الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
جامعة تشرين
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

تطوير علاقة السهم في الجوائز البيتونية الهجينة التسليح بقضبان فولاذية وكربونية CFRP

(رسالة أعدت لنيل شهادة الدكتوراه في الهندسة المدنية
اختصاص الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية)

إعداد الطالبة
المهندسة: **ميرفت حسن حشمه**

بإشـــــــــراف

المشرف الرئيس
أ.د. **غاندي علي جحجاح**

المشرف المشارك
أ.د. **أحمد علي عبود**

المشرف المعاون: البروفسور **دمتري رافايلوفيتش ميليان**

عام 2014 م

نوقشت هذه الأطروحة بتاريخ 9/ 11 /2014 م. ، ولقد أجيزت بعد التصحيح واستدراك كافة الأخطاء والملاحظات الواردة فيها.

لجنة الحكم:

الدكتور غاندي جحجاح

أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة تشرين

الدكتور منير الأطرش

أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة تشرين

الدكتور سهيل الجنزير

أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة حلب

الدكتور طارق أصلان

أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة تشرين

الدكتور عصام ملحم

أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة البعث

تصريح

أصرح بأن هذا البحث (تطوير علاقة السهم في الجوائز البيتونية الهجينة التسليح بقضبان فولاذية وكربونية CFRP) لم يسبق أن قُبِلَ للحصول على شهادة، ولا هو مقدّم حالياً للحصول على شهادة أخرى.

المرشحة

ميرفت حسن حشمه

التاريخ:23 /11 /2014 م

.....

DECLERATION

This is to declare that, this work "Developing an expression to calculate the deflection in concrete beams reinforced with hybrid (steel and CFRP) bars" has not been submitted concurrently for any other degree.

Candidate

Mervat Hasan Heshmah

Date: 23 /11/ 2014

شهادة

نشهد بأن هذا العمل الموصوف في هذه الرسالة (تطوير علاقة السهم في الجوائز البيتونية الهجينة التسليح بقضبان فولاذية وكربونية *CFRP*)، هو نتيجة بحث علمي قامت به المرشحة السيدة ميرفت حسن حشمه بإشراف الدكتور غاندي علي جحجاح (أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، اللاذقية، سورية)، والدكتور أحمد علي عبود (أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، اللاذقية، سورية)، والبروفسور الدكتور Dmitri Rafayelovich Mailyan (أستاذ في قسم البيتون المسلح، جامعة روستوف الحكومية للهندسة المدنية، روستوف على الدون، روسيا الاتحادية). وأن أي مرجع ورد في هذه الرسالة موثق في النص.

المرشحة

ميرفت حسن حشمه

إشراف

أ.د. أحمد علي عبود

أ.د. غاندي علي جحجاح

التاريخ: 23 /11 /2014 م

.....

CERTIFICATION

It is hereby certified that, the work described in this thesis "Developing an expression to calculate the deflection in concrete beams reinforced with hybrid (steel and CFRP) bars" is the results of Mrs. Mervat Hasan Heshmah own investigations under the supervision of Dr. Ghandi Ali Jahjah (Professor, Department Of Structural Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria), and Dr. Ahmad Ali Aboud (Professor, Department Of Structural Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria), and Dr. Dmitri Rafayelovich Mailyan (Professor, Department Of Reinforced Concrete, Rostov State University Of Civil Engineering, Rostov on Don, Russian Federation). And any reference of other researchers work has been duly acknowledged in the text.

Candidate

Mervat Hasan Heshmah

Supervisors

Prof. Dr. **Ahmad Ali Aboud**

Prof. Dr. **Ghandi Ali Jahjah**

Date: 23 /11/ 2014

حقوق الطباعة Copyright Notice

أصرح بأن جميع حقوق طباعة هذه الرسالة والتي هي بعنوان: " **تطوير علاقة السهم في الجوائز البيتونية الهجينة التسليح بقضبان فولاذية وكربونية CFRP** " تمتلكها جامعة تشرين.

طالبة الدكتوراه المهندسة

ميرفت حسن حشمه

تاريخ: 23 /2014/11

الملخص Abstract:

يسبب انخفاض معامل مرونة قضبان الكربون CFRP حدوث سهوم كبيرة في العناصر البيتونية المسلحة بها وكذلك يكون عرض التشققات كبيراً مقارنة مع العناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ. وضعت لجنة الكود الأمريكي ACI علاقات حسابية خاصة بالعناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية، وفي إصدارات لاحقة لهذا الكود تم تطوير هذه العلاقات لتناسب العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الـFRP وذلك للتنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات وقدرات التحمل. وظهر مؤخراً نوع جديد من العناصر البيتونية المسلحة تسليحاً مشتركاً(هجيناً) بقضبان فولاذية و كربونية CFRP ويعتبر ذلك أمراً واعداً ومفيداً نظراً لما يحققه هذا التسليح المشترك من قوة و قابلية للتشغيل بالإضافة للمتانة العالية والديمومة، غير أن العلاقات الحسابية المتوفرة لا تناسب حالة التسليح الهجين بقضبان(فولاذية وكربونية)، لذلك قمنا باقتراح بعض التعديلات عليها. وللتحقق من صحة هذه التعديلات، تم تحضير واختبار عشر مجموعات من الجوائز في كل منها ثلاثة جوائز بيتونية مسلحة ومتماثلة واختلفت المجموعات عن بعضها بنسب التسليح بقضبان فولاذية وكربونية وبتوزع القضبان في المقطع. كما تمت نمذجة وتحليل العينات المختبرة باستخدام طريقة العناصر المنتهية ببرنامج ANSYS ، ومن خلال مقارنة النتائج التجريبية لقيم السهوم وعرض التشققات وقدرات التحمل مع النتائج المحسوبة وفق التعديلات المقترحة ومع نتائج التحليل ببرنامج ANSYS، تبين أن التعديلات المقترحة على العلاقات الحسابية أعطت نتائج مرضية، غير أن نتائج التحليل كانت أكثر دقة وتم التوصل إلى بعض الاستنتاجات والتوصيات.

الكلمات المفتاحية: جوائز بيتونية مسلحة، تسليح هجين، قضبان كربونية، السهم، قدرة التحمل القصوى، عرض التشققات، برنامج ANSYS.

الشكر والتقدير Acknowledgement:

أتقدم بخالص الشكر والامتنان لكل من ساهم وساعد في انجاز هذه الرسالة وأخص بالشكر الكبير الأساتذة المشرفين:

الأستاذ الدكتور غاندي علي جحجاح

الأستاذ الدكتور أحمد علي عبود

البروفسور الدكتور دمتري رافايلوفيتش ميليان

الذين تفضلوا بالإشراف على هذا البحث مانحين وقتهم وخبراتهم العلمية ومتابعتهم المستمرة والحثيثة لإخراجه بهذه الصورة ونأمل أن يشكل بحثنا هذا لبنة في صرح العلم الكبير وأداة يستفاد منها المهندسون والباحثون.

كما أتقدم بالشكر والتقدير للبروفسور الدكتور **بيتر بيتروفيتش بالسكوي** على جهوده ومساعدته في تحضير واختبار العينات المخبرية، وكذلك لطلاب الدكتوراه في قسم البيتون المسلح بجامعة روستوف: أحمد وروما وديما وستاس وسيرغي وإيغر وفيتا.

ولا يسعني إلا أن أشكر إدارة كلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين، وجامعة روستوف للهندسة المدنية في روسيا الاتحادية، لما قدموه من مساعدات وتسهيلات في السفر والإقامة ووضع إمكانيات وتجهيزات المخابر تحت التصرف في سبيل إنجاح هذا البحث وتحقيق الغاية المرجوة منه.

وفي النهاية أتقدم بالشكر الكبير للسادة أعضاء لجنة الحكم والمقيمين وكل من ساهم في إنجاز هذا البحث.

ميرفت

فهرس المحتويات Table of Contents

المحتويات رقم الصفحة

• **مقدمة**.....	**1**
• **الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية**.....	**(6-89)**
1-1- مقدمة.....	**9**
1-2- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.....	**9**
1-2-1- طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked Section Analysis (CSA).....	**10**
1-2-2- آلية حدوث التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.....	**12**
1-2-3- التماسك بين قضبان التسليح الفولاذية والبيتون المحيط بها.....	**13**
1-2-4- مقارنة بين طرائق حساب عرض الشق والسهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.....	**15**
1-3- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP.....	**19**
1-3-1- خصائص قضبان التسليح FRP وأشكالها.....	**19**
1-3-2- التماسك بين قضبان التسليح FRP والبيتون المحيط بها.....	**21**
1-3-3- مقارنة بين طرائق حساب عرض الشق والسهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان FRP.....	**22**
1-4- الدراسات والأبحاث السابقة في دراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية أو قضبانFRP.....	**25**
1-4-1- مقدمة.....	**25**
1-4-2- تحديد مقدار السهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP وفق كودات مختلفة.....	**25**
1-4-2-1- الموديل الحسابي وفق الكود ACI -440.1R-06.....	**31**
1-4-2-2- الموديل الحسابي للباحثين Hall و Ghali	**32**
1-4-2-3- الموديل الحسابي الكندي ISIS.....	**33**
1-4-2-4- الموديل الحسابي المقترح من قبل الباحثين Favre و Charif	**33**
1-4-3- دراسة تجريبية حول السلوك الإنعطافي للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان GFRP ومقارنة نتائجها مع نتائج موديلات أخرى.....	**34**
1-4-4- سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية GFRP على الانعطاف.....	**43**

1-4-5- متانة وقابلية الاستثمار للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـGFRP في العمل على الانعطاف.....	55
1-4-6- التنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية.....	67
1-4-7- الأشكال المختلفة لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـ CFRP والعاملة على الانعطاف.....	72
1-4-8- دراسة تحليلية لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين بقضبان (فولاذية و FRP).....	82
1-5- الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة النظرية والمرجعية.....	88
• **الفصل الثاني: الدراسة التجريبية**.....	(90-126)
2-1- مقدمة.....	92
2-2- البرنامج التجريبي وعينات الاختبار.....	92
2-3- خصائص المواد المستخدمة.....	98
2-3-1- الخلطة البيتونية.....	98
2-3-1-1- الحصويات المستخدمة.....	99
2-3-1-2- الاسمنت المستخدم.....	99
2-3-2- قضبان التسليح الفولاذية.....	99
2-3-3- قضبان التسليح الكربونية.....	100
2-4- تحضير عينات الاختبار	102
2-5- الإجراءات المتعلقة باختبار العينات.....	105
2-6- مقارنة نتائج اختبار العينات.....	108
2-6-1- مقارنة قدرات التحمل القصوى للعينات المختبرة وأشكال الانهيار.....	108
2-6-2- مقارنة منحنيات (حمولة- سهم) للعينات المختبرة.....	111
2-6-3- مقارنة التشققات وانتشارها وارتفاعها وعرضها في الجوائز المختبرة.....	115
2-6-4- مقارنة التشوه الحاصل في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز.....	121
2-7- الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة التجريبية.....	125
• **الفصل الثالث: الدراسة الحسابية**.....	(127-154)
3-1- مقدمة.....	129
3-2- البرنامج الحسابي	130
3-3- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.....	132

3-3-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.....	132
3-3-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.....	132
3-3-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.....	132
3-3 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.....	132
3-3 -5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ (جوائز المجموعة **I**) من خلال مثال عددي.....	132
3-4- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.....	135
3-4-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.....	135
3-4-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.....	135
3-4-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.....	135
3-4 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.....	135
3-4-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون (جوائز المجموعة **II**) من خلال مثال عددي.....	135
3-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين(فولاذ+كربون).....	138
3-5-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين(فولاذ+كربون).....	138
3-5-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين (فولاذ+كربون).....	139
3-5-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين(فولاذ+كربون).....	139
3-5 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين(فولاذ+كربون).....	139
3-5-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين، (المجموعة **VII**) من خلال مثال عددي.....	139
3-5-6- شرح للعلاقات الرياضية المستخدمة.....	142
3-6- مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الحسابية.....	145
3-6-1- مناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم.....	145
3-6-2- مقارنة قيم عرض الشق التجريبية (*exp.*) مع القيم المحسوبة (*th.*).....	147
3-6-3- مقارنة قيم عرض الشق المحسوبة على أساس قيم التشوه التجريبية ووفق الكودين(ACI وCEB) مع القيم التجريبية ومع القيم الحسابية(*th.*) لجميع الجوائز المختبرة.....	148

3-6-4- مناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف.....	151
3-7- نتائج الدراسة الحسابية.....	154
• **الفصل الرابع: الدراسة التحليلية:** نمذجة وتحليل الجوائز البيتونية المختبرة باستخدام برنامج ANSYS.....	(155-186)
4-1- مقدمة.....	157
4-2- برنامج التحليل ANSYS.....	157
4-3- طرق نمذجة وتحليل العناصر البيتونية المسلحة.....	158
4-4- نمذجة مكونات الجوائز المختبرة باستخدام برنامج ANSYS.....	159
4-4-1- نمذجة البيتون المسلح باستخدام العنصر الحجمي Solid65.....	160
4-4-2- نمذجة قضبان التسليح الفولاذية والكربونية باستخدام العنصر الخطي link8....	163
4-4-3- نمذجة صفائح التحميل والاستناد باستخدام العنصر الحجمي Solid45.....	164
4-5- المراحل الأساسية في عملية النمذجة والتحليل باستخدام ANSYS	165
4-5-1- رسم الشكل الهندسي للموديل(Geometry).....	166
4-5-2- تقسيم الموديل إلى عناصر شبكية (Meshing).....	167
4-5-3- إدخال خصائص المواد وفق برنامج ANSYS.....	168
4-5-3-1- إدخال خصائص البيتون.....	168
4-5-3-2- إدخال خصائص قضبان التسليح الفولاذية والكربونية.....	171
4-5-3-3- إدخال خصائص صفائح التحميل والاستناد.....	172
4-5-4- إعطاء الشروط الطرفية للموديلات المنمذجة (Boundary Conditions).....	172
4-5-5- تطبيق الحمولات على الموديلات المنمذجة (Appling Loads).....	173
4-5-6- التحليل اللاخطي للموديلات المنمذجة (Nonlinear Analyses).....	173
4-6- أشكال التشققات في الموديلات المحللة باستخدام ANSYS.....	174
4-7- مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج التحليل ببرنامج ANSYS.....	176
4-7-1- مقارنة قدرة التحمل على الانعطاف.....	176
4-7-2- مقارنة قيم السهوم التجريبية والتحليلية وسط مجاز الجوائز.....	177
4-7-3- مقارنة أشكال التشققات.....	180
4-8- نتائج وتوصيات القسم التحليلي.....	186
• **الفصل الخامس: مقارنة النتائج**.....	(187-215)
5-1- مقدمة.....	189

5-2- مقارنة النتائج التجريبية والحسابية والتحليلية باستخدام ANSYS.....	**189**
5-2-1- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم.....	**189**
5-2-2- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بعرض الشق.....	**204**
5-2-3- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف.....	**212**
5-3- الاستنتاجات.....	**215**
5-4- التوصيات.....	**217**
•المراجع.....	**218**
•الملخص باللغة الأجنبية.....	**222**

قائمة بالجداول List of Tables:

الفصل	رقم الجدول	اسم الجدول	الصفحة
الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	1-1	مقارنة لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريبات وكودات مختلفة	16
	2-1	مقارنة لطرائق حساب السهوم في العناصر البيتونية المسلحة بالقضبان الفولاذية بتقريبات وكودات مختلفة	18
	3-1	مقارنة بين خصائص قضبان الفولاذ وقضبان الـ FRP	21
	4-1	مقارنة لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP بتقريبات وكودات مختلفة	23
	5-1	مقارنة لطرائق حساب السهوم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP بتقريبات وكودات مختلفة	24
	6-1	تفاصيل الجوائز المختبرة في الدراسة [1]	27
	7-1	الجدول (1-7) الأبعاد الهندسية ونسب التسليح للجوائز المختبرة في الدراسة [11]	35
	8-1	الخصائص الميكانيكية للبيتون في الدراسة [11]	36
	9-1	الخصائص الميكانيكية لقضبان الـGFRP في الدراسة [11]	36
	10-1	قيم السهم ونسبة (طول المجاز إلى السهم) عند حمولات قصوى وحمولات استثمارية [11]	41
	11-1	الحمولات القصوى المحددة حسابيا وتجريبي في الدراسة [11]	41
	12-1	التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة في الدراسة [21]	45
	13-1	قدرة التحمل القصوى للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها في الدراسة [21]	46
	14-1	عرض التشققات والتباعد فيما بينها في الدراسة [21]	47
	15-1	تفاصيل الجوائز المختبرة في الدراسة [34]	57
	16-1	نتائج اختبار الشد لقضبان وأساور التسليح في الدراسة [34].	58
	17-1	مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية المتنبأ بها في الجوائز المختبرة في الدراسة [34]	65
	18-1	عرض التشققات المحدد تجريبياً وتحليلياً في الدراسة [37]	71
	19-1	المقاومة المميزة للبيتون على الضغط في جوائز الدراسة[37]	73

الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	1-20	الخصائص الميكانيكية للقضبان المستخدمة في الدراسة [31]	74
	1-21	نسب التسليح التوازنية والحقيقية والأصغرية في الدراسة [31]	76
	1-22	الحمولات والسهوم وأشكال الانهيار في الجوائز المختبرة في الدراسة [31]	76
	1-23	عزم التشقق والعزم المقاوم الأعظمي في الدراسة [31]	78
	1-24	نسبة المجاز إلى السهم لحظة الانهيار في الجوائز المختبرة في الدراسة [31]	80
	1-25	عامل قابلية التشوه Deformability factor ومعامل المتانة Ductility index في الدراسة [31]	81
	1-26	الخصائص الميكانيكية لقضبان الـFRP في الدراسة [28]	86
الفصل الثاني: الدراسة التجريبية	2-1	التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسميتها وتسليحها وتقسيمها إلى مجموعات.	95
	2-2	المقاومة المميزة للبيتون على الضغط $f_c^{/}$ لجميع المجموعات المختبرة	98
	2-3	النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية في المتر المكعب	99
	2-4	مواصفات قضبان التسليح الفولاذية والكربونية المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة	100
	2-5	مقارنة قدرات التحمل الأعظمية للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها	108
	2-6	مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط مجاز الجوائز ومتوسط عدد الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي	111
	2-7	مقارنة عرض الشق في الجوائز المسلحة بالكربون أو بشكل هجين(فولاذ+كربون) مع عرض الشق في الجوائز المعيارية عند ثلاث قيم لعرض الشق(0.1-0.2-0.3)mm والحمولات المسببة لها	120
	2-8	مقارنة قيم التشوهات النسبية المقاسة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح جوائز المجموعات(I - II - VII- VIII- IX- X) لحظة الانهيار	122
	2-9	مقارنة قيم التشوهات النسبية المقاسة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح جوائز المجموعات (III - IV- V- VI) لحظة الانهيار	124
الفصل الثالث: الدراسة الحسابية	3-1	التفاصيل المتعلقة بجوائز المجموعات المحسوبة يدوياً	131
	3-2	حساب السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN)، وكذلك قدرة تحمل جوائز المجموعة(**I**).	134
	3-3	حساب السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN)، وكذلك قدرة تحمل جوائز المجموعة(II).	137
	3-4	مقارنة بين العلاقات المناسبة لحساب الجوائز المسلحة بالكربون والعلاقات المطورة والمناسبة للتسليح الهجين.	138
	3-5	حساب السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN)، وكذلك قدرة تحمل جوائز المجموعة(VII).	141

	6−3	مقارنة نسبة القيمة التجريبية(.exp) للسهم إلى القيمة الحسابية(.th)، ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$).	147
	7−3	مقارنة نسبة القيم التجريبية لعزم الانعطاف المقاوم إلى القيم الحسابية.	153
الفصل الرابع: الدراسة التحليلية	1−4	عدد العناصر المنتهية في الموديلات المحللة.	167
	2−4	مواصفات قضبان التسليح الفولاذية المستخدمة في نمذجة الجوائز المختبرة	171
	3−4	مقارنة القيم التجريبية (.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS ، لعزم الانعطاف المقاوم	177
	4−4	مقارنة القيم التجريبية (.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS ، للسهم وسط مجاز الجوائز	180
الفصل الخامس: مقارنة النتائج	1−5	مقارنة نسبة القيم التجريبية للسهم $\delta_{\exp.}$ إلى القيم الحسابية $\delta_{th.}$ **والقيم المحددة ببرنامج ANSYS** ، δ_{ANSYS}.	203
	2−5	مقارنة نسبة القيم التجريبية(.exp) لعرض الشق إلى القيم الحسابية(.th)، $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$).	211
	3−5	مقارنة نسبة القيم التجريبية لعزم الانعطاف المقاوم $M_{\exp.}$ إلى القيم الحسابية $M_{th.}$ وقيم M_{ANSYS}.	214

قائمة بالأشكال List of Figures:

الفصل	رقم الشكل	اسم الشكل	الصفحة
الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	1-1	مقارنة بين طريقة تحليل المقطع المتشقق CSA وطريقة التحليل المقطعي SA المستخدمة لتصميم الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ	10
	2-1	سلوك البيتون بين الشقين في منطقة الانعطاف الصافي للجائز مقابل السلوك المتنبأ به من قبل CSA	11
	3-1	طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked Section Analysis (CSA)	12
	4-1	مرحلة ظهور التشققات ومرحلة استقرارها والتوزع المتوقع للاجهادات والتشوهات والتماسك والانزلاق خلال هاتين المرحلتين	13
	5-1	علاقة نموذجية بين التماسك والانزلاق	14
	6-1	ضغط نتوءات الحلزنة على البيتون وتشكل شقوق عرضية ميكروية	14
	7-1	موديل التماسك والانزلاق الموضعي (Local bond-slip model)	15
	8-1	رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990	17
	9-1	رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب ACI 318-95	17
	10-1	رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب BSI 1985	17
	11-1	رسم توضيحي لطريقة حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بالقضبان الفولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990	17
	12-1	الأشكال المختلفة لقضبان الـ FRP واختلاف سطحها الخارجي	19
	13-1	مقارنة لمخططات إجهاد . تشوه لكل من قضبان الفولاذ وGFRP وCFRP و AFRP عند العمل على الشد	20
	14-1	علاقة التماسك والانزلاق لقضبان FRP	22
	15-1	رسم توضيحي لطريقة الاختبار في الدراسة [1]	26
	16-1	علاقة إجهاد– تشوه لقضبان التسليح الفولاذية والـFRP في الدراسة [1]	26
	17-1	نسب التسليح التوازنية للمقاطع المسلحة بـGFRP و CFRP والفولاذ في الدراسة [1].	28
	18-1	منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المختبرة في الدراسة [1]	29
	19-1	شكل الشقوق في الجائز I.6 المسلح بقضبان نوع (Isorod) [1]	29
	20-1	انهيار الجائز I.4 المسلح بقضبان (Isorod) [1]	30

الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	1−21	توزع التشوهات في الجوائز المسلحة بقضبان الـFRP حيث $\rho = 0.4\%$ [1]	30
	1−22	منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً للجوائز المسلحة بقضبان الـFRP [1]	32
	1−23	التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة [11]	35
	1−24	شكل سطح قضبان الـGFRP [11]	36
	1−25	الخطوات التجريبية [11]	37
	1−26	منحنيات (حمولة – تشوه) في بيتون الجوائز C-216 وC-316 [11]	38
	1−27	منحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان الجائز C-316-D2-b [11]	38
	1−28	منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً وسط الجوائز C-216-D2 , C-216-D1 [11]	39
	1−29	منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً تحت تأثير حمولات استثمارية وسط الجوائز C-216-D1 , C-216-D2 [11]	40
	1−30	منحنيات (حمولة – عرض التشقق) المحددة تجريبياً وتحليلياً تحت تأثير حمولات استثمارية للجائزين C-216-D1 , C-216-D2	42
	1−31	تأثير نسبة التسليح بقضبان الـGFRP على مدى الاختلاف بين القيم التجريبية والتحليلية المحددة بعلاقة برانسون[21]	44
	1−32	مجموعات الجوائز المختبرة وتفاصيل المقاطع الطولية والعرضية [21]	44
	1−33	أداء الجوائز في المجموعات الثلاث من ناحية (عزم – سهم) [21]	46
	1−34	منحنيات (عزم– سهم) المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقتين (1−64) و (1−65) [21]	48
	1−35	منحنيات (عزم– سهم) [21] المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقات في الكود ACI 318	49
	1−36	منحنيات (عزم– سهم) المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام تقريب Dolan [21]	50
	1−37	منحنيات (عزم– سهم) لجوائز المجموعات الثلاث المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقتين (1−64) و (1−65) [21]	52
	1−38	العامل k_g كتابع لقيمتين وهما نسبة التسليح وعامل مرونة قضبان الـGFRP [21]	53
	1−39	مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المحسوبة تحليلياً وتجريبياً[21]	54
	1−40	مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi وغيره مع المخططات المحسوبة تحليليا باستخدام الموديل المقترح من اجل CB2B [21]	54
	1−41	مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi وغيره مع المخططات المحسوبة تحليليا باستخدام الموديل المقترح من اجل CB3B [21]	55

الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	1-42	مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi وغيره مع المخططات المحسوبة تحليليا باستخدام الموديل المقترح من اجل CB4B [21]	55
	1-43	تفاصيل الجوائز المختبرة وطريقة التحميل[34]	56
	1-44	رسم توضيحي لسطح قضيب التسليح GFRP قطر 10mm وعليه جدائل من ألياف قطر 2mm ملصوقة بالايبوكسي [34]	58
	1-45	الأبعاد الهندسية لأساور الـGFRP [34]	59
	1-46	الأبعاد الهندسية وفق الموديل التحليلي للجائز المسلح بـGFRP [34]	59
	1-47	نتائج تجارب اقتلاع قضبان الـGFRP المغموسة في البيتون (تجارب pull-out)[34]	60
	1-48	مخطط الاجهادات والتشوهات على طول ارتفاع المقطع[34]	61
	1-49	منحني(إجهاد . تشوه) لقضبان التسليح [34]	62
	1-50	أشكال الشقوق في الجوائز المختبرة عند الحالة الحدية [34]	64
	1-51	منحنيات (حمولة – عرض الشق) في جوائز المرحلة الأولى[34]	65
	1-52	منحنيات (حمولة – عرض الشق) في جوائز المرحلة الثانية[34]	66
	1-53	منحنيات (حمولة – سهم) في منتصف جوائز المرحلة الأولى[34]	66
	1-54	منحنيات (حمولة – سهم) في منتصف جوائز المرحلة الثانية[34]	67
	1-55	مقارنة بين منحنيات (عزم – سهم) المحسوبة بالطرق التحليلية والمحددة تجريبياً [37]	69
	1-56	مقارنة بين منحنيات (عزم – سهم) [37] المحددة تجريبياً والمحسوبة وفق ACI440.1R-03	69
	1-57	مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق) المحددة تجريبيا وباستخدام الكود[5].	70
	1-58	مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق) المحددة تجريبيا وباستخدام علاقة الكود[5] المعدلة	70
	1-59	مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق)[37] المحددة تجريبياً من قبل Masmoudi، والمتوقعة حسب الكود ACI **[5]**	71
	1-60	مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق)[36] المحددة تجريبيا من قبل Masmoudi، والقيم حسب علاقات الكود المعدلة ACI **[5]**	72
	1-61	الأبعاد الهندسية وتفاصيل جائز نموذجي(الأبعاد بـ mm) [31]	73

الفصل الأول: الدراسة النظرية والمرجعية	شكل القضبان الفولاذية والكربونية المستخدمة في الدراسة [31]	1-62	74
	أشكال التشققات في الجوائز المختبرة في الدراسة [31]	1-63	75
	منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المختبرة في الدراسة [31]	1-64	79
	تحديد معامل المتانة في الدراسة[31]	1-65	81
	مقطع الجائز البيتوني في الدراسة[28]	1-66	82
	منحني (إجهاد – تشوه) للبيتون المضغوط في الدراسة[28]	1-67	84
	منحني (إجهاد – تشوه) للفولاذ في الدراسة[28]	1-68	85
	منحني (إجهاد – تشوه) لقضبان الـFRP في الدراسة[28]	1-69	85
	علاقة (عزم – انحناء) في الدراسة[28]	1-70	86
	علاقة (تشوه – عزم) الحاصل في بيتون الجوائز في الدراسة[28]	1-71	87
	علاقة (تشوه – عزم) للقضبان الفولاذية في الدراسة[28]	1-72	87
	علاقة (تشوه – عزم) لقضبان الـGFRP في الدراسة[28]	1-73	87
الفصل الثاني: الدراسة التجريبية	مخطط توضيحي للبرنامج التجريبي يبين مقارنة لنوع وكيفية التسليح الهجين في الجوائز المختبرة وطريقة تسميتها وتقسيمها إلى عشرة مجموعات	2-1	94
	الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات X-IX-VIII-VII-VI-V-IV-III-II-I	2-2	96
	شكل هياكل التسليح لمجموعات الجوائز المختبرة I -II-III-IV-V-VI-VII-IX-VIII	2-3	97
	شكل القوالب الفولاذية بعد الانتهاء من عملية صب الجوائز البيتونية، حيث تم صب 3 جوائز متماثلة بالتسليح وبالأبعاد الهندسية من بيتون كل مجموعة	2-4	98
	شكل قضبان التسليح المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة (a- الفولاذية،b- الكربونيةCFRP).	2-5	99
	جهاز شد قضبان التسليح ماركة(IP200) في مخبر تجريب المواد بجامعة روستوف، وشكل العينات الفولاذية بعد انقطاعها	2-6	100
	اختبار القضبان الكربونية في مخبر تجريب المواد بكلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين.	2-7	101
	مخطط (إجهاد – تشوه) للقضبان الكربونية.	2-8	101
	عملية تحضير هياكل التسليح لكل مجموعة جوائز	2-9	102
	عملية لصق حساسات التشوه على قضبان التسليح والأدوات والمواد المستخدمة لتوصيلها وعزلها	2-10	103
	شكل الهياكل بعد لصق الحساسات وعزلها	2-11	103

الفصل الثاني: الدراسة التجريبية	12-2	عملية جبل البيتون بالجبالة الكهربائية، وصب الجوائز البيتونية في القوالب المعدنية، واستخدام الرجاجة الابرية لرج البيتون	104
	13-2	عملية إخراج ونقل العينات من القوالب المعدنية بعد تصلب البيتون باستخدام رافعة مخبرية	104
	14-2	مخطط عام للجوائز المختبرة يبين مكان توضع مقاييس التشوه والحساسات وموزع الحمولة وكيفية الاستناد	105
	15-2	شكل جهاز اختبار الجوائز في مخبر البيتون لدى جامعة روستوف	106
	16-2	شكل محطة قياس التشوهات طراز (Ostroestva Izmeritelna-Obravlaushe OIO2002)	106
	17-2	اختبار الجوائز وتسجيل النتائج	107
	18-2	مقارنة قدرات التحمل الأعظمية في الجوائز المختبرة	109
	19-2	العلاقة بين قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز و(تغير نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة)	112
	20-2	مقارنة منحنيات (حمولة – سهم) لمجموعات الجوائز المختبرة I -II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX	114
	21-2	أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة (I -II -VII -VIII-IX-X) والتي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة.	116
	22-2	أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة (III-IV-V-VI)	117
	23-2	منحنيات (حمولة – اتساع الشق) لمجموعات الجوائز المختبرة I -II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX	118
	24-2	توزع التشوهات النسبية في مقاطع الجوائز المختبرة	121
	25-2	مقارنة بين منحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان التسليح السفلية و(حمولة – تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة I -II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X	123
	26-2	مثال لتحطم البيتون المضغوط لحظة الانهيار وانسلاخ حساسات التشوه	123
	27-2	مقارنة بين منحنيات (حمولة – تشوه في قضبان التسليح) حيث أخذ متوسط قيم التشوه النسبي في طبقتي التسليح، و(حمولة – تشوه في البيتون المضغوط) لمجموعات الجوائز المختبرة III -IV- V – VI	125

الفصل الثالث: الدراسة الحسابية	1-3	الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة، a- المجموعات المسلحة بطبقة واحدة من القضبان، b- المجموعات المسلحة بطبقتين من القضبان	131
	2-3	مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية وفق الكود ACI 318-05	133
	3-3	مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان كربونية وفق الكود ACI -440.1R-06	136
	4-3	مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين اعتماداً على علاقات مطورة	140
	5-3	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان	145
	6-3	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان	146
	7-3	المخططات التوضيحية لحساب عرض الشق في الكودين ACI [7] وCEB [15]	149
	8-3	مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم الحسابية (.th) لعرض الشق مع القيم المحددة وفق الكودين ACI[7] و CEB [15] والمحسوبة اعتمادا على قيم التشوه التجريبية الحاصلة في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان	150
	9-3	مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم الحسابية (.th) لعرض الشق مع القيم المحددة وفق الكودين ACI[7] و CEB [15] والمحسوبة اعتمادا على قيم التشوه التجريبية الحاصلة في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان.	151
	10-3	مقارنة بين القيم التجريبية(.exp) ■والقيم الحسابية(.th)□ لعزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة	152
الفصل الرابع: الدراسة التحليلية	1-4	بيئة برنامج التحليل الإنشائي ANSYS المعتمد في الدراسة التحليلية	158
	2-4	نمذجة البيتون بطريقة الشق المنفصل	159
	3-4	نمذجة عنصر بيتوني بطريقة الشق اللزج	159
	4-4	العنصر الحجمي (Solid65) المستخدم في نمذجة البيتون	160
	5-4	العنصر الخطي (Link8) المستخدم في نمذجة قضبان التسليح المختلفة	163
	6-4	طرق نمذجة قضبان التسليح ضمن البيتون	164
	7-4	العنصر الحجمي (Solid45) المستخدم في نمذجة صفائح الاستناد والتحميل الفولاذية	164
	8-4	كيفية نمذجة البيتون وقضبان التسليح وصفائح الاستناد والتحميل	165
	9-4	موديل تحليلي يمثل ربع الجائز المختبر وفق المجموعات(I-II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X).	166
	10-4	الشكل الهندسي للموديلات التحليلية المعتمدة لحالتي التسليح بطبقة واحدة أو بطبقتين من القضبان	166

الفصل الرابع: الدراسة التحليلية	4−11	نمذجة جائز المجموعة (I) بثلاثة موديلات مختلفة بحسب حجم العناصر الشبكية	167
	4−12	المنحني النموذجي (إجهاد – تشوه) للبيتون عند العمل على الضغط أو الشد	168
	4−13	منحني (إجهاد – تشوه) للبيتون المضغوط وفق تقريبات مختلفة	169
	4−14	المنحني المبسط Simplified لعلاقة (إجهاد – تشوه) الخاص بالبيتون المضغوط	169
	4−15	سطوح الانهيار والتشقق في البيتون وفق برنامج ANSYS	170
	4−16	مستوي الشق واتجاهه في العنصر(Solid65) وفق برنامج ANSYS	171
	4−17	مخطط إجهاد – تشوه لقضبان التسليح الفولاذية	171
	4−18	مقطع طولي وعرضي ومسقط أفقي للموديلات التحليلية المدروسة والشروط الطرفية المطبقة عليها	172
	4−19	الحل التكراري بطريقة نيوتن – رافسون (حالة تزايد الحمولة مرتين)	173
	4−20	تمثيل الشقوق برموز في نماذج العناصر المنتهية	174
	4−21	كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة للتشققات	174
	4−22	منحني (إجهاد – تشوه) لفولاذ التسليح: a– منحني حقيقي محدد بتجربة الشد، b– خط تمثيلي	175
	4−23	آلية تشكل وعمل الشقوق في البيتون	175
	4−24	مقارنة بين القيم التجريبية(.exp) ■ ، والقيم المحددة بـ(ANSYS)□، بما يخص عزم الانعطاف المقاوم	176
	4−25	مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (VIII-VII- II-I)	178
	4−26	مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (X-IX- II-I)	178
	4−27	مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (VI-V- IV-III)	179
	4−28	مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(**II–I**) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها	181
	4−29	مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(VIII–VII) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها	182
	4−30	مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(X–IX) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها	183
	4−31	مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(IV–III) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها	184

	32−4	مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(V−VI) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها	185
الفصل الخامس: مقارنة النتائج	1−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(I)**	190
	2−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(II)**	191
	3−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(III)**	192
	4−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(IV)**	193
	5−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(V)**	194
	6−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VI)**	195
	7−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VII)**	196
	8−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VIII)**	197
	9−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(IX)**	198
	10−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(X)**	199
	11−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان المتساوية القطر	200
	12−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان المختلفة القطر	201

الفصل الخامس: مقارنة النتائج	13−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان	202
	14−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(I)**	204
	15−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(II)**	204
	16−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(III)**	205
	17−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(IV)**	205
	18−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(V)**	206
	19−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VI)**	206
	20−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VII)**	207
	21−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VIII)**	207
	22−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(IX)**	208
	23−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(X)**	208
	24−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في حالة التسليح بطبقة واحدة من القضبان	209
	25−5	مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في حالة التسليح بطبقتين من القضبان	210
	26−5	مقارنة بين القيم التجريبية(.exp) ■ ، والقيم الحسابية(.th)□ ، والقيم المحددة بـ(ANSYS)، بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة	213

قائمة بالمصطلحات List of Terminology:

-A-	
Aggressive Environments	أوساط ملوثة
Approaches	تقريبات
-B-	
Beam	جائز
Behaviour	سلوك
Balanced Reinforcement Ratio	نسبة التسليح التوازنية
Bond	الالتحام
bond shear	إجهاد القص الناتج عن التماسك
Boundary Conditions	شروط طرفية
Branson's Equation	علاقة برانسون
-C-	
Capacity	طاقة التحمل
Carbon Rebars	قضبان كربونية
Compressive Behavior	سلوك على الضغط
Creep	زحف
Crack	تشقق
Crushing	التحطم
Crack-Width	عرض الشق
Curves	منحنيات
Curvature	الانحناء
Casting	الصب
Cracking Moment	عزم التشقق
Corrosion	الصدأ
-D-	
Durability	الديمومة
Displacement	الانتقال
Deflection	السهم

Deformation	التشوه
Dowel Action	فعل الدويل
Diagonal Crack	شق قطري
Degree of Freedom	درجة الحرية
Ductility index	معامل المتانة
Deformability factor	عامل قابلية التشوه
-E-	
Effective Moment Of Inertia	عزم العطالة الفعال
Experimental Results	نتائج تجريبية
-F-	
Finite Element	عنصر منته
Flexural Capacity	قدرة التحمل على الانعطاف
Failure Modes	أشكال الانهيار
Fibre Reinforced Polymer Bars (FRP)	قضبان الألياف البوليميرية
-G-	
Glass Rebars	قضبان زجاجية
Gauges	حساسات
Geometrical Shape	الشكل الهندسي
Gross Moment Of Inertia	عزم عطالة المقطع الكلي
Glass FRP (GFRP)	قضبان الألياف الزجاجية
-H-	
Hybrid Reinforcement	تسليح هجين
–I–	
Initial tangent modulus of concrete in tension	عامل المرونة الأولي للبيتون على الشد
Initial tangent modulus of concrete in compression	عامل المرونة الأولي للبيتون على الضغط
-L-	
Load	حمولة
Linear Variable Differential Transformers (LVDTs)	مقاييس السهم (الانتقالات)

Limit States	حالات حدية
-M-	
Moment	عزم
Modeling	نمذجة
Modulus of Elasticity	عامل المرونة
Modulus of rupture	معامل الانقطاع
-N-	
Numerical Modeling	نمذجة عددية
Nonlinearity	اللاخطية
-O-	
Over Reinforced	نسبة تسليح مرتفعة
-P-	
Plasticity	اللدونة
pull-out	السحب (تجربة سحب القضبان من البيتون)
-R-	
Reinforced Concrete	بيتون مسلح
Reinforcement Ratio	نسبة التسليح
-S-	
Stress	إجهاد
Strain	تشوه
Strain Gauges	حساسات تشوه
Support	مسند
Stiffness	قساوة (صلابة)
Shell Element	عنصر سطحي
Shear Transfer Coefficient	عامل نقل القص
Symmetrical	متناظرة
Serviceability Loads	حمولات استثمارية
Stirrups	أساور
Simply Supported Beam	جائز بسيط الاستناد

-T-	
Tensile Behavior	السلوك على الشد
Tensile Strength	المقاومة على الشد
Tensile Modulus	عامل المرونة على الشد
Tension Stiffening	الصلابة على الشد
-U-	
Ultimate Load	الحمولة الحدية
Under Reinforced	نسبة تسليح مخفضة
-Y-	
Yielding Stress	إجهاد الخضوع

قائمة بالاختصارات List of Abbreviations:

الاختصار	التفسير باللغة الأجنبية	التفسير باللغة العربية
ACI	AMERICAN CONCRETE INSTITUTE	المعهد الأمريكي للبيتون
EC	EUROPEAN COMMUNITY	الكود الأوربي
CEB	COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON	اللجنة الأوربية – الدولية للبيتون
RC	REINFORCED CONCRETE	البيتون المسلح
FEM	FINITE ELEMENT METHOD	طريقة العناصر المنتهية
LVDTs	LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMERS (LVDTS)	مقاييس السهم (الانتقالات)
FRP	FIBRE REINFORCED POLYMER	قضبان الألياف البوليميرية
GFRP	GLASS FIBRE REINFORCED POLYMER	قضبان الألياف الزجاجية
CFRP	CORBON FIBRE REINFORCED POLYMER	قضبان الألياف الكربونية
AFRP	ARAMED FIBRE REINFORCED POLYMER	قضبان الألياف الآراميدية
ISIS	INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES	الكود الكندي:(التصميم الذكي للمنشآت المبتكرة)
FIB	FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON	الكود الفيدرالي الدولي للبيتون
CSA	CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION	الجمعية الكندية للمقاييس
BSI	BRITISH STANDARD INSTITUTION	المعهد البريطاني للمقاييس
CEN	COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION	اللجنة الأوربية للمقاييس
CSA	CRACKED SECTION ANALYSIS	طريقة تحليل المقطع المتشقق
SA	SECTIONAL ANALYSIS	طريقة التحليل المقطعي

قائمة بالرموز List of Symbols:

h	الارتفاع الكلي لمقطع الجائز البيتوني(mm)
b	عرض المقطع الجائز البيتوني (mm)
d	الارتفاع الفعال لمقطع الجائز البيتوني (mm)
$f_c^{/}$	المقاومة المميزة للبيتون(MPa)
E_f	معامل مرونة قضبان الـ FRP (MPa)
E_s	معامل مرونة الفولاذ (MPa)
A_f	مساحة مقطع قضبان الـ CFRP المشدودة(mm^2)
A_s	مساحة مقطع القضبان الفولاذية المشدودة(mm^2)
M	العزم المطبق على الجائز(N.mm)
p	الحمولة الكلية المطبقة على الجائز(N)
ε_{cu}	التشوه النسبي الأعظمي في البيتون المضغوط وهو يساوي 0.003 حسب الكود الأمريكي[7]، و0.0035 حسب الكود الأوربي [16]
f_y	إجهاد الخضوع في فولاذ التسليح (MPa)
f_{fu}	مقاومة القضبان الكربونية على الشد (MPa)
a	مجال القص (المسافة بين نقطة تطبيق القوة والمسند) (mm)
L	طول مجاز الجائز(mm)
d_c	سماكة طبقة التغطية وتقاس من السطح المشدود إلى مركز طبقة التسليح الأقرب للسطح (mm)، وفق الكود[4].
s	التباعد الأفقي بين قضبان التسليح في المقطع (mm)
k_b	معامل يتعلق بالتماسك بين قضبان CFRP والبيتون (هذا العامل يتراوح بين 0.6 و 1.72 وقيمته =1.2 في حالة عدم توفر معطيات تجريبية عن قضبان الـCFRP [7])
E_c	معامل مرونة البيتون (MPa).
n_s	نسبة معامل مرونة القضبان الفولاذية إلى معامل مرونة البيتون
ρ_s	نسبة التسليح الحقيقية بقضبان فولاذية
f_{cr}	مقاومة البيتون على الشد modulus of rupture of concrete (ACI318-05 [7]) (MPa)
β_1	معامل يحدد لمقاومات البيتون التي تزيد عن (28 MPa)
ρ_{sb}	balanced effective reinforcement ratio نسبة التسليح الفعالة التوازنية وهي نسبة توافق حدوث انهيار للبيتون ويترافق ذلك مع حدوث تطاول في فولاذ التسليح [31]
I_g	قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق(mm^4)

M_{cr}	العزم المسبب للتشقق (KN.m)
k	معامل يحسب للتسليح بالفولاذ أو للتسليح بالـCFRP
I_{cr}	عزم عطالة المقطع المتشقق (mm^4)
I_e	Effective moment of inertia وهو عزم العطالة الفعال للمقطع (mm^4)
α_s	عامل مقترح ليناسب الفولاذ (ذو إجهاد خضوع عالي f_y (MPa)) وهو نوع الفولاذ المستخدم في البحث (A600 و A500)
δ	قيمة السهم وسط مجاز الجائز (mm)
β_1	النسبة بين بعد المحور الحيادي عن الوجه المشدود للمقطع إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز القضبان المشدودة في المقطع
f_s	الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الفولاذية (MPa)
w	عرض الشق في الجوائز المسلحة (mm)
M_{ns}	قيمة عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بالفولاذ (N.mm)
n_f	نسبة معامل مرونة قضبان الـ CFRP إلى معامل مرونة البيتون
ρ_f	نسبة التسليح الحقيقية بقضبان CFRP
ρ_{fb}	نسبة التسليح الفعالة التوازنية بقضبان CFRP
β_d	عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بالـCFRP
f_f	الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الـCFRP عند تطبيق العزم M على الجائز (MPa)
M_{nf}	قيمة عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بالـ CFRP (N.mm)
ρ'_b	نسبة التسليح الفعالة التوازنية للتسليح الهجين
ρ'	معامل يحسب للتسليح الهجين
k'	معامل يحسب للتسليح الهجين
β'_d	عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بشكل هجين
I'_{cr}	عزم عطالة المقطع المتشقق المسلح بشكل هجين (mm^4)
β'	النسبة بين بعد المحور الحيادي عن الوجه المشدود للمقطع إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز القضبان المشدودة في المقطع المسلح بشكل هجين
ε'_f	التشوه الحاصل في قضبان التسليح الهجينة
f'_f	الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الهجين (MPa)
M'_{nf}	عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بشكل هجين (N.mm)

تطوير علاقة السهم في الجوائز البيتونية الهجينة التسليح بقضبان فولاذية وكربونية CFRP

مقدمة Introduction:

انتشر استخدام قضبان من الألياف البوليميرية FRP في تسليح الجوائز البيتونية خلال السنوات العشرة الأخيرة، وأصبحت بديلة عن القضبان الفولاذية في بعض الأوساط الملوثة أو البحرية، نظراً لما تتميز به قضبان الألياف البوليميرية FRP من خصائص فيزيائية وكيميائية ايجابية، مثل: عدم الصدأ، وخفة الوزن، واللامغنطة، وعدم ناقلية الكهرباء، والمقاومة العالية على الشد ومقاومة للتعب. من جهة أخرى لها خصائص سلبية، مثل: انخفاض معامل مرونتها، وعدم قابليتها للمطاوعة، والسحب، وخطية العلاقة بين الإجهاد والتشوه، وصولاً إلى لحظة الانقطاع[3]. يضاف إلى ذلك اختلاف تماسكها مع البيتون بحسب نوع منتج FRP وصعوبة توفير الانتقال الفعال للقوى بين القضبان والبيتون المحيط بها، كما أن قابليتها للتقصف تفرض قيود على جعلها تشد إلى درجة الانقطاع. ومن جهة أخرى فإن التكاليف الأولية المرتفعة لقضبان الـFRP يعتبر مانعاً لاستخدامها في تسليح المنشآت البيتونية، ولكن هذه التكاليف يمكن تجاهلها أو تصبح معقولة عند التفكير بتكاليف الصيانة البعيدة الأمد[5], إذ إن المنشآت البيتونية المسلحة بقضبان FRP لا تحتاج لصيانة كونها لا تصدأ وليست بحاجة للحماية، وباعتبارها أيضاً لا تتمغنط فقد تشكل أحد الخيارات الرئيسية في تسليح البيتون في غرف الإنعاش الطبية أو المراكز البحثية التي يشكل فولاذ التسليح عاملاً مشوشاً على أجهزتها الدقيقة[26].

دراسات عديدة منجزة من قبل باحثين مثل:(Saadatmanesh ,Ehsani[32]; Benmokrane [12] ; [29] Masmoudi ; [11] Barris ; Leung [28]) توضح إمكانية الاستفادة من قضبان الألياف البوليميرية FRP في تسليح العناصر الإنشائية. وتشير هذه الدراسات إلى أن قضبان الـ FRP يمكن أن تكون مواد واعدة و بديلة للفولاذ الذي هيمن كمادة تسليح في المنشآت البيتونية طوال مائة عام نظراً لخصائصه العالية من ناحية القوة والعمل المشترك مع البيتون. وذلك لأن صدأ قضبان التسليح الفولاذية في البيتون يعتبر أحد الأسباب المؤدية إلى تضرر المنشآت البيتونية المسلحة وانهيارها، لما يسببه من انخفاض في مساحة مقاطع القضبان ويقود إلى انخفاض التماسك بينها وبين البيتون المحيط بها، وبناء عليه فإن الصدأ يؤدي إلى تشظي طبقة التغطية البيتونية أولاً وهذا يؤدي إلى تسريع عملية الصدأ في القضبان الداخلية. ويمكن التغلب على مشكلة الصدأ في قضبان التسليح الفولاذية عن طريق تحسين نوعية البيتون، وزيادة سماكة طبقة التغطية، أو باستخدام الفولاذ المغلف، وقد يكون بالاستعاضة عن قضبان التسليح الفولاذية بقضبان غير قابلة للصدأ مثل قضبان FRP.

أنجزت في العقد الأخير من القرن الماضي مجموعة من الدراسات للتحقق من أداء الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان FRP وكنتيجة لذلك اقترحت مجموعة من الإجراءات والكودات التصميمية. وفي الوقت الحالي توجد كودات عالمية مثل CSA2002[17]، ISIS Canada 2001[23]، IStructE1999 [24]، ACI440[7,8]، متوفرة للمهندسين المنفذين لتساعدهم في تصميم وإنشاء العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الـ FRP. ولحساب السهوم اقترح عدد من الباحثين مجموعة من العوامل لتعديل علاقة برانسون المستخدمة لتصميم العناصر المسلحة بالفولاذ. كما اعتمدت مقترحات وتقريبات مختلفة في كودات خاصة بالعناصر المسلحة بـFRP لتقييم قدرة تحملها على الانعطاف، والتسليح على القص، حيث طورت لجنة ACI440[7] علاقات رياضية للتنبؤ بالسهوم واتساع التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بـ FRP. وتعتمد علاقة برانسون في الكود ACI 318-05 [6] لحساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ، وتم تعديل هذه العلاقة في الإصدار ACI 440.1R-06 [7] لتناسب حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بـ FRP، حيث أصبحت تتضمن عامل تخفيض β_d ، الذي يتعلق بنسبة التسليح الكلية وبنسبة التسليح التوازنية لقضبان FRP. وتعتبر العلاقات الرياضية في هذا الإصدار مهمة جداً وخطوة رائدة لاستخدام منتجات FRP في مجال الهندسة المدنية. ومع ذلك يجب التنويه إلى أن هذه العلاقات تم تطويرها اعتماداً على معطيات محددة ويتوجب تنقيح هذه العلاقات وتصحيحها بشكلٍ أفضل عندما تتوفر معطيات أكثر.

ظهر مؤخراً نوع جديد من العناصر البيتونية المسلحة تسليحاً مشتركاً(هجيناً) بقضبان فولاذية و كربونية CFRP ويعتبر ذلك أمراً واعداً ومفيداً نظراً لما يحققه هذا التسليح المشترك من قوة وقابلية للتشغيل بالإضافة للمتانة العالية والديمومة، وذلك في حال الاستعاضة عن بعض قضبان التسليح الفولاذية بقضبان كربونية لا تصدأ وذات مقاومة عالية على الشد. ونظراً للخصائص المميزة لقضبان CFRP والتي تختلف كثيراً عن خصائص الفولاذ، فإن سلوك العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون) يختلف عن سلوك العناصر المسلحة بقضبان فولاذية فقط أو المسلحة بقضبان كربونية فقط. وهذا ما سوف نحاول تسليط الضوء عليه في بحثنا هذا من خلال برنامج تجريبي وحسابي وتحليلي يهدف إلى تطوير(تعديل علاقة برانسون) لحساب السهم في هذا النوع من التسليح الهجين للجوائز البيتونية، وكذلك تطوير علاقات حساب عرض الشق وقدرة التحمل. والتعديلات المقترحة على هذه العلاقات تتضمن خصائص مادتي التسليح المختلفتين. والعلاقات الجديدة المعدلة يجب أن تناسب حالات مختلفة للتسليح الهجين (فولاذ+كربون).

