

Dynamic Behavior of Steel Bolted Flush End Plate Beam-to-Column Joints During Progressive Collapse

Dr. Badia Haidar^{*}
Dr. Ghandi Loho^{**}
Khudr ALhaj^{***}

(Received 14 / 10 / 2019. Accepted 6 / 1 / 2020)

□ 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. The research presented in this paper processes the dynamic behavior of steel bolted flush end plate beam-to-column joints during progressive collapse. to achieve this goal, a dynamic analytical study was performed using a mechanical model created using the ABAQUS finite element program. Parametric study was performed using numerical model to investigate the effect of column load release time on the dynamic response of the studied model. the dynamic response of the joint was studied under the influence of the sudden loss of the column. This response was defined as the relationship between the initial vertical load in the column and the maximum dynamic vertical transition resulting from the release of this load. Based on the dynamic and static response obtained, the values of dynamic increase factors were calculated based on the strength of the studied joint and compared with the values calculated according to the data of the American code (DOD). in the end, a simplified relationship was established that allows the determination of Dynamic Increased Factors (DIFs) of the studied connection in the stage cable action.

Keywords: Progressive collapse, column loss, Beam-to-column joints, Catenary action, Dynamic increased factor.

^{*} Associate Professor, Department of Structure Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Syria, e: haidar.b@gmail.com

^{**} Assistant Professor, Department of Structure Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University – Syria, e: g_loho@hotmail.com

^{***} PhD Student, Department of Structure Engineering – Faculty of Civil Engineering – Tishreen University– Syria, e: khudr.alhaj@gmail.com

السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي

د. بادية حيدر*

د. غاندي لوجو**

خضر الحج***

(تاريخ الإيداع 14 / 10 / 2019. قُبِلَ للنشر في 6 / 1 / 2020)

□ 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 السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي. لتحقيق هذا الهدف، تم إنجاز دراسة تحليلية ديناميكية باستخدام نموذج ميكانيكي (mechanical model) تم إنشاؤه باستخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS. تم إنجاز دراسة بارامترية باستخدام النموذج العددي للتحري عن تأثير زمن تفريغ حمولة العمود على الاستجابة الديناميكية للنموذج المدروس. تمت دراسة الاستجابة الديناميكية للوصلة تحت تأثير فقدان الفجائي للعمود وقد تم تعريف هذه الاستجابة كعلاقة بين الحمولة الشاقولية الابتدائية في العمود والانتقال الشاقولي الديناميكي الأعظمي الناتج عن تفريغ هذه الحمولة. استناداً إلى الاستجابة الديناميكية و الستاتيكية التي تم الحصول عليها تم حساب قيم معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة للوصلة المدروسة وتمت مقارنتها مع القيم المحسوبة وفقاً لمعطيات الكود الأمريكي (DOD). في النهاية، تم وضع علاقة مبسطة تسمح بتحديد معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة للوصلة المدروسة في مرحلة العمل الكابلي.

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

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

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

*** 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 النقالة 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.

إن الانهيار التدريجي نتيجة فقدان المفاجئ لعمود ما من المنشأ هو حدث ديناميكي لا خطي بامتياز، ولا بد من أخذ الاستجابة الديناميكية العظمى للمنشأ بعين الاعتبار أثناء تقييمه. يمكن مراعاة الآثار الديناميكية في سيناريو الضياع المفاجئ لعمود عبر مقاربتين مبسطتين هما النمذجة الخطية والنمذجة اللاخطية تحت حمولات مضخمة باستخدام معاملات تضخيم ديناميكي (DIFs) [7-8]. إضافة إلى هاتين الطريقتين، يمكن دوماً اللجوء إلى إجراء تحليل ديناميكي مباشر للمنشأ المتضرر، ولكن هذا الأخير يعتبر معقداً نسبياً وغير عملي في بيئة مكاتب التصميم الهندسية. يسمح (DOD) [7] بإجراء 3 أنماط من التحليل: تحليل سناتيكي خطي، تحليل سناتيكي لا خطي وتحليل ديناميكي لا خطي. عند إجراء تحليل سناتيكي خطي، يطبق معامل تضخيم ديناميكي (DIF=2) على الحمولات السناتيكية لأخذ الآثار الديناميكية الناتجة عن الحمولات الطارئة بعين الاعتبار. أما من أجل إجراء تحليل سناتيكي لا خطي، يستخدم معامل تضخيم ديناميكي (DIF) تتناقص قيمته مع ازدياد التشوه المسموح للعناصر الإنشائية.

لقد تزايد عدد الأبحاث التي أظهرت وجود اختلاف واضح لا يمكن إهماله بين الطريقة الستاتيكية الخطية و الطريقة الديناميكية اللاخطية [9]. بيد أن استخدام التحليل الديناميكي يعتبر عملية صعبة في التصميم التطبيقي الخاص بالانهيار التدريجي. وبناء عليه تبقى فكرة المستند (DOD) [7] (تصميم ستاتيكي لاخطي بمعاملات تضخيم ديناميكية DIFs) ثمينة رغم بعض العيوب الموجودة في هذا المستند [10]. على سبيل الذكر لا الحصر، يرتبط معامل التضخيم الديناميكي المعتمد في (DOD) [7] بالقدرة الدورانية للجائز والوصلة، ويوصي هذا المستند باعتماد القيم المحددة بناءً على معطيات زلزالية.

رغم الأبحاث العديدة التي أنجزت لدراسة السلوك الديناميكي لبعض أنواع الوصلات جائز-عمود تحت سيناريو إزالة عمود [9-10-11]. فإن سلوك الوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراعي وصفائح جبهية غير بارزة يتطلب مزيداً من البحث والدراسة من أجل فهم أكثر عمقاً لهذا السلوك وصولاً إلى تحديد معامل التضخيم الديناميكي الملائم لهذا النمط من الوصلات.

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

أهمية البحث وأهدافه:

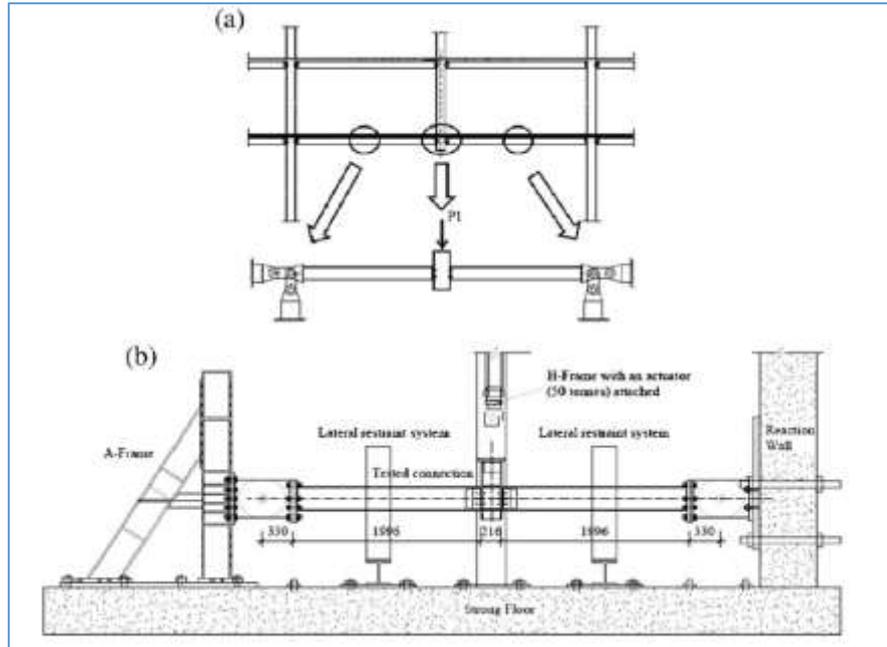
يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الديناميكي للوصلات جائز-عمود المنفذة بالبراعي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي الناتج عن فقدان عمود وصولاً إلى تحديد معامل التضخيم الديناميكي الملائم لهذا النمط من الوصلات. لتحقيق هذا الهدف تم إنجاز الدراسة باستخدام نموذج ميكانيكي للوصلة المدروسة باستخدام برنامج [12] ABAQUS-V.14.2 القائم على طريقة العناصر المنتهية.

