

تطوير نموذج عددي للتنبؤ بسلوك عقد جوائز-عمود فولاذية منفذة بالبراغي وصفائح النهاية الممتدة

د. سامر ساحللي* م. محمد برهوم**

ملخص

إن العقد على اختلاف أنواعها عنصر مهم في المنشآت المعدنية، حيث أنها تلعب دور صلة الوصل بين العناصر الإنشائية المختلفة وتؤمن انتقال الأحمال بشكل آمن فيما بينها. تُصنّف العقد حسب عدة معايير؛ مكان وجودها في المنشأ، صلابتها، ومقاومتها، وذلك يجعل من الممكن دراسة سلوك كل صنف ودراسة المعايير المؤثرة على سلوكه باستخدام الطرق التحليلية أو التجريبية أو العددية.

يقدم هذا البحث تطوير نموذج عددي، تم إنشاؤه باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعتمد التحليل بالعناصر المنتهية، من أجل التنبؤ بسلوك عقد جوائز-عمود فولاذية منفذة بالبراغي وصفائح النهاية الممتدة. تمت معايرة النموذج استناداً إلى تجارب مخبرية أجريت في أبحاث مرجعية. تم تقييم سلوك العقد بالاعتماد على مخططات عزم-دوران استنتج منها قيم العزوم اللدنة والصلابة البدئية والصلابة في مرحلة ما بعد اللدونة.

أظهر النموذج المقترح دقة جيدة في التنبؤ بأنماط الانهيار وقيم العزم اللدن للعقد المدروسة، إضافة لتقييم الصلابة البدئية والصلابة في مرحلة ما بعد اللدونة، ما يجعله صالحاً للاستخدام لاحقاً في دراسة البارامترات المؤثرة على سلوك عقد جوائز-عمود المنفذة بالبراغي وصفائح النهاية.

الكلمات المفتاحية: عقد جوائز عمود معدنية، عقد المحور الضعيف، وصلات صفيحة النهاية، محاكاة حاسوبية، أباكوس.

* دكتور في قسم الهندسة الإنشائية في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين (اللاذقية - سوريا).

** طالب دراسات عليا (ماجستير) في قسم الهندسة الإنشائية في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين (اللاذقية - سوريا).

1- مقدمة:

تحظى العقد في المنشآت الهندسية بأهمية خاصة، نظراً لأنها تصل بين العناصر الإنشائية المختلفة وتنتقل الحمولات فيما بينها حيث أن فشلها يعني فشل العناصر الإنشائية المرتبطة بها، وهذا يهدد سلامة المنشأ. في المنشآت المعدنية، يمكن تصنيف الوصلات في مناطق العقد حسب نوع العناصر التي تصل بينها؛ حيث توجد وصلات استمرار تصل بين عناصر متماثلة الوظيفة والاتجاه (وصلة جأز-جأز)، ووصلات تصل بين عناصر مختلفة الوظيفة والاتجاه (وصلة جأز-عمود)، إضافة لوصلات تصل بين عناصر مختلفة الطبيعة (قاعدة عمود). عند الحديث عن وصلات جأز-عمود، فإن الخواص الأهم لها هي الصلابة البدئية ($S_{j,ini}$) والمقاومة ($M_{j,Rd}$) والقدرة على الدوران ($\phi_{j,max}$). يمكن تحديد هذه الخواص بالاعتماد على ثلاث طرق رئيسية [1]: الطريقة التجريبية (Experimental Method) عبر اختبار عينات حقيقية، الطريقة التحليلية (Analytical Method) التي تعتمد نماذج ميكانيكية مثل طريقة المركبات في الكود الأوروبي EC3-1-8، والطريقة العددية (Numerical Method) التي تعتمد على برامج التحليل بالعناصر المنتهية. في حين أن الطريقة الأولى هي الأكثر دقة، إلا أنها مكلفة جداً مما يمنع استخدامها بشكل واسع. تقدم الطريقة الثانية حلاً جيداً بين الدقة والكلفة. أخيراً، تقدم المنهجية العددية حلاً مقبولاً يجمع بين الدقة والكلفة إضافة للقدرة على معالجة تركيبات معقدة (Complex Configurations) قد تكون غير مغطاة في الطرق التحليلية الموجودة في الكودات. تستند الطريقة العددية على معايرة نماذج عددية بناءً على نتائج تجارب مخبرية، ومن ثم استخدام تلك النماذج لدراسة بارامترات وتركيبات مختلفة للعينات المدروسة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر الفهم الأفضل لسلوك عقد جأز-عمود مهماً من أجل وضع تصاميم أكثر كفاءة وأقل كلفة للمنشآت المعدنية الإطارية. لكن نظراً للكلفة الكبيرة المرافقة للتجارب المخبرية، تُعدّ النماذج الحاسوبية حلاً يجمع بين الكلفة المنخفضة والدقة الجيدة من أجل دراسة عدد كبير من العينات. يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج عددي قادر على التنبؤ بسلوك وصلات جأز-عمود باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعتمد في التحليل على طريقة العناصر المنتهية (Finite-Element Method) أو FEM اختصاراً.

3- منهجية البحث:

بغية معايرة النموذج، ستجري مقارنة بين مخططات العزم-دوران (Moment Rotation Curves, $M-\theta$) المحسوبة بناءً على نتائج البرنامج ونتائج المخططات التجريبية التي تم الحصول عليها من دراسة تجريبية أجراها Costa et al. [3] في جامعة Coimbra في البرتغال.

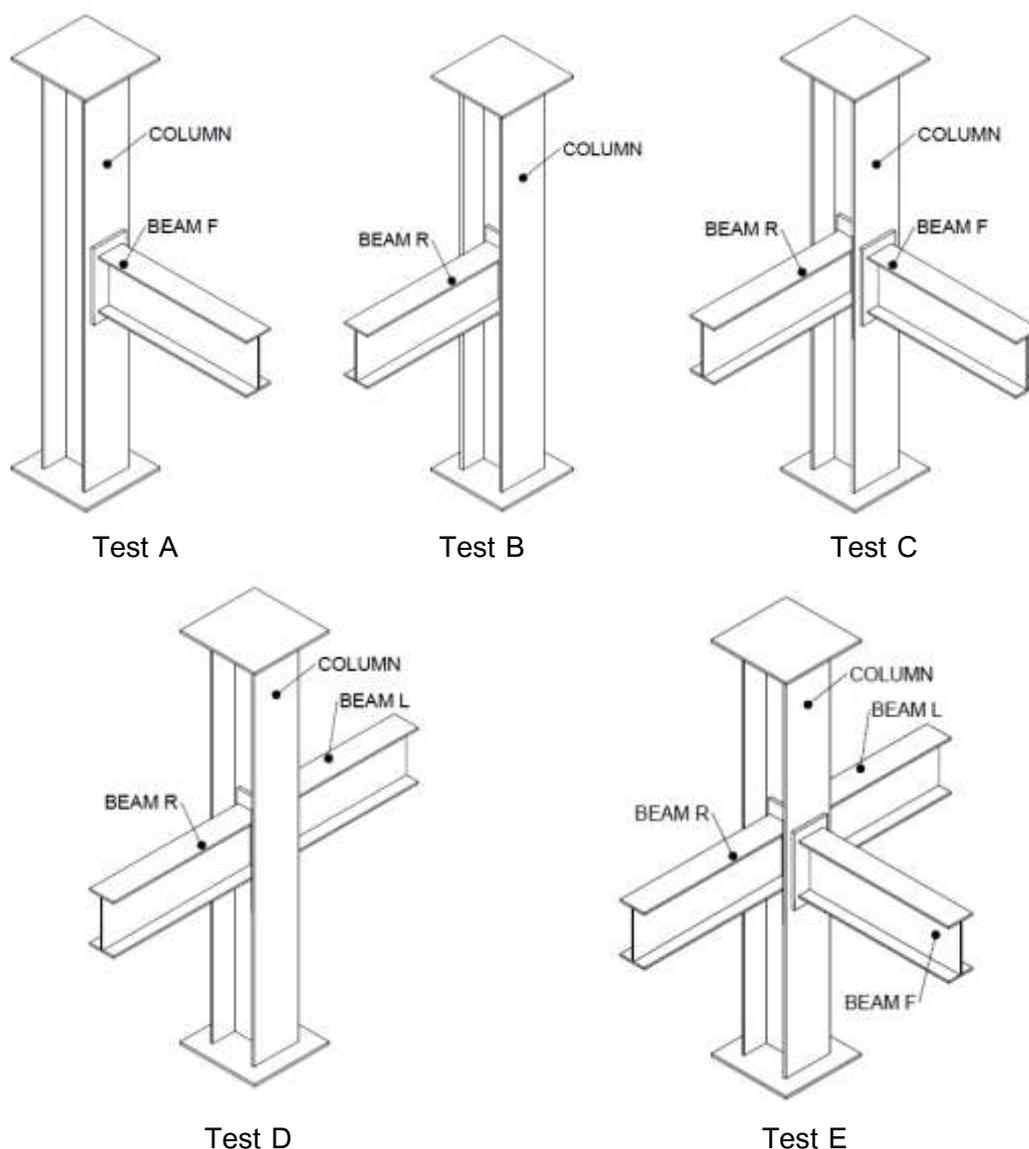
4- طريقة البحث:

سيتم في هذا القسم استعراض التجارب المخبرية المعتمدة، وتقديم شرح مفصل لخطوات إنشاء النموذج الحاسوبي.