تمت مقارنة النتائج الحسابية مع نتائج الاختبارات التجريبية، وذلك لإثبات صحة التعديلات المقترحة، كما تمت مقارنة النتائج الحسابية والتجريبية أيضاً مع نتائج التحليل بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج التحليل الإنشائي ANSYS [9] ، وتم التوصل إلى مجموعة من النتائج والتوصيات.

مشكلة البحث Research Problem:

تتوفر عالمياً كودات تصميمية كثيرة في مجال البيتون المسلح بالفولاذ، ومع انتشار استخدام قضبان الـ FRP في مجال الهندسة الإنشائية كان لابد من وضع كودات تصميمية تناسب العناصر البيتونية المسلحة بهذه القضبان، وبالفعل نفذت دراسات عديدة لفهم سلوك هذه العناصر وتم وضع كودات تصميمية خاصة بالعناصر المسلحة بـ FRP. ولكن مع ظهور الاستخدام المشترك (التسليح الهجين) للقضبان الفولاذية والـ FRP، برزت مشكلة في عدم وجود كودات تصميمية تساعد المهندسين المصممين في فهم سلوك وحساب هذه العناصر المسلحة بشكلٍ هجين.

وتكمن مشكلة البحث في الأسئلة البحثية التالية:

1. كيف يؤثر الاستخدام المختلط للقضبان الكربونية والفولاذية على قيمة السهم وقدرة التحمل وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ وكربون)، مقارنة مع حالة التسليح بقضبان فولاذية فقط أو بقضبان كربونية فقط؟
2. ما هي العوامل التي تتأثر بالاستخدام المشترك للقضبان الكربونية والفولاذية في تسليح العناصر البيتونية وكيف ينعكس ذلك على العلاقات الحسابية الموجودة؟
3. هل تصلح التعديلات المقترحة على مختلف حالات الحساب في العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين، ولاسيما حساب السهم وقدرة التحمل وعرض الشق؟

فرضيات البحث Research Hypotheses:

للإجابة عن الأسئلة البحثية الواردة في مشكلة البحث يمكن بناء الفرضية البحثية التالية:

طالما توجد علاقات حسابية موثوقة لحساب قدرة التحمل والسهم وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ، وكذلك علاقات مطورة وموثوقة لحساب قدرة التحمل والسهم وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بالـ FRP ، فإنه يمكن البناء على هذه العلاقات الحسابية وتطوير علاقات تناسب التسليح الهجين من خلال استخدام خصائص هذين النوعين من القضبان ضمن العلاقات الحسابية للوصول إلى علاقات مطورة لحساب قدرة التحمل والسهم وعرض الشق في العناصر المسلحة بشكلٍ هجين. ولإثبات صحة هذه الفرضيات نحتاج إلى مقارنة نتائجها الحسابية مع النتائج التجريبية والتحليلية.

أهمية البحث Research Importance:

تعتبر القضبان الكربونية بديلاً واعداً للقضبان الفولاذية في تسليح العناصر البيتونية، لما تتمتع به من متانة عالية على الشد، غير أن العناصر البيتونية المسلحة بها يحصل فيها سهوماً كبيرة وعدد شقوق أكبر نتيجة انخفاض معامل مرونتها، وهذا ما دفع إلى التفكير بالاستخدام المشترك (الهجين) للقضبان الفولاذية والكربونية، وذلك للاستفادة القصوى من الخصائص الايجابية لكلٍّ منهما. وباعتبار أن طريقة حساب وتصميم هذه العناصر الهجينة التسليح بحاجة إلى مزيد من الدراسة، تبرز أهمية هذا البحث في تسليط الضوء على هذا الموضوع ومعالجته.

أهداف البحث Research Objectives:

- تطوير وتعديل علاقات لحساب (السهم وعرض الشق وقدرة التحمل) في العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(بقضبان فولاذية وكربونية)، وذلك من خلال تطوير علاقة برانسون وعلاقات أخرى خاصة بالعناصر المسلحة بالفولاذ فقط، أو المسلحة بالكربون فقط. والتحقق من صحة هذه العلاقات المقترحة والمطورة من خلال إجراء مقارنة مباشرة لنتائجها الحسابية مع النتائج التجريبية والنتائج التحليلية الحاصلة من استخدام برنامج ANSYS.

ولتحقيق هذا الهدف كان لابد من القيام بالأعمال التالية:

1- تحضير واختبار طيف واسع من العينات البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو (الفولاذ والكربون) للحصول على قاعدة بيانات واسعة من النتائج التجريبية، وذلك بما يخص قدرات التحمل وعرض الشق والسهوم والتشوهات لاستخدامها لاحقا في تقييم النتائج الحسابية والتحليلية، وكذلك في دراسة النقاط التالية:

a – دراسة تأثير نسبة التسليح الهجين(فولاذ+كربون) على قدرات التحمل وأشكال الانهيار في الجوائز المختبرة.

b – إجراء مقارنة لقيم السهوم في وسط المجاز لمعرفة فاعلية التسليح الهجين من ناحية التشوه.

c – دراسة تأثير التسليح الهجين على أشكال التشققات وعرضها وانتشارها في الجوائز المختبرة.

d – مقارنة منحنيات(حمولة- تشوه في قضبان التسليح) و(حمولة- تشوه في البيتون المضغوط) للجوائز المختبرة.

2- نمذجة العينات المختبرة وتحليلها بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج التحليل الإنشائي ANSYS [9]. ومقارنة نتائج التحليل مع النتائج التجريبية والحسابية.

تمثلت منهجية إعداد البحث(Research Methodology) بالمراحل التالية:

اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي التحليلي وذلك من خلال المراحل التالية :

- الدراسة النظرية والمرجعية وتتضمن الاطلاع على ما يتوفر من دراسات وأبحاث علمية حول موضوع البحث، والطرق المتبعة في حساب العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية، أو قضبان من الـ FRP أو المسلحة بشكلٍ هجين بقضبان (فولاذية +FRP).

- الدراسة التجريبية وتتضمن تحضير واختبار ثلاثين جائزاً بيتونياً مقسمة إلى عشر مجموعات في كلٍّ منها ثلاثة جوائز متماثلة بالأبعاد الهندسية وبالتسليح. ومقارنة نتائج الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين مع نتائج الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ أو الكربون.

- الدراسة الحسابية وتتضمن تطوير علاقات لحساب (السهم وقدرة التحمل وعرض الشق) انطلاقاً من علاقات كود المعهد الأمريكي للبيتون ACI440[7]، وحساب الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين اعتماداً على هذه العلاقات المطورة والمعدلة.

– الدراسة التحليلية ونمذجة هذه الجوائز بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج التحليل الإنشائي [9] ANSYS.

– مقارنة نتائج الدراسة التجريبية والحسابية والتحليلية ، ثم استخلاص الاستنتاجات والتوصيات العامة.

وتضمنت الرسالة ما يلي: مقدمة البحث، وخمسة فصول أساسية، وفهرس، وقائمة بالمراجع المستخدمة، بالإضافة لثلاثة ملاحق تتعلق بموضوع البحث.

حيث شمل الفصل الأول الدراسة النظرية والمرجعية، بينما تناول الثاني الدراسة التجريبية ونتائج الاختبارات، في حين خصص الثالث للدراسة الحسابية وتطوير علاقات حسابية للسهم وعرض الشق وقدرة التحمل، وتضمن الفصل الرابع الدراسة التحليلية باستخدام برنامج ANSYS، أما الفصل الخامس فقد تناول مقارنة النتائج التجريبية مع الحسابية والتحليلية واستخلاص الاستنتاجات والتوصيات.

الفصل الأول
الدراسة النظرية والمرجعية

الفصل الأول

الدراسة النظرية والمرجعية

1-1- مقدمة.

1-2- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

1-2 -1- طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked Section Analysis (CSA).

1-2 -2- آلية حدوث التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

1-2 -3- التماسك بين قضبان التسليح الفولاذية والبيتون المحيط بها.

1-2 -4- مقارنة طرق حساب عرض الشق والسهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

1-3- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP.

1-3 -1- خصائص قضبان التسليح FRP وأشكالها.

1-3 -2- التماسك بين قضبان التسليح FRP والبيتون المحيط بها.

1-3 -3- مقارنة طرق حساب عرض الشق والسهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان FRP.

1-4- الدراسات والأبحاث السابقة في دراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية أو قضبانFRP.

1-4-1- مقدمة.

1-4-2- تحديد مقدار السهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP وفق كودات مختلفة.

1-4-2-1- الموديل الحسابي وفق الكود ACI -440.1R-06.

1-4-2-2- الموديل الحسابي للباحثين Hall و Ghali .

1-4-2-3- الموديل الحسابي الكندي ISIS.

1-4-2-4- الموديل الحسابي المقترح من قبل الباحثين Favre وCharif .

1-4-3- دراسة تجريبية حول السلوك الانعطافي للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان *GFRP* ومقارنة نتائجها مع نتائج موديلات أخرى.

1-4-4- سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية *GFRP* على الانعطاف.

1-4-5- متانة وقابلية الاستثمار للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـ*GFRP* في العمل على الانعطاف.

1-4-6- التنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية.

1-4-7- الأشكال المختلفة لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـ *CFRP* والعاملة على الانعطاف.

1-4-8- دراسة تحليلية لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين بقضبان (فولاذية و*FRP*).

1-5- الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة النظرية والمرجعية.

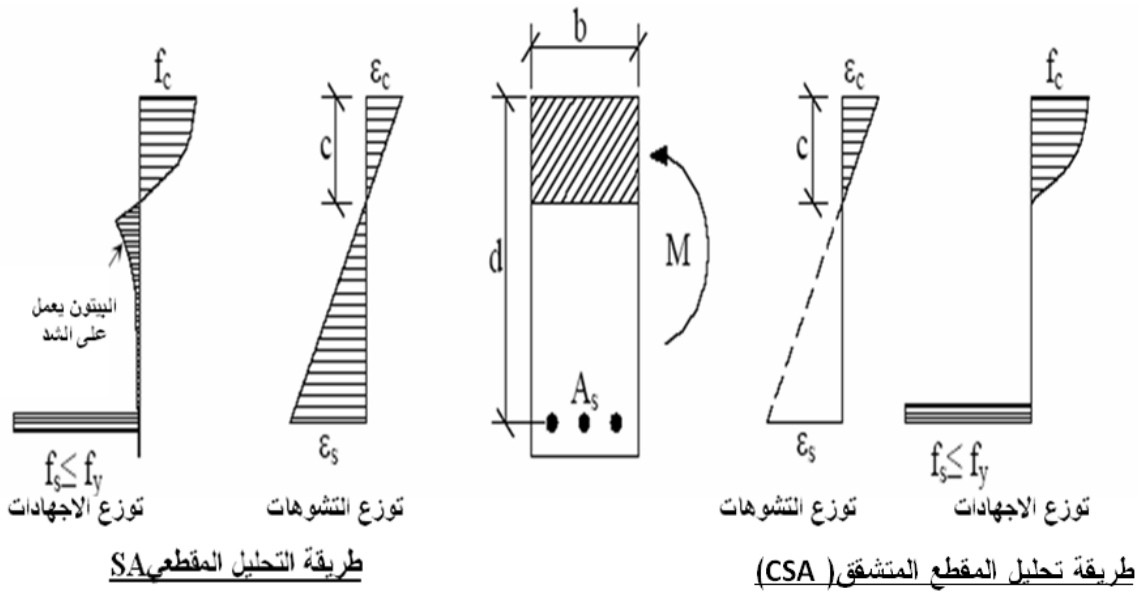
الفصل الأول
الدراسة النظرية والمرجعية

1-1- مقدمة.

تتناول الدراسة المرجعية عرضاً لاستخدام القضبان الفولاذية في تسليح العناصر البيتونية العاملة على الانعطاف، وأشهر طرق الحساب المستخدمة في تصميمها، وآلية حدوث التشققات، وموضوع التماسك بين القضبان الفولاذية والبيتون المحيط بها، وكذلك مقارنة لطرق حساب السهم وعرض الشق فيها وفق تقريبات وكودات مختلفة. ثم يتم التعرض لاستخدام قضبان الـFRP في تسليح العناصر البيتونية التي ظهرت في الفترة الأخيرة كخيار بديل للقضبان الفولاذية، وهنا يتم التعرض لأنواع هذه القضبان وخصائصها بالإضافة لموضوع تماسكها مع البيتون، ونتيجة انخفاض معامل مرونتها وارتفاع قدرة تحملها على الشد، تسلك العناصر المسلحة بها سلوكاً مختلفاً عن العناصر المسلحة بالفولاذ، هذا ما جعلها تلقى اهتماماً كبيراً من قبل باحثين كثر في العالم. لذا سنجري مقارنة لطرق حساب السهم وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان الـFRP وفق تقريبات وكودات مختلفة. وخدمة لأهداف البحث سنلقي الضوء على مجموعة من الدراسات والأبحاث السابقة التي تناولت سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية أو قضبانFRP أو المسلحة بشكلٍ هجين بقضبان فولاذية وقضبان FRP.

1-2- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

يعمل البيتون والفولاذ معاً بشكلٍ جيد لأسباب منها: التماسك الجيد بينهما ما يمنع حدوث انزلاق للقضبان، بالإضافة لقدرة البيتون على تأمين الحماية من الصدأ لقضبان التسليح في الظروف الجيدة. توجد طرق مختلفة لحساب العناصر البيتونية العاملة على الانعطاف نذكر منها طريقتين[3]: الأولى وتسمى طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked section analysis (CSA) وفيها يفرض أنه يجب على كل مقطع في الجائز الخاضع للانعطاف أن يتشقق ولا يسمح بحدوث أي شد في البيتون. أما الطريقة الثانية فتسمى طريقة التحليل المقطعي Sectional analysis (SA) وهي تقول بأن الشقوق في العناصر الخاضعة للانعطاف متباعدة، وهذا يسمح بحدوث شد في البيتون في المناطق الواقعة بين الشقوق وتحت المحور الحيادي للمقطع. ويبين الشكل(1-1) الفرق بين الطريقتين. وسنعرض لاحقاً طريقة تحليل المقطع المتشقق (CSA).



الشكل(1–1) مقارنة بين طريقتي تحليل المقطع المتشقق CSA، والتحليل المقطعي SA المستخدمة لتصميم الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ[3].

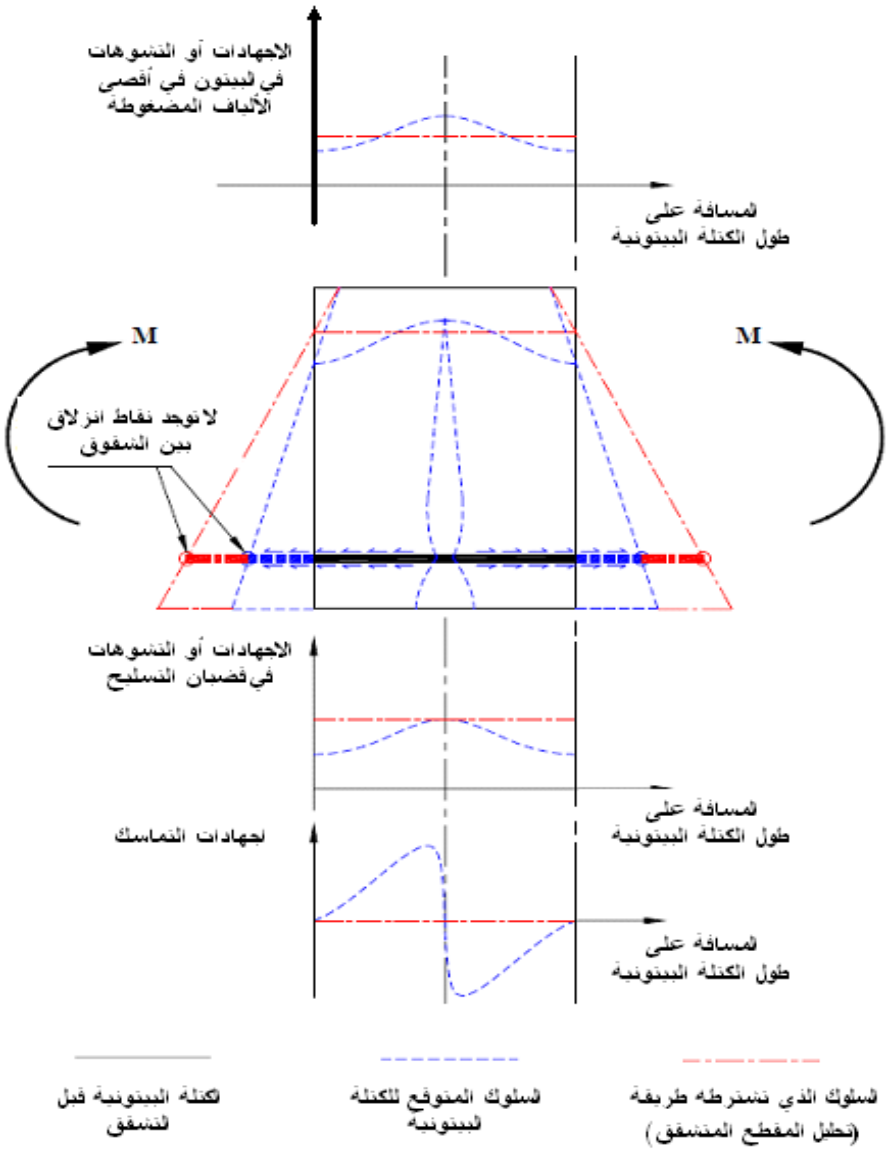
1–2 –1– طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked Section Analysis (CSA).

تعتبر هذه الطريقة من أشهر الطرق في دراسة الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الـ FRP.

مناقشة طريقة تحليل المقطع المتشقق(CSA): تتضح هذه الطريقة من خلال سلوك المقاطع البيتونية الواقعة بين شقين في الجائز البيتوني المسلح كما هو مبين في الشكل(1–2)، وهذه المقاطع تقع في منطقة الانعطاف الصافي من الجائز البيتوني. ويمكن استقراء السلوك من خلال (مخططات التشوه لكلٍّ من البيتون والتسليح، والمحور المحايد، وإجهادات التماسك)، فطريقة (CSA) تعتمد فرضية بقاء المقاطع المستوية قبل التشوه وبعده، وأن التماسك تام بين البيتون والتسليح، وأن التسليح في وسط المسافة بين شقين لا يعاني من أي انزلاق مع البيتون، وهذا يكافئ أن التماسك كامل وتام. حيث يهمل أي رد فعل بين البيتون والتسليح. وبوجود توزع خطي للتشوه على كامل عمق المقطع المتشقق، ترسم (CSA) تأثير الشق وتفرض تشوه ثابت على أي مستوى في مناطق المقطع المشدود أو المضغوط مع عمق ثابت للمحور الحيادي.

وتستخدم طريقة (CSA) قيمة ثابتة لتشوه البيتون والناتجة عن الضغط ، وتعتمد توزيع التشوه مع تغير عمق المحور الحيادي على طول ارتفاع المقطع البيتوني.

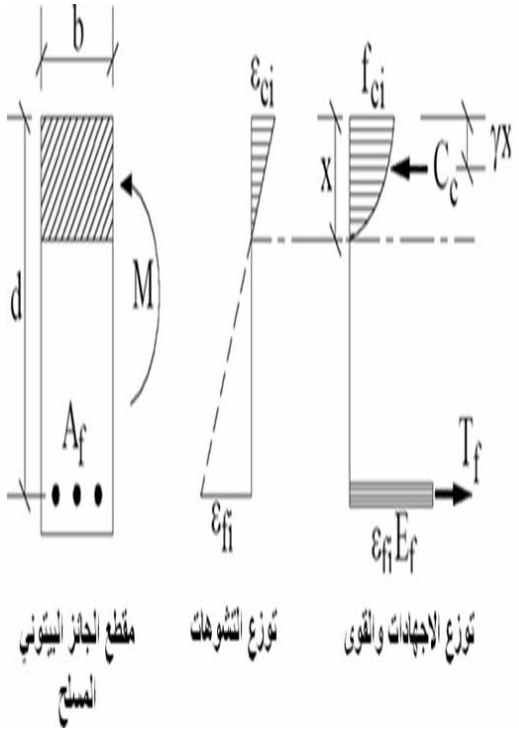
تفرض (CSA) أن قضبان التسليح تتعرض للتشوه على طولها وأن قيمة التشوه أعظمية عند الشق، مع وجود تشوه في البيتون المضغوط في منطقة الضغط، و يتعلق السهم بتشوه قضبان التسليح، كما يستخدم موديل سلوك البيتون على الضغط (إجهاد . تشوه) الوحيد الاتجاه.



الشكل(1–2) سلوك البيتون بين الشقين في منطقة الانعطاف الصافي للجائز
مقابل السلوك المتنبأ به من قبل CSA [3].

تطبيق طريقة تحليل المقطع المتشقق(CSA) في حساب السهم: يستخدم موديل سلوك البيتون وقضبان التسليح في المقطع الخاضع للانعطاف كما هو مبين في الشكل(1–3)، حيث أن قيمة التشوه في البيتون عند أقصى ليف مضغوط تساوي ε_{ci}. ويطلب معرفة مجهولين لتحديد مخطط التشوه على كامل ارتفاع المقطع وهما (ارتفاع المحور الحيادي x والتشوه في قضبان التسليح ε_{fi}). وبالتالي تلزم معادلتان لإيجاد هذين المجهولين، ونحصل عليهما من التماثل الهندسي لمخطط التشوه مثلثي الشكل وعلاقة توازن القوى الداخلية في البيتون وقضبان التسليح C_c و T_f. ولتحديد النقطة اللحظية لتطبيق القوة C_c يمكن استخدام عاملين وهما عامل المركزية α وفق العلاقة (1–1)، وعامل التموضع γ وفق العلاقة (1– 2)، ويمكن إيجاد هذين العاملين من قانون سلوك المادة (إجهاد – تشوه). ويحسب التقوس (φ) وفق العلاقة (1– 6) انطلاقاً من مخطط التشوه، ويستخدم الانحناء لحساب السهم اعتماداً على نظرية مساحة الانحناء. ولتغطية كامل مجال التحميل تكرر هذه العملية لكامل الألياف على

ارتفاع المنطقة المضغوطة المتواجدة ضمن المجال (من 0← ε_{cu1})، حيث: ε_{cu1} – قيمة التشوه العظمى للبيتون على الضغط. وعند انقطاع قضبان التسليح يتوقف التحليل عند القيمة الموافقة لـ ε_{ci} والتي هي أقل من ε_{cu1}. ويعرض الباحث[3] العلاقات الرياضية (من(1–1) إلى (1–6)) التي تقود إلى حساب السهم وفق هذه الطريقة.



$$\alpha = \frac{\int_0^{\varepsilon_{ci}} f_c d\varepsilon_c}{f_{cm}\varepsilon_{ci}} \qquad (1\text{-}1)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_{ci}} \varepsilon_c f_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_{ci}\int_0^{\varepsilon_{ci}} f_c d\varepsilon_c} \qquad (2\text{-}1)$$

$$\varepsilon_{fi} = \varepsilon_{ci}\frac{(d-x)}{x} \qquad (3\text{-}1)$$

$$[C_c = \alpha f_{cm} x b] = [T_f = A_f E_f \varepsilon_{fi}] \qquad (4\text{-}1)$$

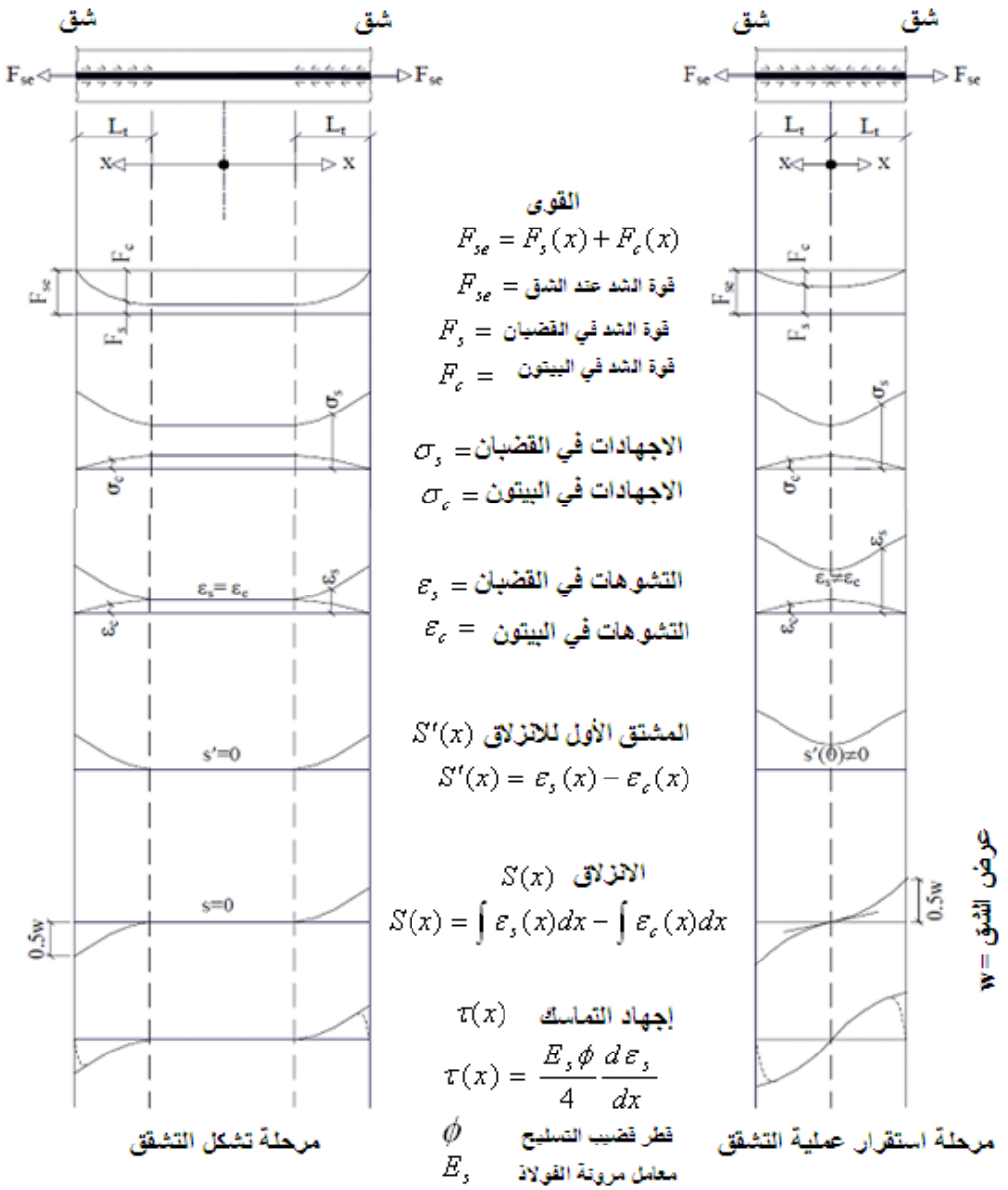
$$M = C_c(d - \gamma x) \qquad (5\text{-}1)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{ci}}{x} \qquad (6\text{-}1)$$

الشكل(1–3) طريقة تحليل المقطع المتشقق Cracked Section Analysis (CSA) [3].

1–2 –2– آلية حدوث التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

تنتقل إجهادات الشد من قضبان الفولاذ إلى البيتون المحيط بها من خلال سطح التماسك بينهما، وقبل حدوث التشقق تكون التشوهات على سطوح التماس بين البيتون والفولاذ متساوية ولا وجود للانزلاق، وباعتبار أن البيتون ضعيف على الشد تحدث التشققات عندما تزداد الإجهادات الشادة في البيتون عن حد المقاومة على الشد، عندها تتحمل قضبان الفولاذ كامل الإجهادات الشادة في منطقة التشققات. ونظراً لعدم وجود التوافق في التشوهات بينهما يحدث انزلاق للقضبان على طرفي الشق ويشرح الشكل(1–4) آلية حدوث التشققات.



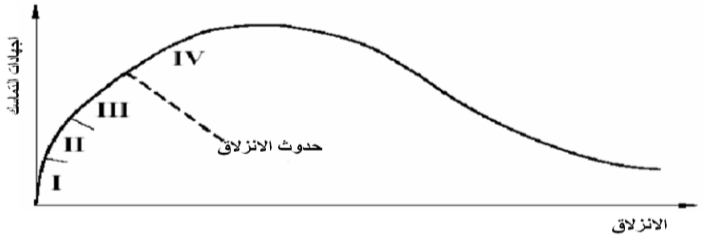
الشكل(1–4) مرحلة ظهور التشققات، ومرحلة استقرارها، والتوزع المتوقع للإجهادات والتشوهات والتماسك والانزلاق، خلال هاتين المرحلتين [3].

1–2 –3– التماسك بين قضبان التسليح الفولاذية والبيتون المحيط بها.

تتأثر كل مظاهر السلوك في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بشكلٍ كبير بموضوع التماسك، ولاسيما عرض التشققات والسهوم وقدرة التحمل. تنتج قوة التماسك بين القضبان والبيتون نتيجة الالتحام بينهما، وعندما يصل الإجهاد في القضبان إلى مستويات معينة تتولد أفعال ميكانيكية واحتكاك، وتترافق إجهادات التماسك بحدوث انزلاق نسبي للقضبان. يبين الشكل(1–5) علاقة نموذجية بين التماسك والانزلاق ويمكن تقسيمها إلى أربع مراحل[3]:

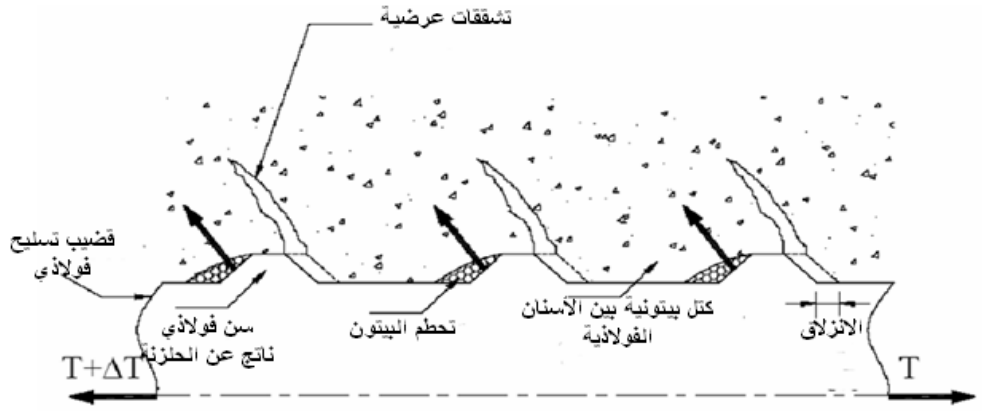
في المرحلة الأولى I: يكون التماسك ناتجاً عن الالتحام، وتكون إجهادات التماسك منخفضة جداً، وتهمل قيم الانزلاق، وينهار الالتحام في نهاية هذه المرحلة.

في المرحلة الثانية II: يتأثر التماسك بتقدم نتوءات الحلزنة ضمن البيتون المحيط بها وتتولد شقوق ميكروية عند نتوءات الحلزنة، حيث يحدث انحناء للكتل البيتونية بين نتوءات الحلزنة، وكذلك تحطم بسيط للبيتون أمامها، الشكل(1-6).



الشكل(1-5) علاقة نموذجية بين التماسك والانزلاق [3].

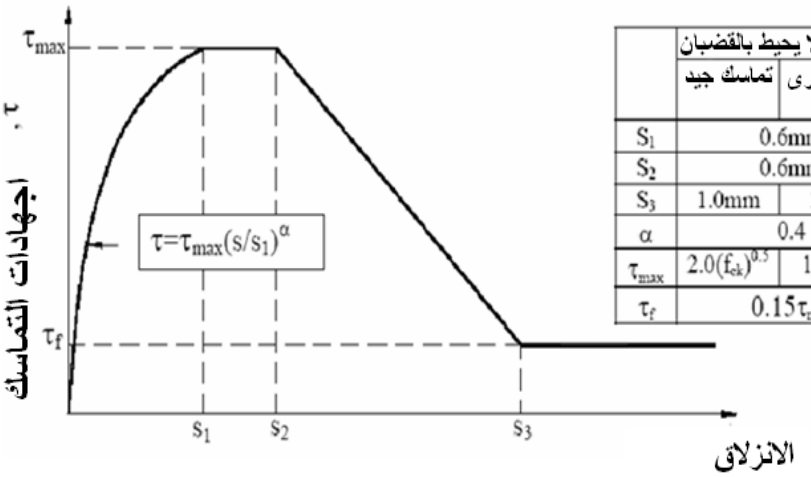
في المرحلة الثالثة III: تتحرك أسافين الحلزنة وتسبب شقوق انزلاقية طولية وتنتشر بشكلٍ شعاعيSpread Radially. وإذا كانت إحاطة البيتون بالقضبان غير كافية أو كانت طبقة التغطية قليلة، يزداد اتساع هذه الشقوق خلال طبقة التغطية، وتظهر على سطح الجائز ويرافق ذلك انهيار على شكل انهيار للتماسك.



الشكل(1-6) المرحلة II . ضغط نتوءات الحلزنة على البيتون، وتشكل شقوق عرضية ميكروية [3].

في المرحلة الرابعة IV: إذا منع حدوث شقوق انزلاقية طولية، فإن انهياراً على شكل اقتلاع لقضبان التسليح يحصل عند قيم عالية لإجهادات التماسك وتقوم نتوءات الحلزنة بقص البيتون وتبدأ عملية احتكاك على طول مستوى الانزلاق وحول قضبان التسليح وهذا يترافق بانخفاض لإجهادات التماسك. وتتعلق قوة التماسك بين القضبان والبيتون المحيط بعدة أمور مثل مقاومة البيتون على الشد والحالة الإجهادية ومستوى إحاطة البيتون للقضبان وسماكة طبقة التغطية بالإضافة لقطر قضبان التسليح وتباعدها.

تم تطوير موديل مبسط في الكود CEB 1993 [15] ويسمى موديل التماسك والانزلاق الموضعي استناداً لكمٍّ كبيرٍ من النتائج التجريبية كما يبين الشكل(1-7)، حيث يمكن استخدام هذا الموديل لمعرفة توزع إجهادات التماسك τ على طول خط الانتقال، وكذلك التنبؤ بتشكل التشققات، وفي حساب طول الإرساء للقضبان.



	البيتون لا يحيط بالقضبان		البيتون يحيط بالقضبان	
	تماسك جيد	حالات أخرى	تماسك جيد	حالات أخرى
S_1	0.6mm		1.0mm	
S_2	0.6mm		3.0mm	
S_3	1.0mm	2.5mm	التباعد بين أسنان الحلزنة	
α	0.4		0.4	
τ_{max}	$2.0(f_{ck})^{0.5}$	$1.0(f_{ck})^{0.5}$	$2.5(f_{ck})^{0.5}$	$1.25(f_{ck})^{0.5}$
τ_f	$0.15\tau_{max}$		$0.40\tau_{max}$	

الشكل(1–7) موديل التماسك والانزلاق الموضعي (Local bond-slip model) [15]

1–2 –4– مقارنة بين طرائق حساب عرض الشق والسهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية.

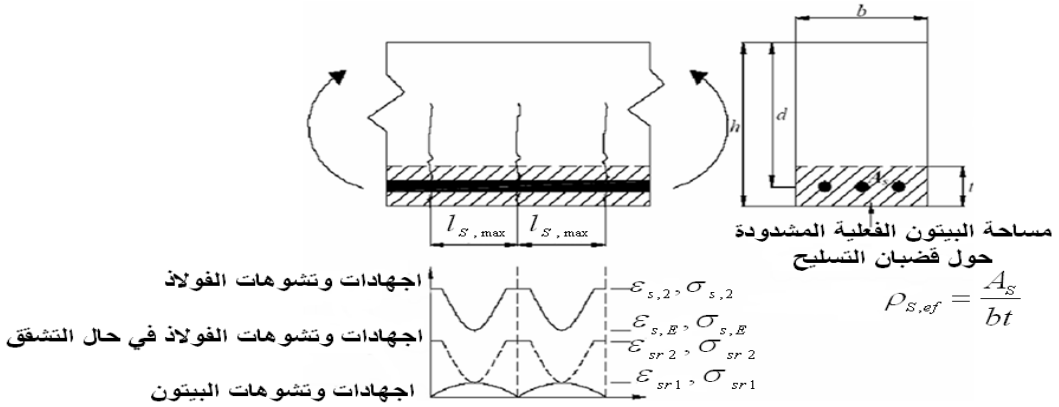
يبين الجدول(1–1) مقارنةً لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريبات وكودات مختلفة وهي : CEB-FIP model code 1990 [15]، Eurocode 2 [16]، ACI 318-95 [4]، BSI-1985 [14]، وقد تم وضع العلاقات الرياضية اللازمة لحساب عرض الشق والمسافة بين الشقوق وفق كلٍّ تقريب كما هو مبين في العلاقات من (1–7) إلى (1–16). كما يرد في الجدول ذاته شرح للعوامل الداخلة في كل علاقة رياضية. ويبين الشكل(1–8) رسماً توضيحياً لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990 [15]. ويبين الشكل(1–9) رسماً توضيحياً لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب ACI 318-95 [4]. كما يبين الشكل(1–10) رسماً توضيحياً لطريقة حساب عرض الشق بتقريب BSI 1985 [14].

يبين الجدول(1–2) مقارنة لطرائق حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريبات وكودات مختلفة وهي : CEB-FIP model code 1990 [15]، Eurocode 2 [16]، ACI 318-95 [4]، BSI-1985 [14]، وقد تم وضع العلاقات الرياضية اللازمة لحساب السهم وفق كل تقريب كما هو مبين في العلاقات من (1–17) إلى (1–24). كما نظم في نفس الجدول شرح للعوامل الداخلة في كل علاقة رياضية. ويظهر الشكل (1–11) رسماً توضيحياً لطريقة حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بالقضبان الفولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990 [15].

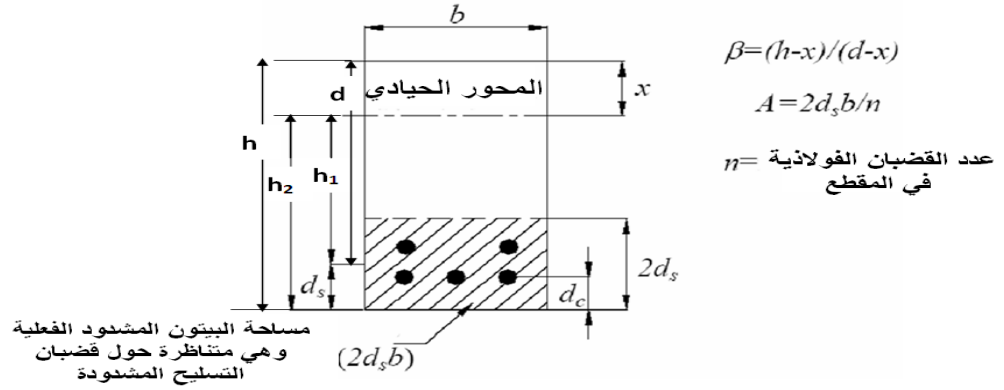
وتجدر الإشارة إلى أن الكود العربي السوري[43]، أعطى علاقات بسيطة لحساب السهم وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ، وميز بين الحمولات الستاتيكية والديناميكية. غير أنه لن يتم التطرق لهذه العلاقات، كون هذا الكود لم يدرس حالة التسليح بقضبانFRP، وبالتالي لا تصلح علاقاته للمقارنة المطلوبة.

الجدول(1–1) مقارنة لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريبات وكودات مختلفة.

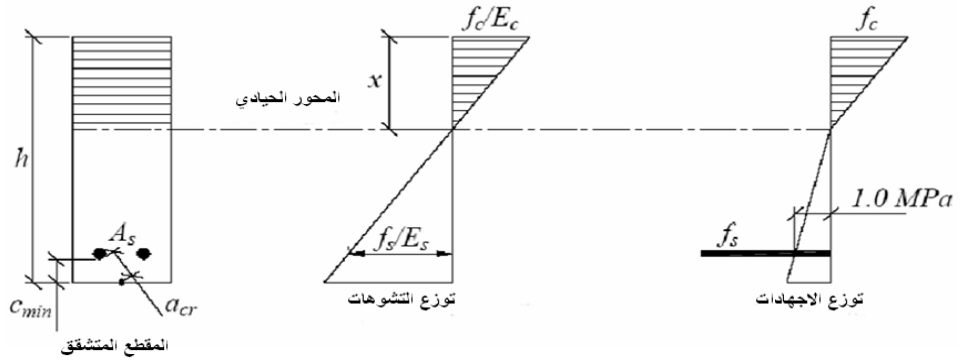
اسم الكود	العلاقات المستخدمة لحساب عرض الشقوق والمسافة بينها	شرح لمختلف العوامل الداخلة في العلاقات
CEB-FIP model code 1990 **[15]**	عرض الشق $w_K = l_{s,\max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs})$ (7-1) حيث المسافة بين شقين $l_{s,\max} = 2\frac{\sigma_{s2} - \sigma_{SE}}{4\tau_{bk}}\phi_s$ (8-1) وبشكلٍ أخر $l_{s,\max} = \frac{\phi_s}{3.6\rho_{s,ef}}$ (9-1)	يبين الشكل(1–8) رسماً توضيحياً لهذا التقريب. $l_{s,\max}$ – المسافة بين شقين والتي يحصل فيها انزلاق بين القضبان البيتون ε_{sm} – متوسط قيمة التشوه في القضبان ε_{cm} – متوسط قيمة التشوه في البيتون ε_{cs} – قيمة التشوه في البيتون والناتجة عن انكماش البيتون σ_{s2} – قيمة الإجهاد في الفولاذ عند الشق σ_{sE} – قيمة الإجهاد في الفولاذ عند النقطة التي يكون فيها الانزلاق يساوي الصفر τ_{bk} – الجزء الأدنى من متوسط قيمة إجهاد التماسك= $(1.8 f_{ctm})$ ϕ_s – قطر قضيب التسليح (f_{ctm}) – مقاومة البيتون على الشد $\rho_{s,ef}$ – نسبة التسليح الفعلية مع الأخذ بالحسبان المساحة الفعلية للبيتون المتناظر حول القضبان المشدودة
Euro-code 2 [16]	يعتمد على نفس التقريب الموجود في CEB-FIP Model code 1990 [15] ولكن المسافة بين شقين تحسب كما يلي: $s_{r,\max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi_s / \rho_{s,ef}$ (10-1) for $s \le 5(c + \phi_s/2)$ $s_{r,\max} = 1.3(h - x)$ (11-1) for $s > 5(c + \phi_s/2)$	k_1 – معامل التماسك وهو= 0.8 للقضبان شديدة التماسك، ويساوي 1.6 للقضبان الملساء k_2 – معامل توزع التشوهات وهو= 0.5 في حالة الانعطاف، ويساوي 1 في حال الشد الصافي k_4 – معامل يساوي 0.425 c – سماكة طبقة التغطية حتى قضبان التسليح الطولية k_3 – معامل يساوي 3.4 s – التباعد بين القضبان h – الارتفاع الكلي للمقطع x – ارتفاع المحور الحيادي للمقطع
ACI 318-95 **[4]**	$w = 2.2\beta\varepsilon_s \sqrt[3]{d_c A}$ (12-1) وتم تعديلها عام 2005 لتصبح كما يلي $w = 2\beta\varepsilon_s \sqrt[3]{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$ (13-1) المسافة القصوى بين شقين= 4* سماكة طبقة التغطية للعناصر المشدودة. المسافة القصوى بين شقين في العناصر الخاضعة للانعطاف=أصغر بـ 20% من المسافة المحسوبة للعناصر المشدودة	يبين الشكل(1–9) رسماً توضيحياً لهذا التقريب w – عرض الشق الأعظمي على الوجه المشدود للجائز ε_s – التشوه في قضبان التسليح الفولاذية A – مساحة البيتون المحيطة بشكلٍ متناظر بالقضبان المشدودة $A = 2d_s b/n$ (14-1) حيث: n – عدد القضبان في المقطع. d_c – سماكة طبقة التغطية من طرف المقطع المشدود وحتى مركز القضبان السفلية β – نسبة المسافة بين المحور الحيادي والطرف المشدود إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز قضبان التسليح السفلية $\beta = (h - x)/(d - x)$ (15-1)
BSI 1985 **[14]**	$w_{cr} = \frac{3a_{cr}\varepsilon_m}{1 + 2\left(\frac{a_{cr} - c_{\min}}{h - x}\right)}$ (16-1) والمسافة القصوى بين شقين= 3* سماكة طبقة التغطية البيتونية.	يبين الشكل(1–10) رسماً توضيحياً لهذا التقريب w_{cr} – عرض الشق الأعظمي في النقطة المدروسة a_{cr} – المسافة بين النقطة المدروسة وسطح قضيب التسليح الأقرب $c_{\min}$ – سماكة طبقة التغطية الأصغرية h – الارتفاع الكلي لمقطع الجائز x – ارتفاع المحور الحيادي للمقطع ε_m – متوسط قيمة التشوه عند مستوى النقطة المدروسة



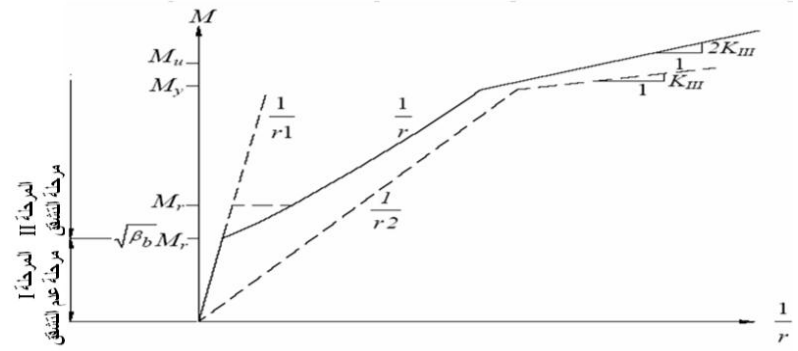
الشكل(1–8) رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990 [15].



الشكل(1–9) رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب ACI 318-95 [4].



الشكل(1–10) رسم توضيحي لطريقة حساب عرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريب BSI 1985 [14].



الشكل(1–11) رسم توضيحي لطريقة حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بالقضبان الفولاذية بتقريب CEB-FIP model code 1990 [15].

الجدول(1–2) مقارنة لطرائق حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بالقضبان الفولاذية بتقريبات وكودات مختلفة.

اسم الكود	العلاقات المستخدمة لحساب السهوم	شرح لمختلف العوامل الداخلة في العلاقات
CEB-FIP model code 1990 **[15]**	$k=\frac{d^2\delta}{dx^2}$ (17-1) وهي العلاقة التفاضلية العامة. يحسب السهم اعتماداً على التقوس الأساسي الذي يحسب بالعلاقة التالية : $\frac{1}{r}=\frac{\varepsilon_{s,m}-\varepsilon_{c,m}}{d}$ (18-1) $\frac{1}{r}=\frac{1}{r_1}$ (19-1) التقوس في المرحلة الأولى بدون تشقق $\frac{1}{r}=\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_{ts}}$ (20-1) $=\frac{1}{r_2}-\left(\frac{1}{r_{2r}}-\frac{1}{r_{1r}}\right)\beta_b(M_r/M)$ التقوس في المرحلة الثانية التي يحدث فيها تشقق	يبين الشكل(1–11) رسماً توضيحياً لهذا التقريب. $\varepsilon_{s,m}$ – قيمة التشوه في قضبان التسليح وتحسب اعتماداً على الصلابة على الشد لمساحة منطقة البيتون المشدود حول القضبان السفلية. $\varepsilon_{c,m}$ – قيمة التشوه في البيتون المضغوط في أقصى ارتفاع مقطع الجائز وتعتمد قيمتها على ارتفاع منطقة البيتون المضغوط في المقطع في المنطقة الواقعة بين الشقوق. d – زراع العزم. $\beta_b=\beta_1\beta_2$ – معامل يتعلق بنوعية التماسك بين القضبان والبيتون المحيط بها وديمومة الحمولة β_1 – معامل جودة التماسك ويساوي1 للتماسك القوي ويساوي 0.5 للقضبان الملساء β_2 – معامل ديمومة الحمولة أو تناوبها ويساوي 0.8 للتحميل العادي، ويساوي 0.5 للحمولات الطويلة الأمد. M – عزم الانعطاف المطبق على الجائز. $M_{cr}=M_r$ – عزم التشقق $\frac{1}{r_1}$ و $\frac{1}{r_{1r}}$ – التقوس في المرحلة الأولى منسوب لقيم العزم M و M_r $\frac{1}{r_2}$ و $\frac{1}{r_{2r}}$ – التقوس في المرحلة الثانية منسوبة لقيم العزم M و M_r $\frac{1}{r_{ts}}$ – عامل تأثر التقوس بالصلابة على الشد (M_{cr}/M) – نسبة عزم التشقق إلى العزم المطبق
Euro-code 2 **[16]**	قيمة السهم تساوي $\alpha=\xi\alpha_{II}+(1-\xi)\alpha_I$ (21-1) وفيها $\xi=1-\beta\left(\frac{M_{CR}}{M}\right)^2$ (22-1)	α_I – معامل التشوه في المرحلة الأولى بدون تشقق α_{II} – معامل التشوه في المرحلة الثانية المتشققة ξ – عامل يحسب من أجل الصلابة على الشد β – عامل يتعلق بديمومة الحمولة (=1 للحمولات قصيرة الأمد ، ويساوي 0.5 للحمولات طويلة الأمد) M_{cr} – عزم التشقق M – العزم المطبق في الإصدار الأخير من هذا الكود يسمى β بـ β_2 ويضرب بعامل أخر β_1 β_1 – عامل التماسك للقضبان (= 1 للقضبان قوية التماسك ، ويساوي 0.5 للقضبان الملساء)
ACI 318-95 **[4]**	يحسب السهم اعتماداً على قيمة عزم العطالة الفعلي للمقطع I_e $I_e=I_{cr}+(I_g-I_{cr})\left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3\le$ $\le I_g$ (23-1)	M_{cr} – عزم التشقق M_a – العزم المطبق I_g – قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق I_{cr} – قيمة عزم عطالة المقطع المتشقق
BSI 1985 **[14]**	قيمة السهم = a $\alpha=kl^2\left(1/r_b\right)$ (24-1)	l – الطول الفعلي لمجاز الجائز k – عامل يعتمد على شكل مخطط عزم الانعطاف $1/r_b$ – التقوس في وسط المجاز

1-3- الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP.

1-3 -1- خصائص قضبان التسليح FRP وأشكالها.

تتكون قضبان التسليح البوليميرية الليفية FRP من خليط من الألياف المستمرة والمواد اللاصقة، وتستعمل فيها عادة ألياف إما زجاجية GFRP أو آراميدية AFRP أو كربونية CFRP [26,3]، أما المواد اللاصقة فقد تكون البوليستر أو الفينول استير أو الابوكسي. مهمة الألياف تحمل القوى المطبقة على القضبان أما المواد اللاصقة فمهمتها نقل الإجهادات بين ألياف FRP وحمايتها من الوسط المحيط ومن التضرر الميكانيكي.

يشكل وزن اللاصق في القضبان من 0.25 إلى 0.5 من وزنها الكلي أما حجمه فيشكل من 0.5 إلى 0.7 من حجمها الكلي [27]. يلعب الشكل الخارجي لسطح قضبان FRP دوراً كبيراً في قدرة التماسك وتتوفر تجارياً أنواع كثيرة من القضبان بأسطح مختلفة مثل (المكسوة بالرمل . المضلعة . المسننة . المجدولة)، كما هو مبين في الشكل(1-12)، مع أنه لا توجد مواصفات محددة بخصوص خصائص السطح في أي كود عالمي.

الشكل(1-12) الأشكال المختلفة لقضبان الـ FRP واختلاف سطحها الخارجي [3].

