

## Effect of design details on behavior of steel bolted extended end plate beam-to-column joints during progressive collapse

Dr. Badia Haidar <sup>i</sup>  
Dr. Ghandi Loho <sup>ii</sup>  
Khudr ALhaj <sup>iii</sup>

(Received 7 / 10 / 2018. Accepted 27 / 12 / 2018)

### □ 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. This paper deals with the effect of design details on the behavior of bolted extended end-plate beam-to-column joints during the progressive collapse due to column loss. To achieve this aim, a three-dimensional 3D model was created using ABAQUS. The numerical model was validated in comparison to the results obtained from published researches. The validated numerical model has been used for a parametric study to investigate the effect of some geometric details on the behavior and properties of the studied joint under the scenario of column removal. The results of this study confirmed the possibility of improving the resistance of the joint and obtaining a rotation capacity of more than 0.15 rad by using suitable design details, especially the ratio between the thickness of the end plate and the diameter of the bolts ( $t / d \leq 0.5$ ) and the ratio between the resistance of the joint bolts and the plastic resistance of the beam section ( $N_{bolt}/N_{beam} \geq 1$ ).

**Keywords:** Progressive collapse, column loss, Beam-column joints, Catenary action

<sup>i</sup> Assistant Professor, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University – Syria, e: [haidar.b@gmail.com](mailto:haidar.b@gmail.com)

<sup>ii</sup> Associated Professor, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University – Syria, e: [g\\_loho@hotmail.com](mailto:g_loho@hotmail.com)

<sup>iii</sup> PhD student, Department of structure engineering – Faculty of Civil engineering – Tishreen University – Syria, e: [khudr.alhaj@gmail.com](mailto:khudr.alhaj@gmail.com)

## تأثير التفاصيل التصميمية على سلوك الوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي

د. بادية حيدر<sup>iv</sup>

د. غاندي لوجو<sup>v</sup>

خضر الحج<sup>vi</sup>

تاريخ الإيداع 7 / 10 / 2018. قُبِلَ للنشر في 27 / 12 / 2019

### □ ملخص □

تشكل الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي عنصراً جوهرياً في أداء المنشآت الفولاذية تحت شروط التحميل الاستثنائية كالانفجارات واصطدام العربات بسبب خطر حدوث ما يعرف بالانهيار التدريجي (progressive collapse). يعالج البحث المقدم في هذه الورقة تأثير التفاصيل التصميمية على سلوك الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود. لتحقيق هذا الهدف، تم إنشاء نموذج عددي ثلاثي الأبعاد 3D باستخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS. تم توثيق النموذج العددي المنجز بالمقارنة مع نتائج تجريبية مستخلصة من الأبحاث المنشورة. استخدم النموذج العددي الموثق لإنجاز دراسة بارامترية لتقصي تأثير بعض التفاصيل الجيومترية التصميمية على سلوك وخصائص الوصلة المدروسة تحت سيناريو إزالة عمود. أكدت نتائج هذا البحث إمكانية تحسين مقاومة الوصلة والحصول على قدرة دورانية تزيد عن (0.15 rad) عبر استخدام تفاصيل تصميمية ملائمة وخاصة النسبة بين سماكة الصفيحة الجبهية وقطر البراغي ( $t/d \leq 0.5$ ) من جهة والنسبة بين مقاومة براغي الوصلة مجتمعة والمقاومة المحورية للذنة لمقطع الجائز من جهة أخرى . ( $N_{bolt}/N_{beam} \geq 1$ )

الكلمات المفتاحية: الانهيار التدريجي، فقدان عمود، وصلات جائز-عمود، فعل الكابل.

<sup>iv</sup> أستاذ مساعد ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : [haider.b@gmail.com](mailto:haider.b@gmail.com)

<sup>v</sup> مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : [g\\_loho@hotmail.com](mailto:g_loho@hotmail.com)

<sup>vi</sup> طالب دكتوراه ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. e : [khudr.alhaj@gmail.com](mailto: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].

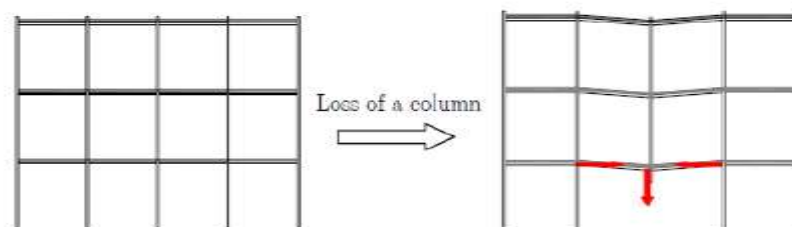
استناداً إلى الأبحاث المنجزة حتى تاريخه، هناك إجماع ضمن الوسط الهندسي الإنشائي على ضرورة امتلاك المنشأ لوحدة ومن المفضل أكثر من الخصائص التالية للتقليل من خطر الانهيار التدريجي [5].

- مقاومة، صلابة ومطاوعة مناسبة للمنشأ ككل.

- مقاومة ومطاوعة موضعية كافية، وخاصة للوصلات، لمنع بدء سيرورة الانهيار.

- استمرارية كافية تمنح المنشأ إمكانية خلق مسارات بديلة للحمولة.

كما يوجد توافق على أن الآلية الرئيسية التي تساهم في مقاومة نظام إنشائي ما للانهيار التدريجي هي ما يعرف بفعل الكابل (catenary action). يشير هذا المصطلح إلى قدرة الجوائز على مقاومة الحمولة الشاقولية من خلال آلية تشبه السلسلة (catenary-like mechanism) أو الكابل (cable-like mechanism) تتطور في جوائز المنطقة المتأثرة مباشرة بإزالة العمود [6] الشكل (1).



الشكل (1): آلية تشكل فعل الكابل في الجوائز المحيطة بالعمود المزال

تخضع الوصلات في بعض سيناريوهات الانهيار التدريجي (فقدان مفاجئ لعمود) لتشوّهات كبيرة جداً وتخضع لقوى محورية كبيرة ناتجة عن آلية فعل الكابل التي تتطور في الجوائز، 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 خصائص جوهرية من أجل أي تمثيل واقعي لأداء الوصلة أثناء الانهيار التدريجي.

رغم الأبحاث العديدة التي أنجزت لدراسة تأثير فعل الكابل على سلوك الوصلات جائز-عمود تحت سيناريو إزالة عمود بهدف تحسين التفاصيل الإنشائية لهذه الوصلات بما ينعكس إيجاباً على أدائها، فإن سلوك الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة يتطلب مزيداً من البحث والدراسة من أجل فهم أكثر عمقاً لهذا السلوك تحت تأثير فعل الكابل الذي يتطور في الجوائز المرتبطة بالوصلة عند إزالة عمود.

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

### أهمية البحث وأهدافه

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التفاصيل التصميمية (قطر البراغي ، سماكة وبروز الصفيحة الجبهية) على سلوك الوصلات الفولاذية جازز - عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود. لتحقيق هذا الهدف تم إنجاز دراسة بارامترية باستخدام نموذج عددي ثلاثي الأبعاد تم إنشاؤه للوصلة المدروسة باستخدام برنامج ABAQUS-V.14.2 [7] القائم على طريقة العناصر المنتهية، وقد تم توثيق النموذج العددي بالمقارنة مع نتائج تجريبية مستخلصة من الأبحاث المنشورة [8].

### الدراسة المرجعية

يُعد الكود البريطاني [9] 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 [10] مقاربات مشابهة. حالياً يُعد الكود الأمريكي [ASCE-7-10] [1] هو الكود الوحيد الذي يعالج موضوع الانهيار التدريجي بشكل مفصل نوعاً ما، إضافة إلى المستندين الأميركيين (DOD) [11] و (GSA) [12] القائمين على نفس الفلسفة المعتمدة في [ASCE-7-10] [2] ولكن مع تفصيل أكثر.

