



جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية
الدراسات العليا

تقوية الجوائز الصفائحية المعدنية الحاوية على فتحات دائريّة ضمن الجسد باستخدام المدعّمات

دراسة أُعدت كمتطلب جزئي لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية

إساف :

الدكتور المهندس بشار سلوب

إعداد:

المهندس يعرب علي

2015

الملخص :

تستخدم الجوائز الصفائحية عندما تكون الحمولات الشاقولية المطبقة كبيرة ولا يمكن تحملها باستخدام المقاطع الفولاذية النظامية. يتم تنفيذ الفتحات في جسد الجوائز الصفائحية لأغراض خدمية واستثمارية واقتصادية متنوعة، وهذا ما يسبب انخفاضاً كبيراً في قدرة تحمل الجائز ، حيث لا يسمح باستخدام نظرية حقل الشد في صفيحة الجسد المفرغة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك الجوائز الصفائحية المفرغة بفتحات دائيرية متوضعة بشكل مركري ضمن صفيحة الجسد، حيث تم دراسة أثر كل من قطر الفتحة ونسبة نحافة الجسد وصلابة الجناح، تم أيضاً دراسة مجموعة من طرائق التدعيم (صفيحة، حلقة، مدعمات أفقية، مدعمات شاقولية، تدعيم متصالب، حلقة مع مدعمة قطرية متوضعة باتجاه تشكل حقل الشد، حلقة مع مدعمتين قطريتين بالاتجاهين)، لتحديد الطريقة الأفضل التي يمكن استخدامها استعادة قدرة تحمل الجائز المهدورة بسبب وجود الفتحات.

نفذت الدراسة بإجراء تحليل عددي لا خطى GMNIA يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة ووجود خطأ صنع هندسي مسبق وذلك باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعمل وفق طريقة العناصر المحدودة. حيث تبين من هذا البحث أن جميع طرائق التدعيم قادرة على زيادة قدرة تحمل الجائز المفرغ ولكن بنسب متفاوتة، وأن التدعيم بصفحة فولاذية (Flat) هي الطريقة الأكثر فعالية واقتصادية.

كلمات مفتاحية : الجوائز الصفائحية الفولاذية، نظرية العناصر المحدودة، الفتحات الدائرية في الجسد ، تحنيب القص، المدعمات، طرائق التقوية، دراسة بارامترية، حقل الشد.

شك وتقدير

عندما يكون للإهداء معنى .. وللشک فائدة ..

فهو لصاحب اليد البيضاء في إنجاز هذه الأطروحة ..

الدكتور المهندس : بشار سلحب

الذي أكّر مني مشكوراً باحتضان هذا العمل الذي سأغفر به طوال حياتي ..

فقد مر كل ما يملّك من وقت وجهد واهتمام .. وأغناه علمًا ومعرفة بأفكاره المميزة

ومنابعه الدائمة حتى أبصر النور .. له مني كل التقدير والاحترام ..

وفتقكم الله .. وأدام عليكم الصحة والعافية ..

الشك دائماً إلى كلية الهندسة المدنية في جامعة دمشق بقادرهما التعليمي والإداري

على رعايتها واهتمامها ..

إلى قدوتي الأولى و نبراسي الذي ينير دربي ..
إلى من كان فيض عطائه زادي لأقف على قدمي في معرك الحياة ..
إلى معلمي الأول ..

أبي الغالي

إلى شجرة الحب والحنان التي لا تذبل ..
إلى نبع المحبة الصافي ..

أمي الغالية

إلى من شاركوني أيام عمري بحلوها ومرها فأضفوا عليها الأمل والتفاؤل ..
إلى من أتنفسهم فرحا بين ضلوعي ..

أحبتني : معن ، زينب

إلى من يتسع لهم القلب .. ولا تتسع لذكرهم الصفحات ..

أقربائي ، أصدقائي

شكرا من القلب على محبتكم ودعمكم وتشجيعكم المستمر
المشاعر دائما أكبر من أن نسطرها في أوراق

فهرس المحتويات

I	.....	فهرس المحتويات
III	.....	فهرس الأشكال
VI	.....	فهرس الجداول
VII	.....	الرموز المستخدمة
الفصل الأول (المقدمة)		
1	.....	الفصل الأول (المقدمة)
2		1 – 1 الفولاذ و تطبيقاته
3		1 – 2 الجوائز الصفائحية
6		1 – 3 تحنيب القص
7		1 – 4 مرحلة ما بعد التحنيب ومفهوم حقل الشد
8		1 – 5 الفتحات في الجوائز الصفائحية
10		1 – 6 الهدف من إجراء هذا البحث
11		1 – 7 محتويات الأطروحة
الفصل الثاني (الدراسة المرجعية)		
12	.....	الفصل الثاني (الدراسة المرجعية)
13		1 – 1 مقدمة
13		2 – 2 الشروط المحيطية لصفحة الجسد
13		2 – 3 سلوك الجوائز الصفائحية المصمتة
19		2 – 4 سلوك الجوائز الصفائحية مفرغة الجسد
23		2 – 5 تأثير وجود الفتحة على قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحي
23		3 – 1 حالة الفتحات الدائرية – 2
26		3 – 2 حالة الفتحات المستطيلة
29		3 – 6 تقوية وتدعم الجوائز الحاوية على فتحات
34		3 – 7 سلوك الصفائح مدعمة الفتحات تحت تأثير قوة القص
الفصل الثالث (التحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة)		
37	.....	الفصل الثالث (التحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة)
38		1 – 1 مقدمة
38		1 – 2 توصيف التجربة
39		1 – 3 مواصفات المادة
39		2 – 4 مواصفات العنصر المستخدم في النمذجة
40		2 – 5 شروط الاستناد والتحميل ونوع التحليل
40		2 – 6 سوء الصنع والتلوهات الابتدائية
41		2 – 7 دراسة تأثير نعومة الشبكة
43		2 – 8 مقارنة النموذج مع الدراسة التجريبية
43		CP12 – 8 – 1 العينة
44		CP2 – 8 – 2 العينة

فهرس المحتويات

46	الفصل الرابع (الدراسة البارامتيرية)
47	1 - مقدمة 4
47	2 - تأثير نسبة قطر الفتحة إلى عمق الجسد 4
48	3 - تأثير صلابة الجناح 4
49	4 - تأثير نسبة نحافة الجسد 4
51	5 - تأثير طريقة التدعيم 4
52	5 - 1 - التدعيم بصفحة 4
53	5 - 2 - التدعيم بحلقة 4
55	5 - 3 - التدعيم بمدعمة شاقولية 4
56	5 - 4 - التدعيم بمدعمة أفقية 4
58	5 - 5 - التدعيم بمدعمة أفقية وشاقولية معاً (تدعيم متصالب) 4
60	5 - 6 - التدعيم بمدعمة حلقية ومدعمة قطرية واحدة باتجاه حقل الشد 4
62	5 - 7 - التدعيم بمدعمة حلقية ومدعمتين قطريتين بالاتجاهين 4
65	6 - تأثير عرض صفيحة التدعيم 4
67	الفصل الخامس (النتائج والتوصيات)
68	1 - النتائج 5
68	1 - 1 - النتائج التي تم الحصول عليها من عملية المذكرة والتحليل 5
68	1 - 2 - النتائج التي تم الحصول عليها من الدراسة البارامتيرية للجوائز الصفائحية المفرغة 5
69	1 - 3 - النتائج التي تم الحصول عليها من دراسة تقوية وتدعم الجوائز الصفائحية المفرغة 5
70	2 - توصيات عامة للدراسات والأبحاث المستقبلية 5
71	(المراجع المستخدمة)

فهرس الأشكال

2	استخدام الفولاذ في المبني	1 – 1
2	استخدام الفولاذ في الجسور	2 – 1
3	استخدام الجوانز الصفائحية في الجسور	3 – 1
4	أقسام الجائز الصفائحي	4 – 1
4	أنواع المقاطع العرضية للجوانز الصفائحية	5 – 1
5	تغير عرض وسمك صفيحة الجناح	6 – 1
5	زيادة سماكة صفيحة الجناح بطرق متعددة	7 – 1
5	زيادة ارتفاع صفيحة الجنادل في مناطق العزوم الأعظمية	8 – 1
6	تغير ارتفاع صفيحة الجنادل في الجسور القوسية	9 – 1
7	جوانز صفائحية ذات جسد نحيل وارتفاع كبير	10 – 1
7	تشكل حقل الشد في صفيحة الجنادل	11 – 1
8	تشكل حقل الشد في الجوانز الصفائحية بشكل يشبه الجائز الشبكي على شكل حرف (N)	12 – 1
8	الفتحات في الجوانز الصفائحية	13 – 1
9	استخدام الفتحات لإمداد الدكتات ومعدات التكيف	14 – 1
9	أشكال مختلفة من الفتحات	15 – 1
10	تأثير وجود الفتحة على شكل حقل الشد المتشكل في الصفائح المعدنية	16 - 1
13	توزيع العمل الانشائي بين أجزاء المقطع العرضي للجائز الصفائحي	1 – 2
14	العلاقة بين اجهاد القص الحرج q_w و q_{cr}	2 – 2
14	شكل تحنيب الصفيحة حسب الشروط المحيطية ونوع التحميل المطبق	3 – 2
15	سلوك الجوانز الصفائحية خلال مراحل التحميل وحتى حدوث الانهيار	4 – 2
17	مخطط حساب معامل تحنيب القص	5 – 2
18	المساهمات المكونة لقدرة تحمل الجائز الصفائحي	6 – 2
20	ميكانيكية انهيار الجوانز الصفائحية غير المفرغة	7 – 2
20	ميكانيكية انهيار الجوانز الصفائحية المفرغة	8 – 2
22	البعد الفعال لحقل الشد المتشكل في الجوانز الصفائحية مفرغة الجنادل	9 – 2
23	نموذج الاختبار لجائز صفائحي بجسد مفرغ بفتحات دائيرية	10 – 2
24	شكل الانهيار للصفيحة CP12	11 – 2
25	العلاقة بين قدرة التحمل القصوى للجائز وحجم الفتحة للتجربة التينفذها Narayanan & Rockey	12 – 2
26	نموذج الاختبار (الجائز الصفائحي بجسد مفرغ بفتحات مستطيلة)	13 – 2
27	شكل الانهيار للصفيحة RCP 8	14 – 2
28	العلاقة بين قدرة التحمل القصوى للصفائح والعامل b_0/d_0	15 – 2
29	طائق التدعيم التي اقترحها الكود البريطاني	16 – 2
29	طائق التدعيم التي اقترحها الكود الأوروبي	17 – 2
30	التدعيم المتصلب	18 – 2

فهرس الأشكال

30	طائق التدعيم التي اقترحها الكود الأمريكي	19 – 2
31	طائق التدعيم التي استخدمها Segner	20 – 2
31	طريقة التدعيم المستخدمة من قبل الباحث Pennock	21 – 2
32	طائق التدعيم بتغيير نقاط التثبيت	22 – 2
32	طائق التدعيم المستخدمة من قبل الباحث Sivakumaran	23 – 2
33	تدعيم فيرنيل	24 – 2
33	طائق التدعيم المستخدمة من قبل الباحث Chen	25 – 2
34	أبعاد الصفيحة والفتحة	26 – 2
34	تقسيم الصفيحة إلى ثلاثة مناطق	27 – 2
35	شكل الانهيار لأنواع مختلفة من التدعيم في صفيحة نسبة حافتها $d/t = 200$	28 – 2
36	العلاقة بين قياس التدعيم t_r والمقدرة القصبية القصوى للصفيحة	29 – 2
38	نموذج الاختبار	1 – 3
39	مخطط الاجهاد – التشوه لمادة الفولاذ المستخدمة	2 – 3
39	العنصر المحدد المستخدم في النمذجة	3 – 3
40	شروط الاستناد والتحميل لنموذج برنامج ABAQUS	4 – 3
41	النمط الأول لشكل تشوه سوء الصنع للعينة CP5	5 – 3
42	نوعة الشبكة حسب أبعاد العنصر المحدد المستخدم	6 – 3
43	العلاقة بين عدد عناصر شبكة صفيحة الجسد وحمولة الانهيار الموافقة	7 – 3
43	مخطط (الحملة – الانقال) للعينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والتجريبية	8 – 3
44	شكل انهيار العينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والدراسة التجريبية	9 – 3
44	الشكل المتشوه للعينة CP12 حسب نتائج برنامج ABAQUS	10 – 3
45	مخطط (الحملة – الانقال) للعينة CP2 حسب الدراسة التحليلية والتجريبية	11 – 3
45	شكل انهيار العينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والدراسة التجريبية	12 – 3
45	الشكل المتشوه للعينة CP2 حسب نتائج برنامج ABAQUS	13 – 3
48	العلاقة بين النسبة d_0/d وحمولة الانهيار	1 – 4
49	العلاقة بين النسبة T/Puo و b_f/Puv والنسبة	2 – 4
50	العلاقة بين النسبة t/d والنسبة Puo/Puv	3 – 4
52	نموذج الجدول المستخدم لتسجيل نتائج دراسة تدعيم الفتحات	4 – 4
52	التدعيم بـ صفيحة	5 – 4
53	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ صفيحة فولاذية	6 – 4
54	التدعيم بـ حلقة	7 – 4
54	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ حلقة	8 – 4
55	التدعيم بـ مدعمات شاقولية	9 – 4
55	مسافة التأثير الفعالة للمدعمة العرضية	10 – 4

فهرس الأشكال

56	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات شاقولية	11 – 4
57	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات أفقية	12 – 4
57	التدعيم بـ مدعمات أفقية	13 – 4
58	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات شاقولية وأفقية معاً (التدعيم المتصالب)	14 – 4
59	التدعيم بـ مدعمات شاقولية وأفقية (تدعيم متصالب)	15 – 4
59	مقارنة التدعيم المتصالب مع التدعيم بمدعمات أفقية فقط و مدعمات شاقولية فقط	16 – 4
60	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعة حلقة ومدعة قطرية باتجاه واحد معاً	17 – 4
61	التدعيم بمدعة حلقة ومدعة قطرية باتجاه واحد معاً	18 – 4
61	مقارنة التدعيم بحلقة ومدعة قطرية واحدة مع التدعيم المتصالب	19 – 4
62	نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعة حلقة ومدعمتين قطرتين بالاتجاهين	20 – 4
63	التدعيم بمدعة حلقة ومدعمتين قطرتين بالاتجاهين	21 – 4
63	مقارنة التدعيم بحلقة ومدعة قطرية واحدة مع التدعيم بحلقة ومدعمتين قطرتين	22 – 4
64	العلاقة بين سماكة المدعمة وقدرة التحمل القصوى للجازر المدعم	23 – 4
65	العينات المستخدمة في دراسة تأثير تغير h_r	24 – 4
66	العلاقة بين h_r وقدرة التحمل القصوى للجازر المدعم	25 – 4

فهرس الجداول

24	أبعاد العينات ونتائج الاختبار للتجارب التي نفذها Narayanan & Rockey	1 – 2
28	الأبعاد ونتائج الاختبار للتجارب التي نفذها Narayanan & Der Avanessian	2 – 2
42	حملة الانهيار المتغيرة حسب نوعية الشبكة	1 – 3
47	الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامتيرية لتأثير النسبة d_0 / d	1 – 4
49	الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامتيرية لتأثير صلابة الجناح	2 – 4
50	الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامتيرية لتأثير نسبة نحافة الجسم	3 – 4

الرموز المستخدمة

ارتفاع صفيحة الجسد للجائز الصفائحي	h, h_w
ارتفاع الصفيحة	d
سماكه صفيحة الجسد	t_w, t
اجهاد الخضوع للفولاذ المستخدم (المقاومة التصميمية)	p_y, f_y
اجهاد الشد الرئيسي في الصفيحة	σ_t^y
معامل تحنيب القص	k_τ
معامل يونغ	E
معامل بواسون	ν
معامل يتعلق بنسبة إجهاد الخضوع للفولاذ	ϵ
قطر الفتحة الدائرية المنفذة	d_h, d_0
هو إجهاد القص لصفيحة الجسد	q_w
هو إجهاد القص الحرج لصفيحة الجسد	q_{cr}
هو إجهاد القص المخفض بسبب وجود الفتحة	$(\tau_{cr})_{red}$
زاوية ميل حقل الشد بالنسبة للبعد الأفقي لصفيحة	θ
المسافة بين المفاصل اللذة المتشكلة في صفيحة الجناح	c
أبعاد الفتحة المستطيلة المنفذة ضمن صفيحة الجسد	$b_0 \times d_0$
عرض صفيحة الجسد	a
سماكه صفيحة الجناح	T
عرض صفيحة الجناح	b_f
حمولة الانهيار الناتجة عن الدراسة التجريبية	Pu_{EXP}
حمولة الانهيار الناتجة عن الدراسة التحليلية	Pu_{FEM}
قدرة التحمل القصوى في حالة الجائز مفرغ بفتحة دائرية	Puo
قدرة التحمل القصوى للجائز بنفس الأبعاد ولكن صفيحة الجسد غير مفرغة (مصممة)	Puv
سماكه المدعمة	t_r
عرض المدعمة	h_r
كمية التدعيم	t_r / t
قدرة تحمل الجائز المفرغ والمدعوم	$P_{ul(reinf)}$
قدرة تحمل الجائز غير المفرغ (سماكة المدعمة تساوي صفر)	$P_{ul(solid)}$
قوة القص لفعل فيرنديل	V_V
المقدرة العزمية لصفيحة الجناح	M_{pf}



الفصل الأول

المقدمة

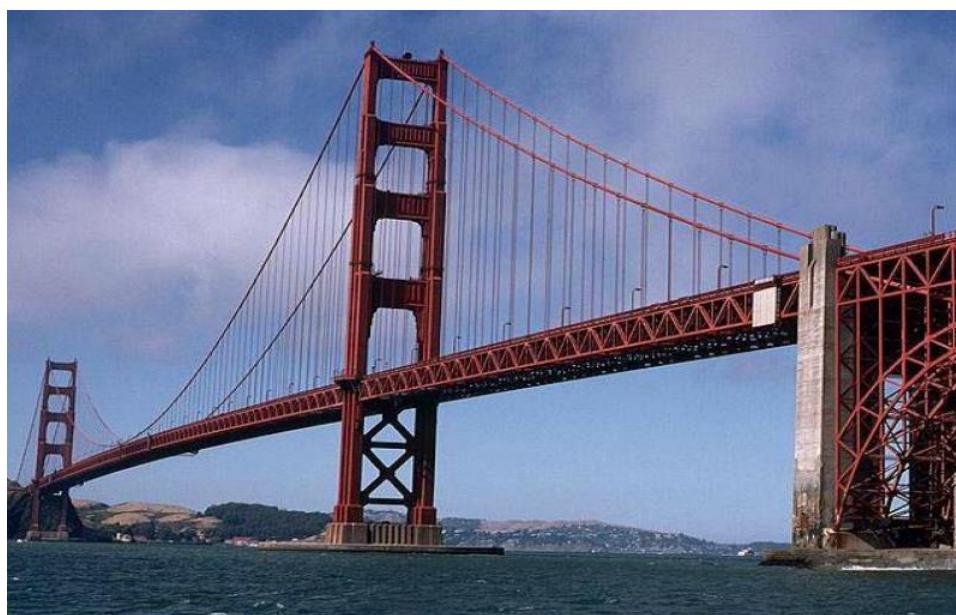
Introduction

١ - الفولاذ وتطبيقاته

عاماً بعد عام يثبت الفولاذ كمادة فعالة في أعمال البناء والتشييد، وذلك بسبب المزايا التي يتمتع بها، كالدلونة الكبيرة، وقدرة التحمل العالية مقارنةً مع الوزن، وخواصه المتباينة إذا ما تمت مقارنته بمواد البناء الأخرى الشائعة كالبليتون والخشب، وكذلك امتلاكه مخطط (الإجهاد - التشوه) متناظر، ما يعني أن قدرة الفولاذ على تحمل الإجهادات متساوية تقريباً في حالي التحميل (الشد والضغط)، يبين الشكلان (١ - ١) و (١ - ٢) تطبيقات استخدام الفولاذ في أنواع مختلفة من المنشآت.



الشكل (١ - ١) استخدام الفولاذ في المبني [Davison and Owens, 2003]



الشكل (١ - ٢) استخدام الفولاذ في الجسور [Abo-Hamid , 2007]

تُقسم العناصر الإنسانية الفولاذية حسب طريقة تصنيعها إلى نوعين رئيسيين : العناصر المدرفلة على الساخن وفيها تأخذ المقاطع الفولاذية الأبعاد و السماكات المطلوبة في درجات الحرارة العالية، حيث تعطى الشركات المصنعة جداول تصصيلية بأبعاد وخصائص هذه المقاطع، والعناصر المشكّلة على البارد حيث يتم تشكيل المقاطع المطلوبة في درجة حرارة الجو العادي.

و مع ازدياد المتطلبات المعمارية والاستثمارية بقي التحدي الأهم الذي يواجه المصمم هو إيجاد واستخدام عناصر إنسانية تعمل بكفاءة وفعالية عالية وذات وزن خفيف وكلفة تصنيع اقتصادية، فكانت الجوانز الصفائحية إحدى أهم هذه العناصر.

1 – 2 الجوائز الصفائحية

تستخدم الجوانز الصفائحية بشكل واسع في الأبنية ذات المجازات الطويلة، والمباني الصناعية، والجوائز الحاملة للرافعات الثقيلة، والجسور كما هو مبين في الشكل (1 – 3)، حيث تكون الحمولات في هذه المنشآت ضخمة وعزم الانعطاف قوى القص الناتجة عنها كبيرة وتفوق قدرة تحمل المقاطع النظمية المتوفرة.



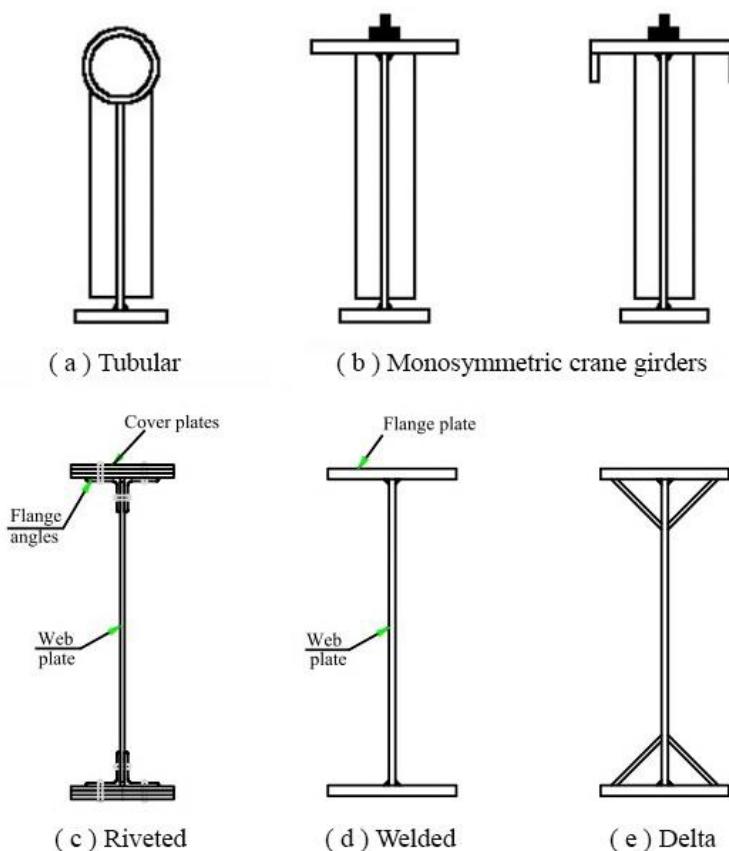
[Elwell et al. 2009] الشكل (1 – 3) استخدام الجوائز الصفائحية في الجسور

تصنع الجوائز الصفائحية ببساطة أشكالها من صفيحتين ملحوظتين إلى صفيحة الجسد لتشكل مجتمعة مقطع على شكل حرف (I) كما هو مبين في الشكلين (1 – 4) و (1 – 5)(d)، حيث يتم عادة وضع مدعمات عرضية شاقولية على طول الجائز لتقوية الجسد ومنعه من التهنيب الموضعي وزيادة قدرة تحمله لقوى القص. ويتم أيضاً في بعض الأحيان استخدام مدعمات عرضية أفقية عندما يكون عمق الجائز كبيراً.



[Tata Steel, 2012] الشكل (1 – 4) أقسام الجائز الصفائحي

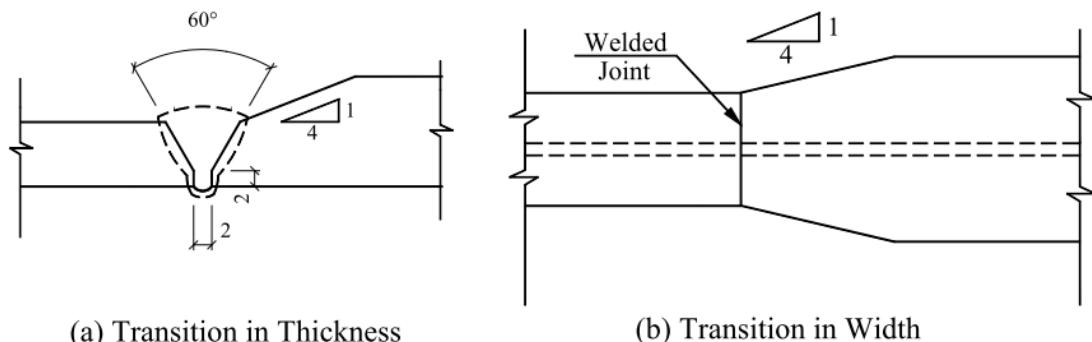
يوجد أشكال متنوعة للمقاطع العرضية كما هو مبين في الشكل (1 – 5), النوع (a) يكون فيه جناح الجائز عبارة عن عنصر دائري مفرغ, النوع (b) يمثل نماذج لقطع عرضي لجاز حامل للرافعة , النوع (c) يكون فيه الجناح مؤلف من صفائح, حيث يتتألف المقطع العرضي من صفية جسد موصولة بالبرشمة من طرفيها مع زاويتين وعلى الساق الأفقية للزاوية تستند صفية الجناح, النوع (d) وهو المقطع العرضي الملحم شائعاً الاستخدام, النوع (e) يكون فيه جناح المقطع على شكل حرف Δ .



[Abo-Hamid, 2007] الشكل (1 – 5) أنواع المقاطع العرضية للجوز الصفائحة

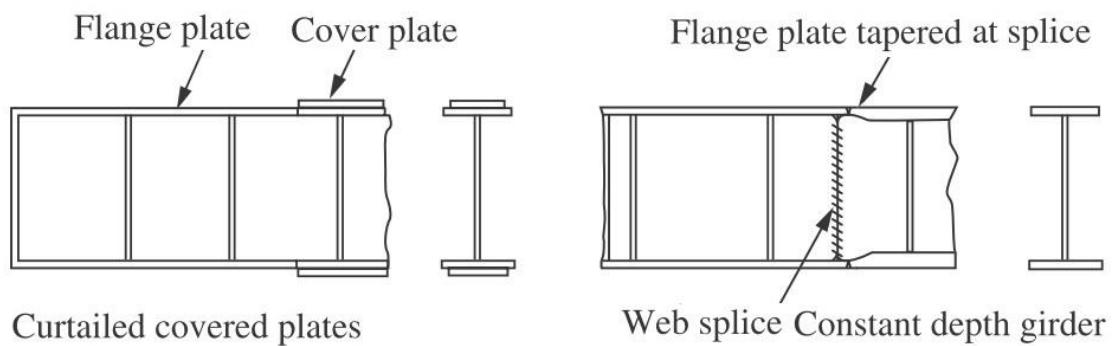
إن طريقة التصنيع السابقة تعطي المصمم مرونة كبيرة في تصميم الجائز الصفائحي واختيار أبعاد المقطع العرضي بما يؤمن القيام بالمهمة الإنسانية المطلوبة بأقل تكلفة ممكنة، فعندما تكون العزوم المطبقة منخفضة،

يمكن تقليل سماكة الجناح كما يظهر في الشكل (1 – 6) (a), أو تقليل عرض صفيحة الجناح كما هو مبين في الشكل (1 – 6) (b).

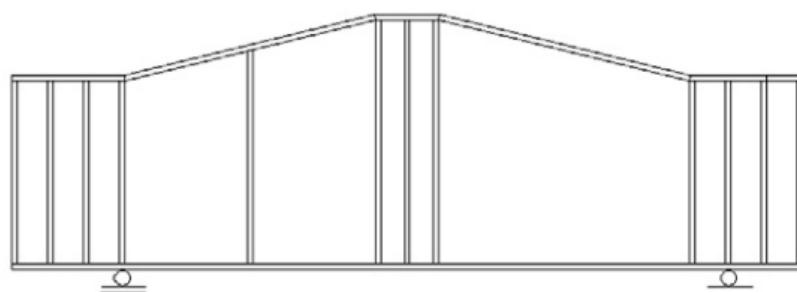


الشكل (1 – 6) تغير عرض وسماكة صفيحة الجناح [Abo-Hamid, 2007]

في المقابل يمكن في مناطق العزوم الكبيرة زيادة سماكتها كما يبين الشكل (1 – 7), أو استخدام صفيحة جسد متغيرة الارتفاع كما في الشكل (1 – 8) الذي يبين زيادة ارتفاع صفيحة الجسد لحالة الجوانز بسيطة الاستناد حيث يكون العزم أعظمي في منتصف المجاز.



الشكل (1 – 7) زيادة سماكة صفيحة الجناح بطرق متعددة [Lam et al, 2004]



الشكل (1 – 8) زيادة ارتفاع صفيحة الجسد في مناطق العزوم الأعظمية [Bedynek et al, 2013]

يمكن أيضاً زيادة سماكة صفيحة الجسد أو زيادة ارتفاعها في مناطق القص العالي كما في حالة الجسور الفوسيّة الشكل (1 – 9). ويمكن في حالات أخرى استخدام فولاذ ذو ماركة أعلى في مناطق محددة من الجائز.



الشكل (1 – 9) تغيير ارتفاع صفيحة الجسد في الجسور القوسية [Abo-Hamid, 2007]

١-٣ تحنيب القص :

عند استخدام الجائز الصفائي للتغطية المجازات الكبيرة، سيكون المقطع العرضي بأبعاد كبيرة وخصوصاً ارتفاع صفيحة الجسد كما يبين الشكل (1 – 10)، وهذا ما يؤدي غالباً إلى نسبة نحافة d/t عالية في صفيحة الجسد ويكون وبالتالي الجائز في أغلب الحالات عرضة لتحنيب القص حسب توصيات الكودات العالمية.

- **الكود البريطاني (BS 5950 : 2000 : 1)**: نص الكود في الفقرة 4.4.5.1 أنه يجب التتحقق من تحنيب القص في المقاطع الملحومة عندما تكون النسبة d/t أكبر من القيمة 62، حيث:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{275}{p_y(N/mm^2)}} , \quad t \text{ سماكة الجسد و } d \text{ ارتفاعه, } p_y \text{ المقاومة التصميمية للفولاذ.}$$

- **الكود الأوروبي (EN 1993-1-5 : 2004)**: نص الكود في الفقرة 5.1 أنه يجب التتحقق من تحنيب القص في الجوائز المعدنية ذات الجسد المدعم عندما تتجاوز النسبة h_w/t القيمة $\frac{31}{\eta}$ ، حيث:

ارتفاع الجسد, t سماكة الجسد، والعامل η يأخذ القيمة 1 عندما يكون نوع الفولاذ أكبر من

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y(N/mm^2)}} , \quad \eta = 1.2 \quad \text{حيث: } f_y \text{ المقاومة التصميمية S460}$$

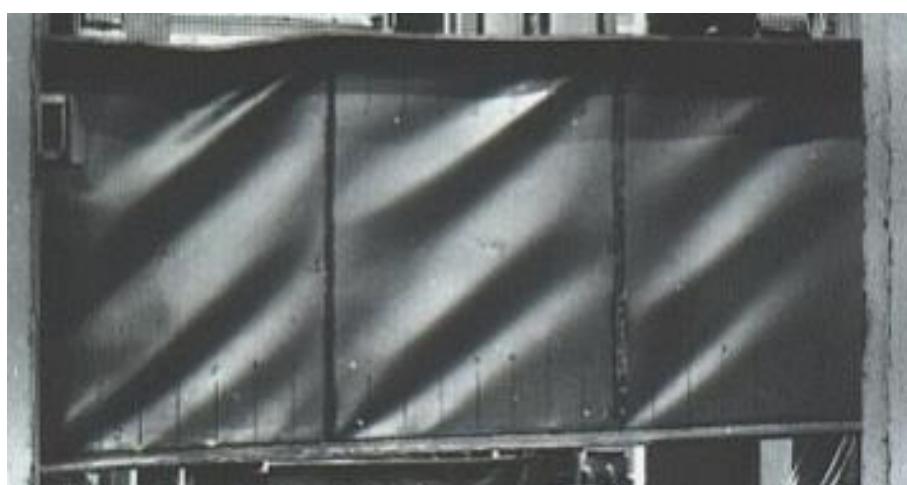
للفولاذ، k_t معامل تحنيب القص وتعلق قيمته بحسب شروط استناد الصفيحة ونوع المدعمات المستخدمة (طولية، عرضية) وكذلك بالنسبة a/h_w حيث a هي البعد بين المدعمات العرضية .