1-4 وصف التجارب المخبرية:

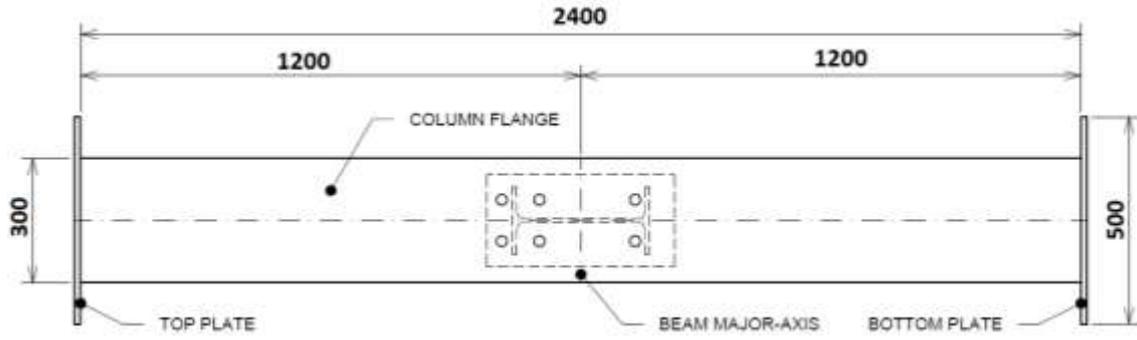
ضمّت التجارب التي أجراها [3] Costa et al. (2019) خمس عينات من العقد وهي موضحة في الشكل (1). العناصر التي تتألف منها هذه العقد هي كالآتي:

العمود: مقطع HEA 300، الجوائز (ظرفية): مقاطع IPE 330، صفائح نهاية بسماكة 20 مم لوصل الجوائز إلى العمود، تختلف أبعاد الصفائح بين المحورين القوي والضعيف (الرئيسي والثانوي). تم وصل الصفائح إلى العمود باستخدام 6 براغي M24 عالية المقاومة Class 10.9. صنف الفولاذ المستخدم في العناصر الإنشائية هو S355.

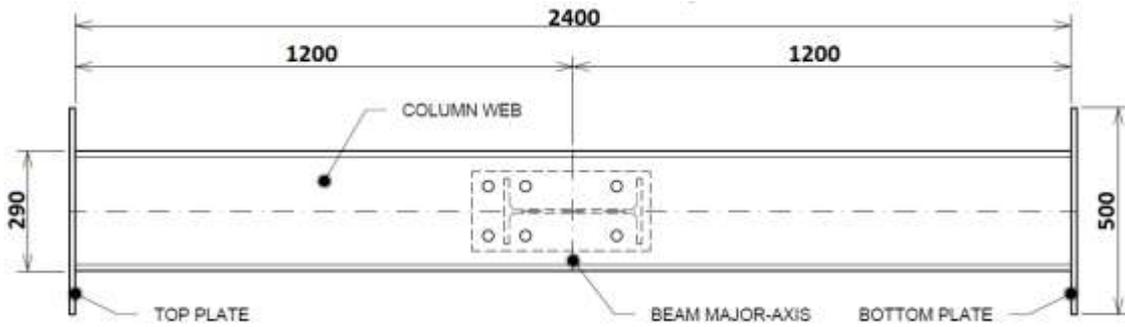


شكل 1 - التجارب المخبرية وفق [3] Costa et al.

تبين الأشكال (2-4) أبعاد العمود والجوائز و صفائح النهاية. (جميع الأبعاد بالمليمتر).

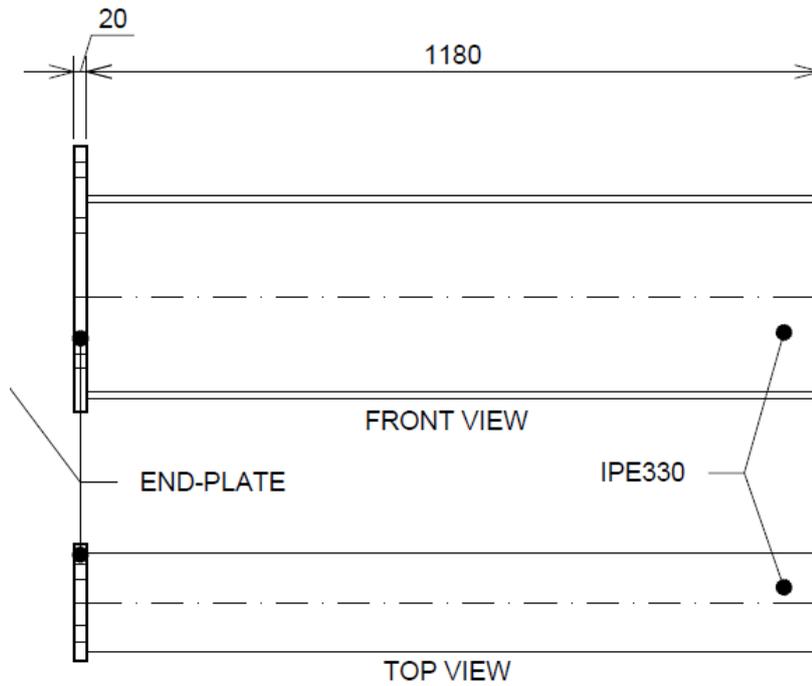


أ- مقطع أمامي للعمود

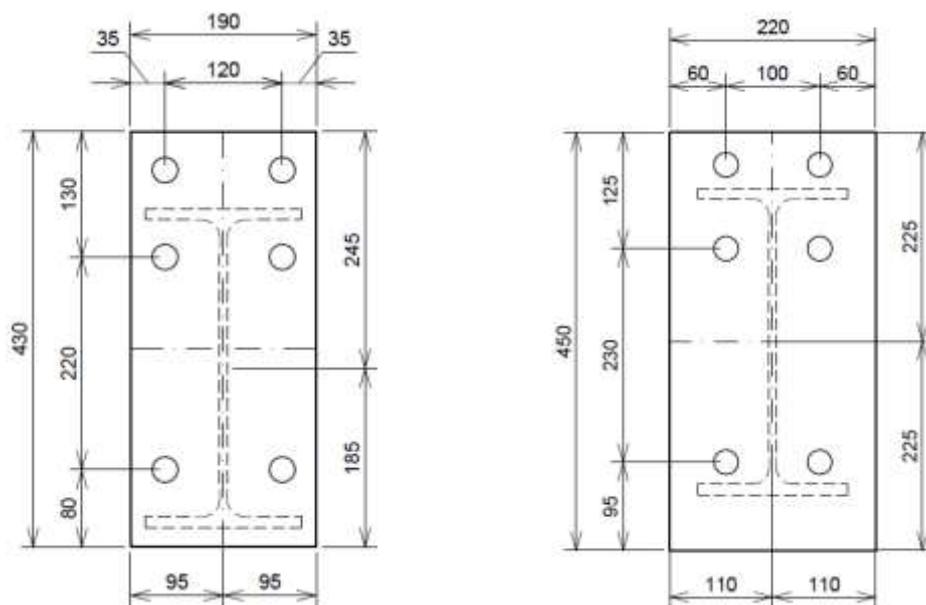


ب- مقطع جانبي للعمود

شكل 2 - التفاصيل الهندسية للعمود [3]



شكل 3 - التفاصيل الهندسية للجائز [3]



ب - صفحة النهاية في المحور الضعيف

أ - صفحة النهاية في المحور القوي

شكل 4 - التفاصيل الهندسية لصفائح النهاية [3]

2-4-2 النموذج العددي:

تم اعتماد برنامج ABAQUS من أجل تطوير نموذج عددي ثلاثي الأبعاد لمحاكاة سلوك عقدة منفذة بصفائح النهاية والبراغي تحت تأثير حمولة شبه ستاتيكية (quasi-static) متزايدة بانتظام مطبقة على الجائز. من أجل معايرة النموذج المقترح، سيتم مقارنة النتائج الحاسوبية مع نتائج 5 تجارب أجراها (Costa et al. (2019).

