفشل.

الجدول 1:دراسات عديدة حول سلوك الانحناء لعوارض المقاطع المركبة من الفولاذ المشكل على البارد

دراسة		المنهجية							النتائج الرئيسية
					طريقة تحليل العناصر المحدودة				
ت	مراجع	المواد	نوع الاتصال	نوع الاختبار	نوع التحليل	أداة تحليل العناصر المحدودة	العناصر	نموذج الاتصال	
1	[62]	قناة CFS مقطع I مبني	صفان من البراغي يربطان بين شبكتين متقابلتين	اختبار الانحناء رباعي النقاط	الخطي وغير الخطي	Abaqus	CFS: عنصر قشرة	-	كان المتوسط والانحراف المعياري بين قدرة العزم التي تم الحصول عليها بواسطة FEA و DSM هو 0.96 و 0.07 على التوالي، مما يدل على اتفاق مقبول.
2	[63]	عوارض ذات مقاطع مركبة من الفولاذ المشكل على البارد (قنوات أو مقطع سيجما)	براغي ذاتية التثبيت		التحليل غير الخطي	Ansys		تم اعتبار معامل الاحتكاك التلامسي بين الأسطح 0.25، والسلوك طبيعي.	- تؤدي قوة الخضوع العالية وسماكة الفولاذ إلى قدرة انحناء أعلى. - يمكن أن يؤدي تقوية الجدار باستخدام الدعامات إلى تحسين أداء قدرة الانحناء للعتبة
3	[67]	عارضة مقطعية على شكل حرف U مصنوعة من الفولاذ المجلفن على البارد، مثبتة بوصلات قص ومملوءة بالخرسانة.	-	اختبار الانحناء ثلاثي النقاط			عناصر ثلاثية الأبعاد صلبة للفولاذ المجلفنة على البارد والخرسانة	من سطح إلى سطح	- اختلفت النتائج العددية والتجريبية للانحراف وقدرة تحمل الحمل بنسبة تتراوح من 1.04 إلى 1.27 مما يشير إلى تطابق مقبول. - قصأدت الموصلات إلى تحسين الأداء
4	[10]	عوارض مقطعية مفتوحة/مغلقة مركبة من الفولاذ المجلفن على البارد	ترتيب مختلف للمسامير على الألواح الحواف	اختبار الانحناء رباعي النقاط		Abaqus	Shell عنصر :CFS	التلامس بين الأسطح مع سلوك مماس عديم الاحتكاك وتلامس صلب عادي	- كان تأثير تباعد البراغي على قدرة عزم الدوران للمقاطع المغلقة المركبة أكبر من تأثيره على المقاطع المفتوحة المركبة.
5	[69]	عوارض قناة ذات حواف متقابلة من	صفان من البراغي على شبكتين، كل					البراغي: عناصر التوصيل CFS-CFS:	- تفاوتت القدرة القصوى للمقاطع المتوقعة بواسطة نماذج العناصر المحدودة بنسبة 2% أقل من النتائج