1- الدراسة المرجعية

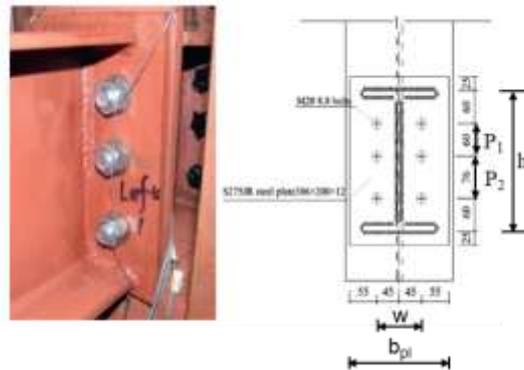
قام الباحث Yang [13] بإجراء اختبارات تجريبية ستاتيكية لتقييم أداء بعض الأنواع الشائعة الاستخدام للوصلات الفولاذية جائز-عمود تحت سيناريو إزالة عمود مركزي. وتضمنت الوصلات المختبرة وصلة واحدة منفذة بالبراعي وصفائح جبهية غير بارزة. تقع الوصلة المعتبرة في هذا الاختبار فوق الطابق حيث تمت إزالة عمود داخلي محيطي. لتبسيط الاختبار، تم افتراض وقوع نقطة الانعطاف عند وسط مجاز الجائز، حيث تم اعتماد نصف مجاز الجائز مع شروط استناد مفصلية عند نهاية كل جائز كما يظهر الشكل (1).

يتألف النموذج التجريبي من جذع عمود مركزي وجائزين متصلين به ووصلة جائز-عمود مركزية. يظهر الشكل (2) 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 التقيد 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 Bo Yang [14] بإجراء دراسة عديدة لتقييم أداء الوصلات المختبرة تجريبياً. أكدت النتائج التجريبية والعديدية على مساهمة آلية فعل الكابل في المقاومة من أجل أنماط مختلفة من الوصلات المدروسة.

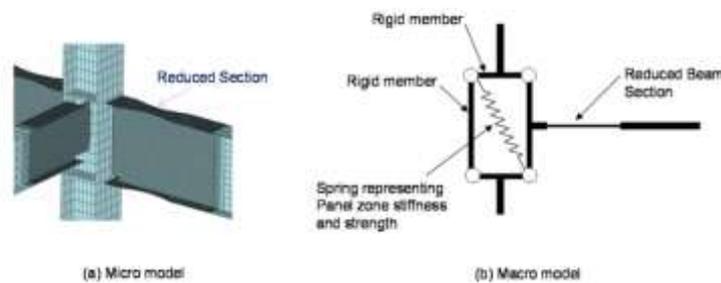


الشكل(1): نموذج وصلة جانز-عمود المختبرة تجريبيا وتجهيزات الاختبار [13]



الشكل (2): التفاصيل الإنشائية للوصلة بصفحة جبهية غير بارزة [13]

فيما يخص التحليل الإنشائي، يجب استخدام نماذج إنشائية قادرة على محاكاة استجابة المنشأ تحت انهيار تدريجي. يمكن تصنيف النماذج الإنشائية كنماذج مايكروية (micro-models) ونماذج ماكروية (macro-models) [15] الشكل(3).



الشكل (3) : تصنيف النماذج الإنشائية [15].

النموذج المايكروبي هو نموذج عناصر منتهية قائم على الاستمرارية الفيزيائية وهو قادر على محاكاة الاستجابة الموضعية والإجمالية للمنشأ بدقة عالية. لكن النماذج المايكروبية تتطلب قدرات حاسوبية كبيرة ووقت تحليل طويل مما جعل النمذجة المايكروبية خياراً مفيداً مع توفر الدقة الكافية. وفي هذا الإطار، تعتبر النماذج الميكانيكية (mechanical models) القائمة على طريقة المركبات (component method) هي الأكثر استخداماً لمحاكاة سلوك الوصلات الفولاذية بمختلف أنواعها.

يوجد الكثير من الأبحاث التي اهتمت بتطوير نماذج ميكانيكية لوصلات جوائز-عمود منفذة بالبراعي وصفائح جبهية وذلك عندما تخضع الوصلة لعزم انعطاف صرف بينما نجد عدداً قليلاً نسبياً من النماذج الميكانيكية من أجل وصلات تخضع لعزم انعطاف مترافق مع قوة محورية ثابتة أو متزايدة بنفس معدل تزايد عزم الانعطاف [16-17-18] وتصبح هذه النماذج نادرة فيما يخص أداء الوصلة أثناء الانهيار التدريجي تحت سيناريو فقدان العمود [19]. 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 [20].

طرائق البحث ومواده:

1- وصف النموذج الميكانيكي المستخدم لدراسة السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جوائز-عمود المنفذة بالبراعي وصفائح جبهية غير بارزة:

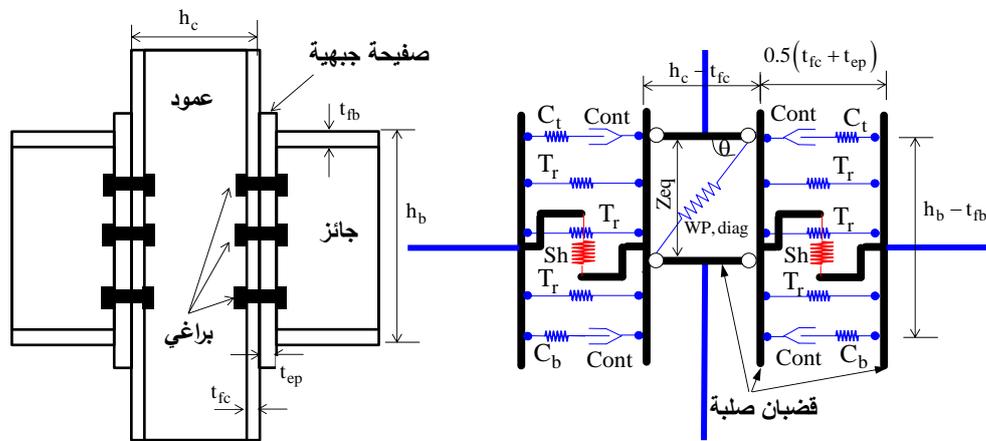
تمت دراسة السلوك الديناميكي للوصلات جوائز-عمود المنفذة بالبراعي وصفيحة جبهية غير بارزة بتوظيف النموذج الميكانيكي المطور من قبل الباحث [19] Alhaj باستخدام برنامج ABAQUS-V.14.2 [12]. يتألف النموذج الميكانيكي المبين على الشكل (4) من مجموعة من القضبان الصلبة المتصلة فيما بينها بعدد من النوابض (springs) المستخدمة لنمذجة مركبات الوصلة. نعطي فيما يلي المركبات (النوابض) التي يتألف منها النموذج الميكانيكي المطور. **النوابض Tr:** كل واحد من هذه النوابض هو نابض مكافئ لمجموعة المركبات الفردية المنسوبة إلى صف براغي مشدود (r) والمجمعة على التسلسل (البراعي المشدود- جسد العمود المشدود عرضياً- جسد الجوائز المشدود- جناح العمود الخاضع للانعطاف- الصفيحة الجبهية الخاضعة للانعطاف).

النوابض Ct وCb: 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 (جناح وجسد الجوائز المضغوطان- جسد العمود المضغوط عرضياً)

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 (البراعي الخاضعة للقص- الصفيحة الجبهية و جناح العمود الخاضعين للضغط القطري على جدران الثقوب- اللحم الخاضع للقص بين الصفيحة الجبهية و جسد الجوائز).