يحدد الكود الأمريكي وهذان المستندان طريقتي تصميم:

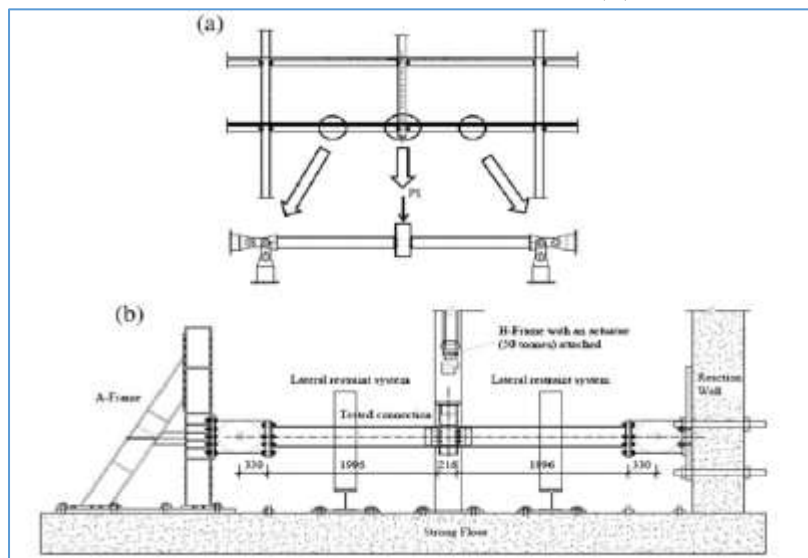
- طريقة التصميم غير المباشرة (indirect design method) وهي تشمل اعتبارات ضمنية يمكن أن تحسن المقاومة على الانهيار التدريجي من خلال تزويد المنشأ بحد أدنى من المقاومة، الاستمرارية والمطاوعة.
- طريقة التصميم المباشرة (direct design method) وتقوم بشكل أساسي على ما يعرف بطريقة المسار البديل (Alternate path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

تقترن آلية فعل الكابل مع تطور تشوهات كبيرة بما يكفي لتتم مقاومة الحمولات المطبقة بشكل رئيسي من خلال المركبات الشاقولية للقوى المحورية التي تتطور في الجوائز (قوى الكابل) عوضاً عن العمل الانعطافي الأصلي. يتطلب تطوير آلية فعل الكابل في المنشآت الفولاذية أن تمتلك الوصلات جازز-عمود مطاوعة كافية لتسهيل تشوه الجازز ضمن شكل جديد يشبه الكابل وفي نفس الوقت يجب أن تمتلك مقاومة إنشائية كافية لتحمل الحمولات المطبقة عليها في الوضع الجديد [6].

تُعد الوصلات الفولاذية جازز-عمود المنفذة ببراعي وصفائح جبهية شائعة الاستخدام في العديد من المنشآت كالأبنية السكنية والمكتبية، لقد تم إنجاز عدد كبير من الأبحاث التجريبية والعددية لدراسة سلوك هذا النوع من الوصلات تحت تأثير عزم انعطاف صافٍ. لكن عدداً قليلاً منها فقط اهتم بدراسة سلوك هذه الوصلات تحت تأثير عزم انعطاف وقوة محورية، وكانت القوة المحورية إما ثابتة أو متزايدة بنفس معدل تزايد عزم الانعطاف [13]. أظهرت نتائج هذه الأبحاث تأثيراً ملحوظاً لوجود القوة المحورية على مقاومة الوصلة ولاسيما عندما تكون شادة حيث تؤدي إلى تخفيض مقاومة

وصلاية الوصلة. عندما يتعلق الأمر بسلوك هذه الوصلات أثناء الانهيار التدريجي تحت سيناريو فقدان عمود، نجد عدداً أقل من الاختبارات التجريبية والدراسات العددية. قام الباحث Yang [8] بإجراء اختبارات تجريبية لتقييم أداء بعض الأنواع الشائعة الاستخدام للوصلات الفولاذية جوائز - عمود تحت سيناريو إزالة عمود مركزي. وتضمنت الوصلات المختبرة وصلة واحدة منفذة بالبراغي و صفيحة جبهية بارزة. تقع الوصلة المعتبرة في هذا الاختبار فوق الطابق حيث تمت إزالة عمود داخلي محيطي. لتبسيط الاختبار، تم افتراض وقوع نقطة الانعطاف عند وسط مجاز الجوائز، حيث تم اعتماد نصف مجاز الجوائز مع شروط استناد مفصلية عند نهاية كل جوائز كما يظهر الشكل (2).



الشكل (2): نموذج وصلة جوائز - عمود المختبرة تجريبيا وتجهيزات الاختبار [8]

يتألف النموذج التجريبي من جذع عمود مركزي وجائزين متصلين به ووصلة جوائز - 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 جوائز لأخذ التقييد الناتج عن العناصر الإنشائية المجاورة في المنشأ الحقيقي بعين الاعتبار. تم إجراء الاختبار بتطبيق انتقال متزايد على العمود باستخدام مكبس يدفعه نحو الأسفل حتى الانهيار.

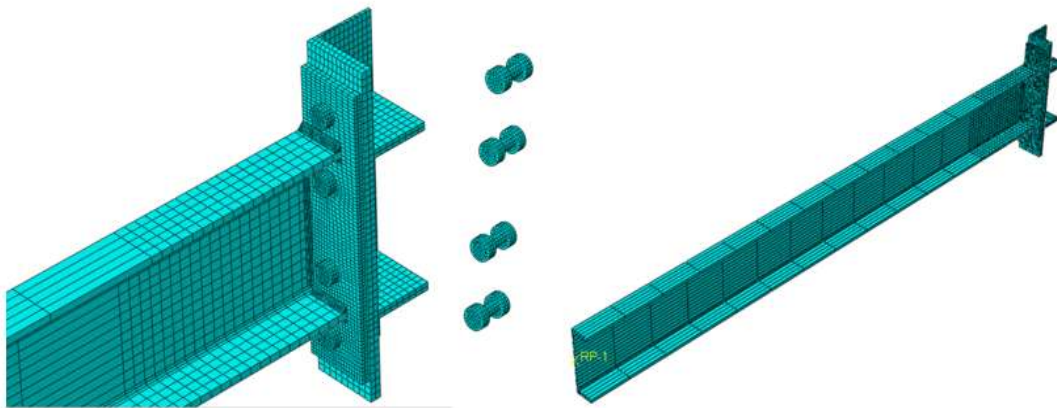


## 1-1 افتراضات النمذجة

العينة التجريبية متناظرة هندسياً ومن حيث الحمولات بالنسبة لمستويين شاقوليين لذلك تم تقسيمها إلى أربعة أقسام متساوية وتم نمذجة قسم واحد فقط وذلك لتخفيض حجم النموذج العددي. لم تتم نمذجة حلزنة البراغي بشكل صريح وإنما استخدمنا للبراغي قطر مكافئ استناداً إلى مساحة المقطع الفعال للبرغي والذي يأخذ الحلزنة بعين الاعتبار بشكل ضمني بهدف تخفيض زمن التحليل. تم تكثيف عدد العناصر المنتهية في المناطق حيث يتوقع أن تكون الإجهادات مركزة بشكل كبير. تم إجراء دراسة حساسية لنعومة الشبكة وقد أظهرت هذه الدراسة أن الحجم الملائم للعناصر المنتهية في منطقة تركيز الإجهاد هو (5mm) من أجل البراغي، الصفيحة الجبهية و (10mm) من أجل الجائز والعمود. يظهر الشكل (4) النموذج العددي (3D) الذي تم إنشاؤه بشكله النهائي لمحاكاة التجربة المعروضة أعلاه [8].

## 1-2 نمط العناصر المنتهية المستخدمة في النموذج.

تم استخدام عناصر صلبة (solid element) من النمط (C3D8R) لنمذجة الجائز، العمود، الصفيحة الجبهية، صفائح الاستمرارية، البراغي و اللحام. يتألف هذا العنصر المنتهي من ثماني عقد وكل عقدة تمتلك ثلاث درجات حرية (3 انتقالات)، ويمكنه تمثيل التشوهات الكبيرة اللاخطية المادية والهندسية ومحاكاة التصدع (fracture).