الشكل (1 – 10) جوائز صفائحية ذات جسد نحيل و ارتفاع كبير [Allerton Steel Ltd, 2012]

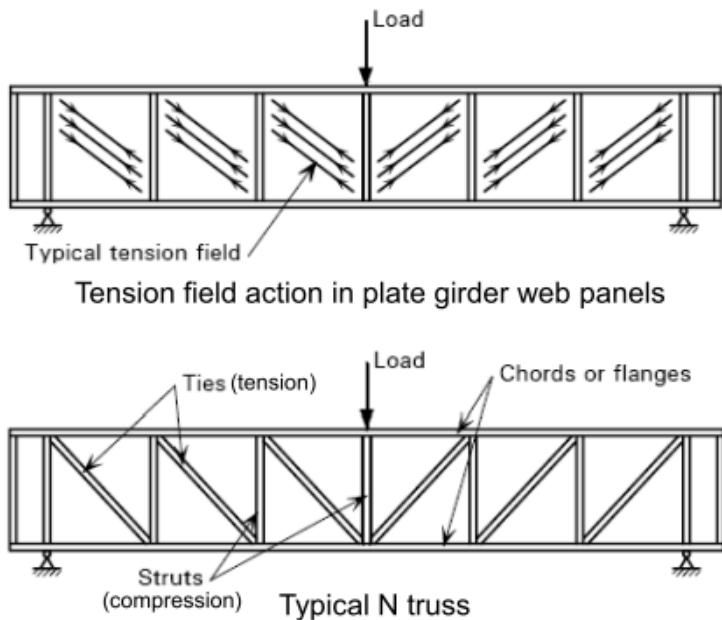
١ – ٤ مرحلة ما بعد التحنّب ومفهوم حقل الشد :

عندما يحصل التحنّب في جسد الجوائز الفولاذية - غير المزودة بمدعمات عرضية - بفعل قوة القص المطبقة فإنها تفقد قدرتها على مقاومة أي إجهادات إضافية، ولكن في حالة الجوائز الصفائحية الفولاذية فإن الصفيحة المؤطرة (web panel) المتشكلة بين المدعمات العرضيتين وبين الجناحين (صفيحة الجسد) يمكنها أن تبذل مقاومة إضافية للقص من خلال نشوء وتطور آلية تحمل جديدة تظهر على شكل إجهادات غشائية شديدة مائلة كما يبيّن الشكل (1 – 11).



الشكل (1 – 11) تشكّل حقل الشد في صفيحة الجسد [Narayanan 1983]

فيصبح عمل صفائح الجسد مشابها لعمل قضبان الشد القطيرية في الجوائز الشبكية على شكل حرف (N) كما يبيّن الشكل (1 – 12) أما المدعمات العرضية فتعمّل كالعناصر المعرضة إلى قوى ضغط.



الشكل (1 – 12) تشكل حقل الشد في الجوانز الصفائحية بشكل يشابه الجائز الشبكي على شكل حرف (N)

[Way and Salter, 2003]

١ - ٥ الفتحات في الجوانز الصفائحية :

يتم تنفيذ الفتحات في جسد الجوانز الفولاذية عموماً (ومنها الجوانز الصفائحية) كما يبين الشكل (1 – 13)، لنوادي خدمية واستثمارية عديدة كإمارات أنابيب التكييف والتلفنة ومعدات الصرف الصحي في المباني السكنية،



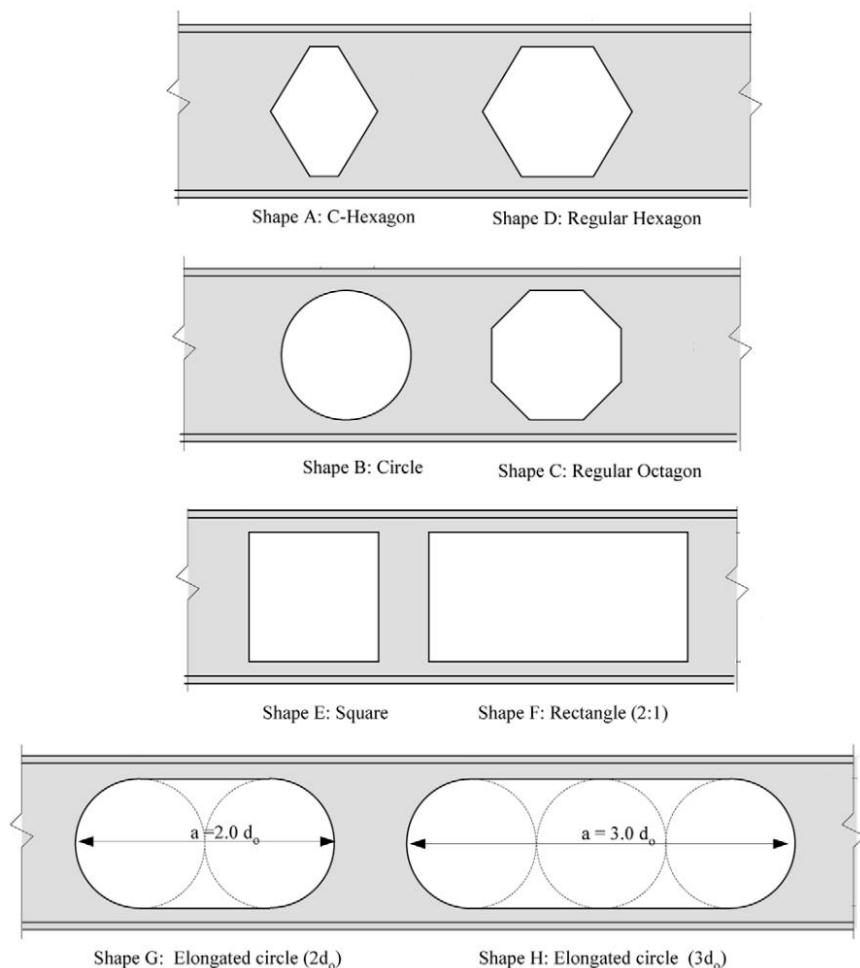
الشكل (1 – 13) الفتحات في الجوانز الصفائحية [ArcelorMittal, 2008]

حيث يكون الارتفاع الكبير عائقاً أمام تمرير هذه المعدات تحت الجائز، وهذا ما يعتبر أمراً مقبولاً ومرغوباً من الناحية المعمارية حيث يمكن الاستغناء عن الأسقف المستعارة بسبب المنظر الجذاب الذي يمكن تشكيله بواسطة أشكال مختلفة من الفتحات كما يبين الشكل (1 – 14)، كما يتم تنفيذ الفتحات لتسهيل أعمال الصيانة والتفتيش

في الجسور والطرق السريعة. أما من الناحية الاقتصادية فإن وجود الفتحات يخفف بالتأكيد من الوزن الذاتي للجائز وبالتالي يؤدي إلى اقتصادية مقبولة .



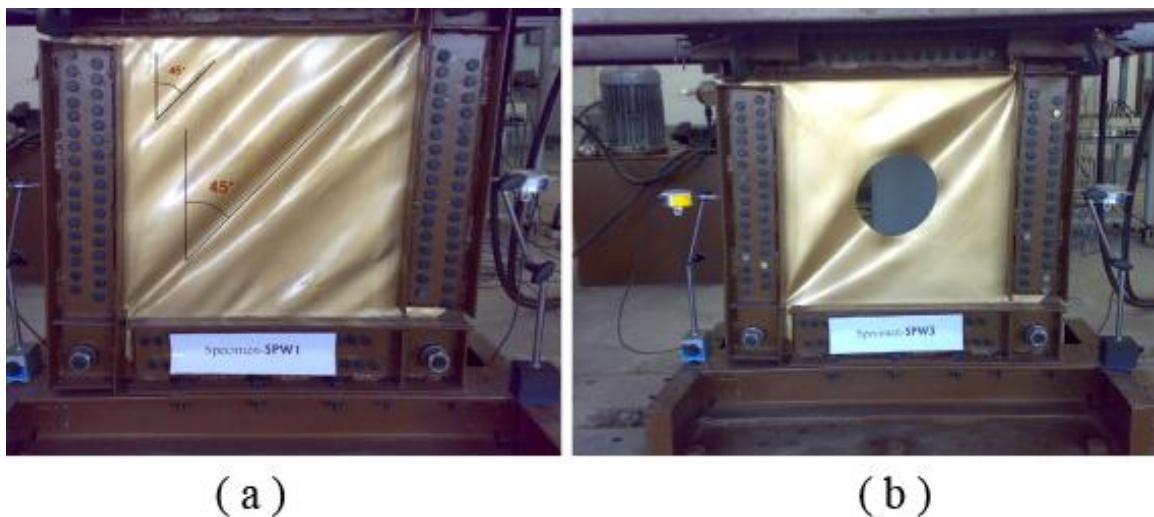
الشكل (1 – 14) استخدام الفتحات لإمداد الدهون ومعدات التكييف [ArcelorMittal, 2008]



الشكل (1 – 15) أشكال مختلفة من الفتحات [Chung et al. 2003]

يبين الشكل (1 - 15) أشكال مختلفة لتصاميم الفتحات، حيث أنه لا يوجد فعلياً معيار لتحديد و اختيار شكل الفتحة الأمثل، ولا يستخدم نوع محدد أو إلزامي للفتحات، لكن المصمم عادة ما يفضل اللجوء إلى الأشكال المنتظمة كالفتحات الدائرية والمستطيلة.

إن وجود الفتحات له تأثير سلبي على الجوانب الصفائحية وهذا التأثير يظهر في عدة جوانب أهمها : انخفاض طاقة التحمل القصوى للجائز، تغيير توزيع الاجهادات حول الفتحة وفي الجسم بشكل عام، وتغيير سلوك الجائز عند الانهيار. يبين الشكل (1 - 16) شكل حقل الشد المتشكل في صفيحة معدنية من دون فتحة (a)، وبوجود فتحة (b).



الشكل (1 - 16) تأثير وجود الفتحة على شكل حقل الشد المتشكل في الصفائح المعدنية
[Valizadeh et al . 2012]

اقترح الكود الأمريكي (AISI 2004) أنه يجب دراسة أثر وجود الفتحة عندما يتجاوز قطرها 14 mm ، وفي كثير من الحالات التي تتفذ فيها الفتحات لأغراض معمارية أو استثمارية فإن قطرها سيتجاوز تلك القيمة وهذا سيؤدي إلى انخفاض واضح في قدرة تحمل الجائز، ولتعويض هذا الفاقد من قدرة التحمل يتم استخدام التدعيم للمنطقة المجاورة للفتحة، حيث يوجد العديد من طرائق التدعيم الفعالة التي يمكن تنفيذها.

1 – 6 الهدف من إجراء هذا البحث :

إن عمق الجسم الكبير في الجوانب الصفائحية يفرض من الناحية المعمارية والاستثمارية وجود الفتحات، وفي حالات أخرى لنواحي اقتصادية تتعلق بتحفييف الوزن الذاتي وبالتالي تحقيق الوفر المادي، وحيث لا يسمح باستخدام نظرية حقل الشد في صفيحة الجسم الحاوية على فتحات، فهذا من شأنه التقليل الكبير من قدرة تحمل الجائز للحمولات، فيصبح بذلك الحل الإنساني باستخدام الجوانب الصفائحية مفرغة الجسم غير مناسب.

فتبدو الحاجة ملحة لإيجاد حل أمثل يحافظ من خلاله على وجود الفتحات وتحقق استفادة مقبولة من استخدام الجائز الصفائحى الفولاذى كحل إنسانى، وهذا الحل هو باستخدام التدعيم.

فيكون هدف هذا البحث هو دراسة سلوك الجوائز الصفائحية الفولاذية التي يحتوي جسدها على فتحات دائيرية مدعمة، ومقارنة طرائق تدعيم مختلفة، وتحديد أكثرها فاعلية وقدرة على استرداد الطاقة المفقودة من الجائز نتيجة وجود الفتحات.

حيث أنه أجريت بعض الدراسات والأبحاث حول تدعيم وتقوية الجوائز ذات الفتحات في الجسد ولكنها لم تتناول بشكل خاص موضوع تقوية الجوائز الصفائحية المفرغة، كما أنها لم تكن شاملة لجميع انواع الفتحات، ولم تدرس كل طرائق التدعيم الممكنة، وبالتالي لم يتحدد بشكل شامل ودقيق أكثر هذه الطرائق قدرة وفعالية في استرداد الطاقة المفقودة من قدرة تحمل الجائز.

1 – 7 محتويات الأطروحة :

تألف الأطروحة من خمسة فصول كما يلي :

الفصل الأول: ويتضمن مقدمة عامة عن الجوائز الصفائحية: أهميتها و مجال استخدامها، طريقة تصنيعها، الفتحات المصنعة ضمن الجسد، وكذلك الهدف من إجراء هذا البحث.

الفصل الثاني: ويتضمن دراسة مرجعية عن أهم الأبحاث والدراسات السابقة التي تناولت سلوك الجوائز الصفائحية مفرغة الجسد، وأثر البارامترات المختلفة على طاقة التحمل القصوى للجائز من خلال شرح بعض التجارب المنفذة، ومن ثم التطرق بشكل موسع لموضوع تدعيم الفتحات.

الفصل الثالث: ويتضمن نمذجة جائز صفائحي مفرغ بفتحات دائيرية باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعمل وفق طريقة العناصر المحددة، ومقارنة نتائج التحليل مع نتائج التجربة الواردة في الدراسة المرجعية للتحقق من صحة النموذج وصلاحته لتنفيذ الدراسة البارامترية.

الفصل الرابع: ويتضمن الدراسة البارامترية، حيث سيتم تغيير مجموعة من المتغيرات وبيان أثرها على قدرة تحمل الجائز مثل قطر الفتحة الدائرية و نسبة حنفية الحسد وصلابة الجناح، ومن ثم تطبيق طرائق مختلفة من التدعيم (صفيحة، حلقة، دعامات أفقية، دعامات شاقولية، تدعيم متصالب، التدعيم بحلقة ومدعمات قطرية) لاختيار وتحديد طريقة التدعيم الأفضل.

الفصل الخامس: ويتضمن النتائج التي تم الخلوص إليها من هذه الدراسة وكذلك التوصيات والمقترحات الواجبأخذها بعين الاعتبار في الدراسات والأبحاث المستقبلية.



الفصل الثاني

الدراسة المرجعية

Literature Review

2 – 1 مقدمة :

يهدف هذا الفصل إلى استعراض أبرز ما قام به الباحثون في مجال الجوائز الصفائحية الفولاذية المفرغة وغير المفرغة، وكذلك موضوع تدعيم وقوية الصفائح المفرغة والحلول التي قدمتها الكودات العالمية وأهم الدراسات التي اهتمت بهذا المجال. حيث تتنوع هذه الدراسات بين تجريبية تمت بتطبيق الحمولات وملاحظة التشوّهات الناتجة وتسجيل النتائج، وبين تحليلية اعتماداً على النمذجة باستخدام برامج العناصر المحددة المتنوعة.

2 – 2 الشروط المحيطية لصفيحة الجسد :

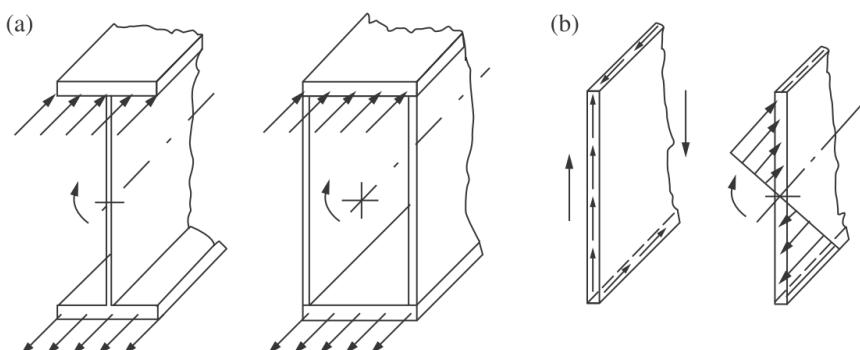
في المنشآت الفولاذية الصفائحية كجدران القص والجوائز الصفائحية يتم استخدام المدعمات العرضية لتخفييف تحنيب الجسد والحصول على تحمل أكبر في مرحلة ما بعد التحنّيب، ونتيجة لهذا الاستخدام فإن الجسد ينقسم إلى مجموعة من الصفائح المؤطرة بالمدعمات العرضية والجناحين.

يختلف الباحثون في اعتماد الشروط المحيطية المثالية عند دراسة قدرة تحمل الصفيحة الواحدة. فمثلاً اتجه الباحثان (Basler and Thurlimann (1959) لاعتبار أن الصفيحة تستند استناداً بسيطاً عند الأطراف، أما الباحثان (Chern and Ostapenko (1969) اعتبروا أن الصفيحة ذات أطراف موثوقة بشكل كامل، بينما اعتمد الباحثان (Sharp and Clark (1971) حداً وسطياً بين الاستناد الموثوق والاستناد المفصلي.

أجرى (Lee et al (1996) دراسة تحليلية موسعة شملت أكثر من 300 صفيحة فولاذية معرضة إلى إجهاد قص ذات شروط استناد محيطية متنوعة، وتوصل إلى أنه عندما نسبة سماكة الجناح إلى سماكة الجسد $t_f / t_w < 1$ فإن التمثيل الأكثر واقعية للشروط المحيطية لصفيحة الجسد هو باعتبارها ذات استناد بسيط، في حين أنه عندما $t_f / t_w > 2$ فإن شروط استناد صفيحة الجسد مع الجناح تكون أقرب إلى الاستناد الموثوق.

2 – 3 سلوك الجوائز الصفائحية المصمتة :

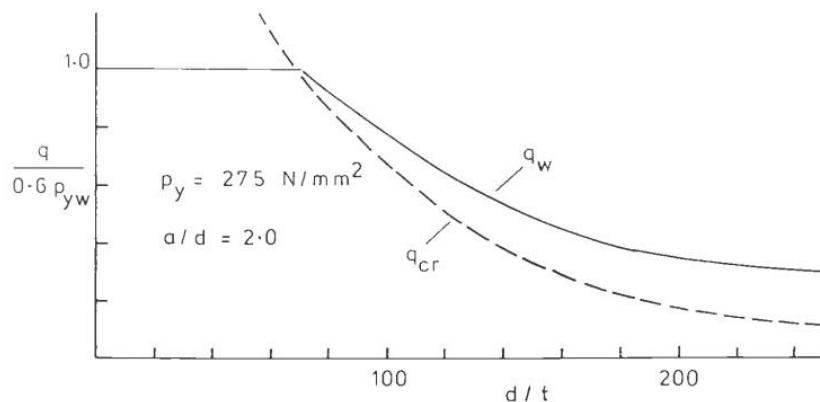
إن العمل الأساسي لصفيحة الجسد هو تحمل قوى القص وتأمين ذراع عزم التحمل وهو المسافة بين الجناحين العلوي والسفلي، بينما تقوم صفيحتي الجناح بتحمل قوى الشد والضغط الناتجة عن عزم الانعطاف كما هو مبين في الشكل (1 – 2).



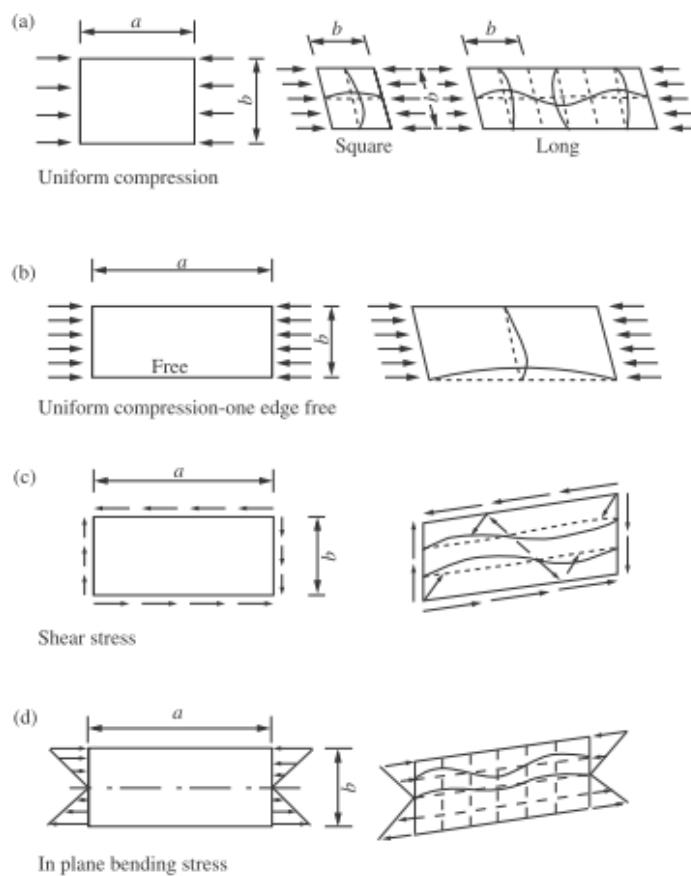
[Lam et al.2004] الشكل (2 – 1) توزيع العمل الانشائي بين أجزاء المقطع العرضي للجاز الصفائحى

عندما تتعرض العناصر أحادية البعد كالأعمدة إلى حمولة ضغط محوري فإن التحنّب يحدث مباشرة عند الوصول إلى إجهاد التحنّب الحرّج، بينما في حالة العناصر ثنائية البعد كالصفيحة فإنها تبقى مستقرة في مرحلة التحنّب وتبقى قادرة على مقاومة أحmal إضافية، تسمى هذه المقدرة الاحتياطية أو الإضافية التي تمتلكها الصفيحة بقدرة بما بعد التحنّب، يبيّن الشكل (2 - 2) العلاقة بين إجهاد القص الحرّج q_{cr} ، وإجهاد تحنّب الصفيحة q_w مع النسبة d/t .

القص لصفيحة الجسد q_w مع النسبة d/t



الشكل (2 - 2) العلاقة بين اجهاد القص الحرّج q_{cr} و q_w [Davison and Owens, 2003]

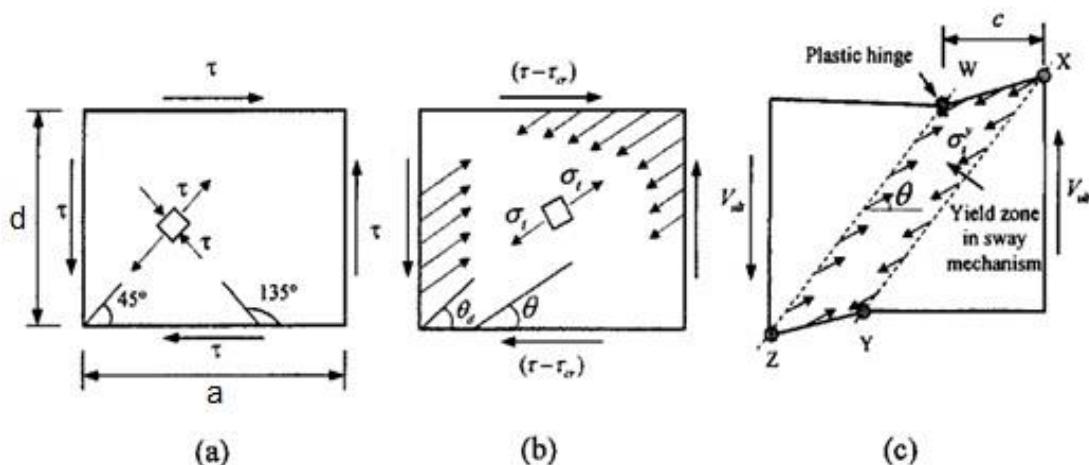


الشكل (2 - 3) شكل تحنيب الصفيحة حسب الشروط المحيطية ونوع التحميل المطبق [Lam et al. 2004]

يتغير شكل تحنيب الصفيحة ومقدار إجهاد التحنيب الحرج حسب أبعاد الصفيحة المدروسة وشروطها المحيطية، وكذلك حسب شكل الحمولة المطبقة. يوضح الشكل (2 - 3) شكل تحنيب الصفيحة عندما تتعرض إلى ضغط منتظم (2 - 3) (a), وإلى ضغط منتظم بوجود طرف حر واحد (2 - 3) (b), وعندهما تتعرض إلى قوى قص الشكل (2 - 3) (c), وعندهما تكون معرضة إلى إجهاد انعطاف مطبق في مستوى الصفيحة كما في الشكل (2 - 3) (d).

فعندما يتعرض الجائز الصفائحي إلى حمولة قص متزايدة باستمرار فإن سلوكه الإنسائي يمكن تقسيمه إلى ثلاثة مراحل:

- مرحلة الاجهادات الرئيسية (مرحلة ما قبل حدوث التحنيب)، وفيها لا يكون الجائز قد وصل بعد إلى مرحلة التحنيب، فتتعرض صفيحة الجسد إلى إجهادات ضغط وشد رئيسية متساوية، كما هو مبين في الشكل (2 - 4) (a).
- مرحلة ما بعد التحنيب، حيث لا زيادة تحدث في إجهادات الضغط ولكن يحدث إعادة توزيع للإجهادات في الصفيحة، ويلاحظ تطور وتشكل إجهادات غشائية شادة مائلة (حقل الشد) كما هو مبين في الشكل (2 - 4) (b).
- ومع استمرار عملية التحميل وازدياد الحمولة يحدث سيلان وخصوصاً لفولاذ الصفيحة تحت تأثير مشترك من حقل الاجهادات الغشائية واجهاد القص في مرحلة ما بعد التحنيب وتنهار صفيحة الجسد بتشكل أربعة مفاصل لينة في الجناحين كما يبين الشكل (2 - 4) (c).



الشكل (2 - 4) سلوك الجوائز الصفائحية خلال مراحل التحميل وحتى حدوث الانهيار

[Shanmugam, 2003]

طور (Basler 1961) أول طريقة رياضية تحليلية لحساب مقدرة ما بعد التحنّب للصفائح بسيطة الاستناد في جميع الأطراف والعرضة إلى حمولات قص، وحظيت هذه الطريقة بقبول واهتمام المعهد الأمريكي للمنشآت الفولاذية فتبناها واعتمدتها في الكود (AISI 1963)، وفيها يتم حساب قيمة إجهاد القص المرن الحدي للصفائح الصلدة العرضة إلى قوة قص صافية بشكل يواافق المعادلة البسيطة التي وضعها الباحثان Timoshenko and Gere (1961)، والتي تعطى بالشكل التالي :

$$(1 - 2) \quad \tau_{cr}^{solid} = k^{solid} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \times \left(\frac{t_w}{h} \right)^2$$

حيث τ_{cr}^{solid} هو إجهاد القص الحرج للصفائح المصمتة، t_w هو مقدار سماكة الصفيحة، a هو عرض الصفيحة، h هو ارتفاع الصفيحة، E هو معامل يونغ، ν هو معامل بواسون، k^{solid} معامل تحنيب القص وهو مقدار لا يتعلّق بكل من طريقة تطبيق الحمولة، ومعامل شكل الصفيحة $\alpha = a/d$ ، وشروط الاستناد المحيطية، ويتم حسابه من المعادلين (2 - 2) و (2 - 3) في حال كانت الصفيحة تستند استناد بسيط من جهاتها الأربع (s = simple).

$$(2 - 2) \quad k_s^{solid} = 5.34 + \frac{4}{\alpha^2}, \quad \alpha \geq 1$$

$$(3 - 2) \quad k_s^{solid} = 4 + \frac{5.34}{\alpha^2}, \quad \alpha < 1$$

أما عندما تكون الأطراف الأربع لصفيحة الجسد في حالة استناد موثوق (f = fixed)، يتم حساب قيم معامل تحنيب القص من المعادلين (2 - 4) و (5 - 2) :

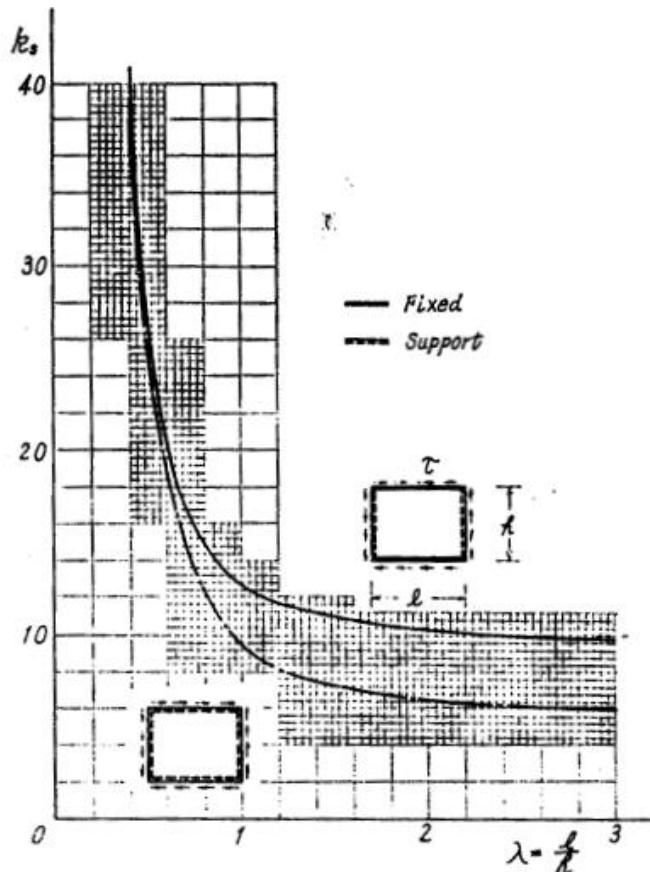
$$(4 - 2) \quad k_f^{solid} = 8.98 + \frac{5.61}{\alpha^2}, \quad \alpha \geq 1$$

$$(5 - 2) \quad k_f^{solid} = 5.61 + \frac{8.98}{\alpha^2}, \quad \alpha < 1$$

اعتبر الباحث (Fujii 1967) أن صفيحة الجسد ذات استناد موثوق من جهة الأجنحة فقط، في حين أنها ذات استناد بسيط مع المدعمات العرضية (sf = simple & fixed)، وقام برسم المخطط المبين بالشكل (5 - 2) لحساب قيمة معامل تحنيب القص، وقام لاحقاً (Bulson 1970) بتحويله إلى العلاقات الرياضية (2 - 6) (7 - 2) كما يلي :

$$(6 - 2) \quad k_{sf}^{solid} = 8.98 + \frac{5.61}{\alpha^2} - \frac{1.99}{\alpha^3}, \quad \alpha \geq 1$$

$$(7-2) \quad k_{sf}^{solid} = \frac{5.34}{\alpha^2} + \frac{2.31}{\alpha} - 3.44 + 8.39 \times \alpha, \quad \alpha < 1$$



الشكل (2 – 5) مخطط حساب معامل تحنيب القص [Fujii, 1967]

أما في الواقع فإن شروط الاستناد الطرفية لصفحة الجسد مع صفيحتي الجناح ليست بسيطة تماماً ولا موثوقة بشكل كامل، ولكنها حالة بين تلك الحالتين وهي النتائج التي حصل عليها (Lee et al. 1996) من دراسته العددية الموسعة، والتي خلص منها إلى العلاقتين :

$$(8-2) \quad k_{sf}^{solid} = k_s^{solid} + \frac{4}{5} \times \left(k_{sf}^{solid} - k_s^{solid} \right) \left[1 - \frac{2}{3} \times \left(2 - \frac{t_f}{t_w} \right) \right], \quad \frac{1}{2} < \frac{t_f}{t_w} < 2$$

$$(9-2) \quad k_{sf}^{solid} = k_s^{solid} + \frac{4}{5} \times \left(k_{sf}^{solid} - k_s^{solid} \right), \quad \frac{t_f}{t_w} > 2$$

حيث أن t_f سماكة الجناح، أما k_{sf}^{solid} ، k_s^{solid} فهما معاملات القص كما تم حسابها في المعادلات أعلاه.