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

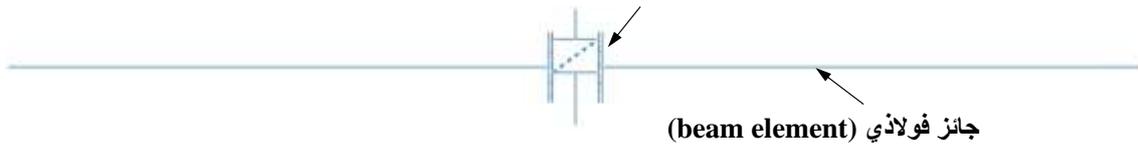
وقد قام الباحث Alhaj [7] بمعايرة وتوثيق النموذج الميكانيكي المطور بالمقارنة مع نتائج تجريبية. لمزيد من التفاصيل حول هذا النموذج الميكانيكي يمكن العودة إلى المقال.



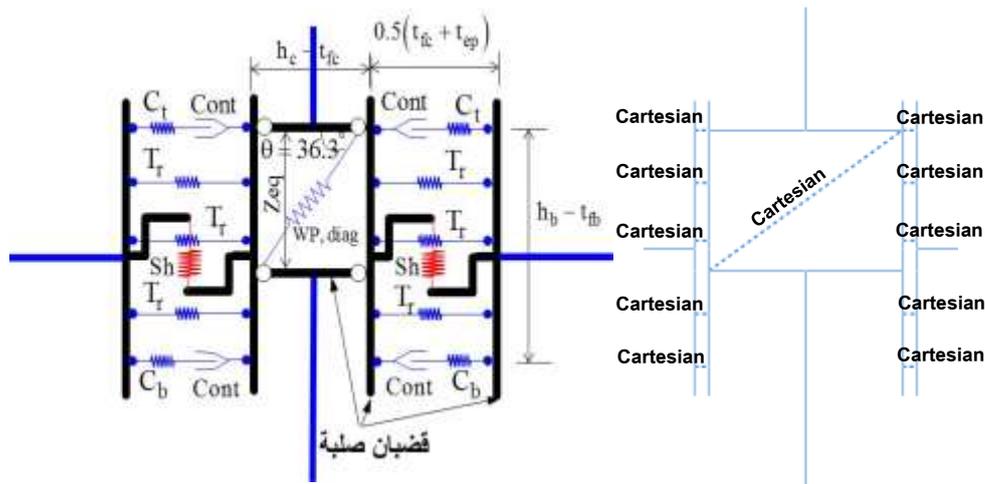
الشكل (4): النموذج الميكانيكي المطور من قبل Alhaj [19]

في الفقرات اللاحقة، ستتم دراسة مختلف جوانب السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة بتطبيق النموذج الميكانيكي المطور من قبل الباحث Alhaj [19] على النموذج التجريبي المختبر من قبل الباحث Yang [13] (الفقرة 2)، والذي سندهوه بـ $FEP-12$ حيث يشير الرقم 12 إلى سماكة الصفيحة الجبهية المستخدمة في الوصلة المختبرة.

وصلة جائز-عمود (Connector element)



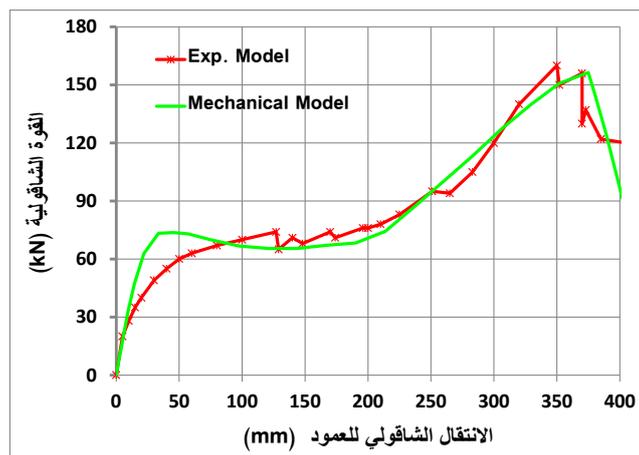
(a) : لمحة عامة عن النموذج العددي



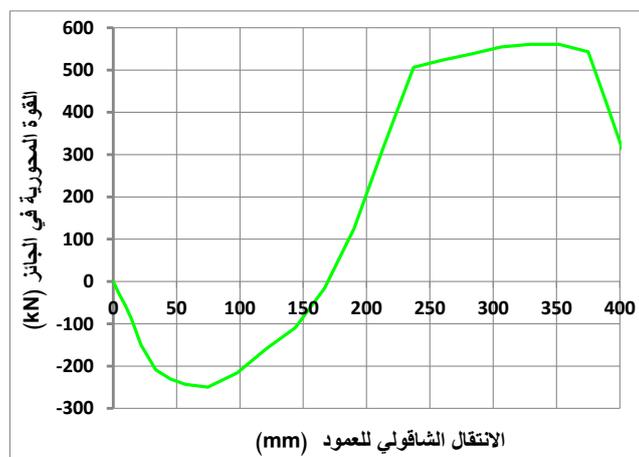
(b): نمذجة الوصلة جائز-عمود باستخدام عناصر ربط (Connector element) من النمط (Cartesian)

الشكل (5) : النموذج العددي المنجز باستخدام ABAQUS

بوضع الخصائص المادية و الجيومترية للوصلة FEP-12 (الفقرة 2) في علاقات النموذج الميكانيكي [19] تم حساب خصائص النوابض المكونة للنموذج الميكانيكي. قمنا بتجميع النموذج الميكانيكي مع مكوناته في نموذج عددي باستخدام برنامج ABAQUS-V.14.2 [12]. حيث تمت نمذجة النوابض 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 الميكانيكي المعتمد، اخترنا عنصر الربط من النمط (Cartesian) [12]، حيث يسمح بنمذجة نوابض محورية (axial springs) ونوابض قصية (shear springs) باستخدام عنصر ربط واحد. لنمذجة الجوائز والأعمدة تم استخدام العنصر B32 وهو عنصر جائزي ثلاثي الأبعاد غير خطي من الدرجة الثانية بثلاث عقد وكل عقدة تمتلك ست درجات حرية (3 انتقالات و 3 دورانات). فيما يخص التخامد، فقد تم استخدام مصفوفة تخامد رايليه (Rayleigh damping matrix) التي تفترض تراكبا خطيا لمصفوفتي الكتلة والصلابة. يظهر الشكل (5) النموذج العددي المنجز باستخدام ABAQUS. يبين الشكل (6) مقارنة بين الاستجابة العددية للوصلة المدروسة باستخدام النموذج الميكانيكي المعتمد [19] و استجابة النموذج التجريبي المختبر من قبل الباحث Yang [13] (الفقرة 2) والممثلة بمنحني القوة الشاقولية-الانتقال الشاقولي للعمود.



الشكل (6) : مقارنة المنحنيات التجريبية والعددية (قوة شاقولية-انتقال شاقولي للعمود)



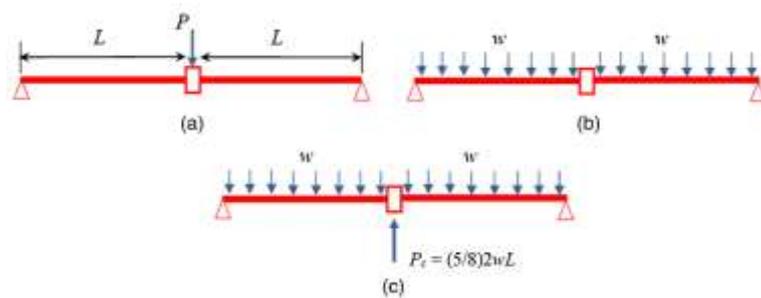
الشكل (7) : منحنى القوة المحورية- الانتقال الشاقولي للعمود

وصلت قدرة تحمل النموذج التجريبي الى (160kN) بينما بلغت قدرة التحمل المحسوبة عددياً (156kN)، وبذلك تجاوزت الدقة في توقع المقاومة القصوى للوصلة باستخدام النموذج العددي 90%. يمكن أن نلاحظ أيضاً أن النموذج العددي يستطيع محاكاة السمات الرئيسية المميزة لاستجابة وصلة جازز-عمود منفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة تحت 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 الجائز. لاحقاً للطور الأول، وتحت تشوهات كبيرة، تبدأ القوة المحورية بالتطور في الجائز بسبب تأثير اللاخطية الهندسية في مرحلة السلوك اللدن ووجود القيود المحورية عند طرف الجائز. في الطور الثاني تتطور آلية تعرف بالقوس الضاغط (compressive arching) تقوم بتفعيل قوى الضغط المحورية في الجائز (الشكل 7). مع ازدياد دوران الوصلة، تتناقص آثار قوس الضغط ويتطور فعل الكابل (Catenary action) المميز بقوى شد محورية في الجائز في الطور الثالث (الشكل 7). وخلال هذه المرحلة، مع ازدياد الشد المحوري في الجائز، تصبح آثار الانعطاف أقل أهمية ويصبح فعل الكابل الشاد هو الآلية الرئيسية لنقل الحمولة قبل أن تنهار الوصلة.