الشكل (4) : النموذج العددي المنجز باستخدام ABAQUS بشكله النهائي

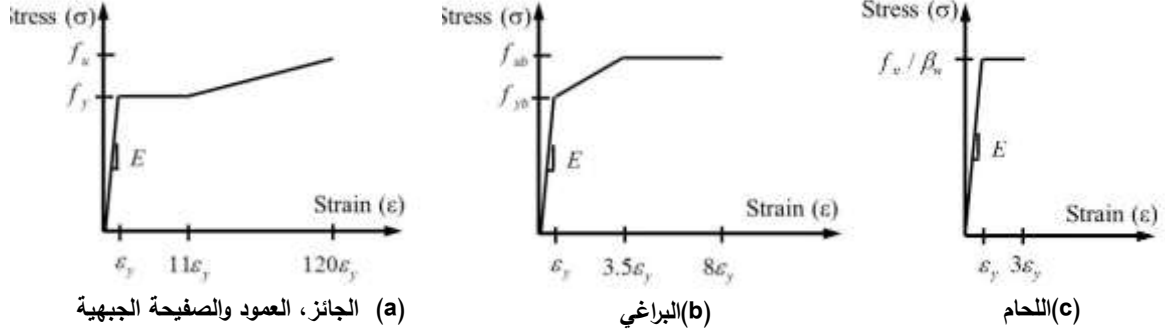
## 1-3 توصيف مواد البناء في النموذج العددي

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 ميبين على الشكل (5-a) من أجل فولاذ الجائز، العمود والصفيحة الجبهية وعلى الشكل (5-b) من أجل فولاذ البراغي. أما من أجل اللحام فتم اعتبار سلوك ثنائي الخطية ممثل على الشكل (5-c). تؤخذ مقاومة اللحام مساوية لـ  $(f_u / \beta_w)$  حيث  $\beta_w$  معامل ترابط يأخذ القيمة 0.85 من أجل الفولاذ S 275 [10]. 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 (1) [14]:

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

حيث:

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

الشكل (5) : مخطط الاجهاد-التشوه الهندسي المعتمد لمادة الفولاذ

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 [7] 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 [7]. ويتم في هذا النموذج أيضاً تعريف تطور التضرر الذي يُوصف من خلال التدهور التدريجي لصلابة المادة. يمنح برنامج ABAQUS-V14.2 [7] المُستخدم إمكانية إزالة العناصر المتضررة بشكل كامل من النموذج بمجرد بلوغ القيمة المخصصة لتشوه التصدع (fracture strain). لا تُعد بارامترات هذا النموذج وخاصة تشوه التصدع كخصائص مادية ثابتة وإنما تعتمد بشكل كبير على حجم العناصر المنتهية المستخدمة في التقسيم (mesh size) [7]، وتتم معايرتها باستخدام معطيات تجريبية.

#### 4-1 الشروط الطرفية والتحميل

تمت نمذجة الشروط الطرفية بشكل يتطابق مع الدراسة التجريبية المعتمدة، حيث يمتلك الجازر مسنداً ثابتاً عند طرفه البعيد عن العمود. طبقت أيضاً شروط التناظر على الأجزاء الملائمة من الجازر، العمود، الصفيحة الجبهية وصفائح الاستمرارية. لنمذجة التماس بين الصفيحة الجبهية، جناح العمود والبراغي، تم استخدام شروط التماس من نمط سطح - سطح (surface-to-surface contact) تم اعتماد احتكاك كولومب (coulomb friction) لوصف السلوك المماسي بين سطوح التماس واستخدم معامل احتكاك قيمته (0.3) وتم اختيار التماس الصلب (Hard contact) لوصف السلوك الناظمي على سطوح التماس [7]. تم التحميل باستخدام تابع انتقال شاقولي عند أعلى العمود متزايد بشكل تدريجي حتى الانهيار.

#### 5-1 نمط التحليل المعتمد

يؤدي وجود الكثير من شروط التماس في النموذج إلى صعوبات في التقارب العددي، وتصبح مشكلة التقارب أكثر حدة في مرحلة محاكاة التصدع. يستخدم التحليل الستاتيكي بشكل واسع، بيد أنه يجب بذل جهود كبيرة نسبياً تتطلب زمن

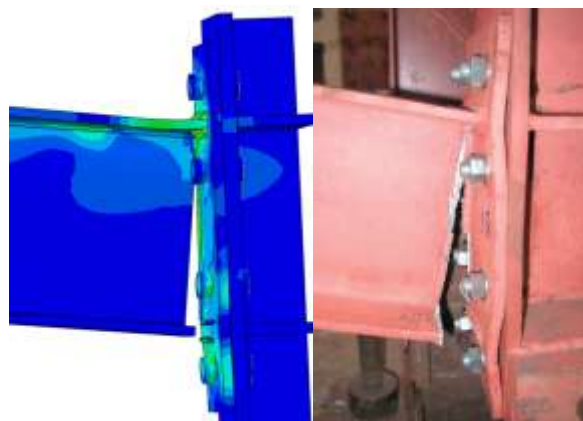


تحليل كبير عندما يُراد محاكاة ظواهر التماس في النموذج، ويصبح الأمر أكثر صعوبة ولا نحصل على التقارب في معظم الحالات عندما يُراد أيضا نمذجة التصدع إضافة إلى ظواهر التماس. للتغلب على مشاكل التقارب العددي في مثل هذه الحالات المعقدة، لجأ عدد من الباحثين إلى استخدام التحليل الديناميكي الصريح (explicit dynamic analysis) [7] حيث أظهر الباحثون أنه يمكن الحصول على استجابة شبه ستاتيكية من خلال التحكم بالخطوة الزمنية، لكن هذه الطريقة تتطلب إمكانيات حاسوبية كبيرة (زمن تحليل وسعة تخزين) [16] لذلك لجأ باحثون آخرون إلى استخدام التحليل الديناميكي الضمني شبه الستاتيكي (quasi-static implicit dynamic analysis) [13]. وقد اعتمدنا في بحثنا هذا النمط من التحليل الموجود في ABAQUS-V14.2 [7] حيث يتطلب إمكانيات حاسوبية أقل ويمكننا من التغلب على مشاكل التقارب المرافقة لنمذجة التصدع وشروط التماس.

## النتائج والمناقشة

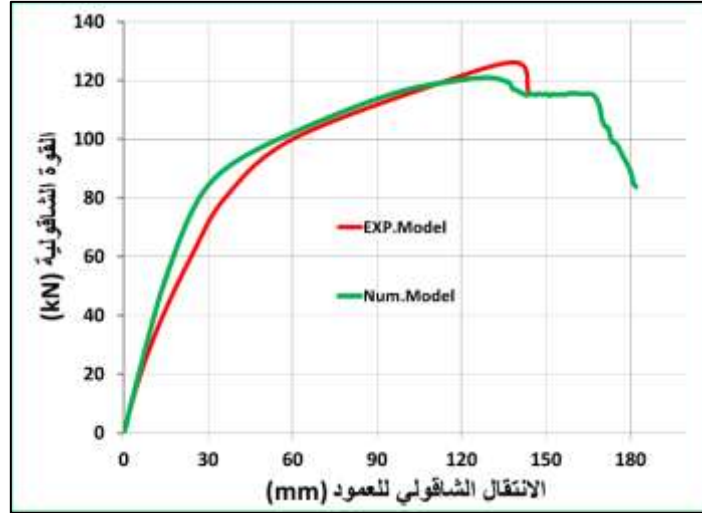
### 1 معايرة وتوثيق النموذج العددي:

لتوثيق النموذج العددي المنجز، سنقارن النتائج التي يعطيها مع نتائج الدراسة التجريبية المعتمدة في عملية النمذجة [8]. تتضمن المقارنة جانبين أساسيين: يتعلق الجانب الأول بأنماط الانهيار الملاحظة، أما الجانب الثاني فيتعلق باستجابة النموذج الممثلة بمنحني القوة الشاقولية-الانتقال الشاقولي للعمود. يظهر الشكل (6) أن النموذج العددي يستطيع محاكاة أنماط الانهيار الملاحظة تجريبياً (انقطاع اللحام) بدقة جيدة.



الشكل (6): مقارنة بين أنماط الانهيار في النموذجين العددي والتجريبي

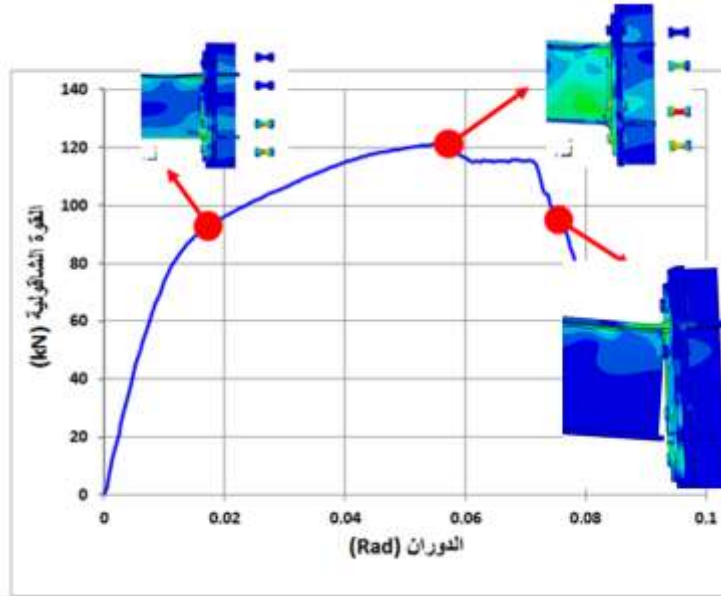
يظهر الشكل (7) المنحني قوة-انتقال للنموذجين التجريبي والعددي، وصلت قدرة تحمل النموذج التجريبي الى (126kN) بينما بلغت قدرة التحمل المحسوبة عددياً (121kN)، وبذلك تجاوزت الدقة في توقع المقاومة القصوى للوصلة باستخدام النموذج 90%.



