

## Shear Lag in Slotted Welded Steel CHS Connections

Samer Sahellie\*

(Received 14 / 5 / 2024. Accepted 16 / 7 / 2024)

### □ ABSTRACT □

The Shear Lag Phenomenon plays a significant role in the structural behavior of steel element connections, affecting their strength and performance. This study investigates the impact of shear lag on the resistance of welded connections when subjected to severe forces, particularly in the case of slotted steel CHS (Circular Hollow Sections) pipes welded to steel plates (Gusset plates). This study contributes to highlighting the importance of this phenomenon to consider its effect according to the European Code (EC3), which explicitly ignores its impact on various types of connections, especially welded ones.

The research evaluates the influence of various factors such as the overlap length (connection length) and the diameter of the connected steel pipes exposed to central concentrated forces on the evolution of the shear lag phenomenon and its consequences on the proposed connection's resistance and durability. This is achieved through analysis using the Component-based Finite Element Method (CBFEM), adopted from the European Code for the analysis and design of steel connections.

Furthermore, the research aims, through numerical analytical study, to develop a relationship to calculate the value of the shear lag coefficient for inclusion in the equations used to check these connections according to the European Code. Additionally, it provides some explanations regarding the impact of the mentioned factors (connection length and diameter of steel pipes) on the shear lag coefficient to assist in selecting the appropriate geometric dimensions of the mentioned connections to ensure achieving the desired efficiency and performance within the framework of structural safety procedures in steel structures.

**Keywords:** steel CHS members, slotted and gusset plate welded connection, shear lag coefficient.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: [ssahellie@yahoo.com](mailto:ssahellie@yahoo.com)

## "التأخر القصي في وصلات الأنابيب المعدنية الملحومة ذات النهايات المشقوقة"

سامر ساحلي\*

(تاريخ الإيداع 14 / 5 / 2024. قبل للنشر في 16 / 7 / 2024)

### □ ملخص □

تلعب ظاهرة التأخر القصي Shear Lag Phenomenon دوراً هاماً في السلوك الإنشائي لوصلات العناصر المعدنية، مما يؤثر على قوتها وأدائها. تبحث هذه الدراسة في تأثير التأخر القصي على مقاومة الوصلات الملحومة، عند تعرض العناصر إلى القوى الشاذة، في حالة الأنابيب المعدنية ذات النهايات المشقوقة Slotted Steel CHS والملحومة مع صفائح معدنية (صفائح تجميع). تشكل هذه الدراسة مساهمة لتسليط الضوء على أهمية هذه الظاهرة للعمل على أخذ تأثيرها في الحسبان وفق اعتبارات الكود الأوروبي (EC3) الذي يتجاهل بشكل صريح تأثير هذه الظاهرة على مختلف أنواع الوصلات ولا سيما في الوصلات الملحومة. يقوم البحث بتقييم تأثير عوامل مختلفة كطول منطقة التراكب (طول منطقة الوصل) وقطر الأنابيب المعدنية الموصولة والمعرضة لقوى ناظرية شاذة مركزية، على تطور ظاهرة التأخر القصي وعواقبها على مقاومة ومتانة الوصلة المقترحة في الدراسة من خلال التحليل باعتماد طريقة العناصر المنتهية بالاعتماد على طريقة المكونات المستخدمة في الكود الأوروبي لتحليل وتصميم الوصلات المعدنية (Component-based Finite Element Method (CBFEM)). كما يهدف البحث، من خلال الدراسة التحليلية العددية، إلى تطوير علاقة لحساب قيمة معامل التأخر القصي لإدراجه في العلاقات المستخدمة لتحقيق هذه الوصلات وفق اعتبارات الكود الأوروبي، بالإضافة إلى تقديم بعض التوضيحات الخاصة بتأثير العاملين المذكورين (طول منطقة الوصل وقطر الأنابيب المعدنية) على معامل التأخر القصي بغية المساعدة في اختيار الأبعاد الهندسية للوصلات المذكورة لضمان تحقيق الكفاءة والأداء المنشودين ضمن إجراءات تحقيق السلامة الإنشائية في المنشآت الفولاذية.

**الكلمات المفتاحية:** وصلات الأنابيب المعدنية المشقوقة والملحومة إلى صفائح التجميع، معامل التأخر القصي.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* \* مدرس، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. E-mail: [ssahellie@yahoo.com](mailto:ssahellie@yahoo.com)

**مقدمة:**

تعتبر العناصر المعرّضة للشد واحدة من العناصر الإنشائية البسيطة الأكثر استخداماً في المنشآت الفولاذية، حيث تتأثر مقاومة هذه العناصر ليس فقط بشكل المقطع العرضي بل أيضاً بطريقة وصل نهايات هذه العناصر. لأسباب عملية وفنية، يتم عادةً وصل جزء أو أجزاء محدودة فقط من المقطع العرضي، الأمر الذي يتسبب في اختلاف توزيع الإجهادات وبالتالي التشوهات في المقطع العرضي في منطقة الوصل وتركزها في مواقع محددة، وبالتالي خفض مقاومة الشد في العنصر الموصول. تتطلب المعايير التصميمية للمنشآت الفولاذية الحالية، مثل CSA S16.1-94 و [1] و CSA S136-94 و AISC 360-16-D [2]، من المصممين النظر في كفاءة المقطع العرضي للعناصر المشدودة نتيجة تأثير التوزيع غير المتجانس للإجهادات والتشوهات، والمعروف عموماً بتأثير التأخر القصي. في حين يتجاهل الكود الأوروبي [3] (EC3) EN 1993-1-8، والبريطاني [4] BS 5950-1-1990، والسوري لاحقاً [5] 2020، التركيز على تأثير هذه الظاهرة صراحةً والاكتفاء باستخدام معامل تخفيض تقريبي ثابت مساوٍ لـ  $0.9/1.25 = 0.72$  لمقاومة التمرق في المقاطع العرضية الحرجة للعناصر المشدودة مركزياً (المقاطع العرضية بعد طرح ثقوب براغي الوصل) وتم تخفيض قيمة معامل التخفيض المذكور إلى المجال (0.4-0.7) في حالة الوصل المحلي اللامركزي للمقاطع الزاوية (الزوايا المتصلة بصف واحد من البراغي على ساق واحدة فقط)، ولم يأت على ذكر تفاصيل عن مقاطع عرضية أخرى أو على تأثير الوصل باستخدام اللحام بدلاً عن البراغي.

تظهر العناصر المشدودة المثبتة بالبراغي ظروفاً غير مواتية في الاتصال أكثر مقارنةً بالعناصر الملحومة، حيث تفرض البراغي إجهادات ضاغطة عالية جداً (Bearing Stresses) عند حواف الثقوب في العنصر المتصل. علاوةً على ذلك، وحسب ترتيب مجموعة البراغي، فإن هذه العناصر عرضةً أيضاً لقوة التمرق الناتجة عن الشد عند النهاية. أما في الوصلات الملحومة، وعلى عكس وصلات البراغي، لا توجد مشاكل في القدرة الحملية وتركيز الإجهادات أو مشكلة التمرق عند النهاية بسبب وجود الثقوب، كما يُظهر توزع الإجهادات في محيط منطقة الاتصال باللحام مقارنةً بالوصلات المثبتة بالبراغي.