يتم حساب القدرة القصية الحدية للجائز الصفائحي V_{ult} باعتبارها ملوبة من ثلاثة مساهمات كما هو مبين في الشكل (2 – 6), أولاً مساهمة المقدرة القصية المرنة للجائز V_{cr} المبينة في الشكل (2 – 6) (a), والمساهمة الإضافية التي يسببها تشكل حقل الشد في مرحلة ما بعد التحنيب V_t الشكل (2 – 6) (b), وتعلق هذه المساهمة بالدرجة الأولى بمدى ثبات حقل الشد المتتشكل واستمراريته خلال عملية التحميل، وهذا الأمر يعتمد على العناصر المحيطة بصفحة الجسد (الجناحين والمدعمات العرضية)، حيث نحصل على أكبر قيمة لمقدرة ما بعد التحنيب عندما يكون محيط الصفحة صلدا تماما، وأخيراً مساهمة الجناحين كما هو مبين في الشكل (2 – 6) (c)، تعطى العلاقة بالشكل :

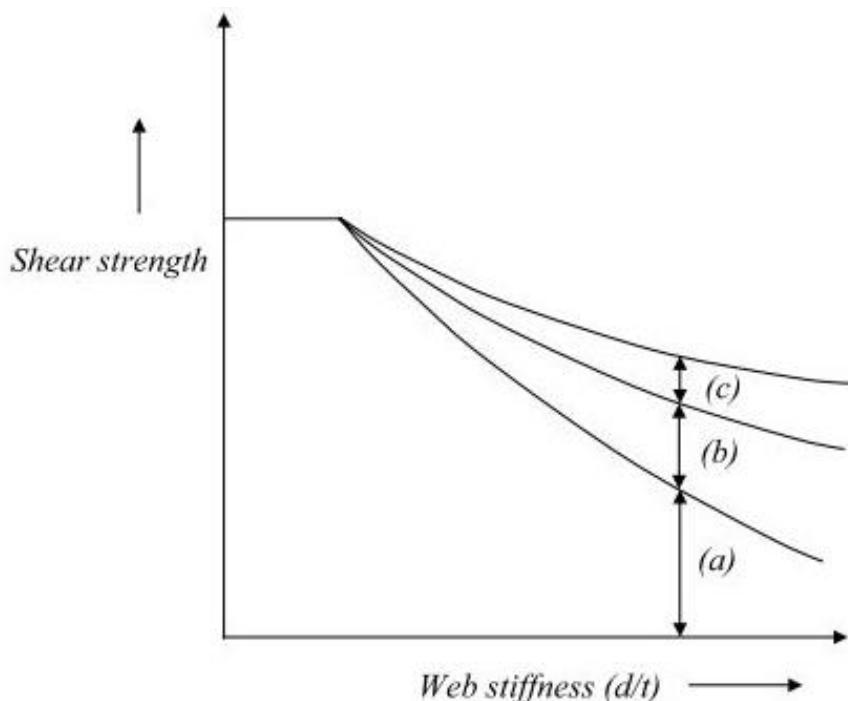
$$(10 - 2) \quad V_{ult} = q_{cr}.d.t + p_{yt}.t.\sin^2 \theta.(d.\cot \theta - a + c) + 4 \frac{M_{pf}}{c}$$

حيث أن p_{yt} الإجهاد الناجم عن حقل الشد، c هي المسافة بين المفاصل اللدنة والمبنية بالشكل (2 – 4) (c)

و يتم حسابها من العلاقة $M_{pf} = \frac{b_f.T^2}{4} \times p_{yf}$ المقدرة العزمية لصفحة الجناح، حيث أن $c = \frac{2}{\sin \theta} \times \sqrt{\frac{M_{pf}}{p_{yf}.t}}$

الجناح، حيث $b_f \times T$ هي أبعاد صفيحة الجناح، p_{yf} إجهاد الخضوع لصفحة الجناح، θ زاوية ميل حقل الشد

$$\theta \cong \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \left(\frac{d}{a} \right)$$



الشكل (2 – 6) المساهمات المكونة لقدرة تحمل الجائز الصفائحي [Narayanan et al. 2011]

2 – 4 سلوك الجوائز الصفائحية مفرغة الجسد :

أجرى الباحثان (1977) Uenoya and Redwood مجموعة من التجارب على صفائح مفرغة بفتحات دائيرية مختلفة الأقطار وبحالتي الاستناد البسيط والاستناد الموثوق, فوجدوا أن إجهاد التحنّب للصفائح المعرضة لقوى قص صافية تتناقض بشكل مستمر مع ازدياد قطر الفتحة المنفذة.

وجد الباحث (1996) Lee et al أن تأثير الفتحات على الصفائح الفولاذية يتعلّق بمجموعة من العوامل أهمها مقاس الفتحة وشكلها ومكان تواجدها ضمن الصفيحة وكذلك عدد الفتحات ضمن الصفيحة المدروسة.

قام الباحث (2009) Chen بدراسة موسعة على الصفائح الفولاذية المفرغة بفتحات مربعة وذلك اعتماداً على الكود الأمريكي (2007) AISI الذي يعتبر الشروط المحيطية للصفيحة بسيطة الاستناد، وكان من نتائج هذه الدراسة أن وجود الفتحات يضعف من مقدرة الصفيحة بشكل واضح، وأن الأكثر تأثيراً هو مقاس أو حجم الفتحة، كما أن المقدرة تنخفض مع ازدياد نسبة نحافة الصفيحة وكذلك مع ازدياد عامل شكل الفتحة ولكن بنسبة أقل.

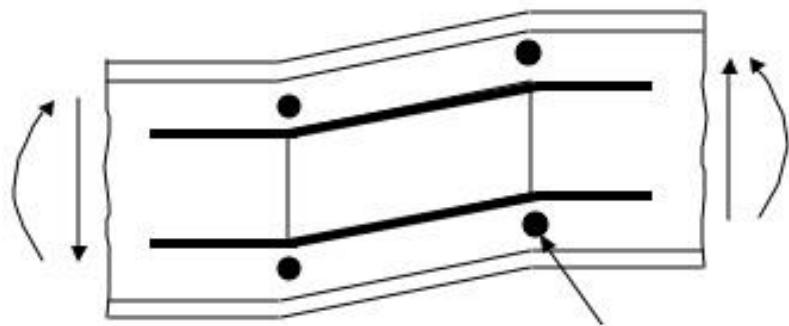
قام الباحث (1971) Hoglund بتقديم أول بحث حول الجوائز المفرغة نحيلة الجسد، حيث قام بدراسة تجريبية موسعة على مجموعة جوائز صفائحية مفرغة بفتحات دائيرية ومستطيلة، ومعرضة إلى حمولات متنوعة، تتراوح نسب النحافة لصفحة الجسد d/t بين (200 ، 300) ، ما يعني حدوث التحنّب في هذه الجوائز قبل حدوث الانهيار. وكان من أهم النتائج التي حصل عليها، هي أن الجوائز المفرغة بالفتحات الموجودة في مناطق القص العالي تنهار عند حمولات أقل بشكل واضح عن الحمولات التي تنهار عندها الجوائز المفرغة بفتحات موجودة في مناطق العزم العالي والقص المنخفض. وهذا ما يدل على الأهمية الكبيرة لمفهوم تحنيب القص في الجوائز الصفائحية مفرغة الجسد.

قام لاحقاً (1983) Narayanan بتنفيذ مجموعة من التجارب على جوائز صفائحية مفرغة الجسد تتراوح نسبة نحافتها بين (150 → 250)، وعامل الشكل لها أكبر من 1 ، حيث لاحظ من خلال دراسته النقاط التالية:

- عند تحميل الجوائز الصفائحية التي تحتوي على فتحات دائيرية أو مستطيلة، فإن الجوائز التي تحتوي على فتحات في مناطق القص العالي تنهار عند حمولات أقل بشكل واضح من تلك التي تحتوي على فتحات في مناطق العزم العالي.

- في حالة الفتحات الدائرية فإن مقدرة القص الحدي للجسد تنخفض بشكل خطى تقريباً مع ازدياد قطر الفتحة المنفذة.

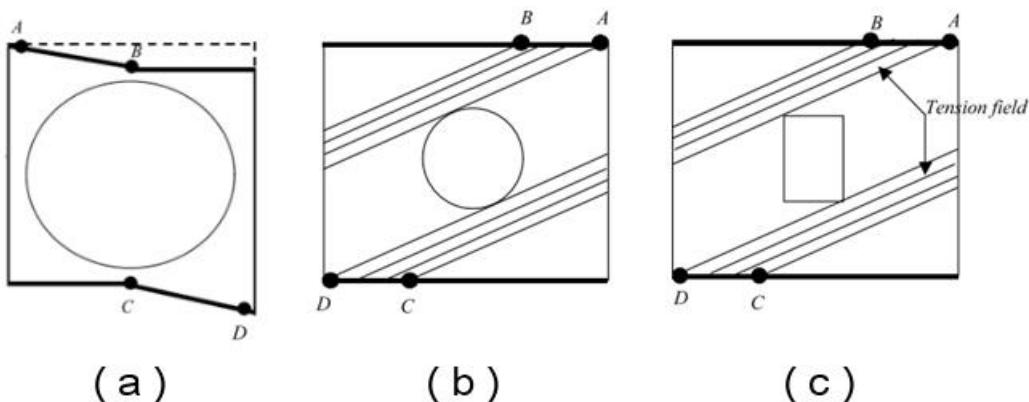
- ميكانيكية الانهيار للجوائز الصفائحية مفرغة الجسد مشابهة تقريباً لميكانيكية انهيار الجوائز الصفائحية غير المفرغة والمبنية في الشكل (2 – 7)، حيث يكون الاختلاف الوحيد هو في المكان الذي تظهر فيه المفاصل اللينة في صفيحتي الجناح تحت تأثير فعل حقل الشد المتشكل ضمن صفيحة الجسد.



Plastic hinge formed in the web

[Narayanan et al. 2011] الشكل (2 - 7) ميكانيكية انهيار الجوانب الصفائحية غير المفرغة

فعدما يكون قطر الفتحة مساوي تقريبا لعمق صفيحة الجسد، فإن المفصلين اللذين الداخليين يتشكلان في منتصف صفيحة الجناح كما يبين الشكل (2 - 8) (a)، ويكون سلوك الصفيحة مشابه لسلوك جائز الفيرنديل. في حين أنه عندما تكون أبعاد الفتحة صغيرة نسبيا، يلاحظ أن المفاصل الداخلية (C , B) تتشكل في المنطقة التي تتعرض إلى عزم انعطاف أعظمي وقوة قص متساوية إلى الصفر كما هو مبين في الشكل (2 - 8) (b) (2 - 8) (c) لحالة الفتحات المستطيلة.



[Narayanan et al. 2011] الشكل (2 - 8) ميكانيكية انهيار الجوانب الصفائحية المفرغة

وضع الباحثان (1984) Narayanan and Der-Avanessian المعادلة التي يمكن من خلالها حساب مقدار إجهاد القص الحرج لصفحة مفرغة بفتحة دائرية و معرضة إلى حمل قص صافي، وهي مشابهة تماما من حيث الشكل للمعادلة الخاصة بحساب قيمة الإجهاد الحرج لصفحة مصممة وتعطى بالعلاقة:

$$(11 - 2) \quad q_{cr}^{opening} = k^{opening} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \times \left(\frac{t_w}{h} \right)^2$$

حيث $q_{cr}^{opening}$ هو إجهاد القص الحرج للصفائح المفرغة، أما $k^{opening}$ فهو معامل تحنيب القص المعدل حسب تأثير الفتحة، ويتم حسابه كنسبة من العامل k^{solid} كما يلي :

حالة الفتحات الدائرية :

• عندما $d_h / h \leq 0.5$

$$(1 - 12 - 2) \quad k^{opening} = k^{solid} \times \left(1 - \alpha_c \times \frac{d_h}{\sqrt{h^2 + d_h^2}} \right)$$

• عندما $d_h / h > 0.5$

$$(2 - 12 - 2) \quad k^{opening} = k^{solid} \times \left(1 - \frac{d_h}{h} \right)$$

حيث d_h هو قطر الفتحة, α_c معامل خاص بالفتحة الدائرية ويأخذ القيمة 1.8 في حالة الاستناد البسيط للصفيحة, والقيمة 1.5 في حالة الاستناد الموثوق.

حالة الفتحات المستطيلة :

• عندما $(d_0 / h \leq 0.5) \& (b_0 / h \leq 0.5)$

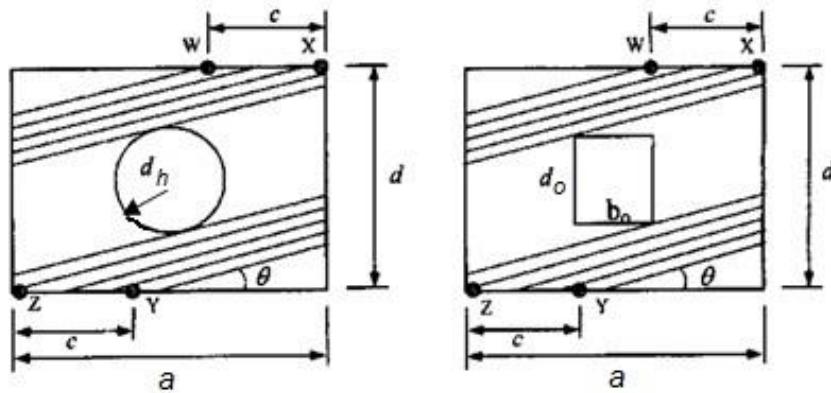
$$(3 - 12 - 2) \quad k^{opening} = k^{solid} \times \left(1 - \alpha_r \times \frac{A_{opening}}{A} \right)$$

• عندما $(d_0 / h > 0.5) \& (b_0 / h > 0.5)$, فإن $k^{opening}$ تأخذ القيمة الأكبر من القيمتين التاليتين:

$$(4 - 12 - 2) \quad k^{opening} = k^{solid} \times \left(1 - \frac{d_0}{h} \right), \quad k^{opening} = k^{solid} \times \left(1 - \frac{b_0}{h} \right)$$

حيث d_0 هو ارتفاع الفتحة, b_0 هو عرض الفتحة, $A_{opening} = d_0 \times b_0$ وهي مساحة الفتحة, $A = h \times a$ وهي مساحة الصفيحة, α_r معامل خاص بالفتحة المستطيلة ويأخذ القيمة 1.5 في حالة استناد الصفيحة بسيط, والقيمة 1.25 في حالة الاستناد الموثوق.

قام (Narayanan and Der Avanessian 1983) كذلك بتطوير نظرية حقل الشد وإدخال تأثير هذا المفهوم ليشمل وجود الفتحات, وتمكنوا من ايجاد معادلات توازن تقريبية لحساب قدرة تحمل الجوانز الصفائحية المفرغة بفتحات دائرية أو مستطيلة متوضعة بشكل مركزي أو غير مركزي ضمن صفيحة الجسد بحيث افترضوا أن الحمولات المطبقة في مرحلة ما بعد التحنّي يتم مقاومتها بإجهادات غشائية قطرية عرضها الفعال c يتعلق بأبعاد الفتحة كما هو مبين في الشكل (2 - 9).



الشكل (2 – 9) البعد الفعال لحقل الشد المتشكل في الجوانز الصفائحية مفرغة الجسد

[Shanmugam, 2003]

وأعطيت المعادلة (2 – 13) لحساب قدرة التحمل القصوى للجائز الفرغ بفتحة دائيرية متوضعة بشكل مركزى قطرها d_h , والمعادلة (14 – 2) لحالة الفتحة المستطيلة أبعادها $(b_0 \times d_0)$.

$$V_{ult} = (\tau_{cr})_{red} dt + \sigma_t^y t \sin^2 \theta [2c + d(\cot \theta - a/d)] - \sigma_t^y t d_h \sin \theta \quad (13 - 2)$$

$$V_{ult} = (\tau_{cr})_{red} dt + \sigma_t^y t \sin^2 \theta [2c + d(\cot \theta - a/d)] - \sigma_t^y t \sqrt{b_0^2 + d_0^2} \sin \theta \sin(\alpha + \theta) \quad (14 - 2)$$

τ_{cr} هو إجهاد القص المخفض بسبب وجود الفتحة , b , d , t هي أبعاد صفيحة الجسد المدروسة, θ هي

زاوية ميل حقل الشد بالنسبة للبعد الأفقي لصفحة وتحسب من العلاقة $\sigma_t^y, \theta = \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \left(\frac{d}{a} \right)$ هو قيمة اجهاد الشد الرئيسي المتشكل في الصفيحة نتيجة الحمولات المطبقة, $\alpha = \text{arc tan} (b_0 / d_0)$.

كما يتم بشكل تقريري مبسط حساب المقدرة القصوية لصفحة الجسد المفرغة بفتحة دائيرية قطرها d_h , باعتبار العلاقة خطية بين المقدرة القصوية لصفحة الجسد المصمتة $V_w = \tau_{wy} \times A_w$, وبين المقدرة القصوية لفعل

فيرانديل $V_V = \frac{8M_p}{a}$, والذي يحدث عندما قطر الفتحة المنفذة يقترب من مساواة عمق صفيحة الجسد كما يبين الشكل (2 – 8) (a), حيث أن M_p هي العزم اللدن لصفحة , a عرض صفيحة الجسد بين المدعنتين الشاقوليتين. وبالتالي عندما قطر الفتحة المنفذة أقل من d , يتم حساب المقدرة القصوية القصوى من العلاقة (15 – 2) .

$$(15 - 2) \quad V_{ult} = V_V + \left(\frac{V_w - V_V}{d} \right) \times (d - d_h)$$

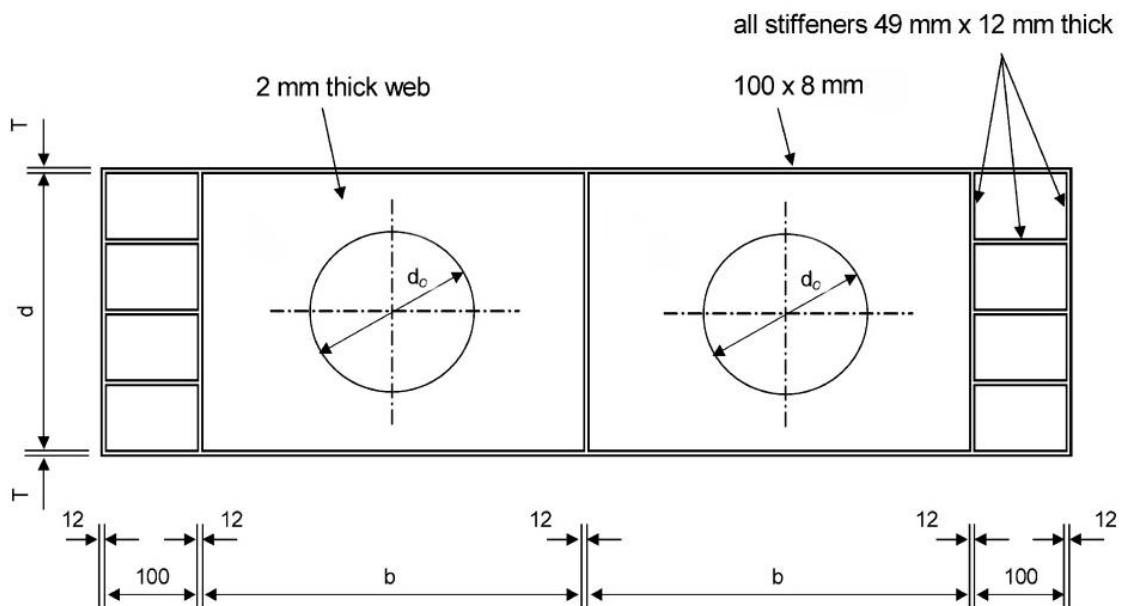
2 – 5 تأثير وجود الفتحة على قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحي :

2 – 5 – 1 حالة الفتحات الدائرية :

نفذ (1981) Narayanan & Rockey تجارب على 20 عينة من الجوائز الصفائحية يحتوي جسدها على فتحات دائيرية، لدراسة تأثير حجم الفتحة على المقدرة القصوية القصوى للجائز ، وأعد Shanmugam et al (2002) رسم التجربة والاستعانة بها في دراسته.

وكان التجربة عبارة عن مجموعة جوائز صفائحية ذات فتحات دائيرية مركبة قطرها d_0 موجودة في منتصف الصفيحة (Centrally Placed) ، كما بين الشكل (2 – 10). الجائز بسيط الاستناد عند النهايات ومعرض لتأثير حمولة مركزية مطبقة في منتصف المجاز، نفذت التجارب بحيث يتم زيادة قيمة القوة المطبقة بالتدريج حتى يحدث انهيار الجائز عند الحمولة القصوى Pu_{EXP} كما في الشكل (2 – 11) الذي يوضح شكل انهيار العينة CP 12 .

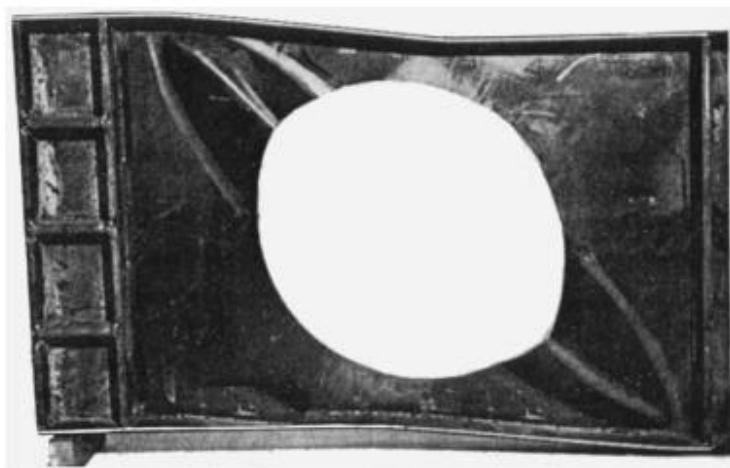
تمت الدراسة على مرحلتين، الأولى مؤلفة من العينات $CP \rightarrow CP 12$ وفيها تكون أبعاد صفيحة الجسد $750 \times 500 \times 2 mm$ ، وبالتالي نسبة النحافة $d/t = 250$ وعامل الشكل $b/d = 1.5$ ، وأبعاد صفيحة الجناح $100 \times 8 mm$. في هذه المرحلة تم تغيير قطر الفتحات d_0 الواقعه ضمن الجسد بين القيمتين (50 \rightarrow 400mm) وبالتالي تتغير نسبة قطر الفتحة d_0 بالنسبة إلى عمق الجسد d بين القيمتين (0.1 \rightarrow 0.8).



الشكل (2 – 10) نموذج الاختبار لجائز صفائحي بجسد مفرغ بفتحات دائيرية

[Shanmugam et al. 2002]

والمراحل الثانية تكون فيها أبعاد صفية الجسد $720 \times 720 \times 2\ mm$ وبالتالي نسبة النحافة $d/t = 360$ وعامل الشكل لصفية الجسد $b/d = 1$, ولبيان أثر تغيير سماكة الجناح على تغير قدرة التحمل مع تغير قطر الفتحة المنفذة تم تقسيم العينات إلى مجموعتين, الأولى مؤلفة من العينات $CP\ 13 \rightarrow CP\ 16$ حيث تكون أبعاد صفية الجناح المستخدمة $8 \times 100\ mm$, والمجموعة الثانية مؤلفة من العينات $CP\ 17 \rightarrow CP\ 20$ وفيها أبعاد صفية الجناح المستخدمة $15 \times 100\ mm$. وقطر الفتحة الدائرية المستخدمة في كل مجموعة يأخذ القيم التالية $mm\ 180, 270, 360, 480$. أبعاد العينات المختبرة ونتائج الدراسة مبينة في الجدول (2 - 1).



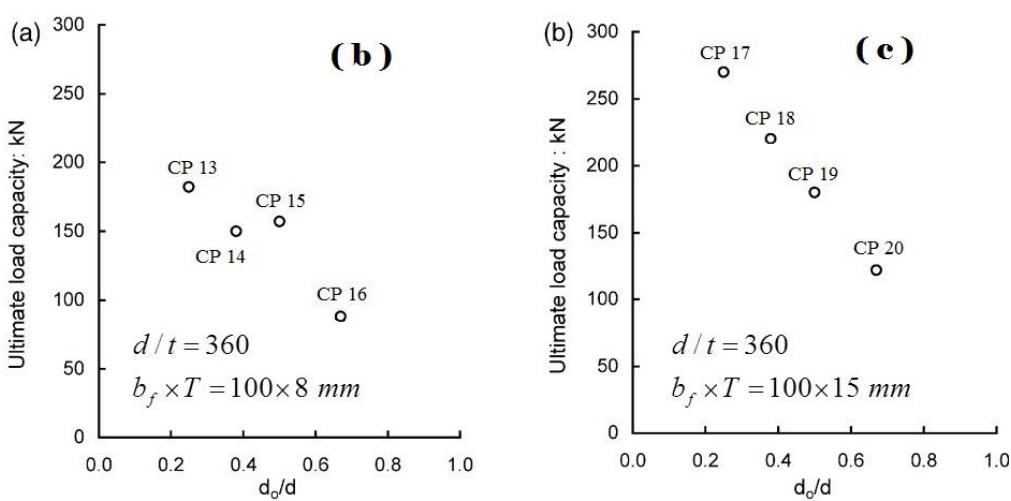
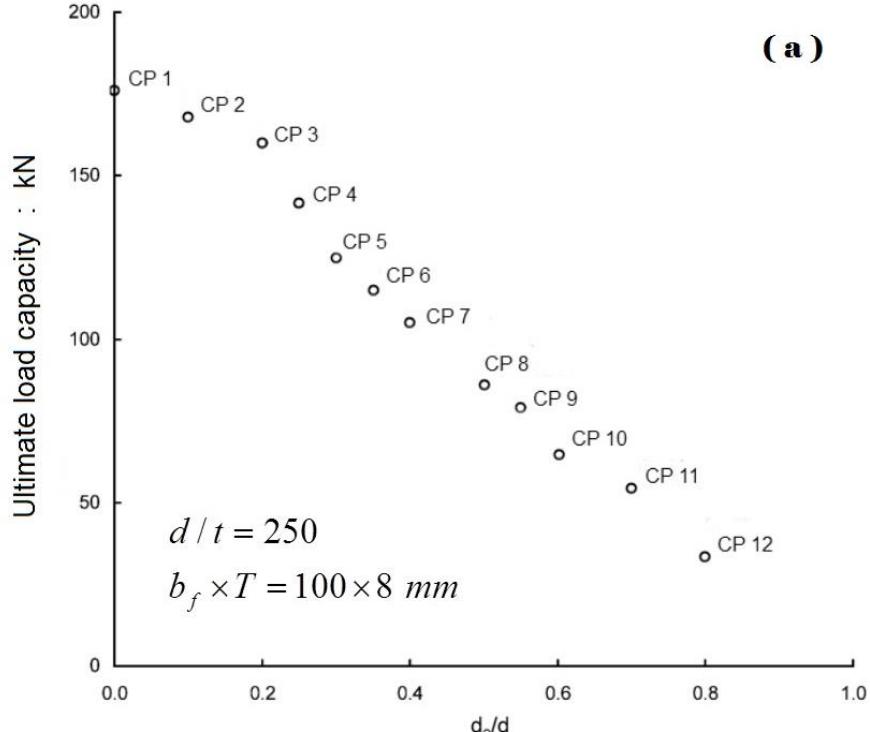
الشكل (11 - 2) شكل الانهيار لصفية CP12 [Shanmugam et al. 2002]

Series	Girder	Nominal size of flange (mm)	d/t nominal	b/d nominal	Dia. of opening d_o (mm)	d_o/d	$P_{uo,exp}$ (kN)
All panels with nominal web dimensions (750×500×2)	CP 1	100×8	250	1.5	0	0.00	176
	CP 2	100×8	250	1.5	50	0.10	168
	CP 3	100×8	250	1.5	100	0.20	160
	CP 4	100×8	250	1.5	125	0.25	142
	CP 5	100×8	250	1.5	150	0.30	125
	CP 6	100×8	250	1.5	175	0.35	115
	CP 7	100×8	250	1.5	200	0.40	105
	CP 8	100×8	250	1.5	250	0.50	86
	CP 9	100×8	250	1.5	275	0.55	79
	CP 10	100×8	250	1.5	300	0.60	65
	CP 11	100×8	250	1.5	350	0.70	54.5
	CP 12	100×8	250	1.5	400	0.80	33.5
All panels with nominal web dimensions (720×720×2)	CP 13	100×8	360	1.0	180	0.25	182
	CP 14	100×8	360	1.0	270	0.38	150
	CP 15	100×8	360	1.0	360	0.50	157
	CP 16	100×8	360	1.0	480	0.67	88
	CP 17	100×15	360	1.0	180	0.25	270
	CP 18	100×15	360	1.0	270	0.38	220
	CP 19	100×15	360	1.0	360	0.50	180
	CP 20	100×15	360	1.0	480	0.67	122

الجدول (2 - 1) أبعاد العينات ونتائج الاختبار للتجارب التي نفذها Narayanan & Rockey

[Shanmugam et al. 2002]

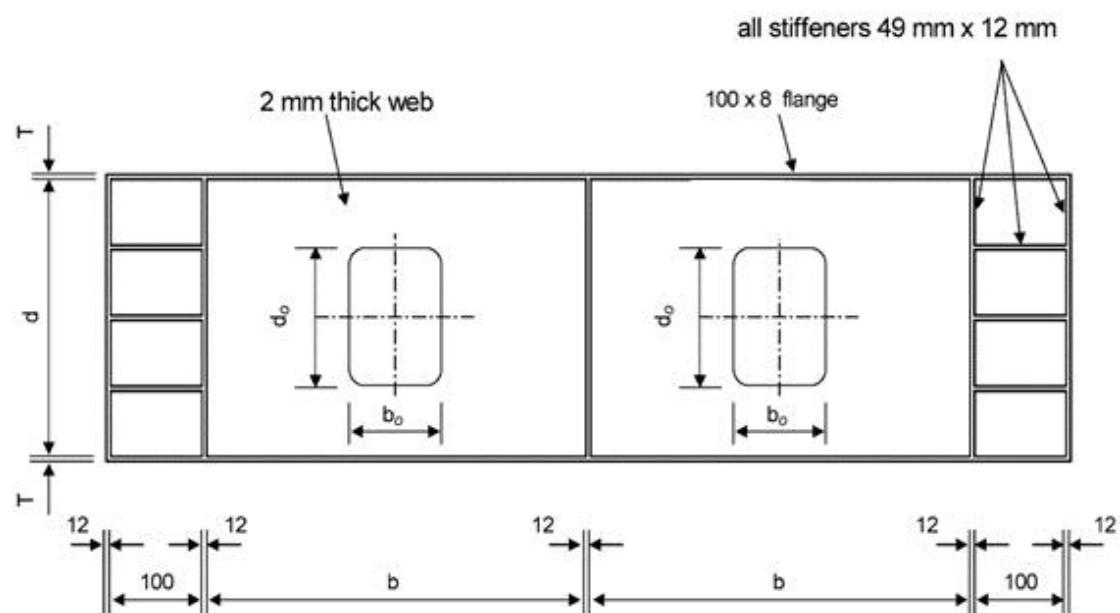
يبين الشكل (2 - 12) العلاقة بين قطر الفتحة المنفذة ضمن صفيحة الجسد ، وبين حمولة الانهيار للعينات الحالات (a) و (b) التي توافق استخدام صفيحة جناح $CP 1 \rightarrow CP 12$ للعينات $CP 13 \rightarrow CP 16$ ، والعينات (c) حيث كانت أبعاد صفيحة الجناح $100 \times 8 mm$ ، وللعينات $CP 17 \rightarrow CP 20$ ، حيث كانت أبعاد صفيحة الجناح $100 \times 15 mm$ المستخدمة .



الشكل (2 - 12) العلاقة بين قدرة التحمل القصوى للجائز وحجم الفتحة للتجارب التي نفذها Narayanan & Rockey [Shanmugam et al. 2002]

حيث يتبيّن من الجدول (2 - 1) ومن الشكل (2 - 12) أن ازدياد حجم الفتحة d_0 نسبة إلى ارتفاع ثابت للجس d يؤدي إلى انخفاض في طاقة تحمل الجائز القصوى (حمولة الانهيار)، وكمثال على ذلك فإن زيادة قطر الفتحة إلىضعف أي من (50 → 100mm) يؤدي إلى نقصان قدرة التحمل (168 → 160 kN) أي بمقدار 0,05، وزيادتها بمقدار ثمانية أضعاف (50 → 400 mm) يؤدي إلى نقصان قدرة التحمل بمقدار خمس مرات. كما يتبيّن أن العلاقة بين نسبة قطر الفتحة إلى عمق الجس d_0/d ، وبين حمولة الانهيار تبقى خطية تقريباً رغم تغيير سماكة صفيحة الجناح المستخدمة، أو تغيير النسبة t/d .

2 - 5 - 2 حالة الفتحات المستطيلة :

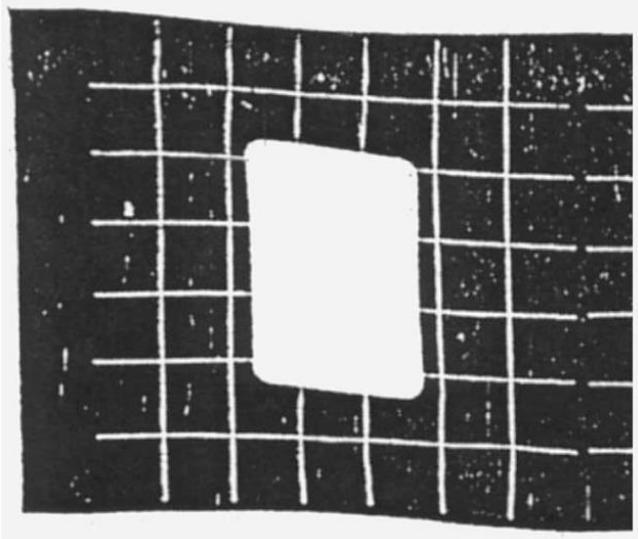


الشكل (2 - 13) نموذج الاختبار (الجائز الصفائحي بجس مفرغ بفتحات مستطيلة)

[Shanmugam et al. 2002]

نفذ (1983) Narayanan & Der Avanessian مجموعة تجارب على 12 عينة من جوائز صفائحية ذات جس مفرغ بفتحات مستطيلة متوضعة بشكل مركزي أبعادها $b_0 \times d_0$ لدراسة تأثير حجم الفتحة (عرضها وارتفاعها) على المقدرة القصوى للجاز، وأعاد (2002) Shanmugam et al. رسم التجربة والاستعانة بها في دراسته التحليلية، أبعاد الجائز والفتحات مبينة في الشكل (2 - 13) .