2- وصف إجراءات المحاكاة (Simulation procedures) أثناء الانهيار التدريجي

يمكن دراسة سلوك الوصلات جازز-عمود أثناء الانهيار التدريجي باستخدام ثلاث طرق تحميل مختلفة [21]:

- يتم في الطريقة الأولى دفع العمود نحو الأسفل بتطبيق حمولة مركزة عليه (الشكل 8-a) حتى حدوث الانهيار وتعرف هذه الطريقة بطريقة الحمولة المركزة القائمة على التحكم بالانتقال (concentrated load-displacement control). تستخدم هذه الطريقة بشكل واسع لدراسة الأداء الستاتيكي للمنشآت [13].
- يتم في الطريقة الثانية تطبيق حمولة موزعة على الجائزين (الشكل 8-b) متزايدة حتى حدوث الانهيار وتعرف هذه الطريقة بطريقة التحكم بالحمولة الموزعة (distributed load- control).
- أما الطريقة الثالثة فتدعى بطريقة تفريغ أو تحرير حمولة العمود (column force- release)، ويتم فيها تخفيض رد فعل العمود إلى الصفر (الشكل 8-c). تمثل هذه الطريقة المقاربة الأكثر دقة لمحاكاة الحالة الفعلية للانهيار التدريجي نتيجة فقدان عمود.

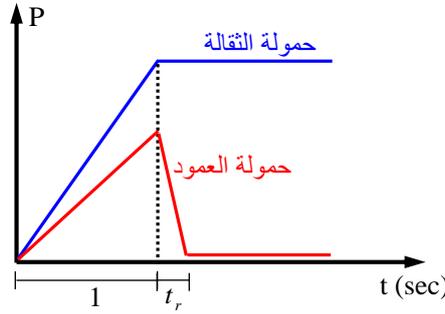


الشكل (8) : طرق التحميل المستخدمة لدراسة سلوك الوصلات جازز-عمود أثناء الانهيار التدريجي [21]

تم اختيار طريقة تفريغ حمولة العمود لدراسة السلوك الديناميكي للوصلات جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة. يتضمن التحليل خطوتين كما يظهر الشكل (9):

- يتم في الخطوة الأولى تطبيق حمولة الثقالة الموزعة بانتظام على الجائزين وتطبق على العمود قوة متجهة نحو الأعلى تمثل رد فعل العمود الناتج عن الحمولات المطبقة على الجائزين (الشكل 8-c)، حيث تتم زيادة حمولة الثقالة وحمولة العمود ستاتيكيًا بشكل خطي خلال ثانية واحدة حتى تبلغ قيمها النهائية.

- أما في الخطوة الثانية فيتم تفريغ حمولة العمود بتخفيضها إلى الصفر خلال زمن t_r لمحاكاة فقدان الفجائي للعمود.

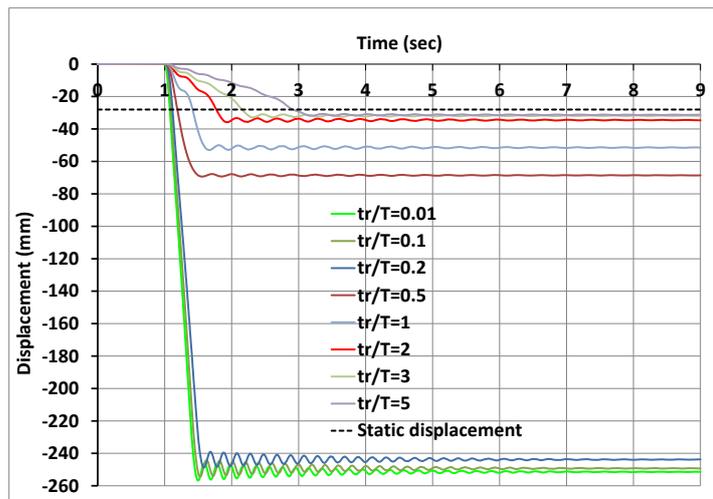


الشكل (9) : منحنى الحمولة- زمن المستخدم لمحاكاة فقدان الفجائي للعمود

3- تأثير زمن تفريغ حمولة العمود t_r

كما ذكرنا سابقاً، فإن فقدان الفجائي للعمود خلال زمن (t_r) يماثل في تأثيره التطبيق الفجائي لحمولة العمود خلال نفس الزمن (t_r). من المعروف في هذه الحالة أن الاستجابة الديناميكية حساسة للنسبة بين زمن تطبيق الحمولة t_r والدور الطبيعي (T) للمنشأ المتبقي بعد إزالة العمود. وقد بين Biggs [22] أن الأثر الديناميكي على استجابة المنشأ يكون ملحوظاً إذا كان $(t_r / T \leq 0.2)$.

باستخدام النموذج الميكانيكي المطور من قبل الباحث Alhaj [19] تم إجراء مجموعة من التحليلات الديناميكية باستخدام قيم مختلفة لزمن تفريغ حمولة العمود (t_r). حيث تم اعتماد زمن تفريغ حمولة العمود كنسبة من الدور الطبيعي (T) لنظام المنشأ المتبقي بعد إزالة العمود، وقد تدرجت قيم t_r ضمن المجال $[0.01 T - 5 T]$. يظهر الشكل (10) مقارنة الاستجابة الديناميكية للوصلة FEP-12 من أجل القيم المعتمدة لزمن تفريغ حمولة العمود حيث كان الدور الطبيعي ($T = 0.41 \text{sec}$).



الشكل (10) : مقارنة الاستجابة الديناميكية للنموذج FEP-12 من أجل قيم مختلفة لـ (t_r / T)

يبين الشكل (10) أن السجلات الزمنية للانتقال الشاقولي للعمود متقاربة مع بعضها البعض بشكل كبير من أجل $(t_r / T \leq 0.1)$. يمكن أن نلاحظ أيضاً أنه من أجل $(t_r / T = 0.5)$ لا تزال الاستجابة الديناميكية حاضرة ولكن بقيم انتقال أعظمي أقل بكثير مقارنة مع الحالات الثلاثة $(t_r / T = 0.01, 0.1 \text{ and } 0.2)$. يقل الاثر الديناميكي لتفريغ حمولة العمود مع زيادة زمن التفريغ t_r ، حيث بلغ الانتقال الأعظمي من أجل $(t_r / T = 5)$ حوالي 32mm وهو قريب من الانتقال الستاتيكي. يشير هذا إلى أن استجابة الوصلة ستصبح ستاتيكية من أجل زمن تفريغ للحمولة يزيد عن 5T.