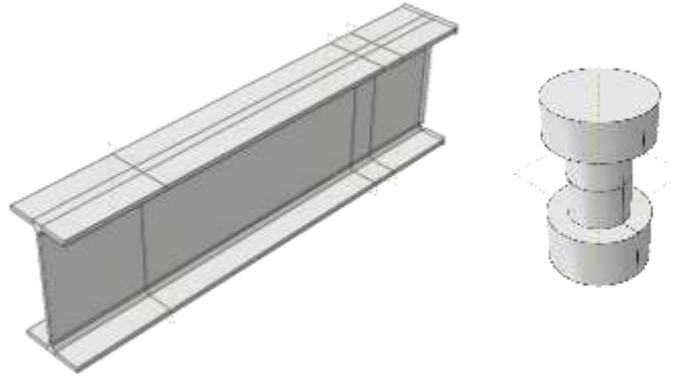
استخدمت عناصر ثلاثية الأبعاد بثماني عقد من النوع (C3D8R) لنمذجة جميع العناصر في النموذج. بُني هذا الاختيار على كفاءة هذا النوع من العناصر في مسائل النمذجة التي يعالجها هذا البحث [4]. نظراً لأن هذا النوع من العناصر لا يملك درجات حرية دورانية، تم استخدام 3 عناصر على طول سماكة الصفائح المعدنية المعرضة لعزوم الانعطاف من أجل الحصول على نتائج دقيقة [9].

1-2-4 نمذجة العناصر:

بغية تبسيط عملية النمذجة واختصار وقت التحليل، تم الاستعاضة عن الاستدارة (fillet) في مقطعي الجائز والعمود بخطوط مستقيمة، كما تمت نمذجة البراغي بشكل أجزاء أسطوانية. الشكل (5).

2-2-4 نمذجة المواد:

من أجل نمذجة سلوك الفولاذ في المرحلة اللدنة، يجب إدخال قيم الإجهاد الحقيقية (true stress) وقيم الانفعال الحقيقية اللدنة (true plastic strain) في برنامج ABAQUS [5]. يتم الحصول على قيم الإجهاد الحقيقي وقيم الانفعال اللدنة ϵ_{pl} حسب العلاقات (1-4). حيث يشير ϵ_t للانفعال الحقيقي، σ_t للإجهاد الحقيقي، σ_e و ϵ_e للإجهاد والانفعال الهندسي (Engineering stress and strain) على التوالي، E_t معامل يونغ الحقيقي (True Young Modulus).



شكل 5- منظور ثلاثي الأبعاد لنموذجي الجانز والبرغي

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_t} \quad (3)$$

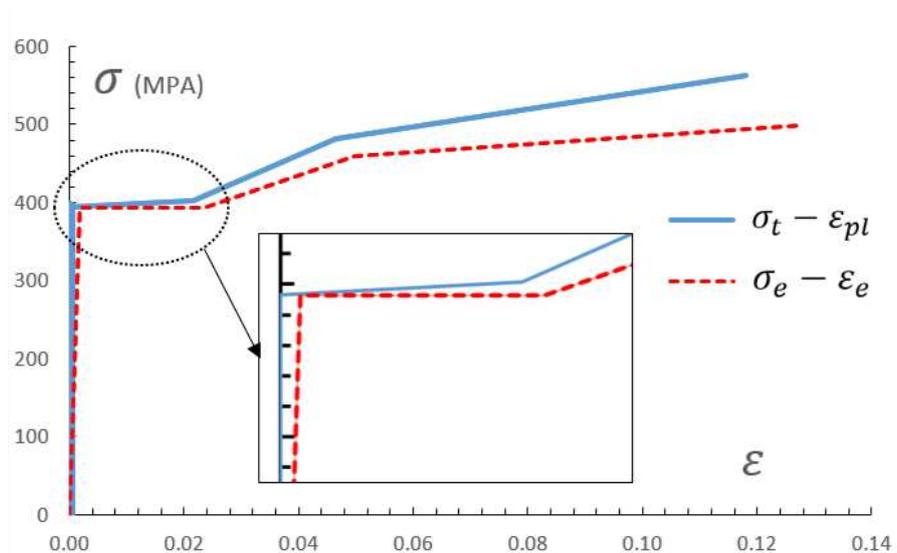
$$E_t = \frac{\sigma_{y,true}}{\varepsilon_{y,true}} \quad (4)$$

يتم حساب الانفعال اللدن اللازم إدخاله في ABAQUS المشار إليه بالعلاقة (3) عبر طرح المركبة المرنة المعبر عنها بالكسر $\frac{\sigma_t}{E_t}$ من قيمة الانفعال الحقيقي الإجمالي ε_t عند كل قيمة إجهاد σ_t .

مخطط الإجهاد-انفعال للفولاذ لجميع العناصر عدا البراغي هو مخطط رباعي الخطية (Quad-linear curve). تم اختيار هذا المخطط وحساب القيم الخاصة به بناء على توصيات Yun et al. [6]. يوضح الشكل (6) مخططات الإجهاد الهندسية، الحقيقية، والحقيقية اللدنة. القيم موضحة تفصيلاً في الجدول (1).

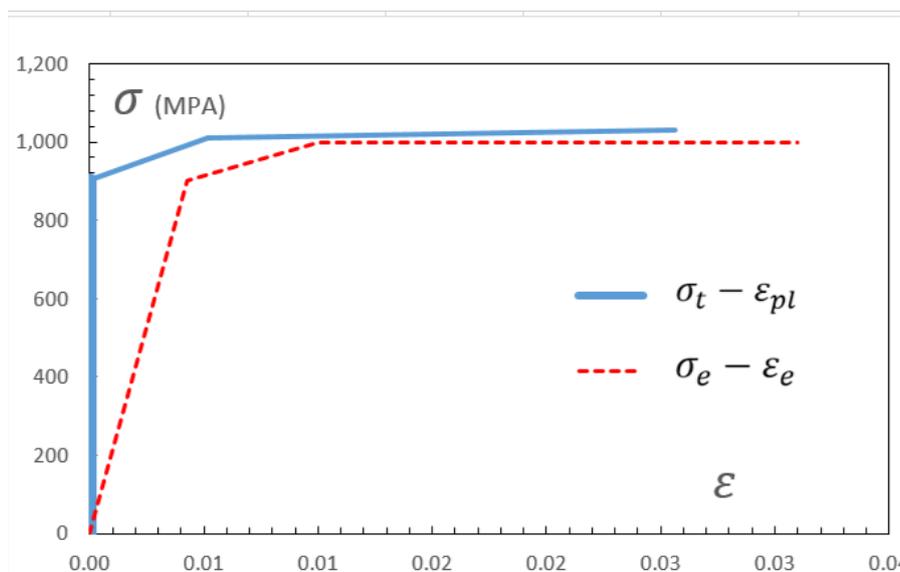
جدول 1 - خصائص الفولاذ المستخدم في العناصر الإنشائية

Property	E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ε_y [-]	ε_u [-]
Engineering (SSA)	216386.6	392.470	499.046	0.00181	0.12814
True	216975.6	393.182	562.992	0.00181	0.12057
True plastic	—	393.182	562.992	0.00000	0.11797
Nominal	210000.0	355.000	490.000	0.00169	0.16531



شكل 6- مخططات الإجهاد-انفعال لفولاذ العناصر

بالنسبة للبراعي، تم اعتماد مخطط ثلاثي الخطية (Tri-linear curve) كما هو موضح في الشكل (7).