الجزئ بسيط الاستناد عند النهايات ومعرض لتأثير حمولة مركزية مطبقة في منتصف المجاز وهذا يجعل جميع الصفائح تتعرّض إلى قوة قص ثابتة القيمة. نفذت التجارب بحيث يتم زيادة قيمة القوة المطبقة بالتدريج حتى انهيار الجائز عند الحمولة القصوى $P_{u_{EXP}}$ كما يبيّن الشكل (2 - 14) . حيث كانت أبعاد صفيحة الجناح المستخدمة $b_f \times T = 100 \times 8 \text{ mm}$ ، وسماكة الجس $t = 2 \text{ mm}$ وتم تثبيتها لجميع العينات المدروسة.



[Shanmugam et al. 2002] RCP 8 (الشكل 2 - 14) شكل الانهيار للصفيحة

تم في هذه الاختبارات دراسة أثر تغير كل من عامل شكل صفيحة الجسد ، ونسبة نحافتها، وكذلك أبعاد ومقاس حجم الفتحة المستطيلة المنفذة. وجرى تقسيم النماذج إلى مجموعتين :

الأولى تم فيها تثبيت قيمة ارتفاع الفتحة المنفذة $d/3 = d_0$ وتغيير قيمة عرضها b_0 بحيث نحصل على عامل شكل للفتحة يأخذ القيم التالية $b_0/d_0 = (0.67, 1, 1.25, 1.5)$. وشملت هذه المجموعة كلا من الجوائز 4, RCP 1, RCP 2, RCP 3, RCP 4، حيث كان مقاس وأبعاد صفيحة الجسد المستخدمة $720 \times 720 \text{ mm}$ وبالتالي نسبة النحافة $d/t = 360$ ، وعامل شكل الصفيحة $b/d = 1$ ، وكذلك مجموعة الجوائز 5, RCP 6, RCP 7, RCP 8، وفيها كانت أبعاد صفيحة الجسد $750 \times 500 \text{ mm}$ ، وبالتالي نسبة النحافة $d/t = 250$ ، وعامل شكل الصفيحة $b/d = 1.5$ ، أبعاد هذه العينات ونتائج التجارب موضحة في الجدول (2 - 2) و كذلك في الشكل (2 - 15) الذي يوضح العلاقة بين نسبة أبعاد الفتحة المستطيلة وبين مقدرة التحمل الحدية عندما نسبة النحافة 360 الشكل (2 - 15) (a)، وعندما نسبة النحافة 250 الشكل (2 - 15) (b).

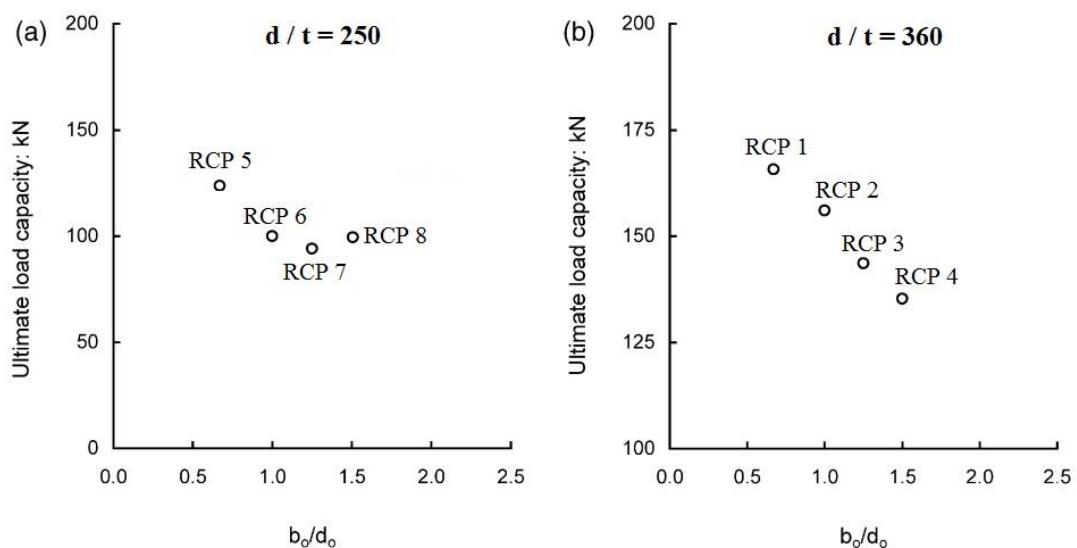
وفي المجموعة الثانية المؤلفة من الجوائز 9, RCP 10, RCP 11, RCP 12 تم تثبيت نسبة عرض الفتحة إلى عرض صفيحة الجسد $d_0 = b/3$ وتغيير ارتفاعها d_0 بحيث تصبح نسبة ارتفاع الفتحة إلى ارتفاع الجسد $(0, 0.25, 0.5, 0.75)$ ، مع استخدام صفيحة الجسد ذات الأبعاد $720 \times 720 \text{ mm}$ ، أيضا نتائج هذه الدراسة موضحة في الجدول (2 - 2).

Series	Girder	d/t nominal	b/d nominal	Size of opening, $b_o \times d_o$ (mm)	d_o/d	b_o/b	b_o/d_o (kN)	$P_{uo,EXP}$ (kN)
Constant d_o , varying b_o	RCP 1	360	1.0	160×240	0.33	0.22	0.67	165.7
	RCP 2	360	1.0	240×240	0.33	0.33	1.00	156.0
	RCP 3	360	1.0	300×240	0.33	0.42	1.25	143.6
	RCP 4	360	1.0	360×239	0.33	0.50	1.50	135.3
	RCP 5	250	1.5	112×168	0.34	0.15	0.67	123.6
	RCP 6	250	1.5	167×167	0.33	0.22	1.00	100.0
	RCP 7	250	1.5	210×167	0.33	0.28	1.25	94.1
	RCP 8	250	1.5	250×167	0.33	0.33	1.50	99.5
Constant b_o , varying d_o	RCP 9	360	1.0	No cut-out	—	—	—	253.0
	RCP 10	360	1.0	240×180	0.25	0.33	1.33	180.6
	RCP 11	360	1.0	240×360	0.50	0.33	0.67	113.0
	RCP 12	360	1.0	240×540	0.75	0.33	0.44	47.6

الجدول (2 – 2) الأبعاد و نتائج الاختبار للتجارب التي نفذها Narayanan & Der Avanessian

[Shanmugam et al. 2002]

يتبيّن من الشكل (2 – 15) و الجدول (2 – 2) أن المقدرة القصوى للصفائح $P_{u,EXP}$ تتحفّض بشكل خطى تقريباً مع تزايد أبعاد الفتحة المستطيلة. فعندما كانت أبعاد الفتحة $160 \times 240\text{ mm}$, كانت حمولة الانهيار 135.3 kN , و عندما أصبحت أبعاد الفتحة $360 \times 240\text{ mm}$, انخفضت قدرة التحمل إلى القيمة 165.7 kN أي تقريباً 18% ,



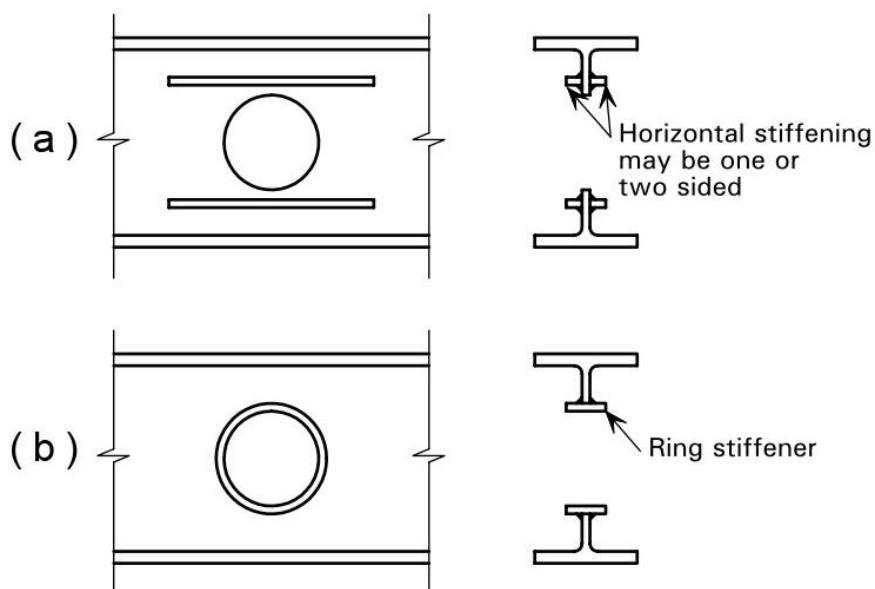
الشكل (2 – 15) العلاقة بين قدرة التحمل القصوى للصفائح والعامل b_o/d_o

[Shanmugam et al. 2002]

2 – 6 تقوية و تدعيم الجوانز الحاوية على فتحات :

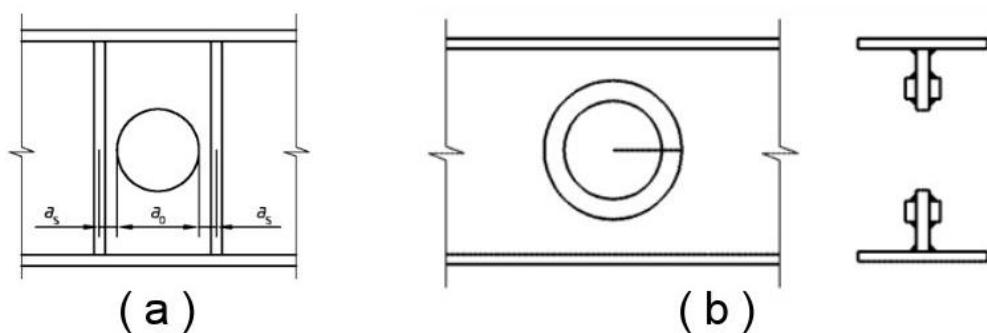
أثبتت الدراسات العديدة أن وجود الفتحات ضمن جسد الجائز الصفائحي له أثر سلبي يتمثل في ضياع وفقدان كبير في قدرة تحمل الجائز ، فكان لابد من البحث عن وسائل لاستعادة هذه الطاقة المهدورة عبر التدعيم، حيث اقترحت الكودات العالمية مجموعة من الطرائق التي يمكن استخدامها لتقوية الفتحات المنفذة ضمن الجوانز.

ذكر الكود البريطاني (BS 5950 : 2000 – 1:) طرائق تدعيم هما التدعيم باستخدام مدعمات أفقية أعلى وأسفل الفتحة كما يبين الشكل (2 – 16) (a) حيث يمكن وضعها من جهة واحدة أو جهتين، والتدعم بحلقة فولاذية حول الفتحات الدائرية كما يبين الشكل (2 - 16) (b).

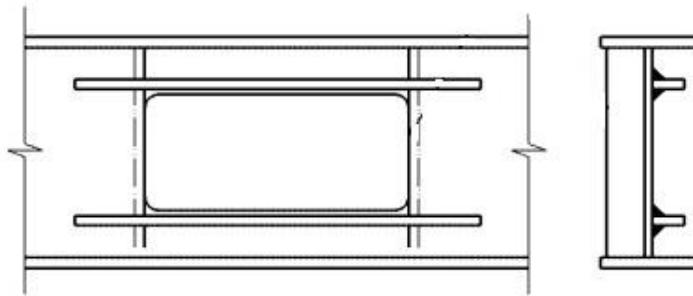


[BS 5950 : 2000 – 1:] طرائق التدعيم التي اقترحها الكود البريطاني [

أما في الكود الأوروبي (ENV 1993-1-1:2002), فقد ذكر إضافة إلى ما سبق التدعيم ب مدعمات شاقولية كما في الشكل (2 – 17) (a), والتدعم بمدعمات أفقيه وشاقولية معا كما في الشكل (2 – 18), وكذلك التدعيم بمدعمات دائيرية كما هو مبين في الشكل (2 – 17) (b).

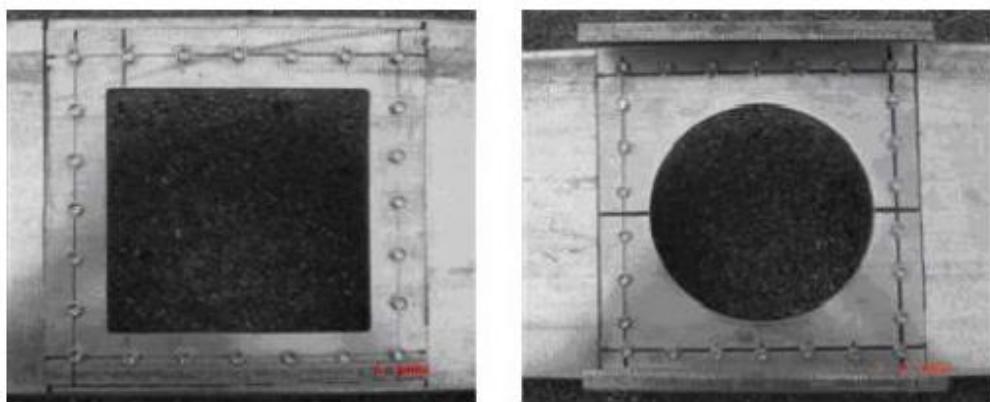


[ENV 1993-1-1:2002] طرائق التدعيم التي اقترحها الكود الأوروبي [



الشكل (2 - 18) التدعيم المتصلب [ENV 1993 -1-1 2002]

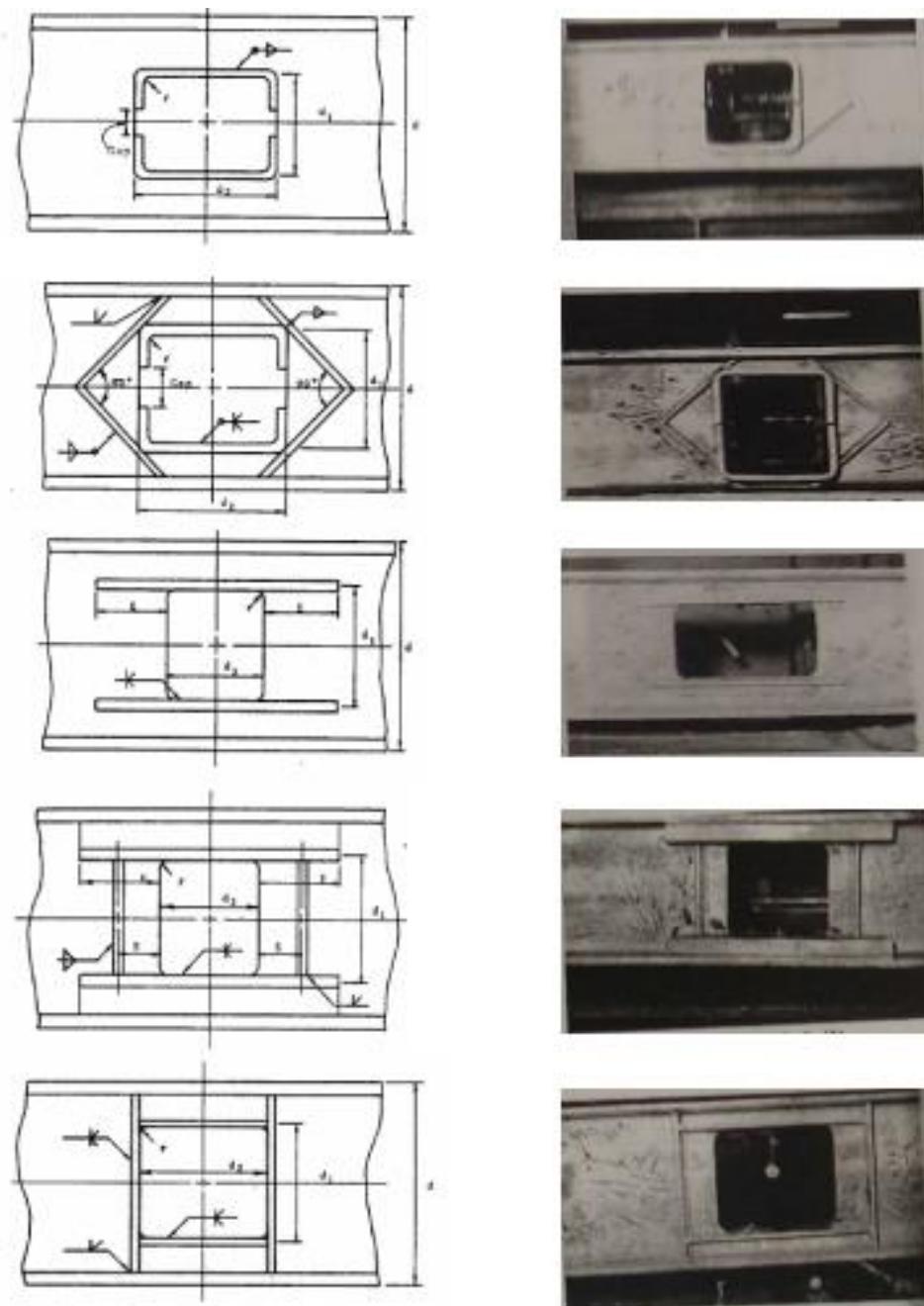
أما الكود الأمريكي (AISI standard 2004), فقد ذكر التدعيم بصفحة فولاذية (Plate) والتدعم بجرياً فولاذية ذات شفة (Stud) مفرغة بفتحة مشابهة من حيث الشكل والمقاس للفتحة الأساسية الموجودة في الجائز كما يبين الشكل (2 - 19).



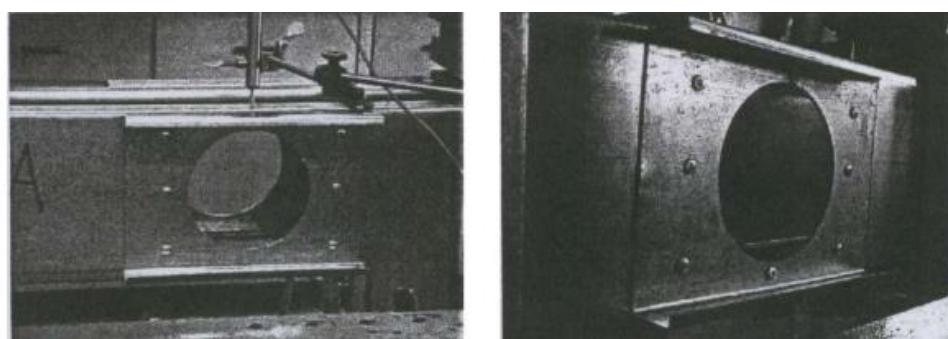
الشكل (2 - 19) طرائق التدعيم التي اقترحها الكود الأمريكي [Sivakumaran, 2008]

نفذ Segner مجموعة من الدراسات التجريبية لتدعم وقوية الجوائز الفولاذية المصنعة على الساخن والمفرغة بفتحات مستطيلة ومربعة وذلك باستخدام قضبان فولاذية تم وضعها حول الفتحات بأشكال وطرائق مختلفة كما يبين الشكل (2 - 20).

قام (Pennock 2001) بمجموعة من الدراسات التجريبية على جوائز فولاذية تم تصنيعها من عناصر مشكلة على البارد يحتوي جسدها على فتحات مربعة وفتحات دائيرية نسبة عمق الفتحة إلى عمق الجسد تساوي 75%, حيث تم التدعيم باستخدام مقطع مجرأة فولادي مفرغ بفتحة ذات شكل وحجم مطابق لفتحة الموجودة في الجائز الرئيسي كما هو مبين في الشكل (2 - 21).

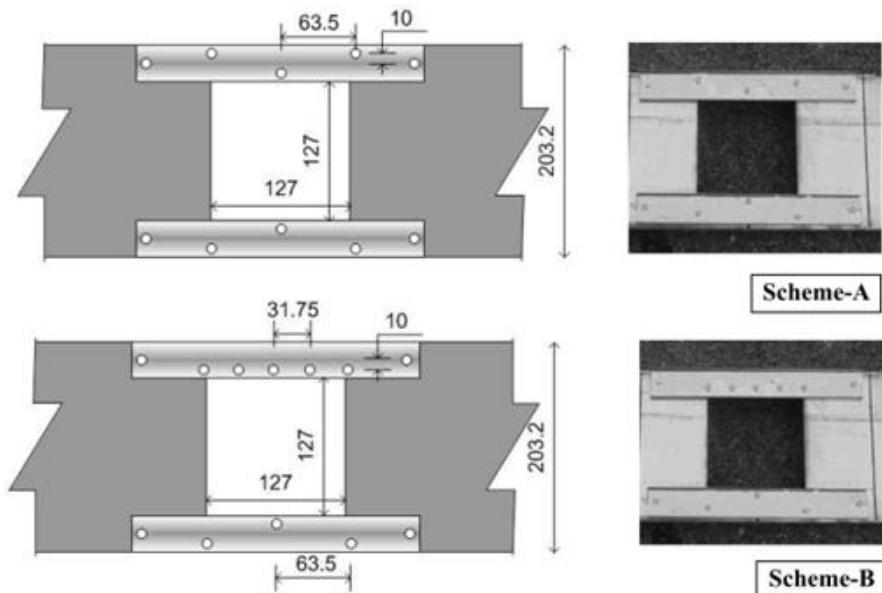


الشكل (2 - 20) طرائق التدعيم التي استخدمها [Sivakumaran, 2008] Segner



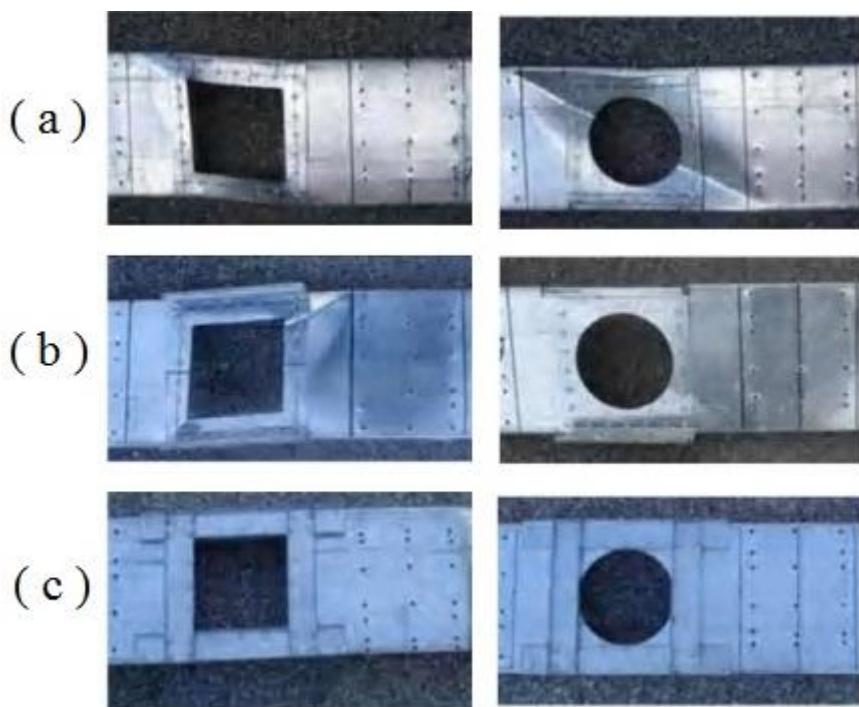
الشكل (21 - 2) طريقة التدعيم المستخدمة من قبل الباحث [Sivakumaran, 2008] Pennock

قام أيضا (Sivakumaran 2006) بمجموعة تجارب لتدعيم الجوانب الفولاذية المشكلة على البارد، وشملت الدراسة كل من الفتحات الدائرية والمربعة والمستطيلة ، أما طريقة التدعيم المستخدمة فكانت مجرأة تتوضع أعلى وأسفل الفتحة، ولكن تم تثبيتها مع جسد الجائز بطرقتين مختلفتين، حيث تم تغيير عدد نقاط التثبيت والتبعاد بينها للمدعمة المتوضعة على الطرف العلوي للفتحة كما هو مبين في الشكل (2 - 22).



الشكل (2 - 22) طرائق التدعيم بتغيير نقاط التثبيت [Sivakumaran, 2008]

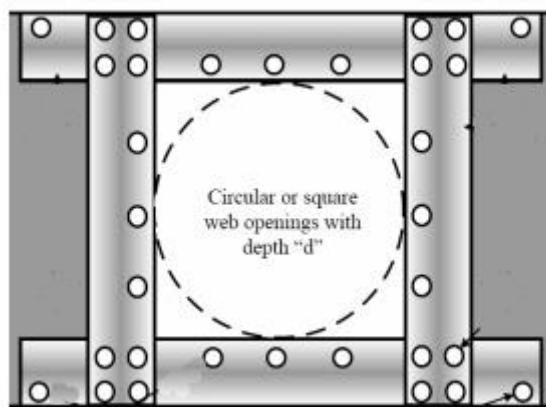
وقد استنتج من تلك التجارب أن الطريقة B قادرة بشكل فعال على استعادة المقاومة الأساسية للعنصر، وأنه من المفضل تثبيت البراغي بمسافات صغيرة في المدعمة المتوضعة على طرف الفتحة المعرض للضغط.



الشكل (2 - 23) طرائق التدعيم المستخدمة من قبل الباحث [Sivakumaran, 2008] Sivakumaran

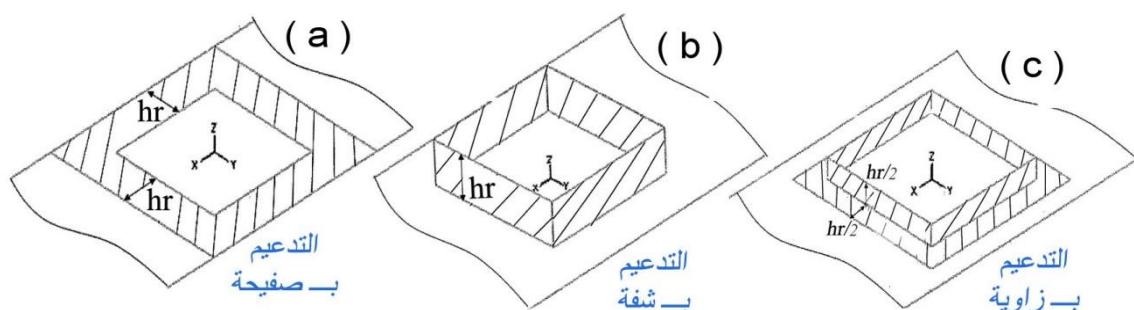
عمل لاحقاً (2008) Sivakumaran على تطوير دراسته السابقة، حيث قام بمجموعة تجارب على تدعيم جوائز فولاذية مشكلة على البارد مقطعها العرضي على شكل مجرایة ذات شفة، مستخدماً ثلاثة طرائق تدعيم هي التدعيم بصفحة الشكل (2 - 23) (a)، والتدعيم باستخدام مقطع فولادي قصير لمجرایة مفرغة كما في الشكل (2 - 23) (b)، وتدعم فيرنديل باستخدام 4 مجرایات كما في الشكل (2 - 23) (c)، حيث شملت الدراسة كلاً من الفتحات المربعة والفتحات الدائرية. حيث بينت النتائج أن التدعيم بالطريقة (C) هي الطريقة الأكثر جدوًى وقدرة على استعادة مقدرة القص الأساسية للجازن .

قام (2009) Acharya بتنفيذ دراسة تحليلية لتدعم جوائز مشكلة على البارد ذات فتحات كبيرة الحجم، حيث قام بتطبيق و اختبار ثلاثة طرائق لتدعم اثنان منها ذكرها الكود الأمريكي (2004) AISI والمبنية في الشكل (2 - 19). والطريقة الثالثة هي التدعيم باستخدام أربع مقطوعات فولاذية (تدعيم فيرنديل) على شكل مجرایة تتوضع حول الجهات الأربع للفتحة كما يبين الشكل (2 - 24) .



الشكل (2 - 24) تدعيم فيرنديل [Sivakumaran, 2008]

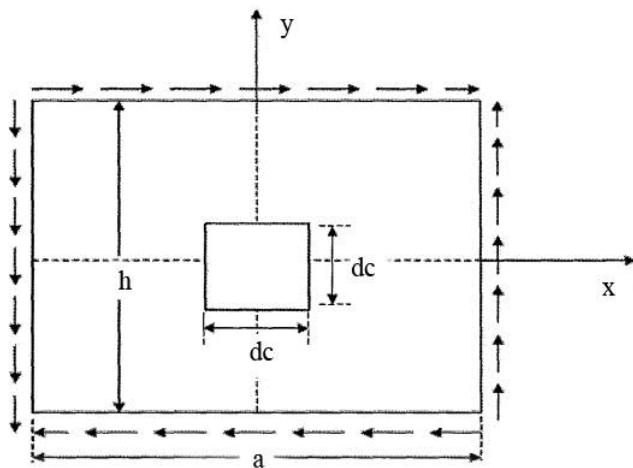
قام أيضاً الباحث (2009) Chen بدراسة تحليلية موسعة لتدعم الصفائح الفولاذية التي تحتوي على فتحات مربعة الشكل ومتوضعة بشكل مركزي ضمن الصفحة، حيث قام باختبار ثلاثة طرائق لتدعم وهي التدعيم بصفحة (Flat) كما يبين الشكل (2 - 25) (a)، والتدعيم بشفة (Lip) كما في الشكل (2 - 25) (b) والتدعم بزاوية (Angle) كما في الشكل (2 - 25) (c) .



الشكل (2 - 25) طرائق التدعيم المستخدمة من قبل الباحث Chen, 2009 [Chen, 2009]

2 – 7 سلوك الصفائح مدعمة الفتحات تحت تأثير قوة القص :

أجرى (Chen 2009) دراسة تحليلية موسعة لفهم سلوك الصفائح مستطيلة الشكل ذات الفتحات المدعمة والمعرضة إلى قوى قاسية ، وكانت الدراسة عبارة عن نمذجة صفائح فولاذية مستطيلة الشكل بسيطة الاستناد ذات فتحات مركزية مربعة وتتعرض إلى قص محظي منظم كما يبين الشكل (2 – 26) ، وذلك باستخدام برنامج ADINA 8.5 ، أبعاد الصفائح المدروسة $a \times h = 300 \times 100 \text{ mm}$ أي عامل الشكل لها $a/h = 3$ حيث a هي طول الصفيحة و h هي ارتفاع الصفيحة . وهذه الصفائح مفرغة بنسبة 60% أي $dc/h = 0.6$ بواسطة فتحات مركزية مربعة بعدها dc .

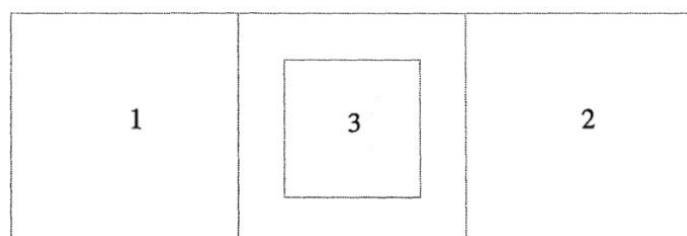


[Chen, 2009] أبعاد الصفيحة والفتحة

حيث تم دراسة ثلاثة طرائق للتدعم الشكل (2 – 25) بصفائح فولاذية لها خصائص الصفيحة الأساسية و ذات عرض ثابت $t_r = 20 \text{ mm}$ وسماكة متغيرة t_r ، بحيث تم دراسة كل طرائق من طرائق التدريم مع أربعة قيم نسبة النحافة h/t وهي (50 , 100 , 150 , 200)

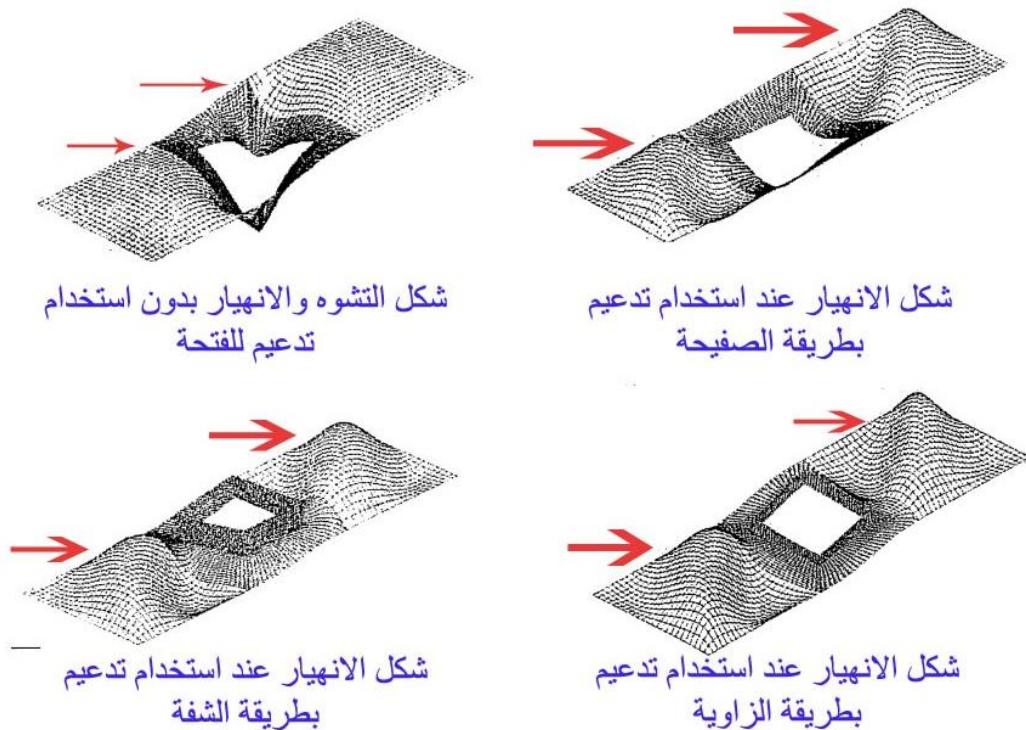
تم تعريف النسبة t_r/t بقياس التدريم وهي نسبة تغير من القيمة (0) والتي توافق عدم وجود أي تدريم حول الفتحة وحتى القيمة التي يتوقف عندها حدوث أي زيادة في المقدرة القصبية المسترجعة .