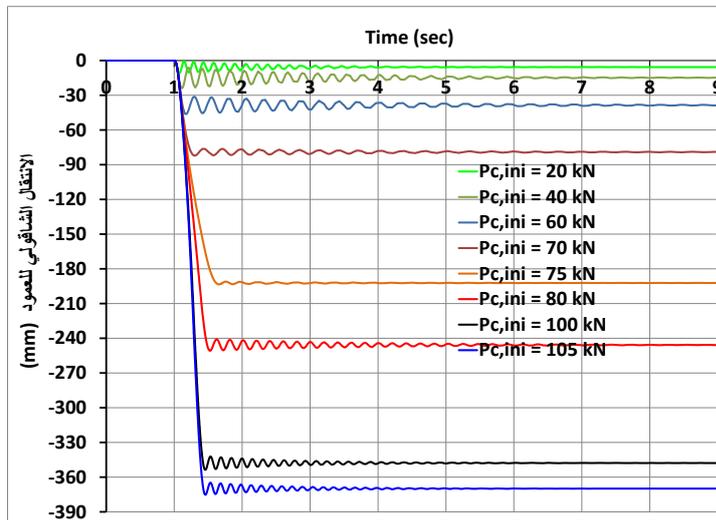
بناء على ما سبق ومن أجل الوصلات بصفحة جبهية، يمكن إهمال تأثير زمن تفريغ حمولة العمود إذا كان لا يزيد عن عشر الدور الطبيعي $(t_r / T \leq 0.1)$ لنظام المنشأ المتبقي بعد إزالة العمود. تتلاقى هذه النتيجة مع النتائج الملاحظة في أبحاث أخرى تعالج نمط آخر من الوصلات جازز-عمود [21-23].

4- الاستجابة الديناميكية للوصلة تحت تأثير الفقدان الفجائي للعمود

سنتم في هذه الفقرة دراسة الاستجابة الديناميكية الكاملة للوصلة جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفحة جبهية غير بارزة (FEP-12) تحت تأثير الفقدان الفجائي للعمود. تم إجراء سلسلة من التحليلات الديناميكية من أجل قيم متنوعة للحمولة الموزعة بانتظام (UDL) المطبقة على الجوائز مع زيادة شدة الحمولة (UDL) في كل تحليل حتى حصول الانهيار. بناء على النتائج التي توصلنا إليها في الفقرة (3-3) تم اعتماد زمن تفريغ حمولة العمود $(t_r = 0.1 T)$.

1-4 وصف السلوك الديناميكي العام

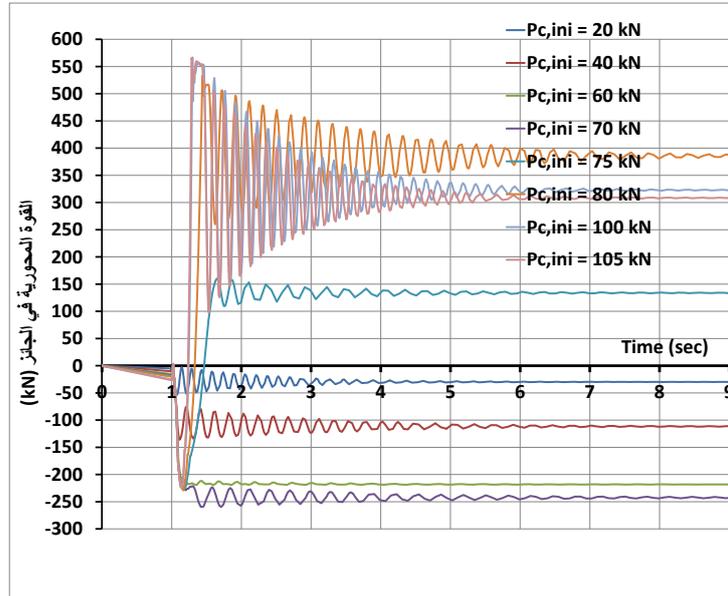
سنقوم في هذه الفقرة بوصف السلوك الديناميكي العام للوصلة من خلال مناقشة وتحليل السجلات الزمنية للانتقال الشاقولي للعمود وللقوة المحورية في الجازز. يظهر الشكل (11) السجلات الزمنية للانتقال الشاقولي للعمود من أجل قيم مختلفة لحمولة العمود الابتدائية $P_{C,ini}$.



الشكل (11) : السجلات الزمنية للانتقال الشاقولي للعمود من أجل قيم مختلفة لحمولة العمود الابتدائية $P_{C,ini}$

نشير هنا إلى أن حمولة العمود الابتدائية هي الحمولة في العمود الموافقة لتطبيق حمولة موزعة بانتظام (UDL) على الجوائز والتي سيتم تفريغها لتحاكي إزالة العمود. نعرف المقاومة الديناميكية للنموذج بأنها القيمة العظمى لـ $P_{C,ini}$ التي

ينهار النموذج عند تفريغها. يظهر الشكل (12) السجل الزمني للقوة المحورية في الجائز. و يلخص الجدول (1) أهم نتائج التحليل الديناميكي للنموذج FEP-12.



الشكل (12) : السجلات الزمنية للقوة المحورية في الجائز من أجل قيم مختلفة لحمولة العمود الابتدائية $P_{C,ini}$

الجدول (1) : ملخص نتائج التحليل الديناميكي للنموذج FEP-12							
حالة التشوه	$N_{b,max}$ (kN)	$d_{C,permanent}$ (mm)	$d_{C,max}$ (mm)	tr/T	tr (sec)	T (sec)	$P_{C,ini}$ (kN)
مرن	-53.5	5.7	11	0.1	0.0136	0.136	20
لدن	-136.2	15	24.1	0.1	0.0188	0.188	40
لدن	-219.2	39	46.3	0.1	0.0229	0.229	60
لدن	-259.6	79	82.2	0.1	0.0246	0.246	70
لدن	160.3	192	193.4	0.1	0.0255	0.255	75
لدن	533.8	246	250.8	0.1	0.0263	0.263	80
لدن	566.8	348	353.7	0.1	0.0294	0.294	100
لدن	565.9	370	375.3	0.1	0.0301	0.301	105

$P_{C,ini}$: حمولة العمود الابتدائية، T: الدور الطبيعي للنموذج، tr: زمن تفريغ حمولة العمود، $d_{C,max}$: الانتقال الشاقولي الأعظمي للعمود، $d_{C,permanent}$: الانتقال الشاقولي الدائم للعمود، $N_{b,max}$: القوة المحورية الأعظمية في الجائز.

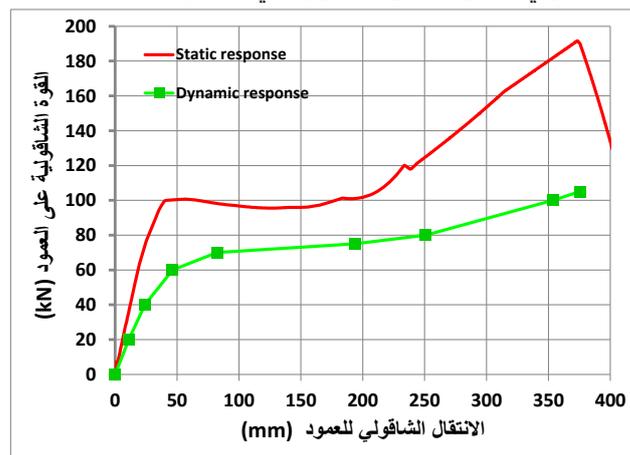
يظهر الشكل (11) أنه لا يوجد أي انتقال شاقولي للعمود حتى الزمن ($t = 1\text{sec}$) الموافق لانتهاؤ مرحلة التحليل الأولى التي تم فيها تطبيق الحمولة الموزعة بانتظام (UDL) على الجائز مع رد الفعل الموافق $P_{C,ini}$ على العمود. وهذا يعني أن طريقة التحميل المعتمدة تكافئ فعلياً وجود عمود مسنود يمنع الانتقال الشاقولي. مع تفريغ حمولة العمود ($t > 1\text{sec}$) يزداد الانتقال الشاقولي للعمود بشكل سريع ليبلغ قيمته القصوى خلال زمن قصير لا يتجاوز 0.45sec

من أجل كافة الحالات المدروسة، ثم يبدأ المنشأ باهتزاز يتخامد سريعاً إلى قيمة دائمة (permanent displacement) يثبت الانتقال الشاقولي عندها. بلغت المقاومة الديناميكية للنموذج $P_{C,ini} = 105kN$ وكان الانتقال الشاقولي الأعظمي الموافق لهذه القيمة $375.3mm$ كما هو مبين في الجدول (1).