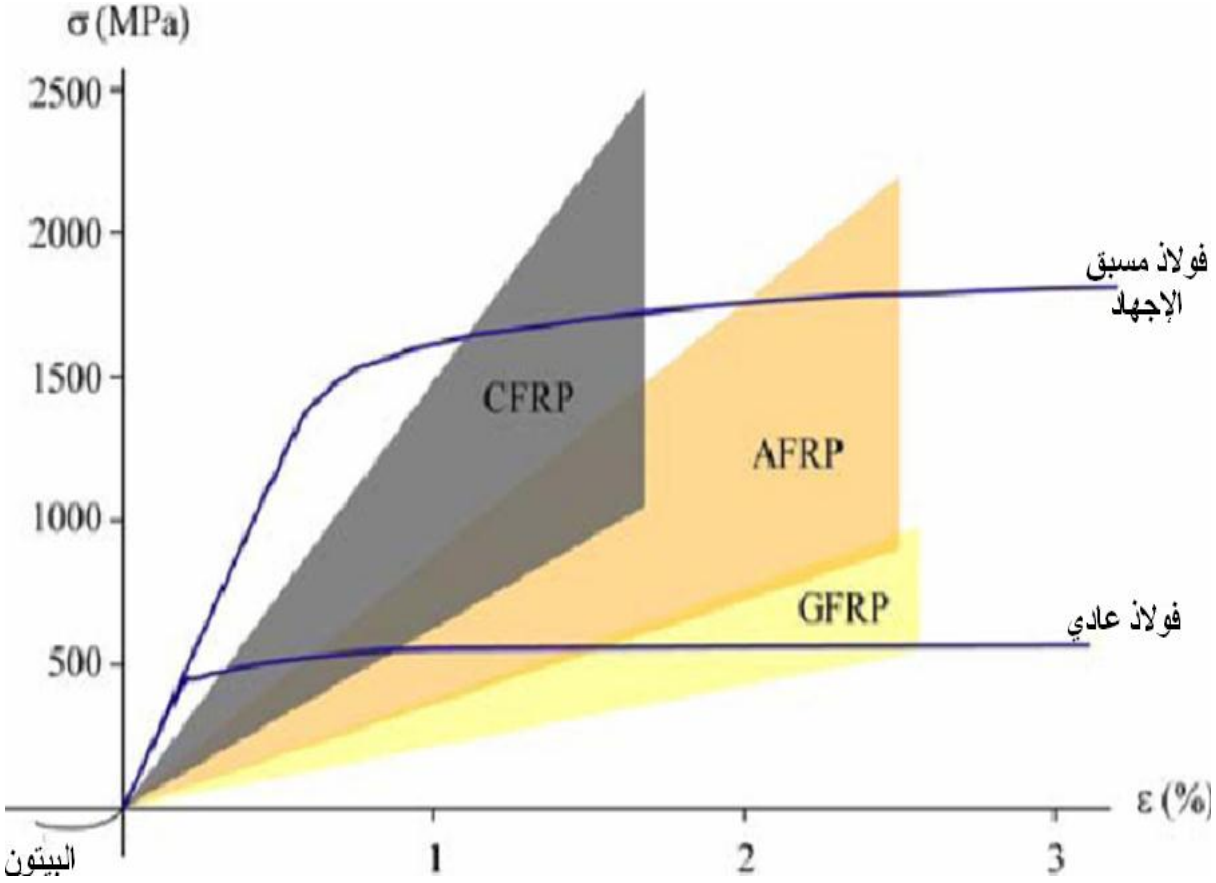
تبدي قضبان FRP سلوكاً خطياً للإجهاد . تشوه تحت تأثير الشد وصولاً إلى لحظة الانقطاع ويعتبر سلوكها قابلاً للتقصف المفاجئ لحظة الانقطاع مقارنةً مع الفولاذ المطاوع.

تتميز قضبان FRP بقدرة شد عالية، وانخفاض في معامل مرونتها، وتشوهها ضمن مجالٍ محدد. ويبين الجدول(1-3) والشكل(1-13) خصائص قضبان FRP والفولاذ على الشد، ويمكن القول أن

مواد الـ FRP عموماً، تعمل على الضغط والقص بشكلٍ أضعف مما تعمله على الشد والفتل، وهذا مثبت من خلال استخدامها في الصناعات الفضائية والجوية[3]. تبدي قضبان FRP خصائص ايجابية أخرى بالمقارنة مع الفولاذ، فهي لا تصدأ وهذا يجعلها بديلاً مثالياً في بعض المنشآت المتاخمة للبحر[27,21,12]، كما تبدي عازليه للكهرباء والمغنطة وهذا مهم في منشآت الاتصالات اللاسلكية والخلوية وغرف العناية المشددة والتصوير بالرنين المغناطيسي في المشافي نظراً لما يسببه الفولاذ من اضطرابات وتشويش إذا ما استخدم في تسليح عناصرها البيتونية [3]. يضاف إلى ذلك خفة وزنها وهذا يسهل نقلها ويسرع عملية التنفيذ والإنشاء. أما السلبية الأساسية لقضبان FRP فتتمثل بانخفاض معامل مرونتها وهذا يؤدي لحدوث تشوهات كبيرة في العناصر المسلحة بها، فالشقوق تصبح أعمق وأوسع وكذلك السهوم.

يغلب على عملية تصميم العناصر البيتونية المسلحة بقضبان FRP التقيد بالحمولات الاستثمارية، بينما في العناصر المسلحة بالفولاذ فيتم التصميم على الحمولات الحدية [26] .

إذا توجب التقيد بالطرق الحدية لتصميم العناصر المسلحة بـ FRP فالانهيار يكون هشاً وينتج إما عن انقطاع قضبان FRP أو تحطم للبيتون في منطقة الضغط . وتوجد سلبية أخرى وهي اختلاف قوة التماسك مع البيتون بحسب نوع منتج FRP .



الشكل(1-13) مقارنة لمخططات إجهاد . تشوه لكل من قضبان الفولاذ و GFRP و CFRP و AFRP عند العمل على الشد [3].

الجدول(1–3) مقارنة بين خصائص قضبان الفولاذ وقضبان الـ FRP [3].

الخصائص الميكانيكية	الفولاذ	GFRP	CFRP	AFRP
إجهاد الخضوع، MPa	من 276 إلى 517	--	--	--
إجهاد الشد الأعظمي، MPa	من483 إلى 690	من 483 إلى 1600	من600 إلى 3690	من1720 إلى 2540
معامل المرونة، GPa	200	من 35 إلى 51	من 60 إلى 200	من41 إلى 125
التشوه لحظة الخضوع، ‰	من 1.4 إلى 3.3	--	--	--
التشوه لحظة الانقطاع، ‰	من 6.0 إلى12.0	من1.2 إلى 3.5	من 0.5 إلى 3.1	من 1.9 إلى 4.4

1–3 –2– التماسك بين قضبان التسليح FRP والبيتون المحيط بها.

يتأثر سلوك العناصر البيتونية المسلحة بقضبان FRP بقوة التماسك بين هذه القضبان والبيتون، وبقدرة هذه القضبان على مقاومة القوى الشادة الناتجة عن الانعطاف. ويتم إجراء تجارب للتحقق من قوة التماسك مثل تجربة اقتلاع القضبان من البيتون وكذلك لمعرفة العلاقة بين التماسك والانزلاق بالإضافة لمعرفة طول الإرساء.

تتعلق قوة التماسك بين البيتون والقضبان بشكلٍ سطح قضبان الـ FRP و بقيمة معامل مرونتها. وبينت بعض التجارب المنجزة في البحث[3] أن المقطع المربع لقضبانFRP يعطي تماسكاً أفضل من المقطع الدائري، كما أن استعمال أقطار كبيرة يؤدي للتقليل من تماسكها مع البيتون مقارنةً مع الأقطار الصغيرة، وتساوي قوة تماسك قضبان GFRP وCFRP حوالي 72 % من قوة تماسك القضبان الفولاذية[3].

تجدر الإشارة إلى أن مقاومة البيتون ضد الانهيار بالتلاحم(التماسك) تتعلق بالكثير من العوامل نذكر منها:

1– مقاومة البيتون: تزداد قوة التماسك بازدياد مقاومة البيتون.

2– وضعية قضبان التسليح: التلاحم في القضبان ذات الوضع الشاقولي أكبر منها في القضبان بالاتجاه الأفقي.

3– موقع قضيب التسليح وسماكة التغطية.

4– درجة الرج في البيتون أثناء عملية الصب.

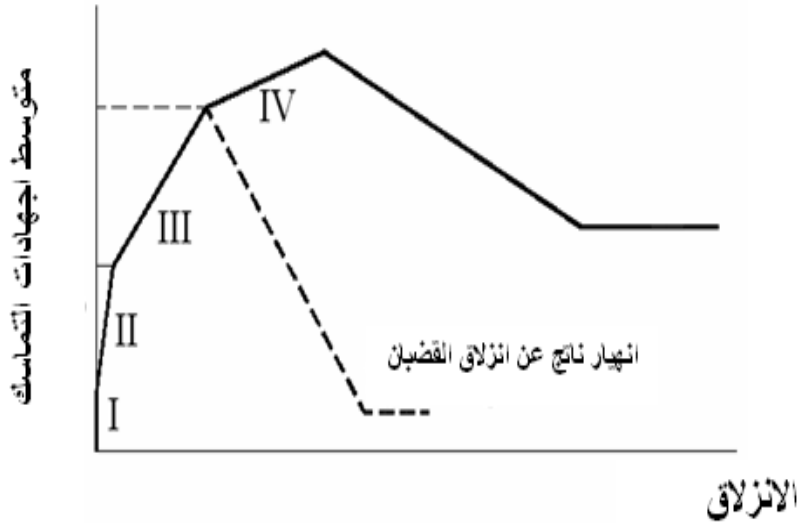
5– ظاهرة الانكماش في البيتون تولد ازدياد في قوة التلاحم، حيث تشكل قوى تطويق عرضانية تؤثر في الفولاذ وتزيد في مقاومة الاحتكاك، باعتبار أن الانكماش يولد اجهادات شد في البيتون، واجهادات ضغط في الفولاذ.

6- شكل المقطع العرضاني للقضيب الفولاذي: تمتاز القضبان الدائرية بقوة تلاحم أكبر من القضبان المربعة أو المستطيلة.

7- طبيعة سطح القضبان الفولاذية ووجود النتوءات بالنسبة للقضبان عالية التلاحم.

8- التسليح العرضاني للمقطع يؤدي إلى زيادة قوى التلاحم لقضبان التسليح الطولي.

يشرح الكود FIB1999 [20] تماسك قضبان FRP مع البيتون من خلال المنحني المبين بالشكل(1-14) وهو منحني تماسك . انزلاق، فحتى نهاية المرحلة III يكون التماسك مماثلاً لتماسك الفولاذ. وتعتبر مسألة تطوير كودات واشتراطات بخصوص تماسك قضبان FRP غاية في التعقيد وذلك بسبب التنوع الكبير لمكونات الألياف واللاصق وأشكال هذه القضبان[3,2].



الشكل(1-14) علاقة التماسك والانزلاق لقضبان FRP [20] .

1-3 -3- مقارنة بين طرائق حساب السهم وعرض الشق في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان FRP.

يبين الجدول(1-4) مقارنة لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP بتقريبات وكودات مختلفة وهي: ACI 440.1R -03 [5]، ACI[7] 440.1R -06 ، IStructE [24] ، وقد تم وضع العلاقات الرياضية اللازمة لحساب عرض الشق والمسافة بين الشقوق وفق كل تقريب كما مبين في العلاقات من (1-25) إلى (1-27). كما نظم في نفس الجدول شرح للعوامل الداخلة في كل علاقة رياضية.

يبين الجدول(1-5) مقارنةً لطرائق حساب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية بتقريبات وكودات مختلفة وهي: Benmokrane 1996 [12]، Masmoudi1998 [29]، Toutanji 1999 [36] ، ACI 440.1R -03 [5] ، ACI 440.1R -06 [7]، IStructE [24]، وقد تم وضع العلاقات الرياضية اللازمة لحساب السهم وفق كل تقريب كما مبين في العلاقات من (1-28) إلى (1-36). كما نظم في نفس الجدول شرح للعوامل الداخلة في كل علاقة رياضية.

الجدول(1–4) مقارنة لطرائق حساب عرض التشققات في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP بتقريبات وكودات مختلفة.

اسم الكود	العلاقات المستخدمة لحساب عرض الشقوق والمسافة بينها	شرح لمختلف العوامل الداخلة في العلاقات
ACI 440.1R -03 [5] ACI 440.1R -06 [7]	**يحسب عرض الشق اعتماداً على تقريب Gergley-Lutz المعدل** $w = \frac{2.2}{E_f}\beta k_b f_f \sqrt[3]{d_c A}$ (25-1) **وفي الإصدار الحديث للكود ACI 440.1R -06 يقترح الباحث Forsch التقريب التالي:** $w = 2\frac{f_f}{E_f}\beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$ (26-1)	k_b – عامل يتعلق بالتماسك بين قضبان FRP والبيتون ويجب أن يحدد تجريبياً (k_b =1 إذا كان التماسك مشابه للفولاذ، و k_b < 1 إذا كان أقل من الفولاذ)والعكس بالعكس : (k_b = 1.2 إذا لم تتوفر معطيات عنه بحسب ACI 440.1R -03 [5]) (k_b = 1.4 إذا لم تتوفر معطيات عنه بحسب ACI 440.1R -06 [7]) d_c – سماكة طبقة التغطية من طرف المقطع المشدود وحتى مركز القضبان السفلية s – التباعد بين قضبان الـ FRP β – نسبة المسافة بين المحور الحيادي والطرف المشدود إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز قضبان التسليح السفلية $\frac{f_f}{E_f}$ – التشوه في قضبان الـ FRP E_f – معامل مرونة قضبان الـ FRP
IStruc-tE [24]	**يعتمد على نفس التقريب الموجود في BSI 1985 [14] الخاص بالعناصر المسلحة بالفولاذ ولكن يقترح ضرب عرض التشققات بعامل تصعيد 1.2 =** $w_{cr} = 1.2\left(\frac{3a_{cr}\varepsilon_m}{1+2\left(\frac{a_{cr}-c_{\min}}{h-x}\right)}\right)$ (27-1)	w_{cr} – عرض الشق الأعظمي في النقطة المدروسة a_{cr} – المسافة بين النقطة المدروسة وسطح قضيب التسليح الأقرب $c_{\min}$ – سماكة طبقة التغطية الأصغرية h – الارتفاع الكلي لمقطع الجائز x – ارتفاع المحور الحيادي للمقطع ε_m – متوسط قيمة التشوه عند مستوى النقطة المدروسة

الجدول(1-5) مقارنة لطرائق حساب السهوم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP بتقريبات وكودات مختلفة.

اسم الكود أو التقريب	العلاقات المستخدمة لحساب السهوم	شرح لمختلف العوامل الداخلة في العلاقات
تقريب Benmo-krane 1996 [12]	يحسب السهم اعتماداً على قيمة عزم العطالة الفعلي للمقطع I_e والموجودة في الكود ACI 318 [4]ويقترح العلاقة التالية لحسابه $I_e = \alpha I_{cr} + \left(\frac{I_g}{\beta} - \alpha I_{cr}\right)\left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3$ (28-1)	M_{cr} – عزم التشقق، I_{cr} – قيمة عزم عطالة المقطع المتشقق M_a – العزم المطبق، I_g – قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق α – عامل تساوي قيمته 0.84 ، β – عامل تساوي قيمته 7
تقريب Masm-oudi 1998 [29]	يحسب السهم اعتماداً على قيمة عزم العطالة الفعلي للمقطع I_e والموجودة في الكود ACI 318 [4]ويقترح العلاقة التالية لحسابه $I_e = I_{cr} + \left(\beta I_g - I_{cr}\right)\left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3$ (29-1)	M_{cr} – عزم التشقق، I_{cr} – قيمة عزم عطالة المقطع المتشقق M_a – العزم المطبق، I_g – قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق β – عامل تساوي قيمته 0.6
تقريب Tout-anji 1999 [36]	يحسب السهم اعتماداً على قيمة عزم العطالة الفعلي للمقطع I_e والموجودة في الكود ACI 318 [4]الخاصة بالتسليح بالفولاذ ويقترح العلاقة التالية لحسابه $I_e = I_{cr} + \left(I_g - I_{cr}\right)\left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^m$ (30-1)	m – عامل متغير يتعلق بنسبة التسليح ومعامل مرونة الـ FRP ويحسب كما يلي: $m = 6 - \frac{10E_f}{E_s}\rho_f$ for $\frac{E_f}{E_S}\rho_f < 0.3$ $m = 3$ for $\frac{E_f}{E_S}\rho_f \geq 0.3$ ρ_f – نسبة التسليح بقضبان FRP ، E_f – معامل مرونة قضبان الـ FRP ، E_s – معامل مرونة الفولاذ.
ACI 440.1R-03 [5] ACI 440.1R-06 [7]	يحسب السهم اعتماداً على قيمة عزم العطالة الفعلي للمقطع I_e $I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$ (31-1) حيث قيمة β_d في الكود 440.1R-03 [5] تساوي $\beta_d = \alpha_b\left[\frac{E_f}{E_s} + 1\right]$ (32-1) و قيمة β_d في الكود 440.1R-06 [7] تساوي $\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)$ (33-1)	α_b – عامل يتعلق بتماسك القضبان مع البيتون المحيط (وهو يساوي 0.5 للقضبان الفولاذية ، ويساوي 0.5 لقضبان FRP ولكن يحتاج لدراسة معمقة) β_d – عامل يتعلق بنسبة التسليح بـ FRP إلى نسبة التسليح المتوازنة ρ_f – نسبة التسليح بـ FRP حيث: $\rho_f = \frac{A_f}{bd}$ (34-1) وفيها (A_f ، b ، d) هي بالتتالي: مساحة مقطع قضبان التسليح ، عرض الجائز ، الارتفاع الفعال للجائز. ρ_{fb} – نسبة التسليح المتوازنة وتحسب وفق الكود ACI [7]بالعلاقة $\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$ (35-1) حيث:(β_1 ، f_c ، f_{fu} ، ε_{cu}) هي بالتتالي: نسبة ارتفاع كتلة البيتون المضغوط إلى ارتفاع المحور الحيادي في المقطع، مقاومة البيتون على الضغط ، مقاومة القضبان على الشد ، قيمة التشوه العظمى في القضبان وتساوي 0.003. أما في الكود Eurocode 2 [16] فتحسب بالعلاقة $\rho_{fb} = \frac{0.81(f_{ck} + 8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk}\left(\frac{f_{fk}}{E_f} + \varepsilon_{cu}\right)}$ (36-1) حيث: (f_{ck} ، f_{fk}) هي بالتتالي: مقاومة البيتون على الضغط ، مقاومة قضبان التسليح على الشد.

1-4- الدراسات والأبحاث السابقة في دراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية أو قضبانFRP.

1-4-1- مقدمة.

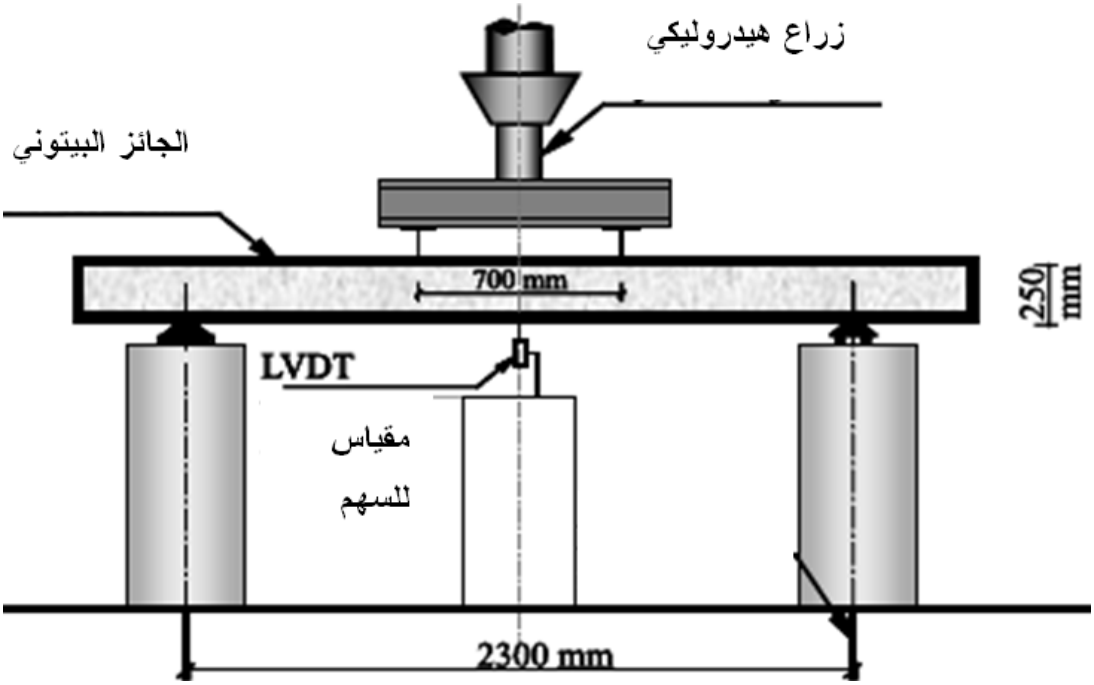
يعتبر صدأ فولاذ التسليح مشكلة خطيرة بالنسبة لديمومة المنشآت البيتونية المسلحة, وقد تركزت الجهود والأبحاث التي أنجزت مؤخراً الضوء على ابتكار مواد تسليح لا معدنية للاستخدام في الصناعة الإنشائية. وظهور الألياف البوليميرية FRP هي نتاج هذه الجهود والتطويرات في مجال الصناعات البلاستيكية والمواد المختلطة الليفية. وهناك قدر كبير من الأعمال البحثية للتحقق من فاعلية استخدام قضبان FRP في تسليح البيتون ونتيجة لذلك فإن استخدامها يزداد عاماً بعد عام كمادة تسليح للبيتون، وذلك بسبب مقاومتها الممتازة للصدأ ومقاومتها العالية على الشد وخصائص أخرى كعازليتها للكهرباء والمغنطة. وتتميز هذه المواد المركبة المتطورة بانخفاض معامل مرونتها وخطية العلاقة بين الإجهاد والتشوه وصولاً إلى لحظة الانقطاع, كما أن قوة التماسك بين هذه المواد والبيتون تختلف بحسب نوع قضبان الـ FRP المستخدمة. وقد بينت أبحاث كثيرة أن تصميم العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الـ FRP يتم على أساس حمولات استثمارية مع مراعاة تحقيق السهوم والتشققات.

1-4-2- تحديد مقدار السهم في العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف البوليميرية FRP وفق كودات مختلفة[1].

Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars [1].

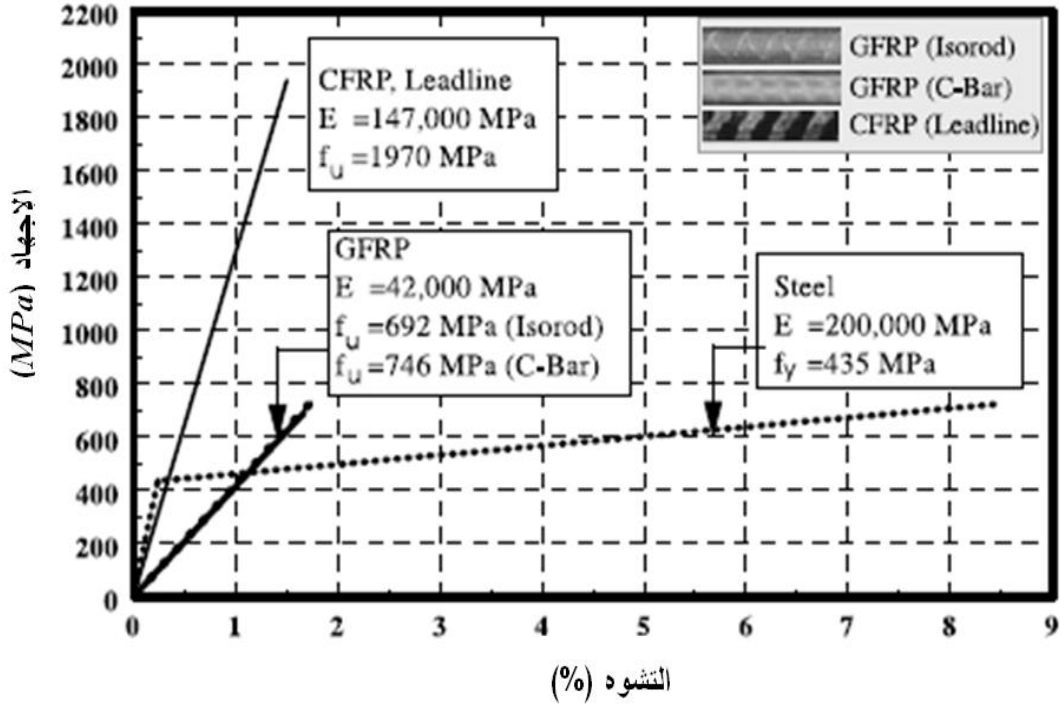
إن الهدف من البرنامج التجريبي المقدم في هذا البحث دراسة أداء العناصر البيتونية المسلحة بقضبان من الـFRP على الانعطاف وصولاً إلى الانهيار, ويشمل البرنامج دراسة السهوم وقدرة التحمل القصوى بالإضافة إلى أشكال الشقوق وأشكال الانهيار.

تم في هذه الدراسة اختبار سبعة جوائز بعضها مسلح بقضبان من الألياف الزجاجية GFRP، والبعض الآخر مسلح بقضبان من الألياف الكربونية CFRP, حيث أبعاد المقطع العرضي (250×500) mm والطول الصافي للمجاز 2300mm، أما التغطية البيتونية فتساوي 38mm في جميع الجوائز. واستخدمت أساور فولاذية بقطر $\phi=9.5$mm وتباعد 400mm على طول الجوائز المختبرة. والجوائز بسيطة الاستناد محملة بحمولتين مركزتين والتحميل استاتيكي وفق الشكل(1-15).



الشكل (1–15) رسم توضيحي لطريقة الاختبار في الدراسة [1].

يبين الشكل(1-16) علاقة إجهاد – تشوه لقضبان التسليح الفولاذية والـFRP المستخدمة في البرنامج التجريبي, وتشمل قضبان زجاجية GFRP من نوع (Isorod), وقضبان زجاجية أخرى مسماة (C-bar), وقضبان كربونية (Leadline), بالإضافة لقضبان فولاذية تقليدية.



الشكل(1-16) علاقة إجهاد– تشوه لقضبان التسليح الفولاذية والـFRP في الدراسة [1].

تم تصنيع قضبان الـ GFRP نوع (Isorod) عن طريق شد ألياف زجاجية نوع E ومعالجتها حرارياً بلاصق بوليستيري، ولتحسين خصائص الالتحام تم لف سطحها بألياف زجاجية على شكل حلزوني وغطيت بمزيج من الرمل واللاصق البوليستيري. أما قضبان الـGFRP من نوع (C - bar) فتم تصنيعها

بطريقة الشد لأربعة أنواع من الألياف المختلفة وهي(زجاجية نوع E وتسمى النوع الأول, وكربونية وتسمى النوع الثاني، وآراميدية وتسمى النوع الثالث، وهجينة زجاج وكربون وتسمى النوع الرابع)، أما النوع الأول فتم تصنيع صنفين منه يختلفان بحسب سطح القضبان، وهذان الصنفان هما A وB حيث استخدم في هذه الدراسة الصنف B.

تم تصنيع القضبان CFRP المسماة (Leadline) عن طريق شد الألياف الكربونية المستمرة وإشباعها بلاصق ايبوكسي, حيث كانت قضبان الـGFRP أقل قدرة على الشد من بقية أنواع الـFRP, غير أنها كانت الأرخص ثمناً والأكثر مقاومةً للصدأ والمغنطة، وتميزت بارتفاع نسبة مقاومتها إلى وزنها، وتراوحت مقاومة البيتون الأسطوانية على الضغط بين MPa (30-35) وقت الاختبار, وإجهاد الخضوع لفولاذ التسليح $f_y = 435\text{MPa}$, ويبين الجدول(1-6) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة.

الجدول(1-6) تفاصيل الجوائز المختبرة في الدراسة [1].

اسم العينات	نوع قضبان التسليح	الأبعاد الهندسية		ρ (%)	ρ/ρ_b
		b	t		
I,4	**GFRP(Isorod)**	**500**	**250**	**0.38**	**0.78**
I,6	**GFRP(Isorod)**	**500**	**250**	**0.63**	**1.26**
II,5	**GFRP(Isorod)**	**500**	**250**	**1.52**	**3.00**
C,4	**GFRP(C-bar)**	**500**	**250**	**0.45**	**1.05**
C,8	**GFRP(C-bar)**	**500**	**250**	**0.88**	**2.05**
L,2	**CFRP(Leadline)**	**500**	**250**	**0.20**	**0.95**
L,4	**CFRP(Leadline)**	**500**	**250**	**0.47**	**2.24**

لكل نوع من الجوائز نسبتي تسليح عالية ومنخفضة, وتم تحديد نسبة التسليح التوازنية ρ_b من شرط التوازن والانسجام وباستخدام منطقة ضغط مستطيلة مكافئة في المقطع البيتوني وفق العلاقة التالية:

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f_c'}{f_u}\frac{0.003E_{\text{f}}}{0.003E_{\text{f}} + f_u} \qquad (37\text{-}1)$$

حيث:

$\rho_b = \frac{A_{\text{fb}}}{bd}$ وفيها: A_{fb} – مساحة قضبان الـFRP المشدودة في المقطع التوازني(mm^2), b – عرض المقطع (mm).

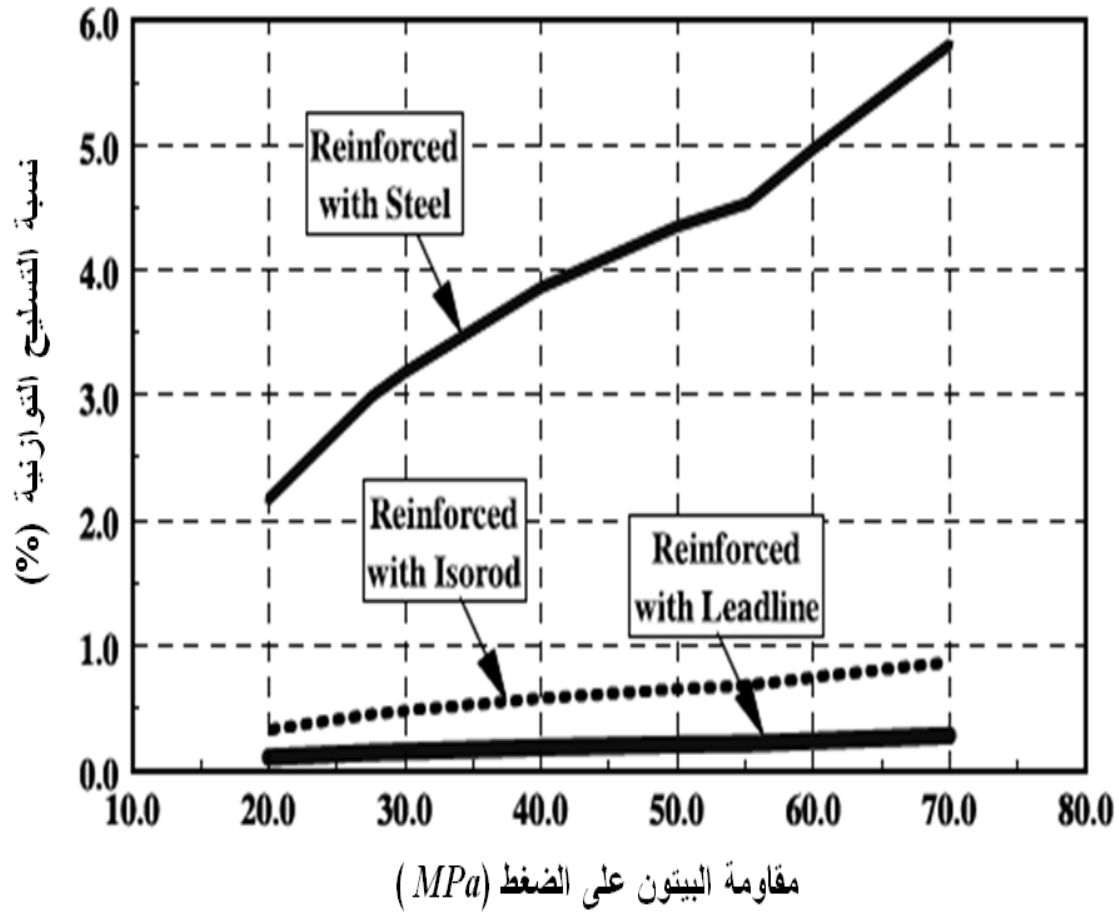
d – الارتفاع الفعال للمقطع (mm), f_c' – مقاومة البيتون على الضغط (MPa), f_u – إجهاد الانقطاع في قضبان الـFRP (MPa).

E_{f} – معامل مرونة قضبان الـFRP (MPa).

β_1 – نسبة عمق منطقة الضغط المستطيلة المكافئة البيتونية إلى عمق المحور الحيادي، وتؤخذ هذه النسبة بحسب الكود ACI وبوحدات عالمية (SI) كما يلي:

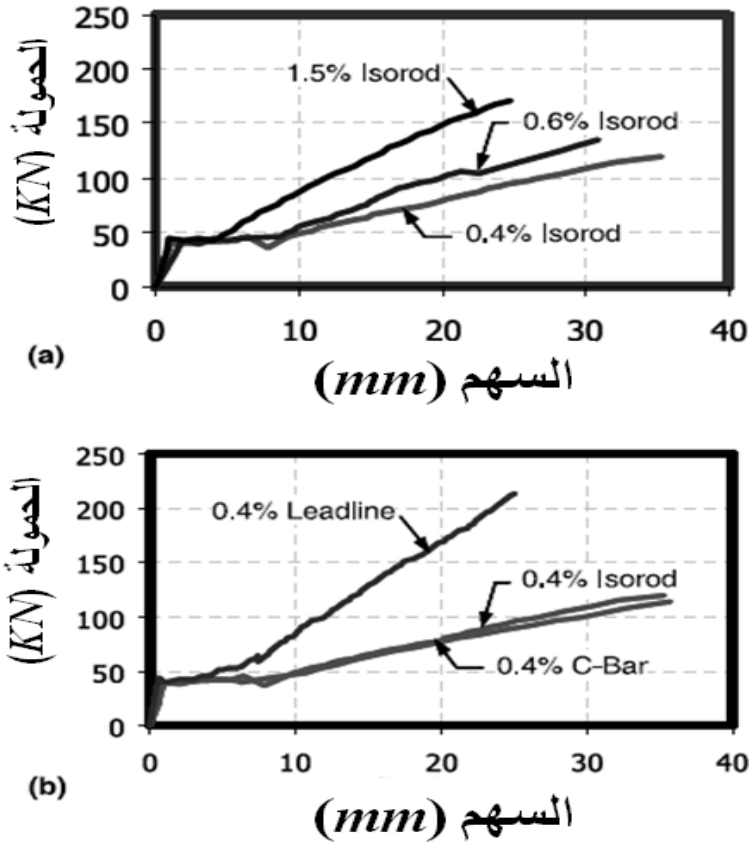
$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\left(\frac{f_c' - 27.6}{6.7}\right) \qquad (38\text{-}1)$$

تشير الدراسة إلى أن نسبة التسليح التوازنية للمقاطع البيتونية المسلحة بالـFRP أصغر من النسبة التوازنية للمقاطع المسلحة بالفولاذ، وهذا يعود إلى المقاومة العالية لقضبان الـFRP على الشد وانخفاض معامل مرونتها كما هو مبين في الشكل(1-17) .



الشكل(1-17) نسب التسليح التوازنية للمقاطع المسلحة بـGFRP و CFRP والفولاذ في الدراسة [1].

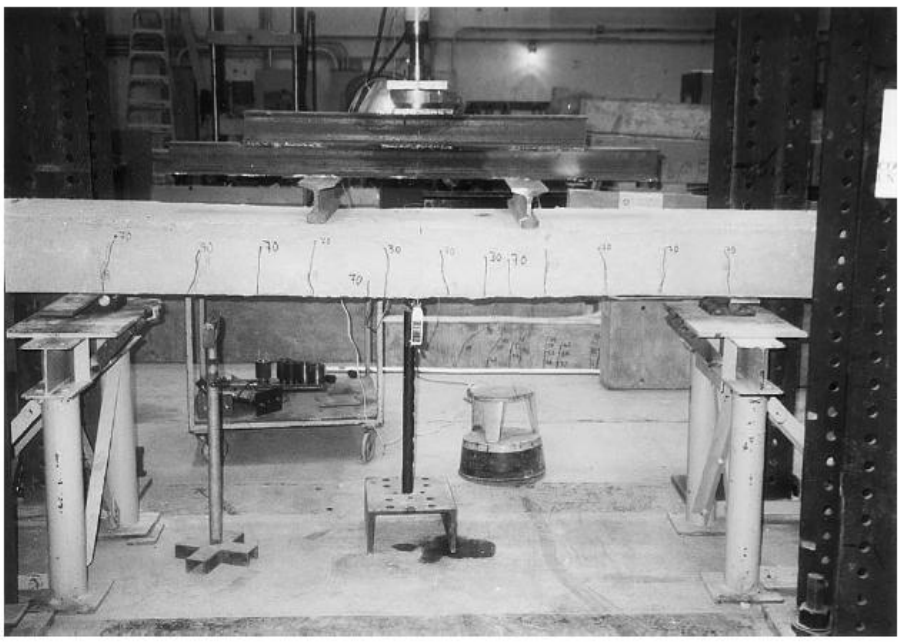
يبين الشكل(1-18) منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المختبرة بنسب تسليح مختلفة من الـFRP, حيث لوحظ أن الجوائز سلكت سلوكاً خطياً حتى حصول التشقق. وبعد ذلك تبين أن منحني (حمولة – سهم) يصبح ثنائي الخطية مع انخفاض الصلابة. والشكل(1-18,a) يبين نتائج مقارنة سلوك الجوائز I1.5 , I.6 , I.4 المسلحة بـGFRP نوع (Isorod)، ومنه يلاحظ أنه بزيادة نسبة التسليح تنخفض بشكلٍ كبير قيمة السهم بعد حصول الشق الأول. ويبين الشكل (1-18,b) منحنيات (حمولة- سهم) للجوائز I.4 , C.4 , L.4 المسلحة بنسبة التسليح 0.4% والمستخدم فيها قضبان من نوع (Isorod) و(C-bar) و(Leadline) ومن مقارنة النتائج وجد أن الجوائز المسلحة بـGFRP تبدي انخفاضاً مهماً في صلابتها بعد حصول الشق الأول مقارنة مع الجوائز المسلحة بـCFRP. وهذا يعود إلى انخفاض معامل مرونة قضبان الـGFRP بالمقارنة مع قضبان الـCFRP , فمعامل مرونة GFRP يؤثر على تشكل الشقوق. وعند انخفاض الصلابة على الشد في البيتون الواقع بين الشقوق ينخفض عزم العطالة الفعال وبالتالي تزداد قيمة السهم.



الشكل(1-18) منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المختبرة في الدراسة [1]

a– تأثير نسبة التسليح، b– تأثير نوع التسليح .

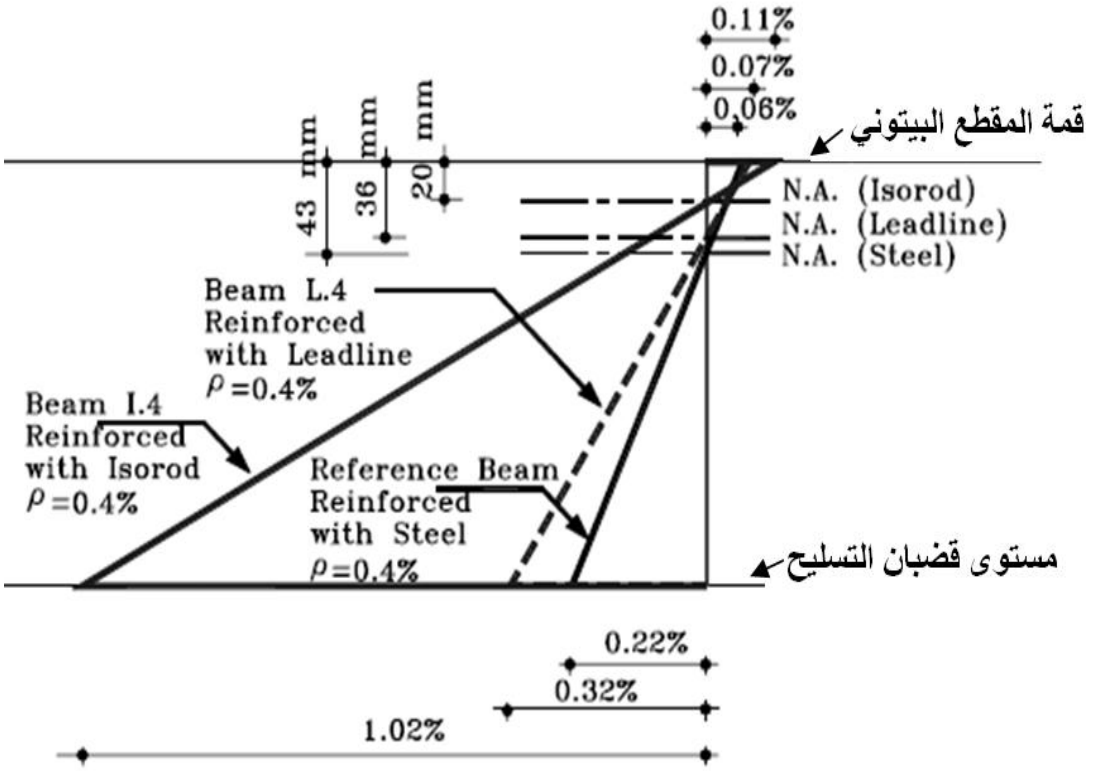
يبين الشكل (1-19) شكل الشقوق في الجائز I.6 المسلح بـ 0.6% قضبان نوع (Isorod), ويبين الشكل(1-20) الشقوق في الجائز I.4 المسلح بـ 0.4% قضبان نوع (Isorod).



الشكل(1-19) شكل الشقوق في الجائز I.6 المسلح بقضبان نوع (Isorod) [1].

الشكل(1-20) انهيار الجائز I.4 المسلح بقضبان (Isorod) [1].

يبين الشكل (1-21) مقارنة القيم التجريبية للتشوه عند الحمولة (80KN) في الجائز I.4 المسلح بـGFRP والجائز L.4 المسلح بـCFRP نوع (Leadline), والتشوه المحسوب نظرياً في الجائز المرجعي المسلح بالفولاذ بنسبة التسليح 0.4%. وتبين النتائج أنه عند نفس الحمولات تكون قيمة التشوهات والسهوم في الجوائز المسلحة بـ GFRP أكبر مما هي عليه في الجوائز المسلحة بـCFRP, كما أن عمق منطقة الضغط في مقطع الجوائز المسلحة بـGFRP أصغر مما هو عليه في الجوائز المسلحة بـCFRP, فالجائز C.4 المسلح بـ(C-bar) يعطي نتائج مشابهة لحالة الجائز I.4 من نوع (Isorod).



الشكل(1-21) توزع التشوهات في الجوائز المسلحة بقضبان الـFRP حيث $\rho = 0.4\%$ [1].

اعتمدت الدراسة عدة موديلات مفصلة لحساب الصلابة على الشد بالانحناء في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP وهي:

1-4-2-1- الموديل الحسابي وفق الكود ACI -440.1R-06 [7].

يحسب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP باستخدام علاقات الكود ACI -440 [7] التي يعتمد فيها حساب السهم تحت تأثير حمولات استثمارية على عزم العطالة الفعال I_e الذي يعطى بالعلاقة التالية:

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3 \beta_d\, I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (39\text{-}1)$$

$$\beta_d = \alpha_b\left[\frac{E_{\mathrm{f}}}{E_s}+1\right] \qquad (40\text{-}1)$$

حيث:

α_b- عامل يساوي 0.5 وهو عامل الالتحام بين القضبان والبيتون (من أجل جميع أنواع القضبان الفولاذية والـFRP)، وهو يأخذ بعين الاعتبار خصائص الالتحام وعامل مرونة قضبان الـFRP، E_{f}- عامل مرونة قضبان الـFRP, E_s- عامل مرونة القضبان الفولاذية، M_{cr}- العزم المسبب للتشقق، M_a- العزم المطبق، I_{cr}- عزم عطالة المقطع المتشقق ، I_g- قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق، β_d- عامل يتعلق بنسبة التسليح بـ FRP إلى نسبة التسليح المتوازنة.

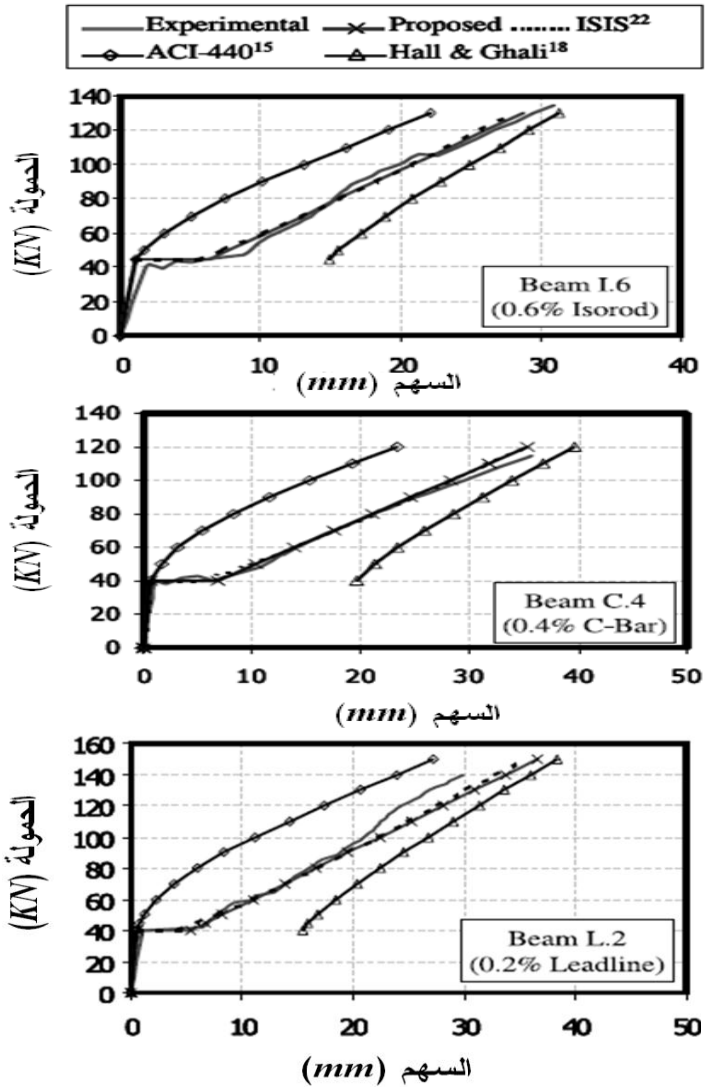
إن قيمة السهم الناتج عن حمولات دائمة $\Delta_{(\mathrm{cp+sh})}$ في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP يحدد بعلاقة الكود ACI -440 كما يلي:

$$\Delta_{(\mathrm{cp+sh})} = \delta\xi\,\Delta_{(\mathrm{in})} \qquad (41\text{-}1)$$

حيث:

$\Delta_{(\mathrm{in})}$- السهم الأولي, ξ- هو عامل يتعلق بزمن التحميل ويساوي (1.74) لحمولة تدوم (12) شهراً, و يساوي (2) لحمولة تدوم عشر سنوات, δ- هو عامل يساوي (0.46) من أجل قضبان AFRP و GFRP، ويساوي (0.53) من أجل قضبان CFRP, ويمكن أن يأخذ قيمة (0.6) مع بعض التحفظ في التصميم.

ويبين الشكل(1-22) مقارنةً لقيم السهم المحسوب تحليلياً باستخدام العلاقتين (1-40) و(1-41) مع القيم التجريبية, حيث توصلت الدراسة إلى أن السهم المحسوب اعتماداً على علاقات الكود ACI -440 أقل من السهم المحدد تجريبياً وخاصة في الجوائز المسلحة بـGFRP وذلك عند حمولات تزيد عن حمولات التشقق.



الشكل(1–22) منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً للجوائز المسلحة بقضبان الـFRP [1].

1–4–2–2– الموديل الحسابي للباحثين Hall و Ghali [1].

قدم الباحثان موديلاً رياضياً للتنبؤ بقيمة السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بـGFRP وفكرة الموديل هي إجراء تكامل للتقوسات الأساسية عند عدد من المقاطع وعلى طول العنصر وذلك لتحديد السهم وسط المجاز, وبالاعتماد على المعادلة التفاضلية للخط المرن، يمكن حساب التقوس ψ_m في أي مقطع من الجائز وفق العلاقة التالية:

$$\psi_m = \frac{d^2y}{dx^2} = y'' = \frac{M}{EI_m} \qquad (42\text{-}1)$$

حيث:

M– العزم المطبق على المقطع , E–عامل المرونة، I_m– عزم العطالة الأساسي ويحسب بالعلاقة التالية:

$$I_m = \frac{I_1 I_2}{\left[I_1 + \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 (I_2 - I_1) \right]} \qquad (43\text{-}1)$$

حيث:

I_1 – عزم عطالة المقطع غير المتشقق, I_2 – عزم عطالة المقطع المتشقق، β_1 – عامل يتعلق بجودة التلاحم بين القضبان والبيتون ويساوي (1) للقضبان المحلزنة و(0.5) للقضبان الملساء.

β_2 – عامل يتعلق بطول مدة تطبيق الحمولة أو تكرارها ويساوي (0.8) لحالة التحميل الأولى و(0.5) للحمولات الدورية، وهذه القيم مأخوذة من الكود CEB-FIP [15]. وللتبسيط اقترح الباحثان Hall و Ghali حساب السهم وسط المجاز اعتماداً على التقوس في المقطع الأوسط, وحسب السهم في الجوائز اعتماداً على هذه العلاقة.

تمت مقارنة النتائج مع القيم التجريبية كما هو مبين في الشكل(1–22), حيث تبين النتائج أن حساب السهم دون إجراء التكامل للتقوس في مقاطع عديدة يؤدي إلى الحصول على قيم أكبر من القيم التجريبية.

1–4–2–3– الموديل الحسابي الكندي ISIS [23].

يقترح الكود الكندي طريقة يدوية لحساب السهم اعتماداً على عزم العطالة الفعال في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP وفق العلاقة التالية:

$$I_e = \frac{I_g I_{cr}}{I_{cr} + \left[1 - 0.5\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right]\left(I_g - I_{cr}\right)} \qquad (44\text{-}1)$$

وقد أظهرت النتائج المحسوبة وفق الكود ISIS [23] توافقاً جيداً مع النتائج التجريبية.

1–4–2–4– الموديل الحسابي المقترح من قبل الباحثين Favre وCharif [1].

قدم الباحثان Favre و Charif طريقة لحساب السهم اعتماداً على الموديل المعروض في الكود CEB-FIP [15] والخاص بالعناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ, حيث يحسب السهم Δ وفق العلاقة التالية:

$$\Delta = \Delta_2 - \left(\Delta_2 - \Delta_1\right)\cdot \beta' \cdot \frac{M_{cr}}{M_a} \qquad (45\text{-}1)$$

وفيها:

Δ_1 – قيمة السهم من أجل الانعطاف البسيط حيث لا توجد تشققات, Δ_2 – قيمة السهم في حالة وجود مقاطع متشققة.

والعامل β' يساوي $\beta_1 \cdot \beta_2$.

اقترح الباحثان تبسيط العلاقة (1–45) من أجل العناصر البيتونية المسلحة بـFRP عن طريق تعويض عزم العطالة الفعال المستخدم في حالة عدم حصول تشققات بعزم عطالة المقطع I_g مع إهمال عطالة

التسليح, وذلك بسبب انخفاض عامل المرونة لقضبان الـFRP, كما أن العامل β' يؤخذ مساوياً (0.5) لجميع الحالات العملية وهذا ما اقترحه أيضا الباحث Ghali [1]، لذلك تمت إعادة كتابة العلاقة (1−45) كما يلي:

$$\Delta = \frac{KL^2}{E_c}\left(\frac{0.5M_{\text{cr}}}{I_{\text{g}}} + \frac{M_{\text{a}} - 0.5M_{\text{cr}}}{I_{\text{cr}}}\right) \qquad (46\text{-}1)$$

حيث:

K − عامل يعتمد على طبيعة التحميل وعلى الشروط الطرفية في العنصر ويحدد من تحليل المرونة.

L − طول مجاز العنصر, E_c −عامل مرونة البيتون.