حيث أن وجود التدريم يؤدي إلى تقسيم الصفيحة إلى ثلاثة مناطق إنشائية كما في الشكل (2 – 27) .



[Chen, 2009] تقسيم الصفيحة إلى ثلاثة مناطق

بيّنت نتائج التحليل أن انهيار الصفائح في حالة عدم التدعيم يحدث عند الزوايا الأربع للفتحة كما يوضّح الشكل (2 - 28), أما بعد تطبيق التدعيم بكمية كافية فإن الصفائح تتهدّر بشكل قطري في الجزء الواقع خارج نطاق الفتحة أي الجزاين (2 & 1) الموضّحين في الشكل (2 - 27).



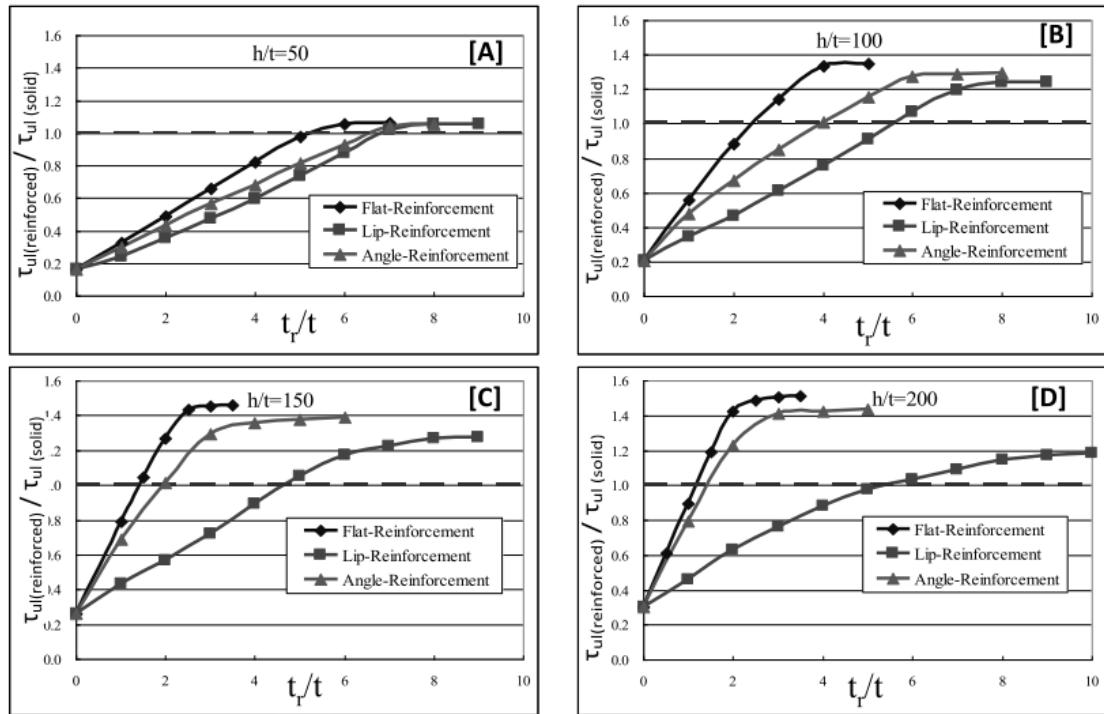
الشكل (2 - 28) شكل الانهيار لأنواع مختلفة من التدعيم في صفيحة نسبة حافتها $d/t = 200$

[Chen, 2009]

قام الباحث بدراسة العلاقة بين قياس التدعيم t_r/t والمقدمة القصوية القصوى للصفيحة المفرغة ممثلة بالنسبة $\tau_{ul(reinf)}/\tau_{ul(solid)}$ والتي تعنى إجهاد القص الحدي للصفيحة ذات الفتحة المدعمة منسوبة إلى إجهاد القص الحدي للصفيحة فيما كانت مصمّمة (غير مفرغة)، حيث أنه عندما تكون قيمة النسبة 1

فهذا يعني أن قياس التدعيم المطبق قام باستعادة كامل قدرة التحمل المفقودة من الصفيحة بسبب وجود الفتحة .

يبين الشكل (2 - 29) العلاقة بين قياس التدعيم t_r/t والنسبة $\tau_{ul(reinf)}/\tau_{ul(solid)}$ لثلاثة طرائق مختلفة للتدعيم (صفيحة , شفة , زاوية) ، مع أربعة قيم للنسبة h/t هي 50,100,150,200 على الترتيب .



الشكل (2 – 29) العلاقة بين قياس التدعيم t_r/t والمقدرة القصوية القصوى للصفيحة

[Chen and Sivakumaran, 2010]

حيث يتبيّن من الشكل (2 – 29) أنه بازدياد كمية التدعيم t_r/t تزداد مقاومة القص الحدية للصفيحة بشكل خطى تقريباً ، كذلك يتبيّن أن طرائق التدعيم الثلاثة قادرّة على استعادة المقدرة القصوية للصفيحة والمفقودة بسبب وجود الفتحة ، كما يلاحظ أنه من أجل كمية تدعيم ثابتة فإن طريقة التدعيم بالصفيحة (Flat) هي الأكثر فاعلية وقدرة على استرداد قدرة تحمل الصفيحة .

كما يمكن من الشكل (2 – 29) (D) ملاحظة أنه بتطبيق كمية تدعيم مناسبة يمكن أن تزداد طاقة تحمل الصفيحة لتصل إلى مرتين ونصف من طاقتها فيما لو لم تكن مفرغة .



الفصل الثالث

التحليل باستخدام طريقة العناصر المحددة

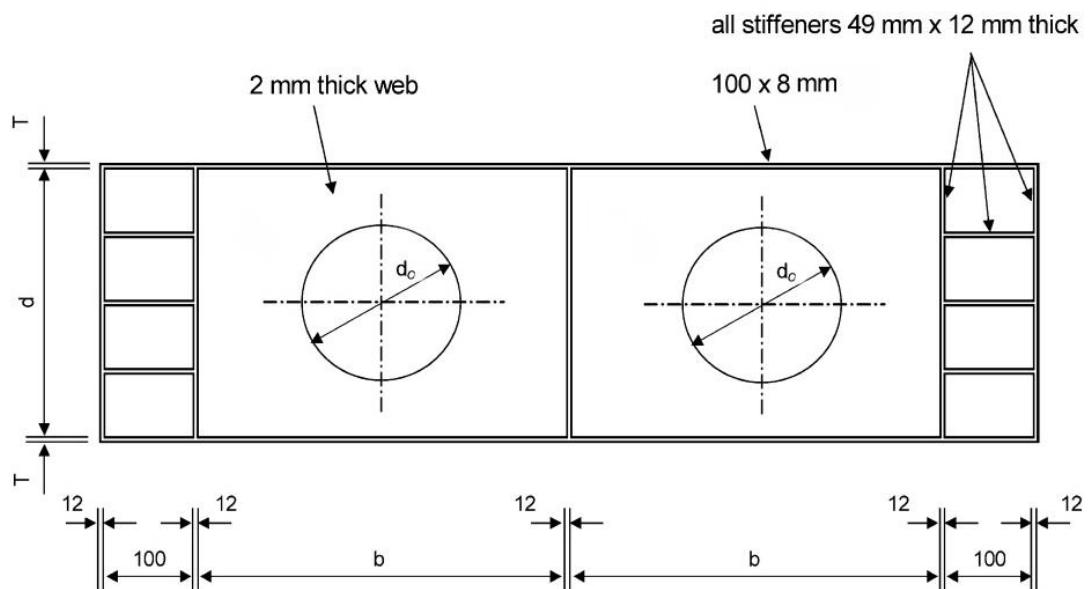
Modelling Using FEM

1 – 3 مقدمة:

يهدف هذا الفصل إلى بناء نموذج العناصر المحددة ABAQUS ، والتحقق من مدى صحته وصلاحيته لتنفيذ الدراسة البارامترية، بمقارنة نتائج تحليل النموذج مع نتائج التجربة التي تم اختيارها ونمذجتها حسب ما وردت في الدراسة المرجعية.

2 – 3 توصيف التجربة:

تم اختيار التجربة التينفذها الباحثان (Narayanan & Rockey 1981) ، لنمذجتها باستخدام برنامج ABAQUS ، واعتماد النموذج كحجر الأساس للانطلاق في هذه الدراسة. وكانت التجربة عبارة عن مجموعة جوائز صفائحية ذات فتحات دائيرية قطرها d_0 متوضعة بشكل مركزي في منتصف صفيحة الجسد (Centrally Placed)، عرض صفيحة الجسد المتوضعة بين المدعمات العرضية $b = 750 \text{ mm}$ ، $t = 2 \text{ mm}$ ، وارتفاعها $d = 500 \text{ mm}$ ، أي عامل الشكل لها $b/d = 1.5$ ، وسماكتها $T = 8 \text{ mm}$ ، $b_f = 100 \text{ mm}$ ، وسماكتها $d_f = 250 \text{ mm}$. حيث تم في التجربة تثبيت أبعاد كل من صفيحتي الجناح والجسد حسب القيم السابقة و تغيير قطر الفتحات الدائرية d_0 بين القيمتين (50 → 400 mm) وبالتالي تغير النسبة d_0/d بين القيمتين (0.1 → 0.8)، تفاصيل نموذج الاختبار موضحة في الشكل (1 – 3).



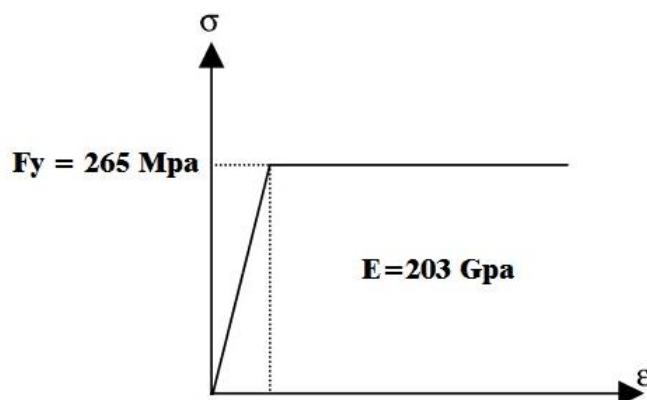
الشكل (1 – 3) نموذج الاختبار (Shanmugam et al. 2002)

الجائز بسيط الاستناد عند النهايات وعرض لتأثير حمولة مركزية مطبقة في منتصف المجاز، نفذت التجربة بحيث يتم زيادة قيمة القوة المطبقة بالتدريج حتى يحدث انهيار الجائز عند الحمولة القصوى $P_{u_{EXP}}$. وسيتم في

هذا الفصل تحليل التجربة والحصول على حمولة الانهيار الكلية للجائز $P_{u_{FEM}}$ دون الخوض في تفاصيل الاجهادات المتشكلة.

3 – 3 مواصفات المادة :

تم اعتماد خصائص ومواصفات مادة الفولاذ - مخطط (الاجهاد - التشوہ) - الواردة في الدراسة المرجعية، حيث كان إجهاد السيلان للفولاذ المستخدم في التجربة 265 MPa ، ومعامل المرونة $E = 203000 \text{ MPa}$.

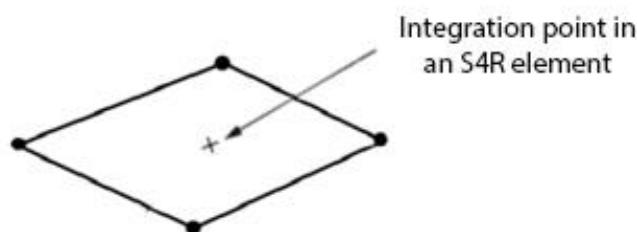


الشكل (3 – 2) مخطط (الاجهاد - التشوہ) لمادة الفولاذ المستخدمة

حيث يبين المخطط أن مادة الفولاذ المستخدمة تبدي مرونة حتى الوصول إلى إجهاد الخضوع وبعدها يدخل الفولاذ بحالة اللدونة التامة، حيث تزداد التشوہات دون أي زيادة في الاجهادات.

3 – 4 مواصفات العنصر المستخدم في النمذجة :

تم استخدام العنصر S4R لنمذجة العناصر الفولاذية من نوع Shell و هو عنصر صفائحي متعدد الأغراض ذو عدد مخفض لنقاط غالوص (نقطة واحدة) (2011) ABAQUS Documentation ، حيث يتتألف هذا العنصر من أربع عقد و تملك كل عقدة ست درجات حرية كما يبين الشكل (3 – 3) .



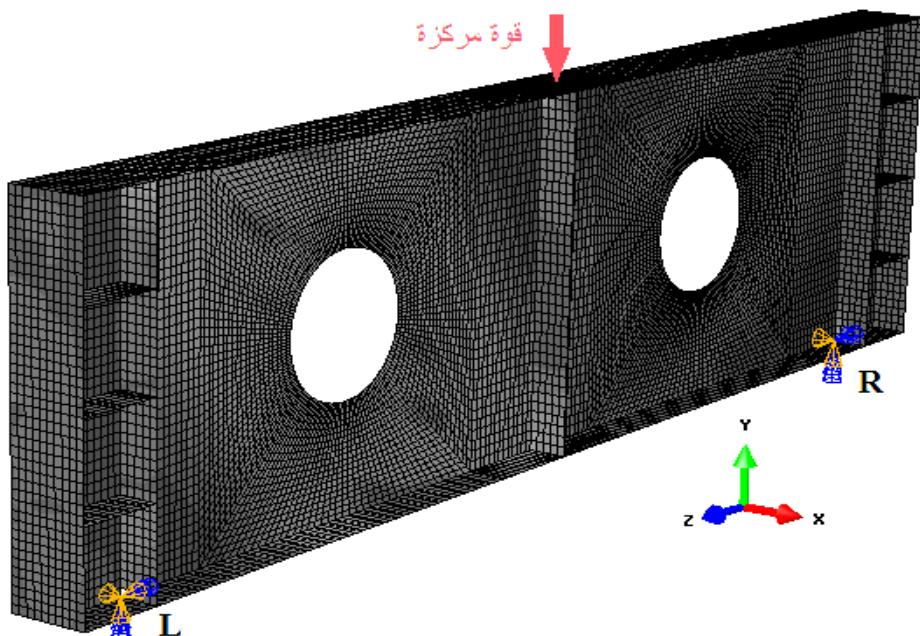
S4R 4-node general-purpose shell, reduced integration with hourglass control, finite membrane strains

الشكل (3 – 3) العنصر المحدد المستخدم في النمذجة (HKS 2011)

3 – 5 شروط الاستناد والتحميل ونوع التحليل :

تم نمذجة شروط الاستناد والتحميل بحيث يستطيع النموذج محاكاة التجربة الواردة في الدراسة المرجعية من حيث توزع الاجهادات و شكل التشوه و حمولة الانهيار الشكل (3 – 4).

المسند اليساري (L) يسمح بدرجة حرية واحدة هي الدوران حول المحور X , أما المسند اليميني (R) فيسمح بدرجتي حرية هما الدوران حول المحور X , والانتقال الأفقي باتجاه المحور Z .



الشكل (3 – 4) شروط الاستناد والتحميل لنموذج برنامج ABAQUS

يتعرض هذا النوع من المنتجات إلى التخريب والانهيار فيكون من الصعب تتبع سلوك ما بعد الانهيار بواسطة الطرق السنتاتيكية المعروفة، حيث على المنشأة أن تحرر طاقة (Strain Energy) لتبقى في حالة توازن. لذا سيكون التحليل المستخدم من النوع :

(Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfection included)

وهو تحليل لا خططي يأخذ بعين الاعتبار لا خططية المادة و التشوهات الحاصلة ، كما تم اعتماد Riks Method (طريقة رิกس) والتي تستخدم لحل مسائل عدم الاستقرار ، حيث تمكنا هذه الطريقة من تصميم لا خططية المادة و شروط سوء التصنيع الابتدائية .

3 – 6 سوء الصنع والتشوهات الابتدائية :

إن الصفائح التي تم استخدامها في تشكيل الجائز الصفائحي غير مسطحة تماماً، حيث تتعرض لبعض التشوهات أثناء أعمال اللحام وتوصيل الصفائح مع بعضها البعض، لذا يجب إدخال هذه التشوهات الابتدائية أثناء بناء نموذج برنامج العناصر المحددة ABAQUS ، وهذا الأمر متاح بوجود الخيار (Eigen Value) الذي يدخل

تأثير التشوّهات الابتدائية في صفيحة الجسد الناتجة عن سوء التصنيع الشكل (3 – 5), حيث أن مقدار أو قيمة هذه التشوّهات Imperfection value تختلف حسب شكلها وتموضعها كما ذكرها (Ouach et al. 2005) :

- إذا كان شكل التشوّه عاماً على كامل الصفيحة (Global Imperfection), فإن مقدار سوء الصنع يؤخذ كنسبة من طول العنصر .

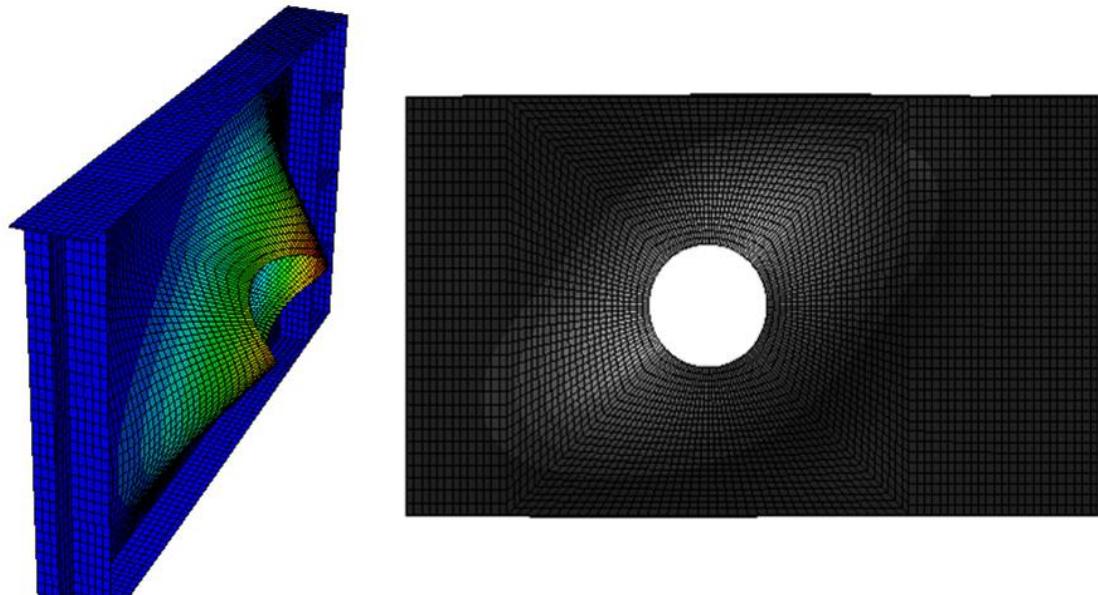
$$imperfection\ value = L / 1000$$
- إذا كان شكل التشوّه محلياً يتركز في منطقة محددة (Local Imperfection), فإن مقدار سوء الصنع يؤخذ كنسبة من سماكة الجسد .

$$imperfection\ value = t / (10 \rightarrow 20)$$

تم اختيار النوع الأخطر Global Imperfection والذي يعطي قيمة أكبر لسوء التصنيع، وبالتالي تكون قيمة سوء الصنع هي:

$$imperfection\ value = d / 1000 = 500 / 1000 = 0.5\ mm$$

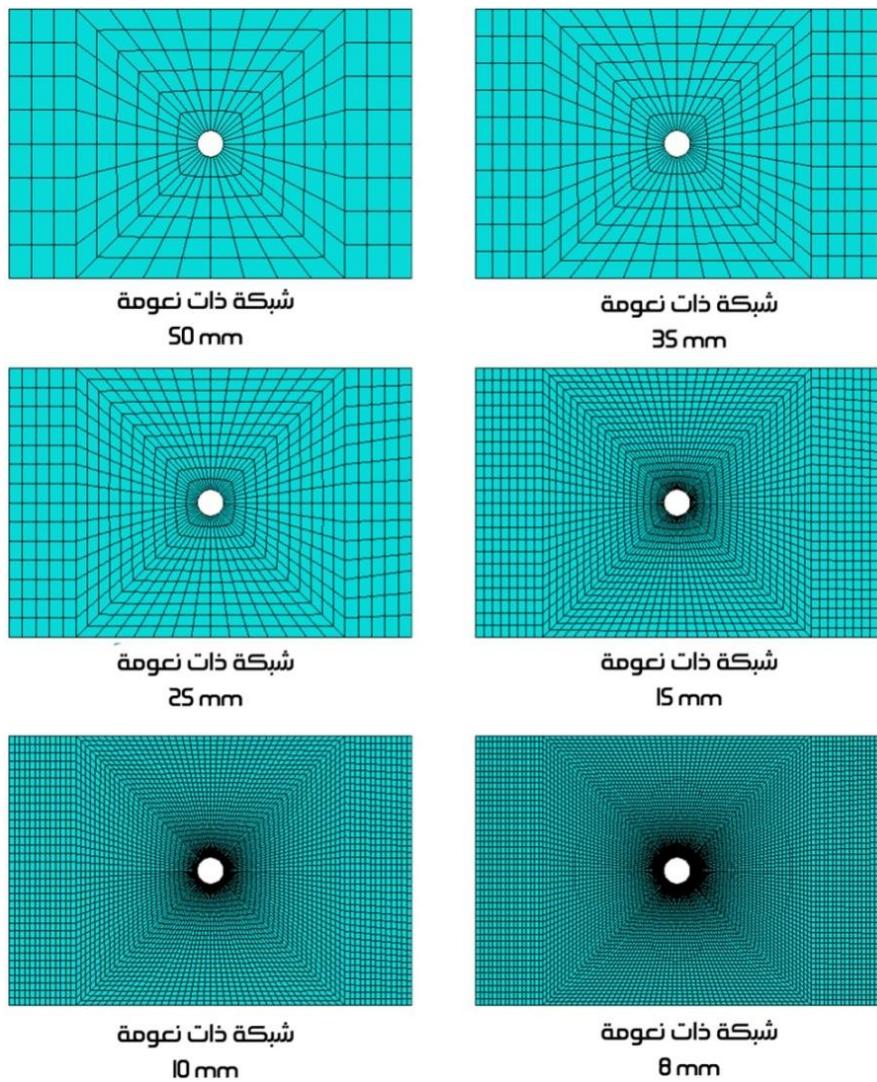
يمكن أيضاً نمذجة سوء التصنيع بطريقة أخرى وهي تحفيز المنشأة بوضع حمل (Trigger Load) في الاتجاه المتوقع للتحبيب لنقل الجملة إلى حالة الاستقرار (ABAQUS Documentation 2011) .



الشكل (3 – 5) النمط الأول لتشوه سوء الصنع للعينة CP5

3 – 7 دراسة تأثير نعومة الشبكة :

من أجل عدد صغير لعناصر الشبكة (مقاس العنصر المحدد كبير) يكون هناك عدم دقة وابتعاد عن النتيجة الصحيحة، بينما اختيار عدد أكبر لعناصر الشبكة (مقاس العنصر المحدد صغير) يؤدي إلى عدم اقتصادية في زمن التحليل. فيجب اختيار أبعاد الشبكة المثالية بحيث لا تؤثر على دقة النتائج وفي ذات الوقت أن تعطي وقتاً مناسباً لإجراء عملية التحليل. وللبحث عن الأبعاد المثالية لنعومة الشبكة (Mesh sensitivity), تم اختبار ست قيم مختلفة لأبعاد عنصر الشبكة (element size) والموجود في صفيحة واحدة (Panel), كما هو مبين في الشكل (3 – 6).



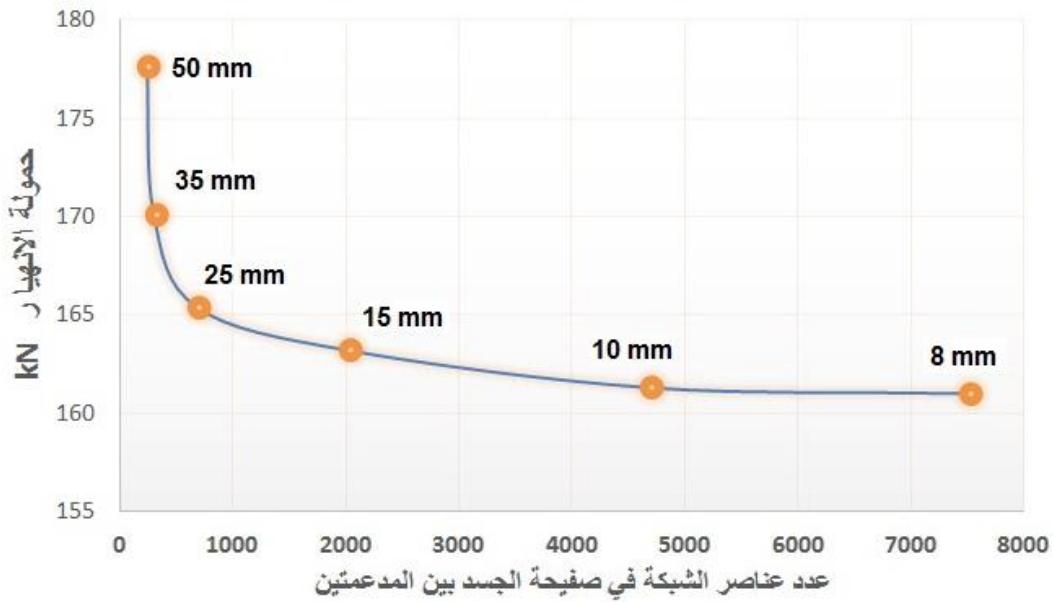
الشكل (3 – 6) نعومة الشبكة حسب أبعاد العنصر المحدد المستخدم

نتائج الاختبار موضحة في الجدول (3 – 1) الذي يبين حمولة الانهيار الموافقة لأبعاد عنصر الشبكة المستخدم وفي الشكل (3 – 7) الذي يبين العلاقة بين عدد عناصر شبكة صفيحة الجسد المحصورة بين مدعنتين عرضيتين والأجنحة وبين قيمة حمولة الانهيار الموافقة.

بعد عنصر الشبكة	عدد عناصر صفيحة الجسد	حمولة الانهيار				
8 mm	10 mm	15 mm	25 mm	35 mm	50 mm	
7507	4683	2016	677	294	235	عدد عناصر صفيحة الجسد
161	161.3	163.2	165.4	170.1	177.6	حمولة الانهيار

الجدول (3 – 1) حمولة الانهيار المتغيرة حسب نعومة الشبكة

فكمما يتبيّن من الشكل (3 – 7) ومن الجدول (3 – 1) أن قيمة حمولة الانهيار تثبت تقريرًا عند عدد عناصر للشبكة يقارب 5000 عنصر ، لذا سنختار درجة النعومة 10 mm لأنها تعطي دقة مقبولة في الحل مع اقتصادية في زمن التحليل و هو المقاس الذي سيتم اعتماده في كافة مراحل الدراسة التحليلية .

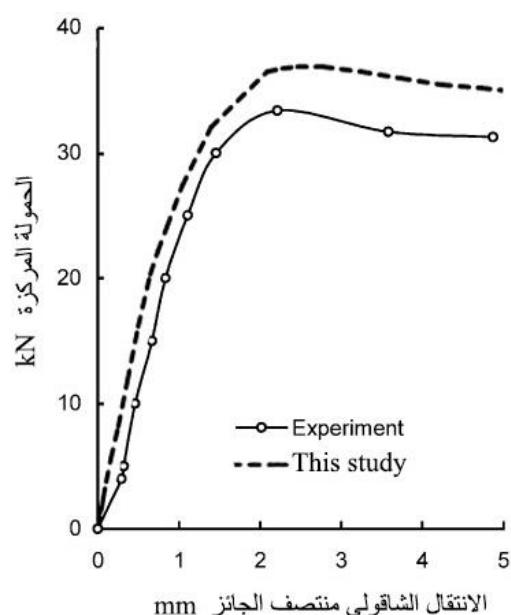


الشكل (3 - 7) العلاقة بين عدد عناصر شبكة صفيحة الجسد وحمولة الانهيار الموافقة

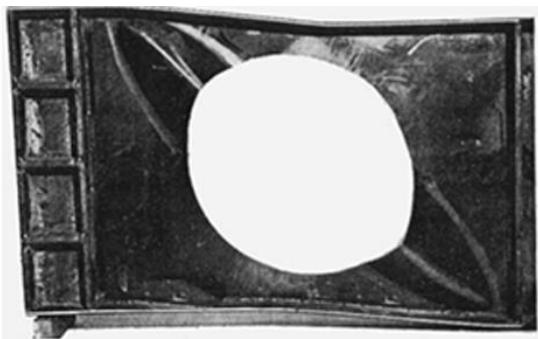
3 – 8 مقارنة النموذج مع الدراسة التجريبية:

: CP12 – 3 العينة

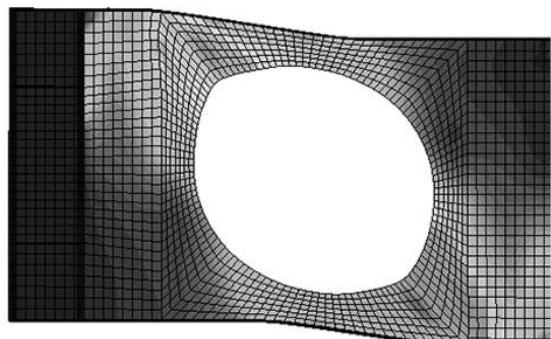
وهي عبارة عن جائز صفائحي بسيط الاستناد ويحتوي على فتحات دائرية متوضعة في منتصف صفيحة الجسد قطرها 400 mm، يبين الشكل (3 – 8) تقارباً كبيراً بين مخطط (الحمولة – الانتقال) الناتج عن النمذجة والتحليل (This study modeling) وبين مخطط (الحمولة – الانتقال) الناتج عن التجربة، حيث كانت حمولة الانهيار الناتجة عن الدراسة التجريبية N 33.5 kN، وحمولة الانهيار الناتجة عن التحليلية N 36.9 kN .



الشكل (3 – 8) مخطط (الحمولة – الانتقال) للعينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والتجريبية



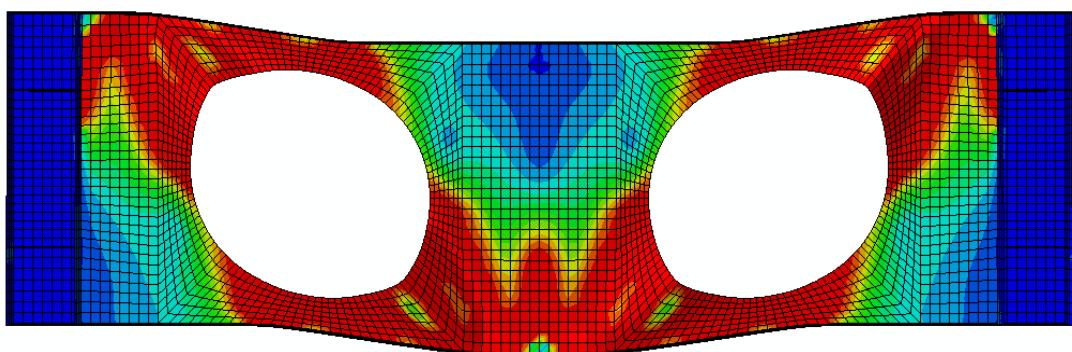
الشكل (b)



الشكل (a)

الشكل (3 – 9) شكل انهيار العينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والدراسة التجريبية

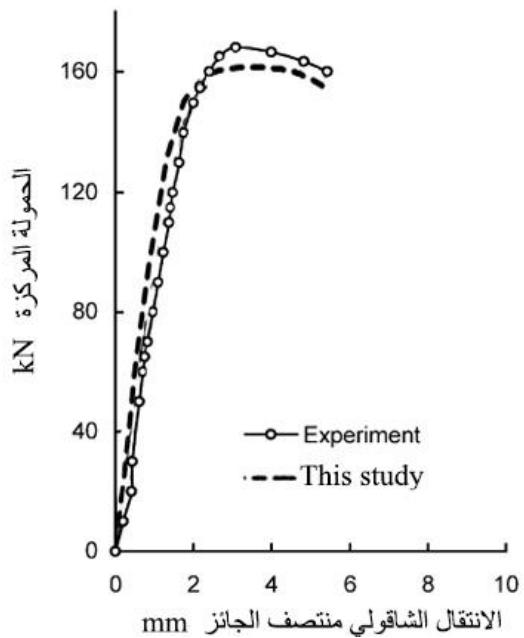
يبين الشكلان (3 – 9), (10 – 3) شكل انهيار العينة CP12 حسب الدراسة التحليلية الشكل (3 – 9) (a) و الدراسة التجريبية الشكل (3 – 9) (b). حيث يظهر بشكل واضح التقارب الكبير بين نتائج النمذجة والتحليل بواسطة برنامج ABAQUS وبين نتائج التجربة الواردة في الدراسة المرجعية .



