

Development of mechanical model to analyze Steel Bolted flush End Plate Beam-to-Column Joints during Progressive Collapse

Dr. Badia Haidar ¹
Dr. Ghandi Loho ²
Khudr ALhaj ³

(Received 10 / 3 / 2019. Accepted 16 / 6 / 2019)

□ ABSTRACT □

Bolted beam-to-column joints are an essential element in the performance of steel structures under exceptional loading conditions such as explosions and vehicle collisions due to the risk of a progressive collapse. In some progressive collapse scenarios (sudden column loss), joints are subject to large axial forces and deformations caused by the catenary action that develops in the beams. These properties are not encountered for joint behavior in conventional structural design, while they are essential characteristics for any realistic representation of joint performance during progressive collapse. A mechanical model has been developed to analyze bolted flush end-plate beam-to-column joints during progressive collapse due to column loss using ABAQUS. The mechanical model was validated in comparison to results obtained from published researches. The results confirmed that the developed mechanical model can simulate the main features of the response of a bolted flush end-plate beam-to-column joint under a column loss scenario with good accuracy.

Keywords: Progressive collapse, column loss, Beam–column joints, mechanical model

¹ Assistant Professor, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University – Syria, e: haidar.b@gmail.com

² Associated Professor, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University – Syria, e: g_loho@hotmail.com

³ PhD student, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University– Syria, e: khudr.alhaj@gmail.com

تطوير نموذج ميكانيكي لتحليل الوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي

د. بادية حيدر⁴

د. غاندي لوجو⁵

خضر يوسف الحج⁶

(تاريخ الإيداع 10 / 3 / 2019. قُبِلَ للنشر في 16 / 6 / 2019)

□ ملخص □

تشكل الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي عنصراً جوهرياً في أداء المنشآت الفولاذية تحت شروط التحميل الاستثنائية كالانفجارات واصطدام العربات بسبب خطر حدوث بالانهيار التدريجي (progressive collapse). تخضع الوصلات في بعض سيناريوهات الانهيار التدريجي (فقدان مفاجئ لعمود) لتشوهات وقوى محورية كبيرة ناتجة عن آلية فعل الكابل (Catenary action) التي تتطور في الحيزان، لا تصادف هذه الخصائص لسلوك الوصلة في التصميم الإنشائي التقليدي بينما تشكل خصائص جوهريّة من أجل أي تمثيل واقعي لأداء الوصلة أثناء الانهيار التدريجي. تم تطوير نموذج ميكانيكي يمكن استخدامه لتحليل الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود باستخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS. تم توثيق النموذج الميكانيكي المنجز بالمقارنة مع نتائج تجريبية مستخلصة من الأبحاث المنشورة. أكدت النتائج أن النموذج الميكانيكي المطور يستطيع وبدقة جيدة محاكاة السمات الرئيسية المميزة لاستجابة وصلة جائز-عمود منفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة تحت سيناريو فقدان عمود.

الكلمات المفتاحية: الانهيار التدريجي، فقدان عمود، وصلات جائز-عمود، نموذج ميكانيكي.

⁴ أستاذ مساعد - قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : haidar.b@gmail.com

⁵ مدرس - قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : g_loho@hotmail.com

⁶ طالب دكتوراه - قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : khudr.alhaj@gmail.com

مقدمة

يشكل أداء منشآت الأبنية تحت شروط التحميل الاستثنائية كالانفجارات واصطدام العربات والطائرات أهمية للباحثين والمهندسين بسبب خطر حدوث ما يعرف بالانهيار التدريجي (انهيار الدومينو) (Progressive Collapse). يعرف الكود الأمريكي ASCE7-10 [1] الانهيار التدريجي بأنه انتشار انهيار موضعي ابتدائي من عنصر إلى آخر مع إمكانية أن يؤدي إلى انهيار المنشأ ككل أو انهيار جزء كبير منه. كان الانهيار الجزئي للبرج Ronan.Point في انكلترا عام 1968 [2] بسبب انفجار غاز، هو المحرض لأول عمل بحثي حول الانهيار التدريجي. ومنذ ذلك الحين، أثارت عدة أحداث كبيرة اهتمام الباحثين بهذا المجال ومنها تفجير مبنى ألفريد مورا الفدرالي في مدينة أوكلاهوما الأمريكية عام 1995 [3] وأحداث 11 أيلول عام 2001 التي أدت إلى انهيار البرجين التوأم لمركز التجارة العالمي في مدينة نيويورك والذي انتهى بمقتل حوالي 3000 شخص [4].

يُعد الكود البريطاني [5] هو الكود الأول الذي أدخل في قواعده طرق تصميم المنشآت لحمايتها من الانهيار التدريجي وذلك بعد انهيار البرج Ronan Point عام 1968. فيما بعد اعتمدت كودات تصاميم أخرى كالكود الأوروبي EN1993-1-7 [6] مقاربات مشابهة. حالياً يُعد الكود الأمريكي [ASCE-7-10] [1] هو الكود الوحيد الذي يعالج موضوع الانهيار التدريجي بشكل مفصل نوعاً ما، إضافة إلى المستنديين الأمريكيين (DOD) [7] و (GSA) [8] القائمين على نفس الفلسفة المعتمدة في [ASCE-7-10] [1] ولكن مع تفصيل أكثر.

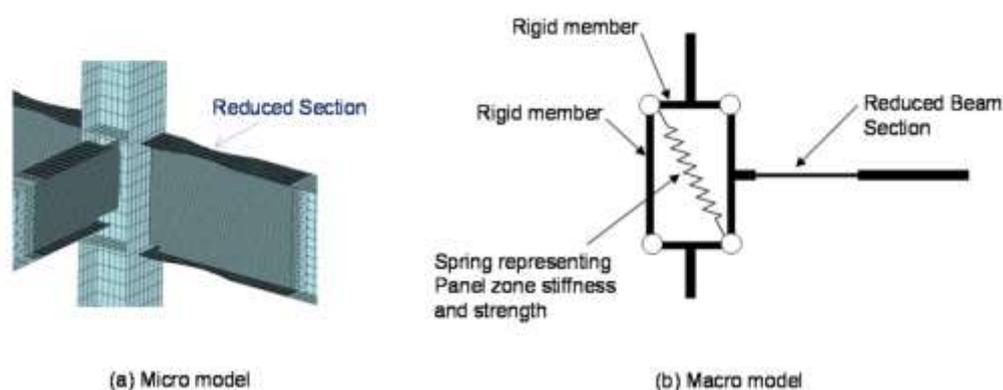
يحدد الكود الأمريكي وهذان المستندان طريقتي تصميم:

- طريقة التصميم غير المباشرة (indirect design method) وهي تشمل اعتبارات ضمنية يمكن أن تحسن المقاومة على الانهيار التدريجي من خلال تزويد المنشأ بحد أدنى من المقاومة، الاستمرارية والمطاوعة.
- طريقة التصميم المباشرة (direct design method) وتقوم بشكل أساسي على ما يعرف بطريقة المسار البديل (Alternate path (AP) method).

في طريقة المسار البديل (AP)، يفترض أنه تمت إزالة عنصر واحد أو أكثر من العناصر الإنشائية الحاملة الشاقولية، ويتبع ذلك بإعادة توزيع حمولات الثقالة بشكل ملائم ومن ثم يتم تحليل النظام الإنشائي للمبنى المتضرر في وضعه الجديد. تركز طريقة المسار البديل (AP) على استجابة المنشأ المتضرر نتيجة الحدث الطارئ دون الاهتمام بالحمولة الاستثنائية التي أدت إلى هذا الضرر.

تخضع الوصلات في بعض سيناريوهات الانهيار التدريجي (فقدان مفاجئ لعمود) لتشوّهات كبيرة جداً وتخضع لقوى محورية كبيرة ناتجة عن آلية فعل الكابل (Catenary action) التي تتطور في الجيزان، وتتغير هذه القوى المحورية بشكل غير تناسبي مع عزوم الانعطاف خلال مراحل الاستجابة المختلفة، وقد تنعكس التشوهات لبعض مركبات الوصلة. لا تصادف هذه الخصائص لسلوك الوصلة في التصميم الإنشائي التقليدي بينما تشكل سمات جوهرية من أجل أي تمثيل واقعي لأداء الوصلة أثناء الانهيار التدريجي.