دراسة		المنهجية							النتائج الرئيسية
					طريقة تحليل العناصر المحدودة				
ت	مراجع	المواد	نوع الاتصال	نوع الاختبار	نوع التحليل	أداة تحليل العناصر المحدودة	العناصر	نموذج الاتصال	
		الفولاذ المشكل على البارد	صف يحتوي على أربعة براغي					التلامس بين الأسطح	التجريبية
6	[33]	عوارض مقطع مربع مجوف من الفولاذ المجلفن على البارد مع وبدون GGBS* و GFRP**	-		التحليل غير الخطي	Ansys	عناصر ثلاثية الأبعاد صلبة لأنظمة التشكيل بالحقن ومواد الحشو	التلامس بين الأسطح مع سلوك احتكاكي (معامل الاحتكاك = 0.2)	- لم تفشل النماذج المملوءة بالخرسانة المقواة بالخبث تحت تأثير الانبعاج الموضعي، بل تحت تأثير الانحناء. - زادت قدرة تحمل عوارض الخرسانة المملوءة والمغلفة بـ GFRP بنسبة 42.7% أكثر من عوارض CFS المجوفة.
7	[68]	عوارض مركبة من الفولاذ المجلفن على البارد مع موصلات القص	-	اختبار الانحناء رباعي النقاط	التحليل غير الخطي	Ansys	عناصر ثلاثية الأبعاد صلبة للفولاذ المدلفن على البارد والخرسانة	-	- كان الانحراف الذي تم الحصول عليه بواسطة تحليل العناصر المحدودة أعلى قليلاً من الانحراف الذي تم الحصول عليه من التحقيق التجريبي.
8	[65]	المقاطع المفتوحة والمغلقة المركبة (المقاطع على شكل حرف I)مملوءباستخدام الخرسانة الركام البوليسترين	مسامير على الشبك/الحواف	تحميل نقطة واحدة	التحليل غير الخطي	Ansys	عناصر ثلاثية الأبعاد صلبة	-	- تطابق أدق مع النتائج التجريبية. - كانت أنماط الفشل في التحقيقات التجريبية والرقمية متوافقة بشكل مقبول.
9	[25]	تم تقوية مقاطع الفولاذ المشكل على البارد المركبة عند نقطة التقاء الشفة/الشبكة وعند الحافة	مسامير على الشبكات	اختبار الانحناء رباعي النقاط	تحليل الانبعاج المرن للقيم الذاتية وتحليل الانبعاج غير الخطي الساكن	Abaqus	CFS: عنصر Shell	البراغي: طريقة التوصيل	- تتمتع طريقة تحليل العناصر المحدودة بمستوى مقبول من الدقة في التنبؤ بقوة وسلوك عوارض الفولاذ المشكل على البارد المركبة
10	[66]	عوارض ذات مقاطع مفتوحة ومغلقة من الفولاذ المجلفنة على البارد	مسامير على كل من الشبكة/الحافة	اختبار الانحناء رباعي النقاط	غير خطي	Abaqus	CFS: عنصر Shell. البراغي: عناصر صلبة ثلاثية الأبعاد	التلامس بين الأسطح مع سلوك احتكاكي (معامل الاحتكاك = 0.2) لتفاعل الفولاذ الكربوني مع الفولاذ الكربوني وتفاعل الفولاذ الكربوني مع البراغي	- لوحظ نمط مماثل للفشل الناتج عن الانبعاج في كل من التحقيق العددي والتجريبي.

REFERENCES

1. M. H. Serror, E. M. Hassan, and S. A. Mourad. **Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 121, pp. 216–228, 2016.
2. J. M. Irwan, A. H. Hanizah, I. Azmi, and H. B. Koh. **Large-scale test of symmetric cold-formed steel (CFS)concrete composite beams with BTTST enhancement**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, pp. 720–726, 2011.
3. M. M. Lawan, M. M. Tahir, S. P. Ngian, and A. Sulaiman. **Structural performance of cold-formed steel section in composite structures: A review**, *J. Teknol.*, vol. 74, pp. 165–175, 2015.
4. M. Pavlović, Z. Marković, M. Veljković, and D. Bucrossed D Signevac. **Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 88, pp. 134–149, 2013.
5. Wehbe, Dayton, and Sigl. **Structures Congress 2011 © ASCE 2011 2297**, pp. 2297–2308, 2011.
6. M. Billah, M. Islam, and R. Bin Ali. **Cold formed steel structure : An overview**, *World Sci. News 1*, vol. 118, pp. 59–73, 2019.
7. N. Usefi, P. Sharafi, and H. Ronagh. **Numerical models for lateral behaviour analysis of cold-formed steel framed walls: State of the art, evaluation and challenges**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 138, pp. 252–285, 2019.
8. M. A. Dar, D. R. Sahoo, S. Pulikkal, and A. K. Jain. **Behaviour of laced built-up cold-formed steel columns: Experimental investigation and numerical validation**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 132, pp. 398–409, 2018.
9. J. Ye, S. M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, P. Shepherd, and K. Pilakoutas. **Verification of Eurocode Design Models on the Calculation of Strengths and Deflections in Cold- Formed Steel Beams**, *Eighth Int. Conf. THIN-WALLED Struct.*, 2018.