الشكل (3 – 10) الشكل المنشوه للعينة CP12 حسب نتائج برنامج ABAQUS

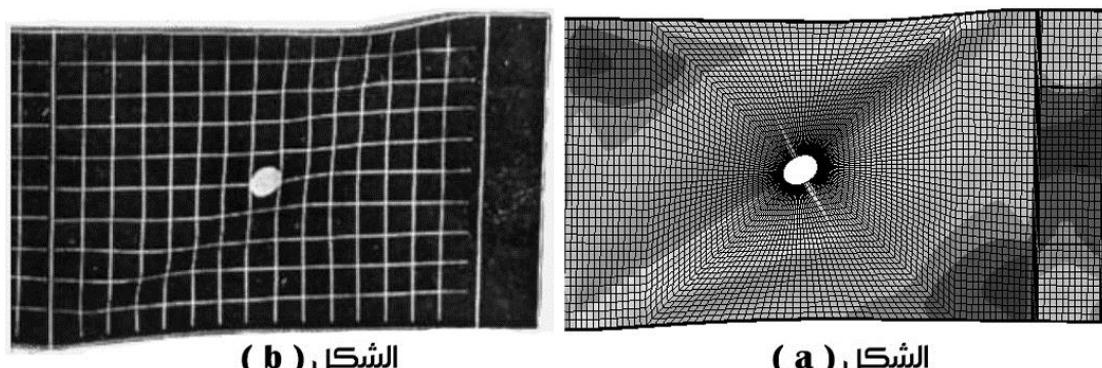
CP2 – 8 العينة :

وهي عبارة عن جائز صفائحي بسيط الاستناد ويحتوي على فتحات دائيرية متوضعة في منتصف صفيحة الجسد قطرها 50 mm, حيث كانت حمولة الانهيار الناتجة عن الدراسة التجريبية 168 kN, وحمولة الانهيار الناتجة عن الدراسة التحليلية (This study) 161.3 kN مخطط (الحمولة – الانتقال) الناتج عن النمذجة والتحليل وكذلك المخطط كما ورد في الدراسة المرجعية للعينة CP2.

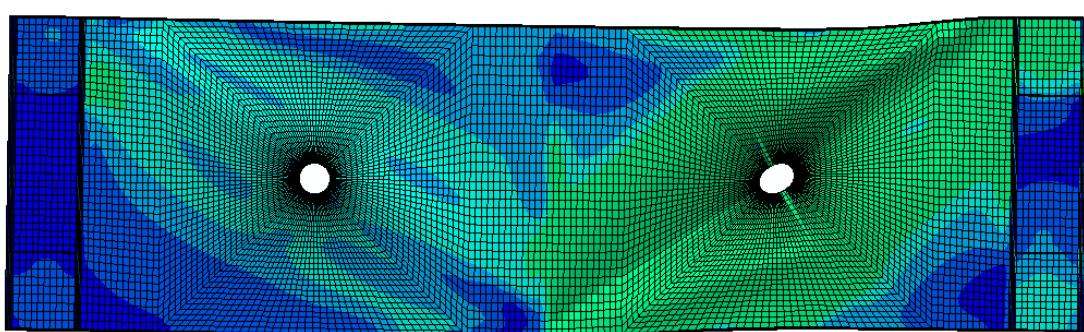


الشكل (3 – 11) مخطط (الحمولة – الانطلاق) للعينة CP2 حسب الدراسة التحليلية والتجريبية

يوضح الشكلان (3 – 12) و (3 – 13) شكل انهيار العينة CP2 حسب النتائج الواردة من الدراسة التحليلية الشكل (3 – 12) (a), والدراسة التجريبية الشكل (3 – 12) (b). حيث يظهر بشكل واضح التقارب الكبير بين نتائج برنامج ABAQUS وبين نتائج التجربة الواردة في الدراسة المرجعية .



الشكل (3 – 12) شكل انهيار العينة CP12 حسب الدراسة التحليلية والدراسة التجريبية



الشكل (3 – 13) الشكل المتشوه للعينة CP2 حسب نتائج برنامج ABAQUS



الفصل الرابع

الدراسة البارامتريّة

Parametric Study

٤ - ١ مقدمة:

بعد أن تم التأكيد من صحة نموذج برنامج العناصر المحددة ABAQUS، أصبح بالإمكان تنفيذ الدراسة البارامترية باعتماد الشروط السابقة ذاتها من حيث (الاستناد والتحميل، سوء الصنع البدائي، نوع الشبكة، نوع التحليل)، وذلك بتثبيت جميع الأبعاد التي تم ذكرها في الفصل السابق ضمن الفقرة (٣ - ٢)، وتغيير قيمة البارامتر المطلوب دراسة تأثيره على قدرة التحمل الحدية للجائز.

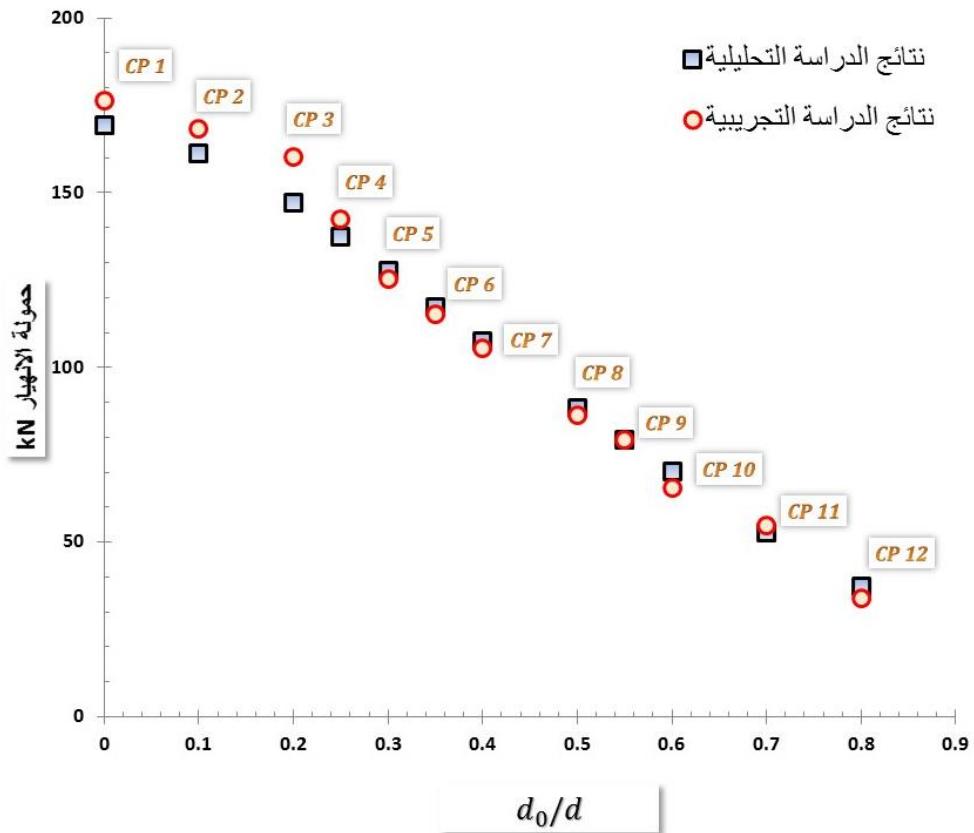
٤ - ٢ تأثير نسبة قطر الفتحة إلى عمق الجسد:

تمت الدراسة باعتماد أبعاد ثابتة لكلّ من الأجنحة والجسد و تغيير قطر الفتحات الدائرية d_0 الواقعة ضمن صفيحة الجسد بين القيمتين ($50 \rightarrow 400 \text{ mm}$) وبالتالي تغير النسبة d_0/d بين القيمتين ($0.1 \rightarrow 0.8$)، ومن ثم مقارنة الحمولة الحدية القصوى الناتجة عن النمذجة والتحليل Puo_{FEM} مع الحمولة الحدية القصوى لذات الجواز حسب نتائج الدراسة التجريبية Puo_{EXP} الواردة في الدراسة المرجعية، تفاصيل نموذج الاختبار ونتائج الدراسة موضحة في الجدول (٤ - ١).

Girder	$b_f \times T$	d/t	b/d	d_0 (mm)	d_0/d	Puo_{FEM} (kN)	Puo_{EXP} (kN)	Puo_{FEM} / Puo_{EXP}
CP 1	100×8	250	1.5	0	0	168.8	176	0.96
CP 2	100×8	250	1.5	50	0.1	161	168	0.96
CP 3	100×8	250	1.5	100	0.2	146.9	160	0.92
CP 4	100×8	250	1.5	125	0.25	137.2	142	0.97
CP 5	100×8	250	1.5	150	0.3	127.3	125	1.02
CP 6	100×8	250	1.5	175	0.35	116.8	115	1.02
CP 7	100×8	250	1.5	200	0.4	107.3	105	1.02
CP 8	100×8	250	1.5	250	0.5	88.1	86	1.02
CP 9	100×8	250	1.5	275	0.55	78.9	79	1.00
CP 10	100×8	250	1.5	300	0.6	69.9	65	1.08
CP 11	100×8	250	1.5	350	0.7	52.4	54.5	0.96
CP 12	100×8	250	1.5	400	0.8	36.9	33.5	1.10
CP Plate Girder with Centrally Placed circular opening						average	1.00	

الجدول (٤ - ١) الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامترية لتأثير النسبة d_0/d

وللوضيح المقارنة تم رسم الشكل (٤ - ١) الذي يبين تغير قدرة تحمل الجائز القصوى حسب نتائج الدراستين التجريبية والتحليلية تبعاً لتغير قطر الفتحة منسوباً إلى ارتفاع الجسد الذي نعبر عنه بالنسبة d_0/d . حيث يلاحظ من الجدول السابق بالنسبة للعينتين (CP2 & CP3) أن ازدياد قطر الفتحة إلىضعف ($50 \rightarrow 100 \text{ mm}$) يؤدي إلى نقصان قدرة التحمل ($168 \rightarrow 160 \text{ kN}$) أي بمقدار 0,05، وبالنسبة للعينتين (CP2 & CP12) أن ازدياد قطر الفتحة بمقدار ثمانية أضعاف ($50 \rightarrow 400 \text{ mm}$) يؤدي إلى نقصان قدرة التحمل بمقدار 80 تقريباً.



الشكل (4 - 1) العلاقة بين النسبة d_0 / d وحمولة الانهيار

يتضح من الشكل (4 - 1) أن ازدياد قطر الفتحة d_0 نسبة إلى ارتفاع ثابت للجسد d يؤدي إلى انخفاض طاقة تحمل الجائز القصوى (حمولة الانهيار) بشكل خطى تقريبا, كما يتضح التقارب الكبير بين نتائج الدراستين التحليلية والتجريبية والممثلة عديا في الجدول (4 - 1) بقيمة النسبة Puo_{FEM} / Puo_{EXP} والتي تساوى تقريبا إلى القيمة (1) .

4 - 3 تأثير صلابة الجناح :

نفذت الدراسة على أربع عينات مختلفة ($CP - T_1 \rightarrow CP - T_4$), حيث تم اختبار مجموعة قيم مختلفة لنسبة صلابة الجناح هي ($b_f / T = 12.5, 11.1, 9.5, 8$) والموافقة لـ أربع قيم مختلفة لسماكنة الجناح $T = (8, 9, 10.5, 12.5) mm$, أما بقية الأبعاد فكانت ثابتة كما يلى : قطر الفتحة $d_o = 250 mm$ وبالتالي $d_o / d = 0.5$, أبعاد صفيحة الجسد $b \times d = 750 \times 500 mm$ وبالتالي نسبة نحافة الجسد $d / t = 250$, الجدول (4 - 2) يبين أبعاد العينات المدروسة ونتائج الاختبار. حيث تتم عملية النمذجة والتحليل وحساب قدرة التحمل القصوى لكل عينة في حالتين, فتكون Puo هي قدرة التحمل القصوى في حالة الجنائز مفرغ بفتحة دائرية, Puv هي قدرة التحمل القصوى للجائز بنفس الأبعاد ولكن صفيحة الجسد غير مفرغة (مصممة).

Girder	b mm	d mm	t mm	d/t	d_0 mm	d_0/d	b_f mm	T mm	b_f/T	P_{uo} kN	P_{uv} kN	$\frac{P_{uo}}{P_{uv}}$
CP-T ₁	750	500	2	250	250	0.5	100	8	12.5	88.1	169	0.52
CP-T ₂	750	500	2	250	250	0.5	100	9	11.1	88.8	172	0.52
CP-T ₃	750	500	2	250	250	0.5	100	10.5	9.5	89.8	175	0.51
CP-T ₄	750	500	2	250	250	0.5	100	12.5	8.0	91.3	181	0.51

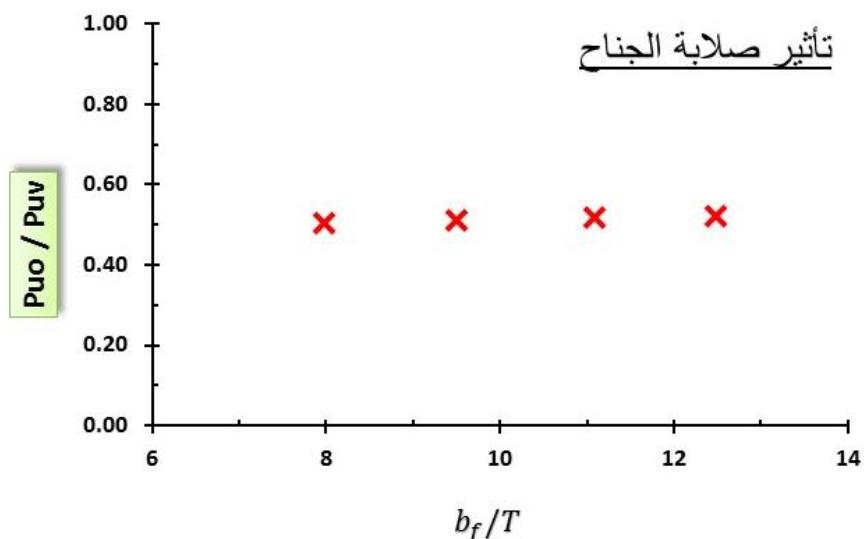


CP : Plate Girder with Centrally Placed circular opening

الجدول (4 – 2) الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامترية لتأثير صلابة الجناح

تبين الدراسة أن النسبة بين قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحى المفرغ وبين قدرة تحمل ذات الجائز عندما صفيحة الجسد غير مفرغة، لا تتعلق بمقدار صلابة الجناح ، فعندما يكون قطر الفتحة $d_o = 250\text{ mm}$ ، وأبعاد صفيحة الجسد $b \times d = 750 \times 500\text{ mm}$ ثابتة، وتتساوى إلى القيمة 0.52 كما هو مبين في الشكل (4 – 2) الذي يوضح العلاقة بين النسبة P_{uo} / P_{uv} والنسبة b_f / T .

أي أن تغير صلابة الجناح لا يؤثر على المقدرة القصوية للجائز الصفائحى حيث أن المهمة الأساسية للجناحين هي مقاومة عزوم الانعطاف المطبق.



الشكل (4 – 2) العلاقة بين النسبة P_{uo} / P_{uv} والنسبة b_f / T

4 – 4 تأثير نسبة نحافة الجسد :

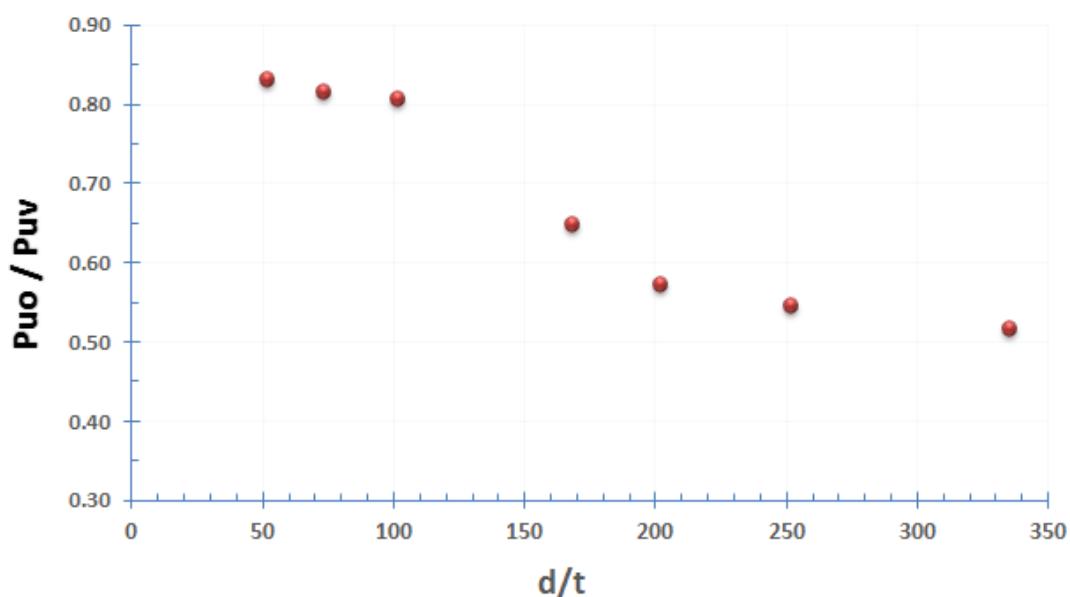
نفذت الدراسة على سبع عينات مختلفة $CP - dt_1 \rightarrow CP - dt_7$ ، حيث يتم دراسة كل عينة في حالتين فتكون P_{uo} هي قدرة التحمل القصوى في حالة الجائز مفرغ بفتحة دائرية ، P_{uv} هي قدرة التحمل القصوى للجائز بنفس الأبعاد ولكن صفيحة الجسد غير مفرغة (مصممة).

<i>Model</i>	<i>b</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>bf</i> (mm)	<i>T</i> (mm)	<i>d/t</i>	<i>d_o</i> (mm)	<i>Puo</i> kN	<i>Puv</i> kN	$\frac{Puo}{Puv}$
<i>CP - dt₁</i>	750	500	1.5	100	8	333	250	65	126	0.516
<i>CP - dt₂</i>	750	500	2	100	8	250	250	85	156	0.545
<i>CP - dt₃</i>	750	500	2.5	100	8	200	250	120	210	0.571
<i>CP - dt₄</i>	750	500	3	100	8	167	250	182	281	0.648
<i>CP - dt₅</i>	750	500	5	100	8	100	250	329.9	409.4	0.806
<i>CP - dt₆</i>	750	500	7	100	8	71	250	408.4	501.9	0.814
<i>CP - dt₇</i>	750	500	10	100	8	50	250	527.3	635.1	0.830

الجدول (4 - 3) الأبعاد ونتائج الاختبار لعينات الدراسة البارامترية لتأثير نسبة حافة الجسد

أبعاد صفية الجسد بين المدعمات $b_f \times T = 100 \times 8 \text{ mm}$, $b \times d = 750 \times 500 \text{ mm}$, وأبعاد الجناح $t = 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 10 \text{ mm}$ وبالتالي يكون $d_o / d = 0.5$, سماكة صفية الجسد تأخذ القيم التالية $t = 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 10 \text{ mm}$. لدينا سبع قيم مختلفة للنسبة d_o / t بين القيمتين $333 \rightarrow 50$, كما هو مبين في الجدول (3 - 4) الذي يعطي أبعاد العينات.

تبين الدراسة السابقة أنه لا يوجد فعلياً تغير ملحوظ في قيمة النسبة Puo / Puv عندما تكون نسبة حافة الجسد $d/t < 100$, بينما نلاحظ انخفاضاً تدريجياً في قيمة النسبة Puo / Puv للجوائز التي نسبة حافتها مع ازدياد قيمة النسبة d/t , أي أن ازدياد سماكة الجسد يؤدي إلى ازدياد قدرة تحمل الجائز كما هو مبين في الشكل (4 - 3) ، الذي يوضح العلاقة بين النسبة d/t والنسبة Puo / Puv .



الشكل (4 - 4) العلاقة بين النسبة d/t والنسبة Puo / Puv

يُلاحظ من الجدول (4 - 2) أن ازدياد سماكة الجناح بمقدار 4.5 mm بين القيمتين ($12.5 \rightarrow 8$) أدى إلى زيادة في قدرة تحمل الجائز المصمت ($169\text{ kN} \rightarrow 181\text{ kN}$) أي بمقدار 12 kN فقط , في المقابل يتبيّن من الجدول (4 - 3) أن ازدياد سماكة الجسد بين القيمتين $3 \rightarrow 1.5$ أي بمقدار 1.5 mm فقط, أدى إلى ارتفاع قدرة تحمل الجائز المصمت من القيمة 126 kN إلى القيمة 281 kN أي إلى زيادة مقدارها 155 kN , وهذا يدل على أن تأثير سماكة الجناح على قدرة التحمل الفصوى هو تأثير ضعيف نسبياً إذا ما ثبت مقارنته بالزيادة التي حدثت في قدرة التحمل الحدية لذات الجائز عند زيادة سماكة صفيحة الجسد , وهو أيضاً تأكيد على أن العمل الأساسي لصفيحتي الجناح في الجائز الصفائحي هو تحمل قوى الشد والضغط الناتجة عن عزم الانعطاف , بينما المهمة الأساسية لصفيحة الجسد هي مقاومة قوى القص .

4 - 5 تأثير طريقة التدعيم:

تم في هذه الدراسة اختبار سبع طرائق مختلفة للتدعيم, يتم تطبيقها على طرفي الجائز الصفائحي المفرغ, وهذه الطرائق هي: 1- التدعيم بصفحة , 2- التدعيم بحلقة , 3- التدعيم بمدعمات شاقولية , 4- التدعيم بمدعمات أفقية , 5- التدعيم بـ مدارات شاقولية وأفقية معاً (تدعيم متصلب), 6- التدعيم بحلقة ومدعة قطرية باتجاه حقل الشد, 7- التدعيم بحلقة ومدعتين قطريتين. حيث أن جميع المدعمات تشتراك بأنها ذات بعدين أساسيين هما سماكة المدعة t_r وعرضها h_r .

تم تنفيذ الدراسة وفق المنهجية التي اتبّعها الباحث (Chen 2009) في بحثه الذي أجراه على تدعيم الصفائح الفولاذية المفرغة بفتحات مربعة نسبة عمقها إلى عمق الصفيحة $d_0/h = 0.6$, لذا تم استخدام قيمة ثابتة لقطر الفتحة $d_0 = 300\text{ mm}$ بحيث يتم الحصول على فرق كبير نسبياً بين قدرة تحمل الجائز المفرغ وقدرة تحمل الجائز المصمت, مما يمكن من ملاحظة التغيرات التي تطرأ على قدرة التحمل نتيجة تطبيق طرائق التدعيم المختلفة, كما تم اعتماد قيمة موحدة لعرض المدعة المستخدمة في جميع مراحل الدراسة ولمختلف طرائق التدعيم, ومقدار هذه القيمة $h_r = 50\text{ mm}$, فتصبح بذلك عملية المقارنة بين طرائق التدعيم صحيحة وفعالة.

فتكون آلية العمل هي أن يتم في كل خطوة زيادة سماكة المدعة t_r , ثم حساب قدرة التحمل الجديدة للجاز , والتي سنرمز لها $P_{ul(reinf)}$, على أن يتم التوقف عن الزيادة عند حدوث إحدى حالتين :

- 1- عندما تثبت تقريباً قدرة التحمل النهائية للجاز وتصبح الزيادة في سماكة المدعة لا تؤثر على مقدرة الجائز ,
- 2- عندما نصل إلى سماكات كبيرة للمدعة وغير منطقية من الناحية الاستثمارية وفي هذه الدراسة سيتم التوقف عن الزيادة عند الوصول إلى سماكة $t_r = 18\text{ mm}$.

حيث يتم تقييم فعالية نوع التدعيم المستخدم بمقارنة قيمة قدرة تحمل الجائز المدعم $P_{ul(reinf)}$ مع القيمة $P_{ul(t_r=0)} = 69.9\text{ kN}$ وهي قدرة تحمل الجائز المفرغ عند عدم وجود التدعيم, حيث تعتبر طريقة التدعيم مفيدة عندما تؤدي إلى زيادة قدرة تحمل الجائز عن القيمة السابقة, أما طريقة التدعيم الفعالة فهي التي يؤدي

استخدامها إلى الوصول بالجائز إلى قدرة تحمل مقدارها $P_{ul(solid)} = 168 \text{ kN}$ أو أكثر، وهي قدرة تحمل الجائز الصفائحي غير المفرغ (أي استعادة كامل قدرة التحمل التي فقدها الجائز بسبب وجود الفتحة).

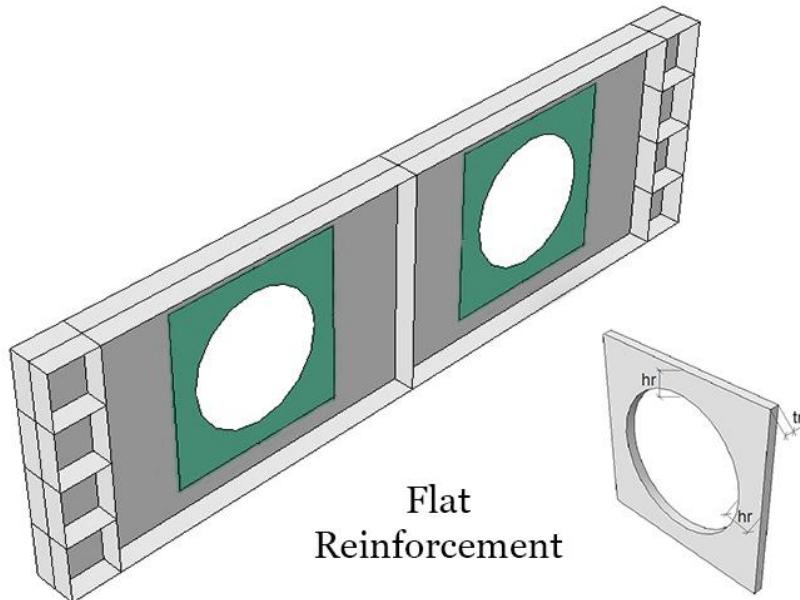
تم تنظيم البيانات ونتائج الدراسة في جداول مشابهة للجدول التالي:

$t_r \text{ (mm)}$	$P_{ul(reinf)} \text{ kN}$	$P_{ul(reinf)}/P_{ul(solid)}$
1	2	3

الشكل (4 - 4) نموذج الجدول المستخدم لتسجيل نتائج دراسة تدعيم الفتحات

حيث في العمود (1) قيم التزايد في سماكة المدعمة المستخدمة t_r ، والعمود (2) سيوضع فيه قيمة قدرة تحمل الجائز المدعم الموافقة لكل قيمة من قيم t_r ، وفي العمود (3) سيتم وضع قدرة تحمل الجائز المدعم منسوبة إلى قدرة تحمل الجائز عندما لا يحتوي الجسد على فتحات، وطالما بقيت هذه القيمة أقل من القيمة (1) فإنه لا يزال هناك قدرة تحمل ضئيلة لم يتم استعادتها.

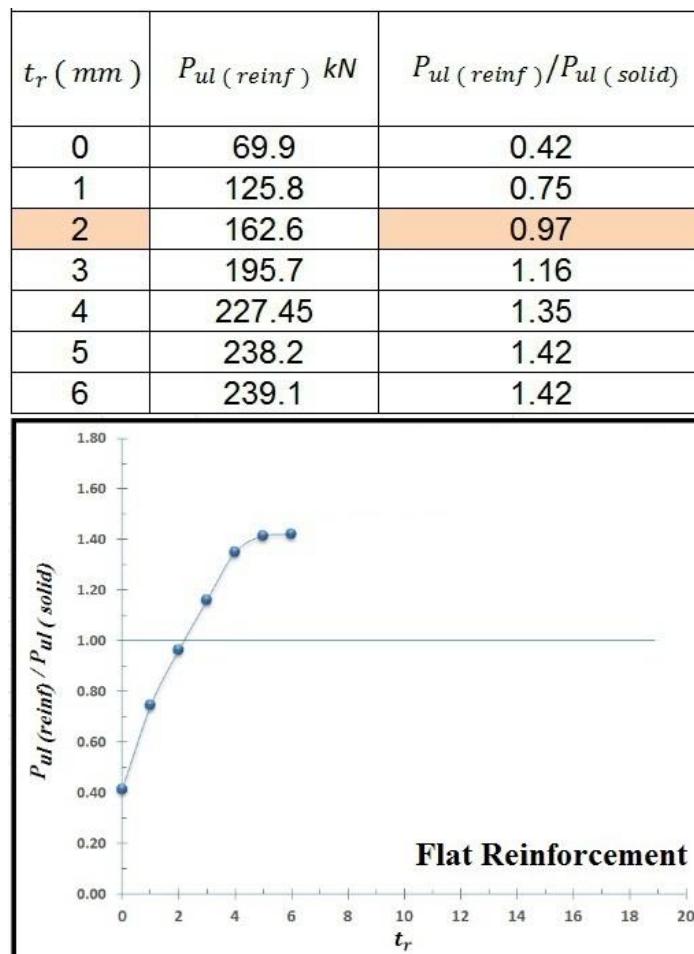
1 - 5 - 4 التدعيم بصفحة :



الشكل (4 - 4) التدعيم بصفحة

المدعمة عبارة عن صفيحة فولاذية مربعة الشكل مفرغة في المنتصف بفتحة دائرية قطرها مساوي لقطر الفتحة المنفذة ضمن صفيحة الجسد في الجائز الصفائحي، وتلham على صفيحة الجسد بحيث تتطبق الفتحتين على

بعضهما تماماً. يتم تنفيذ الدراسة بتطبيق تزايد مقداره 1 mm على قيمة سماكة المدعمة t_r في كل خطوة وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة، نتائج التحليل موضحة في الشكل (4 – 6).

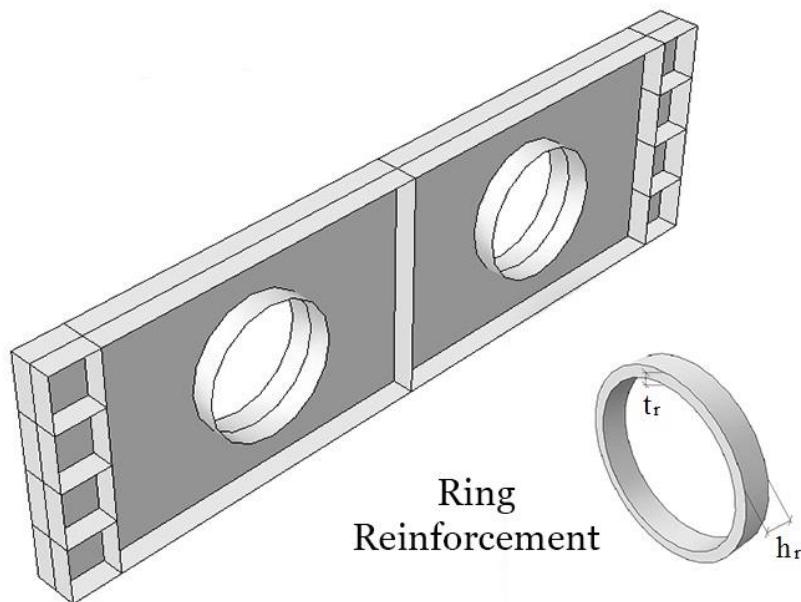


الشكل (4 – 6) نتائج تحليل التدعيم بـ صفيحة فولاذية

حيث يتبيّن من النتائج أنه وباستخدام صفيحة تدعيم سماكتها 2 mm ، فإن نسبة قدرة تحمل الجائز المفرغ والمدعّم إلى قدرة تحمل الجائز غير المفرغ $P_{ul}(\text{reinf}) / P_{ul}(\text{solid}) = 0.97$ ما يعني استعادة قدرة التحمل المفقودة من الجائز بسبب وجود الفتحة بشكل كامل تقريباً، كما يلاحظ أنه وباستخدام مدعّمة ذات سماكة $t_r = 5 \text{ mm}$ يمكن الوصول إلى قدرة تحمل للجازين المفرغ والمدعّم أكبر بـ 40% من قدرة تحمله عندما يكون غير مفرغ.