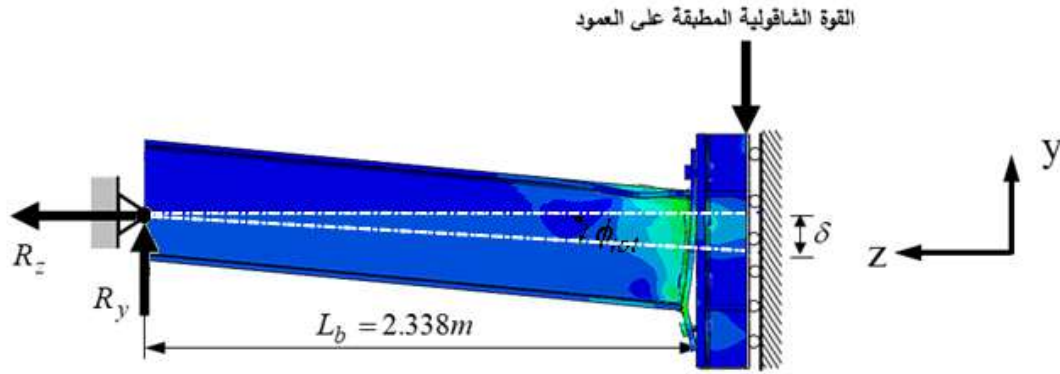
الشكل (7) : مقارنة المنحنيات التجريبية والعديدية (قوة شاقولية-انتقال شاقولي للعمود)

## 2 وصف السلوك العام للوصلة

يظهر الشكل (8) منحنى القوة الشاقولية-الدوران الكلي مع إجهادات (von Mises) الممثلة على الشكل المتشوه من أجل بعض النقاط المميزة على هذا المنحنى. تم حساب الدوران الكلي  $\Phi_{tot}$ ، الذي يتضمن دوران الوصلة ودوران الجانز، بشكل مبسط كنسبة بين الانتقال الشاقولي للعمود وطول الجانز (الشكل 9).



الشكل(8): منحنى القوة الشاقولية-الدوران الكلي مع إجهادات von-Mises الممثلة على الشكل المتشوه



الشكل(9): تعريف الدوران الكلي والقوى المستخدمة في حساب عزم الانعطاف المطبق على الوصلة

يبين الشكل (10) منحنى القوة المحورية-الدوران الكلي ويظهر الشكل (11) مخطط الترابط بين القوة المحورية في الجائز وعزم الانعطاف في الوصلة. حيث تم حساب عزم الانعطاف عند وجه العمود وهو يتضمن جزئين:

- عزم الانعطاف من المرتبة الأولى ( $M^I$ )
- الزيادة في عزم الانعطاف ( $\Delta M$ ) الناتجة عن القوة المحورية المرافقة لفعل الكابل الذي يتطور في الجائز كنتيجة لآثار المرتبة الثانية.

يتم حساب ( $M^I, \Delta M$ ) استناداً إلى الشكل (9) باستخدام العلاقات (2) :

$$M^I = R_y L_b \quad ; \quad \Delta M = R_z \delta \quad (2)$$

حيث :

$R_y$ : رد الفعل الشاقولي للمسند عند طرف الجائز وهو يساوي أيضاً القوة الشاقولية المطبقة على العمود.

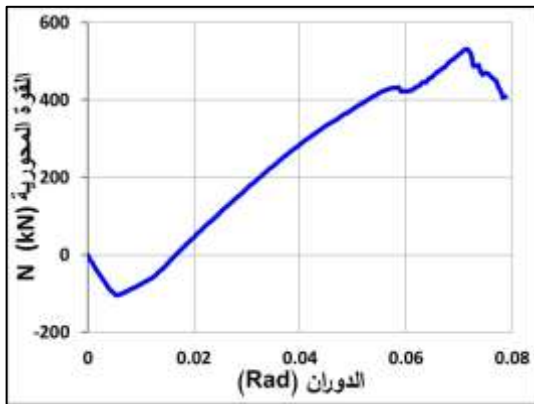
$R_z$ : رد الفعل الأفقي للمسند عند طرف الجائز.

$\delta$ : الانتقال الشاقولي للعمود.

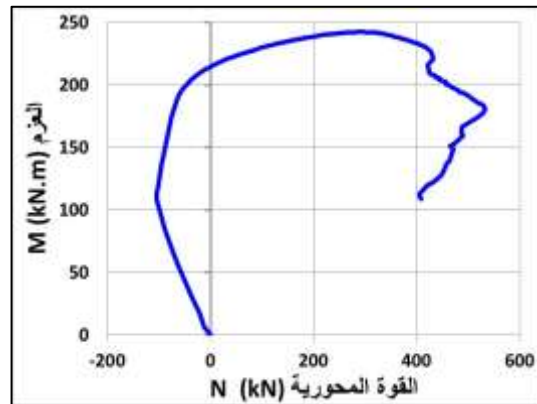
$L_b$ : طول الجائز.

وبالتالي يعطي عزم الانعطاف ( $M^{II}$ ) الذي يتضمن آثار المرتبة الثانية بالعلاقة (3):

$$M^{II} = M^I - \Delta M \quad (3)$$



الشكل (10): منحنى القوة المحورية-الدوران



الشكل (11): مخطط الترابط بين القوة المحورية في الجائز وعزم الانعطاف في الوصلة

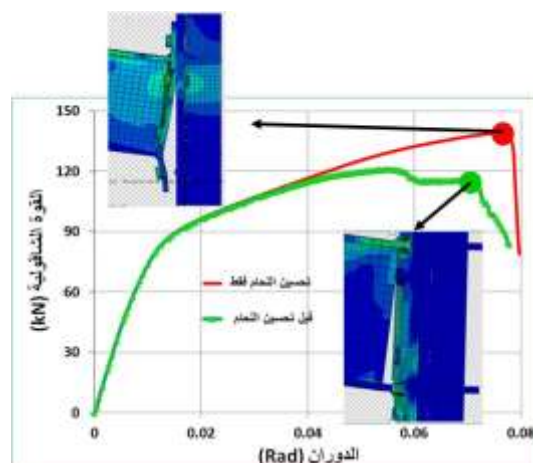
يتميز منحنى الاستجابة بأطوار رئيسية مختلفة نتيجة لآليات مقاومة مختلفة يتم تفعيلها في كل مرحلة ( الشكل 8). يوافق الطور الأول المميز بقوة محورية صغيرة في الجازز مرحلة السلوك المرن المترافق بانقلابات وتشوهات صغيرة، ويمكننا القول أن الاستجابة من المرتبة الأولى (first order) هي التي تميز سلوك الوصلة في هذا الطور. 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، تخضع الوصلة خلال هذه المرحلة لتراكب عزوم انعطاف وقوى محورية، ويمكن أن نحصل على تراكبات متعددة لعزوم الانعطاف والقوى المحورية خلال الأطوار المختلفة كما يظهر الشكل (11).

في الطور الثاني تتطور آلية تعرف بقوس الضغط (compressive arching) تقوم بتفعيل قوى الضغط المحورية في الجازز وذلك من أجل قيم دوران لا تتجاوز  $0.02 \text{ rad}$  (الشكل 10). يمكن للضغط المحوري في الجازز وعزم الانعطاف في الوصلة أن تصل إلى قيم كبيرة مسببةً عدم استقرار مبكر في بعض المركبات المضغوطة من الوصلة كحدوث تحنيط موضعي للجناح المضغوط للجازز. مع ازدياد الدوران، تتناقص آثار قوس الضغط بشكل تدريجي وتصبح القوة المحورية في الجازز شادة في الطور الثالث. خلال هذه المرحلة، خضع اللحام ذو المقاومة الجزئية (Partial-strength weld) بين الصفيحة الجبهية والجازز لقوى شد كبيرة وبدأ بالانهيار عند قيمة منخفضة نسبياً للدوران لا تتجاوز  $0.06 \text{ rad}$  (الشكل 8). سبب انهيار اللحام انخفاض قوة الشد المحوري في الجازز (الشكل 10) ولم يسمح ذلك بتطور فعل الكابل الشاد بشكل فعال في الجازز، ونتيجة لذلك لم نحصل على أي تحسن في مقاومة النموذج وانخفضت القوة الشاقولية المطبقة على العمود (الشكل 8).