ومع ذلك، تطرح الوصلات الملحومة أسئلة تصميمية مختلفة، مثل سلامة اللحامات، والفروق بين اللحامات العرضية واللحامات الطولية أو مزيج الاثنين، وفوائد اللحامات المتوازنة مقابل اللحامات غير المتوازنة. تشير معظم النتائج البحثية المتاحة حالياً إلى أن معظم الاتصالات الملحومة تفشل إما بسبب فشل اللحامات وانهارها، أو كسر (تمرق) المقطع الإجمالي بعيداً عن مناطق الوصل، لكن يمكن أيضاً أن يحدث التمرق ضمن منطقة الوصل، رغم عدم وجود ثقوب كما في وصلات البراغي، ويكون ناتجاً عن انخفاض المقاومة بسبب التأخر القصي [6].

**ظاهرة التأخر القصي (Shear Lag Phenomenon)**

ظاهرة التأخر القصي هي ظاهرة هامة في الهندسة الإنشائية تحدث في أطراف العناصر المعدنية الموصولة بواسطة البراغي أو اللحام، وذلك عندما تفرض طريقة الوصل و/أو ترتيب مكونات الوصلة (توزيع البراغي أو أطوال خطوط اللحام) أن يكون الوصل على جزء أو أجزاء محددة من كامل المقطع العرضي للعنصر الموصول. تسبب هذه الظاهرة اختلافاً في توزيع القوى والإجهادات عند نهايات العناصر المتصلة مقارنةً بالتوزع المثالي المفترض الناتج عن الحملات الخارجية، وتتأثر بعدة عوامل، منها: أبعاد العنصر الموصول، طريقة توزيع الأحمال عليه وطبيعتها، وطريقة الوصل (البراغي أو اللحام)، المادة وخواصها بما في ذلك مرونة المادة ومقاومتها للتشوه، ونوع وقوة اللحام وغيرها من العوامل.

وبالتالي تسبب ظاهرة التأخر القصي تزايد الإجهادات وتركيزها في مناطق الوصل، وتناقصها في باقي الأجزاء الحرة أو غير المثبتة في المقطع العرضي، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة تشوه العنصر المعدني وتدهور أدائه وبالتالي زيادة خطر فشله وانهيائه.

### الدراسات المرجعية

توصل الباحثين [7] من خلال اختبارات تجريبية وتحليلية لـ 27 عينة من صفائح وزوايا ومجاري معدنية ملحومة ومعرضة لقوى شادة لدراسة ظاهرة التأخر القصي وتأثيرها في هذه الوصلات والعوامل التي يمكن أن تزيد من تأثيرها على مقاومة العناصر المشدودة، إلى أن أحكام تأخر القص في مواصفات AISC تعطي نتائج متحفظة إلى حد كبير، وأن المعاملات المقدمة في المعادلة الشهيرة المقترحة من قبل [8] Munse and Chesson عام 1963  $U = 1 - \frac{\bar{X}}{L} \leq 0.9$  معقولة لمجموعة واسعة من أشكال اللحام والأبعاد الهندسية للمقاطع العرضية. وتوصلت الدراسة إلى أن حجم تأثيرات تأخر القص يعتمد على عوامل مختلفة مثل عرض العنصر وطوله وحجم الأحمال وتوزيعها. وخلص البحث أيضاً إلى أن النماذج بطريقة العناصر المحدودة يمكن أن توفر تنبؤات مفيدة لتأثيرات تأخر القص. أوصت الدراسة أيضاً في ذلك الحين إلى أن الحد الأعلى لمعامل التأخر القصي المحسوب وفقاً لعلاقة Munse and Chesson والتي اعتمدت لاحقاً من قبل الكود الأمريكي AISC يجب ألا يتجاوز 0,9:

$$U = 1 - \frac{\bar{X}}{L} \leq 0.9 \quad (1)$$

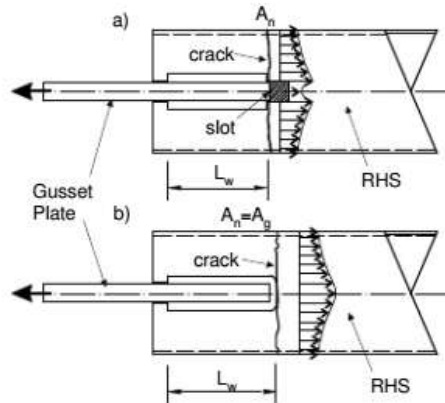
حيث:  $U$  - معامل التأخر القصي،  $\bar{X}$  - لامركزية الوصل،  $L$  - طول الوصل  
سلط الباحثون في [6] وآخرون الضوء على أهمية النظر في تأثير التأخر القصي في عناصر الشد الملحومة في المنشآت المعدنية وكيفية تأثر مقاومتها بعوامل مثل أبعاد المقطع العرضي وطرق الوصل، من خلال مقارنة عددية لمعايير التصميم المتوفرة في بعض الكودات العالمية مثل CSA S16.1-94 و CSA S136-94 و ISC-LRFD، وغيرها من الأبحاث السابقة، وأكدوا على المصممين أن يأخذوا هذا التأثير بعين الاعتبار. ونوهوا إلى أن الأحكام المتوفرة في هذه الكودات معتمدة بشكل رئيسي على نتائج لعناصر مثبتة بالبراغي، مع اعتبار محدود لعناصر الشد الملحومة. حاول البحث [9] التحقق من صحة الطريقة التحليلية المقترحة من قبل المؤلفين لحساب الانخفاض في القوة بسبب تأثيرات تأخر القص في الوصلات الملحومة للعناصر المشدودة (صفائح معدنية ملحومة على صفيحة التجميع) باستخدام الطريقة التحليلية للعناصر المحدودة غير الخطية. تم التركيز على نسبة طول اللحام إلى عرض الصفيحة الملحومة (العنصر المشدود) وبمقارنة نتائجهم مع النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الإرشادات المتوفرة في الكود الكندي CAN/CSA-S16-01، تم إثبات أن القيم الناتجة عن العلاقات المستخدمة في الكود المذكور قد تعطي نتائج قريبة لمقاومات العناصر المشدودة لكنها قد تكون محافظة نوعاً ما.