شكل 7- مخططات إجهاد-انفعال لفولاذ البراعي

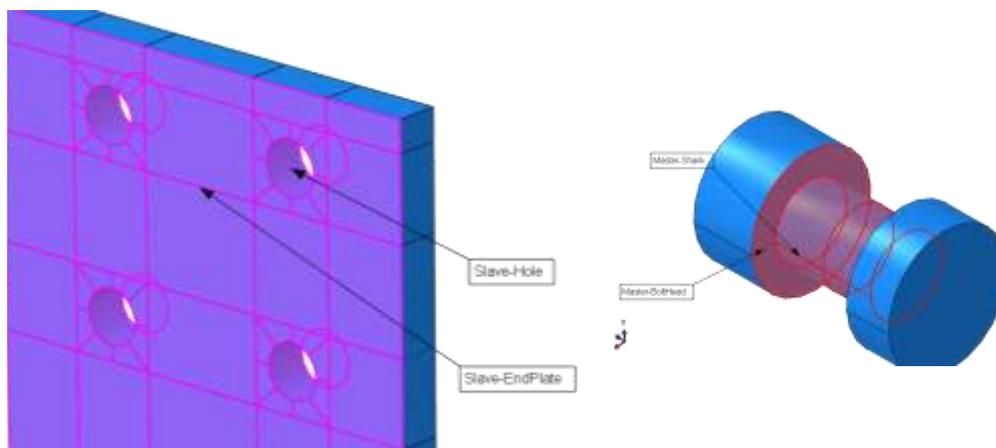
3-2-4 نمذجة مناطق الاتصال:

تُعدّ نمذجة مناطق الاتصال (Contacts) المرحلة الأكثر صعوبة وأهمية في مراحل إنشاء النموذج العددي للعقدة المعدنية، فمع وجود نقاط اتصال كثيرة بين البراعي والصفائح، يمكن لأي خطأ في نمذجة مناطق الاتصال أن يؤدي للحصول على نتائج غير واقعية من النموذج. من أجل هذا الغرض، تم استخدام خاصيتين اثنتين لمناطق الاتصال (Interaction Properties)، وهما خاصية الاتصال الناظمي (Normal Contact) وخاصية الاتصال المماسي (Tangential Contact) مع معامل احتكاك قيمته (0.3). تم تعريف السطوح الرئيسية والتابعة (Master & Slave Surfaces) وفق ما هو موضح في الجدول (2).

جدول 2 - اختيار السطوح الرئيسية والتابعة في النموذج العددي

Contact Pair	Master Surface	Slave Surface
Column Flange-End Plate	End plate	Column Flange
Column Web-End Plate	End Plate	Column Web
Bolt Head-End Plate	Bolt Head	End Plate
Bolt Nut-Column Flange	Bolt Head	Column Flange
Bolt Nut-Column Web	Bolt Head	Column Web
Bolt Shank-Bolt Hole	Bolt Hole	Bolt Shank

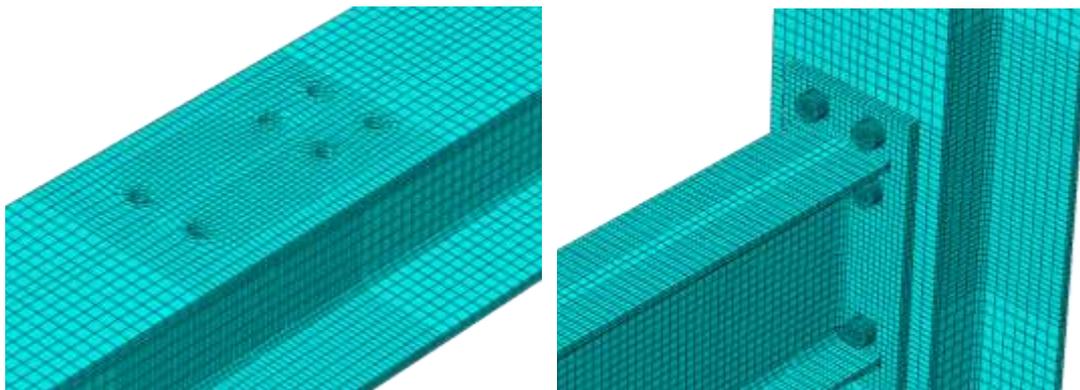
يتم اختيار السطوح الرئيسية والتابعة عادةً بحيث يكون السطح الرئيسي عائداً للعنصر الأصعب (البرغي أصعب من صفيحة النهاية مثلاً)، ويُستحسن أن يكون تقسيمه أصغر (finer) من تقسيم السطح التابع. الاستثناء الوحيد في النموذج هو في زوجي الاتصال (جسد البرغي-السطح الداخلي للثقب) حيث تم اعتماد سطح الثقب الداخلي كسطح رئيس وجسد البرغي كسطح تابع، وهذا بعكس طريقة الاختيار المعتادة. لأنه إن تم اختيار رأس البرغي وجسد البرغي كسطحين رئيسيين ووجه صفيحة النهاية وسطوح الثقوب كسطوح تابعة، ستنبع مشكلة تقاطع سطحين رئيسيين وسطحين تابعين لزوجي اتصال مختلفين وهذا قد يؤدي لمشاكل في التقارب (Convergence of solution). الشكل (8).



شكل 8- تداخل السطوح الرئيسية والثانوية في صفيحة النهاية والبرغي

4-2-4 التقسيم (Mesh):

من أجل الحصول على نتائج مقبولة بأقل وقت تحليل ممكن، تم اختيار أبعاد متباينة للتقسيم تتراوح بين (4-20) مم، حسب أهمية العنصر أو المنطقة وتركيز الإجهادات فيها. يبين الشكل (9) نظرة عامة على تقسيم النموذج.



شكل 9 - التقسيم في النموذج

4-2-5 القيود (Constraints):

تم استخدام نوعين من القيود في النموذج:

(1) قيد الربط (Tie Constraint)، يعمل هذا القيد على دمج درجات الحرية الانسحابية والدورانية للعقد المرتبطة [5]، وقد تم اعتماده في النموذج لأجل ربط العناصر المتصلة باللحام، وربط النقطة التي يحصل عندها التحميل بمقطع الجانز الموافق لمستوي التحميل.

(2) قيد الجسم الصلب (Rigid Body Constraint): تم استخدامه لنمذجة شروط الاستناد في طرفي العمود العلوي والسفلي. تم اختيار هذا النوع نظراً لأن العمود في التجربة المخبرية كان متصلاً بالمفصل عبر قاعدة صلبة يمكن اعتبار سلوكها سلوك جسم صلب.

4-2-6 الشروط الطرفية (Boundary conditions):

وفقاً للتجربة التي أجراها Costa et al.، كان استناد العمود مفصلياً في طرفيه، في كل من المستويين الموافقين للمحور القوي والضعيف لمقطع العمود، بينما كان الجانز حراً دون أي قيود. في النموذج العددي، تم تحديد نقطتين مرجعيتين (Reference Points) عند طرفي العمود وتطبيق الشروط الطرفية عليهما، ومن ثم تم ربطهما بالنموذج باستخدام قيد الجسم الصلب.

4-2-7 التحميل (Loading):

تم تحميل النموذج بالاعتماد على نقاط مرجعية (Reference points) مرتبطة بمقطع الجانز الموافق لمستوي التحميل باستخدام قيد ربط (Tie Constraint). يوضح الجدول (3) تفاصيل الحملات المطبقة على الجوائز في الاختبارات الخمس المختلفة. جميع الحملات مقدرة بـ KN وتم اختيار قيمها لمحاكاة الانهيار. تشير إشارة السالب إلى التحميل باتجاه الأسفل. موضع تطبيق الحمل على الجانز موضح في الشكل (10).

جدول 3 - بروتوكول التحميل في النموذج العددي

اسم العينة	حمولة جانز المحور القوي	حمولة جانز المحور الضعيف الأيسر	حمولة جانز المحور الضعيف الأيمن
Test A	-400	غير مطبقة	غير مطبقة

غير مطبقة	-280	غير مطبقة	Test B
غير مطبقة	-65.5	-400	Test C
-280	60.5	غير مطبقة	Test D
-65.5	60.5	-400	Test E

كانت البراغي في التجارب المخبرية مسبقة الإجهاد، وقد تم تحميلها في البرنامج باستخدام طريقة تعديل الطول (Adjust-Length method). يتم حساب مقدار تعديل الطول اللازم إدخاله في البرنامج ΔL باستخدام العلاقة (5).