### 3- تحسين سلوك الوصلة جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفيحة جبهية بارزة

أظهرت دراسة السلوك العام للوصلة في الفقرة 2.4 أن السلوك الانعطافي سيطر على سلوك الوصلة في المراحل الأولى للاستجابة، أما فعل الكابل فقد كانت مساهمته منخفضة في تحسين مقاومة النموذج المدروس بسبب عدم تطوره بشكل فعال في الجازز. وهذا يعود بالدرجة الأولى إلى القدرة الدورانية المنخفضة للوصلة بسبب الانهيار المبكر للحام بين الجازز والصفيحة الجبهية. سنعمل في هذه الفقرة على تعديل بعض خصائص الوصلة لتحسين قدرتها الدورانية بما يسمح بتطور فعل الكابل الشاد في الجازز.

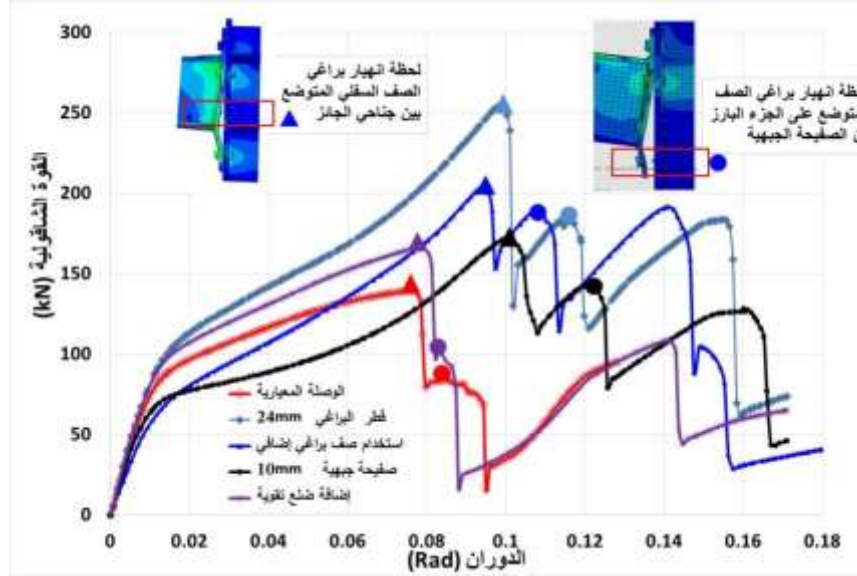
كتحسين أساسي تم استخدام لحام كامل المقاومة (Full-strength weld) بين الصفيحة الجبهية والجازز لتجنب انهيار اللحام قبل الأجزاء الموصولة. أدى هذا الإجراء إلى تحسين القدرة الدورانية للوصلة ولكنها بقيت منخفضة نسبياً ولم تتجاوز  $0.076 \text{ rad}$  بسبب الانقطاع المبكر للبراغي (الشكل 12). حيث انقطعت بداية براغي الصف السفلي المتواجد بين جناحي الجازز ومن ثم انهارت براغي الصفوف الأخرى ابتداءً من الصف الطرفي المتوضع على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية.



الشكل(12): منحنى القوة الشاقولية -الدوران الكلي مع أنماط الانهيار قبل وبعد تحسين اللحام

لتأخير انقطاع البراغي تم إدخال بعض التعديلات على الخصائص الجيومترية للوصلة بلحام كامل المقاومة (والتي سندعوها بالوصلة المعيارية) في محاولة تهدف إلى تركيز التشوهات في الصفيحة الجبهية التي تتميز بأنماط انهيار أكثر مطاوعة. بداية تم اقتراح الحلول التالية:

- زيادة قطر البراغي لتحسين مقاومة الوصلة على الشد المحوري
  - استخدام صف براغي إضافي عند مستوى المحور الطولي للجائز لتحسين مقاومة الوصلة على الشد المحوري
  - تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية لتركيز التشوهات اللدنة فيها
  - إضافة ضلع تقوية (rib) أسفل جناح الجائز السفلي وأعلى جناح الجائز العلوي لزيادة المقاومة الانعطافية.
- يظهر الشكل (13) منحنيات استجابة النموذج من أجل الحلول المقترحة ويُلخص الجدول (1) قيم المقاومة القصوى والقدرة الدورانية والتحسين مقارنة مع الوصلة المعيارية من أجل هذه الحلول الأربعة. تم اعتبار القدرة الدورانية عند الذروة الأعلى لمنحنى القوة الشاقولية-الدوران الكلي. يبين الشكل (13) الجدول (1) أن كافة الحلول المقترحة ساهمت في تحسين المقاومة القصوى والقدرة الدورانية للوصلة بنسب متفاوتة. لكن الحل الأكثر فعالية في تحسين المقاومة القصوى كان زيادة قطر البراغي حيث ازدادت المقاومة القصوى بنسبة (65%) مقارنة مع الوصلة المعيارية بينما كان الحل الأكثر فعالية في تحسين القدرة الدورانية هو تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية حيث ازدادت القدرة الدورانية بنسبة (32%).



الشكل (13): منحنيات القوة الشاقولية-الدوران الكلي للحلول المقترحة لتحسين سلوك الوصلة

تجدر الإشارة هنا إلى أنه من أجل كافة الحلول المقترحة أعلاه لم تحدث أي زيادة في المقاومة بعد الانقطاع الأول في البراغي والذي حدث دائما في براغي الصف السفلي المتواجد بين جناحي الجانز (الشكل 13). ويعود ذلك بشكل رئيسي إلى انهيار براغي الصف المتوضع على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية الذي منع تطور فعل الكابل الشاد بشكل فعال في الجانز (الشكل 13).

الجدول (1): المقاومة القصوى والقدرة الدورانية من أجل الحلول المقترحة لتحسين سلوك الوصلة

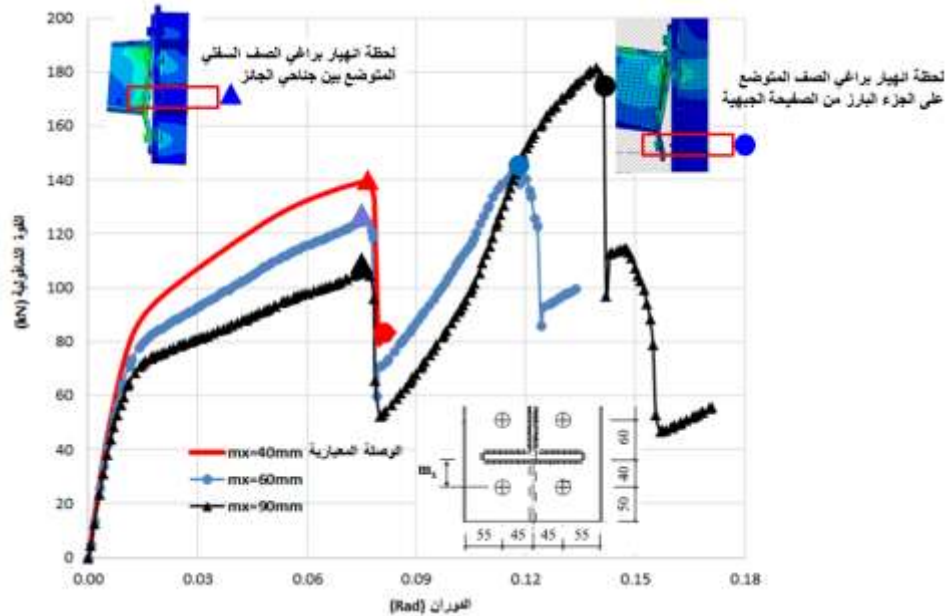
الحل المقترح	المقاومة القصوى kN	القدرة الدورانية Rad	التحسن في المقاومة (%)	التحسن في القدرة الدورانية (%)
الوصلة المعيارية	139	0.076	-----	-----
زيادة قطر البراغي إلى 24mm	254	0.098	65	29
استخدام صف براغي إضافي	217	0.086	56	13
تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية إلى 10mm	172	0.1	24	32
إضافة ضلع تقوية (rib)	166	0.078	19	3

لحل مشكلة الانهيار المبكر لصف البراغي الطرفي تم اقتراح زيادة البروز  $m_x$  لهذا الأخير عن جناح الجانز. يظهر الشكل (14) منحنى استجابة النموذج من أجل ثلاث قيم لهذا البروز ( $m_x = 40, 60$  and  $90mm$ ).