وبالتالي لحساب الانخفاض الحاصل في الصلابة على الشد بالانحناء عند المقاطع البيتونية المسلحة بـFRP الكاملة التشقق يتوجب ضرب الحد الثاني في الجانب الأيمن من العلاقة (1−46) بعامل يساوي ($\frac{1}{0.85}$) وبذلك يحسب السهم في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP وفق العلاقة التالية:

$$\Delta = \frac{KL^2}{E_c}\frac{M_{\text{a}}}{I_{\text{e}}} \qquad (47\text{-}1)$$

حيث:

$$I_{\text{e}} = \frac{I_{\text{g}} I_{\text{cr}}}{I_{\text{cr}}\zeta + 1.15I_{\text{g}}(1-\zeta)} \qquad (48\text{-}1)$$

وفيها:

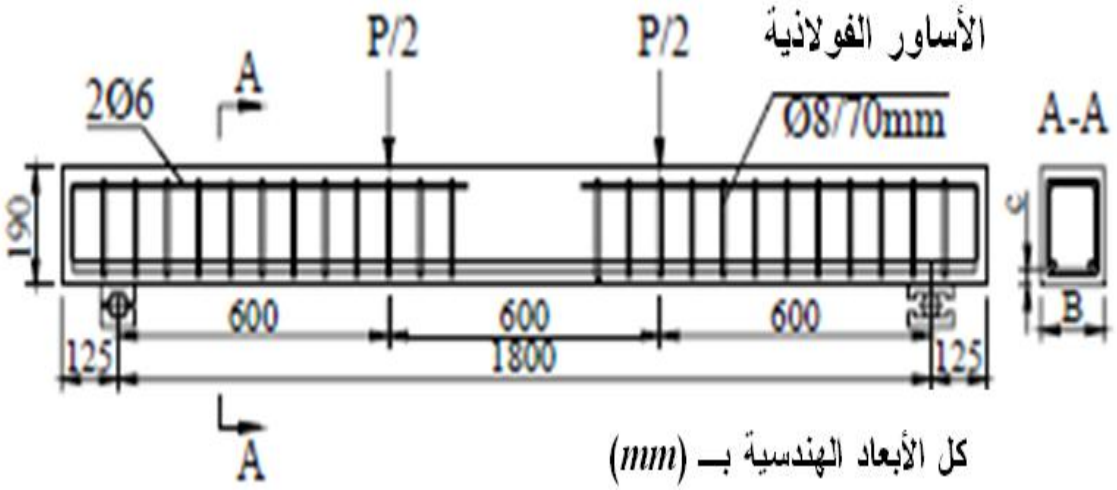
$$\zeta = \frac{0.5M_{\text{cr}}}{M_{\text{a}}} \qquad (49\text{-}1)$$

وتشير الدراسة إلى أنه عند حساب السهم وفق العلاقات (1−47) و(1−48) و(1−49), ومقارنته مع القيم المقاسة تجريبياً لوحظ أن الطريقة المقترحة للتنبؤ بالسهم في العناصر البيتونية المسلحة بـFRP تعطي قيماً أكبر للسهم [1].

1−4−3− دراسة تجريبية حول السلوك الانعطافي للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان *GFRP* ومقارنة نتائجها مع نتائج موديلات أخرى[11].

An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison it's results with prediction models [11].

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تغير نسبة التسليح وتأثير نسبة عمق القضبان إلى ارتفاع المقطع وذلك في ستة أزواج من الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـGFRP, والشكل(1−23) يبين التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة، حيث عرض الجوائز B متغير. تم تسليح مجال القص بشكلٍ كاف من الأساور الفولاذية لمنع حصول انهيار على القص, أما في منطقة العزم الصافي فلم تستخدم أساور عرضية حتى لا تؤثر على تطور التشققات في هذه المنطقة.



الشكل (1−23) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة [11].

تم استخدام قضيبين فولاذيين 2Φ6mm للتسليح العلوي في منطقة القص, واستخدمت ثلاث نسب مختلفة للتسليح توافق ما يلي:(2Ø12,2Ø16,3Ø16), وكذلك نسبتين مختلفتين لعمق القضبان إلى ارتفاع المقطع وهي (0.86 , 0.75), وتم تغيير عرض الجوائز للمحافظة على نسب تسليح بالتتالي (2,66% , 1.77 , 0.99). وصبت الجوائز على شكل أزواج (كل زوج مكون من جائز a و جائز b), حيث لها نفس مقاومة البيتون على الضغط 50MPa.

حضرت العينة a بشكلٍ طبيعي بدون تشقق مسبق, أما في العينة b فقد تم إحداث شق مسبق في وسطها لتامين حدوث تشقق في ذلك الموضع ولتسهيل وضع أجهزة قياس التشوه في هذه المنطقة, وأحدث الشق المسبق بوضع صفيحة فولاذية مستطيلة الشكل بعرض 1mm في القالب قبل إجراء عملية الصب. وسميت العينات بحروف كما يلي: (C-wyz-Dx)، تعبر الحروف wyz عن كمية التسليح (على سبيل المثال 2Φ12mm تكتب 212), أما الحرف x فيعبر عن سماكة طبقة التغطية (D1 يعني أن سماكة طبقة التغطية 20mm و D2 يعني أن سماكة طبقة التغطية 40mm), ويبين الجدول(1-7) الأبعاد الهندسية ونسب التسليح, أما النتائج المتعلقة بالخصائص الميكانيكية للبيتون فهي موضحة في الجدول (1−8).

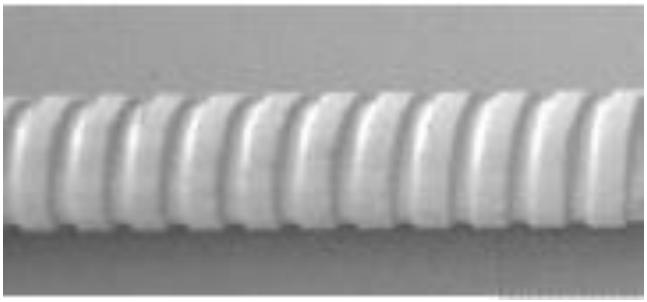
الجدول (1−7) الأبعاد الهندسية ونسب التسليح للجوائز المختبرة في الدراسة [11].

اسم العينات	قضبان التسليح	العرض(*mm*)	طبقة التغطية(*mm*)	d/h	نسبة التسليح
		B	***C***		**%**
C-212-D1	**2Ø12**	**140**	**20**	**0.86**	**0.99**
C-216-D1	**2Ø16**	**140**	**20**	**0.85**	**1.78**
C-316-D1	**3Ø16**	**140**	**20**	**0.85**	**2.67**
C-212-D2	**2Ø12**	**160**	**40**	**0.75**	**0.99**
C-216-D2	**2Ø16**	**160**	**40**	**0.74**	**1.78**
C-312-D2	**3Ø16**	**160**	**40**	**0.74**	**2.67**

الجدول (1−8) الخصائص الميكانيكية للبيتون في الدراسة [11].

اسم العينات	المقاومة المميزة f_c (MPa)	معامل المرونة E_c (MPa)	المقاومة على الشد f_{ct} (MPa)
C-212-D1	**59.8**	**26939**	**3.5**
C-216-D1	**56.3**	**26524**	**3.3**
C-316-D1	**55.2**	**24926**	**3.8**
C-212-D2	**39.6**	**23163**	**3.0**
C-216-D2	**61.7**	**27318**	**3.3**
C-312-D2	**60.1**	**26910**	**3.6**

استخدمت قضبان تسليح من الـGFRP محلزنة, وكانت نسبة حجم الألياف الزجاجية فيها مساوية 75% من الحجم الكلي, وصنعت بطريقة الشد Pultrusion, وفي هذه الطريقة تسحب الألياف الزجاجية الحرة الطويلة من خلال آلة في عملية مستمرة وتخضع الألياف المشدودة إلى إشباع بسائل مركب من الريزين نوع فينول . استير. أوريثان(synthetic vinyl ester-urethane). بعد ذلك تعالج القضبان المتشكلة في نهاية عملية متدرجة للحصول على سطح محلزن (مسنن), كما هو مبين في الشكل(1−24), وتبدي القضبان المستخدمة معامل مرونة عالي نسبيا ويساوي 60GPa, وهذه القيمة مرتفعة إذا ما قورنت بأنواع أخرى شائعة الاستخدام من الـGFRP حيث معامل مرونتها GPa(35-45), وقد استخدمت قضبان ذات قطرين مختلفين ($\Phi 16mm, \Phi 12mm$). حيث أخذ بعين الاعتبار القطر الداخلي للقضبان.



الشكل (1−24) شكل سطح قضبان الـGFRP [11].

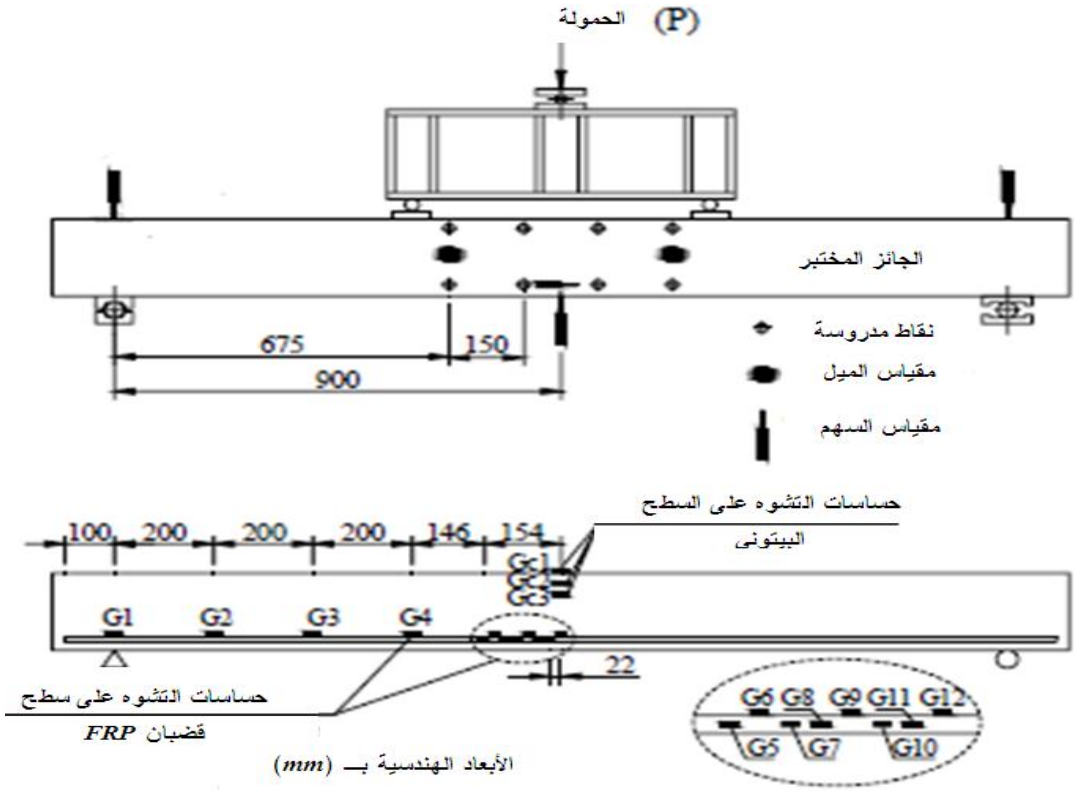
يظهر الجدول (1−9) الخصائص الميكانيكية الناتجة من اختبارات الشد المحوري, وتم تحديد معامل المرونة باستخدام مقياس تشوه محوري خارجي على طول 100mm, وقد أزيل المقياس قبل حصول الانقطاع منعاً لتضرره, لذلك لم يتم قياس التشوه لحظة الانقطاع.

الجدول (1−9) الخصائص الميكانيكية لقضبان الـGFRP في الدراسة [11].

القطر (*mm*)	**12**	**16**
المقاومة القصوى على الشد، f_{fu} (MPa)	**(1000) 1353**	**(1000) 995**
معامل المرونة، E_f (MPa)	**(60000) 63252**	**(60000) 64152**
التشوه الأقصى	**1.8%**	**1.8%**

القيم داخل الأقواس معطاة من قبل المصنع

تم تطبيق الحمولة كما هو مبين في الشكل (1−25) على شكل دفعات كل منها 10KN وبعد كل زيادة كانت تسجل قيمة التشوهات وعرض الشقوق.



الشكل (1−25) الخطوات التجريبية [11].

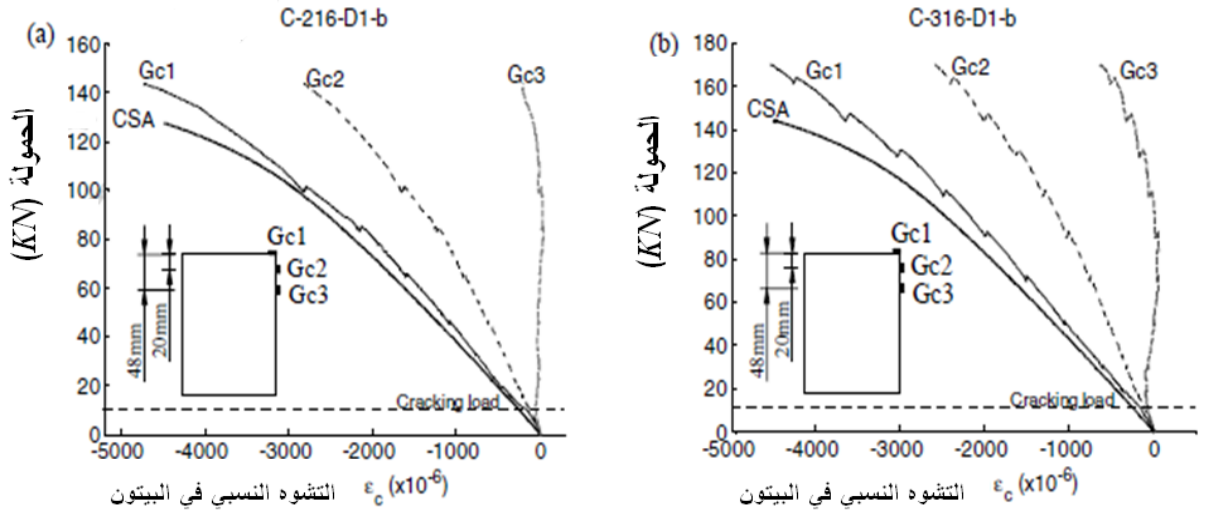
تم قياس الانتقالات والتشوهات وسط المجاز، أما حساسات التشوه فوضعت على الوجه العلوي والسفلي، أما مقاييس الدورانات فتم وضعها على وجهي الجائز الشاقوليين في منطقة العزم الصافي كما هو مبين في الشكل(1−25)، واستخدمت عدسة مكبرة لقياس عرض التشققات بدقة 0.05mm.

جهزت الجوائز من النوع b بشكلٍ إضافي بثلاثة حساسات تشوه للبيتون (أحدها على السطح العلوي للجائز والثاني على عمق 20mm من السطح والثالث على عمق 48mm من السطح العلوي للجائز), وذلك لحساب قيمة التشوه مقابل كل حمولة , أما قضبان الـGFRP للمجموعة b فكانت ذات قطر Φ16mm وسميت كما يلي:

(C-216-D1-b , C-216-D2-b , C-316-D1-b , C-316-D2-b) وهي مجهزة داخلياً بحساسات تشوه على سطح قضبان الـGFRP, أربعة حساسات وزعت في منطقة القص و منطقة العزم الثابت, وثمانية حساسات وزعت بتباعد 22mm انطلاقا من وسط الجائز.

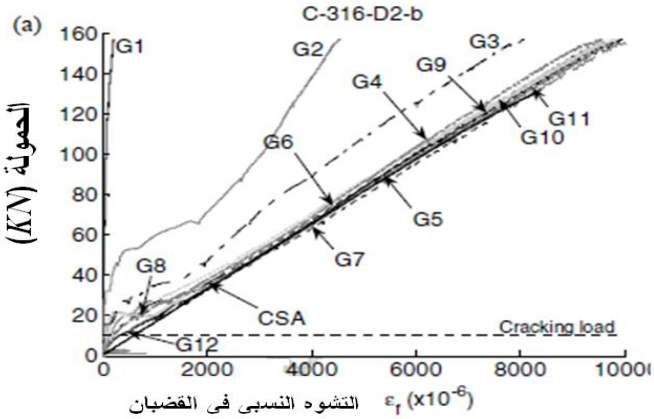
يظهر الشكل(1− 26) العلاقة التجريبية لمنحني (حمولة − تشوه) للبيتون, حيث يلاحظ فرع خطي صغير نسبياً وهو يتوافق مع مرحلة ما قبل التشقق, وفي هذه المرحلة تشير المنحنيات الثلاثة التجريبية إلى وجود سلوك متشابه من ناحية قيم التشوه, ليزداد الفرق بينها بشكلٍ سريع عندما يبدأ التشقق بالظهور. تبين الدراسة أن نسبة التسليح العالية تؤدي إلى عمق أكبر لمنطقة الضغط البيتوني. وتشير الدراسة إلى

توافق جيد بين قيم التشوه المسجلة تجريبياً على سطح المقطع مع النتائج النظرية الحاصلة من تحليل المقطع المتشقق (CSA).



الشكل (1–26) منحنيات (حمولة – تشوه) في بيتون الجوائز C-216 وC-316 [11].

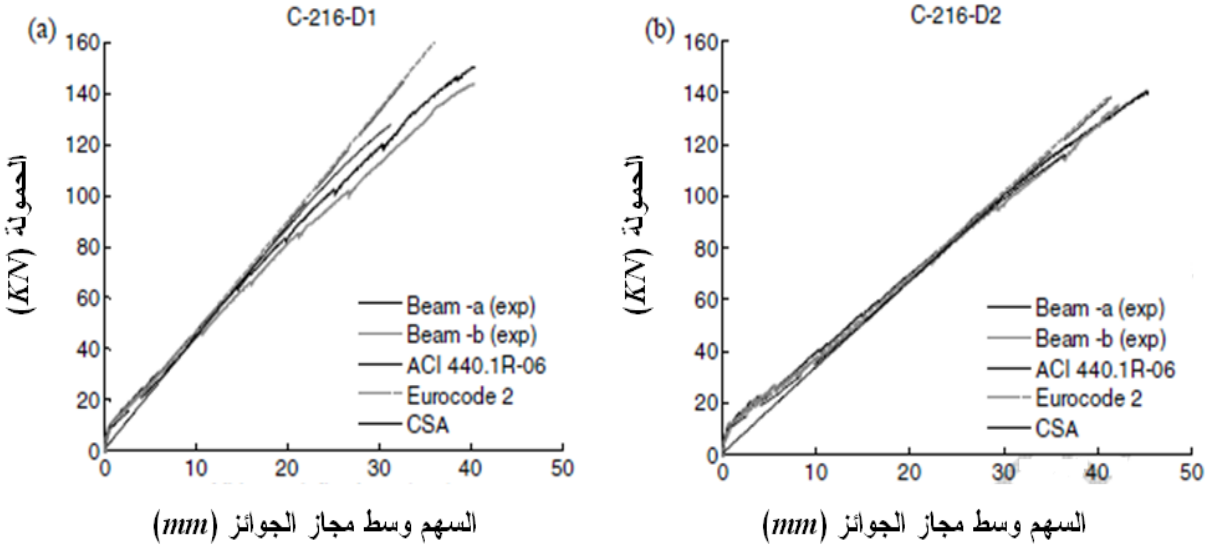
يظهر الشكل(1–27) منحنيات (حمولة– تشوه) في قضبان تسليح الجائزC-316-D2-b المحددة تجريبياً, حيث لوحظ أن الحساس G1 المثبت فوق المسند يعطي قيمة مهملة للتشوه, في حين أن الحساسات G11,G12 المتوضعة في المنطقة الوسطى للجائز أعطت قراءات كبيرة للتشوه بشكلٍ مسبق بسبب وجود شق مفتعل أثناء الصب في ذلك الموضع. وعند حمولات أكبر لم يتم قياس التشوه عند الحساس G12 بل في حساسات مجاورة G11,G10 بسبب التشقق في تلك المنطقة. وتمت مقارنة القيم التجريبية لتشوه قضبان التسليح مع القيم الموافقة المتنبأ بها بتحليل المقطع المتشقق, حيث أعطت طريقة تحليل المقطع المتشقق CSA قيماً للتشوه الأعظمي في قضبان التسليح مماثلة للقيم التجريبية من أجل الحمولة نفسها. وتشير الدراسة إلى حدوث تشوهات كبيرة عند نسب تسليح منخفضة.



الشكل (1–27) منحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان الجائز C-316-D2-b [11].

يظهر الشكل (1–28) منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً اعتماداً على علاقات الكودACI 440.1R-06 [7] وEurocode2 [16] , حيث لوحظ أن نسبة التسليح ونسبة عمق توضع القضبان إلى عمق الجوائز يلعبان دوراً كبيراً في صلابة الجائز. وبالتالي يؤثران على مخطط (حمولة –

سهم), وعند استخدام نفس نسب التسليح ومع نسبة منخفضة لعمق القضبان إلى عمق الجائز تنتج قيماً كبيرة للسهم من أجل نفس الحمولات.



الشكل (1–28) منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً وسط الجوائز C-216-D1 , C-216-D2 [11].

وتشير هذه الدراسة إلى أن الكود ACI 318-05 [6] والإصدارات التي تسبقه والخاصة بالعناصر المسلحة بالفولاذ تقترح استخدام علاقة برانسون لحساب السهم, حيث يعرض تقريب برانسون علاقة لحساب عزم العطالة الفعال I_e وفق العلاقة (1–50) والذي يتغير تدريجياً من عزم عطالة المقطع السليم I_g إلى عزم عطالة المقطع المتشقق I_{cr} عند تطبيق حمولات على العنصر.

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3 I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (50\text{-}1)$$

حيث: M – العزم الأعظمي المطبق على العنصر, M_{cr} – العزم المسبب للتشقق.

قدم الكود ACI -440.1R-06 [7] الخاص بالعناصر المسلحة بـFRP علاقة برانسون المعدلة وهي العلاقة (1–51) التي تشتمل على العامل β_d وهو عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بالـFRP وتحسب بالعلاقة (1–52).

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3 \beta_d\, I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (51\text{-}1)$$

$$\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \qquad (52\text{-}1)$$

حيث:

ρ_f – نسبة التسليح بقضبان الـFRP, ρ_{fb} – نسبة التسليح التوازنية بالـFRP.

فمن أجل جائز بسيط الاستناد مجازه L ومحمل بحمولتين مركزتين كل منها $\left(\frac{P}{2}\right)$، وتقع كل منها على مسافة a من المسند, يحسب السهم الأعظمي من العلاقة التالية:

$$\delta_{\max} = \frac{Pa}{48E_c I_e}\left(3L^2 - 4a^2\right) \qquad (53\text{-}1)$$

يعطي الكودان ACI -440.1R-06 [7] و Eurocode2 [16] قيماً للسهم متوافقة مع القيم التجريبية وذلك من أجل حمولات تصل إلى الحمولات الاستثمارية, أما من أجل حمولات أعلى من ذلك فكل من الكودين يقلل من قيم السهم. وتشير الدراسة إلى أن الاختلاف ينسب إلى حقيقة أن التقريبات في الكودين المذكورين أعلاه محددة في ظروف الاستثمار، وأن هذه التقريبات تعتمد على العلاقة الخطية (إجهاد – تشوه) في البيتون، وهي صحيحة من أجل السهم الناتج عن الانعطاف فقط.

وتقدم الدراسة علاقات أخرى لحساب السهم ومنها علاقة Faza and Gangarao [11]، حيث يحسب عزم العطالة المعدل I_m وفق العلاقة التالية:

$$I_m = \frac{23 I_{cr} I_e}{8I_{cr} + 15I_e} \qquad (54\text{-}1)$$

ويقدم الباحث Toutanji علاقة أخرى يعتبر بموجبها قيمة الأس m في علاقة برانسون كما يلي:

$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} < 0.3 \qquad \Rightarrow \qquad m = 6 - \frac{10E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP}$$

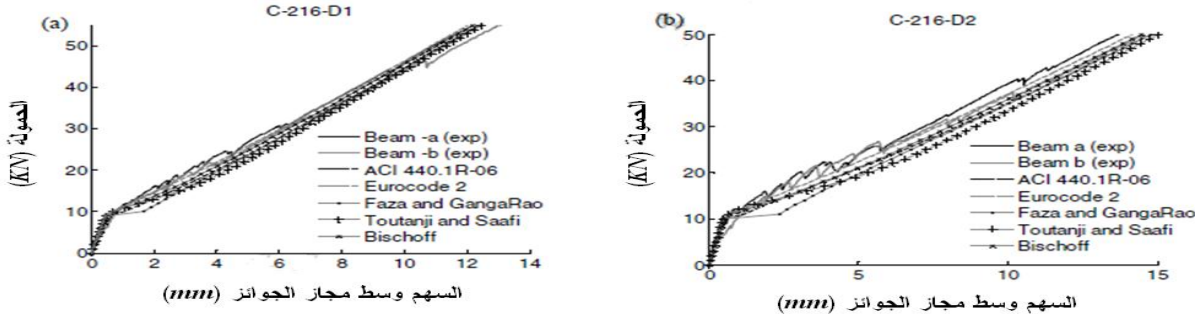
$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} \geq 0.3 \qquad \Rightarrow \qquad m = 3 \qquad (55\text{-}1)$$

حيث: ρ_{FRP} – نسبة التسليح بقضبان الـFRP كنسبة مئوية.

وتقدم الدراسة التقريب المقدم من قبل الباحث Bischoff الذي يقترح علاقة تعتمد على عزم العطالة المكافئ الذي يستند على تأثير الصلابة على الشد على موضوع الانحناء.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^2} \qquad (56\text{-}1)$$

يبين الشكل(1–29) مقارنة بين نتائج تقريبات Faza and Gangarao, Toutanji and Saafi, و Bischoff [11] مع النتائج التجريبية ضمن حدود الحمولات الاستثمارية, حيث تشير الدراسة إلى تشابه بين نتائج التقريبات والنتائج التجريبية من أجل نسب التسليح المختارة بـGFRP. ويعطي تقريب Bischoff والكودان ACI -440.1R-06 [7] و Eurocode2 [16] نتائج أكثر تشابهاً مع النتائج التجريبية.



الشكل (1–29) منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً تحت تأثير حمولات استثمارية وسط الجوائز C-216-D2 , C-216-D1 [11].

يبين الجدول (1−10) قيم السهم ونسبة المجاز إلى السهم وذلك عند حمولات استثمارية وحدية, حيث لوحظ أنه عند حمولات استثمارية، كانت نسبة المجاز إلى السهم تساوي 122.5 و197.6، وتعتبر هذه النسب عالية إذا ما قورنت مع النسب التصميمية المفروضة والتي تساوي قيمة السهم المسموح فيها $\left(\frac{L}{250}\right)$, وبالتالي تؤكد الدراسة أن التحميل بحمولات استثمارية هو المسيطر على موضوع تصميم الجوائز المسلحة بـFRP.

الجدول (1−10) قيم السهم ونسبة (طول المجاز إلى السهم) عند حمولات قصوى وحمولات استثمارية [11].

اسم الجائز	الحمولات القصوى				الحمولات الاستثمارية			
	السهم(*mm*)		نسبة(المجاز/السهم)		السهم(*mm*)		نسبة(المجاز/السهم)	
	الجائز *a*	الجائز *b*	الجائز *a*	الجائز *b*	الجائز *a*	الجائز *b*	الجائز *a*	الجائز *b*
C-212-D1	**52.2**	**47.3**	**34.5**	**38.1**	**14.7**	**13.2**	**122.5**	**136.4**
C-216-D1	**40.5**	**40.3**	**44.4**	**44.6**	**11.4**	**11.8**	**157.5**	**153.0**
C-316-D1	**32.5**	**34.4**	**55.3**	**52.3**	**9.1**	**9.6**	**197.6**	**187.5**
C-212-D2	**47.8**	**46.3**	**37.7**	**38.8**	**13.7**	**11.1**	**131.3**	**161.6**
C-216-D2	**45.4**	**42.3**	**39.6**	**42.6**	**13.4**	**13.6**	**134.8**	**132.1**
C-312-D2	**38.6**	**41.9**	**46.6**	**43.0**	**11.0**	**12.0**	**163.6**	**150.4**

يبين الجدول (1−11) مقارنة الحمولات الحدية المقاسة تجريبياً والقيم المحسوبة تحليلياً باستخدام الكودين Eurocode2 [16] و ACI -440.1R-06 [7] حيث تفترض قيمة التشوه الأعظمي في البيتون المضغوط في الكود ACI مساوية 0.003 وفي الكود الأوروبي 0.0035.

الجدول (1−11) الحمولات القصوى المحددة حسابياً وتجريبياً في الدراسة [11].

اسم الجائز	Pu ACI440 (KN)	Pu EC-2 (KN)	Pu exp. (KN) للجائز a	Pu exp. (KN) للجائز b	Pu exp./ Pu ACI	Pu exp./ Pu EC-2
C-212-D1	**80.8**	**105.8**	**127.4**	**118.6**	**1.53**	**1.16**
C-216-D1	**96.2**	**126.0**	**150.2**	**143.4**	**1.53**	**1.17**
C-316-D1	**110.1**	**144.2**	**164.6**	**169.8**	**1.52**	**1.16**
C-212-D2	**60.5**	**72.5**	**92.3**	**85.1**	**1.47**	**1.22**
C-216-D2	**88.8**	**116.9**	**140.5**	**134.9**	**1.55**	**1.18**
C-312-D2	**102.0**	**133.5**	**144.0**	**157.2**	**1.48**	**1.13**

لوحظ أن جميع الجوائز المختبرة تحملت حمولات أكبر مما تنبأ به الكودان السابقان، وكانت النسب بين القيم التجريبية والقيم التحليلية مساوية 1.17 في حالة استخدام الكود الأوروبي، و1.51 في حالة استخدام ACI. وبالتالي فإن علاقات الكود الأمريكي ACI [7]، أكثر تحفظاً من الكود الأوربي في تحديد الحمولات الحدية, والسبب الوحيد للاختلاف الحاصل بين القيم التجريبية والتحليلية كما تشير إليه الدراسة هو القيمة العظمى للتشوه في البيتون المضغوط, ففي جميع الجوائز المختبرة كانت قيمة التشوه العظمى للبيتون ضمن المجال (0.0042-0.0047) والتي هي أكبر بحوالي 22-34% من القيمة المقترحة من قبل الطرق التحليلية.

لوحظ أن جميع الجوائز المختبرة انهارت على شكل تحطم البيتون المضغوط, وهذا يتوافق مع الشكل المصمم لها أن تنهار به, والحمولة القصوى المحددة تجريبياً كانت أكبر بـ51% عما هو متوقع في الكود

ACI -440.1R-06 [7] وأكبر بـ17% عما هو متوقع في الكود Eurocode2 [16], وهذا يعود إلى أن قيمة التشوه الأعظمي في البيتون تجريبياً كانت أكبر من القيمة المستخدمة في الحسابات التحليلية. لذلك تشير الدراسة إلى ضرورة إجراء أبحاث أعمق في هذا المجال للتأكد من النتيجة. كما تمت مقارنة القيم التجريبية لعرض التشققات مع القيم المحسوبة باستخدام علاقات الكود ACI -440.1R-06 [7] وفق العلاقة التالية:

$$w = 2\frac{\sigma_f}{E_f}\alpha \cdot k_b\sqrt{d_c^2 + (s/2)^2} \qquad (57\text{-}1)$$

حيث:

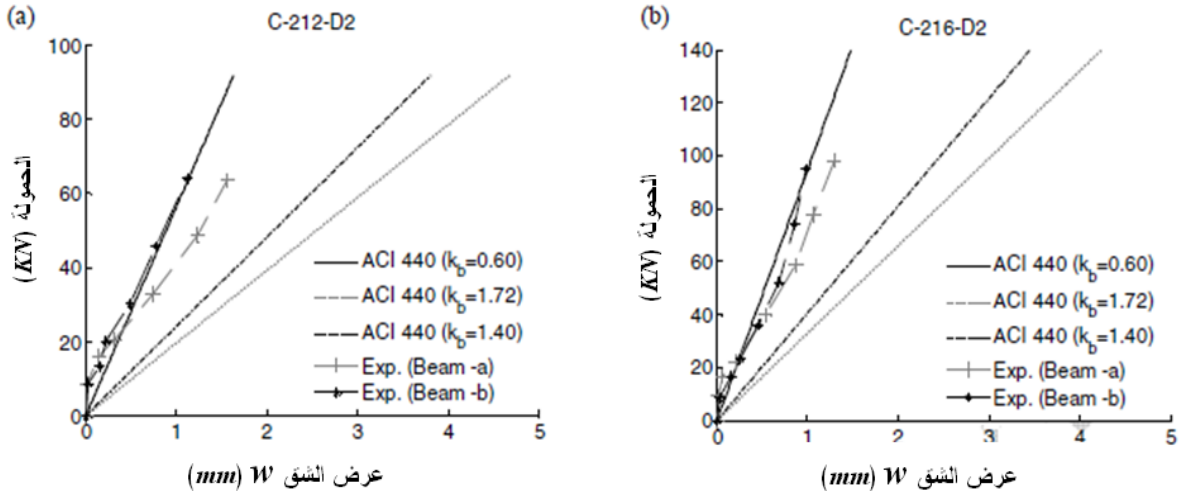
α – نسبة المسافة بين المحور الحيادي والوجه المشدود إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز التسليح.

d_c – سماكة طبقة التغطية وتحسب من الوجه المشدود إلى مركز قضبان التسليح الأقرب إلى الوجه المشدود وتقدر بـ mm.

s – تساوي التباعد بين قضبان التسليح الطولية وتقدر بـ mm.

k_b – عامل يأخذ بالحسبان الالتحام بين القضبان والبيتون, وهذا العامل يفرض (1) من أجل القضبان التي يكون التحامها مماثلاً لالتحام القضبان غير المغطاة بالبيتون, أما في الكود ACI -440.1R-06 [7] فإن هذا العامل يتراوح بين 0.6 و 1.72 وقيمته 1.4 في حالة عدم توفر معطيات تجريبية عن قضبان الـFRP.

يبين الشكل (1–30) العلاقة بين (حمولة – عرض الشق) وفق علاقات الكود ACI من أجل قيم مختلفة لـ k_b, حيث تراوحت القيم التجريبية لعرض الشق بين القيمة العظمى والصغرى المفروضة بالكود ACI -440.1R-06 [7], لكن تبين الدراسة أن القيم تميل أكثر نحو القيمة الصغرى لعرض الشق، مما يفسر وجود التحام جيد بين البيتون وقضبان الـGFRP المستخدمة.



الشكل (1–30) منحنيات (حمولة – عرض التشقق) المحددة تجريبياً وتحليلياً تحت تأثير حمولات استثمارية للجائزين C-216-D2 , C-216-D1 [11].

1-4-4- سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية GFRP على الانعطاف[21].

Flexural Behavior Of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars [21].

تعرض هذه الدراسة طرائق تحليلية قادرة على التنبؤ بالسهم وعرض التشققات في الجوائز المسلحة بـGFRP, حيث يدخل في هذه الطرائق عزم العطالة الفعال للجوائز المسلحة بـGFRP, مع إدخال تأثير نسبة التسليح بهذه القضبان وكذلك عامل مرونتها في علاقة برانسون.

لحساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ، استخدم في هذه الدراسة معامل مرونة البيتون E_c، وكذلك عزم عطالة الجائز I_e, وبالتالي تحدد قيمة السهم في الجائز البيتوني المسلح الخاضع لحمولتين مركزتين في الثلث الأوسط للجائز وفق العلاقة(1-58):

$$\Delta = \left(3L^2 - 4a^2\right)\frac{M}{24 I_e E_c} \qquad (58\text{-}1)$$

حيث:

M- عزم الانعطاف المطبق على الجائز، ويحسب وفق العلاقة التالية: $(M = P.a/2)$.

a - طول مجال القص في الجائز, L- المسافة بين المسندين, P- الحمولة المركزة المطبقة على الجائز التي يحسب عندها السهم, أما عزم العطالة الفعال فيحسب اعتماداً على الاقتراح المقدم من قبل برانسون بالعلاقة التالية:

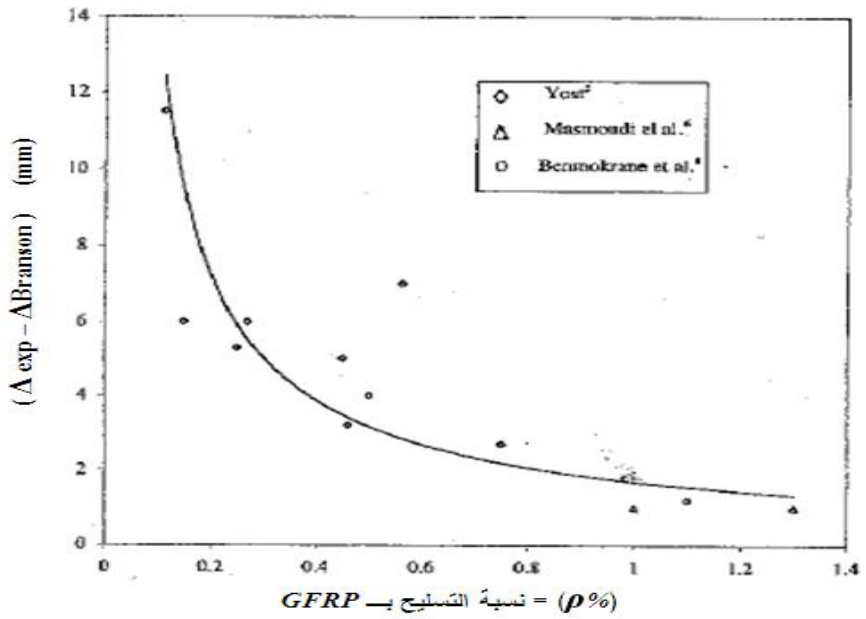
$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m\right] I_{cr} \le I_g \qquad (59\text{-}1)$$

حيث:

m- عامل تساوي قيمته 3, I_e- عزم العطالة الفعال للمقطع, I_{cr}- عزم عطالة المقطع المتشقق.

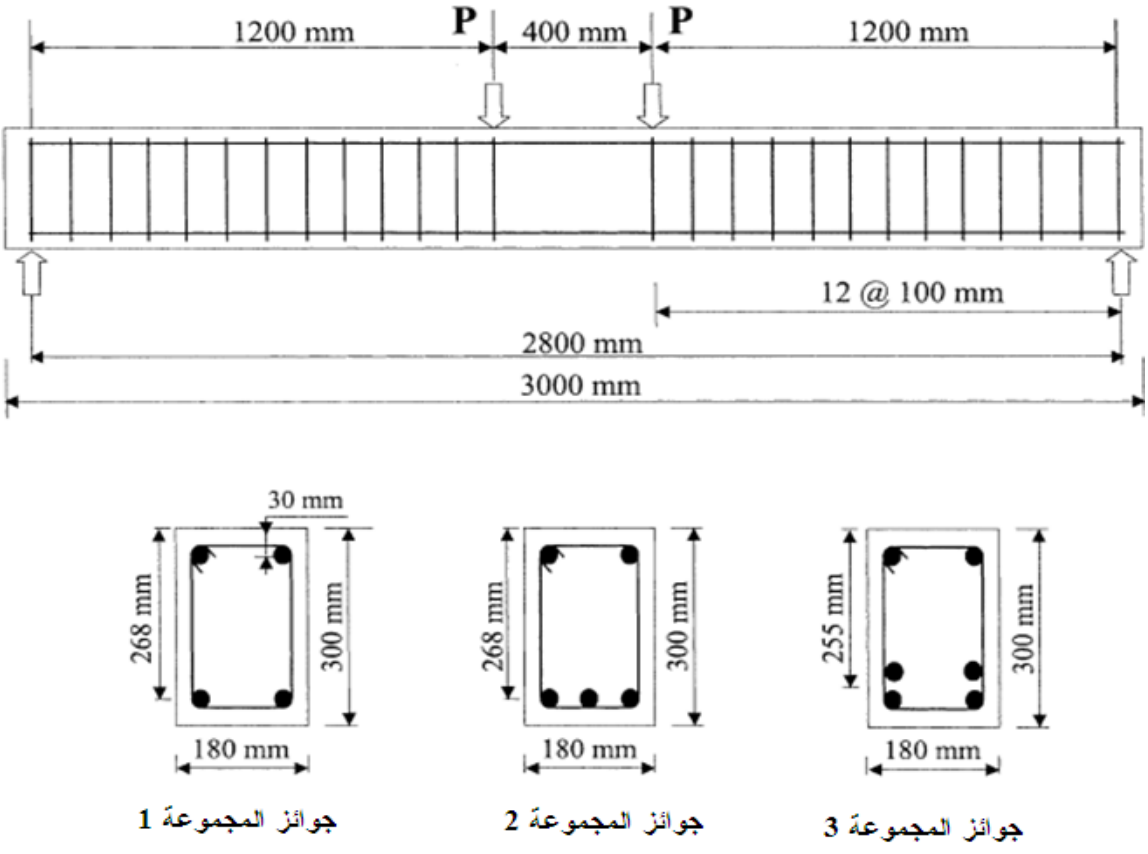
M- العزم الناتج عن الحمولة المطبقة, M_{cr}- العزم المسبب للتشقق.

يبين الشكل (1-31) تأثير نسبة التسليح بقضبان الـFRP على اختلاف قيم السهم المحددة تجريبياً في دراسات سابقة [21,12] والقيم المحددة تحليلياً بواسطة علاقة برانسون عند حمولة تعادل 50% من الحمولة التصميمية, وتبين أشكال الانهيار أنه إذا ازدادت نسبة التسليح بـFRP فإن القيم المحسوبة بعلاقة برانسون تصبح أدق, وقيم السهوم المحسوبة تقل عن القيم التجريبية إذا كانت نسبة التسليح بـGFRP تقل عن 1%.



الشكل (1–31) تأثير نسبة التسليح بقضبان الـGFRP على مدى الاختلاف بين القيم التجريبية والتحليلية المحددة بعلاقة برانسون[21].

تضمَّن البرنامج التجريبي المنجز في هذه الدراسة ثلاث مجموعات من الجوائز البيتونية المسلحة، حيث تم اختبارها على الانعطاف كما هو مبين في الشكل (1–32), ويبين الجدول (1–12) جميع التفاصيل المتعلقة بهذه المجموعات.



الشكل (1–32) مجموعات الجوائز المختبرة وتفاصيل المقاطع الطولية والعرضية [21].

الجدول (1−12) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة في الدراسة [21].

رقم المجموعة	اسم الجائز	البيتون			التسليح الطولي	
		E_C GPa	f'_c MPa	نسبة التسليح التوازنية،%	نسبة التسليح،%	عدد القضبان
1	GB-1-1	35	35	0.56	0.52	2
	GB-1-2	35	35	0.56	0.52	2
2	GB-2-1	35	35	0.56	0.79	3
	GB-2-2	35	35	0.56	0.79	3
3	GB-3-1	35	35	0.56	1.10	4
	GB-3-2	35	35	0.56	1.10	4

تم تصميم الجوائز بحيث يحصل شكلان للانهيار:

الأول: انقطاع قضبان الـFRP بنفس الوقت الذي يتحطم فيه البيتون المضغوط , وذلك للمجموعة الأولى.

الثاني: تحطم البيتون المضغوط في حين تبقى قضبان التسليح في مرحلة المرونة, وذلك بالنسبة للمجموعتين الثانية والثالثة.

وكانت نسبة التسليح في المجموعة الأولى مساوية لنسبة التسليح التوازنية ρ_{bal} , أما في المجموعتين الثانية والثالثة فكانت نسبة التسليح أكبر من نسبة التسليح التوازنية ρ_{bal} التي تتحدد كنسبة تسليح تتحقق بموجبها شروط توازن التشوهات وتحسب من العلاقة (1−60).

$$\rho_{bal} = \frac{0.85\beta_1 f'_c}{f_{fu}} \left(\frac{0.0035}{0.0035 + \varepsilon_{fu}} \right) \qquad (60\text{-}1)$$

حيث:

β_1 – نسبة عمق منطقة البيتون المضغوط المكافئة إلى عمق المحور الحيادي.

f'_c – مقاومة البيتون على الضغط, f_{fu} – المقاومة القصوى لقضبان الـGFRP على الشد.

ε_{fu} – قيمة التشوه الأعظمية الحاصلة في قضبان الـGFRP.

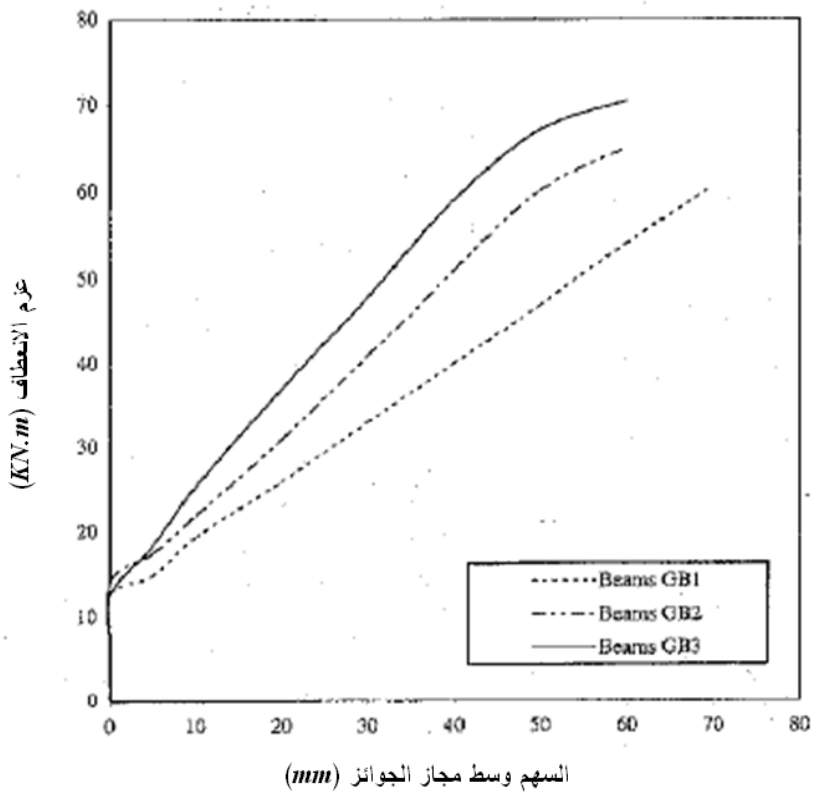
أما قضبان الـGFRP المستخدمة في هذه الدراسة فكانت مصنعة بطريقة شد الألياف ولصقها Pultrusion, وهي تحتوي على 65% من وزنها ألياف نوع E, و 35% من وزنها ريزين, وقطرها الاعتباري يساوي 12.7mm. وقوة الشد الأعظمية للقضبان 695MPa, ومعامل مرونتها 40GPa, وقد استخدمت أساور فولاذية للتسليح العرضي نظرا لعدم توفر أساور من الـGFRP وكذلك قضبان التسليح العلوية كانت من الفولاذ. واستخدمت مقاييس الانتقالات الخطية (LVDTs), التي ثبتت وسط الجائز وفي أماكن تطبيق القوة, كما ثبتت حساسات تشوه على السطح البيتوني المضغوط وعلى سطح القضبان GFRP لقياس التشوهات والانزلاقات الحاصلة. ويبين الجدول (1−13) قيم نسبة التسليح التوازنية ρ_{bal} والعزم المقاوم الأعظمي, وأشكال الانهيار المشاهدة على الجوائز المختبرة.

الجدول (1–13) قدرة التحمل القصوى للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها في الدراسة [21].

اسم الجائز	نسبة التسليح الفعلية، %	نسبة التسليح التوازنية، %	M_{cr} KN.m	M_{exp} KN.m	Δ mm	شكل الانهيار الملحوظ
GB-1-1	0.52	0.56	11.7	60	70	تحطم البيتون المضغوط
GB-1-2	0.52	0.56	12.3	59	73	تحطم البيتون المضغوط
GB-2-1	0.79	0.56	13.4	65	60	تحطم البيتون المضغوط
GB-2-2	0.79	0.56	12.8	64.3	59	تحطم البيتون المضغوط
GB-3-1	1.10	0.56	11.8	71	61	تحطم البيتون المضغوط
GB-3-2	1.10	0.56	11.6	70.5	62	تحطم البيتون المضغوط

لوحظ أن الجوائز المسلحة بنسبة تسليح أكبر من التوازنية انهارت على شكل تحطم البيتون المضغوط وهذا ما حدث في المجموعتين الثانية والثالثة, وكذلك بالنسبة للمجموعة الأولى المسلحة بنسبة تسليح مساوية 52% من النسبة التوازنية كذلك انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط.

وتكون منحنيات (عزم– سهم) خطية إلى بداية حصول التشققات, ثم قريبة من الخطية وصولاً إلى الانهيار مع انخفاض الصلابة, ويعود ذلك إلى مرونة قضبان الـGFRP, كما هو مبين في الشكل (1–33).



الشكل (1–33) أداء الجوائز في المجموعات الثلاث من ناحية (عزم – سهم) [21].

تشير هذه الدراسة إلى حصول التشققات عند بلوغ العزم المطبق قيمة عزم التشقق, ويبين الجدول (1-14) القيم الوسطية لعرض التشققات الناتجة عن الاختبار, وكذلك التباعد بينها كتابع لنسبة التسليح المستخدمة في الجوائز, وقد تم قياس عرض الشقوق والتباعد بينها عند حمولات مساوية30% و90% من الحمولة القصوى، حيث لوحظ تناقص عرض الشقوق عند زيادة نسبة التسليح.

الجدول (1-14) عرض التشققات والتباعد فيما بينها في الدراسة [21].

اسم الجائز	نسبة التسليح، %	عرض الشق،mm		المسافة بين الشقوق،mm	
		90% M_u	30% M_u	90% M_u	30% M_u
GB-1-1	0.52	3.3	1.3	120	133
GB-1-2	0.52	3.5	1.2	118	134
GB-2-1	0.79	2.3	0.6	94	100
GB-2-2	0.79	2.2	0.7	96	99
GB-3-1	1.10	1.8	0.6	78	81
GB-3-2	1.10	1.9	0.5	79	83

ينصح الباحث Dolan [21] باعتبار قيمة الأس(m) في العلاقة (1-24) أكبر من القيمة(3), لتصبح العلاقة (1-24) تابعة لنسبة التسليح الطولي, وباعتبار أن معامل مرونة قضبان الـGFRP أقل من القضبان الفولاذية فإن عامل مرونة قضبان الـGFRP يجب أن يدخل في العلاقة(1-59).

هناك تقريبات مختلفة [21] تقترح إدخال تأثير العاملين E_{FRP}, ρ_{FRP} في قيمة الأس(m), وذلك للمحافظة على شكل العلاقة (1-59) مع أقل قدر مكن من التعديلات عليها.

اقترح استخدام العلاقة (1-61) لتحديد قيمة الأس(m) من أجل الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان الـGFRP بناءاً على الدراسات التجريبية المحددة في هذه الدراسة وفي دراسات أخرى [21] .

$$m = \frac{\log\left[\left(I_{e(\exp)} - I_{cr}\right)/\left(I_g + I_{cr}\right)\right]}{\log\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)} \qquad (61\text{-}1)$$

حيث:

$I_{e(\exp)}$- عزم العطالة الفعال التجريبي والذي يمكن إعادة حسابه باستخدام العلاقة (1-59), فالقيمة المتوسطة لـm تحدد من أجل كل نسبة تسليح ρ_{FRP}, ومن أجل معامل المرونة E_{FRP} باستخدام التحاليل التكرارية كما يلي:

$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} < 0.3 \qquad \Rightarrow \qquad m = 6 - \frac{10E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} \qquad (62\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} \geq 0.3 \qquad \Rightarrow \qquad m = 3 \qquad (63\text{-}1)$$

حيث:

E_{FRP} – معامل مرونة قضبان الـGFRP, E_s – معامل مرونة الفولاذ, ρ_{FRP} – نسبة التسليح بقضبان الـGFRP كنسبة مئوية.