فيما يخص التحليل الإنشائي، يمكن استخدام تقنيات تحليل متنوعة تتدرج من التحليل الستاتيكي المرن الخطي إلى التحليل الديناميكي اللاخطي. يجب استخدام نماذج إنشائية قادرة على محاكاة استجابة المنشأ تحت انهيار تدريجي. يمكن تصنيف النماذج الإنشائية كنماذج مايكروية (micro-models) ونماذج ماكروية (macro-models) [9] الشكل (1).



الشكل (1) : تصنيف النماذج الإنشائية [9].

النموذج المايكروي هو نموذج عناصر منتهية قائم على الاستمرارية الفيزيائية وهو قادر على محاكاة الاستجابة الموضوعية والإجمالية للمنشأ بدقة عالية. لكن النماذج المايكروية تتطلب قدرات حاسوبية كبيرة ووقت تحليل طويل. أما النماذج الماكروية فتستخدم عناصر منتهية من نمط جوائز-عمود (beam-column finite element) إضافة إلى عناصر منتهية نابضية (spring finite elements) لمحاكاة الاستجابة الكلية للمنشأ. تتميز النماذج الماكروية بسهولة الإنشاء وسرعة التحليل مقارنة من النماذج المايكروية لذا فهي ملائمة للاستخدام في بيئة مكاتب التصميم الهندسية عند توفر الدقة الكافية. يتطلب هذه الدقة أن تكون النماذج الماكروية قادرة على تمثيل كل الظواهر الفيزيائية المهمة المرتبطة باستجابة النظام الإنشائي على الانهيار التدريجي. وبشكل خاص، يجب توفر نموذج للوصلة يسمح بمحاكاة سلوكها تحت الشروط التي يمكن أن تخضع لها أثناء الانهيار التدريجي.

وفي هذا الإطار، تعتبر النماذج الميكانيكية (mechanical models) القائمة على طريقة المركبات (component method) هي الأكثر استخداماً لمحاكاة سلوك الوصلات الفولاذية بمختلف أنواعها. وقد تبني الكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] هذه الطريقة لحساب الخصائص الرئيسية للوصلة (الصلابة الدورانية والمقاومة على الانعطاف) عند خضوعها لانعطاف صرف. بيد أن طريقة المركبات كما هي موجودة في الكود الأوروبي ليست قادرة بعد على تحديد خصائص الوصلة عند خضوعها لقوة محورية مرافقة لعزم الانعطاف.

أظهرت الأبحاث المهمة بالسلوك الإنشائي للإطارات في سيناريو الانهيار التدريجي، أنه يمكن للوصلات أن تخضع لقوة محورية كبيرة لا تتطور بشكل تناسبي مع عزوم الانعطاف في الوصلة. علاوة على ذلك، قد تتجاوز تشوهات الوصلة أثناء الانهيار التدريجي بشكل كبير الحدود المعتبرة في شروط التحميل العادي [11]. وبناءً على كل ما سبق، فإن تطوير نموذج ميكانيكي يأخذ بعين الاعتبار هذه الخصائص التي تميز سلوك الوصلة أثناء الانهيار التدريجي أصبح موضوع اهتمام كبير، لكن البحث فيه لا يزال ناشئاً ولاسيما فيما يتعلق بالوصلات جوائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية.

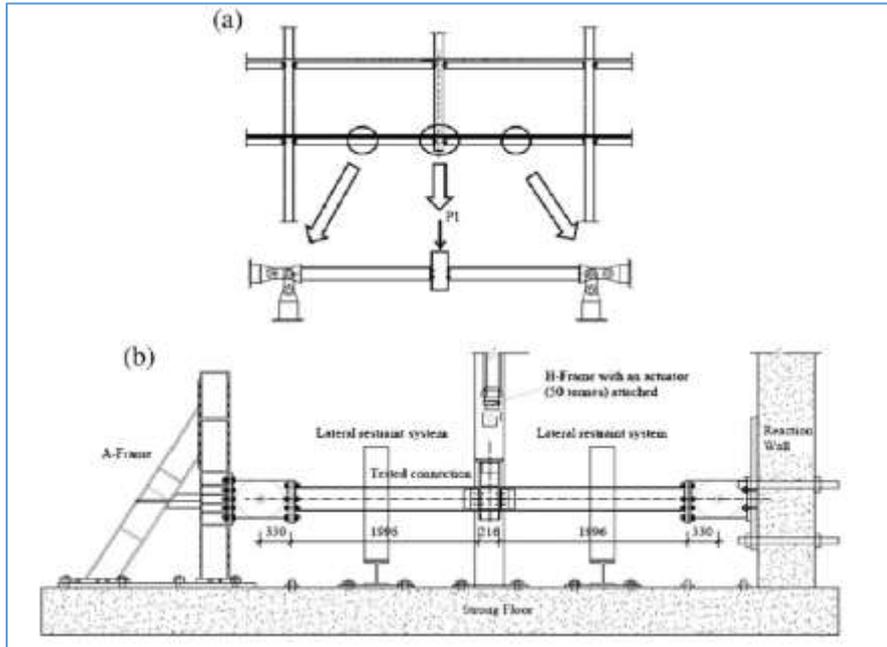
يجري البحث في جامعة تشرين-اللاذقية -سوريا وفترة التنفيذ سنتين.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج ميكانيكي يمكن استخدامه في تحليل الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود. لتحقيق هذا الهدف استخدم برنامج [12] ABAQUS-V.14.2 القائم على طريقة العناصر المنتهية، وقد تم توثيق النموذج الميكانيكي المطور بالمقارنة مع نتائج تجريبية مستخلصة من الأبحاث المنشورة [13].

الدراسة المرجعية

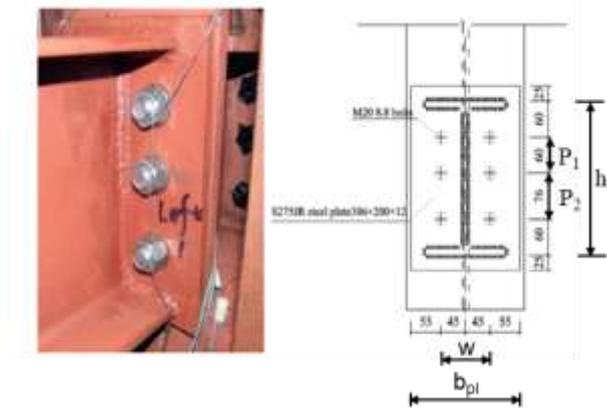
قام الباحث Yang [13] بإجراء اختبارات تجريبية ستاتيكية لتقييم أداء بعض الأنواع الشائعة الاستخدام للوصلات الفولاذية جائز-عمود خلال سيناريو إزالة عمود مركزي. وتضمنت الوصلات المختبرة وصلة واحدة منفذة بالبراغي وصفيحة جبهية غير بارزة. تقع الوصلة المعتبرة في هذا الاختبار فوق الطابق حيث تمت إزالة عمود طرفي. لتبسيط الاختبار، تم افتراض وقوع نقطة الانعطاف عند وسط مجاز الجائز، حيث تم اعتماد نصف مجاز الجائز مع شروط استناد مفصلية عند نهاية كل جائز كما يظهر الشكل (2).



الشكل(2): نموذج وصلة جائز-عمود المختبرة تجريبيا وتجهيزات الاختبار [13]

يتألف النموذج التجريبي من عمود مركزي وجائزين متصلين به ووصلة جائز-عمود مركزية. يظهر الشكل (3) التفاصيل الإنشائية للوصلة المختبرة. استخدم لتصنيع الجوائز مقاطع (UB 254*146*37) ولتصنيع العمود مقطع (UC 203*203*17) ومن أجل الأعمدة والجوائز تم استخدام الفولاذ الإنشائي (S355) أما الصفائح الجبهية فتم تصنيعها من فولاذ (S275) واستخدمت براغي (M20, 8.8). تم تزويد النموذج التجريبي بقيد أفقي عند النهاية الطرفية لكل جائز لأخذ التقييد الناتج عن العناصر الإنشائية المجاورة في المنشأ الحقيقي بعين الاعتبار. تم إجراء الاختبار بتطبيق تابع انتقال ستاتيكي متزايد على العمود الوسطي باستخدام مكبس يدفعه نحو الأسفل حتى انهيار

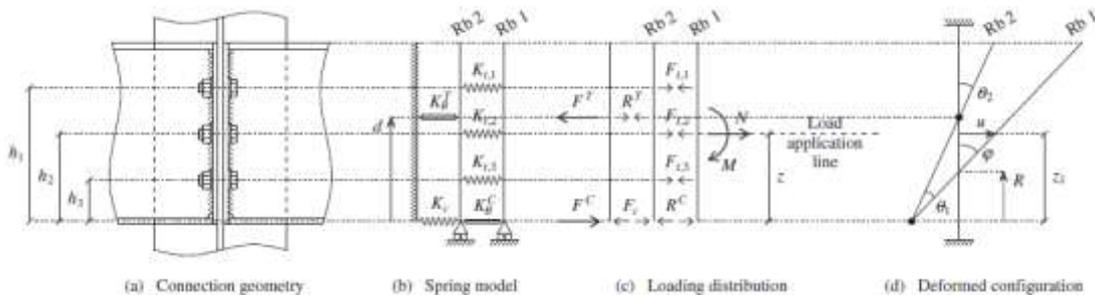
الوصلة. قام نفس الباحث Yang [14] بإجراء دراسة عديدة لتقييم أداء الوصلات المختبرة تجريبياً. أكدت النتائج التجريبية والعديد على مساهمة آلية فعل الكابل في المقاومة من أجل أنماط مختلفة من الوصلات المدروسة.