تظهر المنحنيات المقدمة على الشكل (14) ازدياد المقاومة القصوى والقدرة الدورانية مع ازدياد قيمة البروز  $m_x$ . فمن أجل  $m_x = 90mm$  ازدادت المقاومة القصوى بنسبة (31%) والقدرة الدورانية بنسبة (85%) مقارنة مع الوصلة المعيارية. يمكن تفسير هذا التحسن الملحوظ ولا سيما في القدرة الدورانية من خلال تخفيض صلابة ومقاومة الجزء البارز من الصفيحة الجبهية وهذا من شأنه أن يخفض القوى المحورية المنقولة إلى صف البراغي الطرفي في مراحل التحميل الأولى كما يسمح بتركيز التشوهات اللدنة في الصفيحة الجبهية في مراحل التحميل المتقدمة (انهيار مطاوع

من النمط Mode1 وفقاً للكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] بما يؤخر انهيار البراغي الضرورية لتطور فعل الكابل الشاد في الجائز.

من جانب آخر يبين الشكل (14) أن المقاومة استمرت بالتزايد رغم انقطاع براغي الصف السفلي المتواجد بين جناحي الجائز من أجل ( $m_x = 60mm, 90mm$ ) خلافاً لكل الحالات الأخرى المدروسة (الشكل 13) رغم أن نمط الانهيار المطاوع Mode1 كان هو المتحكم بمقاومة صف البراغي الطرفي من أجل كل الحالات المدروسة.



الشكل (14): منحنيات القوة الشاذية-الدوران الكلي للحل المقترح بزيادة البروز  $m_x$  لتحسين سلوك الوصلة

للتحري عن هذه النتيجة بشكل أعمق، تم تقييم مقاومة صف البراغي الطرفي من أجل كافة الحالات المدروسة وفقاً للكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] وتم تلخيص نتائج هذا التقييم في الجدول (2). تشير الأسطر الرمادية في الجدول (2) إلى الحالات لم يحدث فيها انقطاع مبكر للبراغي المتوضعة على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية مع تطور فعل الكابل بشكل فعال في الجائز.

الجدول (2): مقاومة صف البراغي الطرفي المحسوبة وفق الكود الأوروبي EN1993-1-8 [10] من أجل الحالات المدروسة

$\frac{F_{T,3,Rd}}{F_{T,1,Rd}}$	المقاومة الموافقة للنمط Mode3 $F_{T,3,Rd}$ (kN)	المقاومة الموافقة للنمط Mode2 $F_{T,2,Rd}$ (kN)	المقاومة الموافقة للنمط Mode1 $F_{T,1,Rd}$ (kN)	الحل المقترح
4.3	508	309	118	زيادة قطر البراغي إلى 24mm
3	353	222	118	استخدام صف براغي إضافي
4.3	353	214	82	تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية إلى 10mm
1.7	353	242	207	إضافة ضلع تقوية (rib)
4.8	353	189	74	زيادة البروز ( $m_x=60mm$ )
7.5	353	147	47	زيادة البروز ( $m_x=90mm$ )

يوافق نمط الانهيار **Mode1** خضوع الصفيحة الجبهية بالانعطاف مع بقاء البراغي سليمة بينما يوافق نمط الانهيار **Mode2** خضوعاً جزئياً للصفيحة الجبهية بالانعطاف مع انهيار البراغي بالشد أما نمط الانهيار **Mode3** فيوافق انقطاع البراغي بالشد [10]. يظهر الجدول (2) أن نمط الانهيار **Mode1** هو المتحكم بمقاومة صف البراغي الطرفي من أجل كافة الحالات المدروسة لكن أهمية هذا التحكم تختلف من حالة إلى أخرى وهذا ما تبينه النسبة  $(F_{T,3,Rd} / F_{T,1,Rd})$  بين المقاومتين الموافقتين لنمطي الانهيار الأقل والأعلى مطاوعة. تشير هذه النتيجة إلى أنه لا يكفي أن يتحكم نمط الانهيار المطاوع **Mode1** بمقاومة صف البراغي الطرفي المتوضع على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية لتأخير انهيار هذه البراغي، وإنما يجب أيضاً أن تكون مقاومة براغي هذا الصف الطرفي على الانقطاع بالشد (**Mode3**) أكبر بحوالي خمس مرات من المقاومة وفق نمط الانهيار **Mode1** كما يبينه الجدول (2).

#### 4- الدراسة البارامترية

سنقوم في هذه الفقرة بإنجاز دراسة بارامترية لتقصي تأثير بعض التفاصيل الجيومترية التصميمية على سلوك وخصائص الوصلة المدروسة (المقاومة والقدرة الدورانية) في سيناريو فقدان عمود. لإجراء هذه الدراسة البارامترية، سنستخدم الوصلة التي تم تحسينها عبر استخدام لحام كامل المقاومة مع وضع صف البراغي الطرفي المتواجد على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية على مسافة  $(m_x = 90mm)$  من جناح الجائر وسنسميها **EEP-1**. تم اعتماد قطر البراغي و سماكة الصفيحة الجبهية كبارامترات جيومترية لإنجاز هذه الدراسة. يلخص الجدول (3) قيم هذه البارامترات، حيث يمثل العمود باللون الرمادي قيم هذه البارامترات من أجل الوصلة المحسنة **EEP-1**. تمت نمذجة وتحليل ست وصلات مبنية في الجدول (4). تم الحصول على النتائج العددية ومناقشة تأثير كل من البارامترات الجيومترية المدروسة من الجوانب التالية:

- منحنيات القوة الشاقولية المطبقة على العمود - الدوران الكلي  $\Phi_{tot}$
- منحنيات القوة المحورية في الجائر - الدوران الكلي  $\Phi_{tot}$
- تغير المقاومة الانعطافية، المقاومة القصوى، والقدرة الدورانية بدلالة تغير قيم البارامتر الجيومترية ضمن المجال المدروس.

الجدول (3): ملخص البارامترات المعتمدة لدراسة تأثير التفاصيل الجيومترية التصميمية على سلوك الوصلة

24	20	16	قطر البراغي d(mm)	
20	15	12	10	سماكة الصفيحة الجبهية t(mm)

الجدول (4) : الخصائص الجيومترية للوصلات المعالجة في الدراسة البارامترية

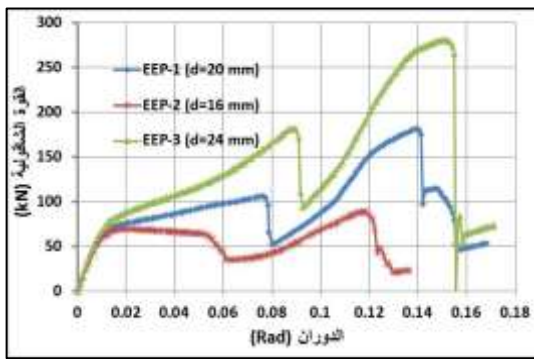
رقم العينة	d(mm)	t(mm)
EEP-1	20	12
EEP-2	16	12
EEP-3	24	12
EEP-4	20	10
EEP-5	20	15
EEP-6	20	20



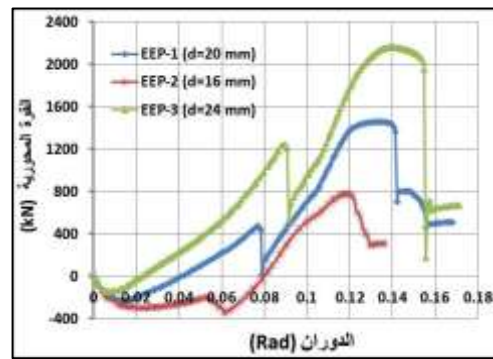
سنعتبر أن المقاومة الانعطافية توافق اللحظة التي تبدأ عندها قوى الضغط المحوري في الجائز بالتناقص كي تتحول إلى قوى شادة وهذا يحدث تقريباً عند قيمة للدوران الكلي تبلغ 0.02rad من أجل معظم الحالات المدروسة. أما المقاومة القصوى فهي ممثلة بالذروة الأعلى للمنحني المذكور. وتم اعتبار القدرة الدورانية عند الذروة الأعلى لمنحني القوة الشاقولية-الدوران الكلي.

#### 4-1 تأثير قطر البراغي.

يظهر الشكل (15) منحنيات القوة الشاقولية-الدوران الكلي، ويبين الشكل (16) منحنيات القوة المحورية - الدوران الكلي وذلك من أجل القيم الثلاثة المدروسة لقطر البراغي [24-20-16mm]. بنظرة عامة إلى الشكل (15)، نلاحظ ازدياد هام للقوة الشاقولية التي يمكن تطبيقها على العمود مع ازدياد قطر البراغي، ويتوافق هذا مع ازدياد مطاوعة الوصلة والقوة المحورية الشادة العظمى في الجائز (الشكل 16).