وتكتب علاقة عزم العطالة المصحح كما يلي:

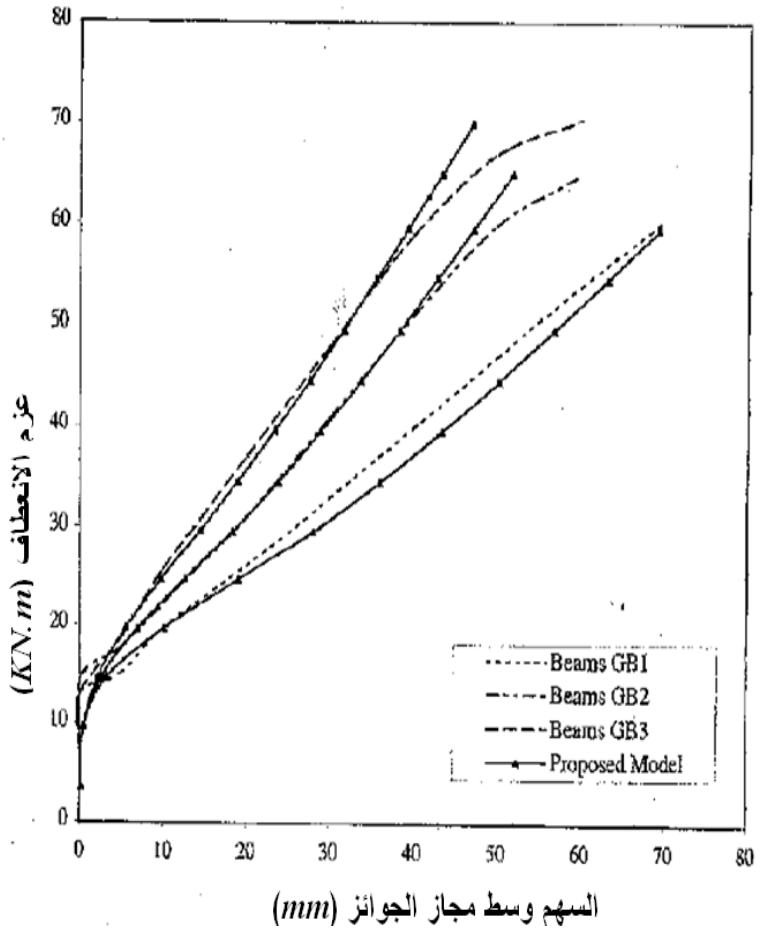
$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} < 0.3$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^{6-\frac{10E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP}} I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^{6-\frac{10E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP}}\right] I_{cr} \le I_g \qquad (64\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \frac{E_{FRP}}{E_s}\rho_{FRP} \ge 0.3$$

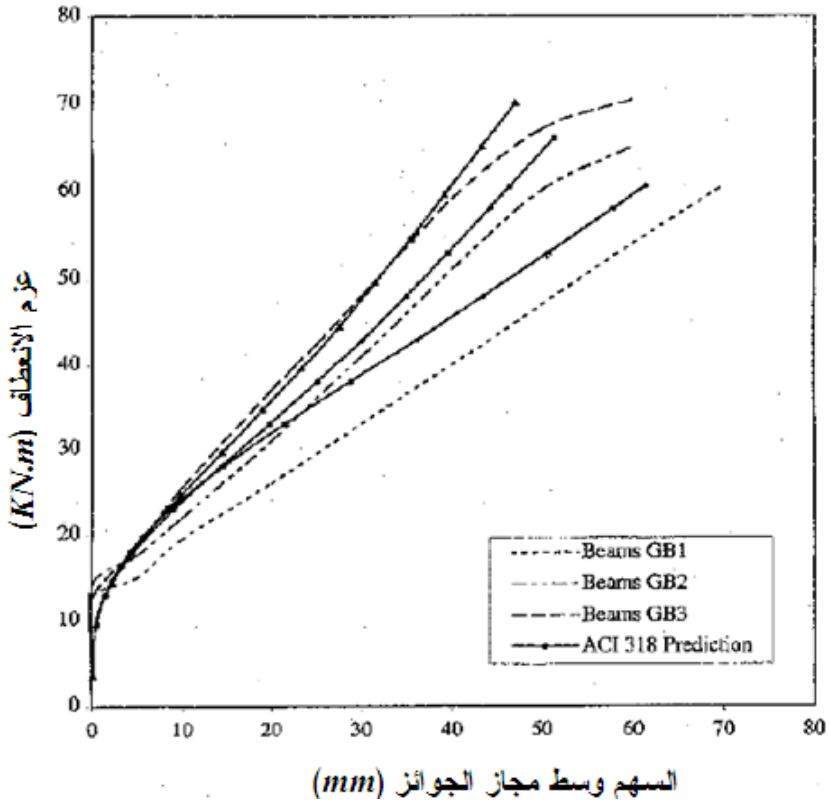
$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (65\text{-}1)$$

يبين الشكل(1–34) منحنيات (عزم– سهم) المحددة تجريبياً وتحليلياً, حيث قيمة الأس من أجل المجموعة الأولى($m=4.96$) وللمجموعة الثانية ($m=4.42$) وللمجموعة الثالثة ($m=3.8$), حيث لوحظ توافق جيد بين النتائج التجريبية والنتائج التحليلية.



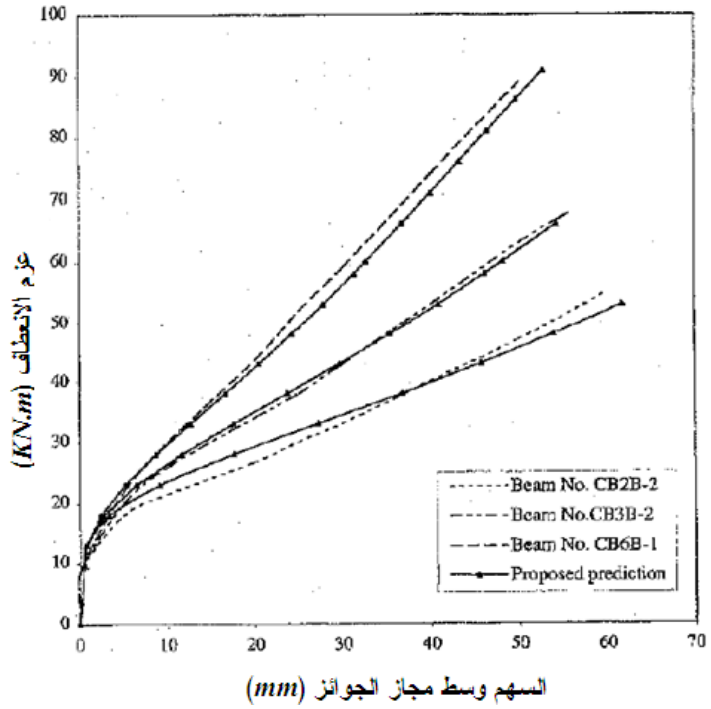
الشكل (1–34) منحنيات (عزم– سهم) المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقتين (1–64) و (1–65) [21].

يبين الشكل(1−35) منحنيات(عزم− سهم) الناتجة من الحساب بعلاقات الكودACI 318 [4], والمنحنيات الناتجة عن قياسات تجريبية في هذه الدراسة [21]. وهذه المنحنيات مرسومة اعتماداً على علاقة برانسون والتي استخدمت فيها $m=3$ في حساب عزم العطالة الفعال وذلك في جميع مقاطع الجائز البسيط الاستناد, حيث لوحظ أن علاقات الكود تقلل من قيمة عزم العطالة الفعال في الجوائز المسلحة بنسبة تسليح منخفضة من قضبان الـGFRP.



الشكل (1−35) منحنيات (عزم− سهم) [21] المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقات في الكود ACI 318 [4].

ولإثبات صحة علاقة عزم العطالة الفعال المقترح I_e من قبل Dolan [21], تمت مقارنة النتائج التجريبية المحددة من قبل Masmoudi ,Theriault ,and Benmokrane في [29] مع النتائج المحسوبة باستخدام العلاقتين (1−64) و(1−65) كما هو مبين في الشكل (1−36), الذي يظهر مقارنة منحنيات (عزم− سهم) المحددة تجريبياً لجوائز ذات مقطع (200×300)mm ومسلحة بقضبان GFRP مع المنحنيات المحددة باستخدام عزم العطالة الفعال المقترح I_e من قبل Dolan. وقد كانت نتائج المقارنة مرضية. حيث كانت الجوائز بسيطة الاستناد بطول 3300 mm , خاضعة لحمولتين مركزتين تبعد كلّ منهما 500 mm عن المساند وفيها نسبة التسليح مساوية (0.56 %, 0,91%, 1,4%). ومتوسط مقاومة البيتون على الضغط 33MPa, ومقاومة الشد لقضبان الـGFRP مساوية 774MPa ومعامل مرونتها يساوي 37,6 GPa.



الشكل (1–36) منحنيات (عزم– سهم) المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام تقريب Dolan [21].

تقترح هذه الدراسة علاقة لحساب السهم تعتمد على الصلابة على الانعطاف للجوائز المسلحة بقضبان الـGFRP يمكنها التنبؤ بشكلٍ معقول بقيمة السهم, ويتم ذلك بإجراء تكامل للانحناء على طول الجائز, ولجائز مرن يحسب الانحناء ϕ_n وفق المعادلة التفاضلية للخط المرن، والتي تأخذ الشكل التالي:

$$\phi_n = \frac{M_n}{E_c I_e} \qquad (66\text{-}1)$$

حيث:

$E_c I_e$ – صلابة المقطع على الانعطاف, M_n – العزم المقاوم الأعظمي للمقطع.

وفي الجوائز المسلحة بنسبة تسليح عالية حيث الانهيار على شكل تحطم للبيتون المضغوط يحسب العزم المقاوم الأعظمي M_n وفق العلاقة التالية:

$$M_n = 0.0035 d A_{FRP} E_{FRP} \left(\frac{d\beta}{a_c} - 1 \right) - A'_c f_y d' - 0.85 (b a_c - A'_s) f'_c \bar{a} \qquad (67\text{-}1)$$

حيث:

$$\bar{a} = \frac{b \frac{a_c^{\,2}}{2} - A'_c d'}{(b a_c - A'_s)} \qquad (68\text{-}1)$$

وفيها:

A'_s – مساحة فولاذ التسليح المضغوط, A_{FRP} – مساحة قضبان الـFRP المشدودة , d – الارتفاع الفعال لقضبان FRP، d' – الارتفاع الفعال للفولاذ المضغوط, $b = 0.85 - 0.008(f'_c - 30)$ وهو عرض الجائز, f'_c -مقاومة البيتون على الضغط, a_c – ارتفاع منطقة الضغط البيتوني وتحسب بحل المعادلة التالية:

$$a_c^{\,2}\left(0.85 f_c' b\right)+a_c\left(A_s'\left(f_y-0.85 f_c'\right)+0.0035 A_{FRP} E_{FRP}\right)-0.0035 d\beta A_{FRP} E_{FRP}=0 \qquad (69\text{-}1)$$

باستخدام توزع التشوه على كامل ارتفاع المقطع البيتوني عند انهيار البيتون في الجائز, وباستخدام العلاقة بين الانحناء الحدي ϕ_n وارتفاع منطقة الضغط البيتوني a_c يمكن حساب الانحناء الحدي بالعلاقة التالية:

$$\phi_n=\frac{(1+a_c)10^{-3}}{2d}+\frac{2\varepsilon_{FRP}}{3d} \qquad (70\text{-}1)$$

تعتمد الصلابة الانعطافية في الجوائز البيتونية المسلحة بـ FRP على مستوى الحمولات المطبقة, فعند مستويات تحميل عالية يؤدي تشكل الشقوق إلى انخفاض الصلابة الانعطافية للمقطع, وهذا الانخفاض في الصلابة يكون أكبر في المقاطع ذات التسليح المنخفض, وأصغر في المقاطع ذات التسليح الكبير. ولاستخدام علاقة الانحناء(1−66) من أجل مختلف مستويات التحميل يجب إدخال عامل تعديل الصلابة α الذي يحسب وفق العلاقة التالية:

$$\alpha=\frac{1}{2}\left(F_r+\frac{M}{M_n}\right) \qquad (71\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \rho_{FRP}<1.18 \quad \Rightarrow \quad F_r=1.22-1.03\rho_{FRP} \qquad (72\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \rho_{FRP}\geq 1.18 \quad \Rightarrow \quad F_r=0 \qquad (73\text{-}1)$$

حيث:

M – عزم الانعطاف الذي يحسب عنده السهم, F_r – عامل يحسب بإحدى العلاقتين (1−72) أو (1−73)، M_n – العزم المقاوم الأعظمي.

ρ_{FRP} – نسبة التسليح بقضبان الـFRP.

تحسب الصلابة المعدلة على الانعطاف $E_c I_e^{\,*}$ في الجوائز البيتونية المسلحة بـFRP وفق العلاقة التالية:

$$E_c I_e^{\,*}=\frac{M_n}{\alpha\phi_n} \qquad (74\text{-}1)$$

بتعويض العلاقة (1−74) في علاقة السهم (1−58), يحسب السهم في المقطع المتشقق وفق العلاقة التالية:

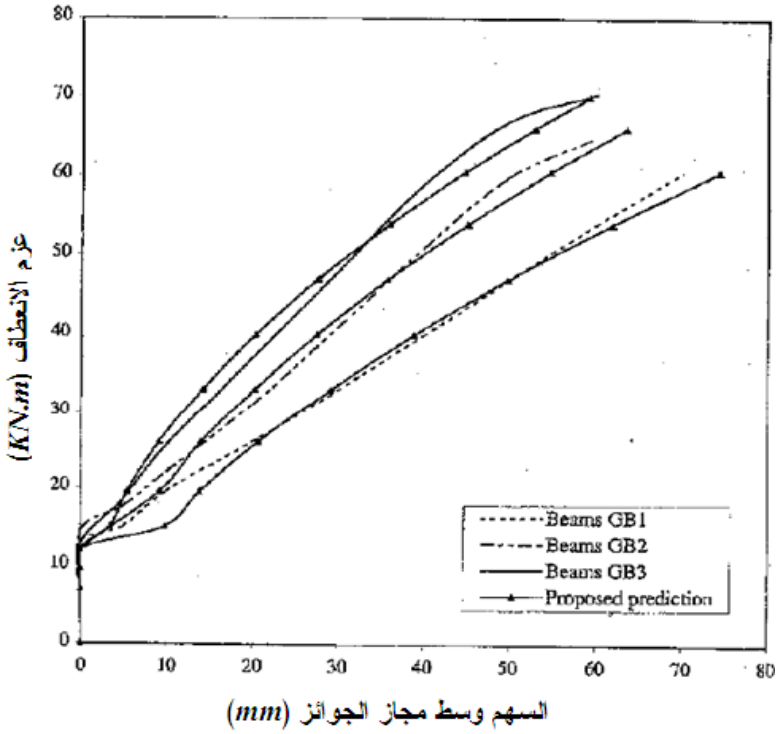
$$\text{for} \quad M>M_{cr} \quad \Rightarrow \quad \Delta=\frac{\alpha\phi_n M\left(3L^2-4a^2\right)}{24M_n} \qquad (75\text{-}1)$$

من أجل الجوائز البيتونية المسلحة بـFRP وغير المتشققة, الصلابة الانعطافية تساوي $E_c I_e$، ويحسب السهم بالعلاقة التالية:

$$\text{for} \quad M\leq M_{cr} \quad \Rightarrow \quad \Delta=\frac{M\left(3L^2-4a^2\right)}{24E_c I_g} \qquad (76\text{-}1)$$

تم حساب السهم في الجوائز البيتونية المختبرة باستخدام إحدى العلاقتين (1–75) أو (1–76) وتمت مقارنته مع النتائج التجريبية كما هو مبين في الشكل(1–37), ومنه تبين أن النتائج التجريبية والتحليلية متشابهة إلى حد ما.

وتشير هذه الدراسة إلى أن العلاقتين (1–75) و(1–76) تعطيان نتائج أفضل للسهوم المحسوبة عند الحمولات القصوى مما تعطيه العلاقتين (1–64) و(1–65), وهذا لأنهما تعتمدان على صلابة الجوائز المسلحة بـGFRP وعلى نسبة التسليح بهذه القضبان وشكل سطح القضبان وعلى قدرة التحمل, في حين أن العلاقتين (1–64) و(1–65) تعتمدان على نسبة التسليح ومعامل المرونة.



الشكل (1–37) منحنيات (عزم– سهم) لجوائز المجموعات الثلاث المحددة تجريبياً و تحليلياً باستخدام العلاقتين (1–64) و (1–65) [21].

تقدم هذه الدراسة العلاقة (1–77) المطورة من قبل الباحث Gergely-Lutz، والتي اختيرت من قبل لجنة الكود ACI 318 [4] للتنبؤ بعرض التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ كما يلي:

$$w = k_g f_s \frac{h_2}{h_1} \sqrt[3]{d_c A} \qquad (77\text{-}1)$$

حيث:

w – عرض الشق على الوجه المشدود, A – مساحة المنطقة المشدودة الفعالة في المقطع البيتوني وتحسب على أنها تساوي مساحة البيتون المشدود الذي ينطبق مركزها على مركز القضبان المشدودة، وتقسم هذه المساحة على عدد القضبان المشدودة كما مبين في الشكل (1–9).

d_c – سماكة طبقة التغطية وتقاس من الألياف الحدية المشدودة إلى مركز القضبان المشدودة الأقرب.

f_s – قيمة الإجهاد في قضبان التسليح الفولاذية عند حمولات معينة, وتحدد من نظرية المقطع المتشقق المرن.

h_1 – المسافة بين مركز التسليح المشدود وصولاً إلى المحور الحيادي.

h_2 – المسافة من الألياف الحدية المشدودة وصولاً إلى المحور الحيادي.

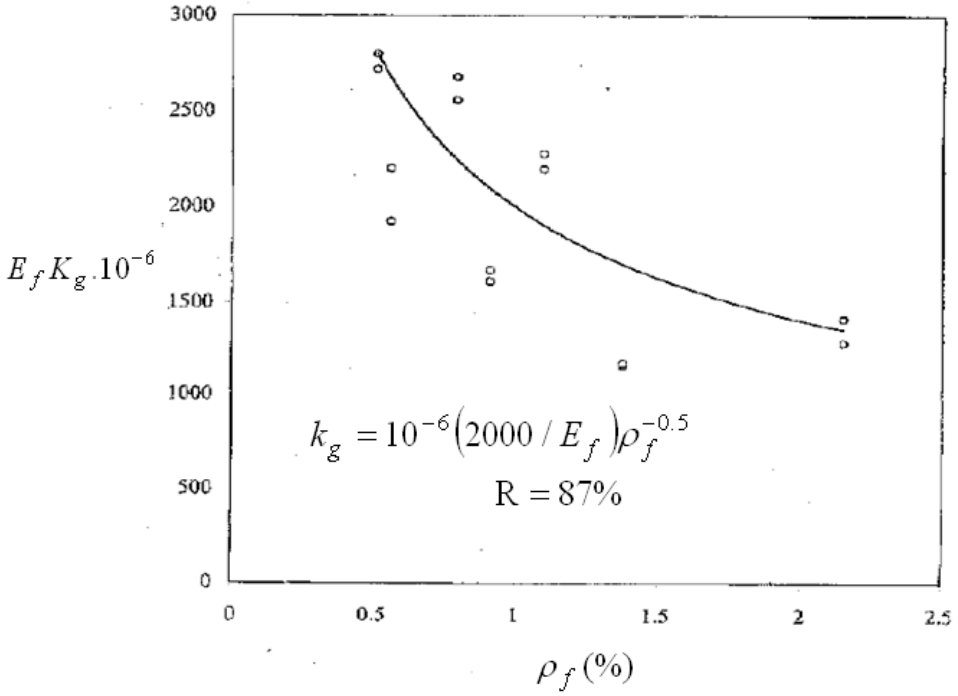
k_g – عامل قيمته ($11\times10^{-6}\,\mathrm{mm^2/N}$) من أجل الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ تقليدي.

يبين الجدول (1–14) أن عرض التشقق تابع يتعلق بنسبة التسليح, وعندما تزداد نسبة التسليح يتناقص عرض التشقق, لذلك فإن العامل k_g ليس ثابت القيمة في الجوائز المسلحة بـGFRP وإنما هو تابع تتعلق قيمته بنسبة التسليح المستخدمة ρ_{FRP}. وأكثر من ذلك وباعتبار أن معامل مرونة قضبان الـGFRP أقل من معامل مرونة الفولاذ فإن العامل k_g في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـGFRP رسم كتابع لقيمتين وهما نسبة التسليح ρ_{FRP} وعامل مرونة قضبان الـGFRP (E_F), كما هو مبين في الشكل (1–38), وباستخدام التحليل التكراري تمت كتابة علاقة لحساب k_g مع نسبة ارتباط مساوية 87% وهي تأخذ الشكل التالي:

$$k_g = 10^{-6}\left(\frac{2000}{E_f}\right)\rho^{-0.5} \qquad (78\text{-}1)$$

وبتعويض قيمة k_g في العلاقة (1–77) تتم كتابة علاقة لحساب عرض الشق في الجوائز المسلحة بقضبان من الـGFRP كما يلي:

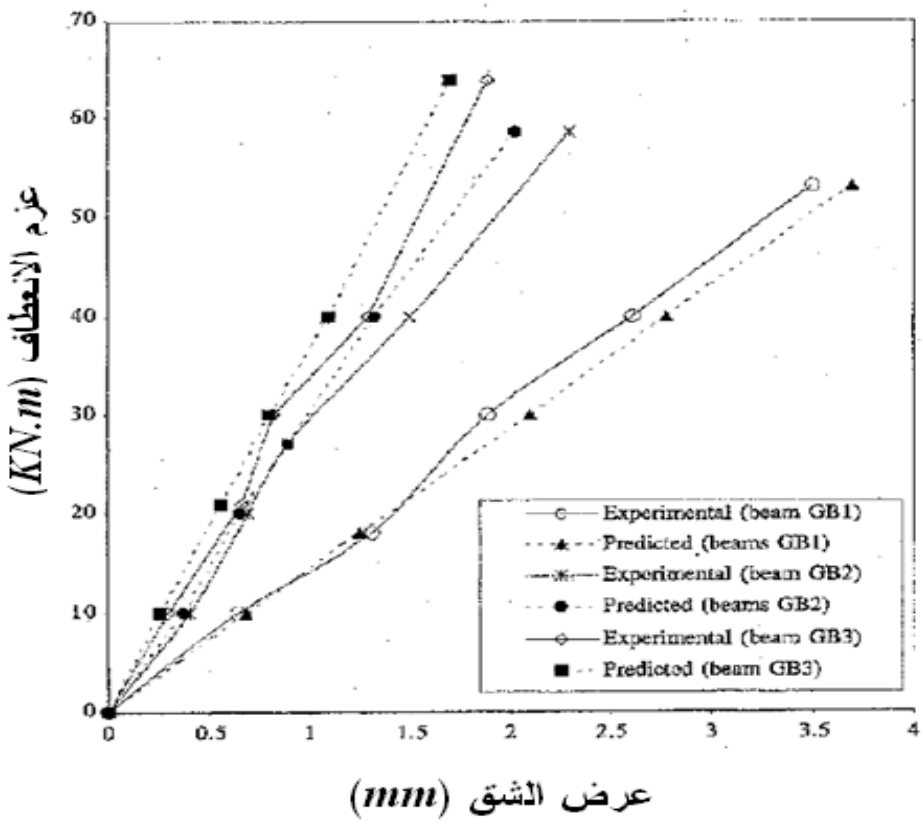
$$w = 10^{-6}\left(\frac{2000}{E_f}\right)\rho^{-0.5} f_s \frac{h_2}{h_1}\sqrt[3]{d_c A} \qquad (79\text{-}1)$$



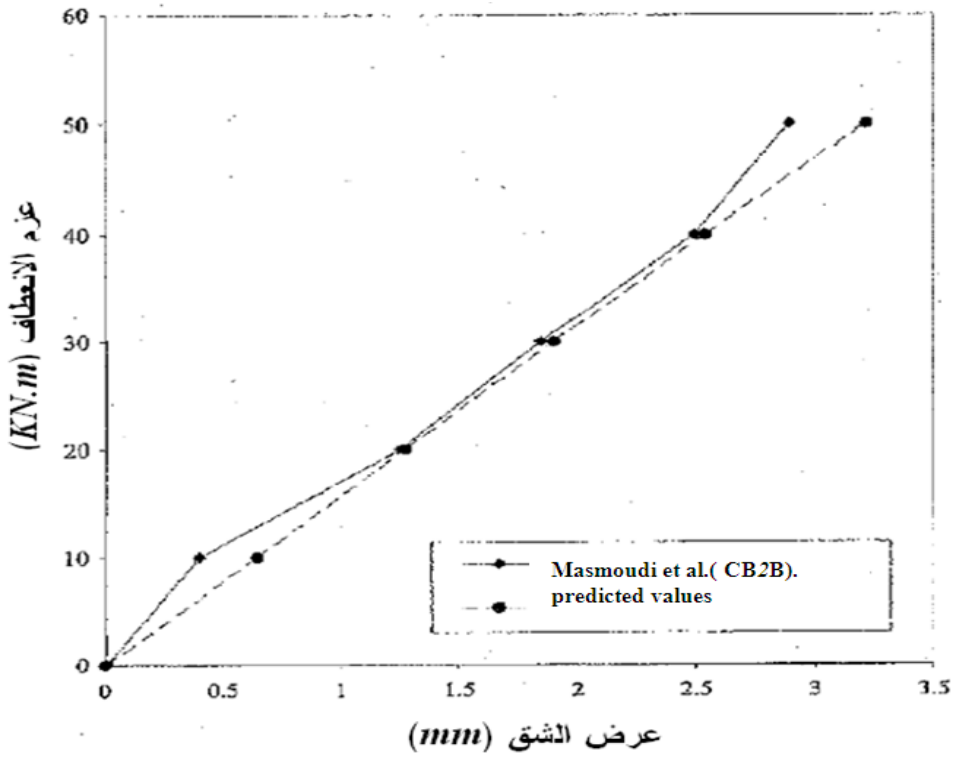
الشكل (1–38) العامل k_g كتابع لقيمتين وهما نسبة التسليح وعامل مرونة قضبان الـGFRP [21].

يبين الشكل (1–39) مقارنة بين القيم التجريبية والتحليلية لعرض الشق المشاهد والمحسوب بالعلاقة (1–79), وقد استخدمت العلاقة ذاتها في دراسات أخرى للتنبؤ بعرض الشق كالدراسة التي قام بها كل

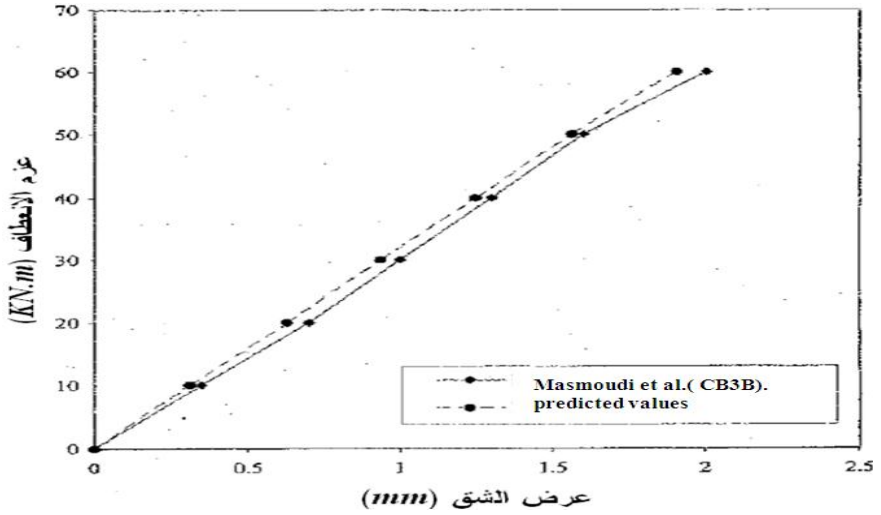
من: Masmoudi و Theriault و Benmokrane [29], ونتائجهم مبينة على الأشكال (1−40), (1−41), (1−42) بالتتالي.



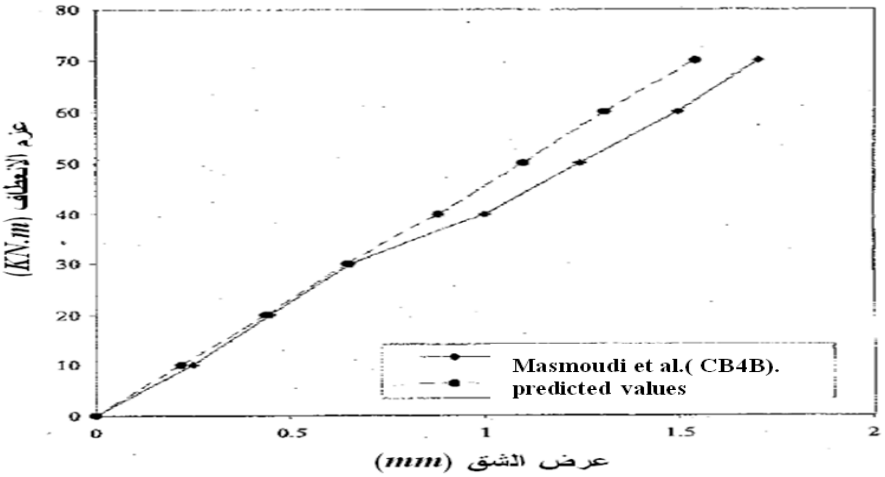
الشكل (1−39) مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المحسوبة تحليلياً وتجريبياً [21].



الشكل (1−40) مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi، وغيره مع المخططات المحسوبة تحليلياً باستخدام الموديل المقترح من أجل CB2B [21].



الشكل (1–41) مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi، وغيره مع المخططات المحسوبة تحليلياً باستخدام الموديل المقترح من أجل CB3B [21].

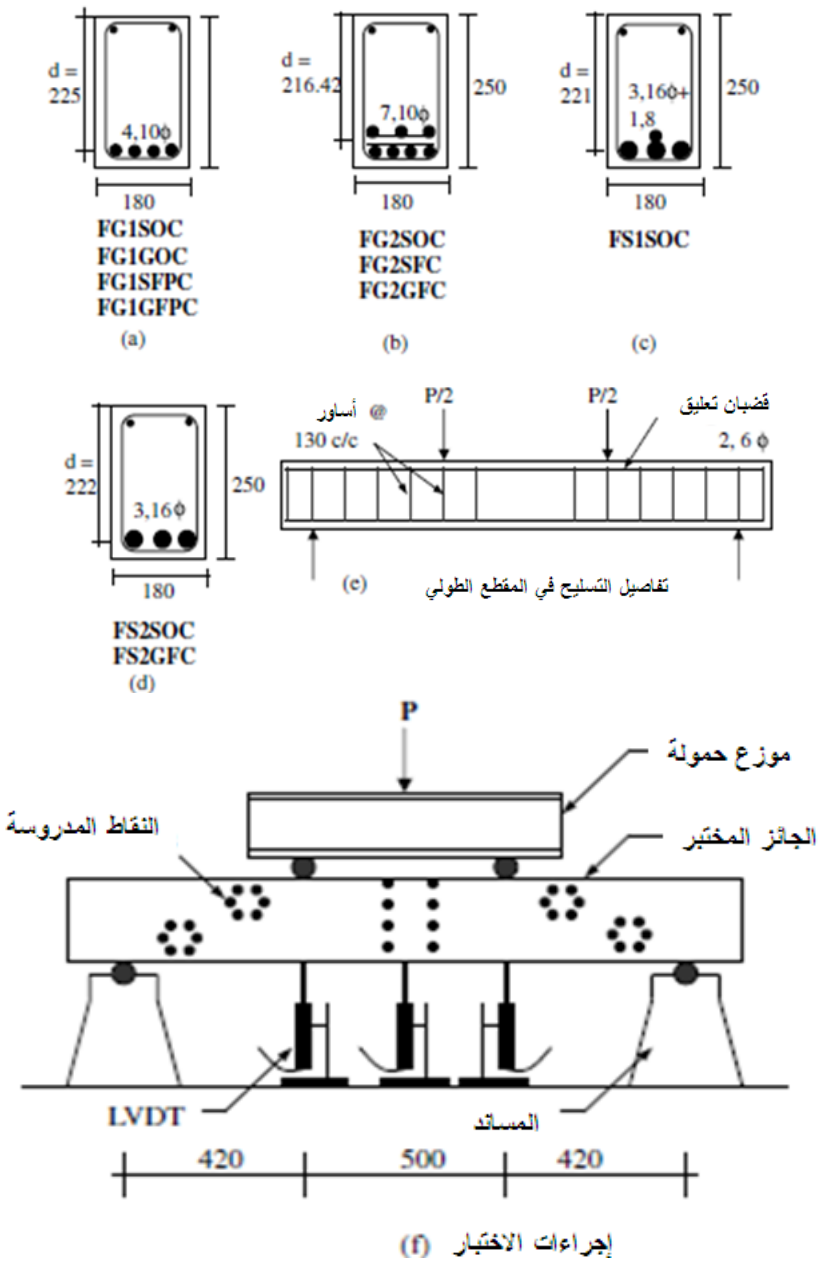


الشكل (1–42) مقارنة منحنيات (عزم – عرض التشقق) المقاسة تجريبياً من قبل Masmoudi، وغيره مع المخططات المحسوبة تحليلياً باستخدام الموديل المقترح من أجل CB4B [21].

1–4–5– متانة وقابلية الاستثمار للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـGFRP في العمل على الانعطاف [34].

Strength and serviceability performance of beams reinforced with GFRP bars in flexure[34].

تتضمن الدراسة المقدمة اقتراح نموذج رياضي عددي للتنبؤ بعرض الشقوق في مراحل التحميل المختلفة, وآخر للتنبؤ بقيمة السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بـGFRP وذلك باستخدام نموذج متاح في المراجع وهو يخص الباحث Razaqpur، واعتماداً على هذه الدراسة تم اقتراح موديل تحليلي لتحديد قدرة التحمل الأعظمية للجوائز المسلحة بـ GFRP، حيث يدخل بالحساب مقدار الانزلاق الحاصل بين قضبان التسليح والبيتون والذي حدد في التجارب العملية المنجزة, كما تم عرض برنامج تجريبي يتضمن عشر جوائز. ويبين الشكل (1–43) جميع التفاصيل المتعلقة بها وقد سلحت تسليحاً أحادياً على أساس الحالة الحدية.



الشكل (1-43) تفاصيل الجوائز المختبرة وطريقة التحميل[34].

في المرحلة الأولى من البرنامج التجريبي تم صب خمسة جوائز (بيتون معدل عالي المقاومة 65MPa), فيها جائز واحد مسلح بتسليح فولاذي تقليدي, أما الجوائز الأربعة الباقية فتم تسليحها بقضبان من الـGFRP وتقسم هذه الجوائز الأربعة من ناحية نوع البيتون كما يلي:

الجائز الأول بيتون عادي وأساور فولاذية, أما الجائز الثاني بيتون عادي وأساور من الـGFRP، والجائز الثالث فبيتونه معدل ومقوى بألياف بوليميرية (FPC) وأساور فولاذية, في حين أن الجائز الرابع ذو بيتون معدل ومقوى بألياف بوليميرية (FPC) وأساور من GFRP. وفي هذه المرحلة استخدمت قضبان GFRP مكونة من ألياف زجاجية ولاصق ايبوكسي, والجوائز الخمسة في هذه المرحلة صممت على حمولة قصوى (290KN).

وفي المرحلة الثانية من البرنامج التجريبي تم صب خمسة جوائز ببيتون عادي المقاومة (35MPa), ومن هذه الجوائز تم تسليح جائزين بفولاذ تقليدي وأحد هذين الجائزين ذو بيتون عادي وأساور فولاذية، أما

الثاني فأساوره من GFRP وبيتونه مقوى بألياف. والجوائز الثلاثة الباقية تم تسليحها بقضبان من الـGFRP وهي بدورها تقسم إلى:

الجائز الأول ذو بيتون عادي وأساور فولاذية، والثاني ذو بيتون مقوى بألياف وأساور GFRP، أما الثالث بيتونه مقوى بألياف وأساور فولاذية. وقضبان الـGFRP المستخدمة في هذه المرحلة مكونة من ألياف زجاجية ولاصق بوليستيري, وصممت جوائز هذه المرحلة على حمولة قصوى (225KN).

لقد تمت تسمية الجوائز بحسب نوعية التصميم والمواد المكونة لها كما يلي: الجوائز العاملة على الانعطاف أضيف لتسميتها حرف (F)، وجوائز المرحلة الأولى (I-1)، وجوائز المرحلة الثانية (II-2). أما نوع الأساور فتم الدلالة عليها كما يلي: الأساور الفولاذية (S) والأساور الزجاجية (G), والبيتون العادي (OC) والمقوى بألياف (FC), أما البيتون المقوى بألياف بوليميرية (FPC).

وكمثال عند القول FS1SOC هذا يعني أن الجائز يعمل على الانعطاف ومسلح تسليحاً طولياً فولاذياً واختبر في المرحلة الأولى وبيتونه معدل عالي المقاومة والأساور فيه فولاذية. ويبين الجدول (1−15) التفاصيل المتعلقة بالجوائز وكيفية تصميمها.

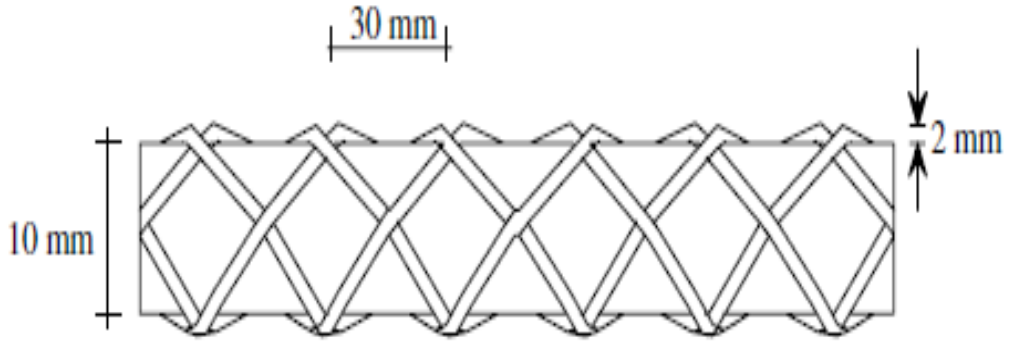
استخدم نوعان من قضبان الـGFRP، النوع الأول بمقاومة قصوى على الشد $f_{gu}=971MPa$ وفيها نسبة الألياف الزجاجية 66.67% واللاصق من نوع ايبوكسي. أما النوع الثاني من قضبان الـGFRP فهو مماثل للنوع الأول ومقاومته القصوى على الشد $f_{gu}=466MPa$ ونسبة الألياف الزجاجية 67.77% واللاصق من نوع بوليستر. ويعود الاختلاف في المقاومة على الشد لهذين النوعين من القضبان إلى اختلاف مقاومة اللاصق المستخدم في تكوينها, حيث أن مقاومة اللاصق تؤثر على إجهادات القص والتماسك الحاصلة في الألياف المكونة للقضبان.

الجدول (1−15) تفاصيل الجوائز المختبرة في الدراسة [34].

الرقم المتسلسل	اسم الجائز	نوع القضبان	التسليح الطولي [a]	التسليح العرضي[a] (أساور مستطيلة مكونة من جزأين (G^b))	المقاومة المكعبية للبيتون على الضغط MPa (f_{cu})
مرحلة I – بيتون معدل عالي المقاومة (65 MPa)					
1	FS1SOC	فولاذ	3Ø16+1Ø8	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	65.23
2	FG1SOC	GFRP Epoxy	4Ø10	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	67.77
3	FG1GOC		4Ø10	سواره G^b بتباعد 130 سم	63.84
4	FG1SFPC		4Ø10	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	44.92
5	FG1GFPC		4Ø10	سواره G^b بتباعد 130 سم	39.26
مرحلة II – بيتون عادي ذو مقاومة (35 MPa)					
6	FS2SOC	فولاذ	3Ø16	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	42.28
7	FS2GFC		3Ø16	سواره G^b بتباعد 130 سم	37.82
8	FG2SOC	GFRP polyester	7Ø10	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	41.82
9	FG2SFC		7Ø10	سواره Ø8 بتباعد 130 سم	38.26
10	FG2GFC		7Ø10	سواره G^b بتباعد 130 سم	38.26

تحتوي القضبان على نسبة عالية من الألياف وبالتالي انقطاعها يتعلق بمقاومة اللاصق المستخدم في صناعتها حيث يعتبر اللاصق هو الرابط الأضعف في تكوينها.

لنوعي القضبان المستخدمة في الدراسة نفس عامل المرونة وهي ذات قطر 10mm، وبينت التجارب المخبرية التي أجراها الباحثون Orozco و Maji و Thiagarajan [34]، أن معالجة السطوح الملساء لقضبان الـFRP ضرورية لتحسين التحامها مع البيتون في الجوائز البيتونية المسلحة بها. لذلك استخدموا في الدراسة قضبان لها جديلتان كل واحدة بقطر 2mm ومغطسة بلاصق ايبوكسي وهي تلتف بشكلٍ حلزوني حول القضبان الزجاجية الملساء ذات القطر 10mm، وتمت إضافة هذه الجدائل ضمن مرحلة ثانية للتصنيع بغية تحسن التحامها بالبيتون كما هو مبين في الشكل(1-44).

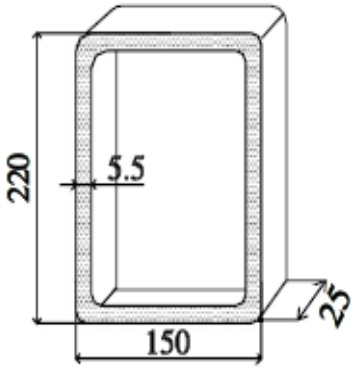


الشكل (1–44) رسم توضيحي لسطح قضيب التسليح GFRP قطر 10mm
وعليه جدائل من ألياف قطر 2mm ملصوقة بالايبوكسي [34].

يعرض الجدول (1–16) النتائج التجريبية لشد القضبان الفولاذية والـGFRP, وقد استخدمت أساور فولاذية مغلقة كتسليح عرضي وأساور من الـGFRP ذات مقطع مستطيل كما هو مبين في الشكل(1–45). أما أساور الـGFRP فقد تم تحضيرها عن طريق نشر أنبوب ذي مقطع مستطيل مصنوع من GFRP بطريقة نسج الألياف وتمت عملية النشر بحيث نحصل على اسواره عرضها 25mm, وقد حسب عرض أسواره GFRP بحيث تقاوم بشكلٍ مماثل لاسواره فولاذية قطرها 8mm.

الجدول (1–16) نتائج اختبار الشد لقضبان وأساور التسليح في الدراسة [34].

مواد الأساور والقضبان	نتائج تجربة الشد			
	معامل المرونة MPa	إجهاد الخضوع MPa	المقاومة القصوى على الشد MPa	التشوه الأقصى
فولاذ أملس (Ø6mm)	195.0	262	280	0.0326
فولاذ محلزن (Ø8mm و Ø16mm)	189.8	440	557	0.0382
GFRP(G1) ايبوكسي	49.0	–	972	0.0199
GFRP(G2) بوليستر	49.6	–	464	0.0094
أساور GFRP	13.3	–	205	0.0154

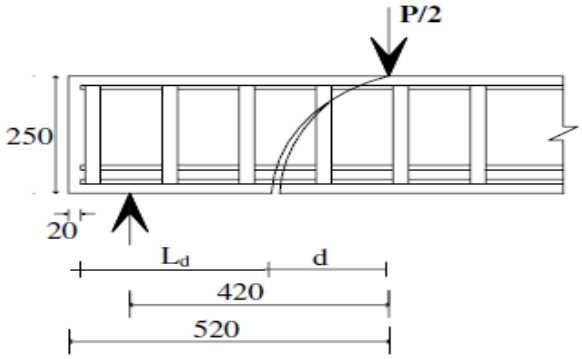


الشكل (1−45) الأبعاد الهندسية لأساور الـGFRP [34].

تشير هذه الدراسة إلى أنه أثناء إجراء التجارب المخبرية على الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان GFRP، لوحظ حصول انزلاق(slip) لقضبان التسليح في المراحل النهائية، وكذلك دوران للكتل البيتونية المتشققة، في حين أن التحميل لم يصل إلى قدرة التحمل القصوى للجوائز. وانطلاقاً من هذه الحقيقة تم اقتراح موديل تحليلي للتنبؤ بقدرة التحمل القصوى للجوائز العاملة على الانعطاف والمسلحة بـ GFRP وكذلك التنبؤ بمختلف المتطلبات الأخرى تحت تأثير الحمولات الاستثمارية مثل عرض التشققات والسهوم في أي مرحلة من مراحل التحميل وخصوصا في لحظة الانهيار.

- **<u>التنبؤ بقدرة التحمل القصوى.</u>**

تبين من خلال المشاهدة أن الشق الحرج في الجوائز البيتونية المسلحة بـ GFRP يميل بزاوية 45 درجة كما هو مبين في الشكل (1−46), ويبدأ هذا الشق على مسافة تساوي الارتفاع الفعال للجائز (d) انطلاقاً من نقطة تطبيق القوة في مجال القص للجائز.



الشكل (1−46) الأبعاد الهندسية وفق الموديل التحليلي للجائز المسلح بـGFRP [34].

وفقاً للدراسة [34] يمكن حساب قدرة التحمل بطريقة تحليل المقطع الحرج في المرحلة التي يحصل فيها انزلاق لقضبان التسليح، وذلك لأنه بعد هذه المرحلة يهمل أي تعاظم للإجهادات في قضبان التسليح كما هو مبين في الشكل(1−47). وتعطى القيمة الحدية للتشوه في قضبان التسليح في المرحلة التي يصبح الانزلاق هو المسيطر كحالة انهياريه بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon_{b-slip}=\frac{\tau_b L_d(\pi\phi_b)}{E_b(\pi\phi_b^2/4)} \qquad (80-1)$$

حيث:

L_d – طول الإرساء لقضبان التسليح كما هو مبين في الشكل(1–47).

τ_b – القيمة العظمى لإجهاد القص على التماسك في قضيب التسليح bond shear ويحسب من تجارب اقتلاع قضبان الـFRP المغموسة في البيتون (تجارب pull-out) كما هو مبين في الشكل(1-47).

ϕ_b – قطر قضبان التسليح FRP و E_b – عامل مرونة قضبان التسليح FRP.

إن التشوه في البيتون على عمق يساوي x_i من أقصى الطرف المضغوط في المقطع يحسب بالعلاقة التالية:

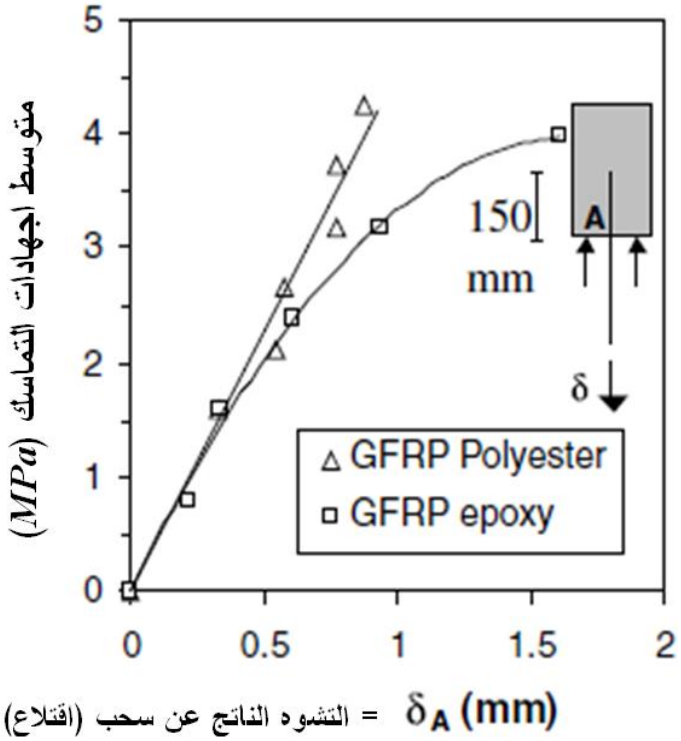
$$\varepsilon_{ci} = \frac{\varepsilon_{b-slip}}{(d_b - x_u)}(x_u - x_i) \qquad (81\text{-}1)$$

حيث:

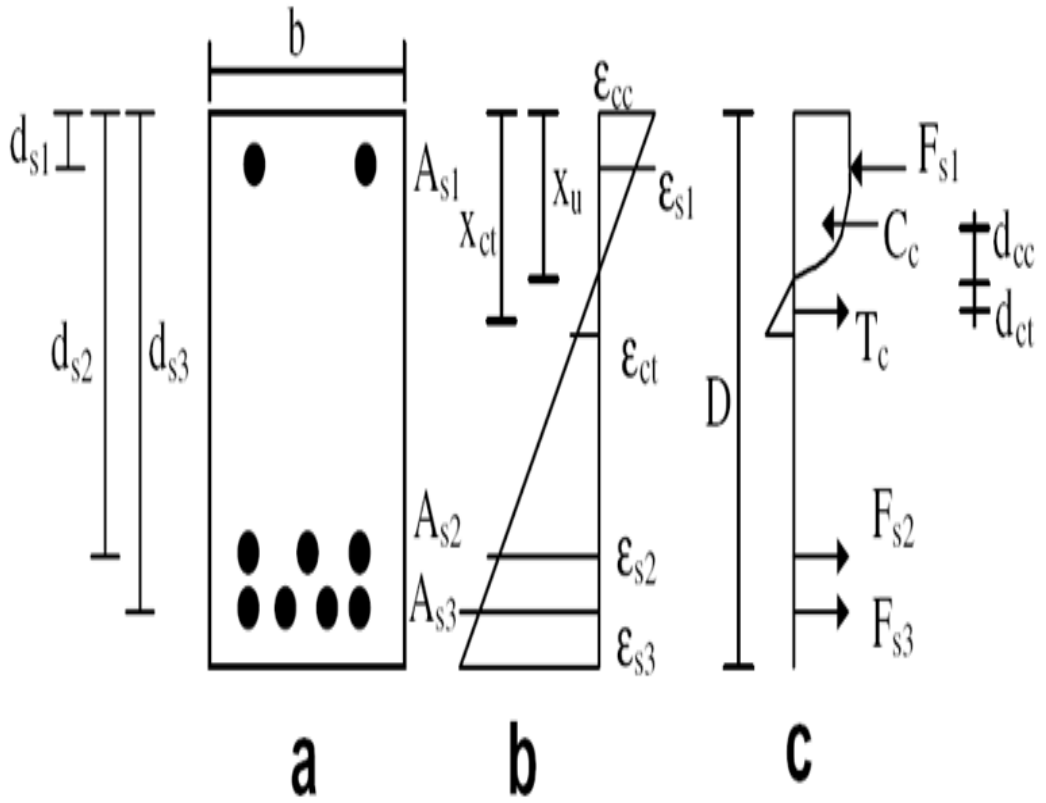
d_b – الارتفاع الفعال للجائز ويحسب على أنه المسافة بين أقصى ليف بيتوني مضغوط في المقطع إلى مركز قضبان التسليح السفلية القريبة من الطرف المشدود، ويساوي قيمة d_{s3} كما هو مبين في الشكل (1-48) أي: يساوي(الارتفاع الكلي – طبقة التغطية حتى قضبان التسليح – 0.5 x قطر قضيب التسليح).

x_u – ارتفاع المحور الحيادي للمقطع، ويبين الشكل (1-48) التشوهات الخطية على طول ارتفاع المقطع.

وفي الكود الهندي IS 456 تعتبر الإجهادات في منطقة البيتون المضغوط على شكل قطع مكافئ في القسم الأول حتى يصبح التشوه مساوياً 0.002 ويصبح ثابتاً بعد ذلك.



الشكل(1–47) نتائج تجارب اقتلاع قضبان الـGFRP المغموسة في البيتون (تجارب pull-out)[34].



الشكل (1−48) مخطط الإجهادات والتشوهات على طول ارتفاع المقطع،

a- مقطع الجائز، b- التشوهات في البيتون، c− الإجهادات في البيتون ومحصلات القوى [34].

تحسب محصلة قوة الضغط في البيتون بالعلاقة التالية:

$$C_c = -\begin{cases} \frac{2}{3} f_{cu}\left[2\frac{\varepsilon_{cc}}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{0.002}\right)^2\right] b x_u \ ; \text{for } 0 \le \varepsilon_{cc} \le 0.002 \\ \frac{2}{3} f_{cu}\left(\frac{0.002}{\varepsilon_{cc}} x_u\right) b + f_{cu}\left(x_u - \frac{0.002}{\varepsilon_{cc}} x_u\right) b \ ; \text{for } 0.002 \le \varepsilon_{cc} \le 0.0035 \\ 0.00 \ ; \text{if } \varepsilon_{cc} \ge 0.0035 \end{cases} \qquad (82\text{-}1)$$

حيث: f_{cu} − المقاومة المكعبية للبيتون، ε_{cc} − تشوه البيتون في أقصى ليف مضغوط ويحسب بالعلاقة (1−81) على فرض أن $x_i = 0$ و b = عرض المقطع.