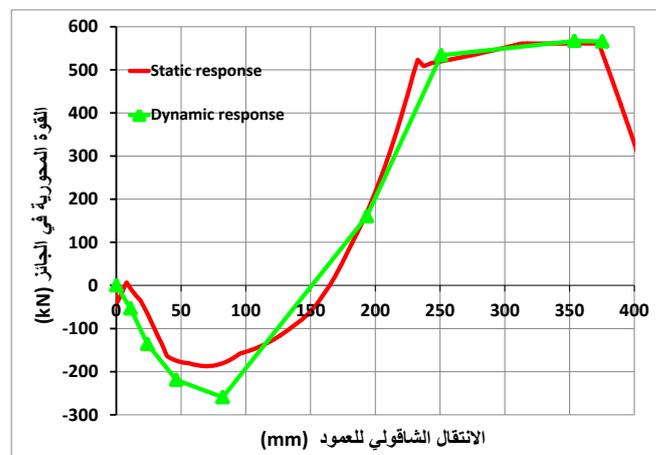
يظهر الشكل (12) أنه عند نهاية مرحلة التحليل الأولى ($t = 1sec$) تتطور في الجانز قوة ضغط محورية تبقى قيمتها محدودة ولا تتجاوز $30 kN$ من أجل كافة الحالات المدروسة. مع تفريغ حمولة العمود ($t > 1sec$) ومن أجل ($P_{C,ini} \leq 70kN$) تزداد قوة الضغط المحورية في الجانز وتبلغ قيمتها الأعظمية في نفس اللحظة التي يبلغ فيها المنشأ انزياحه الشاقولي الأعظمي، ثم تبدأ بالتذبذب لتستقر عند قيمة دائمة مع تخامد اهتزاز المنشأ. من أجل ($P_{C,ini} > 70kN$) تتطور في الجانز قوة شد محورية (الشكل 12)، وهذا يشير إلى تطور فعل الكابل catenary (action) في الجانز. يظهر الشكل (12) والجدول (1) أن قوة الشد المحورية العظمى في الجانز تصبح أكثر أهمية كلما ازدادت حمولة العمود الابتدائية $P_{C,ini}$.

2-4 مقارنة بين الاستجابة الستاتيكية والديناميكية للوصلة المدروسة

يظهر الشكل (13) المنحنيات الستاتيكية و الديناميكية للانتقال الشاقولي- القوة الشاقولية في العمود، بينما يظهر الشكل (14) منحنيات الانتقال الشاقولي للعمود -القوة المحورية في الجانز.



الشكل (13) : مقارنة المنحنيات الستاتيكية و الديناميكية (الانتقال الشاقولي- القوة الشاقولية في العمود)



الشكل (14) : مقارنة المنحنيات الستاتيكية و الديناميكية (الانتقال الشاقولي للعمود -القوة المحورية في الجانز)

تجب الإشارة هنا إلى أن كل نقطة من منحنيات الاستجابة الديناميكية انتقال-قوة تمثل الحمولة الشاقولية الابتدائية في العمود $P_{C,ini}$ والانتقال الشاقولي الديناميكي الأعظمي $d_{C,max}$ الناتج عن تفريغ هذه الحمولة، وتمثل كل نقطة من منحنيات الاستجابة الديناميكية انتقال-قوة محورية في الجائز الانتقال الشاقولي الديناميكي الأعظمي المذكور والقوة المحورية الموافقة له في الجائز، بينما تمثل منحنيات الاستجابة الستاتيكية كامل السجلات حمولة-انتقال تحت تحميل ستاتيكي. يلخص الجدول (2) مقارنة بين النتائج العددية القصوى تحت حمولات ستاتيكية و ديناميكية.

القوة المحورية الأعظمية في الجائز (kN)		القدرة الدورانية (Rad)		الانتقال الشاقولي الأعظمي للعמוד (mm)		المقاومة (kN)	
ديناميكية	ستاتيكية	ديناميكية	ستاتيكية	ديناميكي	ستاتيكي	ديناميكية	ستاتيكية
567.8	561	0.161	0.16	375	373.4	105	192

يظهر الشكل (13) أن الحمولات الستاتيكية أكبر بشكل ملحوظ من الحمولات الديناميكية عند نفس الانتقال. وتبين قيم الجدول (2) أن القدرة الدورانية متقاربة تحت حمولات ديناميكية و ستاتيكية. وكما هو متوقع فإن المقاومة الديناميكية أصغر بشكل ملحوظ من المقاومة الستاتيكية (الجدول 2)، حيث بلغت المقاومة الديناميكية للوصلة المدروسة فقط 55% من مقاومتها الستاتيكية.

يظهر الشكل (14) أن منحنيات الاستجابة الديناميكية للقوى المحورية في الجائز تتبع المنحنيات الستاتيكية بشكل متقارب، وهذا يشير إلى أن تطور القوى المحورية في الجائز مع ازدياد دوران الوصلة هو نفسه تقريبا تحت حمولات ديناميكية وستاتيكية. وهذا منطقي لأن تطور القوى المحورية في الجائز يتعلق بشكل أساسي بتطاول الجائز والوصلة المستقل عن شكل التحميل عموما.

يبين الشكل (14) أيضا أن القوة المحورية الضاغطة في الجائز تتناقص مع ازدياد الانتقال الشاقولي لتتطور فيه قوى شادة عند انتقال شاقولي يزيد عن 150mm وهذا يوافق زاوية دوران تزيد عن 60mrad. في هذه المرحلة يمكن القول أنه تم تطوير فعل الكابل في الجائز حيث تزداد القوة المحورية الشادة في الجائز وصولا إلى انهيار الوصلة. يساهم فعل الكابل في تحسين السعة الحملية الستاتيكية للوصلة بشكل ملحوظ مقارنة مع المقاومة الانعطافية. بيد أن الشكل (13) يظهر أن تأثير فعل الكابل في تحسين السعة الحملية الديناميكية هو أقل أهمية مقارنة مع تأثيره في تحسين السعة الحملية الستاتيكية.

3-4 معاملات التضخيم الديناميكي "Dynamic increased factors (DIFs)"

يوجد العديد من الأبحاث التي اهتمت بدراسة معاملات التضخيم الديناميكي لاستخدامها في التحليل الإنشائي الخاص بالانهيار التدريجي [24, 25]. بشكل عام هناك نمطين من معاملات التضخيم الديناميكي: معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (Force-based DIF) ويرمز له بـ (DIFp) ومعامل التضخيم الديناميكي القائم على الانتقال (Displacement-based DIF) ويرمز له بـ (DIFu).

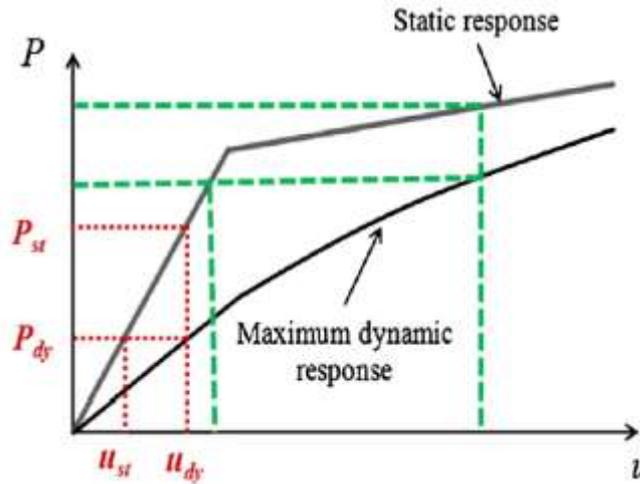
وفقا لـ Biggs [22]، يعرف معامل التضخيم الديناميكي القائم على الانتقال (DIFu) بالعلاقة (1):

$$DIF_U = \frac{u_{dy}}{u_{st}} \quad (1)$$

حيث u_{dy} هو الانتقال الديناميكي الأعظمي و u_{st} هو الانتقال الستاتيكي لنظام مرن بدرجة حرية واحدة (SDOF) تحت حمولة معطاة $P = P_{dy}$ (الشكل 15). وقد تم تعميم هذا التعريف ليشمل الأنظمة الإنشائية اللاخطية من أجل تحليل المنشآت أثناء الانهيار التدريجي [22]. بيد أنه لا يمكن استخدام معامل التضخيم الديناميكي القائم على الانتقال (DIFu) لحساب مقاومة العناصر الإنشائية عند تصميمها لمقاومة الانهيار التدريجي. لذلك يعتبر معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) مفيداً جداً في التصميم ويعرف بالعلاقة (2):

$$DIF_p = \frac{P_{st}}{P_{dy}} \quad (2)$$

حيث P_{st} تمثل القوة الستاتيكية و P_{dy} تمثل القوة الديناميكية تحت نفس الانتقال (الشكل 15).