الشكل(15): منحنيات القوة الشاقولية-الدوران الكلي (تغيير قطر البراغي)



الشكل(16): منحنيات القوة المحورية-الدوران الكلي (تغيير قطر البراغي)

لتوضيح تأثير قطر البراغي بشكل كمي، يظهر الشكل (17) و (18) على الترتيب تغيير المقاومة (الانعطافية والقصوى) والقدرة الدورانية بدلالة النسبة بين المقاومة على الشد لكل البراغي في الوصلة ( $N_{bolt}$ ) والمقاومة المحورية للذروة لمقطع الجائز ( $N_{beam}$ ). تحسب  $N_{bolt}$  ،  $N_{beam}$  بالعلاقات (4):

$$N_{bolt} = n \cdot A_s \cdot f_{ub} \quad , \quad N_{beam} = A_{beam} \cdot f_y \quad (4)$$

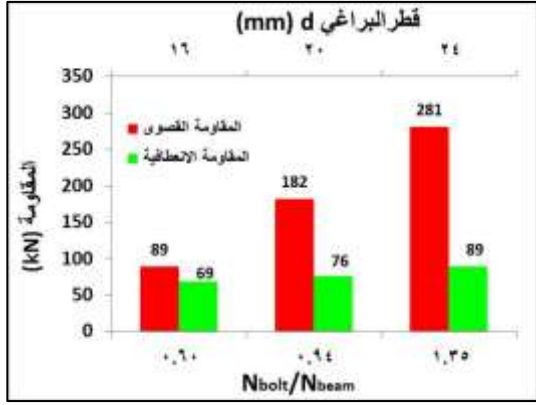
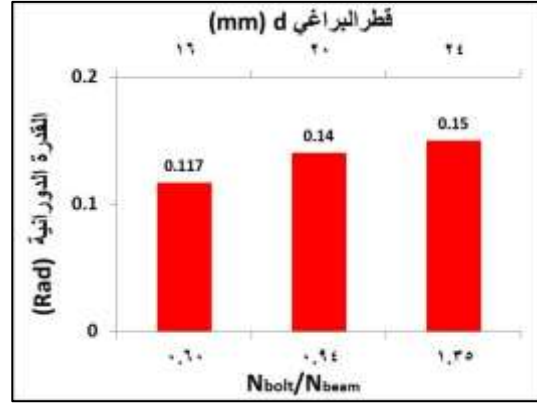
$n$ : عدد البراغي في الوصلة

$A_s$ : المقطع المقاوم للبرغي

$A_{beam}$ : المقطع العرضي للجائز

$f_{ub}$  ،  $f_y$ : إجهاد الخضوع و المقاومة القصوى على الشد لفلواذ الجائز والبراغي .

إن اختيارنا للنسبة ( $N_{bolt} / N_{beam}$ ) لتقديم النتائج العددية على الشكلين (17) و (18) يعود إلى واقع أن القوة المحورية الشادة العظمى المرافقة لفعل الكابل في الجائز تعتمد بشكل رئيسي على القيمة الدنيا بين المقاومة المحورية للذروة لمقطع الجائز ( $N_{beam}$ ) و المقاومة على الشد لكل براغي الوصلة ( $N_{bolt}$ ). يظهر الشكل (17) أن زيادة قطر البراغي تساهم بشكل فعال في زيادة المقاومة القصوى. مثلاً، من أجل زيادة في مقاومة البراغي مقدارها 56% (زيادة قطر البراغي من 16mm إلى 20mm) ازدادت المقاومة القصوى بمقدار (104%). وباستخدام براغي بقطر (24mm) تزيد مقاومتها على الشد عن المقاومة المحورية للذروة لمقطع الجائز ( $N_{bolt}/N_{beam}=1.35$ )، يطرأ تحسن إضافي على المقاومة القصوى للنموذج بزيادة مقدارها (54%) مقارنة مع حالة استخدام براغي بقطر (24mm).

الشكل(17): تغير المقاومة بدلالة  $N_{bolt} / N_{beam}$ الشكل(18): تغير القدرة الدورانية بدلالة  $N_{bolt} / N_{beam}$ 

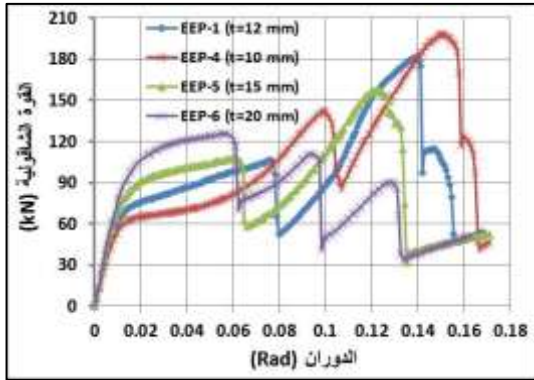
إن هذا التحسن في المقاومة القصوى مع ازدياد قطر البرغي يعود إلى واقع أن فعل الكابل يتطور في الجانز بفعالية أكبر مع ازدياد مقاومة البرغي على الشد من جهة، ومن جهة أخرى تساهم زيادة قطر البرغي في تحسين القدرة الدورانية للوصلة (الشكل 18) التي تؤدي بدورها إلى تحسين المقاومة القصوى للنموذج عبر زيادة قيمة المركبة الشاقولية للقوة المحورية في الجانز. مثلاً تسبب زيادة قطر البرغي من (16mm) إلى (24mm) زيادة في القدرة الدورانية مقدارها (28%) (الشكل 18). إن هذا التحسن في القدرة الدورانية مع ازدياد قطر البرغي يعود إلى واقع أن استخدام براغي أقوى يسمح بتركيز التشوهات اللدنة في الصفيحة الجبهية (انهيار مطاوع من النمط Mode I وفقاً للكود الأوروبي EN1993-1-8 [10]) وهذا يمنح الوصلة قدرة دوران أكبر.

بمقارنة المقاومة القصوى مع المقاومة الانعطافية (الشكل 17)، نلاحظ أنه مع تطور فعل الكابل الشاد بفعالية أكبر في الجانز عبر زيادة قطر البرغي، تزداد المقاومة القصوى مقارنة مع المقاومة الانعطافية. مثلاً، من أجل براغي بقطر 16mm ( $N_{bolt} / N_{beam} = 0.6$ )، بلغت المقاومة القصوى قيمة تزيد فقط بنسبة 29% عن المقاومة الانعطافية نتيجة عدم تطور فعل الكابل الشاد بفعالية كافية في الجانز بسبب الانقطاع المبكر للبرغي. بينما ساهم فعل الكابل الذي تطور بشكل فعال في الجانز عند استخدام براغي بقطر 24mm ( $N_{bolt} / N_{beam} = 1.35$ ) في زيادة المقاومة القصوى بمقدار (216%) مقارنة مع المقاومة الانعطافية.

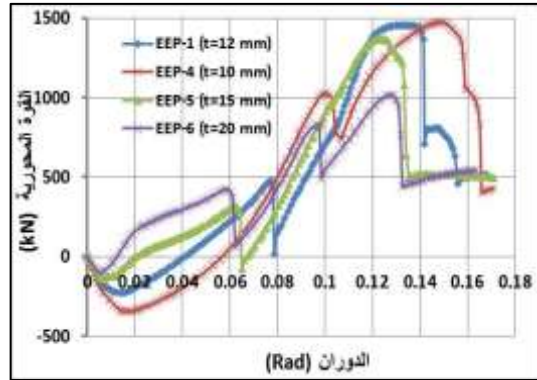
#### 4-2 تأثير سماكة الصفيحة الجبهية

يظهر الشكل (19) منحنيات القوة الشاقولية-الدوران الكلي، وبين الشكل (20) منحنيات القوة المحورية-الدوران الكلي وذلك من أجل القيم الأربعة المدروسة لسماكة الصفيحة الجبهية (10-12-15-20mm). تبين المنحنيات على الشكل (19) أن تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية يساهم في زيادة مقاومة النموذج ومطاوعته. باستثناء الحالة الخاصة بصفيحة جبهية سماكتها (20mm) حيث لم يتطور فعل الكابل الشاد بفعالية في الجانز، نلاحظ أن قيم القوة المحورية الشادة العظمى في الجانز تبقى متقاربة عند تغيير سماكة الصفيحة الجبهية (الشكل 20)، ولا تختلف عن بعضها البعض بأكثر من (10%). وهذا منطقي على اعتبار أن القوة المحورية الشادة العظمى الممكن تطبيقها على الجانز تتعلق بشكل أساسي بالمقاومة على الشد لبرغي الوصلة التي ثبتنا أقطارها في الحالة المدروسة هنا.