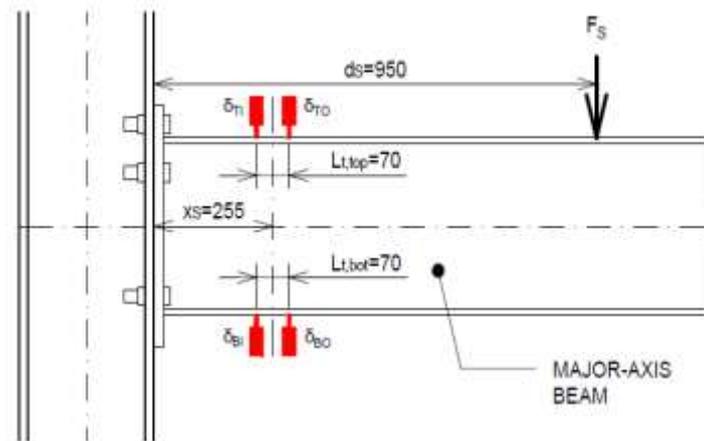
$$\Delta L = \varepsilon L \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{0.7F_{ub}}{E} \quad (6)$$

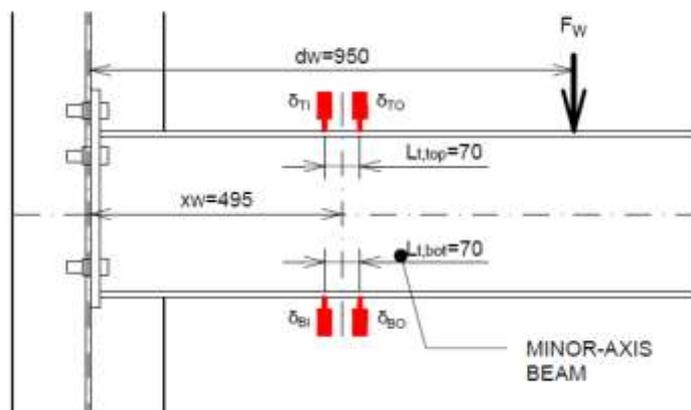
حيث L هي طول جسد البراغي، F_{ub} إجهاد الانقطاع لفولاذ البراغي، و E معامل يونغ.

8-2-4 حساب دوران العقدة:

يظهر الشكلان (10) و(11) تفاصيل التحميل للعقد في المحورين القوي والضعيف ومواقع أجهزة قياس الانفعال (LVDT).



شكل 10 - مواقع تطبيق الحمولة وأجهزة قياس الانفعال في المحور القوي



شكل 11- مواضع تطبيق الحمولة وأجهزة قياس الانفعال في المحور الضعيف

مركبات الدوران التي تم أخذها بعين الاعتبار في هذا البحث هي:

* الدوران الكلي θ_t ، يُحسب وفق العلاقة (7) أو (8) حسب نوع العقدة، محور قوي أو ضعيف.

* الدوران المرن للجائز θ_b ، يحسب وفق العلاقتين (9) أو (10).

* الدوران المرن للعمود θ_c ، يُحسب وفق العلاقة (11) أو (12). المعطيات الخاصة بالحساب موضحة في الشكل (11).

يتم حساب دوران العقدة عبر طرح قيمتي الدوران المرن للجائز والعمود من قيمة الدوران الكلي، علاقة (13).

$$\theta_{t,S} = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\delta_{T0} - \delta_{T1}}{L_{t,top}} \right) + \arctan \left(\frac{\delta_{B0} - \delta_{B1}}{L_{t,bot}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\theta_{t,W} = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\delta_{T0} - \delta_{T1}}{L_{t,top}} \right) + \arctan \left(\frac{\delta_{B0} - \delta_{B1}}{L_{t,bot}} \right) \right] \quad (8)$$

$$\theta_{b,S} = \frac{F_S}{EI_{b,S,y}} \left[d_S x_S - \frac{x_S^2}{2} \right] \quad (9)$$

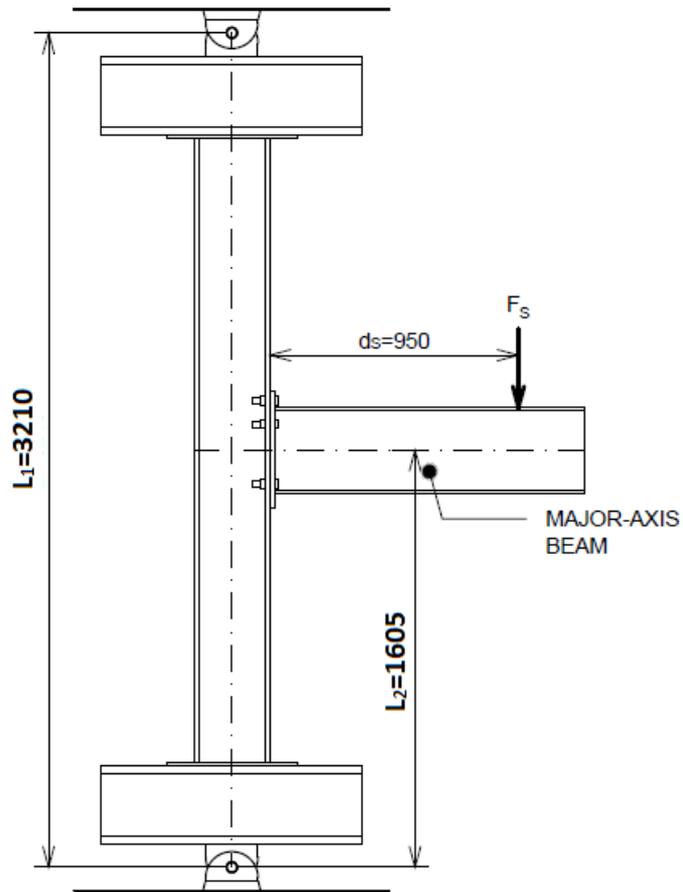
$$\theta_{b,W} = \frac{F_W}{EI_{b,W,y}} \left[d_W x_W - \frac{x_W^2}{2} \right] \quad (10)$$

$$\theta_{c,S} = \frac{F_S d_S}{3EI_{c,S,y} L_1} [L_1^2 - 3L_1 L_2 + 3L_2^2] \quad (11)$$

$$\theta_{c,W} = \frac{F_W d_W}{3EI_{c,W,y} L_1} [L_1^2 - 3L_1 L_2 + 3L_2^2] \quad (12)$$

$$\theta_j = \theta_t - \theta_b - \theta_c \quad (13)$$

يبين الشكل (11) الأبعاد اللازمة للحساب في العلاقات السابقة.

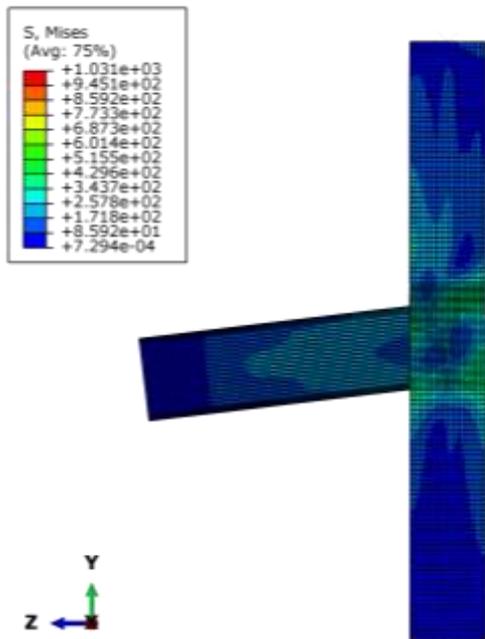


شكل 12- معطيات حساب الدوران المرن للعمود

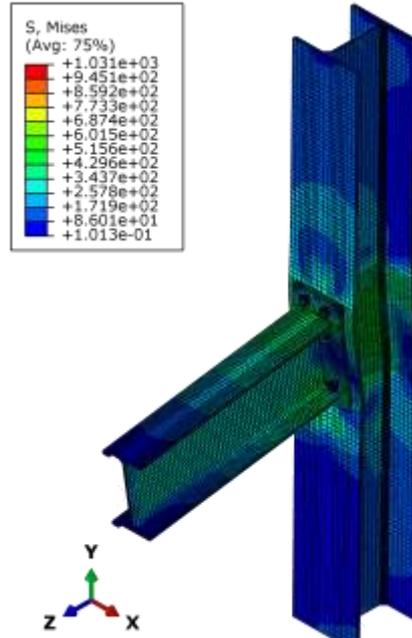
5- النتائج والمناقشة:

1-5 انهيار العينات:

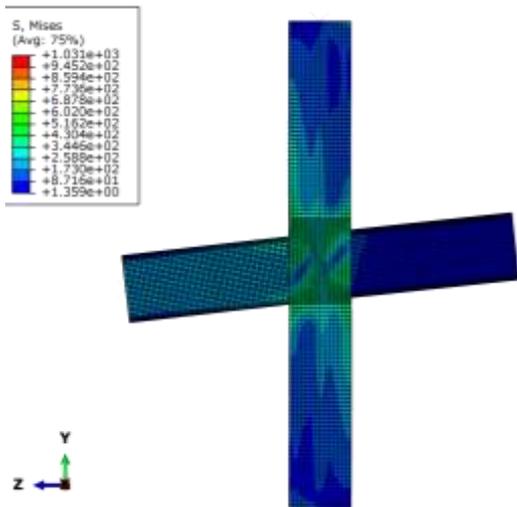
تبين الأشكال (13-17) الاختبارات الحاسوبية الخمسة بعد إجراء التحليل باستخدام ABAQUS.



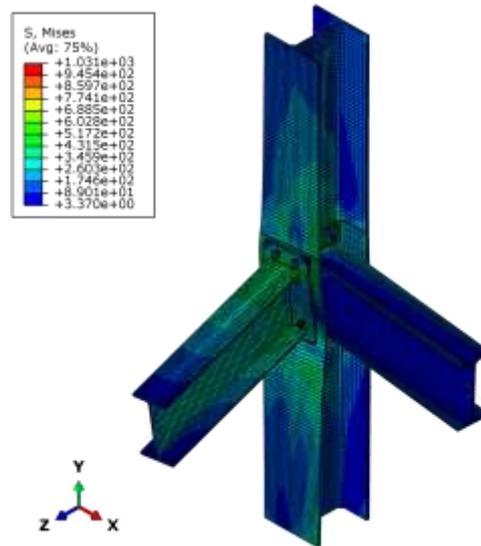
شكل 14 - انهيار النموذج Test NB



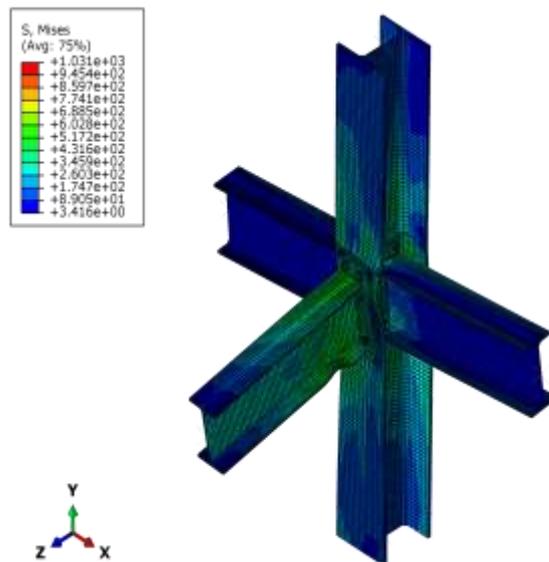
شكل 13 - انهيار النموذج Test NA



شكل 16 - انهيار النموذج Test ND



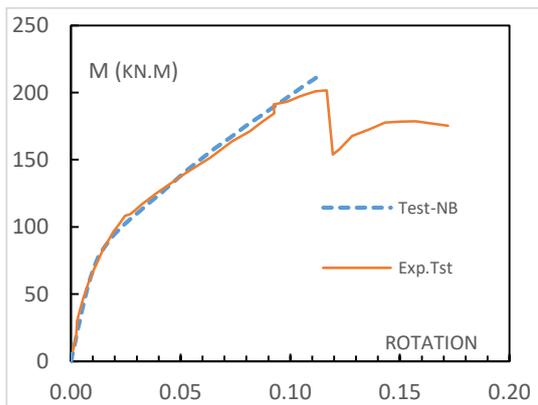
شكل 15 - انهيار النموذج Test NC



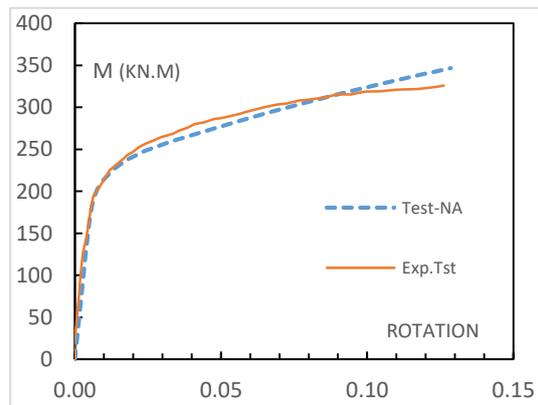
شكل 17 - انهيار الاختبار Test NE

2-5 مخططات العزم-دوران:

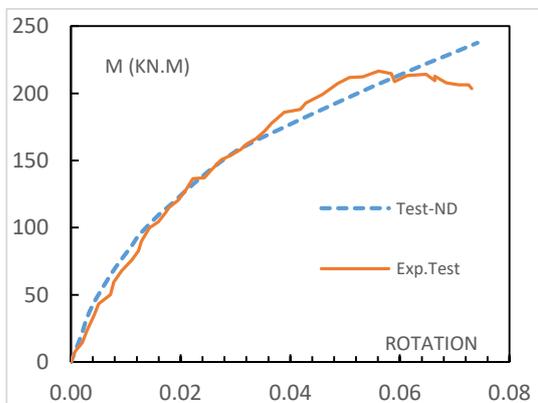
بعد حساب قيم الدوران (θ_j) لكل عقدة من العقد، تم رسم مخطط عزم-دوران لكل تجربة من التجارب العددية ومقارنته مع المخطط التجريبي. النتائج موضحة في الأشكال (18-22).