يستفيض J.A. Packer, 2009 وآخرون في كتابهم [10] بالشرح عن وصلات المقاطع المستطيلة المفرغة RHS المشقوفة والملحومة مع صفائح التجميع كما في الشكل (1)، وعن تأثير التأخر القصي في هذه الوصلات بشكل رئيسي بطول اللحام،  $L_w$ ، أو "طول الاتصال". ويذكر أنه بالنسبة لأطوال اللحام الكبيرة، يكون الانهيار المتحكم هو تشقق المقطع وفق محيطه خارج منطقة الاتصال، الشكل (2)، وتصبح تأثيرات التأخر القصي غير ملحوظة، في حين أنه للأطوال القصيرة للحام ( $L_w / w < 0.7$ ) يتحكم التمزق الطولي في انهيار المقاطع المفرغة، الشكل (3)، حيث يُعتبر البُعد  $w$  هو التباعد بين اللحامات المنفذة.



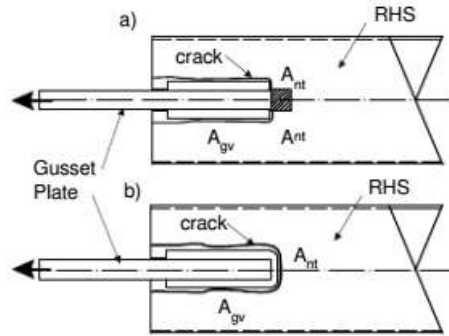
الشكل (1) - عنصر لنظام تريبط إطار معدني مقطعه العرضي RHS مشقوق وملحوم

إلى صفيحتي تجميع عند النهايات، [10]



الشكل (2) - عنصر لنظام تريبط إطار معدني مقطعه العرضي RHS مشقوق وملحوم إلى صفيحتي تجميع عند النهايات: انهيار محيطي

(CH) مع: (a) لحام طولي فقط و (b) لحام طولي ولحام عرضي معاً، [10]



الشكل (3) - عنصر لنظام تريبط إطار معدني مقطعه العرضي RHS مشقوق وملحوم إلى صفيحتي تجميع عند النهايات: انهيار بالتمزق

(TO) مع: (a) لحام طولي فقط و (b) لحام طولي ولحام عرضي معاً، [10]

خلصت الدراسة التجريبية المقدمة من قبل [11] إلى أن تأثيرات تأخر القص يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم وصلات الأنابيب المشقوقة والملحومة مع صفائح تجميع. ووجدت الدراسة أن زيادة طول اللحام له تأثير كبير على مقاومة الوصلات وعلى طبيعة وشكل انهيارها، انظر الأشكال (4) و(5). وأوصت ولأغراض التصميم العملي باستخدام قيمة مقاومة الخضوع بدلاً عن مقاومة الشد القصوى لفولاذ الأنابيب.



الشكل (4) - تشوهات المقطع CHS المشقوق والملحوم إلى صفيحة تجميع:  
انهيار بالتمزق خارج منطقة الوصل عند استخدام لحام طولي طويل نسبياً، [11]



الشكل (5) - تشوهات المقطع CHS المشقوق والملحوم إلى صفيحة تجميع:  
انهيار بالتمزق عند أطراف منطقة الوصل عند استخدام لحام طولي قصير ومتوسط الطول، [11]

قدّم الباحثون في [12] و [13] دراسات عديدة وتجريبية على زوايا معدنية معرضة للشد وموصولة بالبراغي وباللحام، حيث تم استخدام الفولاذ عالي المقاومة والتحقق من علاقة عامل التأخر القصي أو ما يعرف بقاعدة  $U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$  الشهيرة. خلصت الدراسات إلى التأكيد على التأثير الكبير للامركزية القوة الشادة المطبقة، ولصنف الفولاذ المستخدم بسبب معدل الاستطالة لهذا الفولاذ، وأن طول منطقة الوصل ليس له تأثير في الوصلات المنفذة بالبراغي أو باللحام عبر الساق الطويلة، خلافاً لتلك الموصولة عبر ساقها القصير، وأكدت الدراسة على أن قاعدة  $U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$  الشهيرة تعطي تقديرات محافظة وبعيدة عن الواقع حسب الساق الموصولة وطريقة الوصل.

تبحث الدراسة المقدمة من قبل [14] وباحثون آخرون في تأثيرات البارامترات ذات الصلة على تأخر القص في الزوايا المفردة والمزدوجة الملحومة في كلا الساقين. تم التوصل إلى أن علاقات المواصفات متحفظة في معظم الحالات، ومن أجل الحد من التحفظ المفرط، تم إدخال بعض المعادلات الجديدة لتقدير تأخر القص كما يلي:

$$U = 1.3 - \frac{1.58\bar{x}}{L_w} - \frac{0.03\bar{x}}{t_G} \leq 1 \quad (2) \quad \text{للزوايا المفردة}$$

$$U = 1.1 - \frac{0.76\bar{x}}{L_w} \leq 1 \quad (3) \quad \text{للزوايا المزدوجة}$$

حيث  $\bar{x}$  تمثل لامركزية الوصل،  $L_w$  طول منطقة الوصل و  $t_G$  سماكة صفيحة التجميع. دراسة البارامترات المؤثرة على ظاهرة التأخر القصي للمقاطع W, WT والموصولة باستخدام البراغي تمت من خلال [15]، وقد أظهرت النتائج توافقاً مع قيم عامل التأخر القصي المستخدم للمقاطع صغيرة الحجم والمقترح من قبل الكود الأمريكي واختلافاً كبيراً من أجل المقاطع الأكبر، وعليه فقد اقترح نموذجاً حسابياً لهذا العامل يناسب مختلف قياسات المقاطع المدروسة كما يلي:

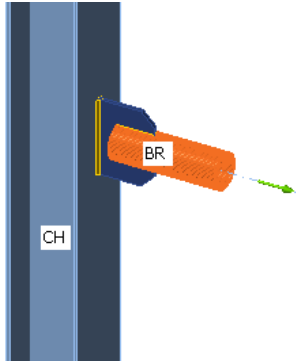
$$U = 1 - \frac{\bar{x} b_f A_g}{L d A_f} \leq 1 \quad (4)$$

حيث  $\bar{x}$  تمثل لامركزية الوصل،  $L$  طول منطقة الوصل،  $A_g$  سماكة صفيحة التجميع،  $A_f$  مساحة الجناح و  $d$  ارتفاع المقطع. العمل المجرى من قبل [16] قدّم تحقيقاً تجريبياً لتحليل التأخر القصي وتأثيره في الزوايا المعدنية المشدودة والموصولة بالبراغي. أشارت نتائج الاختبارات إلى أن تباعدات الثقوب (مسافة الحافة، ومسافة النهاية، والمسافات بين مراكز الثقوب) لها تأثير على قدرة تحمل المقاطع العرضية. وبالمقارنة مع نتائج الأبحاث المنشورة سابقاً، تمّ التأكيد على وجود فوارق مهمة في النتائج لا سيما في الزوايا المشدودة والمتصلة عبر ساقها الأطول، وكانت الفوارق مهمة بالمقارنة مع اعتبارات الكود الأوروبي خاصةً، وعزت الدراسة هذه الفوارق كون الكود المذكور يهمل ظاهرة التأخر القصي وتأثيرها على مقاومة هذه العناصر.