تبقى مساهمة البيتون في تحمل القوى الشادة موجودة حتى مرحلة ظهور التشققات وبعد ذلك تصبح مهملة، وتحسب محصلة القوى الشادة في المقطع البيتوني والواقعة تحت المحور الحيادي T_c بالعلاقة (1−83).

$$T_c = \frac{1}{2} f_{ct}\left(x_{ct} - x_u\right) \qquad (83\text{-}1)$$

f_{ct} − مقاومة البيتون على الشد وتحسب بالعلاقة (2−84) كما هو مقترح في الكود الهندي IS 456.

$$f_{ct} = 0.7\sqrt{f_{cu}} \qquad (84\text{-}1)$$

χ_{ct} – ارتفاع البيتون من أقصى الطرف المضغوط في المقطع إلى نقطة تشكل الشق ويحسب بالعلاقة(1–81). حيث يتم التعويض كما يلي: $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{ct}$ ، f_{cu} – المقاومة المكعبية للبيتون ، ε_{ct} – تشوه البيتون عند التشقق ويحسب بالعلاقة (1–85) .

$$\varepsilon_{ct} = f_{ct} / E_{ct} \qquad (85\text{-}1)$$

E_{ct} – عامل المرونة الأولي للبيتون على الشد، ويحسب بالعلاقة (1–86) وهو عامل اقترحه الباحث Zhuang ويدعى (Initial tangent modulus of concrete in tension).

$$E_{ct} = E_c / 2 \qquad (86\text{-}1)$$

E_c – عامل المرونة الأولي للبيتون على الضغط والمقترح في الكود الهندي IS 456 ويدعى (Initial tangent modulus of concrete in compression).

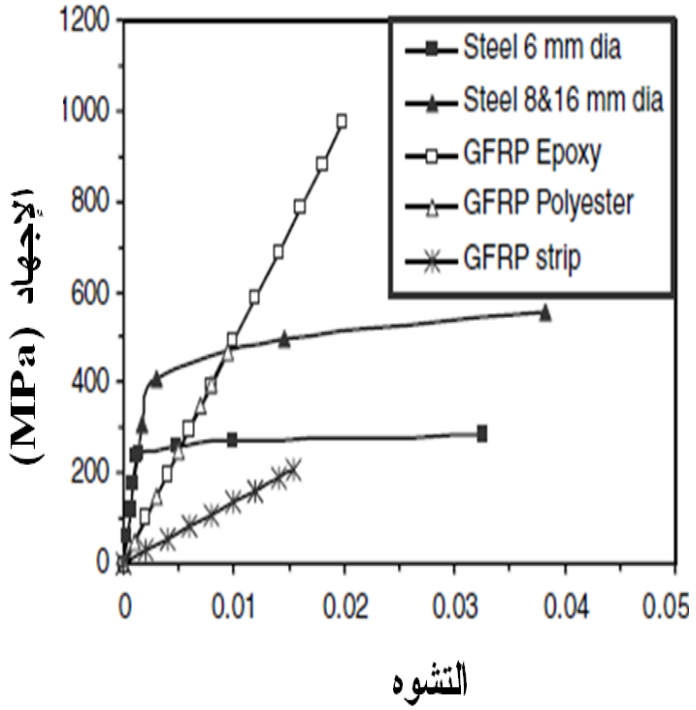
$$E_c = 5000\sqrt{f_{cu}} \qquad (87\text{-}1)$$

تحسب القوى الداخلية في قضبان التسليح F_{si} بالعلاقة التالية:

$$F_{si} = f_{si} A_{si} \qquad (88\text{-}1)$$

حيث: f_{si} – الإجهاد الأقصى في قضبان التسليح، A_{si} – مساحة مقطع قضبان التسليح.

يعتمد التحليل المقطعي في حساب قدرة تحمل الجائز على المرحلة التي يسيطر فيها انسلاخ قضبان التسليح كشكل أساسي لانهيار الجائز وفقاً [34]. وتحسب قيمة الإجهادات في قضبان التسليح f_{si} اعتماداً على تجارب الشد ومن منحني (إجهاد– تشوه) كما هو مبين في الشكل (1–49).



الشكل(1–49) منحني(إجهاد . تشوه) لقضبان التسليح [34].

تعتبر قيمة التشوه في قضبان التسليح الواقعة على المستوى (i) من المقطع مساوية لقيمة التشوه في البيتون المحيط به في نفس المستوى، وتحسب بالعلاقة (1–81) بعد تعويض قيمة عمق هذا المستوى

عن الطرف الأقصى المضغوط للمقطع (x_i). يتشكل في المرحلة النهائية للانهيار شق انزلاقي على طول قضبان التسليح الطولية في منطقة القص وصولاً إلى المساند, ويحسب عمق المحور الحيادي للمقطع x_u اعتماداً على العلاقة التالية القائمة على مبدأ توازن القوى.

$$\left|C_c + T_c + \sum_i F_{si}\right| \le 0.01 \ \text{kN} \qquad (89\text{-}1)$$

وتحسب قدرة التحمل القصوى للجائز اعتماداً على العزم المقاوم الأعظمي M_u وعلى أبعاد الجائز وفق العلاقة التالية:

$$P = 2(M_u / a) \qquad (90\text{-}1)$$

حيث أن قيمة العزم المقاوم الأعظمي تعطى بالعلاقة التالية:

$$M_u = C_c d_{cc} + T_c d_{ct} + \sum_i F_{si}(d_{si} - x_u) \qquad (91\text{-}1)$$

حيث:

a – طول مجال القص، وبقية الأبعاد d_{cc}، d_{ct}، d_{ct} مبينة على الشكل (1–48).

تحسب الحمولة المسببة للشق الأول اعتماداً على قيمة التشوه في أقصى الطرف السفلي المشدود للمقطع وهو التشوه في البيتون ε_{ct}, ويعتمد هذا الموديل التحليلي على عمل الجائز على الانعطاف وتعتبر إجهادات الشد في قضبان التسليح مساوية لإجهادات الشد المحورية الناتجة عن تجارب اقتلاع قضبان GFRP المغموسة في البيتون (تجارب pull-out) في العلاقتين (1–80) و(1–81).

- **<u>– التنبؤ بعرض التشققات باستخدام الموديل التحليلي[33].</u>**

يستخدم الموديل التحليلي للتنبؤ بعرض الشق الأعظمي w في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من GFRP في مختلف مراحل التحميل وهو يعطى بالعلاقة التالية:

$$w = \frac{0.2}{E_{FRP}} (\rho_{FRP})^{-0.5} f_{si} \frac{(D - x_u)}{(d_{si} - x_u)} \sqrt[3]{d_c A_{ct}} \qquad (92\text{-}1)$$

$$A_{ct} = \frac{2(D-d)b}{\text{number of bars}} \qquad (93\text{-}1)$$

E_{FRP} – عامل مرونة قضبان FRP، ρ_{FRP} – نسبة التسليح بقضبان الـFRP، f_{si} – قيمة الإجهادات المحورية في قضبان التسليح FRP التي تتوضع على عمق يساوي d_{si} (في الجوائز التي تسلح بأكثر من طبقة من القضبان، تؤخذ قيمة الإجهادات المحورية في القضبان الأقرب للسطح المشدود أي على عمق يساوي d_{s3}).

D – الارتفاع الكلي لمقطع الجائز، d_c – سماكة طبقة التغطية.

A_{ct} – مساحة البيتون الفعلية الخاضعة للشد ولها مركز ينطبق على مركز قضبان التسليح وتوزع هذه المساحة حول قضبان التسليح السفلية بالتساوي.

- **<u>– التنبؤ بقيمة السهم باستخدام الموديل التحليلي[34].</u>**

تحدد قيمة السهم باستخدام العلاقة التالية والمقترحة من قبل الباحث Razaqpur.

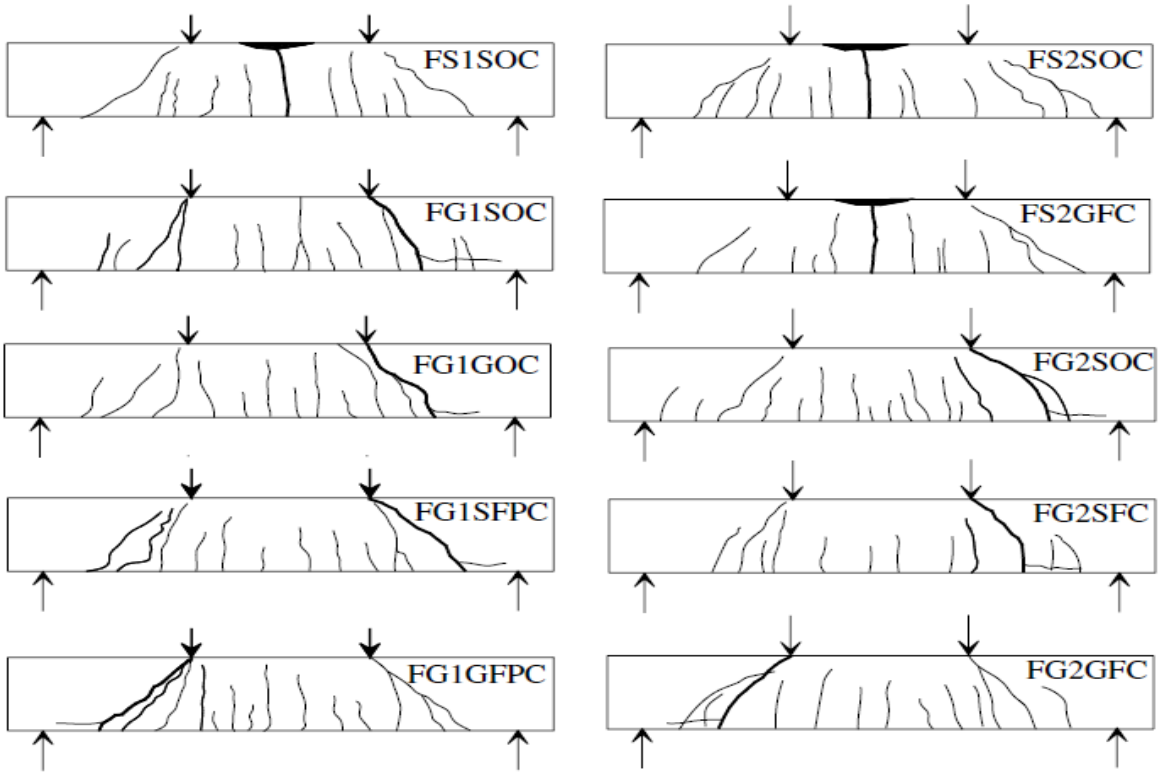
$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{48E_c I_{cr}}\left[3\left(\frac{a}{L}\right) - 4\left(\frac{a}{L}\right)^3 - 8\eta\left(\frac{L_g}{L}\right)^3\right] \qquad (94\text{-}1)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \qquad (95\text{-}1)$$

حيث:

L– الطول الصافي للجائز المستند استناداً بسيطاً، E_c– تحسب بالعلاقة (1–87)، I_{cr}– عزم عطالة المقطع المتشقق حول محوره الحيادي ويحدد اعتماداً على الشكل (1–48)، L_g– المسافة بين المساند للجائز غير المتشقق(وهي قيمة مقترحة من قبل الباحثRazaqpur)، η– معامل يحسب بالعلاقة (1–95)، I_g– عزم عطالة المقطع حول محوره المركزي.

يبين الشكل(1–50) انتشار التشققات على طول الجوائز وذلك عند الحالة الحدية, وتشير الدراسة إلى أنه في الجوائز المسلحة بالفولاذ كان الانهيار على شكل تحطم البيتون المضغوط. أما فيما يتعلق بالجوائز المسلحة بالـGFRP لوحظ أنه في أحد هذه الجوائز تطور الشق الشاقولي في منطقة القص بشكلٍ حرج وامتد إلى الأمام باتجاه نقطة تطبيق القوة عند الحالة الحدية, وانهارت هذه الجوائز عند حمولات أقل من الحمولات التصميمية وكان الانهيار ناتجاً عن انسلاخ البيتون عن القضبان حيث انسلخ البيتون عن قضبان الـGFRP عند مستوى يوازي مستوى قضبان التسليح.



الشكل(1–50) أشكال الشقوق في الجوائز المختبرة عند الحالة الحدية [34].

يبين الجدول(1–17) الحمولات المسببة للشق الأول والحمولات الحدية, حيث تشير الدراسة إلى أن التقريب المقدم تنبأ بشكلٍ دقيق بقدرة تحمل الجوائز المسلحة بـ GFRP عند مراحل التحميل المختلفة.

الجدول (1–17) مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية المتنبأ بها في الجوائز المختبرة في الدراسة [34].

الرقم المتسلسل	اسم الجائز	الحمولة المسببة للشق الأول			قدرة التحمل الأعظمية		
		P_{cro} (KN)	P_{crp} (KN)	$\frac{P_{crp}}{P_{cro}}$	P_{uo} (KN)	P_{up} (KN)	$\frac{P_{up}}{P_{uo}}$
1	FS1SOC	72.85	–	–	299.20	–	–
2	FG1SOC	74.05	70.93	0.96	174.24	155.87	0.89
3	FG1GOC	71.75	68.59	96	168.96	155.62	0.92
4	FG1SFPC	59.55	56.28	0.94	163.08	153.89	0.94
5	FG1GFPC	55.46	52.17	0.94	161.92	153.02	0.95
6	FS2SOC	56.86	–	–	234.53	–	–
7	FS2GFC	51.92	–	–	221.10	–	–
8	FG2SOC	58.03	55.43	0.96	194.57	195.00	1.00
9	FG2SFC	56.35	52.77	0.94	187.33	194.00	1.04
10	FG2GFC	54.41	52.77	0.97	185.50	194.00	1.05
القيمة المتوسطة		–	–	0.95	–	–	0.97
الانحراف المعياري		–	–	0.01	–	–	0.06

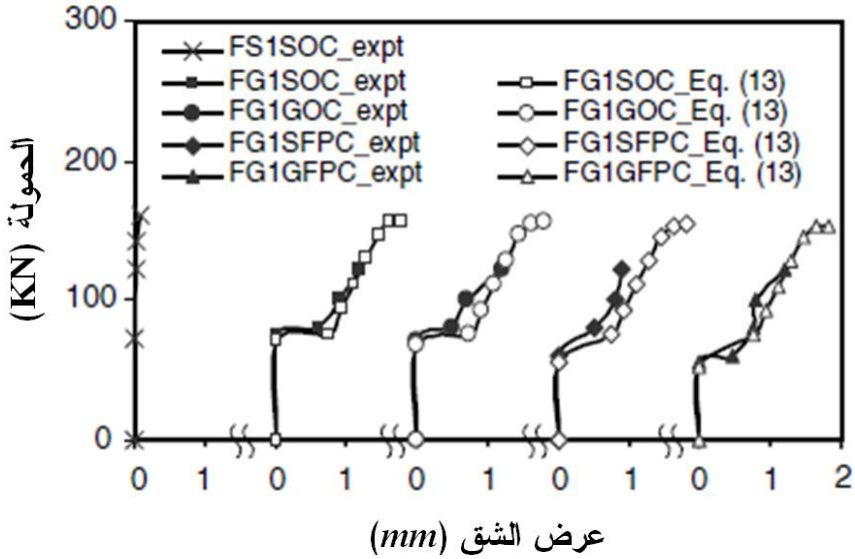
P_{cro} – قيمة الحمولة المسببة للتشقق (تجريبياً).

P_{crp} – قيمة الحمولة المسببة للتشقق المتنبأ بها حيث: $x_{ct} = D$ وفق الشكل (1–48).

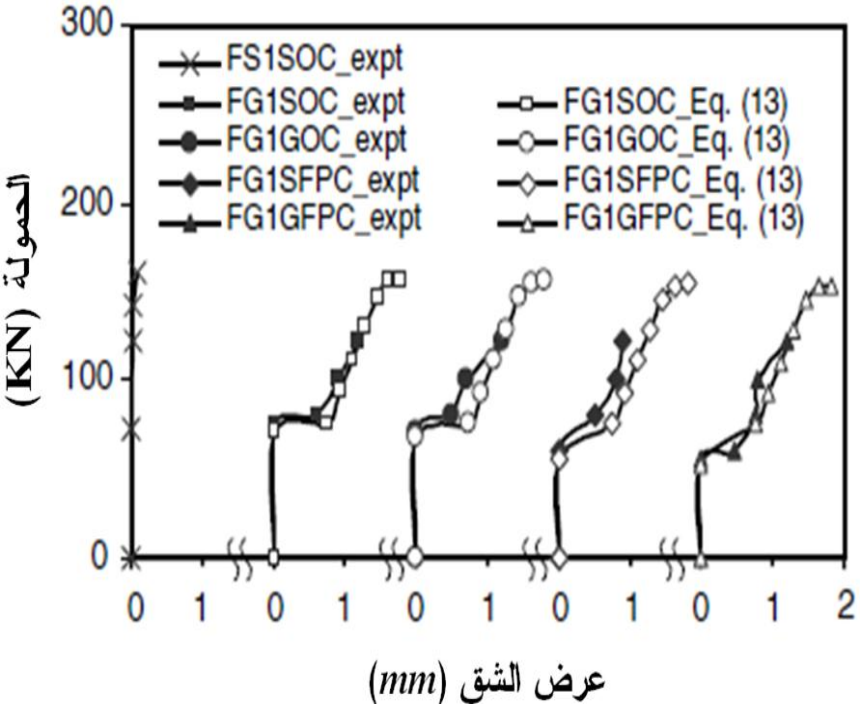
P_{uo} – قيمة الحمولة الحدية (تجريبياً).

P_{up} – قيمة الحمولة الحدية المتنبأ بها، و $\varepsilon_{s3} = \varepsilon_{b-slip}$.

يبين الشكلان (1–51) و(1–52) عرض الشقوق في الجوائز المختبرة عند مراحل تحميل مختلفة حيث كان عرض الشقوق في الجوائز المسلحة بـGFRP أكبر من عرض الشقوق في الجوائز المسلحة بالفولاذ, بسبب انخفاض صلابة قضبان الـGFRP.

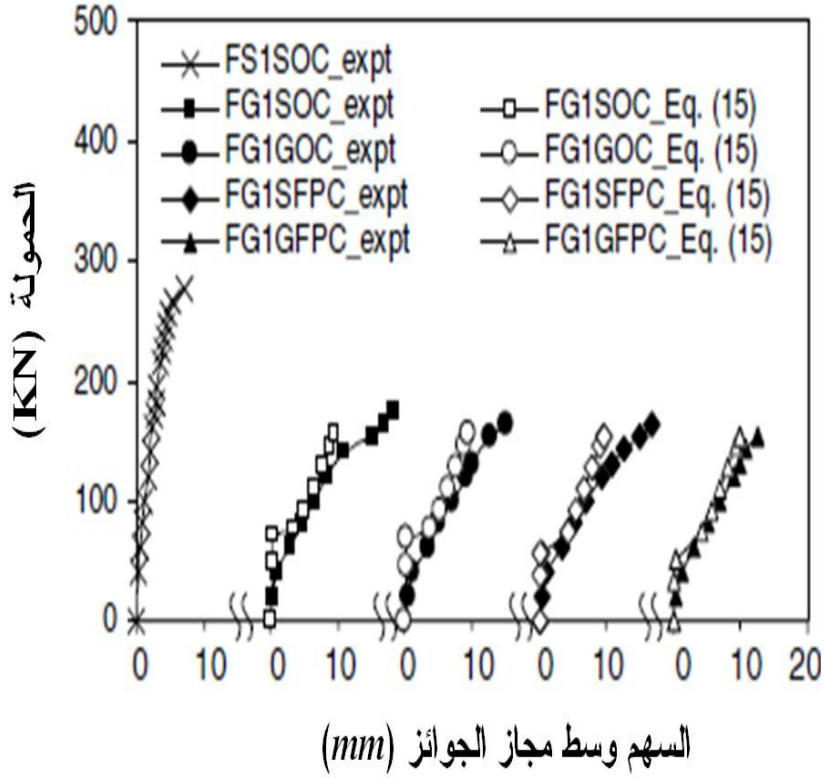


الشكل(1–51) منحنيات (حمولة – عرض الشق) في جوائز المرحلة الأولى[34].

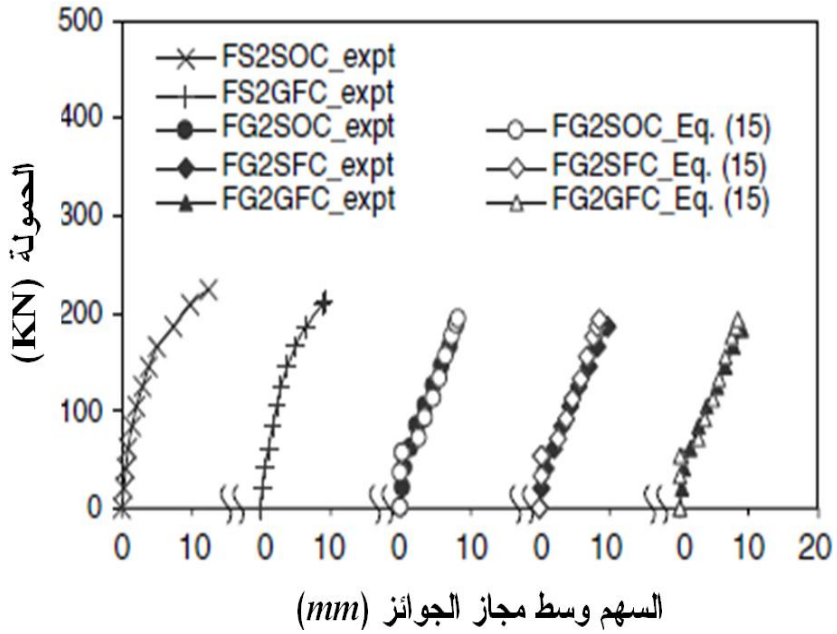


الشكل(1–52) منحنيات (حمولة – عرض الشق) في جوائز المرحلة الثانية[34].

يبين الشكلان (1–53) و(1–54) مقارنة منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المسلحة بـGFRP وفقاً للقيم التجريبية والتحليلية المتنبأ بها, وتشير المقارنة المبينة في [34] إلى أن التقريب المقدم والمعطى بالعلاقة (1–87) والذي يحدد قيم السهم يتنبأ بشكلٍ جيد ومعقول بقيم السهم عند مراحل التحميل المختلفة.



الشكل(1–53) منحنيات (حمولة – سهم) في منتصف جوائز المرحلة الأولى[34].



الشكل(1−54) منحنيات (حمولة – سهم) في منتصف جوائز المرحلة الثانية[34].

1−4−6− التنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية[37].

Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods[37].

تعتمد هذه الدراسة على النتائج التجريبية الواردة في الدراسة السابقة[21]، وهي تبين أنه يمكن استخدام علاقات الكودACI440.1R-03 [5]، للتنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بطبقة واحدة من قضبان الـFRP, في حين أنه يلزم إجراء تعديل على بعض العوامل في ذلك الكود عند استخدام طبقتين من قضبان الـFRP. وكما ذكر سابقاً في [21]، فقد تم اختبار ستة جوائز محاكية للجوائز العادية ومسلحة بنسب تسليح مختلفة من قضبان الـGFRP وقسمت إلى ثلاث مجموعات, ويبين الجدول(1−12) جميع التفاصيل المتعلقة بها وقد تم اختبارها على الانعطاف كما هو مبين على الشكل(1−32).

يبين الجدول (1−13) قيم ρ_{bal} وقدرة التحمل القصوى بالإضافة لأشكال الانهيار المشاهدة في الجوائز المختبرة, ففي البداية وقبل أن تتشقق الجوائز كانت منحنيات (عزم− سهم) خطية, وهذا ينسب إلى الخصائص المرنة الخطية لقضبان الـGFRP وللبيتون. ومع زيادة الحمولات يحدث التشقق في منطقة العزم الثابت حيث يصبح العزم المطبق أكبر من عزم التشقق مما يؤدي لتناقص الصلابة, كما أن اتساع التشققات في الجوائز البيتونية المسلحة بـGFRP ينسب إلى انخفاض معامل مرونة قضبان الـGFRP. ويمكن حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية باستخدام عزم العطالة الفعال الثابت والمعطى بالكود ACI 318 [4]، حسب العلاقة (1−96) التي تستند إلى سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ عند التحميل بحمولات استثمارية.

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (96\text{-}1)$$

حيث: I_g – عزم عطالة المقطع, I_{cr} – عزم عطالة المقطع المتشقق الموافق, M_a – العزم الناتج عن حمولات استثمارية. M_{cr} – العزم المسبب للتشقق.

واعتماداً على دراسات سابقة ولاسيما (Toutanji و Masmoudi و Benmokrane و Yost) والمنشورة في [29]، لوحظ أن العلاقة (1–96) تبالغ في مقدار عزم العطالة الفعال للجائز المسلح بنسب تسليح منخفضة من الـGFRP, وهذا يؤدي إلى التقليل من قيمة السهم الأعظمي الحاصل. والشكل (1–31) يبين تأثير التسليح الطولي بقضبان الـFRP على الاختلاف بين السهوم المحددة تجريبياً من خلال الدراسات السابقة، والسهوم المحددة من خلال العلاقة (1–96) عند حمولات تساوي 50% من الحمولات الأعظمية.

ومن الشكل(1–31) يتبين أيضاً أنه عند التسليح بقضبان من الـFRP بنسب تسليح كبيرة فإن العلاقة (1–96) تتنبأ بالسهم بشكلٍ معقول لذلك فالسهم المحسوب في الجوائز المسلحة بالـGFRP بنسب تسليح أقل من 1%، أقل مما هو عليه في الواقع.

وضعت علاقة معدلة لعزم العطالة الفعال في الكود ACI440.1R-03 [5] كما يلي:

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3 \beta_d\, I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (97\text{-}1)$$

حيث:

$$M_{cr} = \frac{f_{cr} \cdot I_{cr}}{y_b}$$

$$\beta_d = \alpha_b \left[\frac{E_f}{E_s} + 1\right]$$

α_b – عامل يساوي 0.5 وهو عامل الالتحام بين القضبان والبيتون.

I_g – عزم عطالة المقطع $\left(\frac{bh^3}{12}\right)$.

I_{cr} – عزم عطالة المقطع المتشقق ويعطى بالعلاقة التالية:

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{12} \cdot k^3 + n_f \cdot A_f \cdot d^2 \cdot (1-k)^2 \qquad (98\text{-}1)$$

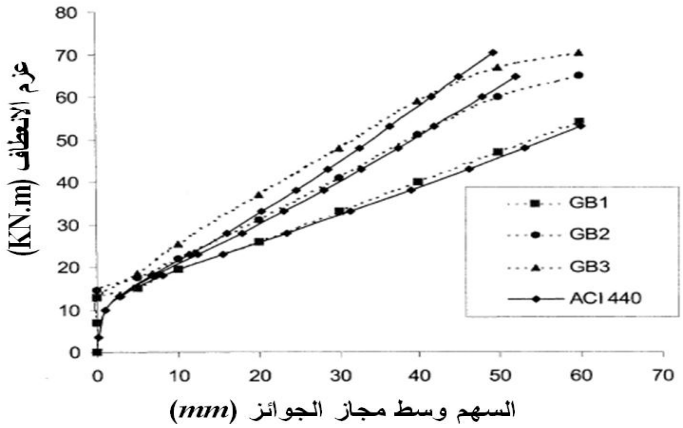
d – الارتفاع الفعال لمقطع الجائز البيتوني.

k – ثابت يحسب بالعلاقة: $k = \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f$ (99-1) ، حيث: $n_f = \frac{E_f}{E_c}$

E_f – معامل مرونة قضبان الـFRP , $E_c = 4560\sqrt{f'_c}$ (Mpa) , $f_{cr} = 0.6\sqrt{f'_c}$ (Mpa) .

y_b – المسافة بين المحور الحيادي إلى أقصى ليف بيتوني مشدود في الجائز.

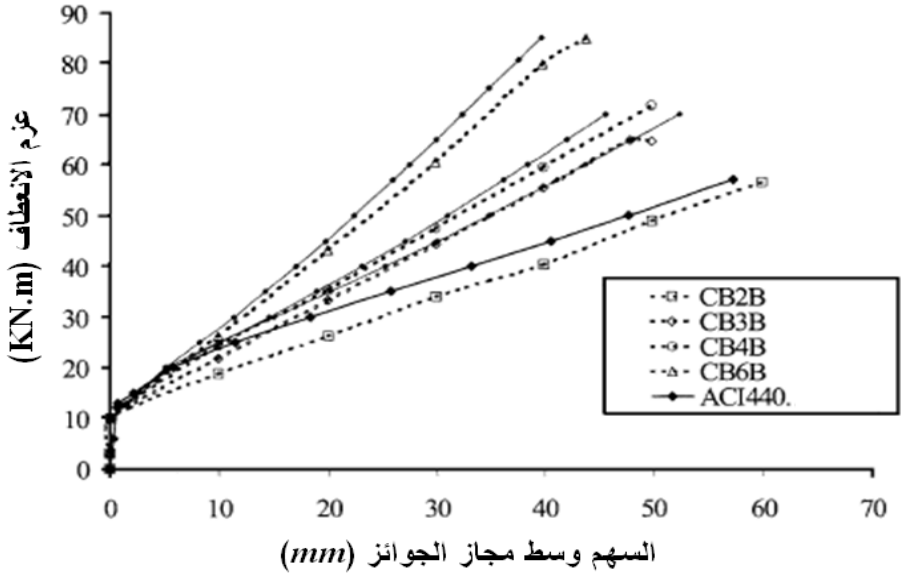
يبين الشكل(1−55) مقارنة بين منحنيات(عزم− سهم) التجريبية المحددة في الدراسة[21]، والمنحنيات المتنبأ بها في الكودACI440.1R-03 [5], وهي تظهر توافقاً جيداً بين القيم التجريبية والتحليلية .



الشكل (1−55) مقارنة بين منحنيات (عزم – سهم) المحسوبة بالطرق التحليلية والمحددة تجريبياً [37].

للتحقق بشكلٍ أعمق من علاقة السهم في الكود تمت مقارنة النتائج التجريبية المقدمة من قبل Masmoudi مع النتائج المتنبأ بها في الكود ACI440.1R-03 [5], وهذا مبين على الشكل(1−56). فالجوائز البيتونية ذات المقطع (200×300) mm والمسلحة بقضبان GFRP البسيطة الاستناد بمجال 3000 mm , حملت بحمولتين مركزتين المسافة بينهما 500 mm , وكانت نسبة التسليح كما يلي: للجائزCB2B = 0.56%، وللجائزCB3B = 0.91%, أما للجائزCB4B = 1.38% , وللجائز CB6B= 2.15%. وكانت القضبان متوضعة على طبقة واحدة في الجائزين CB2B و CB3B, أما في الجائزين CB4B وCB6B فكانت القضبان متوضعة على طبقتين.

يبين الشكل(1-56) المقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج المحددة وفق الكود ACI440.1R-03 [5] حيث يظهر توافق جيد بين النتائج.



الشكل (1−56) مقارنة بين منحنيات (عزم – سهم) [37] المحددة تجريبياً والمحسوبة وفق ACI440.1R-03 [5].

يقدم الكود ACI440.1R-03 [5] العلاقة التالية لحساب عرض التشققات:

$$w = \frac{2.2}{E_f}\beta \cdot k_b \cdot f_f \sqrt[3]{d_c \cdot A} \qquad (100\text{-}1)$$

حيث:

w – عرض التشقق مقدراً بـ 10^{-3}mm , E_f – معامل مرونة قضبان FRP مقدراً بـ MPa.

f_f – الإجهاد في قضبان الـFRP مقدرا بـ MPa ويحسب وفق الكود [5] بالعلاقة التالية:

$$f_f = M_s \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} \qquad (101\text{-}1)$$

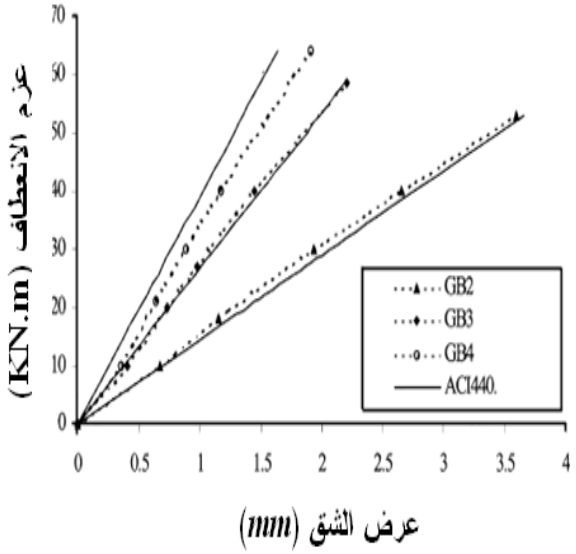
k_b – عامل يحدد درجة التحام قضبان FRP بالبيتون المحيط بها, ويقترح أن تكون قيمته تساوي (1.2) من أجل قضبان الـFRP في حال عدم توفر بيانات تجريبية.

A – مساحة البيتون في منطقة الشد وهي تقسم على عدد القضبان المشدودة، mm^2 .

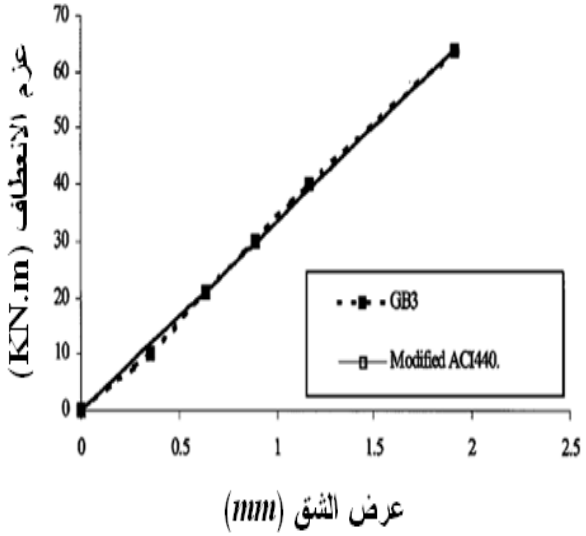
d_c – سماكة طبقة التغطية وتقاس من السطح المشدود إلى مركز طبقة التسليح الأقرب للسطح، mm.

يبين الشكل(1–57) مقارنةً بين عرض التشققات المحددة تجريبياً والمحددة تحليلياً باستخدام العلاقة السابقة, وذلك عندما تتوضع قضبان FRP على طبقة واحدة، ويتبين أن الكود يتنبأ بعرض الشق بدقة عندما تتوضع القضبان على طبقة واحدة, غير أنه في حال توضع القضبان على أكثر من طبقة تصبح التنبؤات غير دقيقة, لذلك لابد من تعديل العلاقة السابقة لتناسب القضبان المتوضعة على أكثر من طبقة.

في هذه الدراسة تم اقتراح قيمة العامل $k_b = 1.4$ لتناسب قضبان الـFRP المتوضعة على طبقتين, ويبين الشكل(1–58) مقارنة بين النتائج التجريبية لعرض التشققات والنتائج التحليلية الناتجة عن استخدام العلاقة المعدلة, حيث تشير الدراسة إلى وجود توافق جيد بين النتائج التجريبية ونتائج الكود ACI [5] عندما يكون ($k_b = 1.4$)



الشكل (1–57) مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق) المحددة تجريبياً وباستخدام الكود[5].



الشكل (1–58) مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق) المحددة تجريبياً وباستخدام علاقة الكود[5] المعدلة.

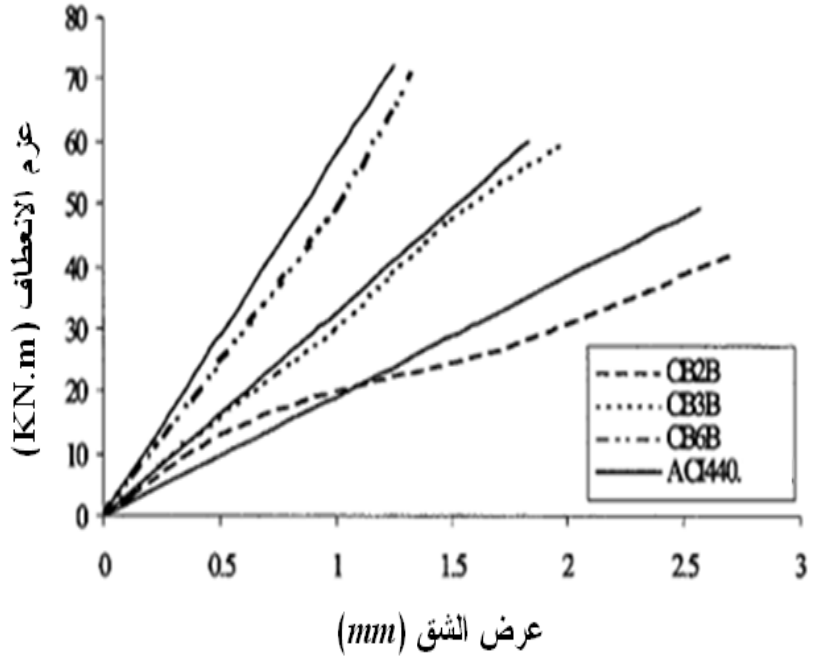
يظهر الجدول (1–18) قيم عرض التشقق المحددة تجريبياً وتحليلياً و ذلك عند حمولات تساوي 30% و90% من الحمولة القصوى.

الجدول (1–18) عرض التشققات المحدد تجريبياً وتحليلياً في الدراسة [37].

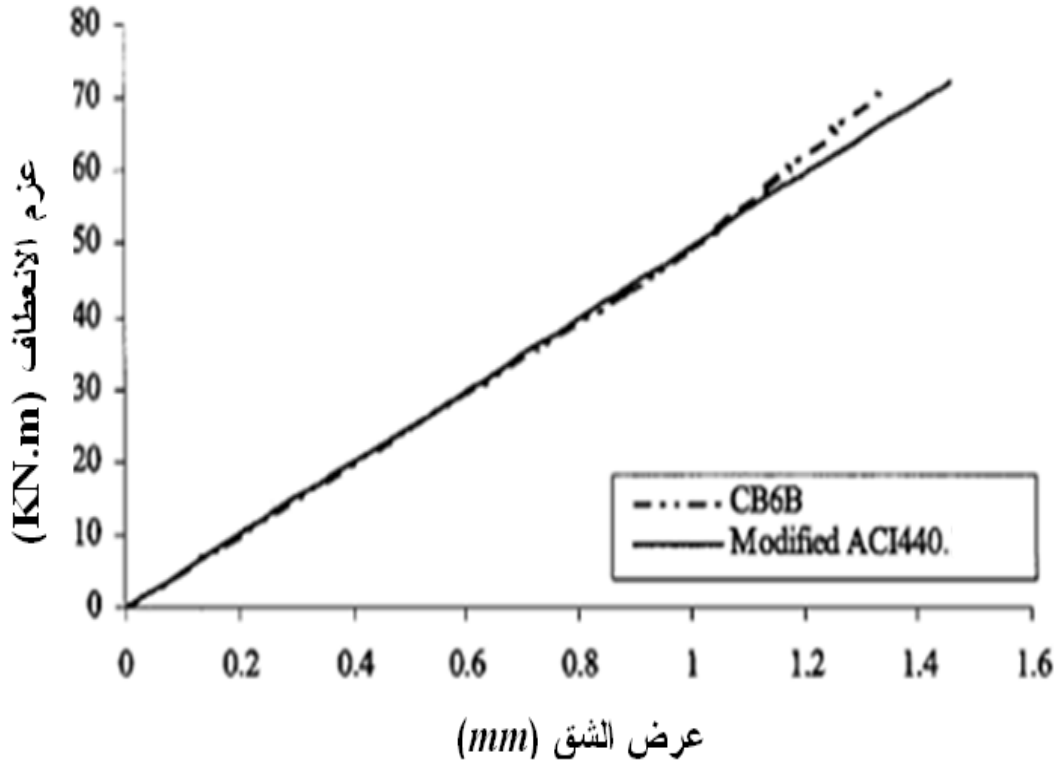
اسم الجائز	نسبة التسليح %	عرض الشق(mm) المحدد تحليلياً عند العزوم		عرض الشق(mm) المحدد تجريبياً عند العزوم	
		30% M_u	90% M_u	30% M_u	90% M_u
GB-1-1	0.52	1.1	3.3	1.3	3.3
GB-1-2	0.52	1.1	3.3	1.2	3.5
GB-2-1	0.79	0.7	2.0	0.6	2.3
GB-2-2	0.79	0.7	2.0	0.7	2.2
GB-3-1	1.10	0.6	1.7*	0.6	1.8
GB-3-2	1.10	0.6	1.7*	0.5	1.9

* –عرض الشق المعدل

إضافة لذلك ولإجراء تحقيق أعمق للتعديلات المبينة أعلاه, تمت في هذه الدراسة [37] مقارنة عرض التشققات المحددة تجريبياً من قبل الباحث Masmoudi مع عرض التشققات المحسوبة وفق الكود ACI **[5]**، وكما هو مبين على الشكل(1-59), حيث أمكن الوصول إلى استنتاجات مماثلة فعلاقات الكود ACI **[5]** تحسب عرض التشققات بشكلٍ دقيق عندما تتوضع قضبان الـFRP على طبقة واحدة, ولكن عندما تتوضع على طبقتين فإن علاقات الكود تصبح غير دقيقة, وعند إعطاء العامل k_b القيمة 1.4 فإن عرض التشققات المحدد تجريبياً يتوافق بشكلٍ جيد مع القيم التحليلية وهذا مبين على الشكل (1– 60).



الشكل (1–59) مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق)[37] المحددة تجريبياً من قبل Masmoudi، والمتوقعة حسب الكود ACI **[5]**.

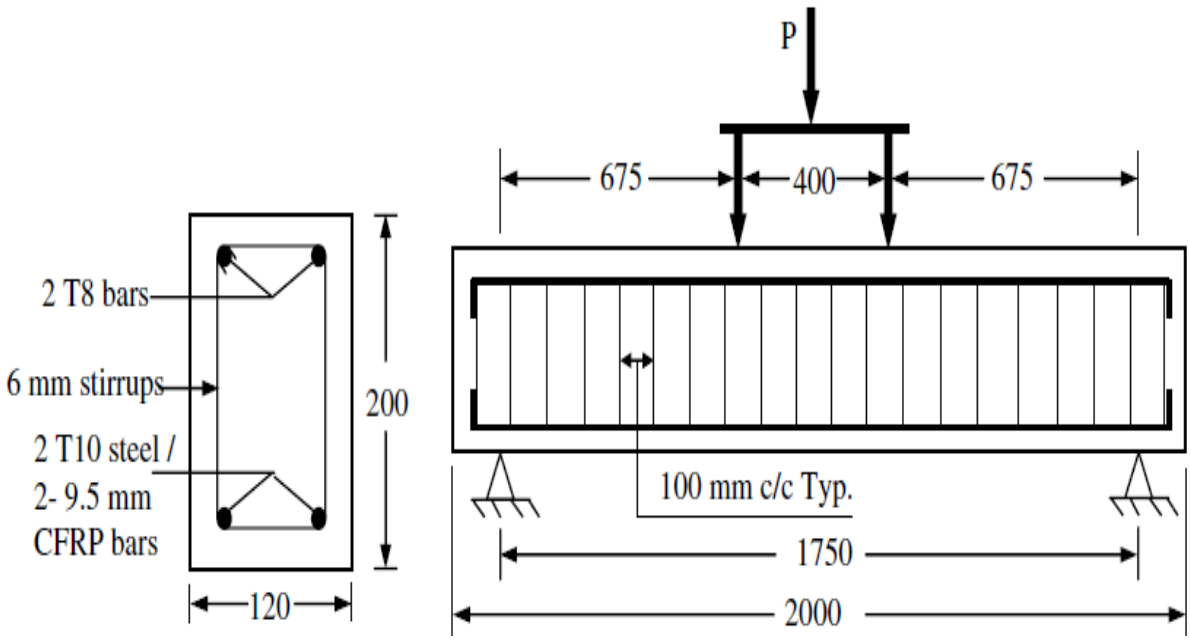


الشكل (1–60) مقارنة منحنيات (عزم– عرض التشقق)[37] المحددة تجريبياً من قبل Masmoudi، والقيم حسب علاقات الكود المعدلة ACI **[5]**.

1–4–7– الأشكال المختلفة لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـ CFRP والعاملة على الانعطاف[31].

Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending[31].

تعرض هذه الدراسة نتائج اختبارات أنجزت على جوائز بيتونية مسلحة بقضبان من الـ CFRP وهي جزء من بحث كبير لدراسة سلوك الجوائز البيتونية المعرضة لدرجات حرارة عادية ودرجات عالية. استخدمت واختبرت في المرحلة الأولى من هذا البحث أربعة جوائز بيتونية مسلحة إما بقضبان فولاذية أو كربونية بدرجة حرارة الغرفة, وأخذت النتائج كمرجعية لمعرفة أداء جوائز مماثلة بظروف حرارة مرتفعة, واعتمدت الجوائز المسلحة بالفولاذ فقط كجوائز معيارية، حيث تم التركيز على السلوك الانعطافي وبالتحديد على علاقة (إجهاد . تشوه) و(حمولة . سهم)، وعلى أشكال الانهيار الحاصل ، وقدرة التحمل القصوى بالإضافة لأشكال التشققات وانتشارها. أما سلوك هذه الجوائز تحت تأثير حمولات طويلة الأمد والجوانب المتعلقة بالمتانة فلم تدرس واعتبرت خارج نطاق هذا البحث, ويبين الشكل(1–61) كلاً من المقطع الطولي والعرضي للجوائز المختبرة.



الشكل(1–61) الأبعاد الهندسية وتفاصيل جائز نموذجي(الأبعاد بـ mm) [31].

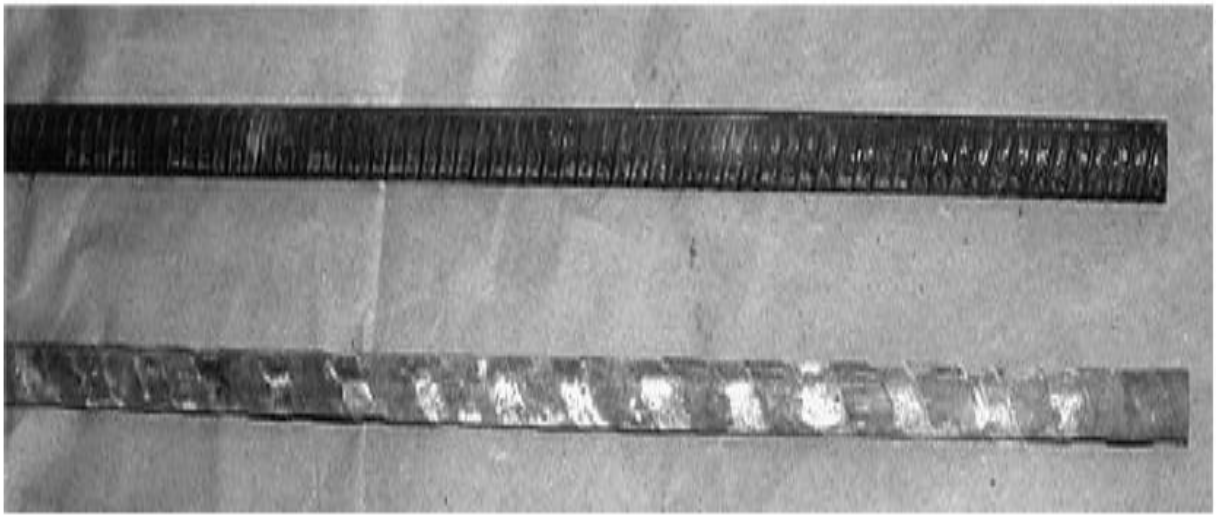
يبين الجدول (1–19) المقاومة المميزة للبيتون على الضغط, وهذه المقاومة أخذت اعتماداً على متوسط قيم المقاومة الناتجة من اختبار ثلاثة مكعبات لكلِّ جائز. وتمت تسمية كل جائز مختبر بحروف تدل على نوع التسليح والشروط الحرارية التي تم الاختبار تحت تأثيرها, فالحرف (B) يدل على اسم الجائز في حين أن الحرف الثاني (R) يدل على أن الجائز اختبر بحرارة تعادل حرارة الغرفة، أما الحرف الثالث في حالة (S) يدل على أن قضبان التسليح فولاذية, وفي حالة (C) يدل على أن قضبان التسليح كربونية.

الجدول (1–19) المقاومة المميزة للبيتون على الضغط في جوائز الدراسة[31].

أسماء الجوائز	المقاومة المميزة على الضغط (MPa)
BRS1	46.52
BRS2	44.64
BRC1	42.55
BRC2	41.71

قضبان الـCFRP المستخدمة ذات قطر صافي 9.5mm كما هو مبين في الشكل (1–62), وقد صنعت من قبل مصنع أمريكي باستخدام عملية الشد والإشباع باللاصق, والألياف كربونية مستمرة حيث نسبة الألياف تعادل 60% من الحجم الكلي, ومقاومة الشد تعادل 4.83GPa ومعامل مرونتها 234GPa. أما اللاصق المستخدم لصناعة القضبان فهو (Bisphenolo epoxy vinyl ester), وعولج السطح أثناء تحضير القضبان بحيث تم الحصول على سطح محلزن لزيادة التحامه بالبيتون. والتف خط الحلزنة بشكلٍ متباعد ليشكل حلقات حلزنة حيث عولج سطح القضبان بنفس نوع اللاصق ومن دون إضافة ألياف. ويبين الجدول(1–20) الخصائص الميكانيكية للقضبان المستخدمة بعد اختبارها على الشد, أما المقطع الاعتباري للقضبان الفولاذية فهو يماثل تقريباً مقطع قضبان الـCFRP من حيث

المساحة. وتم التسليح بالقضبان الفولاذية وقضبان الـCFRP بشكلٍ متشابه من ناحية توضع القضبان في المقطع, مع عدم إمكانية الحصول على تطابق في المساحة من كلا النوعين بشكلٍ مطلق.



الشكل (1−62) شكل القضبان الفولاذية والكربونية المستخدمة في الدراسة [31].

الجدول (1−20) الخصائص الميكانيكية للقضبان المستخدمة في الدراسة [31].

نوع القضبان	إجهاد الشد الأقصى (MPa)	التشوه الأقصى	معامل المرونة (GPa)
CFRP	1676	0.0145	135.9
فولاذ قطر 10 ملم	530	0.0048	201
فولاذ قطر 8 ملم	566	0.0049	194
فولاذ قطر 6 ملم	421	0.0041	200

يبين الشكل(1−63) آلية انتشار التشققات في الجوائز المدروسة, حيث تشير الدراسة إلى سلوك متشابه لكلا النوعين من الجوائز المختبرة من ناحية التشقق, حيث تطور نفس العدد من التشققات وكان التباعد بينها متشابهاً عند الانهيار.

تم تصميم الجوائز المختبرة بحسب اشتراطات الكود ACI [5] وكانت نسبة التسليح في الجوائز BRC نسبة زائدة (Over Reinforced)، وتحسب نسبة التسليح ρ باستخدام العلاقة (1−102) وهي أكبر من نسبة التسليح التوازنية ρ_b, وتوافق نسبة التسليح التوازنية الحالة التي يكون فيها التشوه في الألياف البيتونية المضغوطة القيمة القصوى $\varepsilon_c = 0.003$.

الشكل (1−63) أشكال التشققات في الجوائز المختبرة في الدراسة [31].

وبنفس الوقت يكون التشوه في القضبان الفولاذية مساويا تشوه التطاول (التلدن), ويمكن حساب نسبة التسليح التوازنية وفق العلاقة (1−103), وفي الجوائز BRS كانت نسبة التسليح مخفضة (Under Reinforced) أي أقل من نسبة التسليح التوازنية.

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} \qquad (102-1)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$$

$$\rho_{sb} = \frac{0.85\beta_1 f_c}{f_y}\frac{600}{600 + f_y} \qquad (103-1)$$

$$\rho_{fb} = \frac{0.85\beta_1 f_c}{f_{fu}}\frac{\varepsilon_c E_f}{\varepsilon_c E_f + f_{fu}}$$

حيث:

ρ_s – نسبة التسليح الحقيقية بالفولاذ, ρ_f – نسبة التسليح الحقيقية بالـFRP.

ρ_{sb} – نسبة التسليح التوازنية بالفولاذ, ρ_{fb} – نسبة التسليح التوازنية بالـFRP.

f_c – مقاومة البيتون الأعظمية على الضغط (MPa), b – عرض المقطع, d – الارتفاع الفعال للمقطع.

f_y – إجهاد الخضوع للفولاذ (MPa), ε_c – التشوه الأعظمي في الألياف البيتونية المضغوطة.

E_f – معامل مرونة قضبان الـFRP مقدر بـ(MPa), $\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{f_c - 28}{7} \geq 0.65$.

يقترح الباحث Pilakoutas في الكود الأوروبي نسبة تسليح أصغرية بقضبان الـFRP يتحقق بموجبها انهيار في المقطع على شكل تحطم للبيتون المضغوط, وهذه النسبة تحسب بالعلاقة (1–104), حيث تعتبر قيمة ε_c مساوية 0.0035.

$$\rho_{\min} = \frac{0.81(f_c + 8)\varepsilon_c}{f_{fu}\left(\frac{f_{fu}}{E_f} + \varepsilon_c\right)} \qquad (104\text{-}1)$$

وضعت نسب التسليح التوازنية والحقيقية والأصغرية لكلا النموذجين من الجوائز في الجدول (1–21), حيث لوحظ أن الجوائز BRC حققت شروط التسليح الزائد (Over Reinforced) المشروحة في الكود ACI [5] والعلاقة (1-104) في آن واحد.