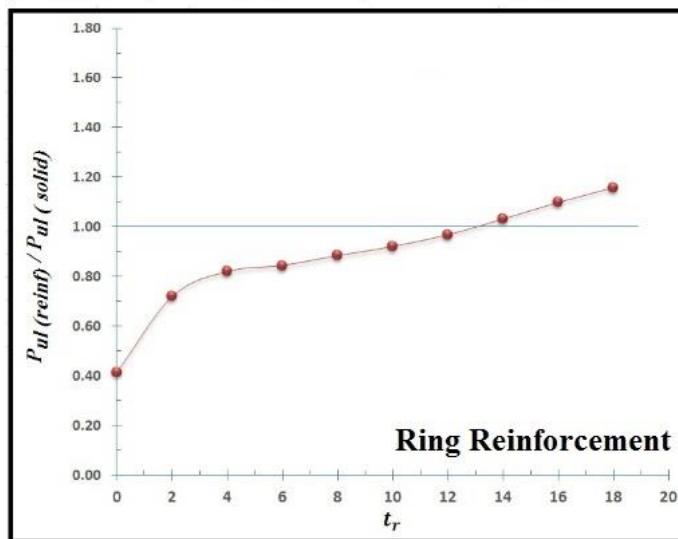
4 – 5 – 2 التدعيم بحلقة :

تمت الدراسة بتطبيق تزايد مقداره 2 mm على قيمة سماكة المدعّمة t_r في كل خطوة وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة ، نتائج التحليل موضحة في الشكل (4 – 8). حيث يتبيّن من هذه النتائج أنه ولاستعادة قدرة تحمل الجائز بشكل كامل يلزم استخدام مدعّمة حلقيّة سماكتها التقريريّة 14 mm .



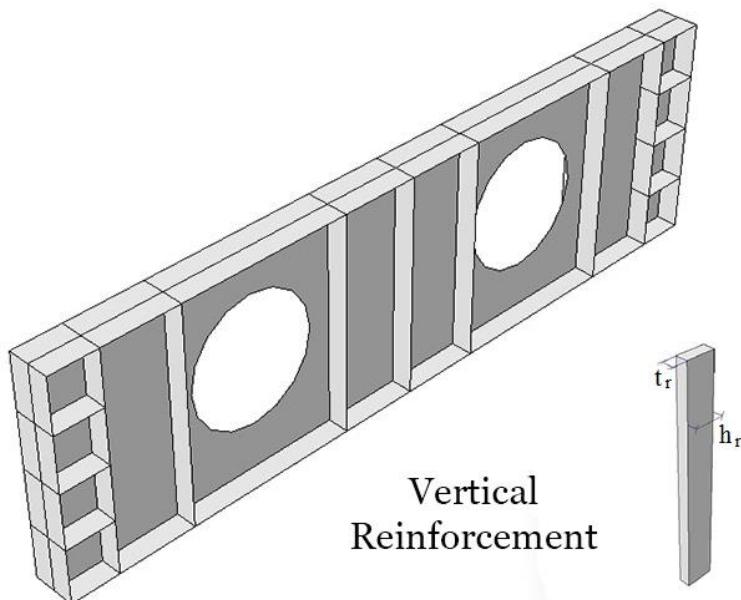
الشكل (4 - 7) التدعيم ب حلقة

t_r (mm)	$P_{ul} (reinf)$ kN	$P_{ul} (reinf) / P_{ul} (solid)$
0	69.9	0.42
2	121.4	0.72
4	138.2	0.82
6	142.3	0.85
8	149	0.89
10	155.1	0.92
12	163.1	0.97
14	173.8	1.03
16	185	1.10
18	195	1.16



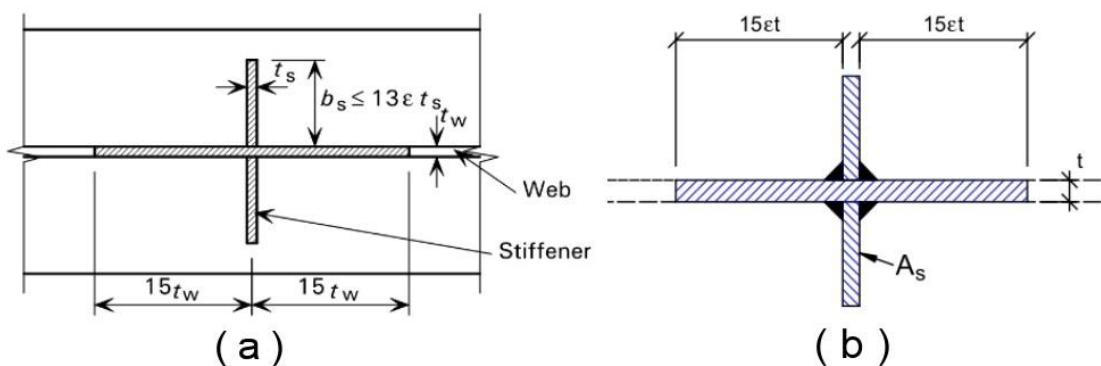
الشكل (4 - 8) نتائج تحليل استخدام التدعيم ب حلقة

٤ - ٥ - ٣ التدعيم بمدعمة شاقولية :



الشكل (4 - 9) التدعيم بـ مدعمات شاقولية

حسب اشتراطات الكود البريطاني المبين بالشكل (4 - 10) (a) فإن مسافة التأثير الفعالة للمدعمة تعطى بالقيمة $15 \times t_w = 15 \times 2 = 30 \text{ mm}$, أما الكود الأوروبي الشكل (4 - 10) (b), فيحددها بالقيمة $15 \times t \times \varepsilon = 15 \times 2 \times \sqrt{\frac{235}{265}} = 28.25 \text{ mm}$ طرف الفتحة للاستفادة من المدعمة بشكل أفضل.

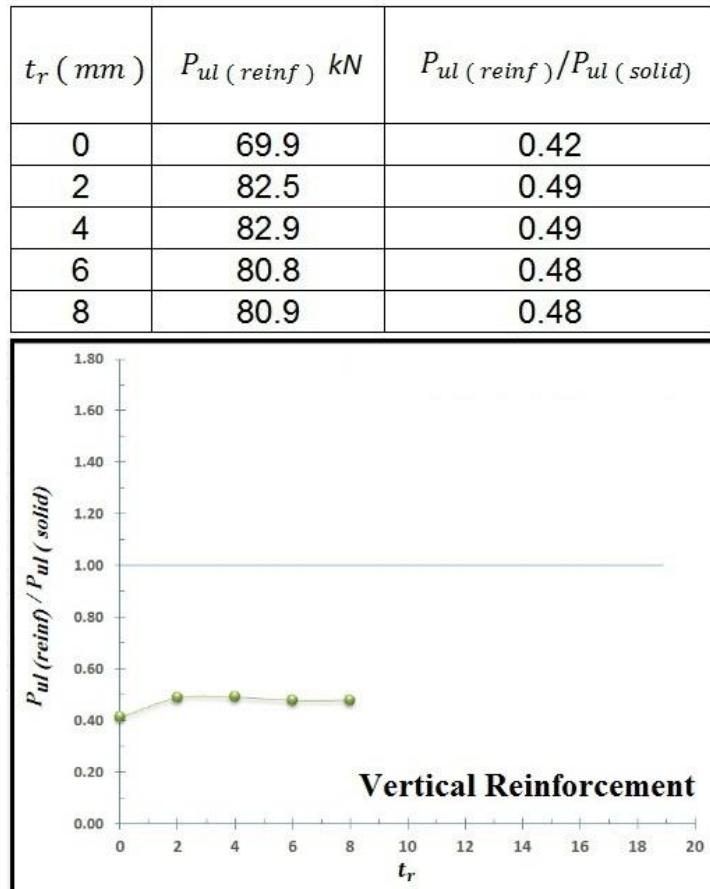


[BS 5950 - 1 : 2000]

[EN 1993 - 1 - 5 : 2004]

الشكل (4 - 10) مسافة التأثير الفعالة للمدعمة العرضية

تمت الدراسة كذلك بتطبيق تزايد مقداره 2 mm على قيمة سمكية المدعمة t_r في كل مرحلة، وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة، نتائج التحليل موضحة في الشكل (4 - 11).



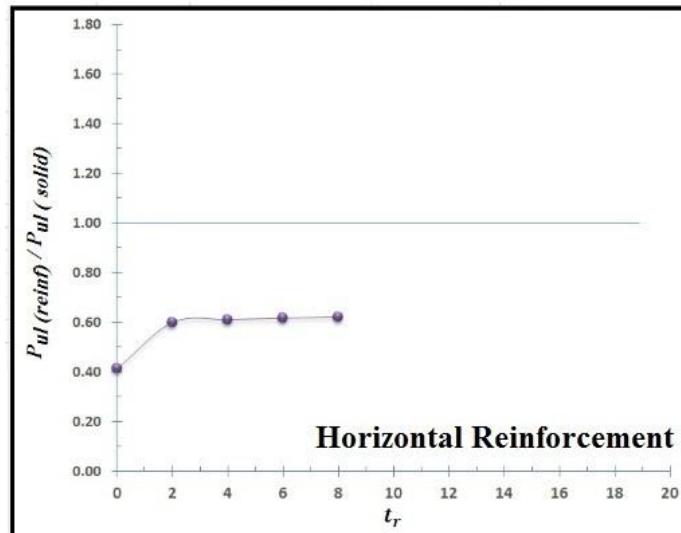
الشكل (4 – 11) نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات شاقولية

حيث تبين النتائج أن هذه الطريقة من التدعيم تؤدي إلى زيادة بسيطة في قدرة تحمل الجائز، ويعود السبب في ذلك إلى وجود المدعمتين الشاقوليتيين الإضافيتين حول الفتحة، والذي أدى إلى تقسيم صفيحة الجسد إلى ثلاثة أقسام، وبالتالي تخفض قيمة عامل شكل صفيحة الجسد المؤطرة بالجناحين والمدعمات الجديدة، ما يزيد قليلاً من قدرتها على مقاومتها تحنيب القص، ولكن هذا التدعيم لم يستطع توصيل حقل الشد المنقطع نتيجة وجود الفتحة ضمن صفيحة الجسد، ولم تقدر وبالتالي على استعادة قدرة التحمل المفقودة بشكل كامل والتي تسبب بها وجود الفتحة.

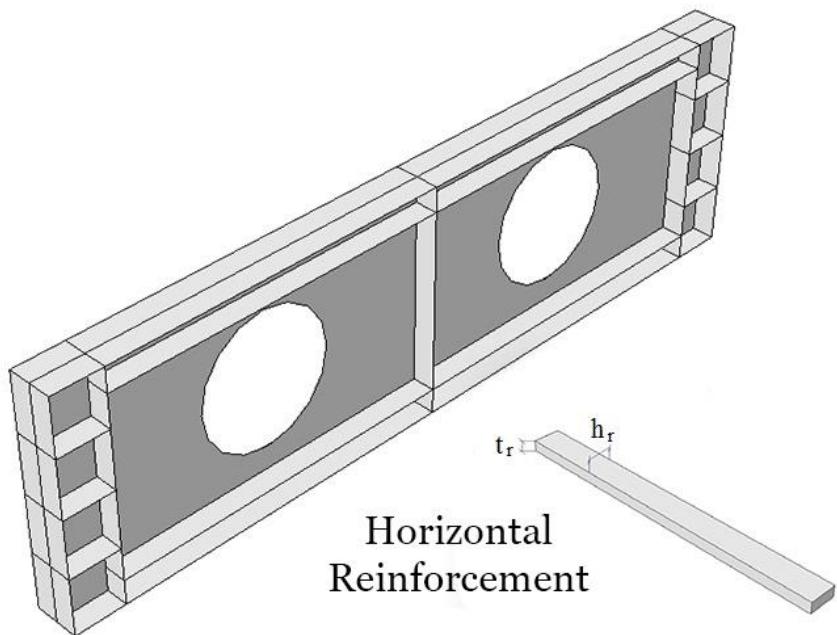
4 – 5 – 4 التدعيم بمدعمة أفقية :

تم كذلك وضع المدعمات الأفقية على تباعد 50 mm من طرف الفتحة، لمراعاة اشتراطات كل من الكود البريطاني والكود الأوروبي، ثم بتطبيق تزايد مقداره 2 mm على قيمة سماكة المدعمة t في كل مرحلة وحساب قدرة تحمل الجائز المموافقة، نتائج التحليل موضحة في الشكل (4 – 12).

t_r (mm)	$P_{ul} (reinf)$ kN	$P_{ul} (reinf) / P_{ul} (solid)$
0	69.9	0.42
2	101.1	0.60
4	103	0.61
6	103.9	0.62
8	105	0.63



الشكل (4 – 12) نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات أفقية



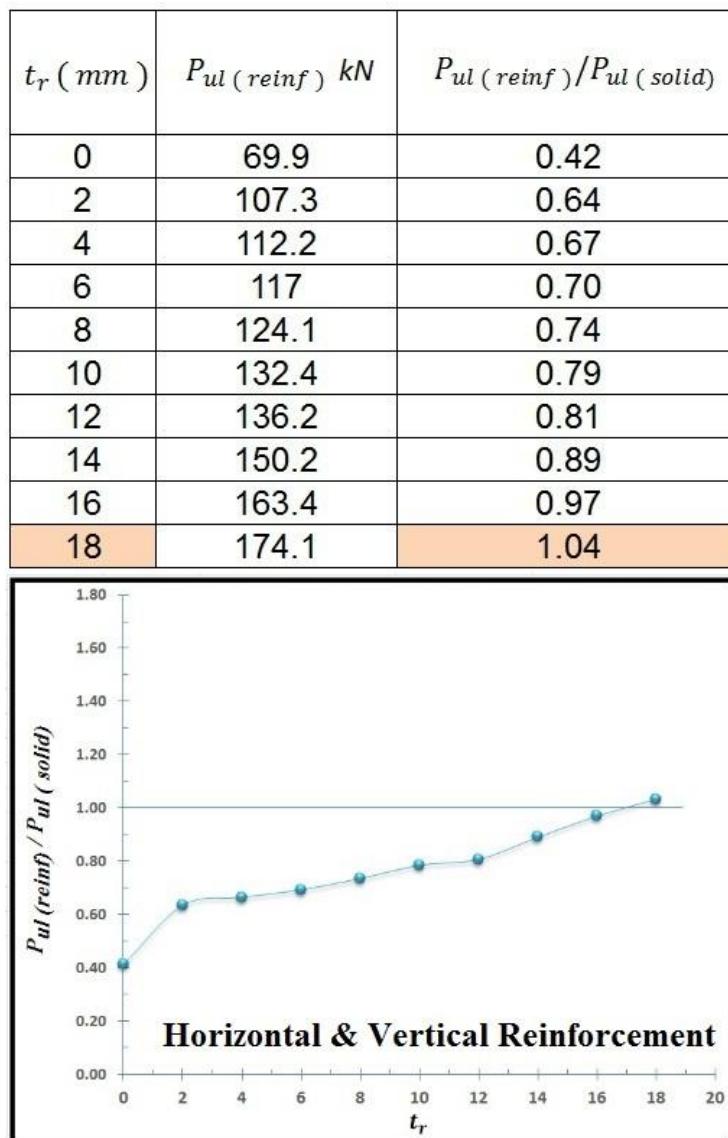
الشكل (4 – 13) التدعيم بـ مدعمات أفقية

حيث يتبيّن من النتائج أن التدعيم بمدّعمة أفقية أيضًا يؤدي إلى زيادة بسيطة في قدرة تحمل الجائز ولكنها أفضل من التدعيم الشاقولي بحوالي kN 13، ويعود السبب في ذلك إلى الانخفاض الحاصل في قيمة النسبة d/t

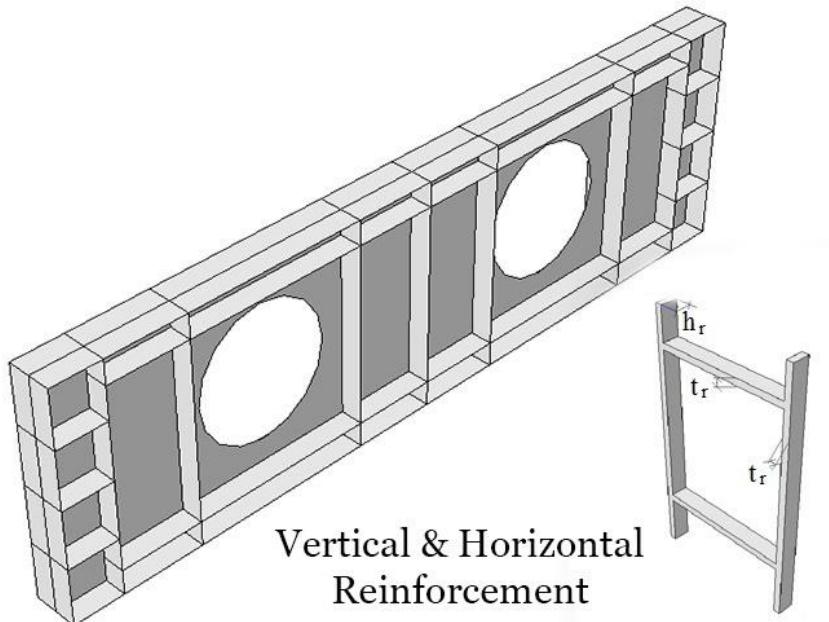
والذي نتج عن وضع المدعمات الأفقية وبالتالي ازدياد مقاومة تحنيب القص لصفحة الجسد، ولكن رغم ذلك تبقى هذه الطريقة غير مجده حيث أنها غير قادرة على استعادة قدرة تحمل الجائز المفقودة بسبب وجود الفتحة بشكل كامل، وذلك لعدم قدرتها على توصيل حقل الشد ضمن صفيحة الجسد والمنقطع بسبب وجود الفتحة.

٤ - ٥ - ٥ - ٤ التدعيم بدعمات أفقية وشاقولية معاً (تدعم متصلب) :

تمت الدراسة كذلك بتطبيق تزايد مقداره mm 2 على قيمة سماكة المدعمة, t_r في كل مرحلة وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة، نتائج التحليل موضحة في الشكل (4 - 14)، حيث يتبين من النتائج أن التدعيم بدعمات أفقية وشاقولية يمكنه عند سماكة 18 mm أن يستعيد قدرة تحمل الجائز بشكل كامل.

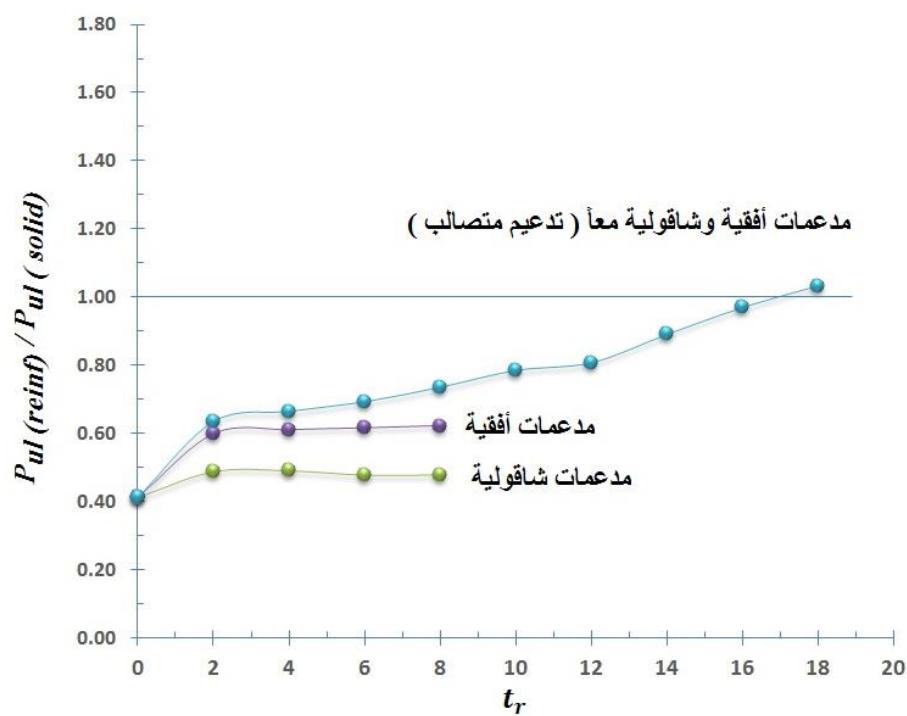


الشكل (4 - 14) نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعمات شاقولية وأفقية معاً (التدعيم المتصلب)



الشكل (4 – 15) التدعيم بـ مدعمات شاقولية وأفقية (تدعيم متصالب)

إن الزيادة التي يتم الحصول عليها في مقاومة الجائز جراء تطبيق هذا التدعيم، هي زيادة أكبر فعلياً من تلك التي نحصل عليها من تطبيق التدعيم الشاقولي أو التدعيم الأفقي كل بمفرده كما يوضح الشكل (4 – 16) ، وذلك بسبب انخفاض نسبة كل من عامل سطحية الجسم، ونسبة حافظتها، والذي يؤدي إلى زيادة مقاومة تحنيب القص لصفحة الجسم المتبقية والموجودة بين المدعمات الإضافية، لكن هذا التدعيم سيكون مكلفاً من الناحية الاقتصادية.

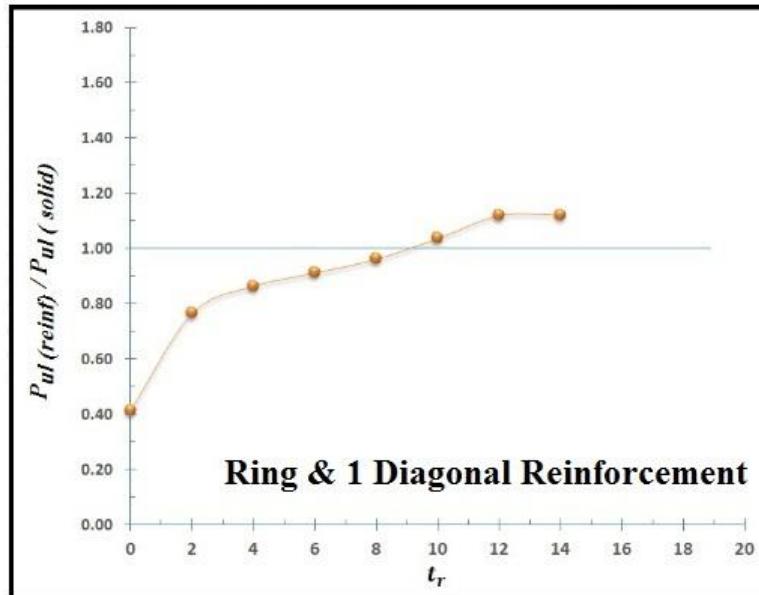


الشكل (4 – 16) مقارنة التدعيم المتصالب مع التدعيم بمدعمات أفقية فقط و مدعمات شاقولية فقط

٤ - ٥ - ٦ التدعيم بمدعاة حلقة ومدعاة قطرية واحدة باتجاه حقل الشد:

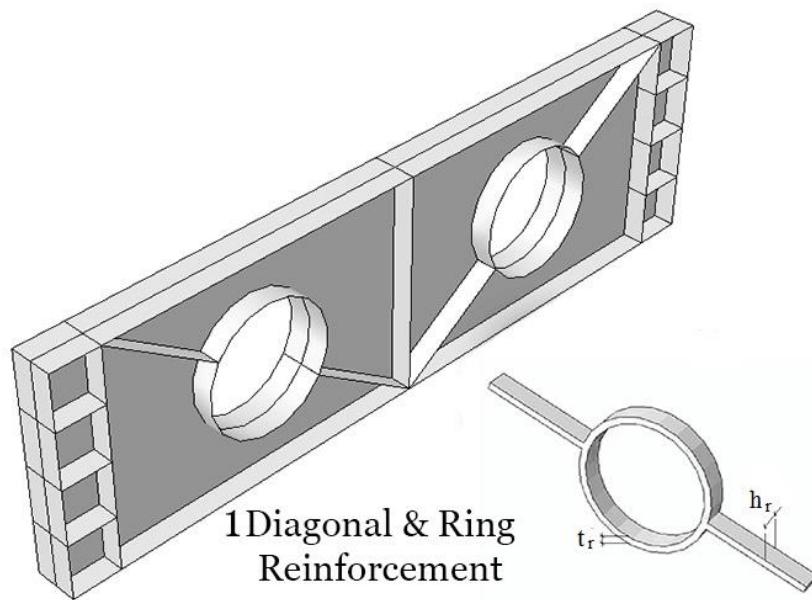
تمت الدراسة كذلك بتطبيق تزايد مقداره 2 mm على قيمة سماكة المدعاة t_r في كل خطوة، وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة، نتائج التحليل موضحة في الشكل (٤ - ١٧).

$t_r (\text{ mm })$	$P_{ul} (\text{ reinf }) \text{ kN}$	$P_{ul} (\text{ reinf }) / P_{ul} (\text{ solid})$
0	69.9	0.42
2	129.2	0.77
4	145.7	0.87
6	153.8	0.92
8	162.2	0.97
10	174.8	1.04
12	188.7	1.12
14	189.1	1.13



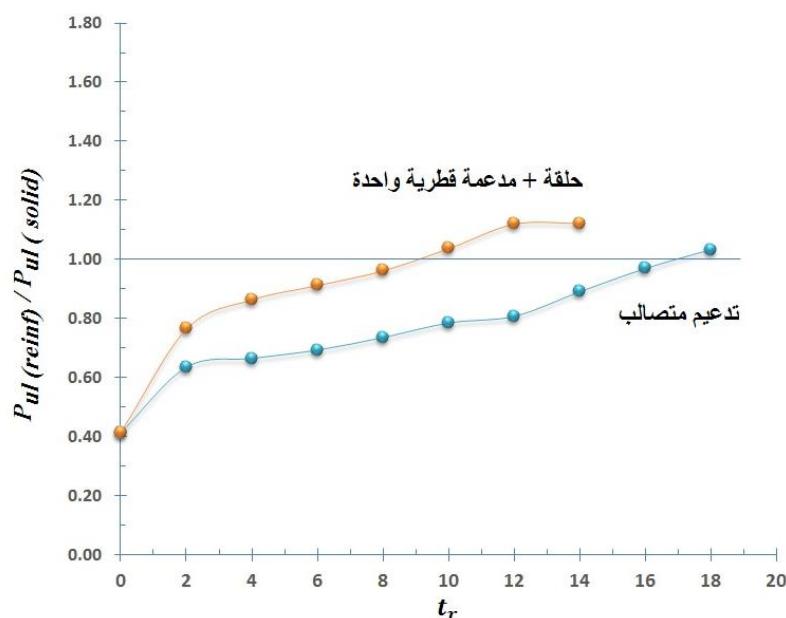
الجدول (٤ - ١٧) نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعاة حلقة ومدعاة قطرية باتجاه واحد معاً

حيث يتبيّن من النتائج أنه من الممكن استعادة قدرة تحمل الجائز المفقودة بشكل كامل تقريباً، إذا ما تم استخدام مدعاة ذات سماكة ذات 10 mm .



الشكل (4 - 18) التدعيم بمدعة حلقة ومدعمة قطرية باتجاه واحد معًا

يمكن مقارنة الشكلين (4 - 14) و (4 - 17) ملاحظة أنه عندما كانت $t_r = 2$, كانت قدرة تحمل الجائز 129.2 kN في حين كانت قدرة تحمل الجائز المدعم بتدعم متصلب 107.3 kN, وعندما أصبحت $t_r = 14$ كانت قدرة تحمل الجائز 189.1 kN, بينما كانت قدرة تحمل الجائز باستخدام التدعيم المتصلب 150.2 kN, ما يدل على أنه عند كل سماكة مستخدمة، فإن التدعيم بهذه الطريقة يعطي زيادة تقريبية في المقاومة مقدارها 23% أكبر من تلك التي نحصل عليها بتطبيق التدعيم المتصلب، مع المحافظة على كلف الاقتصادية أقل كما يبين الشكل (4 - 19)، حيث أنه يتم وضع المدعمات باتجاه حقل الشد وبالتالي تقوية جسد الجائز على مقاومة قوى الشد المتشكلة قطريا.

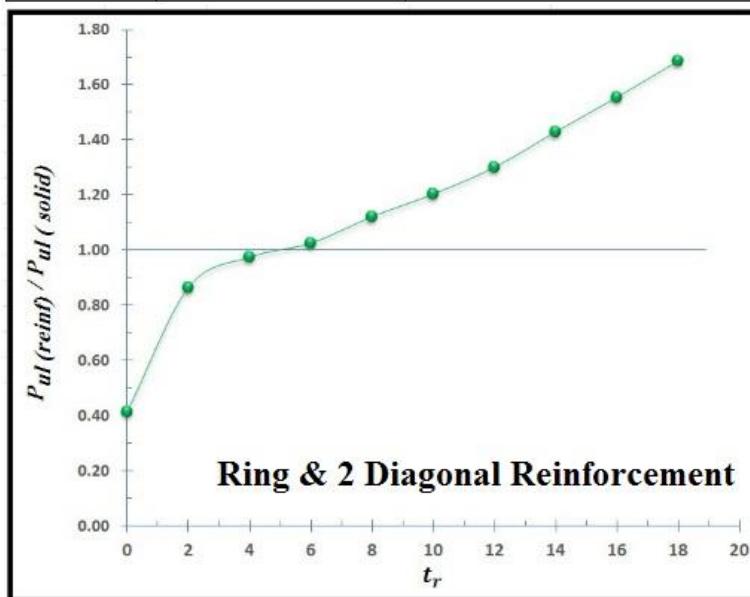


الشكل (4 - 19) مقارنة التدعيم بحلقة ومدعمة قطرية واحدة مع التدعيم المتصلب

٤ - ٥ - ٧ التدعيم بمدعاة حلقة ومدعنتين قطريتين بالاتجاهين:

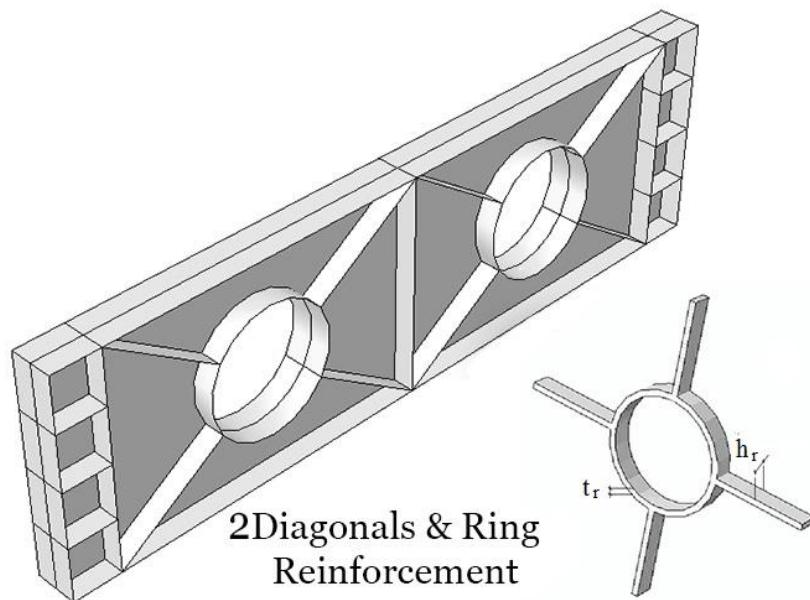
تمت الدراسة بتطبيق تزاييد مقداره 2 mm على قيمة سماكة المدعنة t_r في كل خطوة وحساب قدرة تحمل الجائز الموافقة، وكانت نتائج الدراسة مبينة في الشكل (20 - 4).

$t_r (\text{ mm })$	$P_{ul} (\text{ reinf }) \text{ kN}$	$P_{ul} (\text{ reinf }) / P_{ul} (\text{ solid })$
0	69.9	0.42
2	145.8	0.87
4	164.1	0.98
6	172.7	1.03
8	188.8	1.12
10	202.6	1.21
12	219	1.30
14	240.6	1.43
16	261.7	1.56
18	283.8	1.69



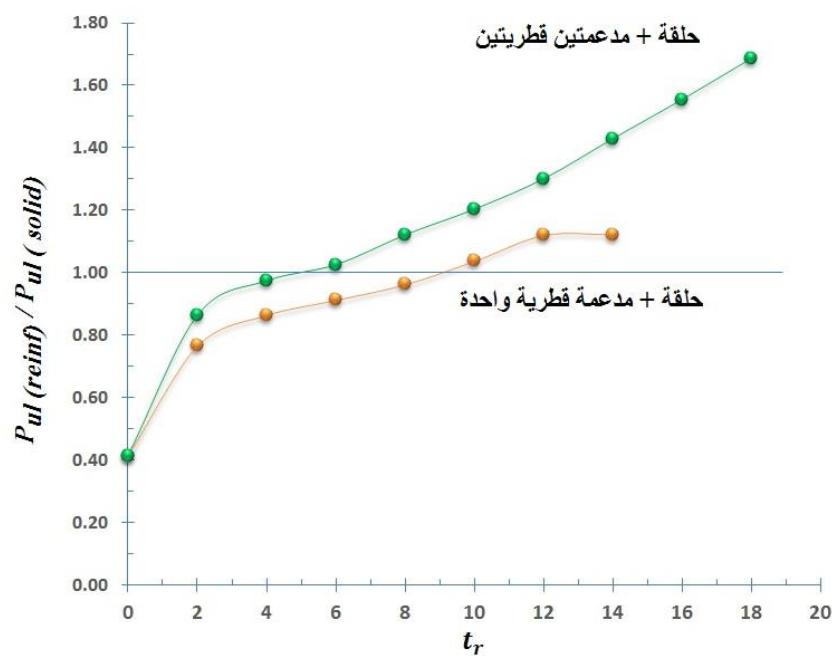
الجدول (4 - 20) نتائج تحليل استخدام التدعيم بـ مدعاة حلقة ومدعنتين قطريتين بالاتجاهين

حيث يلاحظ من النتائج أنه من الممكن استعادة قدرة تحمل الجائز المفقودة بشكل كامل بتطبيق مدعاة حلقة ومدعنتين قطريتين بسماكة 6 mm , كما يمكن ملاحظة أنه وباستخدام سماكة $t_r > 16 \text{ mm}$ يمكن أن تزداد قدرة تحمل الجائز المفرغ والمدعى إلى أكثر من مرة ونصف من قدرة تحمل ذات الجائز عند عدم وجود فتحة.