الشكل (3): التفاصيل الإنشائية للوصلة بصفحة جبهية غير بارزة [13]

يوجد الكثير من الأبحاث التي اهتمت بتطوير نماذج ميكانيكية لوصلات جائر-عمود منفذة بالبراغي وصفائح جبهية وذلك عندما تخضع الوصلة لعزم انعطاف صرف بينما نجد عدد قليل نسبياً من النماذج الميكانيكية من أجل وصلات تخضع لعزم انعطاف مترافق مع قوة محورية ثابتة أو متزايدة بنفس معدل تزايد عزم الانعطاف [15-16-17] وتصبح هذه النماذج نادرة فيما يخص أداء الوصلة أثناء الانهيار التدريجي خلال سيناريو فقدان العمود [18]. تقوم هذه النماذج الميكانيكية بمعظمها على طريقة المركبات (Component method) المعتمدة حالياً في عدد من كودات التصميم الخاصة بالوصلات الفولاذية ومنها الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10].

استناداً إلى المبادئ العامة لطريقة المركبات، قام الباحث Stylianidis وزملاؤه [18] بتطوير النموذج الميكانيكي الموصوف على الشكل (4). يتألف النموذج من ثلاثة قضبان صلبة تمثل محور العمود (قضيب الاستناد)، محور جناح العمود (القضيب الثاني: Rb_2) وطرف الجائر المجاور للعمود (القضيب الأول: Rb_1). تتصل هذه القضبان الثلاثة بمجموعة من النوايض المستخدمة لنمذجة مركبات الوصلة. واستخدم الباحثون منحنى ثنائي الخطية لتوصيف العلاقة قوة-انتقال لكل مركبات الوصلة.



الشكل(4): النموذج الميكانيكي المطور من قبل Stylianidis [18]

اعتمد الباحثون طريقة توصيف المركبات في الكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] لحساب الصلابة المرنة (K_e) والمقاومة التصميمية (F_{Rd}) لمركبات الوصلة الأساسية. وقام الباحثون باعتماد صلابة لدنة تقريبية (K_p) استناداً إلى

الصلابة المرنة (Ke) ومعامل تقسية تشوهية μ ملائم $(Kp=\mu Ke)$. و قد طور الباحثون مجموعة من الصيغ الصريحة لتوقع تشوهات الوصلة المدروسة بدلالة عزوم الانعطاف والقوى المحورية المطبقة على الوصلة. تجدر الإشارة إلى أن هذا النموذج لا يأخذ التشوهات القصوى للمركبات بعين الاعتبار وبالتالي لا يمكنه توقع المقاومة القصوى للوصلة. إضافة إلى ذلك فإن النموذج لا يأخذ مقاومة الوصلة على القص بعين الاعتبار. من جانب آخر، قام الباحثون بتوثيق النموذج الميكانيكي المقترح بالمقارنة مع نتائج تجريبية من أجل حالة قوة محورية ثابتة (شادة أو ضاغطة) فقط مترافقة مع عزم انعطاف متزايد وهذا لا يتوافق مع حالة التحميل التي تخضع لها الوصلة أثناء الانهيار التدريجي حيث تخضع الوصلة لعزم انعطاف مع قوة محورية تتزايد بشكل غير تناسبي مع عزم الانعطاف. يضاف إلى ذلك، أنه لا يمكن استخدام هذا النموذج كما هو مطور لإجراء تحليل إنشائي لهذا النمط من الوصلات عندما تتواجد ضمن المنشأ.

طرائق البحث ومواده

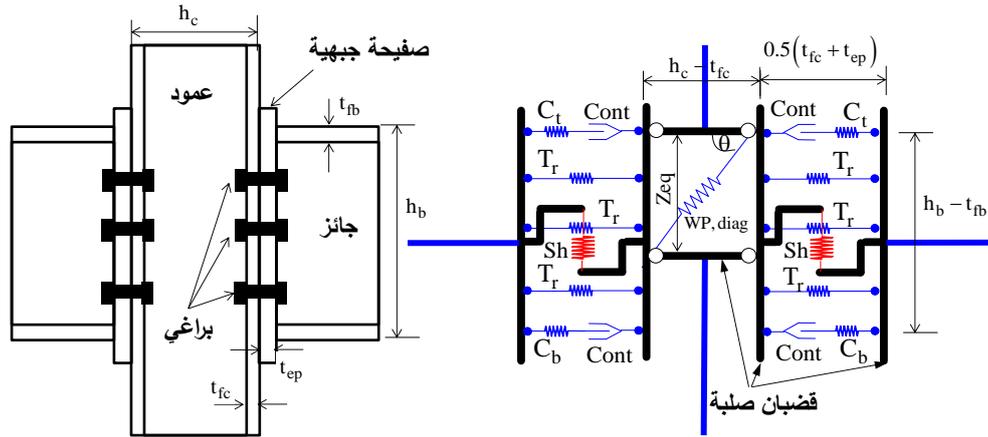
1- تطوير نموذج ميكانيكي للوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة:

تم تطوير النموذج الميكانيكي المقدم في هذا البحث بالاستفادة من النماذج الميكانيكية المتاحة [15-16-17-18]، كما تم الاعتماد على النتائج التجريبية في البحث [13]، إضافة إلى نتائج النماذج العددية المايكروية التي تم تطويرها من قبل مؤلفي هذا البحث والتي شكلت موضوع بحث سابق. يستند النموذج الميكانيكي المطور في هذا البحث بشكل جوهري إلى طريقة المركبات (component method) المعتمدة في الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10]. حيث قمنا بإدخال تعديلات وتحسينات تأخذ بعين الاعتبار الشروط التي تخضع لها الوصلة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن إزالة عمود. نذكر بأن طريقة المركبات تقوم على اعتبار الوصلة كمجموعة من المركبات الفردية مع افتراض أن كل من هذه المركبات يعمل كإنباض له قانون سلوكه الخاص قوة - انتقال، وبعد ذلك يتم تجميع المركبات الفردية إما على التسلسل أو على التوازي وفقاً للشكل الهندسي للوصلة مع مراعاة شروط تطابق التشوهات.

تم استخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS-V.14.2 [12] لتطوير النموذج الميكانيكي المقترح. يأخذ هذا النموذج بعين الاعتبار اللاخطية الهندسية والمادية ويسمح بمحاكاة التصدع (fracture)، ومن أجل توثيق النموذج الميكانيكي المطور تم تشكيل النموذج اعتماداً على النموذج التجريبي المختبر من قبل الباحث Yang [13] والمذكور في الفقرة (2) وذلك من حيث الأبعاد الهندسية وخواص مواد البناء المستخدمة والشروط الطرفية وطريقة التحميل.

1-1 وصف النموذج الميكانيكي المطور

يظهر الشكل (5) النموذج الميكانيكي المقترح لوصلة جائز-عمود منفذة بالبراغي وصفيحة جبهية غير بارزة. يتألف النموذج من مجموعة من القضبان الصلبة المتصلة فيما بينها بعدد من النوابض (springs) المستخدمة لنمذجة مركبات الوصلة. نعطي فيما يلي المركبات (النوابض) التي يتألف منها النموذج الميكانيكي المطور.