#### الدراسة التحليلية لوصلات الأنابيب المعدنية المشقوقة والملحومة

##### وصف النماذج

سيتم في هذه المقالة استخدام طريقة العناصر المحدودة المعتمدة على طريقة المكونات CBFEM المتوفرة ببرنامج IDEA STATICA CONNECTION لدراسة وتحليل سلوك ومقاومات مكونات وصلات الأنابيب المعدنية المشقوقة والملحومة إلى صفائح التجميع عند تعرضها للشد المركزي. يبيّن الشكل (6) نموذجاً أساسياً للوصلات المدروسة، وهي شائعة الاستعمال حيث تمثل وصلات عناصر أنظمة التبريط وعناصر الجوائز الشبكية وغيرها من التطبيقات.



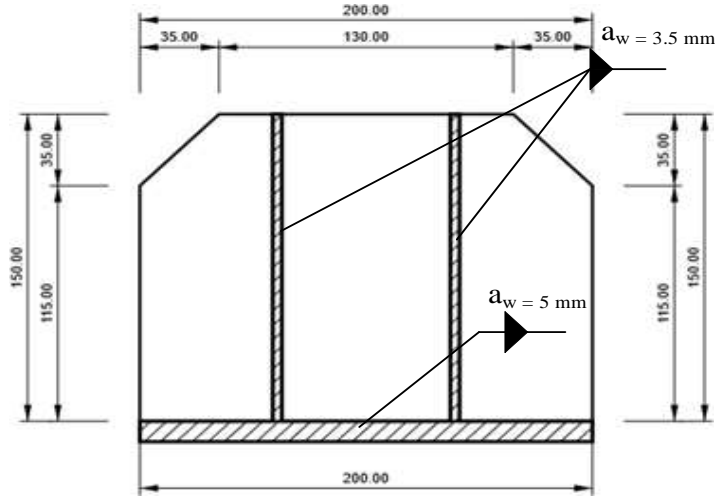
الشكل (6) - وصلة العنصر ذو المقطع CHS المشقوق والملحوم إلى صفيحة تجميع

##### مكونات الوصلة وبارامترات الدراسة

تتألف الوصلة بشكل عام، انظر الشكل (6)، من العنصر المعدني الرئيسي المشار إليه على الشكل بـ (BR)، وهو عنصر معدني ذو مقطع دائري مجوّف (CHS)، حيث تمّ تنفيذ شقين في جداره لتمرّ فيهما صفيحة تجميع معدنية ذات سماكة كافية (Plate 200x150x10 mm) وفق أطوال تداخل (تراكب) متغيرة ومتصلة مع الأنابيب المعدني بواسطة أربعة خطوط من اللحامات الزاوية (Fillet welds) ذات سماكة 3.5 mm مستمرة على كامل طول التراكب. تتصل

صفيحة التجميع بواسطة خطي لحام زاوي مستمرين بسماكة 5 mm بجناح عنصر معدني ذو صلابة كافية لمقاومة التحنيب مقطعه العرضي (HEA200) مشار إليه على الشكل ب (CH). يُظهر الشكل (7) أبعاد صفيحة التجميع وتوضعات خطوط اللحام الزاوي المستخدمة.

جميع مكونات الوصلة من الفولاذ ذو الصنف S 275. سيتم التركيز في هذه الدراسة التحليلية على تأثير أبعاد المقطع العرضي للعنصر الأنبوبي (CHS)، وطول التداخل (الترائب) المساوي لطول اللحام الزاوي المستخدم ( $L_w$ ) على مقاومة الوصلة وسلوكها وبيين الجدولين (1 و 2) بارامترات الدراسة ومنهجية العمل لكل حالة دراسية.



الشكل (7) - صفيحة التجميع وتوضعات خطوط اللحام الزاوي المستخدمة

لضمان وصول فولاذ العنصر المعدني لحد الخضوع، تم تطبيق قوة شادة مركزية أكبر من القوة الأعظمية التي يمكن أن يتحملها أكبر مقطع عرضي للعنصر المعدني المستخدم حسب اعتبارات الكود الأوروبي EN-1993-(EC3) والمعطى بالعلاقة (5):

$$N_{t,max} = N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

حيث:  $A$  مساحة مقطع العنصر الأنبوبي الإجمالي،  $f_y$  إجهاد الخضوع لفولاذ العنصر،  $\gamma_{M0}$  عامل أمان المادة في حالة الشد.

الجدول (1) - أطوال التداخل  $L_w$  المدروسة مع المقطع الثابت CHS 82.5x4 والقوة الشادة المطبقة

$N_{t,applied} = 300 \text{ kN}$	
	$L_w$ [mm]
CHS 82.5x4	30-40-50-60-70-80-90-100-110-120-130-140-150

الجدول (2) - أطوال التداخل  $L_w$  المدروسة مع المقاطع العرضية المتغيرة CHS Dx4 والقوة الشادة المطبقة

$N_{t,applied} = 350 \text{ kN}$	
CHS Dxt [mm]	$L_w$ [mm]
	Min. - Medium - Max.
CHS 62.5x4	30 - 100 - 150
CHS 72.5x4	30 - 100 - 150
CHS 82.5x4	30 - 100 - 150
CHS 92.5x4	30 - 100 - 150
CHS 102.5x4	30 - 100 - 150



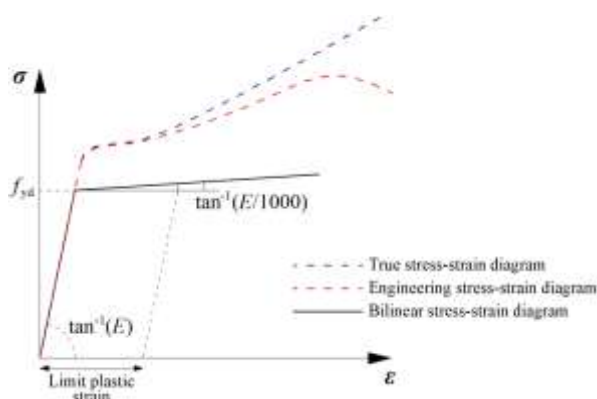
## التحليل باستخدام طريقة CBFEM

تحليل المقاومة (Strength analysis) هو التحليل الأهم الذي يتم إجراؤه للوصلات. يجري تحقيق تشوه الصفائح والتحقيقات المرافقة للمكونات حسب الكود بواسطة التحليل المرن-اللدن (Elastic-plastic analysis)، ويعتمد تحليل الوصلات على السلوك اللا خطي لمواد العناصر (Non-linear materials). يتم تطبيق الحمولة بشكل متزايد تدريجياً وخلالها يتم تحديد الحالة الإجهادية. هناك خياران لإجراء التحليل باستخدام برنامج IDEA StatiCa Connection ، [17]:

- استجابة الوصلة للحمولة المطبقة الإجمالية، حيث يتم تطبيق الحمولة المعروفة بشكل كامل (100 %)، ويتم حساب الحالة الإجهادية والتشوهات المرافقة لها الناتجين عن تأثير الحمولة الكاملة.
- إيقاف التحليل عند الوصول للحالة القصوى (Ultimate limit state)، وفي هذا الخيار ضمن البرنامج يتم إيقاف التحليل عند وصول أي مكون من مكونات الوصلة (صفائح، لحام..). إلى الحالة الحدية القصوى المعروفة لكل من إجهاد الخضوع أو التشوه اللدن، وإيجاد الحالة الإجهادية والتشوهية الموافقتين والنسبة المئوية للحمولة الحرجة مع هامش تسامح بسيط ومقبول ناتج عن العملية التكرارية للتحليل في كل مرحلة. تجدر الإشارة إلى أنه من المتوقع أن تصل الإجهادات إلى قيمة أعلى قليلاً من إجهاد الخضوع التصميمي المعرف ( $f_{yd}$ ) ويُعزى ذلك إلى ميل عتبة الخضوع ضمن المجال اللدن في مخطط إجهاد-تشوه ثنائي الخطية المعرف لسلوك المادة المرن-اللدن المثالي، انظر الشكل (8). وفقاً للكود الأوروبي (1993-1-5 appendix C paragraph C.8 note 1)، تُحدد القيمة المستخدمة للتشوه اللدن الحدي بـ 5% ويبين الجدول (3) تعريف مادة الفولاذ المستخدمة، والقيم المستخدمة لتمثيل السلوك المرن-اللدن لهذه المادة.

الجدول (3) - مادة الفولاذ المستخدمة، والقيم المستخدمة لتمثيل السلوك المرن-اللدن

Material, Steel Grade	Young's modulus, E [MPa]	Yield strength, $f_{yd}$ [MPa]	Limit plastic strain, $\epsilon_{lim}$ [%]
S 275	$210 \times 10^3$	275	5.0

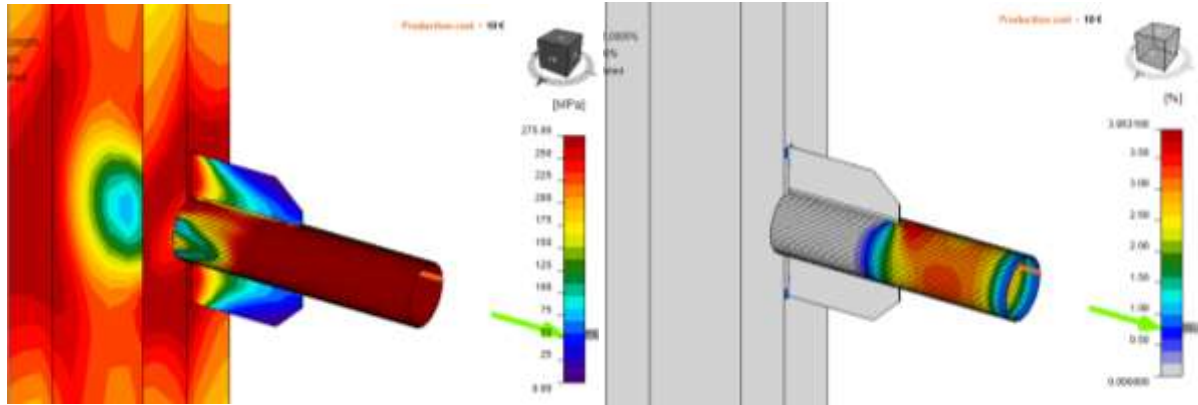


الشكل (8) - السلوك المرن-اللدن للمواد المعروفة وميل عتبة الخضوع، [17]

## نتائج التحليل

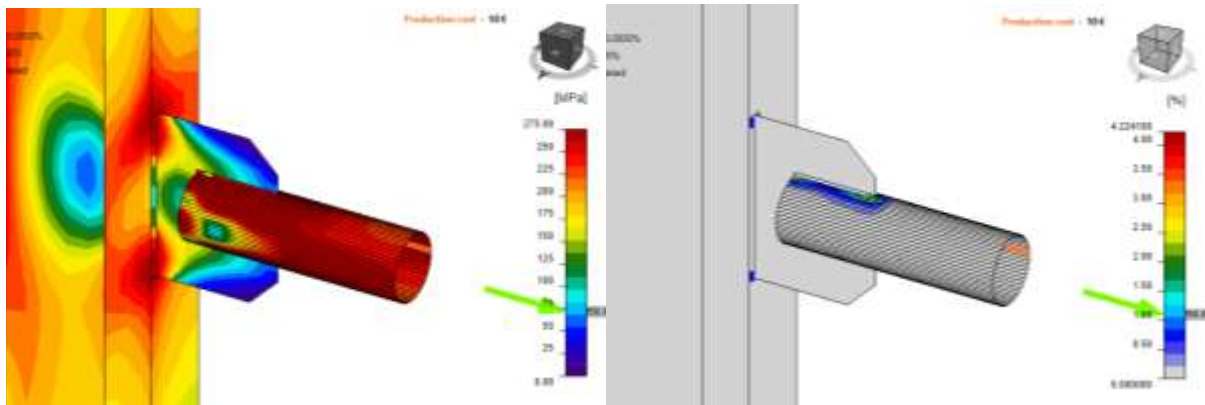
الحالة الإجهادية والتشوهات اللدنة الموافقة للقوة الشادة الأعظمية في المقطع الثابت CHS 82.5X4 وفقاً لأطوال التداخل القصيرة والمتوسطة والطويلة المدروسة مبينة في الأشكال (9) و(10) و(11) على الترتيب، ويعرض الجدول

(4) نتائج تحليل وصلة أنبوب معدني CHS 82.5x4 وفقاً لتغيّر طول التداخل  $L_w \in \{30\text{ mm} - 150\text{ mm}\}$  وقيم القوى الأعظمية الموافقة للحالة الحديّة المعرفة وذلك تحت تأثير قوة شادة مركزية مطبقة  $N_{t,applied} = 300\text{ kN}$ . كما يوضّح الشكل (12) القوى الشادة الأعظمية الناتجة عن تحليل وصلات خمسة أنابيب معدنية مختلفة الأقطار  $CHS\ D \times 4$  ضمن المجال  $D \in \{62.5\text{ mm} - 102.5\text{ mm}\}$  وذلك عند استخدام ثلاثة أطوال تداخل  $L_w \in \{30\text{ mm} - 100\text{ mm} - 150\text{ mm}\}$ ، تحت تأثير قوة شادة مركزية مطبقة  $N_{t,applied} = 350\text{ kN}$  أكبر من السعة الحملية المفترضة لأكبر مقطع عرضي مستخدم  $D = 102.5\text{ mm}$  والمحسوبة وفقاً للعلاقة (5).