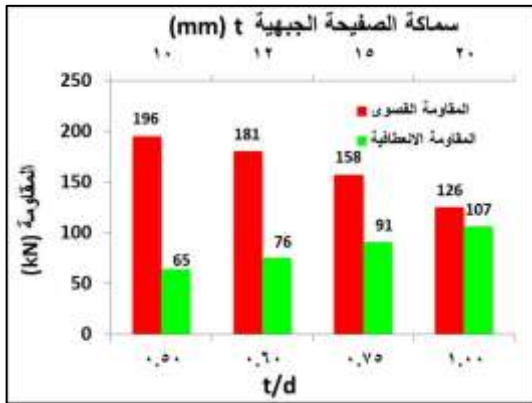
لتوضيح تأثير سماكة الصفيحة الجبهية بشكل كمي على مقاومة ومطاوعة الوصلة، يظهر الشكلان (21) و (22) على الترتيب تغير المقاومة (القصوى والانعطافية) وتغيير القدرة الدورانية بدلالة النسبة  $(t/d)$  بين سماكة الصفيحة الجبهية (t) وقطر البرغي (d).



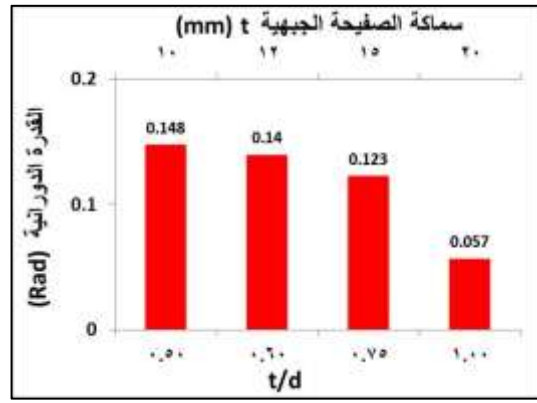
الشكل (19): منحنيات القوة الشاقولية-الدوران الكلي (تغيير سماكة الصفيحة الجبهية)



الشكل (20): منحنيات القوة المحورية-الدوران الكلي (تغيير سماكة الصفيحة الجبهية)



الشكل (21): تغير المقاومة بدلالة  $t/d$



الشكل (22): تغير القدرة الدورانية بدلالة  $t/d$

يبين الشكل (21) أن تخفيض النسبة  $(t/d)$  عبر تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية يساهم في زيادة المقاومة القصوى للنموذج. مثلاً، بسبب تخفيض النسبة  $(t/d)$  من (1) إلى (0.5) زيادة في المقاومة القصوى مقدارها (56%). يمكن تفسير هذا التحسن في المقاومة القصوى المترافق مع انخفاض النسبة  $(t/d)$  من خلال ازدياد القدرة الدورانية للوصلة (الشكل 22) التي تساهم في زيادة قيمة المركبة الشاقولية للقوة المحورية في الجائز. مثلاً، يساهم تخفيض نسبة  $(t/d)$  من (1) إلى (0.5) في تحسين القدرة الدورانية بمقدار (160%) (الشكل 22). يمكن تفسير هذا التحسن في القدرة الدورانية مع انخفاض النسبة  $(t/d)$  بشكل مماثل لما ورد في الفقرة (4-4-1)، حيث أن تخفيض النسبة  $(t/d)$  عبر تخفيض سماكة الصفيحة الجبهية يسمح بتعديل آلية الانهيار عند صفوف البراغي المشدودة بحيث تتركز التشوهات اللدنة في الصفيحة الجبهية (انهيار مطاوع من النمط Mode1 وفقاً للكود الأوروبي EN1993-1-8 [10])، وهذا يمنح الوصلة قدرة دوران أكبر. يظهر الشكل (22) أنه تم الحصول على أفضل قدرة دوران من أجل  $(t/d=0.5)$ . بمقارنة المقاومة القصوى مع المقاومة الانعطافية (الشكل 21)، نلاحظ أن تطور فعل الكابل الشاد في الجائز قد ساهم في ازدياد المقاومة القصوى بشكل ملحوظ مقارنة مع المقاومة الانعطافية وذلك من أجل كافة الحالات المدروسة، وكانت هذه الزيادة أكثر أهمية مع انخفاض النسبة  $(t/d)$ . مثلاً، من أجل  $(t/d=1)$  بلغت المقاومة القصوى قيمة تزيد بمقدار (18%) عن المقاومة الانعطافية. بينما بلغت المقاومة القصوى قيمة تزيد بمقدار (202%) عن المقاومة الانعطافية من أجل  $(t/d=0.5)$  (الشكل 21).

## الاستنتاجات والتوصيات

تؤثر التفاصيل الإنشائية التصميمية بشكل كبير على سلوك الوصلات الفولاذية جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن إزالة عمود. نلخص فيما يلي أهم النتائج التي توصلنا إليها في هذا البحث:

- أظهرت استجابة الوصلة تحت سيناريو فقدان عمود، أن نقل الحمولة الشاقولية يتم عبر آليتين رئيسيتين تتطوران في الجائز: الآلية الأولى هي فعل قوس الضغط، والآلية الثانية هي فعل الكابل الشاد الذي يتم تفعيله نتيجة تطاول الجائز وازدياد دوران الوصلة ويكون أكثر وضوحاً من أجل قيم دوران تتجاوز (0.07rad).
- تلعب الخواص الجيومترية للجزء البارز من الصفيحة الجبهية دوراً جوهرياً في تطور فعل الكابل الشاد بشكل فعال في الجائز. لذا يجب أن يتحكم نمط الانهيار Mode1 بمقاومة صف البراغي المتوضع على الجزء البارز من الصفيحة الجبهية ويجب ألا تقل المقاومة على الانقطاع بالشد (Mode3) لبراغي هذا الصف عن خمس مرات مقاومة صف البراغي المذكور.
- تؤثر مقاومة البراغي بشكل ملحوظ على تطور فعل الكابل في الجائز. ولضمان تطور فعل الكابل بفعالية أكبر يجب ألا تقل مقاومة براغي الوصلة مجتمعة عن المقاومة المحورية للدنة لمقطع الجائز ( $N_{bolt}/N_{beam} \geq 1$ ).
- تزداد مطاوعة الوصلة بتخفيض النسبة بين سماكة الصفيحة الجبهية وقطر البراغي ( $t/d$ ) وتم الحصول على أفضل قدرة دوران للوصلة من أجل ( $t/d \leq 0.5$ ).
- من أجل ( $t/d \leq 0.5$ ) مع ( $N_{bolt}/N_{beam} \geq 1$ ) تم الحصول على قدرة دوران للوصلة تزيد عن (0.15rad).

وبناء على دراستنا نوصي بما يلي

- دراسة تأثير الخصائص الجيومترية للجائز والعمود وخاصة ارتفاع المقطع على سلوك الوصلات المنفذة بصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي.
- تطوير نموذج ميكانيكي (نموذج النوايض) لمحاكاة سلوك الوصلات الفولاذية جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي تحت سيناريو فقدان عمود.

## 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] LI, H. *Modeling, Behavior and Design of Collapse-Resistant Steel Frame Buildings*. University of Michigan, Ann Arbor, 2013, 232.
- [6] KHANDELWAL, K. *Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis*, Engineering Structures, Vol. 33, 2011, 2653–2661.
- [7] ABAQUS V6.14. *ABAQUS/Standard User`s Manual*, Dassault Systèmes, USA, 2014, 1128p.
- [8] YANG, B. *Experimental tests of different types of bolted steel beam–column joints under a central-column-removal scenario*, Engineering Structures, Vol. 54, 2013, 112–130.
- [9] Office of the Deputy Prime Minister, - *The Building Regulations 2000 part A*. London, UK, 2004,262.
- [10] EN 1993-1-8. *Euro code 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, Brussels, 2005, 135p.
- [11] DOD. *Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*, Unified Facilities Criteria (UFC), USA, 2009, 245p.
- [12] General Services Administration (GSA). - *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, Washington, 2003, 119.
- [13] Elsawaf, S. *Numerical modelling of restrained structural subassemblies of steel beam and CFT columns connected using reverse channels in fire*. Engineering Structures, Vol.33, 2011, 1217–1231.
- [14] YANG, B. *Numerical analyses of steel beam–column joints subjected to catenary action*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 70, 2012, 1–11.
- [15] DINU, F. *Experimental testing and numerical analysis of 3D steel frame system under column loss*, Engineering Structures, Vol.113, 2016, 59–70.
- [16] BAILEY, C. *Numerical modelling of structural fire behaviour of restrained steel beam-column assemblies using typical joint types*. Engineering Structures, Vol. 32, 2010, 2337–2351.