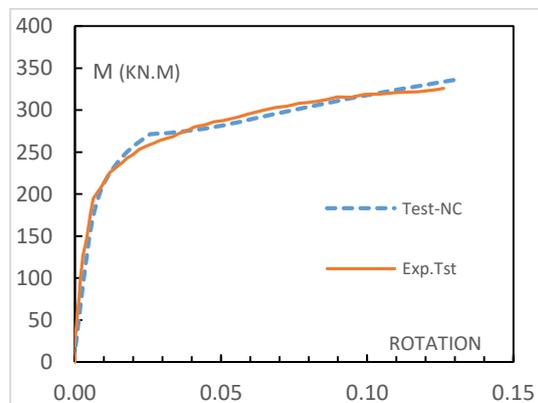
شكل 19 - مخطط عزم-دوران للاختبار Test B



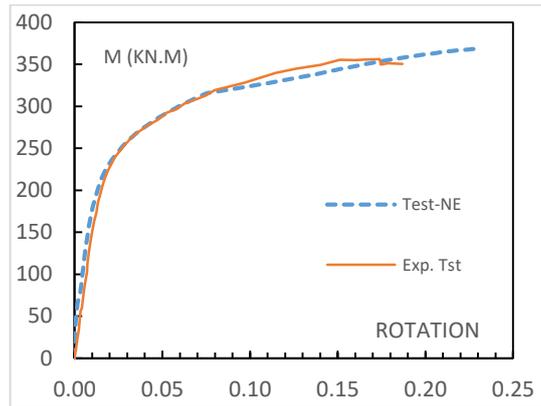
شكل 18 - مخطط عزم-دوران للاختبار Test A



شكل 21 - مخطط عزم دوران للاختبار Test D



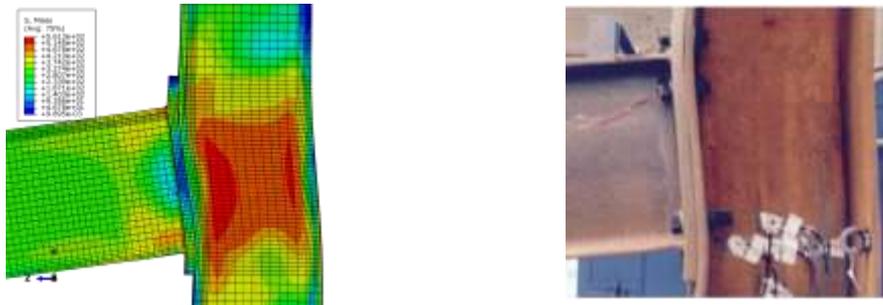
شكل 20 - مخطط عزم دوران للاختبار Test C



شكل 22 - مخططات عزم-دوران للاختبار Test E

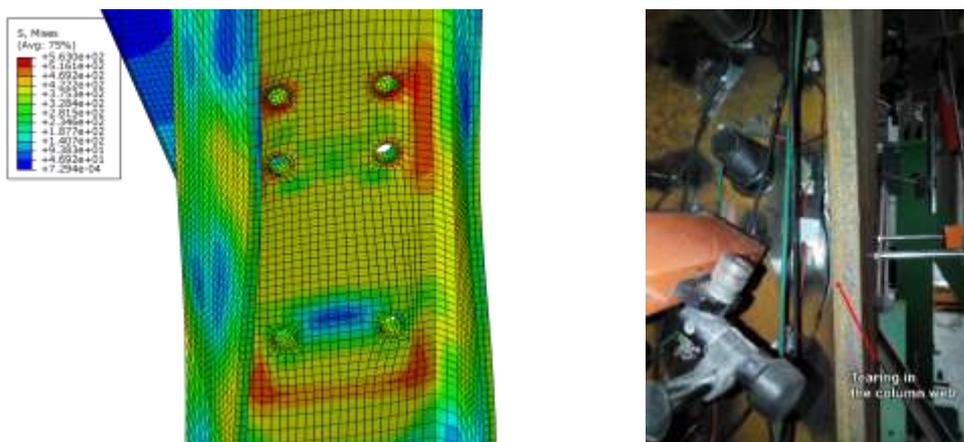
3-5 أنماط الانهيار:

الاختبار Test A: حصل الانهيار بعد حدوث انفعالات كبيرة في جناح العمود وصفيحة النهاية. الشكل (23)



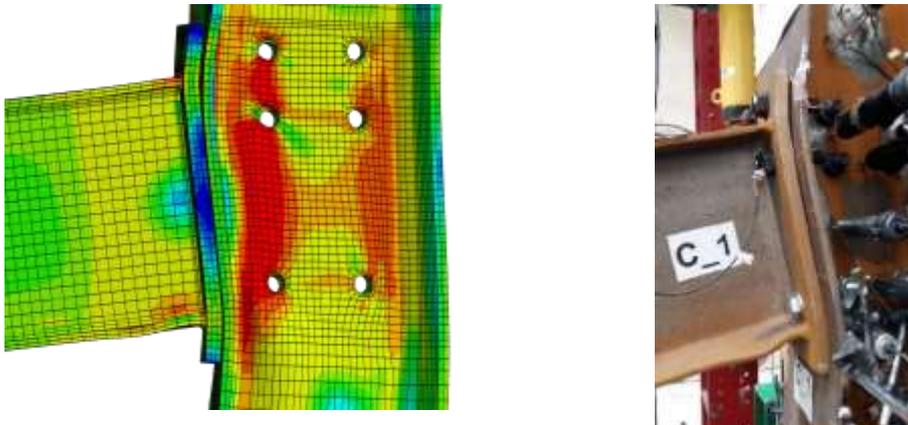
شكل 23 - نمط الانهيار للاختبار Test A

الاختبار Test B: اخترقت رنديلة البرغي (washer) الثقب، ولاحقاً حصل تمزق في جسد العمود. يبدو واضحاً في النموذج العددي تركيز الإجهادات حول ثقب صف البراغي العلوي والمناطق في جسد العمود المحاذية لحواف صفيحة النهاية. الشكل (24).

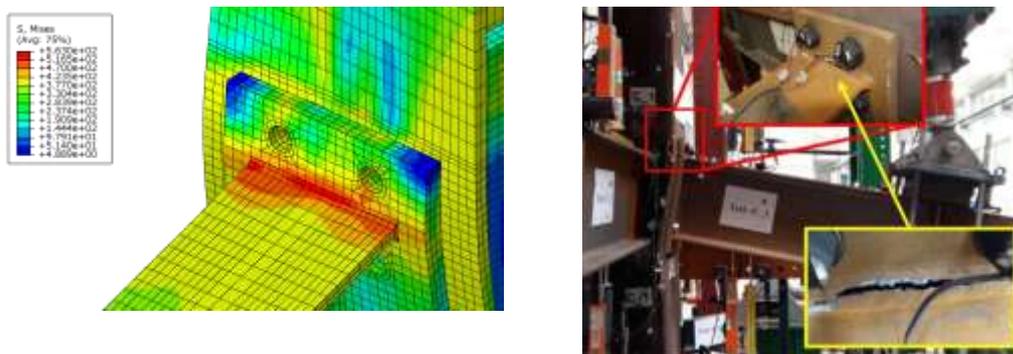


شكل 24 - نمط الانهيار للاختبار Test B

الاختبار Test C: حصل الانهيار بعد انقطاع اللحام بين الجناح العلوي للجائز وصفيحة النهاية. شكل (25) وشكل (26).

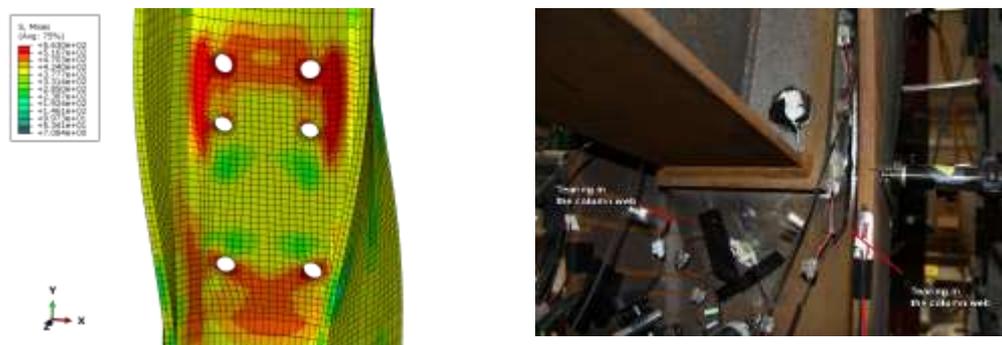


شكل 25 - نمط الانهيار للاختبار Test C



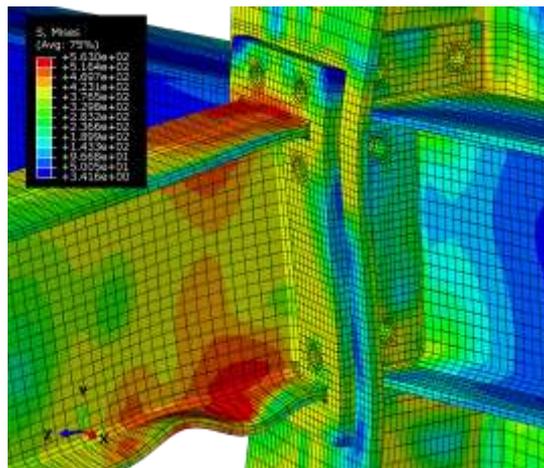
شكل 26 - انهيار اللحام في الاختبار Test C

الاختبار Test D: حصل الانهيار نتيجة تمزق جسد العمود عند حواف صفيحتي النهاية المتقابلتين. يمكن رؤية تركيز الإجهادات في جسد العمود على محيط صفائح النهاية في النموذج العددي. شكل (27).