10. L. Wang and B. Young. **Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 131, pp. 16–32, 2018.
11. Y. Liu, L. Guo, and Z. Li. **Flexural behavior of steel-concrete composite beams with U-shaped steel girders**, in *12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018)*, 2018, pp. 161–167.
12. G. Li, D. Liu, Z. Yang, and C. Zhang. **Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 732–744, 2017.
13. F. Yin, S. D. Xue, W. L. Cao, H. Y. Dong, and H. P. Wu. **Experimental and Analytical Study of Seismic Behavior of Special-Shaped Multicell Composite Concrete-Filled Steel Tube Columns**, *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 146, 2020.
14. K. Piyawat, C. Ramseyer, and T. H. K. Kang. **Development of an axial load capacity equation for doubly symmetric built-up cold-formed sections**, *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 139, pp. 1–13, 2013.
15. G. Hancock. **Distortional Buckling Of Steel Storage Rack Columns**, *J. Struct. Eng.*, vol. 111, pp. 2770–2783, 1985.
16. S. Wanniarachchi. **Flexural Behaviour and Design of Cold- formed Steel Beams with Rectangular Hollow Flanges**, QUEENSLAND UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2005.
17. A. E. M. R. Pinto. **Local and Distortional Buckling of Cold-Formed Steel Members**, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de, 2010.
18. J. Zhu and L. Y. Li. **Effect of shear stress on distortional buckling of CFS beams subjected to uniformly distributed transverse loading**, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 26, pp. 1423–1429, 2019.
19. Y. B. HEVA. **Behaviour and design of cold-formed steel compression members at elevated temperatures yasintha bandula heva**, Queensland University of Technology A, 2009.
20. S. Kesawan, M. Mahendran, Y. Dias, and W. Bin Zhao. **Compression tests of built-up cold-formed steel hollow flange sections**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 116, pp. 180–193, 2017.
21. F. Muftah, M. S. H. Mohd Sani, S. Mohammad, and M. M. Tahir. **Ultimate load of built-up cold formed steel column**, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 9, pp. 2095–2101, 2014.
22. W. Reyes and A. Guzmán. **Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, pp. 929–935, 2011.
23. B. Young and J. Chen. **Cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners**, *Proc. 9th Int. Conf. Steel, Sp. Compos. Struct.*, vol. 134, pp. 43–53, 2007.
24. P. Manikandan and A. Ezhilan. **Investigation on cold-formed steel built-up new innovative hat-shaped closed section under bending**, *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, vol. 11, pp. 1–8, 2019.
25. P. Manikandan and S. Sukumar. **Behaviour of stiffened cold-formed steel built-up sections with complex edge stiffeners under bending**, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, pp. 2108–2115, 2015.
26. K. Sudha and S. Sukumar. **Behaviour of cold-formed steel built-up i section under bending**, *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, pp. 4622–4631, 2013.
27. L. Xu, P. Sultana, and X. Zhou. **Flexural strength of cold-formed steel built-up box sections**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, pp. 807–815, 2009.
28. A. Y. Kamal and N. N. Khalil. **Cold-Formed Steel U-Section Encased in Simple Support Reinforced Concrete Beam .**, *IJRDO-Journal Mech. Civ. Eng.*, vol. 3, pp. 8–23, 2017.
29. Bamaga *et al.* **Feasibility of developing composite action between concrete and cold?formed steel beam**, vol. 20, p. 3689−3696, 2013.
30. D. Dubina and V. U. R. Landolfo. ***Eurocode 3:***