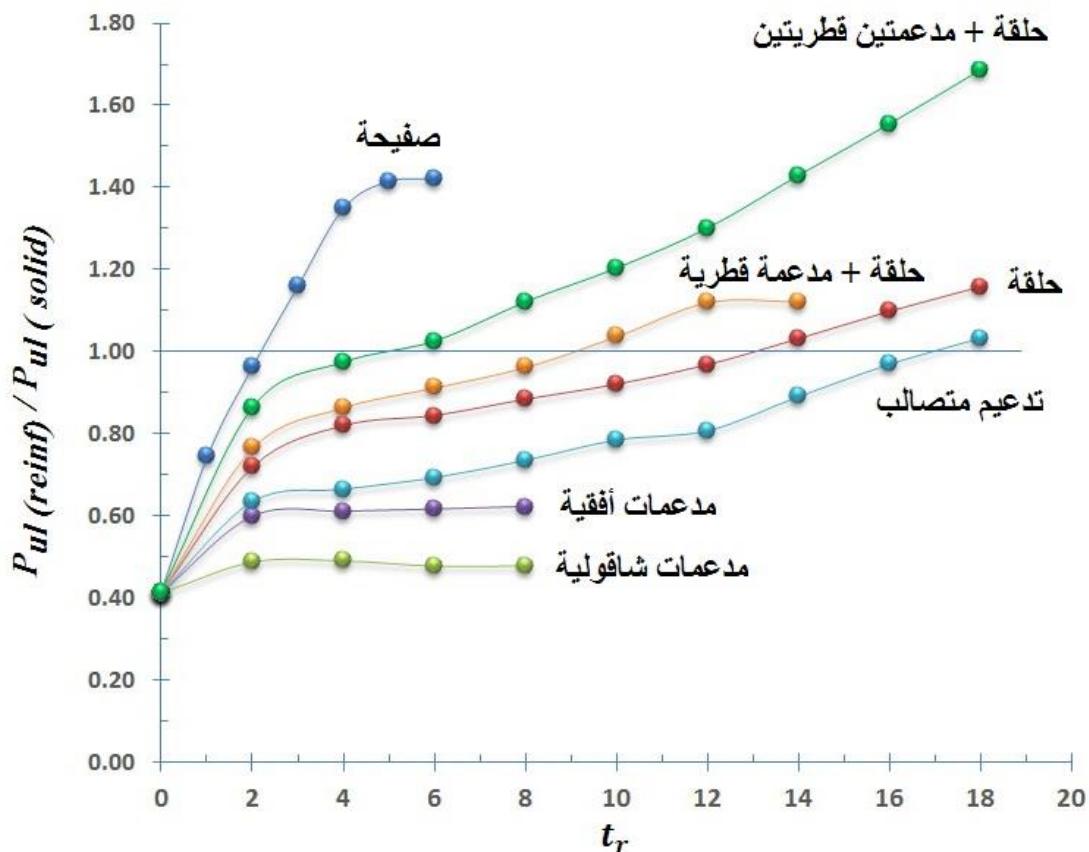
الشكل (4 - 21) التدعيم بمدمعة حلقة ومدعمنين قطريتين بالاتجاهين

بمقارنة الشكلين (4 - 17) و (4 - 20) يلاحظ أنه عندما كانت $t_r = 2$, كانت قدرة تحمل الجائز في حين كانت قدرة تحمل الجائز المدعم بحلقة ومدعمة قطرية واحدة $129.2 kN$, وعندما أصبحت $t_r = 14$, كانت قدرة تحمل الجائز $240.6 kN$, بينما كانت قدرة تحمل الجائز المدعم بحلقة ومدعمة قطرية واحدة $189.1 kN$, ما يدل على أن هذه الطريقة تعطي زيادة تقريبية في المقاومة أكبر بمقدار 12% مقارنة مع التدعيم باستخدام حلقة ومدعمة قطرية واحدة, حيث أن إضافة المدعمة القطرية بالاتجاه الثاني العمودي على حقل الشد يساهم أيضاً في زيادة مقاومة صفيحة الجسد كما يوضح الشكل (4 - 22).



الشكل (4 - 22) مقارنة التدعيم بحلقة ومدعمة قطرية واحدة مع التدعيم بحلقة ومدعمنين قطريتين

من الأشكال (6 - 4) , (8 - 4) , (10 - 4) , (11 - 4) , (14 - 4) , (17 - 4) , (20 - 4) يتبين أن جميع طرائق التدعيم التي تم اختبارها تؤدي إلى زيادة طاقة التحمل القصوى للجائز المفرغ عن القيمة المفقودة بسبب وجود الفتحة بشكل كامل فهي: التدعيم بـ صفيحة والدعيم بـ حلقة والدعيم المتصلب، والدعيم بحلقة مع مدعمات قطرية.

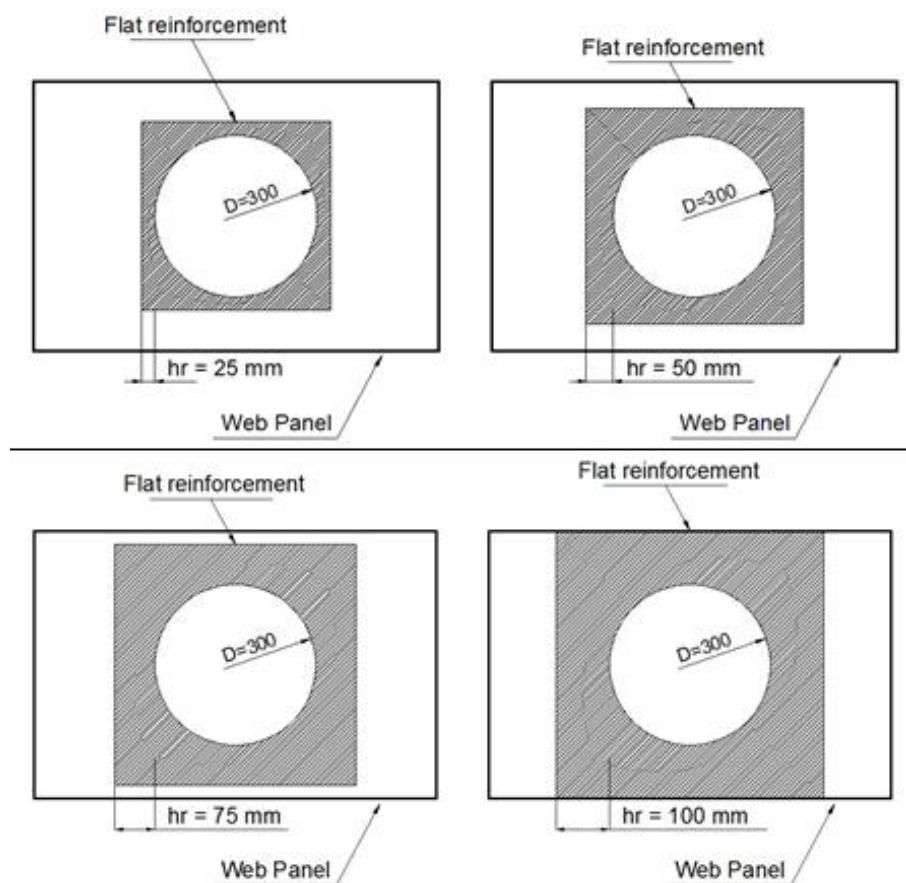


الشكل (4 - 23) العلاقة بين سماكة المدعمة وقدرة التحمل القصوى للجائز المدعم

يلخص الشكل (4 - 23) النتائج الكاملة لطرائق التدعيم المختلفة، حيث يوضح العلاقة بين سماكة المدعمات المستخدمة t_r وقدرة التحمل القصوى للجائز المدعم $P_{ul(reinf)}$ نسبة إلى قدرة تحمل ذات الجائز عندما صفيحة الجسد غير مفرغة $P_{ul(solid)}$ ، وذلك لطرائق التدعيم السبعة التي تم اختبارها في هذا البحث، حيث يمكن اعتبار أن التدعيم بصفحة معدنية (Flat Reinforcement) هي الطريقة الأكثر فاعلية واقتصادية، وهذا يؤكّد النتيجة التي توصل إليها Chen (2009) ، بينما استخدام المدعمات الشاقولية هي الطريقة الأقل جدوّيّة وفائدة.

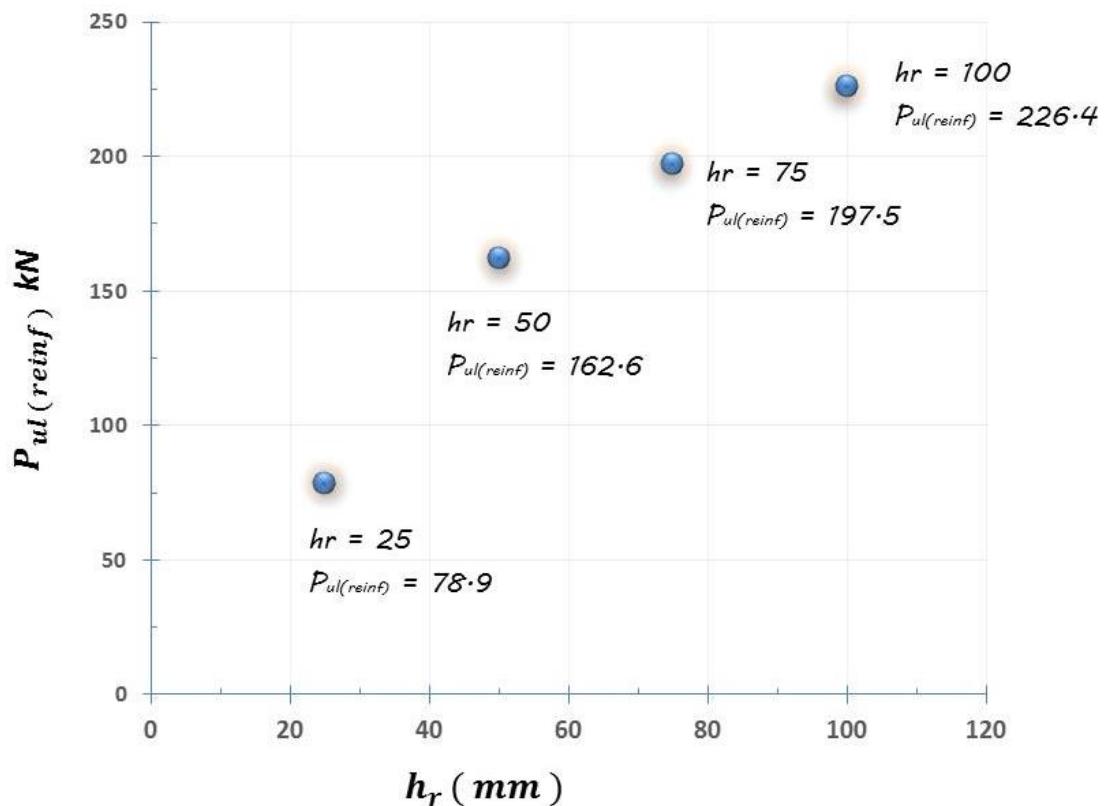
4 - 6 تأثير عرض صفيحة التدعيم :

تبين من الفقرة السابقة أن التدعيم بـ صفيحة معدنية (Flat) هي الطريقة الأكثر فاعلية وقدرة على استرداد طاقة التحمل الضائعة نتيجة وجود الفتحات، وذلك من أجل قيمة ثابتة لـ عرض الصفيحة $h_r = 50\text{ mm}$. ولمعرفة ما إذا كان لتغيير قيمة h_r تأثير على فعالية التدعيم بهذه الطريقة، تم تثبيت قيمة سماكة صفيحة التدعيم $t_r = 2\text{ mm}$ واختبار أربعة قيم مختلفة لـ عرض الصفيحة ($h_r = 25, 50, 75, 100\text{ mm}$) كما هو مبين في الشكل (4 - 24) ، ومن ثم حساب مقدمة الجائز الموافقة لكل قيمة من هذه القيم وكانت نتائج النمذجة والتحليل كما هو مبين في الشكل (25 - 4) .



الشكل (4 - 24) العينات المستخدمة في دراسة تأثير تغير h_r

حيث يتضح من الشكل (4 - 25) أن ازدياد قيمة عرض صفيحة التدعيم h_r بمقدار أربع مرات أدى إلى زيادة في قدرة تحمل الجائز مقدارها 147.5 kN أي بمقدار % 287 ، حيث أنه عند استخدام صفيحة معدنية للتدعم عرضها $h_r = 25\text{ mm}$ كانت قدرة تحمل الجائز الموافقة $P_{ul} = 78.9\text{ kN}$ ، وعند استخدام صفيحة عرضها $h_r = 100\text{ mm}$ أصبحت قدرة تحمل الجائز $P_{ul} = 226.4\text{ kN}$ ، ما يعني أن ازدياد قيمة عرض صفيحة التدعيم h_r يؤدي إلى ازدياد واضح في طاقة تحمل الجائز.



الشكل (4 - 25) العلاقة بين h_r وقدرة التحمل القصوى للجائز المدعّم



الفصل الخامس النتائج والتوصيات

Results and Recommendations

النتائج والتوصيات للأبحاث المستقبلية

تم في هذا البحث اختبار سبع طرائق تدعيم مختلفة لتفعيل وتدعم الجواز الصفائحية الفولاذية التي تحتوي على فتحات دائيرية متوضعة بشكل مركزي ضمن صفيحة الجسد.

فبعد عرض مقدمة موجزة عن الجواز الصفائحية الفولاذية من حيث استخدامها وطريقة تصنيعها وسلوكها الإنساني وكذلك أسباب وتأثيرات تنفيذ الفتحات ضمن صفيحة الجسد، تم ذكر دراسة مرجعية لأهم الأبحاث والدراسات التحليلية والتجريبية التي تناولت موضوعي الجواز الصفائحية والتدعم، ثم تم الانتقال إلى إجراء عملية النمذجة والتحليل للتجربة الواردة في الدراسة المرجعية، وذلك باستخدام برنامج ABAQUS الذي يعمل وفق نظرية العناصر المحددة (Finite Element Method)، بإجراء تحليل عددي لا خطى GMNIA يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة ووجود خطأ صنع هندسي مسبق. حيث تم حساب قدرة التحمل الحدية للعينة المدروسة والتي جاءت مطابقة وموافقة للنتائج الواردة في الدراسة المرجعية، تم بعدها إجراء دراسة بارامترية لتأثير مجموعة من المتغيرات على مقدرة التحمل القصوى للجائز وهي: تأثير قطر الفتحة المنفذة، صلابة الجناح، نسبة نحافة الجسد، وكذلك اختبار وتطبيق مجموعة طرائق واقتراحات لتفعيل وتدعم الجائز الصفائحى المفرغ، وإجراء المقارنة في ما بينها لاختيار الطريقة الأكثر فعالية واقتصادية، كانت الطرائق المستخدمة هي التدعيم بـ (1 - صفيحة فولاذية ، 2 - حلقة ، 3 - مدعمات شاقولية ، 4 - مدعمات أفقيه ، 5 - مدعمات شاقولية وأفقيه معاً (تدعيم متصالب) ، 6 - حلقة مع مدعمة قطرية باتجاه تشكيل حقل الشد ، 7 - حلقة مع مدعمتين قطريتين باتجاهين).

5 – 1 النتائج:

5 – 1 – 1 النتائج التي تم الحصول عليها من عملية النمذجة والتحليل:

- النموذج المنفذ وفق برنامج ABAQUS استطاع وبدقة مقبولة جداً التنبؤ بقدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحى المفرغ وكذلك بشكل الجائز عند الانهيار، حيث كانت قيمة حمولة الانهيار لنموذج الجائز الصفائحى المفرغ بفتحة قطرها $d_0 = 400 \text{ mm}$ مساوية إلى $N = 36.9 \text{ kN}$ ، وحمولة الانهيار لذات الجائز حسب الدراسات المخبرية $N = 33.5 \text{ kN}$ ، وكان المتوسط الحسابي لنتائج الدراسة التحليلية نسبة إلى النتائج التجريبية مساوية إلى القيمة (1) .

$$\frac{\sum P_{ult(FEM)}}{\sum P_{ult(EXP)}} = 1$$

5 – 1 – 2 النتائج التي تم الحصول عليها من الدراسة البارامترية للجواز الصفائحية المفرغة:

- تتناقص قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحى المفرغ بفتحة دائيرية متوضعة بشكل مركزي ضمن صفيحة الجسد بشكل خطى تقريباً مع ازدياد قطر الفتحة المنفذة. فعندما كان قطر الفتحة $d_0 = 50 \text{ mm}$ كانت قدرة تحمل الجائز $N = 168 \text{ kN}$ ، وعندما أصبح $d_0 = 400 \text{ mm}$ أصبحت قدرة التحمل $N = 33.5 \text{ kN}$.

- لا تتأثر قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحي المفرغ إلى قدرة تحمله عندما صفيحة الجسد غير مفرغة عند تغير سماكة صفيحة الجناح، فعندما تكون أبعاد صفيحة الجسد $2\text{ mm} \times 500 \times 750$ ، قطر الفتحة المنفذة ضمنها $d_0 = 250\text{ mm}$ ، وأبعاد صفيحة الجناح $100 \times 8\text{ mm}$ ، تكون هذه النسبة مساوية إلى القيمة 0.52.
- تزداد قدرة التحمل القصوى للجائز المفرغ نسبة إلى قدرة تحمل ذات الجائز عندما صفيحة الجسد غير مفرغة، كلما انخفضت قيمة نسبة حافة صفيحة الجناح d/t حتى الوصول إلى القيمة $100 \leq d/t \leq 100$ ، بعدها لا يحدث تغير ملحوظ في قدرة تحمل الجناح.

5 – 1 – 3 النتائج التي تم الحصول عليها من دراسة تقوية وتدعم الجواز الصفائحي المفرغة:

- طرائق التدعيم التي يمكن باستخدامها استعادة كامل قدرة تحمل الجنائز الصناعية بسبب وجود الفتحة، والتي تساوي 168.8 kN هي فقط التدعيم بـ (1 - صفيحة ، 2 - حلقة ، 3 - التدعيم المتصلب ، 4 - حلقة مع مدعاة قطرية باتجاه تشكيل حقل الشد ، 5 - حلقة مع مدععتين قطرتين بالاتجاهين)، في حين أن استخدام المدعمات الشاقولية أدى إلى زيادة قدرة تحمل الجنائز المفرغ إلى القيمة 82 kN فقط، واستخدام المدعمات الأفقية أدى إلى زيادة قدرة تحمل الجنائز المفرغ إلى القيمة 103 kN ، حيث أن المقدرة الإضافية للجائز الصفائحي المفرغ الإضافية والتي تم الحصول عليها من استخدام المدعمات الأفقية، أو المدعمات الشاقولية، هي زيادة ذات مقدار ثابت وتحصل مرة واحدة ولا تتأثر بزيادة سماكة المدعمة، أما بالنسبة لطرائق التدعيم الخمسة المتبقية، فإن قدرة تحمل الجنائز الصفائحي المفرغ والمدعם تزداد مع ازدياد سماكة المدعمة t ، ولكن بنسب وقيم تختلف حسب نوع التدعيم المستخدم.
- تعتبر طريقة التدعيم الأكثر فعالية واقتصادية هي التدعيم بصفحة فولاذية (Flat)، حيث أنها تستطيع استعادة المقدرة الكاملة للجائز بسماكة لا تتعدي ال 2.5 mm المدعمة الواحدة، يليها التدعيم بحلقة ومدععتين قطرتين، ثم التدعيم ب حلقة ومدعمة قطرية واحدة، ثم التدعيم بحلقة فولاذية، ثم التدعيم المتصلب، ثم التدعيم بمدعمات أفقية، في حين أن التدعيم بمدعمات شاقولية هي الطريقة الأقل جدوئ وفعالية.
- عند تطبيق التدعيم بـ صفيحة أو التدعيم بـ حلقة مع مدععتين قطرتين، فإنه يمكن باستخدام سماكات مناسبة للمدعمات الحصول على قدرات تحمل عالية للجائز المفرغ والمدعם تصل إلى قيم أكبر من 1.4 مرة من قدرة تحمل الجنائز فيما لو كانت صفيحة الجنيد غير مفرغة.

- عند استخدام التدعيم بصفحة فولاذية ، فإن زيادة عرض الصفحة h_r يزيد من فعاليتها ويزيد من قدرة التحمل القصوى للجائز الصفائحى المفرغ والمدعم، حيث أن زيادة عرض صفحة التدعيم من القيمة $h_r = 25 \text{ mm}$ إلى القيمة $h_r = 100 \text{ mm}$ ، أدى إلى زيادة قدرة التحمل بمقدار % 287 .

5 – 2 توصيات عامة للدراسات والأبحاث المستقبلية :

تم في هذا البحث دراسة تدعيم الجوائز الصفائحية التي تحتوي على فتحات دائرية متوضعة بشكل مركزي ضمن صفيحة الجسد، يمكن التوسيع في الدراسات المستقبلية ودراسة تدعيم جوائز تحتوي على أشكال أخرى من الفتحات كالفتحات المربعة أو المستطيلة، أو فتحات ذات تموضع متعدد ضمن صفيحة الجسم.

تم في هذا البحث دراسة تدعيم الجوائز الصفائحية المعروضة إلى قوة مركزية مطبقة في منتصف المجاز، يمكن التوسيع في الأبحاث المستقبلية ودراسة حالات تحمل أخرى كدراسة تدعيم الجائز في حالة الحريق، كذلك دراسة الجائز تحت مجموعة متعددة من تراكب الأحمال.

تم في هذا البحث التركيز على قيمة حمولة الانهيار للجائز الصفائحى (طاقة تحمله القصوى)، دون الخوض في شكل الانهيار أو نوعه أو تفاصيل الاجهادات خلال مراحل التحمل، يمكن في الدراسات المستقبلية الاهتمام بشكل أوسع بسلوك الجائز في مراحل التحمل المختلفة، ودراسة الاجهادات الفاصلة وأماكن حدوثها.

تم في هذا البحث دراسة نوع واحد فقط من الجوائز الصفائحية الفولاذية، وهي الجوائز الصفائحية المستقيمة (Straight Plate Girder)، ومن المهم الاستمرار في دراسة الأنواع الأخرى منها كالجوائز الصفائحية المنحنية أفقياً (Horizontally Curved) والجوائز الصفائحية متغيرة العطالة (Tapered)، وكذلك الجوائز الصفائحية المختلطة (Composite).

يمكن في الدراسات المستقبلية حساب قيم حمولات الانهيار الناتجة عن المعادلات الرياضية الواردة في الفصل الثاني و مقارنتها مع قيم حمولات الانهيار الناتجة عن النمذجة والتحليل باستخدام برنامج ABAQUS.

تم في هذه الدراسة اعتبار لحام صفيحة التدعيم مطبق لجميع نقاط اتصالها مع صفيحة الجسم وهو تقرير وتبسيط للحالة الواقعية، حيث أنه لا يمكن تنفيذ اللحام إلا على أطراف الصفيحة الخارجية وعلى حواف الفتحة، يمكن في الدراسات اللاحقةأخذ هذا الموضوع بالحسبان ودراسة الحالة الواقعية الدقيقة لاستناد صفيحة التدعيم مع صفيحة الجسم.

References:

1. Abo-Hamid, M. (2007), " **Steel Bridges** " ,Cairo University, Egypt.
2. Acharya, S.R. (2009), " **Reinforcement Schemes for Cold-Formed Steel Joists Having Web Openings** ", Doctoral Dissertation, McMaster University.
3. AISI (2004), " **Supplement to the Standard for Cold-Formed Steel Framing – Prescriptive Method for One and Two Family Dwellings**" , 2001 Edition, American Iron and Steel Institute, Washington, DC.
4. Allerton Steel Ltd (2012), " **Plate Girders** " , Steel Fabrication, North Yorkshire , U.K. Available at: <http://www.allertonsteel.co.uk/>.
5. ArcelorMittal (2008), " **ACB, Cellular Beams : The Intelligent Solution For Long Spans** " , Long Carbon Europe (section and merchant bars), Luxembourg.
6. Basler, K. and Thurlimann, B. (1959), " **Plate Girder Research** " , American Institute of Steel Construction. New York.
7. Bedynek, A. , Real, E. , Mirambell, E. (2013), " **Tapered Plate Girders Under Shear : Tests And Numerical Research** " , Elsevier, Engineering Structures 46 , 350 – 358, Barcelona, Spain.
8. British Standard 5950-1 (2000), " **Structural use of steelwork in building – Part1:Code of practice for design Rolled and Welded sections** " , British Standard Institution, London, UK .
9. Bulson, PS. (1970), " **Stability of Flat Plates** " , Elsevier, New York.
10. Chen, B. (2009), " **Shear Behavior of Steel Plates with Reinforced Openings** " . Master thesis , McMaster University , Ontario , Canada .

11. Chen, B. and Sivakumaran, K.S. (2010), " **Shear Strength Of Steel Plate With Reinforced Opening** ", Sdss'rio 2010 Stability And Ductility Of Steel Structures, conf, Rio de Janeiro, Brazil.
12. Chern, C. and Ostapenko, A. (1969), " **The ultimate strength of plate girders under shear** ", Lehigh University Institute Of Research, Fritz Laboratory Reports. Paper 264.
13. Davison, B. and Owens , G.W. (2003), " **Steel Designers' Manual** ", 6th Edition, The Steel construction Institute, Blackwell Publishing, UK.
14. Elwell, J. ,Guo, M. , and Pilarski, P. (2009), " **Antelope Valley East Leg Bridge** ", Technical paper, Presented at the 2009 World Steel Bridge Symposium, San Antonio, Texas, U.S.A
15. EN 1993 – 1 – 5 (2004), " **Eurocode3 :Design of steel structures - Part 1.5 : Plated structural elements** " .
16. ENV 1993 – 1 – 1 (2002), " **Eurocode3 :Design of steel structures-part 1.1: General rules and rules for buildings** " .
17. Fujii, T. (1967), " **Minimum Weight Design Of Structures Based on Buckling Strength and Plastic Collapse**", (3rd Report) - An Improved Theory on Post-buckling Strength of Plate Girders in Shear, J Soc Naval Arch Japan, pp 119-128.
18. HKS (2011), " **ABAQUS Standard User's Manual** ", volumes I-II-III Version 6.511, Hibbit, Karlsson & Sorenson Inc.
19. Hoglund, T. (1971), " **Strength of Thin Plate Girders with Circular and Rectangular Web Holes without Web Stiffeners** ", In Proceeding of the colloquium of the International Association of Bridge and Structural Engineering, London.

20. Lam, D. ,Ang, T. and Chiew, S. (2004), " **Structural Steelwork : Design to Limit State Theory** ", third Edition, Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford, UK.
21. Lee, S.C., Davidson, L.S. and Yoo, C.H (1996), " **Shear Buckling Coefficients Of Plate Girder Web Panels** ", J Computers & Structures, Vol 59, pp 789 – 795.
22. Lee, S. C. and Yoo, C. H. (1998). " **Strength of Plate Girder Web Panels under Pure Shear** ", Journal of Structural Engineering, Volume 124 (2), February, 1998, pp. 184-194.
23. Liu,T.C.H and Chung, K.F. (2003), " **Steel beams with large web openings of various shapes and sizes finite element investigation** ", Journal of Constructional Steel Research, vol 59, 1159-1176.
24. Narayanan, R. (1983), " **Plated Structures; Stability and Strength** ", Applied Science Publishers, London .
25. Narayanan,R. , Kalyanaraman,V. , Santhakumar,A.R. , Seetharaman,S. , Satish Kumar,S.R. , Arul Jayachandan,S. and Senthil,R. (2011), Teaching Materials, Institute For Steel Development & Growth (Insdag), India.
26. Nayaranan, R. , and Der Avanessian, N.G.V. (1983), " **Equilibrium solution for predicting the strength of webs with rectangular holes** ", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Pt2 ; 75 : 265 – 82.
27. Narayanan, R. , and Rockey, K.C. (1981), " **Ultimate Load Capacity of Plate Girders with Webs Containing Circular Cut-Outs** ", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Pt2 ; 71 : 845 – 62.
28. Olaru,V.D. and Khedmati,M.R. (2006), " **Numerical Study on Ultimate Strength and Behaviour of Plates Girders under Shear** ", 7th International Congress On Civil Engineering, conf, Iran.

29. Ouach, W.M. (2005), " **Residual Stresses In Cold – Formed Steel Sections And Their Effect On Column Behaviour** ". Phd Thesis, HONG KONG, University Of polytechnic.
30. Pennock, R.W. (2001), " **Strength of Light gauge Cold Formed Steel Joists with Web Perforation** ", Senior report, University of New Brunswick, New Brunswick Canada.
31. Shahabian, F. Vejdani, H.R. and Ghoohestani, S. (2006), " **Buckling and Ultimate Shear Capacity of Perforated Plate Girders** ", Stability And Ductility Of Steel Structures, conf, Lisbon, Portugal.
32. Shanmugam, N.E. (2003), " **Ultimate Load Behaviour of Plate Girder Web** ", Steel Structures, Department of Civil Engineering, National University of Singapore , pp 73 – 81.
33. Shanmugam, N.E. ,Lian, V.T. and Thevendran, V. (2002), " **Finite element modelling of plate girders with web openings** ", Thin-Walled Structures Department of Civil Engineering, National University of Singapore; 40 ,pp 443 – 464.
34. Sharp, M.L. and Clark, J.W. (1971), " **Thin Aluminum Shear Webs** ". Journal of Structure Division. ASCE 97, ST4, pp. 1021-1038.
35. Sivakumaran, K.S. (2008), " **Reinforcement Schemes For CFS Joists Having Web Openings** ", Research Report RPO8-6, AISI and Steel Framing Alliance.
36. Sivakumaran, K.S., Ming Yin Ng, and Steven R. Fox, (2006), " **Flexural Strength of Cold-Formed Steel Joists with Reinforced Web Openings** ", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.33, No.9, September 2006, pp. 1195 - 1208.
37. Tata Steel, BCSA and the SCI (2012), " **The free encyclopedia for UK steel construction information , Bridges - initial design**", Available at:
http://www.steelconstruction.info/Bridges - initial_design

38. Uenoya, M. and Redwood, R.G. (1977), "**Elasto-Plastic Shear Buckling of Square Plates with Circular Holes**", Computers and Structures, Volume 8, pp. 231-300.
39. Valizadeh, H. ,Sheidaii, M. and Showkati, H. (2012), "**Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls**", Journal of Constructional Steel Research ; Vol 70, pp 308 – 316 .
40. Way, A.G.J and Salter, P.R (2003), "**Introduction to steelwork design to BS 5950-1 2000**", The Steel Construction Institute ,SCI Pub 325, U.K .

Abstract:

Plate girders are used when the applied vertical loads are too large, and cannot be carried by using the standard hot-rolled beams. Openings are made in the webs of plate girders for serviceability purposes, and that will cause a significant reduction in the ultimate load capacity of the beam, and hence, tension field theory cannot be used to study the web panel containing holes.

This research aims to study the behaviour of plate girder containing central circular web openings through a parametric study. Parameters included in this study were the effect of hole size, web slenderness, and flange stiffness. Also, a large variety of strengthening schemes was studied (Flat, Ring, Vertical stiffeners, Horizontal stiffeners, both Horizontal & Vertical stiffeners, Ring with 1 diagonal stiffener in the direction of the tension field, Ring with 2 diagonal stiffeners), to determine the optimum strengthening method that can restore the original capacity of the plate girder.

In this study, geometrically and materially nonlinear analysis including imperfection (GMNIA) was used. General-purpose finite element software ABAQUS was used in the analysis.

This research shows that all strengthening schemes are able to increase the ultimate load capacity of the perforated beam, but in varying percentages. In addition, strengthening using a plate is found to be the most efficient and economical method comparing to other methods.

Keywords :

Steel Plate Girders, Finite Element Method, Circular Web Opening, Shear Buckling, Strengthening Schemes, Stiffeners, Parametric Study, Tension field.

Damascus University

Faculty Of Civil Engineering

Post Graduate Studies

Department Of Structural Engineering



Strengthening of Steel Plate Girders Containing Web Circular Openings Using Stiffeners

*Thesis Submitted In Partial Fulfillment Of The Requirements For The
Degree Of Master Of Science In Structural Engineering*

By :

Yaarob Ali

Supervisor

Dr. Bashar Salhab

DAMASCUS 2015