شكل 27 - نمط الانهيار في الاختبار Test D

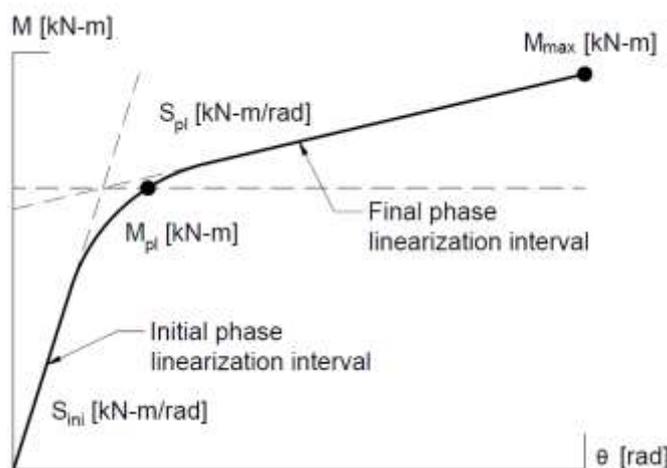
الاختبار Test E: حصل الانهيار في وصلة المحور القوي بعد فشل أحد البراغي وانقطاع اللحام بين الجائز وصفيحة النهاية. يمكن رؤية تركيز الإجهادات في منطقة اللحام في النموذج العددي، شكل (28).



شكل 28 - نمط الانهيار في الاختبار Test E

4-5 حساب العزم اللدن:

بالاعتماد على مخططات عزم-دوران، حُسبت قيم العزم اللدن M_{pl} للعقد باستخدام طريقة الانحدار الخطي (Linear Regression) التي تعني تقسيم مخطط العزم-دوران إلى قسمين خطيين تحدد نقطة تقاطعهما قيمة العزم اللدن [10]. الشكل (29).



شكل 29 - طريقة الانحدار الخطي لحساب العزم اللدن

يبين الجدول (4) مقارنة بين قيم العزم اللدن التجريبي والعدي لكل الاختبارات المدروسة.

جدول 4 - مقارنة قيم العزم اللدن للعينات المدروسة

Test	Expiremntal M_{pl}	Numerical M_{pl}	Δ
Test A	253.63	238.66	-5.90%
Test B	106.34	98.409	-7.46%
Test C	262.82	256.93	-2.24%
Test D	144	135.3	-6.04%

Test E	288.6	295.29	2.32%
--------	-------	--------	-------

يبين الجدول (5) مقارنة بين قيم الصلابة البدئية ($S_{j,ini}$) والصلابة اللدنة ($S_{j,pl}$) لكل من الاختبارات المدروسة.

جدول 5 - مقارنة قيم الصلابة للعينات المدروسة

Test	$S_{j,ini}$		Δ	$S_{j,pl}$		Δ
	Exp.	Num.		Exp.	Num.	
Test A	34677	32673	-5.78%	699.16	893.8	27.84%
Test B	6413.8	7231.5	12.75%	1012.74	1148.8	13.43%
Test C	28709	24789	-13.65%	580.45	648.45	11.72%
Test D	7321	8632	17.91%	2064.76	1712	-17.08%
Test E	14975	16262	8.59%	444.7	356.2	-19.92%

6- الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تظهر الأشكال (18-22) أن هنالك تطابقاً جيداً بين مخططات عزم-دوران التجريبية وتلك التي تم الحصول عليها من البرنامج، وخاصة في المنطقة المرنة.
- 2- بالنظر إلى الأشكال (23-28)، يمكن ملاحظة التوافق في أنماط الانهيار بين النماذج العددية والتجارب المخبرية المقابلة لها.
- 3- أظهرت جميع النماذج العددية دقة جيدة في حساب العزم اللدن حيث لم يتجاوز الانحراف الأقصى نسبة 7.46% عن القيمة التجريبية. تم تسجيل الدقة الأعلى بانحراف بنسبة 2.24% في الاختبار Test C فيما كان الانحراف الأكبر في الاختبار Test B بنسبة 7.46%.
- 4- بالنسبة لقيم الصلابة البدئية، أظهر النموذج قدرة جيدة على توقع قيمتها ضمن مجال خطأ مقبول. تم تسجيل الدقة الأعلى في الحساب في الاختبار Test A بانحراف بنسبة 5.78%، بينما كانت الدقة الدنيا في الاختبار Test D بانحراف بنسبة 17.91%. بالنسبة للصلابة في مرحلة بعد اللدونة، كانت الدقة الأعلى في الاختبار Test C بانحراف بنسبة 11.72%، والدقة الدنيا في الاختبار Test A بانحراف بنسبة 27.84%. تعود الاختلافات في قيمة الصلابة بين النماذج العددية والمخبرية إلى صعوبة تمثيل شروط الاستناد ومناطق الاتصال بدقة في النموذج الحاسوبي.
- 5- أثبت النموذج العددي المقترح قدرة جيدة على توقع سلوك وأنماط انهيار العقد المنفذة بالبراغي وصفائح النهاية، حيث قدّم قيمة دقيقة للعزم اللدن والصلابة البدئية المهمين لتحديد الخصائص المميزة لسلوك العقد، إضافة لتقديمه نتائج مقبولة للصلابة في مرحلة ما بعد التلدن.

توصيات ومقترحات:

يمكن في الأبحاث القادمة الاعتماد على النموذج المقدم في هذا البحث من أجل دراسة البارامترات المؤثرة على مقاومة وصلابة العقد في المحور الضعيف، مثل سماكة صفيحة النهاية، سماكة جسد العمود، أقطار البراغي المستخدمة، ووجود صفائح التقوية لجسد العمود.

المراجع:

- [1] CEN/TC 250. *EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints*. 2005.
- [2] Jaspart, J. and Weynand, K. "Eurocodes: Background & Applications Design of Steel Buildings". In: Joint Research Centre, European Commission, 2015. Chap. Design of moment resisting joints in steel structures.
- [3] Ricardo Costa, José Valdez, Sara Oliveira, Luís Simões da Silva, Eduardo Bayo. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints. *Engineering Structures*. Volume 188, 2019 Pages 277–289, ISSN 0141–0296.
- [4] Augusto H, Simões da Silva L, Rebelo C, Castro J. Characterization of web panel components in double-extended bolted end-plate steel joints. *J Constr Steel Res* 2016;116:271–93.
- [5] *Abaqus 6.14 Online Documentation*. Dassault Systèmes. 2014.
- [6] Yun, X. and Gardner, L. "Stress-strain curves for hot-rolled steels". In: *Journal of Constructional Steel Research* 133 (June 2017), pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>.
- [7] Ismail, Raafat & Fahmy, Ahmed & Khalifa, Ahmed & Mohamed, Y.M.. (2016). Numerical Study on Ultimate Behaviour of Bolted End-Plate Steel Connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 13. 1–22.
- [8] Selamet, S., & Garlock, M. (2010, September). Guidelines for modeling three dimensional structural connection models using finite element methods. In *International symposium: steel structures: culture & sustainability*.
- [9] Bursi, O. S., & Jaspart, J. P. (1997). Calibration of a finite element model for isolated bolted end-plate steel connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 44 (3), 225–262.
- [10] Denis, F., Costa, R., and Gentili, F. "3DJOINTS – Comportamento Tridimensional de Ligações Metálicas". MA thesis. Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Developing a Numerical Model of a Bolted Extended Endplate Beam-To-Column Steel Joint

Dr. Samer Sahellie *

Mohammed Barhoum **

ABSTRACT

Joints are a crucial part in steel structures. They connect different types of structural members and provide safe distribution of loads among them. Joints can be classified by several parameters; location, stiffness, and strength. This makes it easier for studying the parameters that affect the behavior of each class using methods such as analytical, experimental, and numerical methods.

This paper discusses the development of a numerical model constructed using the finite-element software ABAQUS, to predict the behavior of bolted extended end-plate beam-to-column steel joints. The proposed model was calibrated using experimental data in a reference study. The behavior of the joints was examined using the values of the plastic moment (M_{pl}), initial stiffness ($S_{j,ini}$), and plastic stiffness ($S_{j,pl}$), obtained from moment-rotation graphs.

The numerical model showed good accuracy in predicting the failure modes and plastic moment values, while it provided approximate values for both the initial and plastic stiffness of the joints. Therefore, the proposed model can be implemented to study the parameters that rule the behavior of bolted extended end-plate steel joints.

Keywords: Beam-to-column steel joints, Minor-axis joints, End-plate connection, Numerical simulation, ABAQUS.

* Dr. Eng. - Department of Structural Engineering - Faculty of Civil Engineering - Tishreen University (Lattakia - Syria).

** Master's student - Department of Structural Engineering - Faculty of Civil Engineering - Tishreen University (Lattakia - Syria). E-mail: mohammed.barhoum@tishreen.edu.sy