Design of Steel Structures Part 1-3 – Design of Cold-formed Steel Structures, 1st ed., vol. 53. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2012.

31. M. S. H. Mohd Sani, F. Muftah, M. F. Muda, and C. S. Tan. **Resistance of built-up cold-formed steel channel columns filled with concrete**, *J. Teknol.*, vol. 78, pp. 99–104, 2016.
32. M. S. H. M. Sani, M. M. M. Kamal, F. Muftah, and C. S. Tan. **Flexural performance of built-up cold-formed steel beam filled with compacted soil**, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, pp. 9855–9862, 2016.
33. M. Grisilda and S. A. Ligoria. **Flexural behaviour of cold‐formed steel beams filled with GGBS concrete and wrapped with GFRP**, *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 2, pp. 281–287, 2018.
34. O. A. Olaiju, Y. S. Hoe, and E. B. Ogunbode. **Finite element and finite difference numerical simulation comparison for air pollution emission control to attain cleaner environment**, *Chem. Eng. Trans.*, vol. 63, pp. 679–684, 2018.
35. J. Y. Wu, J. Li, and R. Faria. **An energy release rate-based plastic-damage model for concrete**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, pp. 583–612, 2006.
36. D. C. Feng, X. D. Ren, and J. Li. **Softened Damage-Plasticity Model for Analysis of Cracked Reinforced Concrete Structures**, *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 144, pp. 1–15, 2018.
37. G. Z. Voyiadjis and Z. N. Taqieddin. **Elastic Plastic and Damage Model for Concrete Materials : Part I - Theoretical Formulation**, *Int. J. Struct. Chang. Solids*, vol. 1, pp. 31–59, 2009.
38. A. Dragon and Z. Mróz. **A continuum model for plastic-brittle behaviour of rock and concrete**, *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 17, pp. 121–137, 1979.
39. P. H. Feenstra and R. De Borst. **A composite plasticity model for concrete**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 33, pp. 707–730, 1996.
40. E. Pramono and K. Willam. **Fracture Energy-Based Plasticity Formulation Of Plain Concrete**, *J. Eng. Mech*, vol. 115, pp. 1183–1204, 1989.
41. P. Grassl, K. Lundgren, and K. Gylltoft. **Concrete in compression: A plasticity theory with a novel hardening law**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 39, pp. 5205–5223, 2002.
42. P. Grassl and M. Jirásek. **Damage-plastic model for concrete failure**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, pp. 7166–7196, 2006.
43. X. Tao and D. V. Phillips. **A simplified isotropic damage model for concrete under bi-axial stress states**, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, pp. 716–726, 2005.
44. U. Cicekli. **A Plasticity-Damage Model for Plain Concrete**, 2006.
45. A. Wosatko, A. Winnicki, M. A. Polak, and J. Pamin. **Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete**, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 19, pp. 1268–1283, 2019.
46. Y. Chi, M. Yu, L. Huang, and L. Xu. **Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity**, *Eng. Struct.*, vol. 148, pp. 23–35, 2017.
47. J. W. Ju. **On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 25, pp. 803–833, 1989.
48. J. Lee and G. L. Fenves. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures**, *J. Eng. Mech.*, vol. 124, pp. 892–900, 1998.
49. Alnnale, T. (2026). From Reactive to Proactive Governance: A Hybrid LSTM–Gradient Boosting Architecture for Real-Time Anomaly Signal Detection in Multi-Store Retail Supply Chain Decision Systems. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(1), 987-1005.50. B. Alfarah, F. López-Almansa, and S. Oller. **New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures**, *Eng. Struct.*, vol. 132, pp. 70–86, 2017.
51. J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate. **A plastic-damage model for concrete**, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 25, pp. 299–326, 1989.
52. A. Fedoroff, K. Calonius, and J. Kuutti. **Behavior of the Abaqus CDP model in simple stress states**, *Raken. Mek.*, vol. 52, pp. 87–113, 2019.
53. L. Gardner and X. Yun. **Description of stress-strain curves for cold-formed steels**, *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 527–538, 2018.
54. W. Ramberg and W. R. Osgood. **1943-remebrg - osgood .pdf**. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, p. 29, 1943.
55. H. . Hill. **Determination of stress-strain relations from offset yield strength values**, *Natl. Advis. Comm. Aeronaut. Tech. notes*, p. 11, 1944, [Online]. Available: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b805294.pdf.
56. Y. Majdi, C. T. T. Hsu, and S. Punurai. **Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete**, *Eng. Struct.*, vol. 69, pp. 271–284, 2014.
57. FIB. **Model Code 2010**, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2010.
58. J. Liu, X. Zhou, and D. Gan. **Effect of friction on axially loaded stub circular tubed columns**, *Adv. Struct. Eng.*, vol. 19, pp. 546–559, 2016.
59. M. Elchalakani, X. L. Zhao, and R. H. Grzebieta. **Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending**, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 57, pp. 1141–1168, 2001.
60. Dassault Systèmes. **Abaqus 6.11 Theory Manual**, Dassault Systèmes Simulia Corp, USA, 2011.
61. L. H. Han, G. H. Yao, and Z. Tao. **Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, pp. 24–36, 2007.
62. P. Manikandan and M. Thulasi. **Investigation on cold-formed steel lipped channel built-up I beam with intermediate web stiffener**, *Int. J. Adv. Struct.*

Eng., vol. 11, pp. 97–107, 2019.

63. M. Ghannam. **Bending Moment Capacity of Cold-Formed Steel Built-Up Beams**, *Int. J. Steel Struct.*, vol. 19, pp. 660–671, 2019.
64. J. Ye, I. Hajirasouliha, and J. Becque. **Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 125, pp. 245–258, 2018.
65. S. Sawant and A. Galatage. **Experimental Analysis of Pac Encased Cold Formed Steel Sections**, *IJARIIE*, vol. 3, pp. 633–642, 2017, [Online]. Available: www.ijariie.com.
66. L. Laím, J. P. C. Rodrigues, and L. S. Da Silva. **Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams**, *Thin-Walled Struct.*, vol. 72, pp. 1–13, 2013.
67. algasim Alrrjipi, J. A. (2026). Silent Data Waste in Public Laboratories: A Conceptual Framework for Sustainable Data-Driven Management. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(2), 36-48.68. S. Sudharsan and N. Vinoth Kumar. **Experimental Investigation of Cold-Formed Steel Composite Beams with Shear Connectors**, pp. 28–38, 2018.
69. BenHusein, A. H., Shakrum, F. M., & Elgdiri, E. M. (2026). A Comprehensive Performance Evaluation of a Wi-Fi-Based Wireless Sensor Network Using Raspberry Pi and ESP8266 Under Multi-Rate Traffic Conditions. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 816-818.