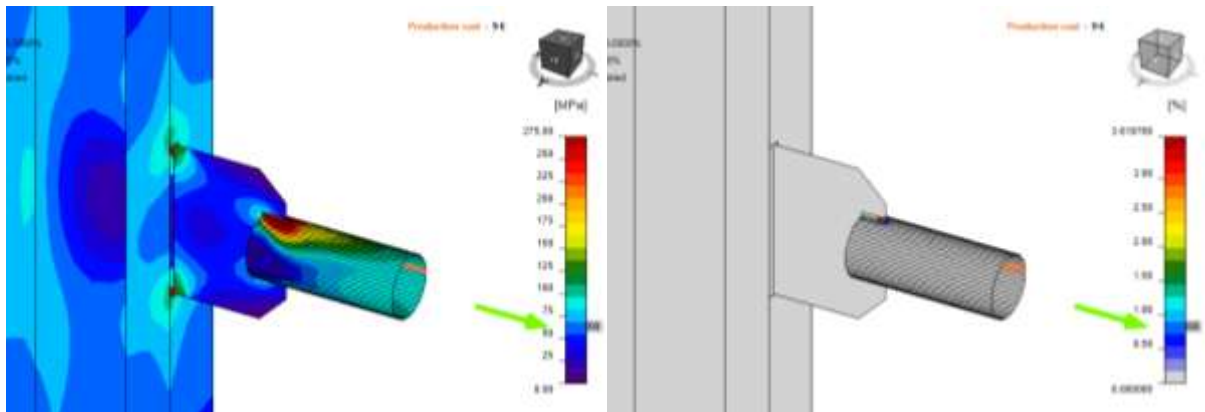
الشكل (9) - الإجهادات والتشوهات اللدنة الموافقة للقوة الشادة الأعظمية في المقطع CHS 82.5X4

طول التداخل  $L_w = 150\text{ mm}$



الشكل (10) - الإجهادات والتشوهات اللدنة الموافقة للقوة الشادة الأعظمية في المقطع CHS 82.5X4

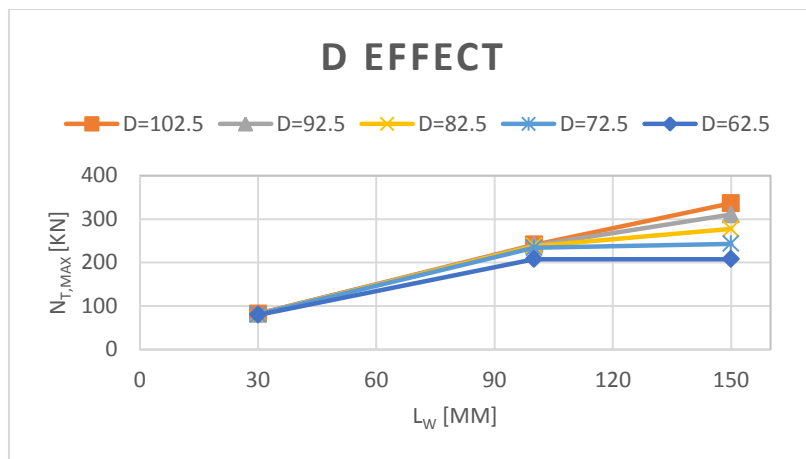
طول التداخل  $L_w = 100\text{ mm}$



الشكل (11) - الإجهادات والتشوهات اللدنة الموافقة للقوة الشادة الأعظمية في المقطع CHS 82.5X4 طول التداخل  $L_w = 30\text{ mm}$

الجدول (4) - نتائج تحليل وصلة أنبوب معدني CHS 82.5x4 وفقاً لتغير طول التداخل

$N_{t,applied} = 300 \text{ kN}$							
$L_w$ [mm]	Results		$N_{t,max}$ [kN]	$L_w$ [mm]	Results		$N_{t,max}$ [kN]
150	Analysis	92.6%	277.8	80	Analysis	64.8%	194.4
	Plates	4.5 < 5.0%			Plates	3.7 < 5.0%	
	Welds	98.4 < 100%			Welds	99.4 < 100%	
140	Analysis	93.0%	279	70	Analysis	57.4%	172.2
	Plates	4.7 < 5.0%			Plates	3.4 < 5.0%	
	Welds	98.4 < 100%			Welds	99.4 < 100%	
130	Analysis	92.6%	277.8	60	Analysis	50.0%	150
	Plates	4.0 < 5.0%			Plates	3.6 < 5.0%	
	Welds	98.4 < 100%			Welds	99.4 < 100%	
120	Analysis	91.0%	273	50	Analysis	42.6%	127.8
	Plates	3.7 < 5.0%			Plates	3.0 < 5.0%	
	Welds	98.7 < 100%			Welds	99.6 < 100%	
110	Analysis	86.7%	260.1	40	Analysis	34.8%	104.4
	Plates	3.9 < 5.0%			Plates	3.7 < 5.0%	
	Welds	99.5 < 100%			Welds	99.2 < 100%	
100	Analysis	79.3%	237.9	30	Analysis	27.0%	81
	Plates	3.7 < 5.0%			Plates	3.1 < 5.0%	
	Welds	99.2 < 100%			Welds	99.5 < 100%	
90	Analysis	72.7%	218.1				
	Plates	3.6 < 5.0%					
	Welds	99.7 < 100%					



الشكل (12) - القوى الشادة الأعظمية بدلالة طول التداخل وحسب أقطار المقاطع CHS

### التحقق من مقاومة اللحام المثلثي وكفايته

يتم تحقيق اللحام المثلثي وفقاً لاشتراطات الكود الأوروبي [3], EN 1993-1-8. لحساب المقاومة التصميمية للحام المثلثي سيتم استخدام الطريقة المبسطة، حيث يمكن افتراض أن المقاومة التصميمية للحام الزاوي كافية (عند كل نقطة من طولها) إذا كانت محصلة جميع القوى التي ينقلها اللحام في كل وحدة طول نقي بالمعيار المعطى بالعلاقة (6):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} = f_{vw.d} A_w = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \sum L_w a_w \quad (6)$$

حيث:  $F_{w,Ed}$  - القيمة التصميمية للقوة المطبقة في اللحام، وهي مساوية لقيمة القوة الشادة الأعظمية،  $N_{t,max}$  في الأنبوب المعدني،  $F_{w,Rd}$  المقاومة التصميمية للحام المثلثي ذو السماكة  $a_w = 3.5 \text{ mm}$  يبين الجدول (5) التحقق من كفاية اللحام المثلثي المستخدم من خلال المقارنة بين مقاومات اللحام التصميمية وفقاً لتغيرات طول التداخل والقوى الأعظمية في العنصر CHS 82.5x4 والتي تؤكد ضمان حدوث الانهيار في الأنبوب المعدني المشدود أولاً.