الجدول (1–21) نسب التسليح التوازنية والحقيقية والأصغرية في الدراسة [31].

اسم الجائز	ρ_b	ρ الفعلية	ρ_{min} المحددة بالعلاقة (1–69)
BRS	0.0277	0.0077	--
BRC	0.0032	0.0070	0.0055

يعرض الجدول (1–22) الحمولات القصوى وقيم السهم بالإضافة إلى أشكال الانهيار في جميع الجوائز, ففي الجائز BRC1 يسبب الشق القطري حدوث الانهيار، ويبدأ الشق القطري بشق شاقولي على مسافة تساوي 120mm من وجه المسند ويتدرج في الميول باتجاه نقطة تطبيق القوة إلى أن يصبح أفقياً تماماً عند هذه النقطة. ويستمر الجائز في تحمل القوة المطبقة إلى أن يمتد الشق القطري ويصبح عرضه كبيراً, وأخيراً يتحطم البيتون الواقع فوق هذا الشق والمجاور لنقطة تطبيق القوة في مجال القص.

الجدول (1–22) الحمولات والسهوم وأشكال الانهيار في الجوائز المختبرة في الدراسة [31].

اسم الجائز	P_{cr} (KN)	P_u (KN)	Δ عند الحمولة $P_{yield}{}^a$ (mm)	Δ عند الحمولة P_u (mm)	Δ عند الحمولة $P_{35\%}$ (mm)	شكل الانهيار
BRS1	7.8	41.9	6.92	29.16	1.75	تطاول فولاذ التسليح
BRS2	7.5	40.1	7.50	27.78	1.74	تطاول فولاذ التسليح
BRC1	7.1	88.9	11.14	35.26	8.60	انهيار ناتج عن القص
BRC2	7.1	86.5	10.96	35.50	8.37	تحطم البيتون المضغوط

a – تدل على قيم السهم في جوائز BRC الموافقة للحالة التي يحصل فيها تطاول فولاذ تسليح الجوائز BRS (وصوله إلى إجهاد الخضوع).

تتضمن الدراسة [34] العلاقات المقدمة في الكود ACI [5] المتعلقة بحساب مقاومة البيتون على الانعطاف ضمن مصطلح يسمى معامل الانقطاع Modulus of rupture كما هو مبين في العلاقة (1-105). حيث أن معامل الانقطاع هو إجهاد الشد الأعظمي في البيتون والناتج عن الانعطاف, كما تتضمن الدراسة اقتراح الكود Eurocode2 [16] في جزئه part1-1 استخدام القيمة الأساسية لمقاومة البيتون على الشد المحوري والتي تعطى بالعلاقة (1-106), و لحساب العزم المسبب للتشقق تستخدم العلاقة (1-107).

$$f_{\mathrm{r}} = 0.62\sqrt{f_c} \qquad (105\text{-}1)$$

$$f_{\mathrm{ct}} = 0.30 \times f_c^{(2/3)} \qquad (106\text{-}1)$$

$$M_{\mathrm{crACI}} = \frac{f_{\mathrm{r}} I_g}{y_b} \qquad (107\text{-}1)$$

$$M_{\mathrm{cr\,Eurocode}} = \frac{f_{\mathrm{ct}} I_g}{y_b}$$

حيث:

f_{r} – معامل الانقطاع (MPa), f_{ct} – مقاومة البيتون على الشد المحوري (MPa).

M_{cr} – عزم التشقق Cracking moment , I_g – عزم عطالة المقطع حول المحور المركزي بدون اعتبار التسليح في المقطع.

y_{b} – المسافة بين المحور المركز للمقطع البيتوني وصولا إلى الألياف الطرفية المشدودة على الوجه السفلي للجائز حيث يهمل وجود التسليح في المقطع.

وبالتالي فإن العلاقة (1-107) تشير إلى أن العزم المسبب للتشقق أو القوة المسببة للتشقق لا تتعلق بشكلٍ أو نوع المادة المستخدمة في التسليح على الشد.

ووفق الدراسة يمكن حساب العزم المقاوم الاعتباري M_{ns} للمقاطع البيتونية المسلحة بالفولاذ بنسبة تسليح مخفضة حسب العلاقة (1-108), وهذه العلاقة شائعة الاستخدام في الكودين ACI [5] و Eruocode2 [16] مع غياب عوامل الأمان، وهي نفس العلاقة المتوفرة في الكود العربي السوري[43]، ولكن في هذا الكود يتم ضربها بالعامل($\Omega = 0.9$) لحالة الانعطاف البسيط. ويمكن الوصول إلى هذه العلاقة عن طريق استخدام شروط الانسجام بين التشوهات والتوازن بين القوى في المقطع.

كما يمكن حساب العزم المقاوم الاعتباري M_{nf} للمقاطع البيتونية المسلحة بالـFRP التي تنهار بتحطم البيتون المضغوط وفق العلاقة (1-109) وهي مأخوذة من الكود ACI [5].

$$M_{\text{ns}} = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_c b}\right) \qquad (108\text{-}1)$$

$$M_{\text{nf}} = A_{\text{f}} f_{\text{f}} d\left(1 - 0.59\frac{A_{\text{f}} f_{\text{f}}}{f_c b d}\right) \qquad (109\text{-}1)$$

حيث: A_f – مساحة قضبان التسليح FRP.

أثبت الباحث Masmoudi [29] أن التسليح لا يؤثر بشكلٍ جوهري على قيمة العزم المسبب للتشقق والمحسوب نظرياً M_{cr}, ويظهر الجدول (1–23) قيم عزم التشقق المحددة تجريبياً والمحسوبة نظرياً وقيم العزم المقاوم الاعتباري لجميع الجوائز المختبرة.

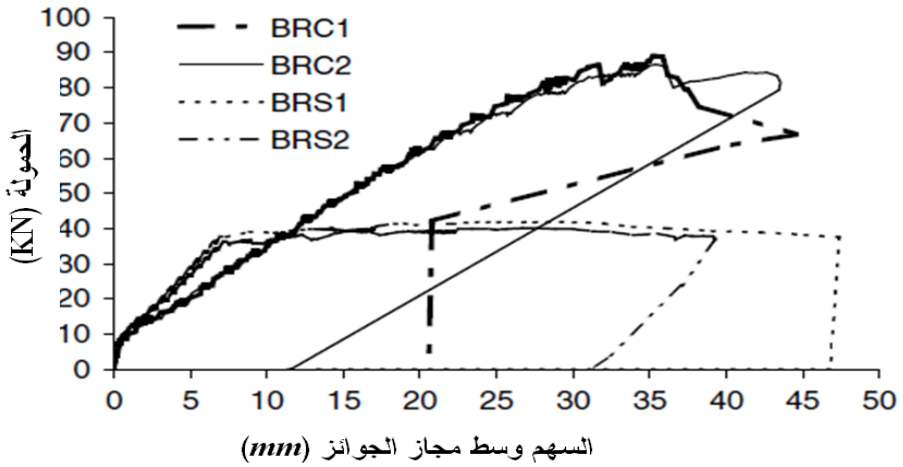
ويكشف الباحث Benmokrane [12] أن مقاومة البيتون على الشد عند العمل على الانعطاف تزداد نتيجة استخدام معامل الانقطاع, والقيم النظرية لـ M_{cr} المحسوبة على أساس مقاومة البيتون على الشد المباشر وفق الكود Eurocode2 [16] تشابه كثيراً القيم التجريبية لـ M_{cr}. وذلك لأن مقاومة البيتون على الشد بالانعطاف المحددة من تجارب معامل الانقطاع تكون أكبر من المقاومة على الشد المباشر, حيث أن التفاوت الصغير بين القيم التجريبية والنظرية لـ M_{cr} يعود جزئياً إلى الاختلاف في مقاومة البيتون بين العناصر الكبيرة (جوائز) والعينات الصغيرة (مكعبات أو أسطوانات). كما أن العلاقة (1–108) تتنبأ جيداً بقيمة العزم الاعتباري في الجوائز المسلحة بالفولاذ, في حين أن العلاقة (1–109) تعطي قيماً مخفضة للعزم الاعتباري في الجوائز المسلحة بالـFRP بنسبة 33%.

الجدول (1–23) عزم التشقق والعزم المقاوم الأعظمي في الدراسة [31].

اسم الجائز	$(M_{cr})_{\text{exp}}$ (KNm)	العزم الحسابي M_{cr} (KNm)		$(M_n)_{\text{exp}}$ (KNm)	$(M_n)_{th.}$ (KNm)	$(M_n)_{th.}/(M_n)_{\text{exp.}}$
		ACI Code	**Eurocode**			
BRS1	2.63	3.38	3.10	14.14	13.29	0.94
BRS2	2.53	3.31	3.02	13.53	13.36	0.99
BRC1	2.40	3.24	2.93	30.00	20.04	0.67
BRC2	2.40	3.20	2.89	29.19	19.91	0.68

يبين الشكل (1–64) منحنيات (حمولة – سهم) المحددة تجريبياً, والجزء الخطي الأولي من كلٍّ منحني يكون مائلاً بشكلٍ متدرج وهذا يعود لعدم وجود التشققات في تلك المرحلة من التحميل حيث أن السهم يتناسب طرداً مع الحمولة المضافة, ويشارك كامل المقطع في مقاومة الحمولة, وتشير الدراسة إلى أن كلا النوعين من الجوائز يسلك نفس السلوك قبل حدوث التشققات ويعود ذلك إلى صلابة الجوائز قبل التشقق. وفي نهاية الجزء الخطي الأولي توجد نقطة تدل على بداية التشقق في الجوائز, أما الجزء الثاني من المنحنيات فيتبع بشكلٍ مباشر الجزء الأولي الخطي, وهذا الجزء يعطي معلومات عن تأثير جودة الالتحام والصلابة على الشد وتأثير ذلك على التباعد بين الشقوق، وميل هذا الجزء أقل من ميل الجزء الأول. وهذا يدل على أن الزيادة في السهم تكون أكبر بعد حصول التشقق مع نفس القدر من التحميل, حيث تنخفض صلابة الجائز بعد تشققه.

ويبدو من اتساع الفارق بين منحنيات الجوائز BRS والجوائز BRC, أن نسبة انخفاض الصلابة في الجوائز BRC أكبر من نسبة الانخفاض في الجوائز BRS مع تزايد الحمولة, ومتوسط الاختلاف في الصلابة بين النوعين من الجوائز لحظة حصول تطاول فولاذ التسليح (التلدن) يساوي 38%. وهذا ينسب إلى انخفاض معامل مرونة قضبان الـCFRP, والذي هو أقل بـ32% من معامل مرونة القضبان الفولاذية.



الشكل (1-64) منحنيات (حمولة – سهم) للجوائز المختبرة في الدراسة [31].

وتشير هذه الدراسة إلى أن قدرة التحمل القصوى في الجوائز BRS تقل عما هي عليه في الجوائز من BRC بمقدار 53% في حين أن السهم في الجوائز BRC عند الحالة الحدية أكبر بمقدار 25% مما هو عليه في الجوائز BRS وهذا مبين في الجدول (1-22), والحالة الحدية هنا هي أكبر حمولة استطاع أن يتحملها الجائز المختبر.

وعند الانهيار كان السهم الأعظمي في الجائزين BRC1 وBRC2 أقل بنسبة 7% مما هو عليه في الجائز BRS1, ونلاحظ أنه في المرحلة التي تسبق تطاول فولاذ التسليح يكون السهم في الجوائز BRC أكبر مما هو عليه في الجوائز BRS. ويعود ذلك إلى انخفاض معامل مرونة قضبان الـCFRP, ولكن بعد حصول التطاول في الفولاذ تبدي الجوائز BRS سهما أسرع مما تبديه الجوائز BRC مع تجاهل التغير في التحميل.

يبين الجدول(1-24) نسبة (مجاز الجائز إلى السهم) لجميع الجوائز المختبرة, ويلاحظ من الشكل (1-64) تراجع السهم بعد أن أزيلت الحمولة عن جوائز المجموعة BRC, وهذا يدل على أن قضبان الـCFRP في هذه الجوائز بقيت في مرحلة المرونة أثناء الانهيار. وكما يظهر الشكل (1-64) أن قدرة التحمل القصوى للجائزين BRC تهبط تدريجياً بعد حصول تحطم البيتون المضغوط. وعند مقارنة قيم السهم للجوائز المختبرة عند حمولات استثمارية مع القيم الحدية للسهم والتي تحدد في الكود ACI [5] على أنها تساوي (مجاز الجائز مقسوماً على360) لوحظ أن السهم في الجوائز BRC أكبر من القيم الحدية المسموحة, كما أن السهم الناتج عن حمولات استثمارية في الجائزين BRC متقارب مع قيم السهم المحسوبة بالطرق التحليلية بشكلٍ مرضٍ. وتبين الدراسة أن التغلب على قيم السهم الكبيرة في الجوائز

المسلحة بـFRP يكون بحلول عملية كتحقيق سهم معاكس في الجوائز أثناء صبها (تقوس للأعلى) بحيث يكون السهم الناتج بعد التحميل ضمن الحدود المرضية.

الجدول (1–24) نسبة المجاز إلى السهم لحظة الانهيار في الجوائز المختبرة في الدراسة [31].

أسماء الجوائز	نسبة المجاز إلى السهم
BRS1	**37.0**
BRS2	**44.5**
BRC1	**39.0**
BRC2	**40.0**

في هذه الدراسة يقترح الباحث Naaman لحساب (معامل المتانة) μ_e في الجوائز المسلحة بالـFRP العلاقة التالية:

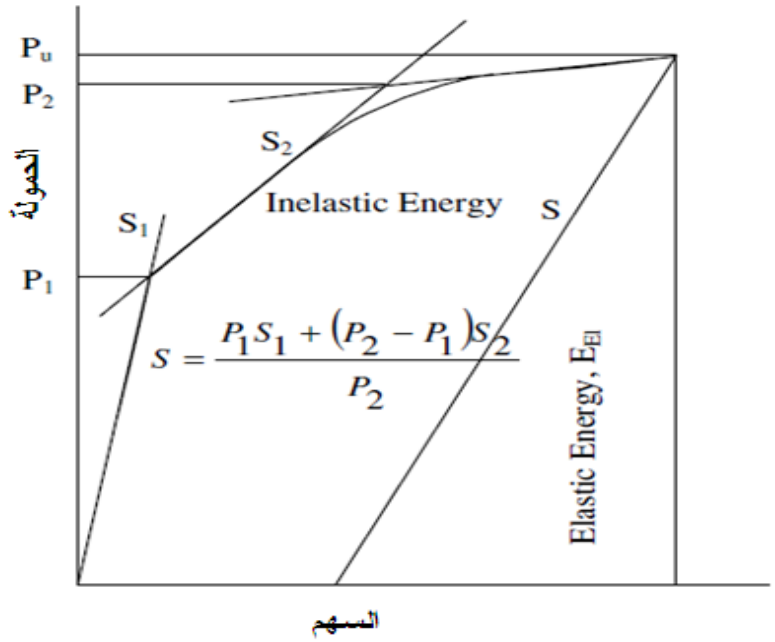
$$\mu_e = \frac{1}{2}\left[\frac{E_T}{E_{E1}} + 1\right] \qquad (110\text{-}1)$$

حيث:

E_T – الطاقة الكلية, وتساوي المساحة الواقعة تحت منحني (حمولة – سهم).

E_{E1} – طاقة المرونة, وتساوي مساحة المثلث المتشكل من الخط الهابط S لحظة الانهيار الظاهر في الشكل (1–65) وجميع الأمور المتعلقة بالمتانة مبينة في الجدول (2–25).

يبين العمود الثالث من الجدول (1–25) أن الجوائز BRS أكثر متانة من الجوائز BRC بأربع مرات, وهناك توافق بين العديد من الباحثين على أن تتم مقارنة الجوائز المسلحة بالـFRP مع نظيراتها المسلّحة بالفولاذ من منطلق قابليتها للتشوه أكثر من مقارنتها من منطلق متانتها.



الشكل (1–65) تحديد معامل المتانة في الدراسة[31].

الجدول (1–25) عامل قابلية التشوه Deformability factor ومعامل المتانة Ductility index في الدراسة[31].

أسماء الجوائز	μ_e	نسبة μ_e	عامل قابلية التشوه
BRS1	8.28	3.80	13.84
BRS2	7.26	3.33	10.10
BRC1	3.01	1.38	28.36
BRC2	2.18	1.00	30.53

وقدم الباحث Jaeger مفهوم عامل قابلية التشوه وعامل المقاومة, ووجد أن ناتج هذين العاملين يبقى بين 6 و7 من أجل الجوائز المسلحة بالفولاذ بغض النظر عن نسبة التسليح, ويسمى هذا الناتج بالعامل الكلي (overall factor) واقترح قيمة له تساوي 6 لجميع أنواع التسليح (فولاذ أو FRP).

اقترح الباحث Newhook طريقة لحساب عامل قابلية التشوه وفق العلاقة التالية[31]:

$$\text{عامل قابلية التشوه} = \frac{\text{(العزم المقاوم} \times \text{الانحناء)عند الحالة الحدية}}{\text{(العزم المقاوم} \times \text{الانحناء)عند الحالة الاستثمارية}} \qquad (111\text{-}1)$$

كما اقترح أن تكون قيمة التشوه الأعظمية تساوي 0.002 في قضبان الـFRP عند الحالة الاستثمارية و 0.0012 في القضبان الفولاذية, ويبين الجدول (1-25) عامل قابلية التشوه لجميع الجوائز المختبرة محسوباً وفق العلاقة (1-111).

حسبت قيمة الانحناء عند الحالة الحدية على أساس أن التشوه في البيتون يساوي 0.0035 وعلى قيمة التشوه الحقيقي الناتج من اختبارات قضبان التسليح, أما قيمة العزم المقاوم عند الحالة الحدية فهو العزم الأعظمي المسجل نتيجة اختبار كل جائز دون ضربه بأية عوامل أخرى, ولوحظ أن عامل قابلية التشوه لجميع الجوائز أكبر من (6)، لذا يمكن القول أن هذه الجوائز آمنة من ناحية المقاومة وقابلية التشوه.

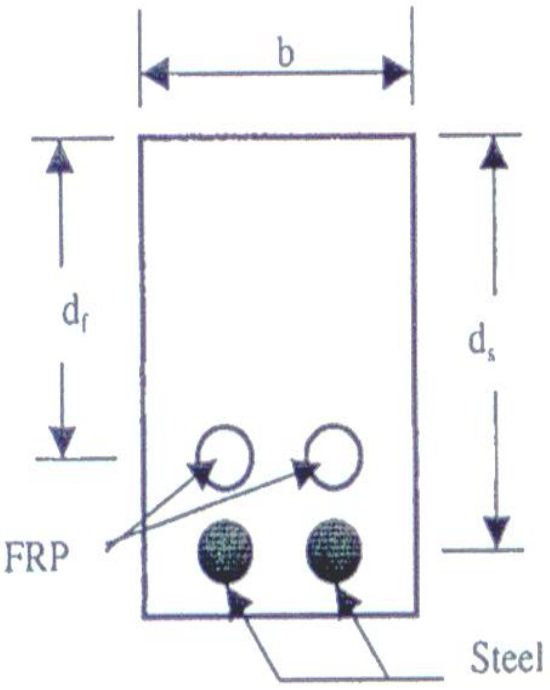
1-4-8- دراسة تحليلية لسلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين بقضبان (فولاذية و FRP)[28].

Analytical Behaviour Of Concrete Beams Reinforced With Steel Rebars And FRP Rods[28].

تقدم هذه الدراسة موديلاً تحليلياً لحساب السلوك الانعطافي للمقاطع البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية وأخرى من الـ FRP , حيث تم تطوير بعض الإجراءات التحليلية البسيطة لحساب التشوهات والإجهادات الحاصلة في البيتون وقضبان التسليح وكذلك العزوم والانحناءات في الجوائز ذات المقطع المستطيل والمسلح بشكلٍ مشترك بالفولاذ والـFRP. وتعتمد الإجراءات المتبعة على توازن القوى وانسجام التشوهات وهي تطبق على المقاطع المسلحة بالفولاذ التقليدي أو بقضبان الـ FRP أو المقاطع المسلحة بشكلٍ مشترك (فولاذ- FRP).

يبين الشكل (1-66) المقطع العرضي للجائز البيتوني المسلح المستخدم في الدراسة, حيث اعتمدت الفرضيات الأساسية التالية:

- تتوزع التشوهات بشكلٍ خطي على كامل ارتفاع الجائز.
- لا يحصل انسلاخ أو انزلاق لقضبان التسليح عن البيتون.
- يمكن تحديد الإجهادات في قضبان التسليح من خلال العلاقة (إجهاد- تشوه).
- يمكن إهمال الشد الحاصل في البيتون.
- يمكن إهمال التشوهات الناتجة عن القص.
- يتحدد انهيار المقطع بحصول تحطم للبيتون المضغوط أو بانقطاع لقضبان التسليح.



الشكل(1-66) مقطع الجائز البيتوني في الدراسة[28].

وتبين الدراسة علاقة (إجهاد – تشوه) للمواد المشكلة للجائز البيتوني المسلح بشكلٍ هجين كما يلي:

<u>سلوك البيتون.</u> تم استخدام موديل (إجهاد– تشوه) غير الخطي للبيتون، وهذا الموديل تم تطويره من قبل الباحثين (Almusallam and Alsayed 1995), وابتكر هذا الموديل ليناسب بشكلٍ جيد النتائج التجريبية للبيتون العادي والعالي المقاومة. وتحدد في هذا الموديل العلاقة بين إجهاد البيتون σ_c وتشوهه ε_c، وفق قانون هوك($\sigma = E.\varepsilon$) لسلوك البيتون، حيث يتم الحصول على معامل يونغ E بتجارب الشد أو الضغط. ويقترح هذان الباحثان شكل لعلاقة (إجهاد – تشوه) وفق العلاقة (1–112).

$$\sigma_c = \frac{\left(K - K_p\right)\varepsilon_c}{\left[1+\left(\frac{\left(K-K_p\right)\varepsilon_c}{\sigma_0}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} + K_p\varepsilon_c \qquad (112\text{-}1)$$

حيث: K – الميل الأول للمنحني, K_p – الميل النهائي للمنحني, σ_0 – الإجهاد المرجعي للبيتون, n – عامل شكل المنحني، الذي يعطى بالعلاقة(1–78).

$$n = -\frac{\ln 2}{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} - \frac{k_p}{k-k_p}\right)} \qquad (113\text{-}1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_c^{/}\left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\right) - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\right)^2\right] \qquad (114\text{-}1)$$

حيث:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{K-K_p} \ , \ \sigma_0 = 5.6 + 1.02\sigma_c' - K_p\varepsilon_0$$

$$\text{for} \quad \sigma_c' \le 55 \ \text{MPa} \quad \Rightarrow \quad K_p = 5470 - 375\sigma_c'$$

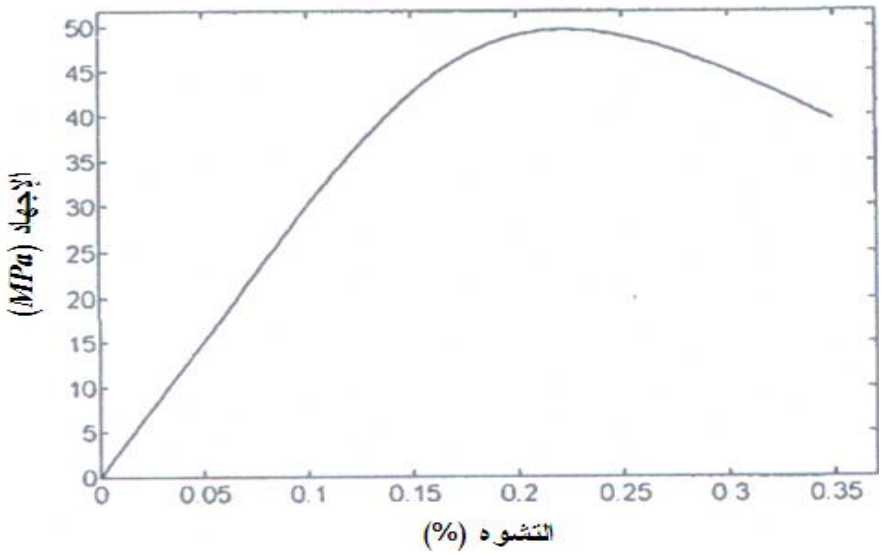
$$\text{for} \quad \sigma_c' \succ 55 \ \text{MPa} \quad \Rightarrow \quad K_p = 16398.23 - 676.82\sigma_c'$$

$$K = 3320\sqrt{\sigma_c'} + 6900$$

حيث: σ_c' تقدر بـ MPa

$$\varepsilon_0 = \left(0.2\sigma_c' + 13.06\right)\times 10^{-4}$$

يبين الشكل (1–67) منحني (إجهاد– تشوه) للبيتون المضغوط وفيه القيمة العظمى لمقاومة البيتون $\sigma_c' = 50\,\text{Mpa}$, ويبدو من هذا الشكل أن منحني (إجهاد– تشوه) ينتهي عند قيمة افتراضية للتشوه تساوي 0.0035.



الشكل(1−67) منحني (إجهاد − تشوه) للبيتون المضغوط في الدراسة[28].

<u>قضبان الفولاذ الخاضعة للشد ضمن البيتون.</u>

يفترض أن قضبان التسليح ضمن البيتون ذات منحني (إجهاد− تشوه) ثنائي الخطية وفق الموديل المقترح من قبل الباحثين Wang and Hsu(2001), وتم شرح العلاقة بين الإجهاد σ_s والتشوه ε_s الحاصلين في قضبان التسليح بالعلاقتين (1−115) و (1−116).

$$\text{for} \quad \varepsilon_s \le \varepsilon_n \qquad \sigma_s = E_s \varepsilon_s \qquad (115\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_n \qquad \sigma_s = \sigma_y \left[(0.91 - 2B) + (0.02 + 0.25B) \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \right] \qquad (116\text{-}1)$$

حيث: E_s − معامل مرونة الفولاذ, σ_y − إجهاد خضوع الفولاذ, B − معامل إجهاد, ε_y − تشوه الفولاذ عند الخضوع.

ε_n − تشوه الفولاذ عند قيمة متوسطة للإجهاد حين يبدأ بالتطاول. وتحسب العوامل في العلاقات السابقة كما يلي:

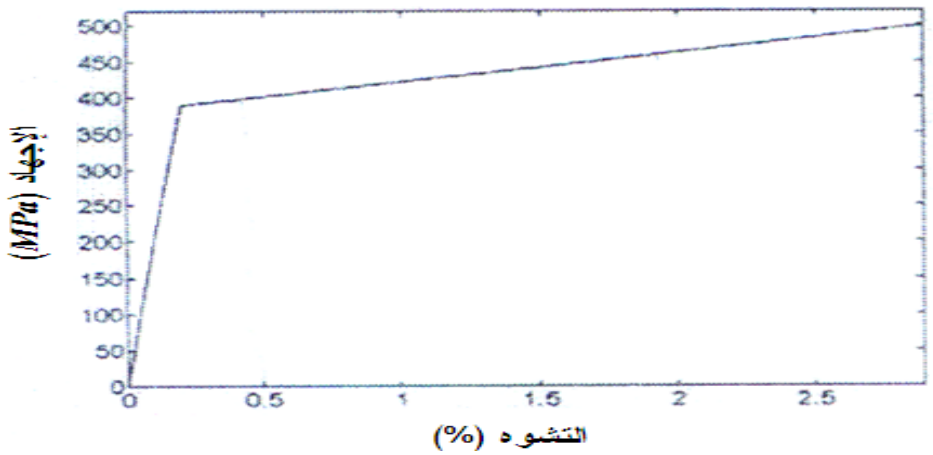
$$\varepsilon_n = \varepsilon_y (0.93 - 2B) \quad , \quad B = \frac{(\sigma_{cr} / \sigma_y)^{1.5}}{\rho} \quad , \quad \rho = \frac{A_s}{b d_s} \ge 0.5\% \quad , \quad \sigma_{cr} = 0.31\sqrt{\sigma'_c}$$

حيث: σ'_c و σ_{cr} تقدر بـ MPa.

ولتسهيل عملية استنباط منحني (إجهاد − تشوه) في القضبان الفولاذية فرضت بعض العوامل العددية كما يلي:

عرض المقطع البيتوني $b = 200\text{mm}$، الارتفاع الفعال $d_s = 300\text{mm}$، مساحة التسليح $A_s = 157\text{mm}^2$، إجهاد الخضوع $\sigma_y = 420\ \text{MPa}$، معامل مرونة الفولاذ $E_s = 200\text{GPa}$.

ويبين الشكل(1–68) المنحني ثنائي الخطية المبسط وفق الموديل المقترح من قبل الباحثين Wang و Hsu [28].



الشكل(1–68) منحني (إجهاد – تشوه) للفولاذ في الدراسة[28].

<u>قضبان الـFRP الخاضعة للشد ضمن البيتون.</u>

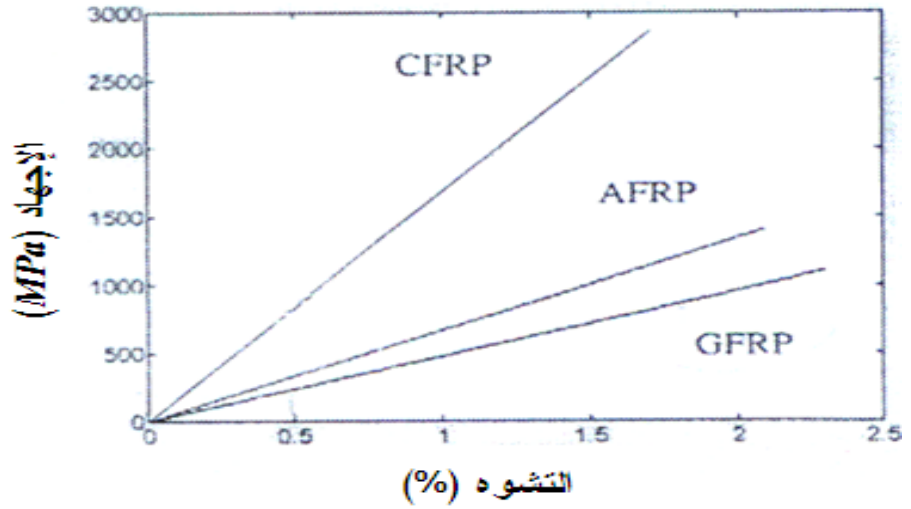
يفترض أن تكون العلاقة بين الإجهاد σ_f والتشوه ε_f الخاصة بقضبان الـFRP علاقة خطية وتتحدد وفق العلاقتين.

$$\text{for} \quad \varepsilon_f \le \varepsilon_f^u \qquad \sigma_f = E_f \varepsilon_f \qquad (117\text{-}1)$$

$$\text{for} \quad \varepsilon_f > \varepsilon_f^u \qquad \sigma_f = 0 \qquad (118\text{-}1)$$

حيث أن E_f – معامل مرونة قضبان الـFRP.

وتشير الدراسة إلى الأنواع الأكثر شيوعاً لقضبان الـFRP المستخدمة في الإنشاءات المدنية وهي الكربونية الآراميدية والزجاجية, وبعض مواصفاتها بحسب القيم المعطاة من قبل (Leung and Burgoyne 2001) محددة في الجدول (1–26). وباستخدام هذه القيم تم تكوين منحنيات (إجهاد–تشوه) الخاصة بالأنواع الثلاثة لقضبان الـFRP كما هو مبين في الشكل (1–69).



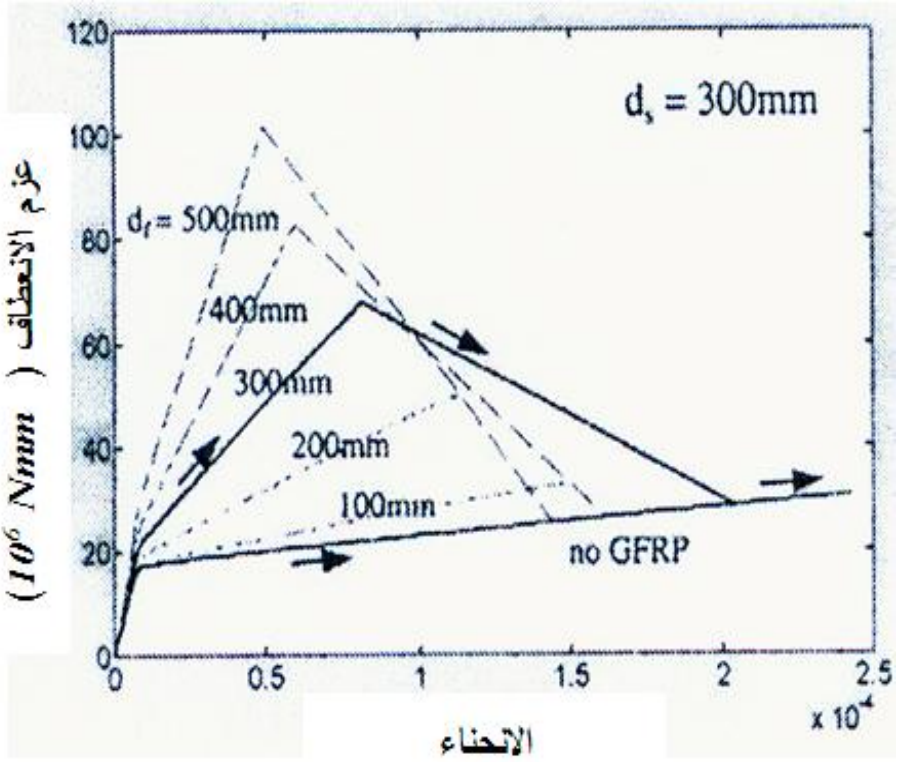
الشكل(1–69) منحني (إجهاد – تشوه) لقضبان الـFRP في الدراسة[28].

الجدول(1–26) الخصائص الميكانيكية لقضبان الـFRP في الدراسة[28].

نوع القضبان	CFRP	AFRP	GFRP
معامل المرونة E_f (GPa)	168	67	48
التشوه الأقصى ε_f^u	0.017	0.021	0.023

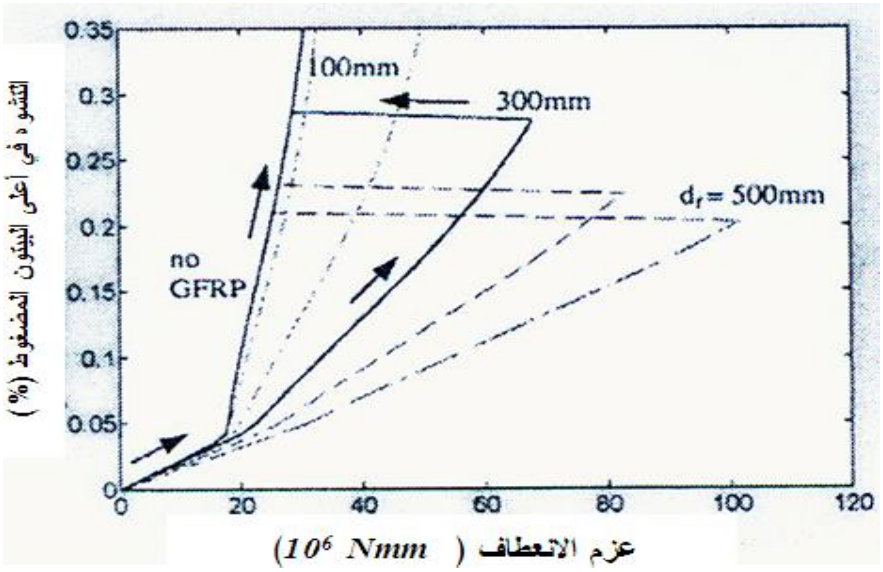
في هذه الدراسة تم اعتبار $A_s = A_f$ والمتحول الوحيد هو عمق قضبان الـFRP (d_f), حيث تم تغييره في المقطع وذلك لدراسة تأثيره على السلوك الانعطافي للجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

للوصول إلى النتائج التحليلية اعتماداً على الإجراءات السابقة, تم فرض بعض المواصفات والأبعاد الهندسية والعوامل. ويظهر الشكل (1–70) التنوع الحاصل في منحني (عزم– انحناء) وفق قيم مختلفة لـ d_f, ولوحظ أنه عندما تضاف قضبان GFRP فإن الصلابة البدائية وعزم الخضوع يزدادان قليلاً, وعند إعطاء قيمة أكبر لـ d_f فإن العزم المقاوم يزداد بشكلٍ كبير وتتشكل على المنحني ذروة.

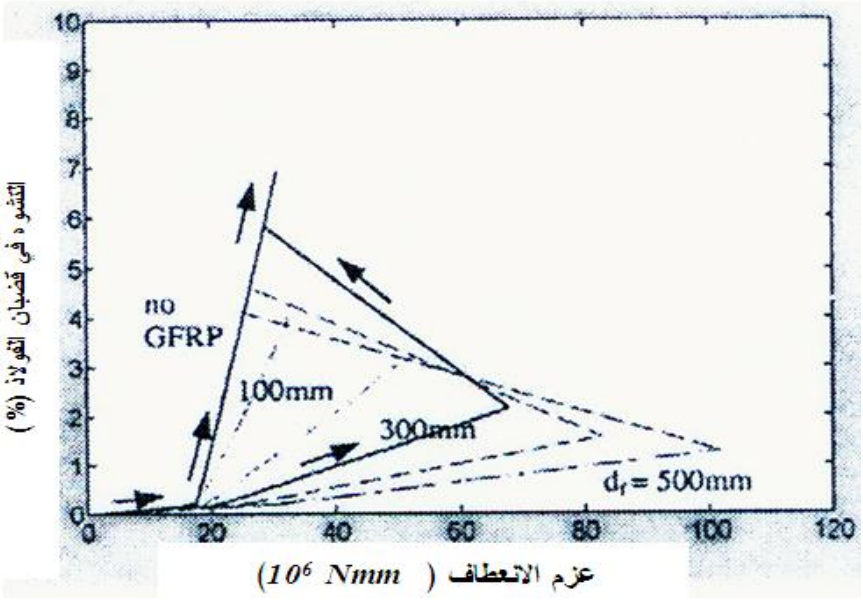


الشكل(1–70) علاقة (عزم – انحناء) في الدراسة[28].

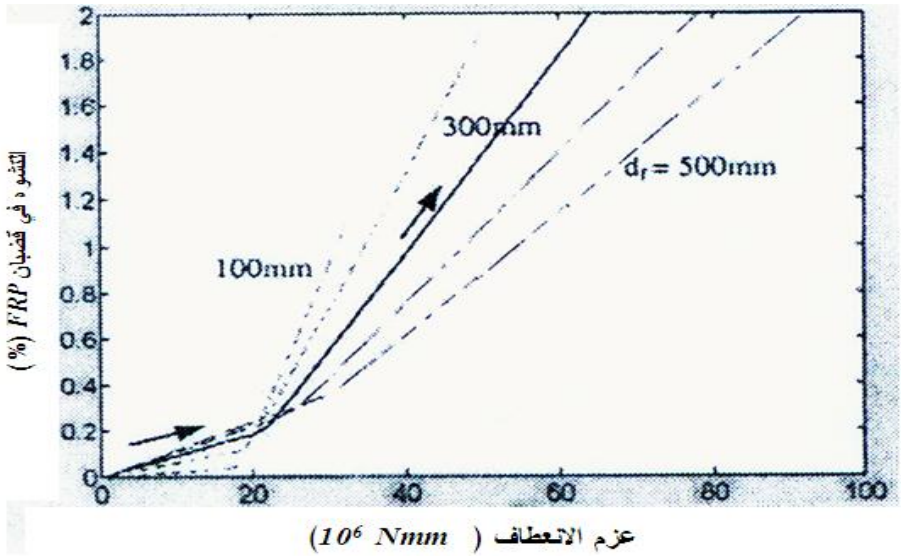
كما رصدت الدراسة قيم التشوه الحاصل في القضبان الفولاذية وقضبان الـGFRP وتشير إلى أنه في حالة($d_f = 100\text{mm}$ و $d_f = 200\text{mm}$) كانت قيم التشوه أصغر من قيم التشوه الأعظمية الموافقة لها, في حين أن التشوه في البيتون يزداد بسرعة إلى القيمة 0.0035, وهذا مبين في الأشكال(1–71) و(1–72) و(1–73)، مما يوضح أن تحطم البيتون يحصل قبل انقطاع قضبان الفولاذ أو(تقصف) FRP, وتمت الإشارة إلى أن الصورة معكوسة تماماً من أجل القيم $d_f = 300\text{mm}$, $d_f = 400\text{mm}$, $d_f = 500\text{mm}$, فقضبان التسليح تنقطع قبل حصول تحطم في البيتون, مع الإشارة إلى أن تشوه الفولاذ يبقى ضمن مجال اللدونة في حين أن قضبان الـGFRP تصل إلى نقطة الانقطاع عند الانهيار, وهذا يفسر التغيير المفاجئ في منحني (عزم– انحناء).



الشكل(1-71) علاقة (تشوه – عزم) الحاصل في بيتون الجوائز في الدراسة[28].



الشكل(1-72) علاقة (تشوه – عزم) للقضبان الفولاذية في الدراسة[28].



الشكل(1-73) علاقة (تشوه – عزم) لقضبان الـGFRP في الدراسة[28].

قدمت هذه الدراسة بعض النتائج المتعلقة بالجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين أهمها أنه من النادر أن تنقطع قضبان الفولاذ عند الحالة الحدية فالتشوه الحدي للفولاذ أكبر بكثير من التشوه الحدي لقضبان الـFRP [35,28]. علاوة على ذلك لا يمكن أن نصادف d_f أكبر من 300mm في الواقع العملي, ومع ذلك فإن هذين الشرطين أخذا بعين الاعتبار لجعل الدراسة متكاملة. وبالتالي يغلب على المقاطع البيتونية المسلحة بالفولاذ وقضبان الـFRP الانهيار المتمثل بتحطم البيتون المضغوط أو انقطاع قضبان الـFRP. ونادراً ما يحصل انقطاع للقضبان الفولاذية, وعند استخدام قضبان الفولاذ وقضبان الـFRP في التسليح يتحطم البيتون المضغوط عند الانهيار إذا كان عمق قضبان الـFRP قليلاً ضمن المقطع. وغير ذلك فإن انقطاع قضبان الـFRP يحصل عندما يكون عمقها كبيراً, وفي حال انقطاع قضبان الـFRP يتحول المقطع مباشرة إلى مقطع مسلح بالفولاذ فقط من حيث السلوك.

1-5- الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة النظرية والمرجعية

1- تستخدم علاقة برانسون لحساب عزم العطالة الفعال في أغلب الدراسات المرجعية وهي علاقة أساسية لحساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ، وهي العلاقة المعتمدة في الكود ACI 318-95 [4]. كما تعرض المراجع تقريبات مختلفة لحساب السهم وغالباً ما تقارن هذه التقريبات مع تقريب برانسون للتحقق من صحتها. لذلك سوف يعتمد تقريب برانسون في الدراسة الحسابية من بحثنا.

2- تستخدم علاقة برانسون المعدلة في مختلف الدراسات التي تناولت تسليح الجوائز البيتونية بقضبان من الـ FRP، وهي العلاقة المعتمدة في الكود ACI 440.1R -06 [7]. وتعطي علاقة برانسون المعدلة قيماً للسهم متقاربة مع القيم التجريبية، وسوف يعتمد هذا التقريب في حساب السهم في الجوائز المسلحة بالكربون من بحثنا. كما تتوفر في الدراسات المرجعية تقريبات أخرى لحساب السهم.

3- تكون السهوم كبيرة في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان FRP، وكذلك التشققات تكون كثيرة وهذا ناتج عن انخفاض معامل مرونة هذه القضبان. لذلك تقترح بعض الدراسات حلول عملية لهذه المشكلة كتحقيق سهم معاكس في الجوائز أثناء صبها (تقوس للأعلى) بحيث يكون السهم الناتج بعد التحميل ضمن الحدود المرضية.

4- تعتبر مشكلة التماسك بين قضبان FRP والبيتون المحيط بها مشكلة أساسية خصوصاً عند حساب عرض الشق، وتقترح الكودات إدخال العامل K_b في حساب عرض الشق، وتتراوح قيمته من 0.6 إلى 1.4 وهذا مجال كبير، ما يتطلب دراسات معمقة لهذا الموضوع. وسوف تعتمد القيمة 1.2 لهذا العامل في دراستنا الحسابية كما يوصي الكود ACI 440.1R -06 [7].

5- تبين الدراسات السابقة أنه من النادر أن تنقطع قضبان الفولاذ عند الحالة الحدية في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين، كون التشوه الحدي للفولاذ أكبر بكثير من التشوه الحدي لقضبان الـFRP. ويغلب

على المقاطع البيتونية المسلحة بالفولاذ وقضبان الـFRP الانهيار المتمثل بتحطم البيتون المضغوط أو انقطاع قضبان الـFRP.

6- لا تتوفر في الدراسات المرجعية علاقات لحساب السهم وعرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون)، وهذا ما سوف نعمل على معالجته في الدراسة التجريبية والحسابية اللاحقة من خلال تطوير علاقة برانسون المعدلة في الكود ACI 440.1R -06 [7].

الفصل الثاني
الدراسة التجريبية

الفصل الثاني

الدراسة التجريبية

2-1- مقدمة.

2-2- البرنامج التجريبي وعينات الاختبار.

2-3- خصائص المواد المستخدمة.

2-3-1- الخلطة البيتونية.

2-3-1-1 الحصويات المستخدمة.

2-3-1-2 الاسمنت المستخدم.

2-3-2- قضبان التسليح الفولاذية.

2-3-3- قضبان التسليح الكربونية.

2-4- تحضير عينات الاختبار.

2-5- الإجراءات المتعلقة باختبار العينات.

2-6- مقارنة نتائج اختبار العينات.

2-6-1- مقارنة قدرات التحمل القصوى للعينات المختبرة وأشكال الانهيار.

2-6-2- مقارنة منحنيات (حمولة- سهم) للعينات المختبرة.

2-6-3- مقارنة التشققات وانتشارها وارتفاعها وعرضها في الجوائز المختبرة.

2-6-4- مقارنة التشوه الحاصل في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز.

2-7- الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة التجريبية.

الفصل الثاني
الدراسة التجريبية

2-1- مقدمة.

يعتبر تسليح العناصر البيتونية تسليحاً مشتركاً(هجيناً) بقضبان فولاذية و كربونية CFRP أمراً واعداً ومفيداً نظراً لما يحققه هذا التسليح المشترك من قوة وقابلية للتشغيل بالإضافة للمتانة العالية والديمومة، وذلك في حال الاستعاضة عن قضبان التسليح الفولاذية في زوايا مقاطع العناصر بقضبان كربونية لا تصدأ وذات مقاومة عالية. ولإثبات مدى فاعلية تسليح العناصر بهذا النوع الهجين من التسليح، ولمعرفة سلوك هذه العناصر قمنا بدراسة تجريبية لسلوك جوائز بيتونية متماثلة ومسلحة بقضبان فولاذية أو كربونية أو فولاذية وكربونية معاً.

جرت عملية تحضير واختبار 30 جائزاً بيتونياً مسلحاً، وقد قسمت إلى عشرة مجموعات في كل منها ثلاثة جوائز، وكانت المتغيرات الأساسية هي نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية، وكيفية توزع قضبان التسليح (على طبقة واحدة أو على طبقتين). واتخذت الجوائز المسلحة بالفولاذ كمعيار لمقارنة السلوك والنتائج المختلفة. كما شملت التجارب اختبار المواد المستخدمة في البحث لتحديد خصائصها الضرورية واللازمة لاحقا في الدراسة التحليلية.

وتهدف الدراسة التجريبية إلى ما يلي:

- دراسة تأثير نسبة التسليح الهجين(فولاذ-كربون) على قدرات التحمل وأشكال الانهيار في الجوائز المختبرة.
- إجراء مقارنة لقيم السهوم في وسط المجاز لمعرفة فاعلية التسليح الهجين من ناحية التشوه.
- دراسة تأثير التسليح الهجين على أشكال التشققات وعرضها وانتشارها في الجوائز المختبرة.
- مقارنة منحنيات(حمولة- تشوه في قضبان التسليح) و(حمولة- تشوه في البيتون المضغوط) للجوائز المختبرة.

2-2- البرنامج التجريبي وعينات الاختبار.

تم تحضير واختبار 30 جائزاً بيتونياً مسلحاً أبعاد كلٍّ منها (12.5*25*200 سم)، وقسمت هذه الجوائز بحسب تسليحها بقضبان فولاذية أو كربونية أو بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون)، وذلك ضمن مقاطعها إلى عشرة مجموعات. ولتسهيل عملية المقارنة بين المجموعات المختبرة تم وضع مخطط توضيحي يشرح البرنامج التجريبي كما يظهر في الشكل (2-1)، ويبين الجدول (2-1) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسليحها و تسميتها وتقسيمها إلى مجموعات. ويبين الشكل(2-2) الأبعاد الهندسية وشكل

ونوع التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات I–II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX –X, وآلية تطبيق الحمولة. ويبين الشكل (2–3) شكل هياكل التسليح لمجموعات الجوائز المختبرة.

– توصيف المجموعات المختبرة.

– تضم المجموعة الأولى (I) ثلاثة جوائز معيارية متماثلة كل منها مسلحة بثلاثة قضبان(فولاذ A600) 3Ø12 وتمت تسميتها (BS1, BS2, BS3).

– وتضم المجموعة الثانية (II) ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة بثلاثة قضبان كربونية CFRP 3Ø12 وتمت تسميتها (BC4, BC5, BC6).

– وتضم المجموعة الثالثة (III) ثلاثة جوائز متماثلة ومسلحة بأربعة قضبان فولاذية متوضعة على طبقتين (فولاذ A600)4Ø12، وتمت تسميتها (Bs7, Bs8, Bs9).

– وتضم المجموعة الرابعة (IV) ثلاثة جوائز متماثلة ومسلحة بأربعة قضبان كربونية متوضعة على طبقتين 4Ø12CFRP، وتمت تسميتها (Bc10, Bc11, Bc12).

– أما المجموعة الخامسة (V) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة ومسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين(فولاذ A600) 2Ø12 في الطبقة العلوية + قضيبين كربونCFRP 2Ø12 في الطبقة السفلية، وتمت تسميتها(Bh13, Bh14, Bh15).

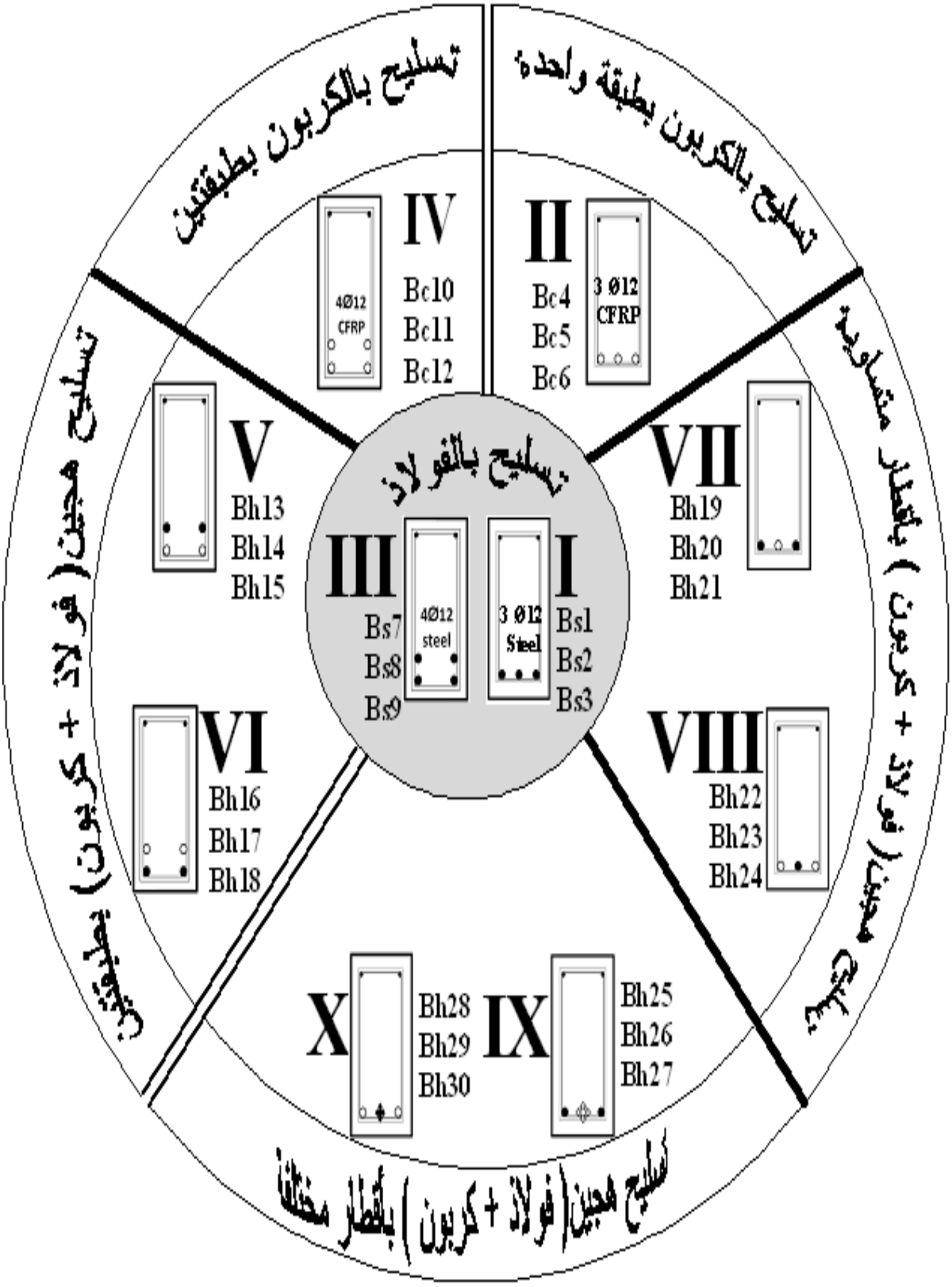
– والمجموعة السادسة (VI) تضم ثلاثة جوائز متماثلة ومسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين(فولاذ A600) 2Ø12 في الطبقة السفلية + قضيبين كربون CFRP 2Ø12 في الطبقة العلوية، وتمت تسميتها(Bh16, Bh17, Bh18).