الشكل (15) : تعريف معاملات التضخيم الديناميكي DIFp و DIFu [21]

يمكن استخدام معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) لتحويل السعة الحملية الستاتيكية إلى مقاومة ديناميكية مكافئة باستخدام العلاقة (3):

$$P_{dy} = \frac{P_{st}}{DIF_p} \quad (3)$$

من المعروف أنه تحت سيناريو فقدان فجائي لعمود و من أجل نظام مرن يكون معامل التضخيم الديناميكي DIFp و DIFu متماثلان ويساويان 2 ($DIF_p = DIF_U = 2$) [21]. ولكن عندما تكون استجابة المنشأ المتبقي بعد إزالة العمود غير مرنة فيمكن أن تختلف قيم معاملات التضخيم الديناميكي عن 2.

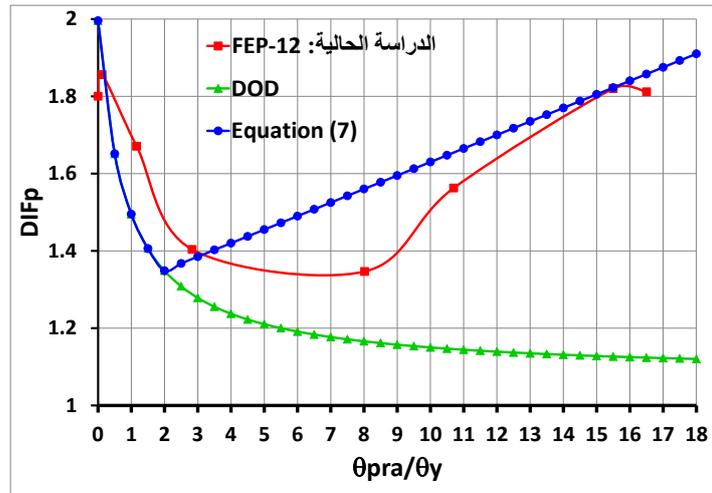
قام الباحث Tsai [26] بدراسة معاملات التضخيم الديناميكي القائمة على القوة وعلى الانتقال من أجل أنظمة غير مرنة بدرجة حرية واحدة (SDOF)، وقد أشارت نتائج الباحث إلى أنه من أجل منشأ مرن-لن تتخضع قيمة معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) من 2 إلى حوالي 1 مع ازدياد مطاوعة المنشأ. بينما يتغير معامل التضخيم الديناميكي القائم على الانتقال (DIFu) من 2 إلى ∞ مع ازدياد الحمولة المطبقة. من جانب آخر يوصي

الدليل التصميمي DOD2013 [6] باستخدام معامل التضخيم الديناميكي (DIFp) المعطى بالعلاقة (4) من أجل المنشآت الفولاذية:

$$DIF_p = 1.08 + \frac{0.76}{\frac{\theta_{pra}}{\theta_y} + 0.83} \quad (4)$$

حيث θ_y, θ_{pra} تمثل على الترتيب زاوية الدوران اللدن وزاوية الدوران عند خضوع النظام الإنشائي المدروس. يمكن أن نرى من العلاقة (4) أن معامل التضخيم الديناميكي (DIFp) كما هو معطى في DOD2013 [7] يتناقص أيضا من 2 إلى حوالي 1 مع ازدياد مطاوعة المنشأ، وهذا يتلاقى مع نتائج Tsai [26]. بيد أن أبحاث Tsai [26] و معطيات DOD2013 [7] لا تأخذ بعين الاعتبار تأثير فعل الكابل (catenary action) عند حساب معاملات التضخيم الديناميكي.

سنهتم فيما يأتي فقط بمعامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) نظرا لأهميته التصميمية. استنادا إلى الاستجابات الديناميكية و الستاتيكية التي تم الحصول عليها وباستخدام العلاقة (2) تم حساب قيم المعامل DIFp للنموذج العددي المدروس (الشكل 16). تمت مقارنة القيم المحسوبة من النماذج العددية (المنحنيات المسماة "الدراسة الحالية" على الشكل 16) مع القيم المحسوبة وفقا لمعطيات DOD2013 [6] (العلاقة 4) كما يظهر الشكل (16).



الشكل (16) : معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp)

يمثل المحور الافقي على الشكل (16) النسبة θ_{pra} / θ_y ، وقد تم تعريف θ_y, θ_{pra} أعلاه. تحسب زاوية الدوران اللدن θ_{pra} بالعلاقة (5):

$$\theta_{pra} = \theta - \theta_y \quad (5)$$

حيث θ تمثل زاوية الدوران الكلي ويتم الحصول عليها بتقسيم الانزياح الشاقولي للعمود على مجاز الجائز، ويتم حساب θ_y بنفس الأسلوب ولكن بأخذ الانزياح الشاقولي الموافق لبدء خضوع النظام الإنشائي المدروس.

يظهر الشكل (16) تمايزا ملحوظا بين القيم الناتجة باستخدام النماذج العددية والقيم الناتجة باستخدام توصيات DOD2013 [7] (العلاقة 4)، ويكون هذا التمايز أكثر وضوحا من أجل قيم كبيرة لـ θ_{pra} / θ_y . يظهر الشكل (16) أن قيم (DIFp) الموصى بها من قبل DOD2013 [7] تبدأ بقيمة تساوي 2 من أجل نظام إنشائي مرن ($\theta_{pra} / \theta_y = 0$)، ثم تبدأ بالتناقص مع تلدن المنشأ وازدياد المطاوعة لتبلغ قيمة تساوي حوالي 1.1 عند انهيار الوصلة.

نجد نتيجة مختلفة عند النظر إلى قيم (DIFp) التي تم الحصول عليها بتطبيق العلاقة (2) على الاستجابات الديناميكية والستاتيكية الناتجة باستخدام النماذج العددية (المنحنيات المسماة "الدراسة الحالية" على الشكل 16). كما يظهر الشكل (16) تنخفض قيم معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) من قيمة قريبة من 2 إلى حوالي 1.4 مع ازدياد المطاوعة وذلك عندما تعمل الوصلة بشكل أساسي على الانعطاف، أي قبل تطور قوى الشد المرافقة لفعال الكابل في الجائز ($\theta < 70mrad$). مع تطور فعل الكابل في الجائز، تعود قيم (DIFp) للتزايد تدريجيا لتصل عند انهيار الوصلة إلى حوالي 1.82.

إن الأسباب الرئيسية لهذا الاختلاف بين قيم (DIFp) المستنتجة في هذا البحث باستخدام العلاقة (2) والقيم المحسوبة وفق توصيات DOD2013 [7] يعود إلى أن هذه الأخيرة مستنتجة من دراسات زلزالية وليس من دراسة الانهيار التدريجي، كما لا تأخذ توصيات DOD2013 [7] فعل الكابل الذي يتطور في الجوائز بعين الاعتبار [23]. حيث لاحظنا أن فعل الكابل يزيد بشكل ملحوظ السعة الحملية الستاتيكية بينما لا يساهم بنفس الدرجة في تحسين السعة الحملية الديناميكية، وهذا يؤدي إلى زيادة معامل التضخم الديناميكي (DIFp) عند الدخول في مرحلة العمل الكابلي. تؤكد هذه النتيجة ضرورة أخذ فعل الكابل بعين الاعتبار عند حساب معاملات التضخيم الديناميكي للمنشآت المعرضة للانهيار التدريجي.