كما يبين الجدول (6) التحقق من كفاية اللحام المثلثي المستخدم في العناصر CHS Dx4 (وفقاً لتغيرات أقطار الأنابيب) وحسب أطوال التداخل الثلاثة المدروسة، والتي تؤكد أيضاً ضمان حدوث الانهيار في الأنابيب المعدنية المشدودة أولاً بالمقارنة مع القوى الأعظمية الناتجة عن التحليل.

الجدول (5) - التحقق من كفاية اللحام المثلثي المستخدم من خلال المقارنة بين مقاومات اللحام التصميمية وفقاً لتغيرات طول التداخل

والقوى الأعظمية في العنصر CHS 82.5x4

$L_w$ [mm]	$N_{t,max}$ [kN]	$F_{w,Rd}$ [kN]	Check	$L_w$ [mm]	$N_{t,max}$ [kN]	$F_{w,Rd}$ [kN]	Check
150	277.8	491	OK	80	194.4	262	OK
140	279	458	OK	70	172.2	229	OK
130	277.8	425	OK	60	150	196	OK
120	273	393	OK	50	127.8	164	OK
110	260.1	360	OK	40	104.4	131	OK
100	237.9	327	OK	30	81	98	OK
90	218.1	294	OK				

الجدول (6) - التحقق من كفاية اللحام المثلثي في العناصر CHS Dx4 (وفقاً لتغيرات أقطار الأنابيب) وحسب أطوال التداخل الثلاثة المدروسة

D [mm]	$L_w$ [mm]	$N_{t,max}$ [kN]	$F_{w,Rd}$ [kN]	Check
102.5	150	336.35	491	OK
92.5		310.45		
82.5		277.55		
72.5		243.25		
62.5		207.9		
102.5	100	240.8	327	OK
92.5		239.4		
82.5		238		
72.5		233.8		

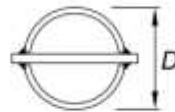
62.5		207.9		
102.5	30	81.9	98	OK
92.5		81.9		
82.5		80.5		
72.5		80.5		
62.5		79.45		

## تطوير وتقييم علاقة معامل التأخر القصي

يتم حساب المقاومة الحدية القصوى للعناصر المشدودة وفقاً لاعتبارات وأحكام الكود الأوروبي EN-1993-1-8 باستخدام معياري التلدن أو الخضوع (Plasticity/Yielding) المحسوب وفقاً للمقطع الإجمالي للعنصر  $A$  والانقطاع أو التمزق (Rupture) المحسوب وفقاً للمقطع الصافي  $A_{net}$  له وفق الصيغة التالية (7):

$$N_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} = \frac{0.9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \end{array} \right. \quad (7)$$

تجدر الإشارة إلى أن الكود الأوروبي يعتمد صيغة واحدة، الصيغة (7)، لجميع أنواع وأشكال المقاطع العرضية (ماعدا المقاطع الزاوية الموصولة بساق واحدة)، ويتبين أنه يراعي تخفيض مقاومة التمزق بمقدار 10% فقط دون لحظ نوع وترتيبات الوصل المستخدم خلافاً للكود الأمريكي AISC 360-16, Table D3.1 الذي يراعي تفاصيل الوصل وأشكال المقاطع العرضية لتقدير التخفيض المناسب من خلال حساب معامل التأخر القصي ( $U$ ) المعطى مثلاً من أجل المقاطع العرضية CHS ذات الشقوق في نهاياتها والموصولة باستخدام اللحام المثلي في الشكل (13)

Round HSS with a single concentric gusset plate through slots in the HSS.	$l \geq 1.3D, U = 1.0$ $D \leq l < 1.3D, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
---	---	---

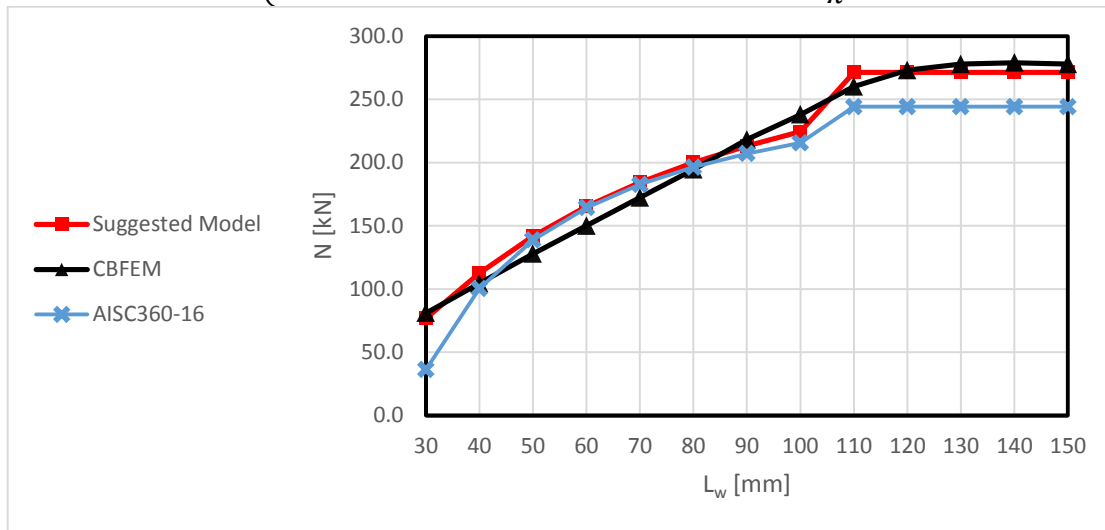
الشكل (13) - علاقة حساب معامل التأخر القصي للمقاطع CHS المشقوقه والملحومة في نهاياتها حسب الكود الأمريكي - AISC 360

16, Table D3.1

ومن خلال المقارنة بين نتائج التحليل باستخدام طريقة CBFEM والنتائج المحسوبة وفقاً لصيغ الكودين المذكورين، وباستخدام طريقة التحليل بالانحدار (Regression Analysis Method)، تم تطوير وتقييم علاقة حساب معامل التأخر القصي ( $U_{SI}$ ) من أجل الحالات المدروسة (العناصر CHS ذات الشقوق والملحومة) ليتم إدراجه بما يتناسب مع اعتبارات وأحكام الكود الأوروبي المذكور وفق الصيغة (8)، والتي تعطي قيمة ذات معامل اعتمادية (Determination Coefficient)  $R^2 = 0.983$  أعلى من القيم الناتجة عن اعتماد الصيغة المقترحة في الكود الأمريكي AISC 360-16 والمساوية  $R^2 = 0.95$ . يبين الشكل (14) المقارنة بين نتائج الموديل المقترح (العلاقة المقترحة)، ونتائج تطبيق صيغة الكود الأمريكي مع نتائج التحليل الدقيق باستخدام طريقة CBFEM.

$$N_{Rd} = \min \begin{cases} N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} = \frac{0.9U_{Sl}A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{with} \begin{cases} L_w \geq 1.3D \Rightarrow U_{Sl} = 1 \\ L_w < 1.3D \Rightarrow U_{Sl} = 0.22e^{1.75(1-\frac{\bar{X}}{L_w})}, \bar{X} = \frac{D}{\pi} \end{cases}$$



الشكل (14) - المقارنة بين نتائج الموديل المقترح ونتائج تطبيق صيغة الكود الأمريكي مع نتائج التحليل الدقيق باستخدام طريقة CBFEM.