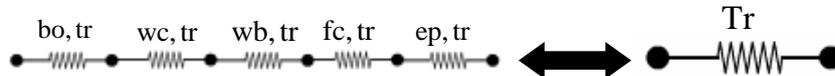


الشكل (5): النموذج الميكانيكي المطور

النوابض T_r : كل واحد من هذه النوابض هو نابض مكافئ لمجموعة المركبات الفردية المنسوبة إلى صف براغي

مشدود (r) والمجمعة على التسلسل (الشكل 6):

- البراعي المشدودة (النابض bo, tr)
- جسد العمود المشدود عرضيا (النابض wc, tr)
- جسد الجائز المشدود (النابض wb, tr)
- جناح العمود الخاضع للانعطاف (النابض fc, tr)
- الصفحة الجبهية الخاضعة للانعطاف (النابض ep, tr)



الشكل (6): نمذجة مركبات الوصلة المنسوبة إلى صف براغي مشدود (r)

النوابض C_b و C_t : كل من هذين النوابضين هو عبارة عن نابض مكافئ للمركبتين الفرديتين المتواجدين في منطقة

الضغط العلوية (انعطاف موجب) أو السفلية (انعطاف سالب) من الوصلة و المجمعتين على التسلسل (الشكل 7):

- جناح وجسد الجائز المضغوطان (النابض fb, c)
- جسد العمود المضغوط عرضيا (النابض wc, c)

استنادا إلى الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] ، يفترض أن مركز الضغط للوصلة يقع عند منتصف سماكة جناح الجائز.



الشكل (7): نمذجة المركبات المضغوطة في الوصلة

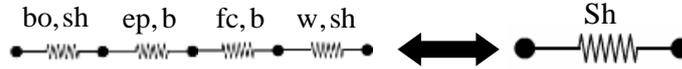
النابض $WP,diag$: يستخدم هذا النابض لنمذجة سلوك لوح جسد العمود (column Web Panel) في القص.

النابض Sh : يستخدم هذا النابض لنمذجة مقاومة الوصلة على القص (connection shear resistance)، وهو

نابض مكافئ لمجموعة المركبات الفردية الخاضعة لتأثير القص الشاقولي في الوصلة و المجمعة على التسلسل

(الشكل 8):

- البراغي الخاضعة للقص (النايض bo,sh)
- الصفيحة الجبهية الخاضعة للضغط القطري (bearing) على جدران الثقوب (النايض ep,b)
- جناح العمود الخاضع للضغط القطري (bearing) على جدران الثقوب (النايض fc,b)
- اللحام الخاضع للقص بين الصفيحة الجبهية و جسد الجازز (النايض W,sh)

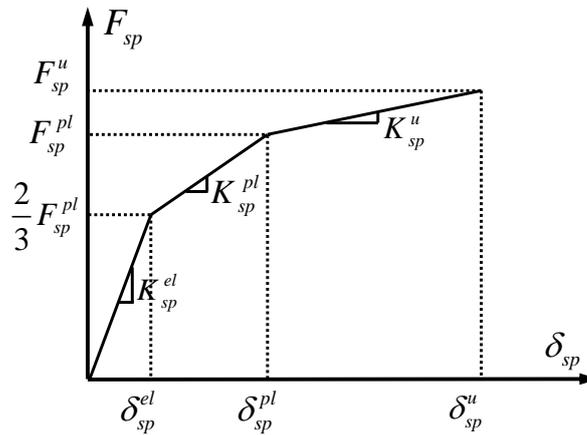


الشكل (8): نمذجة المربعات الخاضعة للقص الشاقولي في الوصلة

العنصر Cont: يستخدم هذا العنصر لنمذجة شروط التماس (contact) بين الصفيحة الجبهية و العمود عند مركز الضغط.

1-2 نمذجة سلوك مركبات الوصلة (النوايض)

يعطى سلوك كل مركبة من الوصلة من خلال علاقة قوة-انتقال، حيث يمكن توصيف هذه العلاقة بمنحني لاخطي ثنائي أو ثلاثي الخطية أو حتى أكثر [15]. سنعتمد في هذا البحث منحني قوة-انتقال ثلاثي الخطية (الشكل 9).



الشكل (9): منحني العلاقة قوة-انتقال المستخدم لتوصيف سلوك النوايض المكونة للنموذج الميكانيكي المطور

لنمذجة سلوك كل من النوايض المكونة للنموذج الميكانيكي المطور. يمكن إنشاء هذا المنحني الثلاثي الخطية استناداً إلى نفس المبدأ المعتمد في الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] لإنشاء منحني العزم-دوران للوصلة باستخدام الصلابة المرنة K_{sp}^{el} والمقاومة لللدنة F_{sp}^{pl} لكل نابض وفق المعادلات (1-a,b,c):

$$K_{sp} = K_{sp}^{el} \quad \text{for } F_{sp} \leq \frac{2}{3} F_{sp}^{pl} \quad (1-a)$$

$$K_{sp} = K_{sp}^{pl} = \frac{K_{sp}^{el}}{3\eta - 2} \quad \text{for } \frac{2}{3} F_{sp}^{pl} < F_{sp} \leq F_{sp}^{pl} \quad (1-b)$$

$$K_{sp} = K_{sp}^u = \mu_{sh} K_{sp}^{el} \quad \text{for } F_{sp} > F_{sp}^{pl} \quad (1-c)$$

حيث:

η : معامل تعديل الصلابة ويأخذ وفقا الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] القيمة ($\eta=2$) من أجل وصلة جأز - عمود منفذة بالبراعي وصفيحة جبهية.

μ_{sh} : معامل التصلب التشوهي (strain hardening) ويمكن إعطاؤه القيمة ($\mu_{sh} = 0.01$) المعتمدة من قبل عدد من الباحثين [18].

يمكن حساب الصلابة المرنة K_{sp}^{el} والمقاومة اللدنة F_{sp}^{pl} لكل نابض من نوابض النموذج الميكانيكي المطور انطلاقا من صلابة ومقاومة مركبات الوصلة التي يمثلها النابض.

3-1-2-1 نمذجة النوابض Tr

تعطى المقاومة اللدنة F_{tr}^{pl} و الصلابة المرنة K_{tr}^{el} للنابض Tr بالعلاقتين (2) و (3):

$$F_{tr}^{pl} = \min(F_{bo,tr}^{pl}, F_{wc,tr}^{pl}, F_{wb,tr}^{pl}, F_{fc,tr}^{pl}, F_{ep,tr}^{pl}) \quad (2)$$

$$K_{tr}^{el} = \frac{1}{\frac{1}{K_{bo,tr}^{el}} + \frac{1}{K_{wc,tr}^{el}} + \frac{1}{K_{wb,tr}^{el}} + \frac{1}{K_{fc,tr}^{el}} + \frac{1}{K_{ep,tr}^{el}}} \quad (3)$$

حيث:

للنوابض اللدنة المقاومة الترتيب على تمثل $F_{bo,tr}^{pl}, F_{wc,tr}^{pl}, F_{wb,tr}^{pl}, F_{fc,tr}^{pl}, F_{ep,tr}^{pl}$
 . bo,tr ; wc,tr ; wb,tr ; fc,tr ; ep,tr
 للنوابض المرنة الصلابة الترتيب على تمثل $K_{bo,tr}^{pl}, K_{wc,tr}^{pl}, K_{wb,tr}^{pl}, K_{fc,tr}^{pl}, K_{ep,tr}^{pl}$
 . bo,tr ; wc,tr ; wb,tr ; fc,tr ; ep,tr

يتضمن الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] علاقات مفصلة لحساب المقاومة والصلابة لكل من المركبات (النوابض) المذكورة أعلاه و المنسوبة إلى صف براغي مشدود (r)، لكن لا يتسع المجال لاستعراضها هنا، ويمكن للقارئ العودة إلى المرجع [10] لمزيد من التفاصيل.

3-2-1-2 نمذجة النوابض Cb و Ct

تعطى المقاومة اللدنة $F_{ct(cb)}^{pl}$ و الصلابة المرنة $K_{ct(cb)}^{el}$ لأي من النابضين Ct و Cb بالعلاقتين (4) و (5):

$$F_{ct(cb)}^{pl} = \min(F_{fb,c}^{pl}, F_{wc,c}^{pl}) \quad (4)$$

$$K_{ct(cb)}^{el} = \frac{1}{\frac{1}{k_{fb,c}^{el}} + \frac{1}{k_{wc,c}^{el}}} \quad (5)$$

حيث:

$F_{fb,c}^{pl}, F_{wc,c}^{pl}$: تمثل على الترتيب المقاومة اللدنة للنابضين fb,c و wc,c
 $k_{fb,c}^{el}, k_{wc,c}^{el}$: تمثل على الترتيب الصلابة المرنة للنابضين fb,c و wc,c

تحتسب مقاومة وصلابة النابضين **Ct** و **Cb** باستخدام الصيغ المعطاة في الكود الأوروبي [10].