استنادا إلى الشكل (16)، يمكن القول أن العلاقة (4) الموصى بها في DOD2013 [7] تعطي نتائج مقاربة مع النتائج التي تم الحصول عليها بتطبيق العلاقة (2) على الاستجابات الديناميكية و الستاتيكية وذلك في مرحلة السلوك الانعطافي قبل تطور فعل الكابل في الجوائز ($\theta_{pra} / \theta_y \leq 2$). وبالتالي يمكن الاستمرار بتطبيق توصيات DOD2013 [7] في مرحلة السلوك الانعطافي. مع ازدياد دوران الوصلة ($\theta_{pra} / \theta_y > 2$) و تطور فعل الكابل في الجوائز يصبح التمايز واضحا بين القيم الناتجة باستخدام العلاقة (2) والقيم الناتجة باستخدام توصيات DOD2013 [7] (العلاقة 4).

بناء على هذه الملاحظات وضعنا علاقة مبسطة تسمح بحساب معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) من أجل ($\theta_{pra} / \theta_y > 2$) للوصلات جازز-عمود بصفحة جبهية غير بارزة، وقد تم التركيز فقط على المقاومة القصوى للوصلة عند تطوير هذه العلاقة، حيث وضعنا العلاقة الخطية (6) من أجل ($\theta_{pra} / \theta_y > 2$) وتمت معايرة ثوابتها باستخدام قيم معامل التضخيم الديناميكي المحسوبة عند انهيار الوصلة المدروسة (الشكل 16).

$$DIF_p = 1.35 + 0.035 \left(\frac{\theta_{pra}}{\theta_y} - 2 \right) \quad \text{for} \quad \frac{\theta_{pra}}{\theta_y} > 2 \quad (6)$$

كنتيجة نهائية يمكن حساب معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) للوصلات جازز-عمود المنفذة بالبراغي وصفحة جبهية غير بارزة باستخدام العلاقة (7) الموضحة بيانيا على الشكل (16).

$$\left(\begin{array}{l} DIF_p = 1.08 + \frac{0.76}{\frac{\theta_{pra}}{\theta_y} + 0.83} \quad \text{for} \quad \frac{\theta_{pra}}{\theta_y} \leq 2 \\ DIF_p = 1.35 + 0.035 \left(\frac{\theta_{pra}}{\theta_y} - 2 \right) \quad \text{for} \quad \frac{\theta_{pra}}{\theta_y} > 2 \end{array} \right) \quad (7)$$

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث إنجاز دراسة تحليلية باستخدام نموذج ميكانيكي (mechanical model) تم إنشاؤه باستخدام برنامج العناصر المنتهية ABAQUS لدراسة السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة أثناء الانهيار التدريجي. نلخص فيما يلي أهم النتائج التي توصلنا إليها في هذا البحث:
- من أجل الوصلات بصفيحة جبهية غير بارزة، يمكن إهمال تأثير زمن تفريغ حمولة العمود إذا كان لا يزيد عن عشر الدور الطبيعي ($t_r / T \leq 0.1$) لنظام المنشأ المتبقي بعد إزالة العمود.
 - مقاومة الوصلة تحت حمولة ديناميكية هي أقل بشكل ملحوظ من مقاومتها تحت حمولة ستاتيكية، حيث بلغت المقاومة الديناميكية للوصلة المدروسة فقط 55% من مقاومتها الستاتيكية.
 - تطور القوى المحورية في الجائز مع ازدياد دوران الوصلة متشابه تحت حمولات ديناميكية وستاتيكية.
 - تأثير فعل الكابل في تحسين السعة الحملية الديناميكية هو أقل أهمية مقارنة مع تأثيره في تحسين السعة الحملية الستاتيكية.
 - تعطي توصيات DOD2013 [7] قيما لمعامل التضخيم الديناميكي (DIFp) أصغر من القيم التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة ولا سيما في مرحلة العمل الكابلي.
 - يمكن الاستمرار بتطبيق توصيات DOD2013 [7] لحساب معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) في مرحلة السلوك الانعطافي للوصلة المدروسة من أجل $(\theta_{pra} / \theta_y \leq 2)$.
 - تم وضع علاقة خطية مبسطة لحساب معامل التضخيم الديناميكي (DIFp) عند خضوع الوصلة المدروسة لدوران كبير بعد تطور فعل الكابل في الجوائز $(\theta_{pra} / \theta_y > 2)$.
- وبناء على دراستنا نوصي بما يلي
- استخدام العلاقة (7) المطورة في هذا البحث لحساب معامل التضخيم الديناميكي القائم على القوة (DIFp) من أجل الوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية غير بارزة.
 - دراسة السلوك الديناميكي للوصلات الفولاذية جائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح جبهية بارزة أثناء الانهيار التدريجي بهدف تعميم العلاقة (7) من أجل هذا النمط من الوصلات.

References:

- [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, 83p

- [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, 302P.
- [5] Office of the Deputy Prime Minister, The Building Regulations 2000 part A. London, UK,.
- [6] EN 1991-1-7, Actions on Structures - Part 1-7: General Actions -Accidental Action, Brussels, 2006 - 69p.
- [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, 2003,119p.
- [9] C. Liu, K.H. Tan, et al., Dynamic behaviour of web cleat connections subjected to sudden column removal scenario, Journal of Constructional Steel Research 86 ,2013,92-106.
- [10] Qiuni Fu, Bo Yang, Ying Hu, et al., Dynamic analyses of bolted-angle steel joints against progressive collapse based on component-based model, Journal of Constructional Steel Research 117,2016, 161-174.
- [11] B. Yang, K.H. Tan, Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: experimental tests of beam-column joints and development of component-based models, J. Struct. Eng. ASCE 139 (9) ,2013, 1498-1514.
- [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, Engineering Structures, Vol. 54, 2013,112-130.
- [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] LI,H Modeling, Behavior and Design of Collapse-Resistant Steel Frame Buildings. PHD thesis,University of Michigan,- Ann Arbor, , 2013, 232p.
- [16] A.A. Del Savio, Generalised component-based model for beam-to column connections including axial versus moment interaction, Journal of Constructional Steel Research 65 ,2009, 1876_1895
- [17] L. Simões da Silva, L.R.O. Lima, P.C.G.S. Vellasco, S.A.L. Andrade, Behaviour of flush end-plate beam-to-column joints under bending and axial force, Steel Compos. Struct. 4 (2) ,2004, 77-94.
- [18] de Lima LRO. Behaviour of endplate beam-to-column joints under bending and axial force. Ph.D. thesis. Rio de Janeiro (Brazil): PUC-Rio, Pontifical Catholic University, Civil Eng. Dept., 2003,122-140.
- [19] ALHAJ, K, Development of mechanical model to analyze Steel Bolted flush End Plate Beam-to-Column Joints during Progressive Collapse.magazine of Tishreen University, Syria, 2019, vol 41, 295-314.
- [20] EN 1993-1-8, - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, Brussels, 2005, 135p.
- [21] Chang Liu, Kang Hai Tan, Tat Ching Fung .Dynamic behaviour of web cleat connections subjected to sudden column removal scenario. J. Constr. Steel Res. 2013, 86, 92-106.
- [22] Biggs, J. M.. Introduction to structural dynamics, MacGraw-Hill, New York,1964,67-90.

- [23] Qiuni Fu, Bo Yang, Ying Hu, Gang Xiong, Shidong Nie, Weifu Zhang, Guoxin Dai (2016). Dynamic analyses of bolted-angle steel joints against progressive collapse based on component-based model. *J. Constr. Steel Res.*, 117, 161–174.
- [24] Ruth, P., Marchand, K. A., and Williamson, E. B. “Static equivalency in progressive collapse alternate path analysis: Reducing conservatism while retaining structural integrity.” *J. Perform. Constr. Facil.*, 10.1061/(ASCE)0887-2006, 349–364.
- [25] Tsai, M. H., and Lin, B. H.. “Dynamic amplification factor for progressive collapse resistance analysis of a RC building.” *Struct. Des. Tall Spec. Build*, 2009, 539–557.
- [26] TsaiMH. An analytical methodology for the dynamic amplification factor in progressive collapse evaluation of building structures. *Mech Res Commun*,2010; 37-61.