### الاستنتاجات والتوصيات:

بحثت هذه الدراسة في تأثير التأخر القصي على مقاومة وصلات الأنابيب المعدنية ذات النهايات المشقوقة Slotted Steel CHS والملحومة مع صفائح معدنية (صفائح تجميع) لتسليط الضوء على أهمية ظاهرة التأخر القصي وضرورة أخذ تأثيرها في الحسبان عند تحقيق وتصميم العناصر المشدودة وفق اعتبارات الكود الأوروبي (EC3) الذي يتجاهل بشكل صريح تأثير هذه الظاهرة ولا سيما في الوصلات الملحومة. يقوم البحث بتقييم تأثير عوامل مختلفة بشكل رئيسي طول منطقة التراكم (طول منطقة الوصل) وقطر الأنابيب المعدنية الموصولة من خلال التحليل باعتماد طريقة العناصر المنتهية المعتمدة على طريقة المكونات Component-based Finite Element Method (CBFEM). كما تم في هذا البحث تطوير واقتراح علاقة لحساب قيمة معامل التأخر القصي ( $U_{Sl}$ ) وإدراجه في العلاقات المستخدمة لتحقيق هذه الوصلات وفق اعتبارات الكود الأوروبي، ويمكن تلخيص النتائج والملاحظات كما يلي:

- تثبت الأشكال (9) و(10) و(11) اختلاف توزيع الإجهادات في أجزاء المقطع العرضي حيث تتركز هذه الإجهادات بالقرب من مناطق الوصل باللحام وتتناقص كلما ابتعدت عنه، كما تثبت أيضاً أنه وبزيادة طول منطقة الاتصال إلى الحد المساوي لـ  $L_w > 1.3D$  فإن تأثير التأخر القصي يقل ويمكن إهماله تماماً، حيث يكون المعيار المتحكم بمقاومة هذه العناصر وقدرة تحملها هو معيار الخضوع والتلدين خارج منطقة الوصل.

- يؤكد الشكل (12) أنّ التأخر القصي يقل بزيادة قطر الأنابيب، كما أنّ تأثير قطر الأنابيب على مقاومة هذه الوصلات ينخفض عند تناقص طول الوصل ويكاد يهمل عند الوصول إلى الحد الأدنى المسموح وفق الكود الأوروبي  $\min(L_w) = 30 \text{ mm}$ .
- تمّ تطوير علاقة حساب معامل التأخر القصي ( $U_{sl}$ ) للحالات المدروسة (العناصر CHS ذات الشقوق والملحومة) ليتم إدراجه بما يتناسب مع اعتبارات وأحكام الكود الأوروبي المذكور وفق الصيغة (8)، وتجدر الإشارة إلى المجال الأوسع لتطبيق العلاقة المقترحة مقارنةً بالمجال المحدود ( $L_w \geq D$ ) الذي يشترطه الكود الأمريكي AISC 360-16 لحساب معامل التأخر القصي، حيث وبالرجوع إلى الشكل (14) وقيم معاملات الاعتمادية  $R^2$  وبالمقارنة مع نتائج التحليل الدقيق باستخدام CBFEM، يمكن التأكد من قدرة العلاقة المقترحة على التنبؤ بمقاومة الوصلات المذكورة بكفاءة أعلى من علاقة معامل التأخر القصي المعتمدة في الكود الأمريكي.

### References:

- [1] Canadian Institute of Steel Construction, Hollow Structural Section - Connections and Trusses, 1997, ISBN 0-88811-086-3, Canada.
- [2] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, July 7, 2016. AISC © 2016.
- [3] BS EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, 2005, European Committee for Standardization.
- [4] BS 5950: Part 1: 1990, Structural use of steelwork in building - Part 1, Code of practice for design in simple and continuous construction: hot rolled sections, Published in 1990.
- [5] The Syrian Arab Code For The Design And Implementation Of Steel Structures, First Edition, 2020, Damascus.
- [6] J.J.R. Cheng, H.A. Khoo, A. Lemenhe, Discussion of design provisions of welded tension members in design standards. Structural Engineering International, 2002, 12(3), 182-194.
- [7] W. S. EASTERLING, L. G. GIROUX, Shear Lag Effects in Steel Tension Members. Engineering Journal/American Institute of Steel Construction, 1993, 30(3), 85-90.
- [8] Chesson E., Jr, Munse, W. H., Riveted and Bolted Joints: Truss-Type Tensile Connections, 1963, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 89(ST1), pp. 67-106.
- [9] G. Abi-Saad, A. Benaddi, D. Bauer, Shear lag in tension member welded connections, 33<sup>rd</sup> Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2005, GC-246-1-10.
- [10] J. A. Packer, J. Wardenier, X. Zhao, A. Vegte, Y. Kurobane, Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, 2<sup>nd</sup> Edition, 2009, ISBN 978-3-938817-04-9.
- [11] Kıymaz G., Seçkin E., Strength and design of slotted and gusset plate welded tubular member connections in stainless steel. Paper presented at the Fourth International Experts Seminar on Stainless Steel in Structures, Ascot, UK, December 6-7, 2012.
- [12] Yang J., Chan T. M., Chan S. L., Numerical study of shear lag of high strength steel bolted and welded angles. In The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea, 2015 (pp. 25-29).
- [13] Ke K., Xiong Y.H., Yam M.C.H., Lam A.C.C., Chung K.F., Shear lag effect on ultimate tensile capacity of high strength steel angles, 2018, Journal of Constructional Steel Research 145 300-314 Elsevier.

- [14] M. Abedin, S. Maleki, N. Kiani, E. Shahrokhinasab, Shear Lag Effects in Angles Welded at Both Legs, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2019, Article ID 8041767, 10 pages.
- [15] M. A. Alhassan, Kh. M. Abdalla, M. E. AL-Shatnawi, Critical Evaluation of the Shear Lag Factor Provisions for W-Sections, 2020, *Frontiers in Built Environment*, 6, article 144.
- [16] B. Chandrakar, M. K. Gupta, S. Jaiswal, Distribution of shear lag and its significance in tensile capacity of steel angle section, 2023, Vol. 14, No. 3, 405-417.
- [17] IDEA StatiCa, Theoretical background of IDEA STATICA - MANUAL GUIDE, October 2017, [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com).