3-2-1-3 نمذجة النابض WP,diag :

وفقا للكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10]، تعطى المقاومة التصميمية لوح جسد العمود الخاضع للقص بالعلاقة

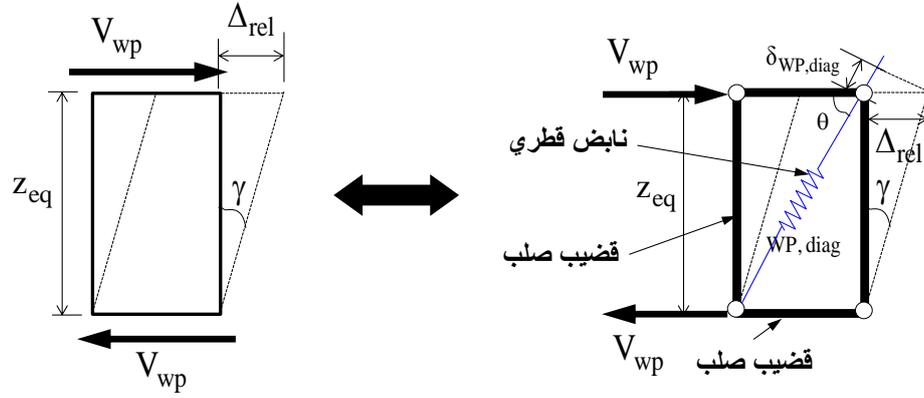
(6):

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (6)$$

حيث:

A_{vc} : السطح الفعال على القص لمقطع العمود، $f_{y,wc}$: حد المرونة لفولاذ جسد العمود

استنادا إلى فرضيات الكود الأوروبي التي تنص على إهمال التشوهات الانعطافية وافترض خضوع لوح جسد العمود لقص منتظم، يمكن حساب صلابة لوح جسد العمود الخاضع للقص انطلاقا من الشكل (10-a) والعلاقات (7-8-9-10).



(a): تشوه لوح جسد العمود في القص

(b): نمذجة لوح جسد العمود

الشكل (10): لوح جسد العمود الخاضع للقص

$$K_{WP}^{el} = \frac{V_{wp}}{\Delta_{rel}} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\Delta_{rel}}{Z_{eq}} \quad (8)$$

$$V_{wp} = \tau A_{vc} : \text{with } \tau = G\gamma, G = \frac{E_a}{2(1+\nu)}, \nu = 0.3 \quad (9)$$

$$K_{WP}^{el} = \frac{G\gamma A_{vc}}{\gamma Z_{eq}} = \frac{GA_{vc}}{Z_{eq}} \Rightarrow K_{WP}^{el} = \frac{0.38A_{vc}}{Z_{eq}} E_a \quad (10)$$

حيث:

V_{wp} : قوة القص المطبقة على لوح جسد العمود

Δ_{rel} : الانتقال النسبي بين طرفي لوح جسد العمود

γ : زاوية الدوران الناتجة عن القص (shear distorsion) للوح جسد العمود

V, G, τ : تمثل على الترتيب إجهاد القص، معامل المرونة بالقص ومعامل بواسون
 Z_{eq} : ذراع الرافعة بين محصلة قوى الشد وقوى الضغط في الوصلة ويمكن حسابها أيضا باستخدام علاقات مفصلة
 في الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10].

لإدخال سلوك لوح جسد العمود في النموذج الميكانيكي المطور تمت نمذجة لوح جسد العمود باستخدام أربعة قضبان
 صلبة متمفصلة فيما بينها و نابض قطري كما يظهر الشكل (10-b). يمكن اشتقاق علاقات المقاومة اللدنة للنابض
 القطري $F_{WP,diag}^{pl}$ وصلابته المرنة $K_{WP,diag}^{el}$ استنادا إلى الشكل (10-b) والعلاقتين (6) و (7) كما يلي:
 يعطى التطاول $\delta_{WP,diag}$ والقوة المحورية $F_{WP,diag}$ في النابض القطري WP,diag بالعلاقتين (11) و (12):

$$\delta_{WP,diag} = \Delta_{rel} \cos \theta \quad (11)$$

$$F_{WP,diag} = \frac{V_{WP}}{\cos \theta} \quad (12)$$

حيث θ هي زاوية ميل النابض القطري عن الاتجاه الأفقي كما يظهر الشكل (10). باستخدام العلاقات (7)-
 (11-12)، تحسب صلابة النابض القطري المرنة $K_{WP,diag}^{el}$ وفق العلاقة (13):

$$K_{WP,diag}^{el} = \frac{F_{WP,diag}}{\delta_{WP,diag}} = \frac{V_{WP} / \cos \theta}{\Delta_{rel} \cos \theta} = \frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{V_{WP}}{\Delta_{rel}} \Rightarrow K_{WP,diag}^{el} = \frac{K_{WP}^{el}}{\cos^2 \theta} \quad (13)$$

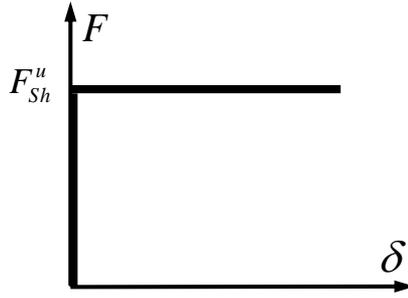
أما المقاومة اللدنة للنابض القطري فتحسب وفق العلاقة (14) بدلالة المقاومة التصميمية على القص للوح جسد العمود
 المعرفة في العلاقة (6):

$$F_{WP,diag}^{pl} = \frac{V_{WP,Rd}}{\cos \theta} \quad (14)$$

من أجل النابض السابقة الداخلة في تكوين النموذج الميكانيكي المطور (WP,diag , Cb , Ct ,Tr) ، يتم تحديد
 المقاومة القصوى لكل نابض F_{sp}^u بنفس الأسلوب المعتمد عند تحديد المقاومة اللدنة F_{sp}^{pl} ولكن باستخدام المقاومة
 القصوى لمركبات الوصلة. ويتم تحديد هذه الأخيرة باستخدام المقاومة القصوى على الشد f_u للفولاذ بدلا من إجهاد
 الخضوع f_y في المعادلات المستخدمة أثناء تطوير هذا النموذج. تجدر الإشارة هنا إلى أن هذه المقاربة في تحديد
 المقاومة القصوى لمركبات الوصلة قد تم اعتمادها من قبل عدد من الباحثين [15].

4-2-1- نمذجة النابض Sh:

عادة ما يكون الانزلاق على سطح التماس بين الصفيحة الجبهية وجناح العمود صغيرا ويصبح مهملا عند استخدام
 براغي مسبقة الإجهاد. آخذين هذا الواقع بعين الاعتبار إضافة إلى صعوبة تحديد صلابة الوصلة الفعلية على القص
 الشاقولي، سنعتمد سلوك صلب-لدن للنابض Sh يعبر عنه منحنى القوة - انتقال المبين على الشكل (11).



الشكل (11): منحنى العلاقة قوة-انتقال المستخدم لتوصيف سلوك النابض Sh

لقد تبني بعض الباحثين هذا المفهوم، أي استخدام نابض قص صلب (Rigid shear spring) لنقل قوة القص الشاقولي بين الجائز والعمود وذلك من أجل نمط آخر من الوصلات [19]. لكنهم لم يأخذوا بعين الاعتبار مقاومة الوصلة على القص الشاقولي، حيث افترض الباحثون أن الانهيار على القص الشاقولي لا يتحكم بمقاومة الوصلة. في الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراعي وصفائح جبهية، تخضع البراعي بشكل متزامن للشد والقص. في مثل هذه الحالة، يوصي الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] بتحقيق الشرط في المتراحة (15):

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (15)$$

حيث:

$F_{v,Ed}, F_{t,Ed}$: قوة الشد وقوة القص التصميمية التي يخضع لها البراعي

$F_{v,Rd}, F_{t,Rd}$: مقاومة البراعي التصميمية على الشد وعلى القص على الترتيب

للتبسيط ووفقا للكود الأوروبي [10]، يمكننا القبول بأن تبلغ البراعي مقاومتها القصوى على الشد $F_{t,Rd}$ إذا كان الجهد القاطع المطبق على الوصلة لا يتجاوز $\left(\frac{0.4}{1.4}\right)$ مضروبة بالمقاومة الكلية على القص للبراعي المستخدمة لمقاومة الشد. بتعبير آخر إذا كان البراعي يخضع بشكل متزامن للشد والقص تخفض مقاومته على القص بضربها بالمعامل $\left(\frac{0.4}{1.4}\right)$. بناء على ما سبق، ويفرض أن كل البراعي ستخضع للشد ولاسيما في مراحل التحميل المتقدمة عند تطور

قوى الشد المرافقة لفعل الكابل في الجائز، تعطى مقاومة النابض Sh بالعلاقة (16):

$$F_{Sh}^u = \min\left(\frac{0.4}{1.4} F_{bo,Sh}, F_{ep,b}, F_{fc,b}, F_{W,sh}\right) \quad (16)$$

حيث تعطى مقاومات النواض $F_{bo,Sh}, F_{ep,b}, F_{fc,b}$ بالعلاقات (17-18-19) على الترتيب:

$$F_{bo,Sh} = n_b F_{v,Rd} \quad (17)$$

$$F_{ep,b} = \sum_{i=1}^{n_b} F_{ep,b,Rd}^i \quad (18)$$

$$F_{fc,b} = \sum_{i=1}^{n_b} F_{fc,b,Rd}^i \quad (19)$$

حيث:

n_b : عدد البراغي الخاضعة للقص في الوصلة

$F_{ep,b,Rd}^i$: مقاومة الصفيحة الجبهية والبرغي (i) على الضغط القطري (bearing) على جدران الثقوب

$F_{fc,b,Rd}^i$: مقاومة جناح العمود والبرغي (i) على الضغط القطري (bearing) على جدران الثقوب

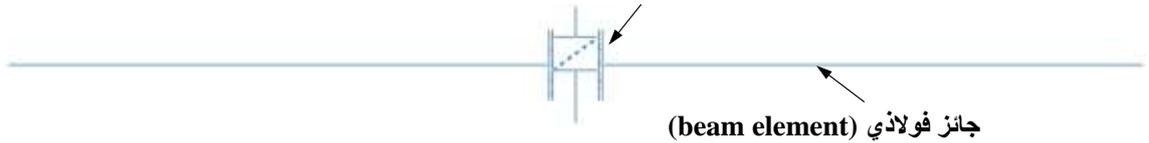
$F_{W,sh}^i$: مقاومة اللحام بين جسد الجائز والصفيحة الجبهية على القص

يتضمن الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10] علاقات تفصيلية لحساب القيم القصوى (باستخدام المقاومة القصوى للفولاذ على الشد f_u) لكل من المقاومات السابقة $F_{v,Rd}, F_{ep,b,Rd}^i, F_{fc,b,Rd}^i, F_{W,sh}^i$ لكن لا يتسع المجال لاستعراضها هنا، ويمكن للقارئ العودة إلى المرجع [10] لمزيد من التفاصيل.

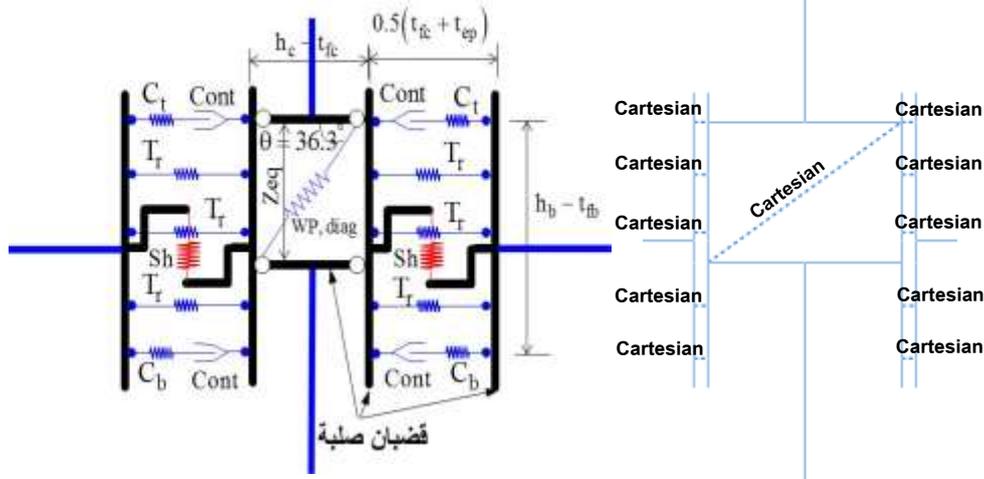
3-1-3 جميع النموذج الميكانيكي المطور

تم تجميع النموذج الميكانيكي المقترح مع مكوناته في نموذج عددي (الشكل 12) باستخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS-V.14.2 [12].

وصلة جائز-عمود (Connector element)



(a) : لمحة عامة عن النموذج العددي



(b): نمذجة الوصلة جائز-عمود باستخدام عناصر ربط (Connector element) من النمط (Cartesian)

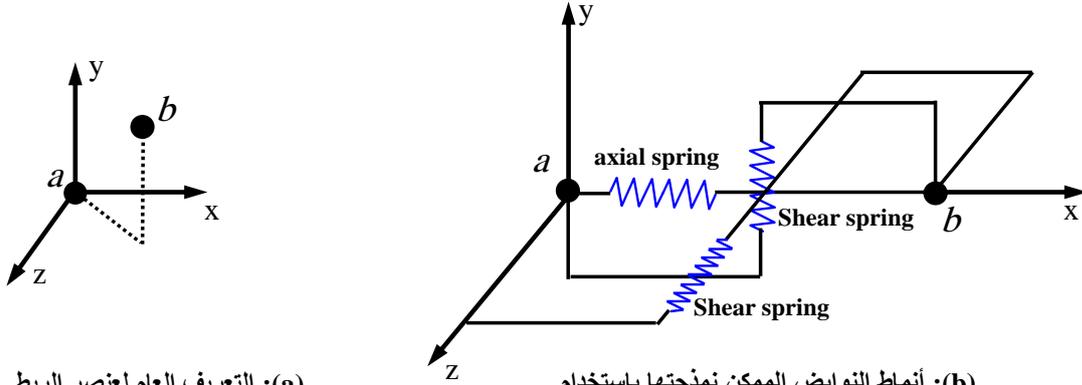
الشكل (12): النموذج العددي المنجز باستخدام ABAQUS

1-3-1 نمط العناصر المنتهية المستخدمة في النموذج

تمت نمذجة النواض في النموذج الميكانيكي باستخدام عناصر ربط ثلاثية الأبعاد بين نقطتين (three-dimensional two nodes connector element CONN3D2). يتضمن برنامج ABAQUS مكتبة واسعة من عناصر الربط، ومن أجل النموذج المطور في هذا البحث، اخترنا عنصر الربط من النمط (Cartesian) حيث يمكن وصف استجابة عنصر الربط في ثلاثة اتجاهات محلية (local directions) [12]. يتم في عنصر الربط المذكور تعريف ثلاثة اتجاهات محلية في العقدة (a) (الشكل 13-a)، ويقاس تغير موضع العقدة (b) في نظام

الإحداثيات المحلي المذكور. يمنح برنامج ABAQUS المستخدم إمكانية توجيه هذه المحاور، وبالتالي إذا اخترنا التوجيه بحيث ينطبق المحور x على الاتجاه (ab) (الشكل 13-b) يمكن استخدام عنصر الربط المذكور بسهولة لوصف الحركة النسبية باتجاه x بين العقدتين (a) و (b) (نابض محوري: axial spring)، إضافة إلى وصف الحركة النسبية باتجاه y و z بين هاتين العقدتين (نوابض قصية: shear springs). نشير هنا إلى أنه قد تم تمثيل النابض (Sh) بنابض قصي (shear spring) موضوع في عنصر الربط المستخدم لنمذجة النابض (Ct).

لنمذجة الجوائز والأعمدة تم استخدام العنصر B32 وهو عنصر جانزي ثلاثي الأبعاد غير خطي من الدرجة الثانية بثلاث عقد وكل عقدة تمتلك ست درجات حرية (3 انتقالات و 3 دورانات).



(a): التعريف العام لعنصر الربط من النمط (Cartesian) [12]

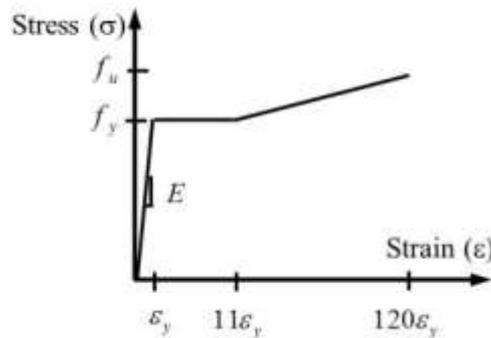
(b): أنماط النوابض الممكنة لنمذجتها باستخدام عنصر الربط من النمط (Cartesian)

الشكل (13) : عنصر الربط (Connector element) من النمط (Cartesian)

1-3-2 توصيف مواد البناء في النموذج العددي

الفولاذ مادة مطاوعة تسلك سلوكاً لاخطياً نتيجة الخضوع اللدن والتصلب التشوهي للمادة. يمكن تمثيل هذا السلوك بمنحني إجهاد تشوه هندسي (Engineering stress-strain curve) ثلاثي الخطية مبين على الشكل (14) من أجل فولاذ الجوائز والأعمدة. إن محاكاة سلوك الفولاذ المعرض لتشوهات كبيرة بشكل واقعي أكثر تتطلب تعريف سلوك الفولاذ باستخدام منحني إجهاد تشوه حقيقي (True stress-strain curve) يمكن الحصول عليه انطلاقاً من المنحني إجهاد تشوه الهندسي باستخدام العلاقات (20) [14]:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng}) \quad ; \quad \epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (20)$$



الشكل (14) : مخطط الإجهاد-التشوه الهندسي المعتمد لمادة الفولاذ

حيث:

 $\epsilon_{true}, \sigma_{true}$: الإجهاد والتشوه الحقيقي $\epsilon_{eng}, \sigma_{eng}$: الإجهاد والتشوه الهندسي

يتطلب كل نابض محوري أو قصي في عنصر الربط من النمط (Cartesian) توصيف سلوكه من خلال منحنى قوة-انتقال. يمكن الحصول على هذا المنحني بسهولة بوضع الخصائص المادية و الجيومترية للوصلة المدروسة في علاقات النموذج الميكانيكي المطور في هذا البحث.

يمكن أن تسبب اللدونة في المواد البلورية المطاوعة كالفولاذ بدء التصدع فيه. يحدث الانهيار المطاوع (ductile fracture) بعد أن تخضع المادة لانضغاط كبير وتشوهات لدنة في منطقة العنق (necked region). إن المعيار المطاوع (ductile criterion) المستخدم في برامج العناصر المنتهية ABAQUS-V14.2 [12] هو نموذج لتوقع بدء التضرر نتيجة ولادة، نمو واتحاد الفراغات في المادة. يفترض هذا النموذج أن التضرر يبدأ عندما يبلغ التشوه اللدن المكافئ (equivalent plastic strain) القيمة المخصصة له [12]. ويتم في هذا النموذج أيضاً تعريف تطور التضرر الذي يُوصف من خلال التدهور التدريجي لصلابة المادة. لا تُعد بارامترات نموذج التضرر وخاصة تشوه التصدع كخصائص مادية ثابتة وإنما تعتمد بشكل كبير على حجم العناصر المنتهية المستخدمة في التقسيم (mesh size) [12]، وتتم معايرتها باستخدام معطيات تجريبية. يمكن لعناصر الربط من النمط (Cartesian) المستخدمة في النموذج العددي أن تأخذ التضرر بعين الاعتبار. يمكن معايرة بارامترات نموذج التضرر المعتمد في هذه العناصر باستخدام معطيات تجريبية أو استناداً إلى نتائج نماذج عددية مايكروية تمت معايرتها باستخدام معطيات تجريبية.

1-3-3 الشروط الطرفية والتحميل

تمت نمذجة الشروط الطرفية بشكل يتطابق مع الدراسة التجريبية المعتمدة [13]، حيث يمتلك كل جأز مسنداً ثابتاً عند طرفه البعيد عن العمود. ومن أجل اعتبار التقييد الدوراني للعمود الناجم عن استمراريته إلى الطوابق العليا في المنشأ الحقيقي، فقد تم تقييد دوران العمود عند طرفيه. إضافة إلى ذلك، تم تقييد الجوائز من الحركة الجانبية بشكل مماثل للقيود المستخدمة تجريبياً. تم التحميل باستخدام تابع انتقال شاقولي عند أعلى العمود متزايد بشكل تدريجي حتى الانهيار.

النتائج والمناقشة

سنقوم في هذه الفقرة بمعايرة وتوثيق النموذج الميكانيكي المطور في هذا البحث، من أجل ذلك، سنقارن النتائج التي يعطيها مع نتائج الدراسة التجريبية المعتمدة في عملية النمذجة. بوضع الخصائص المادية و الجيومترية للوصلة المدروسة (الفقرة 2) في علاقات النموذج الميكانيكي المطور في هذا البحث وباعتماد على الكود الأوروبي EN1993-1-8 [10]، تم حساب المقاومة و الصلابة لمختلف مركبات الوصلة (الجدول 1)، واستخدمت القيم الناتجة لحساب المقاومة و الصلابة للنوابض المكونة للنموذج الميكانيكي المطور (الجدول 2). تمت المقارنة بين استجابة النموذج الميكانيكي المطور الممثلة بمنحني القوة الشاقولية-الانتقال الشاقولي للعمود واستجابة النموذج التجريبي على الشكل (15). وصلت قدرة تحمل النموذج التجريبي إلى (160kN) بينما بلغت قدرة التحمل المحسوبة عددياً (156kN)، وبذلك تجاوزت الدقة في توقع المقاومة القصوى للوصلة باستخدام النموذج 90%.

يمكن أن نلاحظ أيضاً أن النموذج الميكانيكي المطور يستطيع محاكاة السمات الرئيسية المميزة لاستجابة وصلة جازز-عمود منفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة خلال سيناريو فقدان عمود. تتميز هذه الاستجابة بأطوار رئيسية مختلفة نتيجة لآليات مقاومة مختلفة يتم تفعيلها في كل مرحلة. يوافق الطور الأول مرحلة السلوك الانعطافي المميز بقوى محورية صغيرة في الجازز. لاحقاً للطور الأول، وتحت تشوهات كبيرة، تبدأ القوة المحورية بالتطور في الجازز بسبب تأثير اللاخطية الهندسية في مرحلة السلوك اللدن ووجود القيود المحورية عند طرف الجازز. في الطور الثاني تتطور آلية تعرف بالقوس الضاغط (compressive arching) تقوم بتفعيل قوى الضغط المحورية في الجازز (الشكل 16). مع ازدياد دوران الوصلة، تتناقص آثار قوس الضغط بشكل تدريجي وينتظر فعل الكابل (Catenary action) المميز بقوى شد محورية في الجازز في الطور الثالث (الشكل 17). وخلال هذه المرحلة، مع ازدياد الشد المحوري في الجازز، تصبح آثار الانعطاف أقل أهمية ويصبح فعل الكابل الشاد هو الآلية الرئيسية لنقل الحمولة قبل أن تنهار الوصلة.

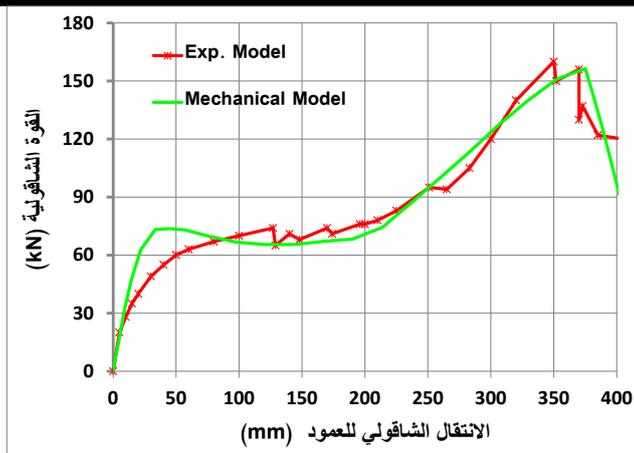
الجدول (1): القيم النظرية لمقاومة وصلابة مركبات الوصلة المختبرة

من قبل الباحث [13] Yang و المحسوبة وفق الكود الأوروبي EN 1993-1-8 [10]

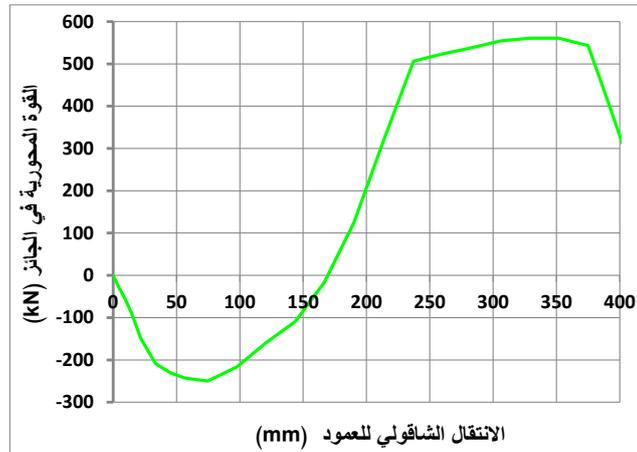
الناض	المركبة	الصلابة المرنة للمركبة K^{el} (kN/mm)	المقاومة اللدنة للمركبة F^{pl} (kN)	المقاومة القصوى للمركبة F^u (kN)
T1	bo,t1	1516	282.2	352.8
	wc,t1	1829	517.5	743.5
	wb,t1	∞	520.7	748
	fc,t1	6065	282.2	352.8
	ep,t1	1495	213.3	284.3
T2	bo,t2	1516	282.2	352.8
	wc,t2	1829	517.5	743.5
	wb,t2	∞	485.2	697.1
	fc,t2	6065	282.2	352.8
	ep,t2	1393	208.3	276.6
T3	bo,t3	1516	282.2	352.8
	wc,t3	1829	517.5	743.5
	wb,t3	∞	520.7	748
	fc,t3	6065	282.2	352.8
	ep,t3	1495	213.3	284.3
Ct, Cb	fb,c	∞	700	1005.4
	wc,c	∞	1155	1691.4
WP,diag	wp	1327	508.6	732.6
Sh	bo,sh	∞	تم اعتماد المقاومة القصوى	258.4
	ep,b	∞	فقط المحسوبة باستخدام	1471
	fc,b	∞	المقاومة القصوى للفولاذ	1020.3
	W,sh	∞	على الشد f_u	576.3

الجدول (2): مقاومة وصلابة النوابض المكونة للنموذج الميكانيكي المطور من أجل الوصلة المختبرة من قبل الباحث Yang [13]

النابض	الصلابة المرنة للنابض K_{sp}^{el} (kN/mm)	المقاومة اللدنة للنابض F_{sp}^{pl} (kN)	المقاومة القصوى للنابض F_{sp}^u (kN)
T1	490.14	213.3	284.3
T2	478.6	208.3	276.6
T3	490.14	213.3	284.3
Ct, Cb	∞	700	1005.4
WP,diag	2045	631.4	909.4
Sh	∞	تم اعتماد المقاومة القصوى فقط	258.4



الشكل (15) : مقارنة المنحنيات التجريبية والعديدية (قوة شاقولية-انتقال شاقولي للعمود)



الشكل (16) : منحنى القوة المحورية- الانتقال الشاقولي للعمود

الاستنتاجات والتوصيات

- استنادا إلى المبادئ العامة لطريقة المركبات (component method) المعتمدة في الكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] ، تم تطوير نموذج ميكانيكي لوصف سلوك الوصلات جائر-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود. نلخص فيما يلي أهم النتائج التي توصلنا إليها في هذا البحث:
- يأخذ النموذج الميكانيكي المطور مقاومة الوصلة على القص بعين الاعتبار.

- يسمح النموذج الميكانيكي المطور بأخذ التأثير المتبادل بين قوى القص والشد في البراجي بعين الاعتبار من خلال تخفيض مقاومة البراجي على القص بسبب قوى الشد فيها بمقدار 70%.
 - يسمح النموذج الميكانيكي المطور بمحاكاة انهيار الوصلة عبر أخذ تدهور الصلابة والمقاومة الناتج عن تضرر مركبات الوصلة بعين الاعتبار.
 - يستطيع النموذج الميكانيكي المطور محاكاة السمات الرئيسية المميزة لاستجابة وصلة جازز-عمود منفذة بالبراجي وصفائح جبهية غير بارزة تحت سيناريو فقدان عمود. وهي السلوك الانعطافي في مرحلة التشوهات الصغيرة، تطور فعل الكابل (Catenary action) في مرحلة التشوهات الكبيرة و انهيار مكونات الوصلة في المرحلة الأخيرة.
 - تعتبر دراسة الانهيار التدريجي مجال بحث ناشئ ونجد عددا قليلا جدا من الدراسات التجريبية بسبب كلفتها المرتفعة وصعوبة تنفيذها، حيث لم نجد سوى تجربة واحدة تتعلق بنمط الوصلة المدروسة في هذا البحث وقد تم توثيق النموذج الميكانيكي المطور بالمقارنة مع نتائج هذه التجربة وأظهرت المقارنة توافقا جيدا بين النتائج العددية والتجريبية وقد تجاوزت الدقة في توقع المقاومة القصوى للوصلة باستخدام النموذج 90%.
 - بالرغم من أن هذا البحث يقتصر على تغطية الوصلات جازز-عمود المنفذة بالبراجي وصفائح جبهية غير بارزة، يمكن نمذجة سلوك أنماط أخرى من الوصلات استنادا إلى نفس المبادئ المعتمدة في هذا النموذج عبر إجراء تعديلات مناسبة.
- وبناء على دراستنا نوصي بما يلي
- التحقق أكثر من صحة النموذج الميكانيكي المطور بالمقارنة مع نتائج يتم الحصول عليها باستخدام نماذج عددية مايكروية (micro-models).
 - استثمار النموذج الميكانيكي المطور لدراسة السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جازز-عمود المنفذة بالبراجي وصفائح جبهية غير بارزة تحت سيناريو فقدان الفجائي لعمود.
 - استخدام النموذج الميكانيكي المطور لنمذجة الوصلات في إطار فولاذي متعدد الطوابق ودراسة مقاومته للانهيال التدريجي تحت سيناريو فقدان الفجائي لعمود.

المراجع

- [1] ASCE7. *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE, Virginia, 2010, 253p.
- [2] GRIFFITHS, H. *Report of Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Canning Town*. Ministry of Housing and Local Government, London, 1968, 83.
- [3] FEMA. *The Oklahoma City bombing: Improving building performance through multi-hazard mitigation*. ASCE, Virginia, 1996, 116p.
- [4] SUNDER, S. *Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers*. NIST, USA, 2005, 302.
- [5] Office of the Deputy Prime Minister, *The Building Regulations 2000 part A*. London, UK, 2004, 85.
- [6] EN 1991-1-7, *Actions on Structures - Part 1-7: General Actions -Accidental Action*, Brussels, 2006, 112p..

- [7] DOD. *Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*, Unified Facilities Criteria (UFC), USA, 2009, 245p.
- [8] General Services Administration (GSA). - *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, Washington, 2003, 119.
- [9] LI, H. *Modeling, Behavior and Design of Collapse-Resistant Steel Frame Buildings*. University of Michigan, Ann Arbor, 2013, 232.
- [10] EN 1993-1-8. *Euro code 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, Brussels, 2005, 135p.
- [11] Stylianidis, P. *Progressive Collapse Response of Steel and Composite Buildings*, Imperial College London, UK, 2011,243.
- [12] ABAQUS V6.14. *ABAQUS/Standard User`s Manual*, Dassault Systèmes, USA, 2014, 1128p.
- [13] YANG, B. *Experimental tests of different types of bolted steel beam–column joints under a central-column-removal scenario*,(54) *Engineering Structures*, 2013, 18.
- [14] YANG, B. *Numerical analyses of steel beam–column joints subjected to catenary action*,(70) *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 10.
- [15] Del SAVIO, A. *Generalised component-based model for beam-to column connections including axial versus moment interaction*,(65) *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 18.
- [16] SIMÕES DA SILVA,L, Lima, L, *Behaviour of flush end-plate beam-to-column joints under bending and axial force*,(4) *Steel Compos. Struct.*, , 2004, 17.
- [17] DE LIMA, L. *Behaviour of endplate beam-to-column joints under bending and axial force*. PUC-Rio, Pontifical Catholic University, Civil Eng. Dept, Brazil, 2003,178.
- [18] STYLIANIDIS,P. *Modelling of connection behaviour for progressive collapse analysis*,(13) *Journal of Constructional Steel Research* ,2015, 15.
- [19] YANG, B, TAN, K, *Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: experimental tests of beam–column joints and development of component- based models*, (9), *J. Struct. Eng. ASCE* 139, 2013, 16.