– أما المجموعة السابعة (VII) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين (فولاذ A600)2Ø12 + قضيب كربونCFRP 1Ø12 وتمت تسميتها (Bh19, Bh20, Bh21).

– والمجموعة الثامنة (VIII) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيب (فولاذ A600)1Ø12 + قضيبين كربونCFRP 2Ø12 وتمت تسميتها (Bh22, Bh23, Bh24).

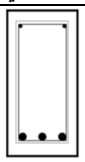
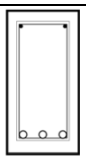
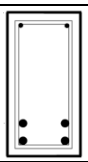
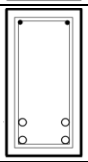
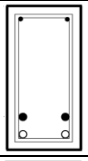
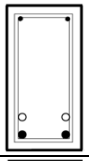
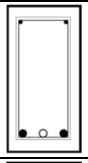
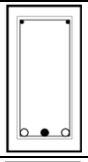
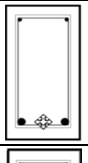
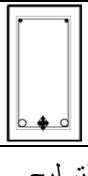
– أما المجموعة التاسعة (IX) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين (فولاذ A600)2Ø12 + قضيب كربونCFRP 1Ø8 وتمت تسميتها (Bh25, Bh26, Bh27).

– والمجموعة العاشرة (X) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيب (فولاذ A500) 1Ø10 + قضيبين كربونCFRP 2Ø12 وتمت تسميتها (Bh28, Bh29, Bh30).

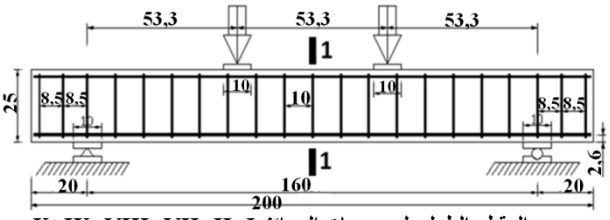


الشكل (2–1) مخطط توضيحي للبرنامج التجريبي يبين مقارنة لنوع وكيفية التسليح الهجين في الجوائز المختبرة وطريقة تسميتها وتقسيمها إلى عشر مجموعات (I–II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX–X).

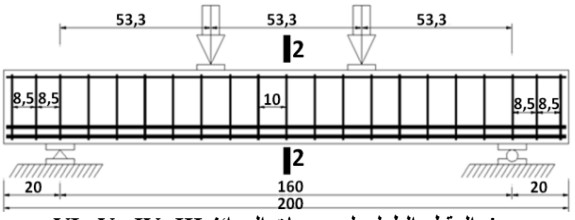
الجدول (2–1) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسميتها وتسليحها وتقسيمها إلى مجموعات.

رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها	اسم الجوائز في المجموعة	نوع وعدد وقطر ومساحة قضبان التسليح		نسبة تسليح المقطع $\mu=\frac{A_{s,c}}{b.h_o}$, %	نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية %	شكل توضيحي للمقطع العرضي
		فولاذية STEEL	كربونية CFRP			
I (معيارية تسليح بالفولاذ)	Bs1 Bs2 Bs3	3Ø12 3.39 CM^2	-	%1.21	**0**	
II تسليح بالكربون	Bc4 Bc5 Bc6	-	3Ø12 3.39 CM^2	%1.21	**100**	
III (معيارية تسليح بالفولاذ)	Bs7 Bs8 Bs9	4Ø12 4.52 CM^2	-	%1.74	**0**	
IV تسليح بالكربون	Bc10 Bc11 Bc12	-	4Ø12 4.52 CM^2	%1.74	**100**	
V تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh13 Bh14 Bh15	2Ø12 2.26CM^2 في الطبقة العليا	2Ø12 2.26CM^2 في الطبقة السفلى	**الكلية=1.74%** فولاذ=0.87% كربون=0.87%	**50**	
VI تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh16 Bh17 Bh18	2Ø12 2.26CM^2 في الطبقة السفلى	2Ø12 2.26CM^2 في الطبقة العليا	**الكلية=1.74%** كربون=0.87% فولاذ=0.87%	**50**	
VII تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh19 Bh20 Bh21	2Ø12 2.26 CM^2	1Ø12 1.13 CM^2	**الكلية=1.21%** فولاذ=0.81% كربون=0.4%	**33.3**	
VIII تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh22 Bh23 Bh24	1Ø12 1.13 CM^2	2Ø12 2.26CM^2	**الكلية=1.21%** فولاذ=0.4% كربون=0.81%	**66.6**	
IX تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh25 Bh26 Bh27	2Ø12 2.26CM^2	1Ø8 0.502 CM^2	**الكلية=0.99%** فولاذ=0.81% كربون=0.18%	**18.18**	
X تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh28 Bh29 Bh30	1Ø10 0.78CM^2	2Ø12 2.26CM^2	**الكلية=1.09%** فولاذ =0.28% كربون=0.81%	**74.3**	

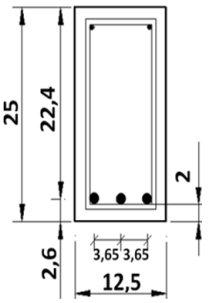
ملاحظة: الحرف الأول B من اسم الجوائز مأخوذ من كلمة Beam, والحرف الثاني يدل على نوع قضبان التسليح فـ S من كلمة Steel, أما C من كلمة Carbon, و h تعني تسليح هجين hybrid فولاذ وكربون, والرقم الذي يلي ذلك يدل على تسلسل الجائز ضمن مجموعته وضمن خطة البحث بشكلٍ عام.



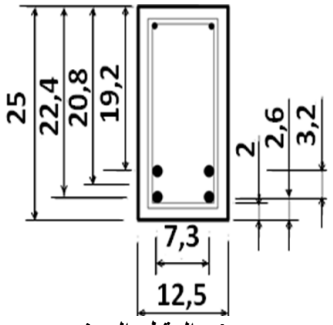
a- المقطع الطولي لمجموعات الجوائز I- II- VII- VIII- IX- X
المسلحة بطبقة واحدة من القضبان العاملة



b- المقطع الطولي لمجموعات الجوائز III- IV- V- VI
المسلحة بطبقتين من القضبان العاملة

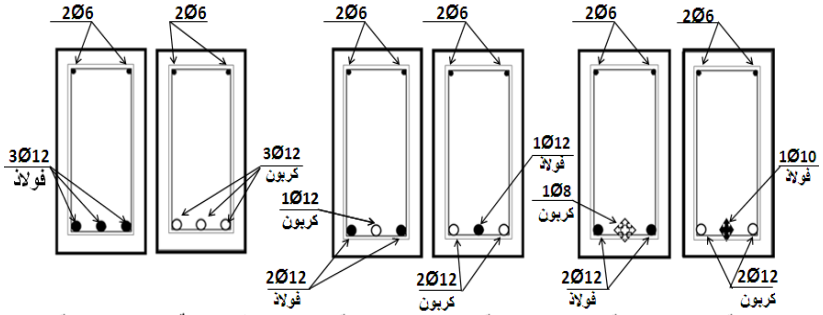


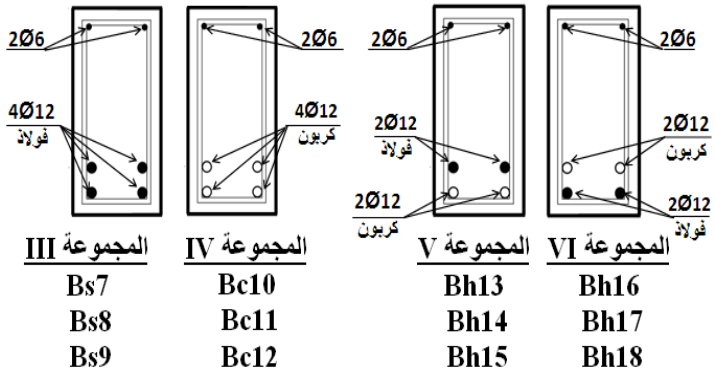
c- المقطع العرضي 1-1



d- المقطع العرضي 2-2

e- المجموعات المختبرة:





الشكل (2-2) الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات I-II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X (الأبعاد بـ سم)، (واعتمدت الرموز التالية للقضبان: ● = قضيب فولاذ قطر 12 ملم ونوعه A600، ○ = قضيب كربون قطر 12 ملم، ◆= قضيب فولاذ قطر 10 ملم ونوعه A500 ، ◈ = قضيب كربون قطر 8 ملم. وتجدر الإشارة إلى أن سماكة التغطية البيتونية حول القضبان من الجوانب والأعلى بحدود 15 ملم ومن الجهة السفلية تساوي 20 ملم.

الشكل (2–3) شكل هياكل التسليح لمجموعات الجوائز المختبرة I –II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX.

2-3- خصائص المواد المستخدمة.

2-3-1- الخلطة البيتونية.

يبين الجدول(2-2) المقاومة المميزة للبيتون على الضغط f_c' لجميع المجموعات المختبرة, وهذه المقاومة المكافئة تحسب وفق العلاقة التالية: $f_c' = 0.8 f_{cu}$, حيث: f_{cu} – متوسط المقاومة المكعبية، وهي ناتجة من اختبار ثلاثة مكعبات(15سم) على الضغط لكل مجموعة جوائز، ويبين الشكل(2-4) القوالب الفولاذية بعد الانتهاء من عملية صب الجوائز البيتونية. والجوائز المختبرة أعدت من البيتون وفق نسب الخلط المبينة في الجدول(2-3) وذلك للحصول على مقاومة مميزة على الضغط بحدود 30 MPa.

الجدول (2-2) المقاومة المميزة للبيتون على الضغط f_c' لجميع المجموعات المختبرة.

رقم المجموعة	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
المقاومة المميزة للبيتون على الضغط (f_c' MPa)	32.1	33.7	34.2	32.8	32.8	31.9	34.8	34.1	31.9	34.3
المتوسط (MPa)	33.3									

الشكل (2-4) شكل القوالب الفولاذية بعد الانتهاء من عملية صب الجوائز البيتونية، حيث تم صب 3 جوائز متماثلة بالتسليح وبالأبعاد الهندسية من بيتون كل مجموعة، بالإضافة لـ 3 مكعبات بيتونية بأبعاد(15*15*15 سم).

الجدول (2–3) النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية في المتر المكعب.

المادة	الإسمنت	البحص	الرمل	الماء
الوزن (Kg)	450	1270	460	207

2–3–1–1 الحصويات المستخدمة.

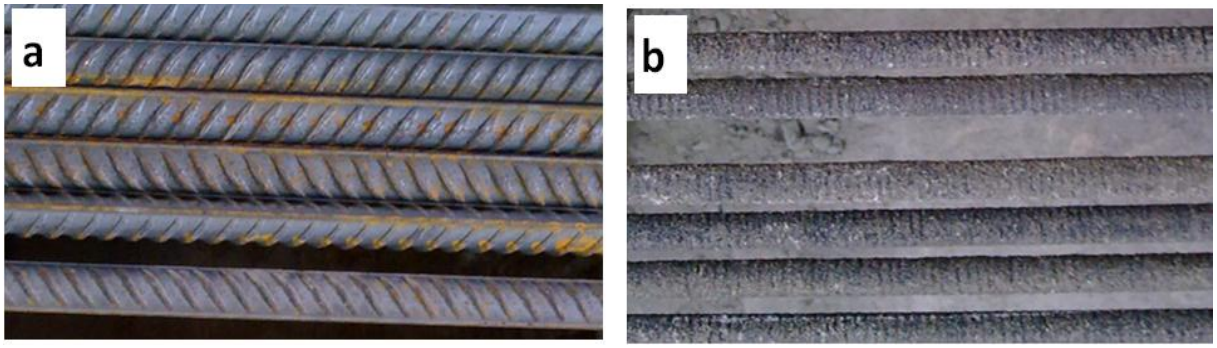
تتكون الحصويات المستخدمة في الخلطة البيتونية من بحص متدرج الخشونة (5–25 mm) لونه اسمر داكن، وكذلك رمل نهري كوارتزي ناعم أبيض اللون خالي من الشوائب والمواد العالقة بكثافة حجمية تساوي(1650 Kg/m^3). وتم تأمين هذه الحصويات مما هو متوفر في سوق مواد البناء المحلية في مدينة روستوف الروسية ضمن عبوات بلاستيكية بوزن 40 كغ. وحسبت الكميات اللازمة لصب 3 جوائز و3 مكعبات لكل مجموعة وفق النسب المبينة في الجدول (2–3)، وجرت عملية وزن مواد الخلطة باستخدام ميزان حساس، وذلك قبل إجراء عملية الجبل والصب.

2–3–1–2– الاسمنت المستخدم.

استخدم الاسمنت البورتلاندي المصنع في معمل "بروليتاريا" في مدينة نوفاراسيسك الروسية، وهو من صنف(M500) وذي مقاومة على الضغط تساوي(**50 MPa**) بعمر 28 يوماً. وهذا الصنف من الاسمنت متوفر في السوق المحلية بمدينة روستوف ويستخدم في المنشآت البيتونية المسلحة. وقد تم استخدامه ضمن فترة الصلاحية المحددة بثلاثة أشهر، وكانت نسبة الاسمنت إلى الماء تساوي $(W/C)=0.46$، وتجدر الإشارة إلى أنه لم يتم إضافة أية مواد أخرى إلى الخلطة البيتونية.

2–3–2– قضبان التسليح الفولاذية.

استخدمت قضبان فولاذية ملساء بقطر6mm من نوع B500 للتسليح العرضي والعلوي وبتباعد للأساور يساوي 10cm, أما للتسليح السفلي العامل فاستخدمت قضبان فولاذية محلزنة بقطر12 ملم من نوع A600 عالي المقاومة، وكذلك قضبان فولاذية محلزنة بقطر10mmمن نوع A500 (لجوائز المجموعة X فقط). والقضبان الفولاذية المستخدمة روسية الصنع ومتوفرة في سوق مدينة روستوف، وتجدر الإشارة إلى أن تسميات حديد التسليح المستخدم في هذا البحث B500 وA500 وA600 تتوافق مع التسميات الحديثة المعتمدة في المراجع الروسية [41]، حيث أن الرقم المرافق للاسم يدل على قيمة إجهاد الخضوع. ويظهر الشكل(2–5) التباين في شكل القضبان الفولاذية والكربونية المستخدمة.



الشكل(2–5) شكل قضبان التسليح المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة (a– الفولاذية، b– الكربونية CFRP).

تم إجراء تجارب الشد المباشر على عينات من فولاذ التسليح المستخدم كما مبين في الشكل(2-6) على جهاز ماركة (IP200) في مخبر جامعة روستوف، وذلك لتحديد مواصفات هذه العينات ويبين الجدول(2-4) الخصائص الميكانيكية لمختلف قضبان التسليح المستخدمة في البحث.

الشكل(2-6) جهاز شد قضبان التسليح ماركة (IP200) في مخبر تجريب المواد بجامعة روستوف، وشكل العينات الفولاذية المختبرة.

الجدول (2-4) مواصفات قضبان التسليح الفولاذية والكربونية المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة والمحددة تجريبياً.

نوع قضبان التسليح	القطر (mm)	المقاومة على الشد MPa	إجهاد الخضوع MPa	معامل المرونة GPa	التشوه النسبي، %
قضبان **فولاذية** ملساء للتسليح العرضي والتسليح العلوي B500	Ø 6	608	497	200	0.12
قضبان **فولاذية** محلزنة للتسليح السفلي A500	T 10	600	525	200	0.10
قضبان **فولاذية** محلزنة للتسليح السفلي A600	T 12	700	622	200	0.065
قضبان **كربونية** محلزنة ومكسوة بالرمل للتسليح السفلي CFRP	Ø 8	2220	-	71.69	0.0309
قضبان **كربونية** محلزنة ومكسوة بالرمل للتسليح السفلي CFRP	Ø 12	2215	-	72.64	0.0305

2-3-3- قضبان التسليح الكربونية.

استخدمت قضبان كربونية CFRP بقطر(8 و12)mm، وعولج السطح في مراحل صناعة القضبان بحيث ينتج سطح محلزن ولصق عليه رمل كوارتزي وذلك لزيادة تماسكه بالبيتون. تم اختبار عينات من هذه القضبان على الشد في مخبر تجريب المواد بجامعة روستوف.

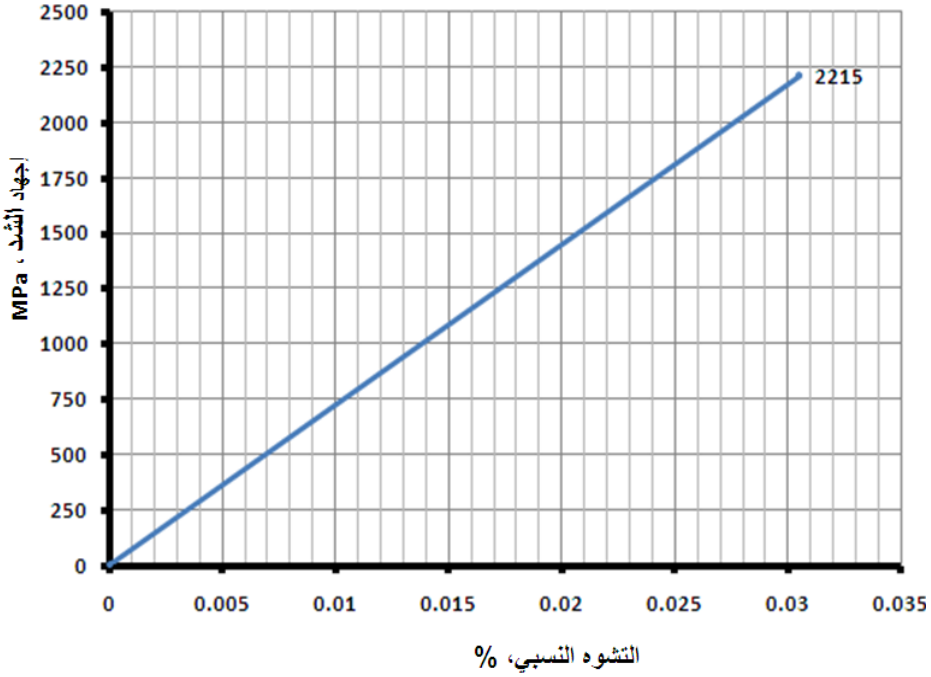
وأعيد اختبار بعض العينات في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين على جهاز الشد ماركة (**ibertest**) كما مبين في الشكل (2–7)، ويبين الشكل (2–8) منحني (إجهاد–تشوه) لقضبان الكربون، ووضعت الخصائص الميكانيكية لقضبان الـCFRP في الجدول(2–4) واعتمدت هذه الخصائص في الدراستين الحسابية والتحليلية.

منحني (قوة – تطاول) مرسوم على شاشة جهاز الشد ماركة ibertest

شكل العينة بعد تثبيتها

تثبيت العينة بملاقم طول كل منها 25 سم

الشكل(2–7) اختبار القضبان الكربونية في مخبر تجريب المواد بكلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين.



الشكل(2–8) مخطط (إجهاد – تشوه) للقضبان الكربونية.

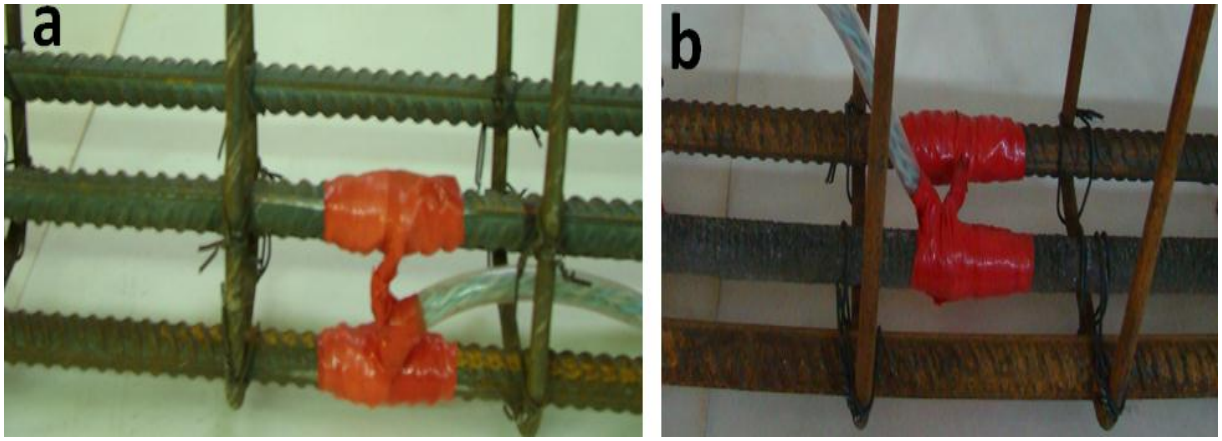
2-4- تحضير عينات الاختبار.

- تحضير هياكل التسليح ولصق حساسات التشوه عليها.

قبل كل عملية صب يتم تحضير ثلاثة هياكل تسليح متماثلة لكل مجموعة عينات كما مبين في الشكل (2-9) مع مراعاة الاشتراطات البعدية بين القضبان[43,42]، وتم لصق حساسات تشوه عدد 2 في منتصف منطقة الانعطاف الصافي على القضيب الواحد، ولصقت الحساسات على قضيبين في كل هيكل تسليح (قضيب طرفي وقضيب وسطي في حالة التسليح بطبقة واحدة) و(قضيب علوي وقضيب سفلي في حالة التسليح بطبقتين). ويساوي طول الحساس 1cm، كما مبين بالشكل (2-10)، وتتم عملية اللصق بعد جلخ وتنظيف وتسوية مكان توضع الحساسات، ثم يتم توصيل الحساسات بالأسلاك الكهربائية المناسبة وتعزل الحساسات والأسلاك جيدا لمنع وصول الرطوبة إليها أثناء عملية الصب كما في الشكل (2-11). وبعد تنظف القوالب المعدنية جيدا تمسح بالزيت وتوضع ضمنها هياكل التسليح، وتمرر الأسلاك الكهربائية بأنبوب مطاطي دقيق وصولا إلى خارج القالب المعدني عبر ثقب محدث في الجهة السفلى منه.

الشكل (2-9) عملية تحضير هياكل التسليح لكل مجموعة جوائز.

الشكل (2–10) عملية لصق حساسات التشوه على قضبان التسليح والأدوات والمواد المستخدمة لتوصيلها وعزلها.



الشكل (2–11) شكل الهياكل بعد لصق الحساسات وعزلها، a – حالة توضع القضبان على طبقتين، b – حالة توضع القضبان على طبقة واحدة.

– خلط البيتون وصب العينات.

تمت عملية جبل المواد المستخدمة في تحضير الخلطة البيتونية باستخدام جبالة مخبرية في مخبر البيتون المسلح بجامعة روستوف في روسيا الاتحادية، والمبينة في الشكل(2–12). وأثناء الصب استخدمت الرجاجة الابرية للحصول على بيتون مكتنز متجانس، ثم جرت تسوية للسطوح بشكلٍ جيد بواسطة المسطرين. وأخرجت عينات الاختبار ونقلت بعد تصلب البيتون وفك القوالب المعدنية باستخدام رافعة مخبرية كما هو مبين بالشكل(2–13)، وبعد ذلك حرصنا على سقاية العينات وتغليفها بالخيش المبلل، وكان يجري ترطيبها بالماء مرتين في اليوم على مدار 28 يوماً. أما عملية تصلب البيتون فتمت في ظروف طبيعية وبدرجة حرارة بحدود ($20\pm2\ C^0$).

الشكل (2–12) عملية جبل البيتون بالجبالة الكهربائية، وصب الجوائز البيتونية في القوالب المعدنية، واستخدام الرجاجة الابرية لرج البيتون.

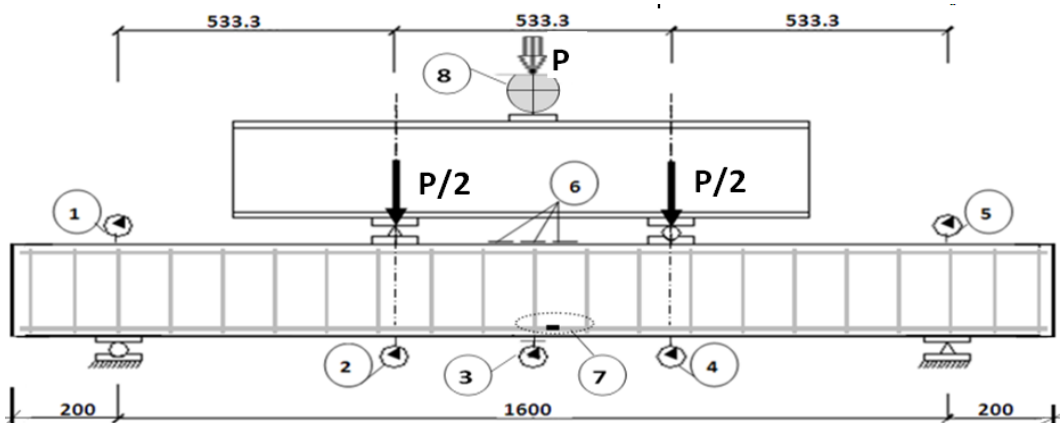
الشكل (2–13) عملية إخراج ونقل العينات من القوالب المعدنية بعد تصلب البيتون باستخدام رافعة مخبرية.

2-5- الإجراءات المتعلقة باختبار العينات.

اختبرت الجوائز بعمر 10-11 شهراً كجوائز بسيطة الاستناد تحت تأثير حمولتين مركزتين تتوضع كل منهما على ثلث طول مجاز الجوائز المساوي (160cm) الشكل(2-14). وتم التحميل بشكلٍ تدريجي باستخدام جهاز تحميل هيدروليكي عن طريق خلية تحميل(ديناموميتر طراز Togaria) ذات استطاعة 500 KN، وقد توضعت بين المكبس الهيدروليكي وموزع الحمولة كما في الشكل (2-15)، وبدفعات تحميل متزايدة KN(4 و8 و16). وبعد كل دفعة تحميل كانت فترة انتظار تساوي 10 دقائق, حيث أخذت القراءات مرتين بعد التحميل مباشرة ثم بعد فترة الانتظار واعتمد أخيراً متوسط القراءتين. فصلت بين الجائز المختبر والمساند وموزع الحمولة صفائح فولاذية بأبعاد(12.5*10*2 سم) لمنع التحطم الموضعي للبيتون.

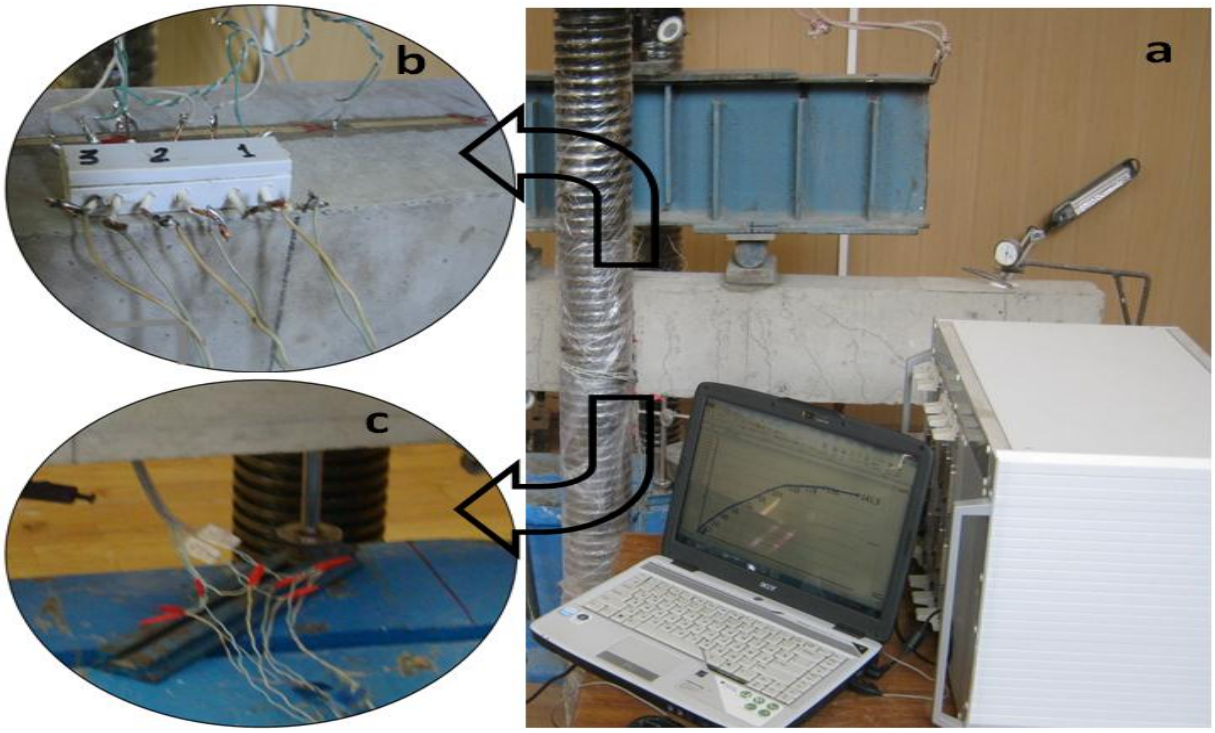
تم التحميل في المرحلة الأولى بثلاث دفعات تحميل كلٌّ منها 4KN تلا ذلك التحميل بدفعات 8KN وبعد ذلك بدفعات 16KN إلى مستوى تحميل يساوي 80% من الحمولة القصوى، بعد ذلك تم التحميل بدفعات 8KN حتى حصول انهيار الجوائز. واستخدمت ثلاثة حساسات للتشوه كل منها بطول (mm 50) لرصد التشوه الطولي الحاصل في البيتون المضغوط كما مبين في الشكل(2-16،-b-c)، ووصلت أسلاك الحساسات جميعها إلى محطة قياس التشوهات وهي من طراز (**Ostroestva Izmeritelna-Obravlaushe OIO 2002**) المبينة بالشكل (2-16،-a).

قيست السهوم والانتقالات في الجوائز المختبرة باستخدام ساعات قياس السهوم (دقتها=0.01 ملم) وعددها خمسة كما مبين في الشكل (2-14)، وضعت اثنتان على محوري الاستناد فوق الجائز واثنتان على محوري التحميل تحت الجائز وواحدة وضعت تحت منتصف مجاز الجائز. وتم تحديد التشققات الحاصلة وانتشارها وعرضها عند كل مستوى تحميل, كما سجلت قيم السهوم والتشوهات والحمولات الموافقة لها. ويبين الشكل(2-17) مختلف مراحل الاختبار وتسجيل النتائج.



الشكل (2-14) مخطط عام للجوائز المختبرة يبين مكان توضع مقاييس التشوه والحساسات وموزع الحمولة وكيفية الاستناد(الأبعاد بـ ملم). 1- 2-3-4-5 مقاييس انتقال ساعية, 6 – مكان لصق حساسات التشوه على السطح البيتوني في منتصف منطقة الضغط، 7 – مكان لصق حساسات التشوه على قضبان التسليح في منطقة الانعطاف الصافي، 8- خلية التحميل (ديناموميتر) وهي تفصل بين المكبس الهيدروليكي وموزع الحمولة.

الشكل (2–15) شكل جهاز اختبار الجوائز في مخبر البيتون لدى جامعة روستوف في (روسيا الاتحادية).



الشكل (2–16) a – شكل محطة قياس التشوهات طراز (Ostroestva Izmeritelna-Obravlaushe OIO2002)، b– مكان لصق حساسات التشوه الثلاثة على البيتون (طول الحساس =5 سم)، c– خروج الأسلاك الموصولة إلى حساسات القضبان من داخل الجائز.

الشكل (2–17) اختبار الجوائز وتسجيل النتائج ، a– وضع الجائز على جهاز الاختبار وتجهيزه بأدوات القياس المختلفة،b– اختبار الجائز وتسجيل مختلف النتائج ، c– تحديد التشققات عند كل مستوى تحميل، d– تصوير العينات بعد الانتهاء من اختبارها.

2-6- مقارنة نتائج اختبار العينات.

أثناء اختبار العينات تم تسجيل العديد من النتائج وسنتطرق فيما يلي إلى مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بمقاومة الجوائز على الانعطاف وقيم السهوم وأشكال التشققات وعرضها وقيم التشوهات في القضبان والبيتون المضغوط.

2-6-1- مقارنة قدرات التحمل القصوى للعينات المختبرة وأشكال الانهيار.

● - **المجموعات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة (I- II – VII- VIII -IX -X).**

إن الحمولات المسببة للانهيار وأشكال انهيار الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو الاثنين معاً (تسليح هجين) والتي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة مبين في الجدول (2-5) وعلى الشكل (2-18،-a).

الجدول (2-5) مقارنة قدرات التحمل الأعظمية للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها.

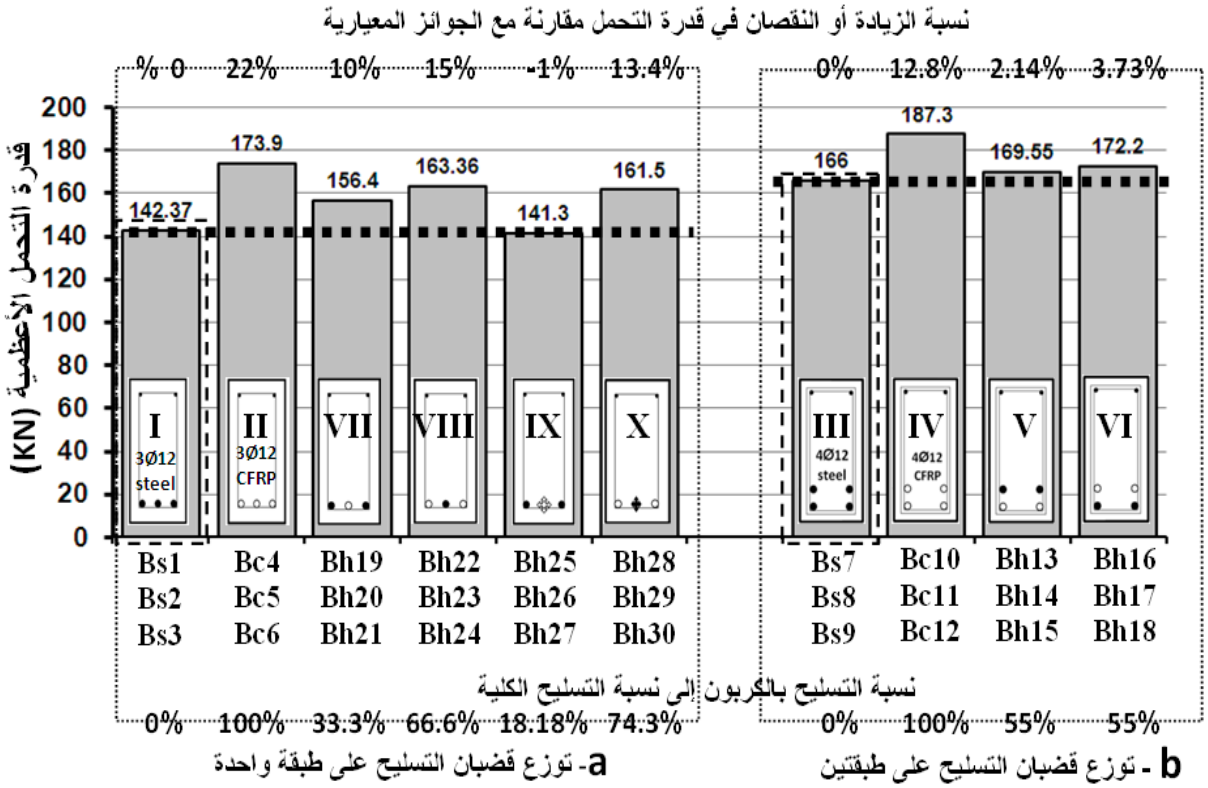
توزع قضبان التسليح	اسم مجموعة الجوائز المختبرة	أسم الجائز	قدرة التحمل القصوى P_{max}^{exp} (KN)		نسبة التسليح الكلية للمقطع %	نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية %	نسبة الزيادة في قدرة التحمل بالنسبة للجوائز المعيارية (المسلحة بالفولاذ) %	شكل الانهيار في الجوائز
			قيمة تجريبية	قيمة وسطية				
على طبقة واحدة	I معيارية	BS1	145.5	142.37	1.21	0	0*	تطاول قضبان التسليح الفولاذية
		BS2	142.2					
		BS3	139.43					
	II	Bc4	173.5	173.9		100	22*	تحطم البيتون المضغوط
		Bc5	174					
		Bc6	176					
	VII	Bh19	155.4	156.4		33.3	10*	تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الفولاذية
		Bh20	155.8					
		Bh21	158					
	VIII	Bh22	163.9	163.36		66.6	15*	تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الفولاذية
		Bh23	162					
		Bh24	164.2					
	IX	Bh25	139.9	141.3	0.99	18.18	-1*	تطاول قضبان التسليح الفولاذية وبداية تحطم للبيتون المضغوط
		Bh26	143.4					
		Bh27	140.6					
	X	Bh28	160.5	161.5	1.09	74.3	13.4*	تحطم البيتون المضغوط
		Bh29	162.6					
		Bh30	161.4					
على طبقتين	III معيارية	BS7	167.7	166	1.74	0	0**	تطاول قضبان التسليح الفولاذية
		BS8	167.5					
		BS9	163					
	IV	Bc10	188.2	187.3		100	12.8**	تحطم البيتون المضغوط
		Bc11	186.6					
		Bc12	185.1					
	V	Bh13	170.97	169.55		50	2.1**	تطاول قضبان التسليح الفولاذية
		Bh14	169.48					
		Bh15	168.2					
	VI	Bh16	171.5	172.2			3.7**	تطاول قضبان التسليح الفولاذية
		Bh17	171.9					
		Bh18	173.2					

ملاحظة: * - عند المقارنة مع المجموعة المعيارية I ، ** - عند المقارنة مع المجموعة المعياريةIII.

يتبين من خلال إجراء مقارنة مباشرة للنتائج التجريبية أنه لنوع قضبان التسليح تأثير كبير على قدرة التحمل الأعظمية للجوائز. وعلى الرغم من أن قضبان التسليح الكربونية المستخدمة في الجوائز ذات قدرة تحمل على الشد أكبر بحوالي أربع مرات من القضبان الفولاذية، فإن قدرة تحمل الجوائز المسلحة بها(المجموعة**II**) أكبر بـ 22% فقط من الجوائز المسلحة بالفولاذ(المجموعة**I**). وقدرة تحمل الجوائز المسلحة تسليحاً هجيناً تتعلق بنسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية، فالجوائز المسلحة على طبقة واحدة بقضيب أو بقضيبين كربون في مقطعها، ازدادت قدرة تحملها القصوى بنسبة (10 و15)% بالتتالي، مقارنة مع الجوائز المسلحة بالفولاذ(المجموعة**I**). أما الجوائز المسلحة بأربعة قضبان على شكل طبقتين، ازدادت قدرة تحملها القصوى بنسبة تراوحت بين(2.1 و12.8)% مقارنة مع الجوائز المسلحة بالفولاذ(المجموعة**III**).

يتبين من الجدول(2–5) والشكل(2–18،–a) أن ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية في الجوائز المختبرة والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها 1.21 %(المجموعات **I -II– VII- VIII**)، ووفق النسب التالية:(0–33.3– 66.6 –100)%، يؤدي إلى زيادة قدرة التحمل وفق النسب التالية:(0–10– 15– 22)% بالتتالي.

ومن أجل نسبة تسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية(18.18%) في الجوائز المختبرة (المجموعة**IX**) والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها(0.99 %)، فإن قدرة التحمل الأعظمية تساوي تقريباً قدرة تحمل جوائز المجموعة المعيارية(**I**)، (على الرغم من أن نسبة التسليح الكلية انخفضت بنسبة 18% مقارنة مع المجموعة المعيارية **I**).



الشكل (2–18) مقارنة قدرات التحمل الأعظمية في الجوائز المختبرة. a- في الجوائز التي تتوزع فيها القضبان على طبقة واحدة، b – في الجوائز التي تتوزع فيها القضبان على طبقتين.

عند زيادة نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسبة (74.3%) في الجوائز المختبرة والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها1.09% (المجموعة**X**)، فإن قدرة التحمل الأعظمية زادت وفق النسبة التالية(13.4%)، (على الرغم من أن نسبة التسليح الكلية انخفضت بنسبة 10% مقارنة مع المجموعة المعيارية (**I**)، واستخدم فيها فولاذ A500 ذو إجهاد خضوع 525MPa وقطر mm 10).

يوضح الجدول(2–5) أشكال الانهيار الحاصلة في الجوائز المختبرة، والتي يظهر منها أن جميع الجوائز البيتونية في المجموعة المعيارية(**I**) انهارت نتيجة تطاول قضبان التسليح الفولاذية. وجوائز المجموعة(**II**) المسلحة بالكربون بشكلٍ كامل، وكذلك جوائز المجموعة (**X**) المسلحة بشكلٍ هجين انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط، أما جوائز المجموعات (**IX -VIII-VII**) المسلحة بشكلٍ هجين فقد انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط في منطقة الضغط ورافقه حصول تطاول في قضبان التسليح الفولاذية.

● ● – المجموعات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقتين (III- IV- V- VI).

يبين الجدول (2–5) قدرات التحمل القصوى للجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو الاثنين معاً (تسليح هجين) بطبقتين من القضبان، ومنه يتبين أن استبدال القضبان الفولاذية بقضبان كربونية يؤدي إلى زيادة في قدرات التحمل الأعظمية، وأن الجوائز المعيارية المسلحة بطبقتين من الفولاذ(المجموعة **III**) تحملت (166 KN)، في حين أن الجوائز المسلحة بطبقتين من الكربون(المجموعة **IV**) كانت الأكثر تحملاً (187.3 KN) أي بزيادة تساوي 12.8% مقارنةً مع الجوائز المعيارية(المجموعة **III**). أما الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين في المجموعة (**V**) حيث القضبان الكربونية تتوضع تحت الفولاذية فقد زادت قدرة التحمل بشكلٍ طفيف وبلغت قدرة تحملها(169.55 KN)، أي بزيادة تساوي 2.14% مقارنة مع الجوائز المعيارية. وفيما يتعلق بالجوائز المسلحة بشكلٍ هجين في المجموعة (**VI**) حيث القضبان الكربونية تتوضع فوق الفولاذية فقد زادت قدرة التحمل بشكلٍ طفيف أيضاً وبلغت قدرة تحملها(172.2 KN) أي بزيادة تساوي 3.73% مقارنةً مع الجوائز المعيارية.

ويبين الشكل(2–18،–b) أن قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المختبرة (المجموعة **IV**) ازدادت الى12.8% مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية إلى 100%. وقدرة التحمل في جوائز المجموعتين(**V** و**VI**) ازدادت وفق النسب (2.14–3.73)% بالتتالي، وذلك مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية فيها إلى 50%. وأن تأثير تبادل القضبان الكربونية والفولاذية مواقعهما على قدرة التحمل لم يتجاوز1.59%. وفي نفس الجدول(2–5) عرضت أشكال الانهيار الحاصلة في الجوائز المختبرة، وتبين النتائج أن جميع الجوائز البيتونية المعيارية المسلحة بالفولاذ(المجموعة **III**) انهارت نتيجة تطاول قضبان التسليح الطولية، وكذلك انهارت جوائز المجموعتين

(**V** و**VI**) المسلحة بنسبة 50% كربون, أما الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون بنسبة (100 % أي المجموعة **IV**) فأنها انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط.

2-6-2- مقارنة منحنيات (حمولة- سهم) للعينات المختبرة.

● **- المجموعات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة(I- II– VII- VIII- IX- X).**

يظهر الجدول (2-6) وكذلك الشكل (2-19،a) مقارنة مباشرة للنتائج التجريبية لقيم السهوم الأعظمية وسط مجاز الجوائز المختبرة والتي تتوضع فيها قضبان التسليح العاملة على طبقة واحدة. ويتبين أنه لنوع قضبان التسليح تأثيراً كبيراً على قيم السهوم الأعظمية للجوائز.

الجدول(2-6) مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط مجاز الجوائز ومتوسط عدد الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي.

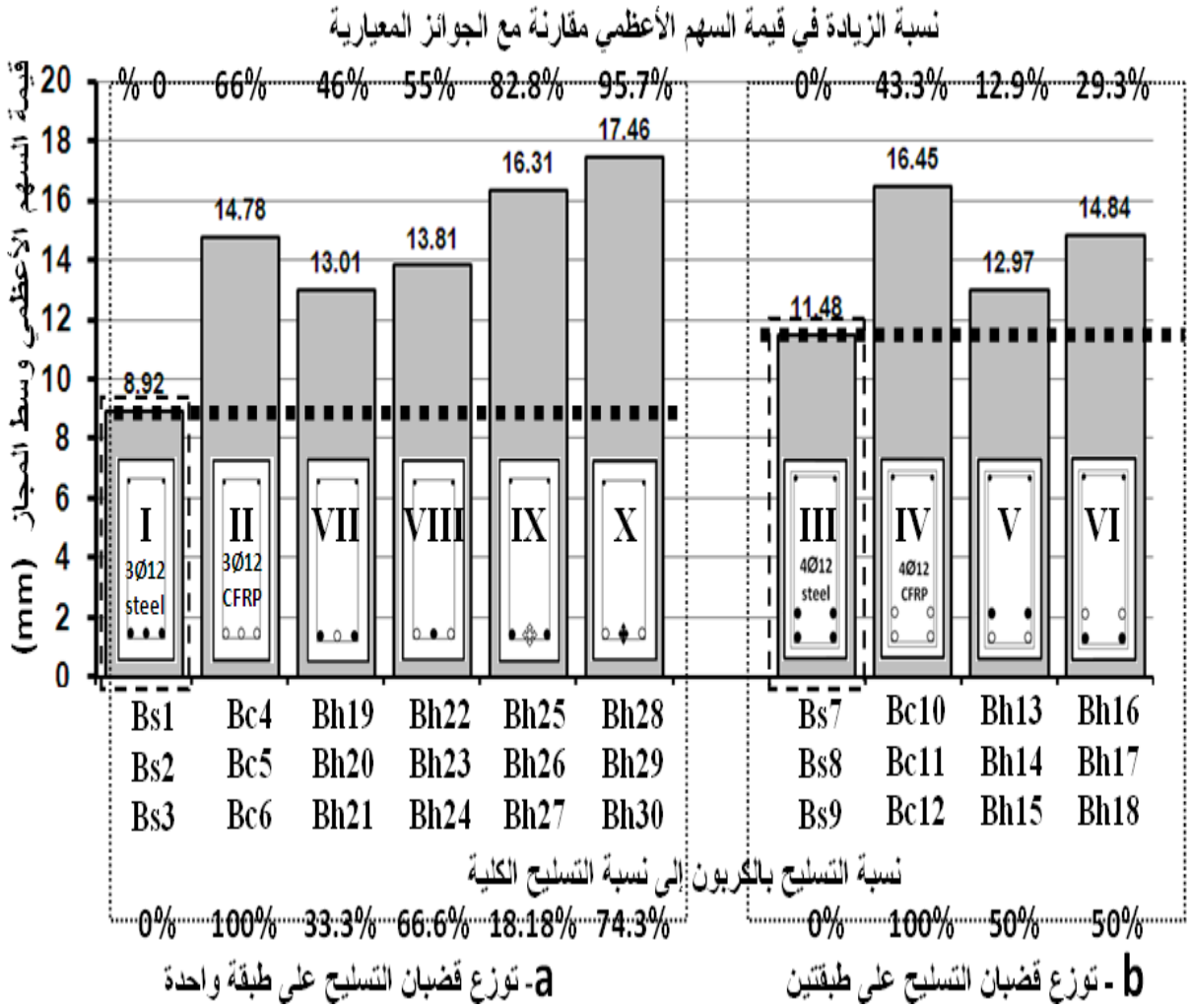
توزع قضبان التسليح	اسم مجموعة الجوائز المختبرة	أسم الجائز	قيمة السهم الأعظمية في وسط المجاز (mm) $\delta_{\max}^{\exp}$		نسبة التسليح الكلية للمقطع %	نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية %	نسبة الزيادة في قيمة السهم مقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ %	متوسط عدد الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي	متوسط المسافة بين الشقوق (CM)	متوسط طول الشق الشاقولي في منطقة الانعطاف الصافي (CM)
			قيمة تجريبية	قيمة وسطية						
على طبقة واحدة	I معيارية	BS1 BS2 BS3	8.65 9.22 8.89	8.92	1.21	0	0*	7	8.9	17.5
	II	Bc4 Bc5 Bc6	14.4 14.75 15.2	14.78		100	66*	13	4.4	17.7
	VII	Bh19 Bh20 Bh21	12.4 12.94 13.7	13.01		33.3	46*	9	6.7	21
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	13.3 13.89 14.28	13.81		66.6	55*	11	5.3	17.4
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	15.66 17.21 16.08	16.31	0.99	18.18	82.8*	7	8.9	17.9
	X	Bh28 Bh29 Bh30	16.77 18.51 17.11	17.46	1.09	74.3	95.7*	9	6.7	19.3
على طبقتين	III معيارية	BS7 BS8 BS9	11.84 11.51 11.10	11.48	1.74	0	0**	7	8.9	16.6
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	17.19 16.13 16.04	16.45		100	43.3**	11	5.3	18.8
	V	Bh13 Bh14 Bh15	13.31 12.79 12.83	12.97		50	12.9**	9	6.7	17.3
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	14.60 14.65 15.29	14.84			29.3**	8	7.6	17.7

ملاحظة: * - عند المقارنة مع المجموعة المعيارية I ، ** - عند المقارنة مع المجموعة المعياريةIII.

عند ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية في الجوائز المختبرة والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها 1.21 %(المجموعات **I -II– VII- VIII**)، ووفق النسب التالية:(0–33.3– 66.6 –100)%، يؤدي إلى زيادة قيمة السهم الأعظمي وفق النسب التالية:(0– 46– 55– 66)% بالتتالي.

وأنه من أجل نسبة تسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية(18.18%) في الجوائز المختبرة (المجموعة**IX**) والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها(0.99 %)، فإن السهم الأعظمي يزداد بنسبة 82.8% مقارنة مع جوائز المجموعة المعيارية(**I**)، (نسبة التسليح الكلية في المجموعة**IX** أقل بنسبة 18% مقارنة مع المجموعة المعيارية **I**).

وعند زيادة نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسبة (74.3%) في الجوائز المختبرة والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها1.09% (المجموعة**X**)، فإن السهم الأعظمي يزداد وفق النسبة التالية:(95.7%)، ويعود السبب في ذلك إلى نسبة التسليح العالية بالكربون، وإلى أن نسبة التسليح الكلية في (**X**) أقل بـ 10% مقارنة مع المجموعة المعيارية (**I**)، واستخدم فيها فولاذ A500 ذو إجهاد خضوع 525MPa وقطر 10mm).



الشكل (2–19) العلاقة بين قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز و(تغير نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة).

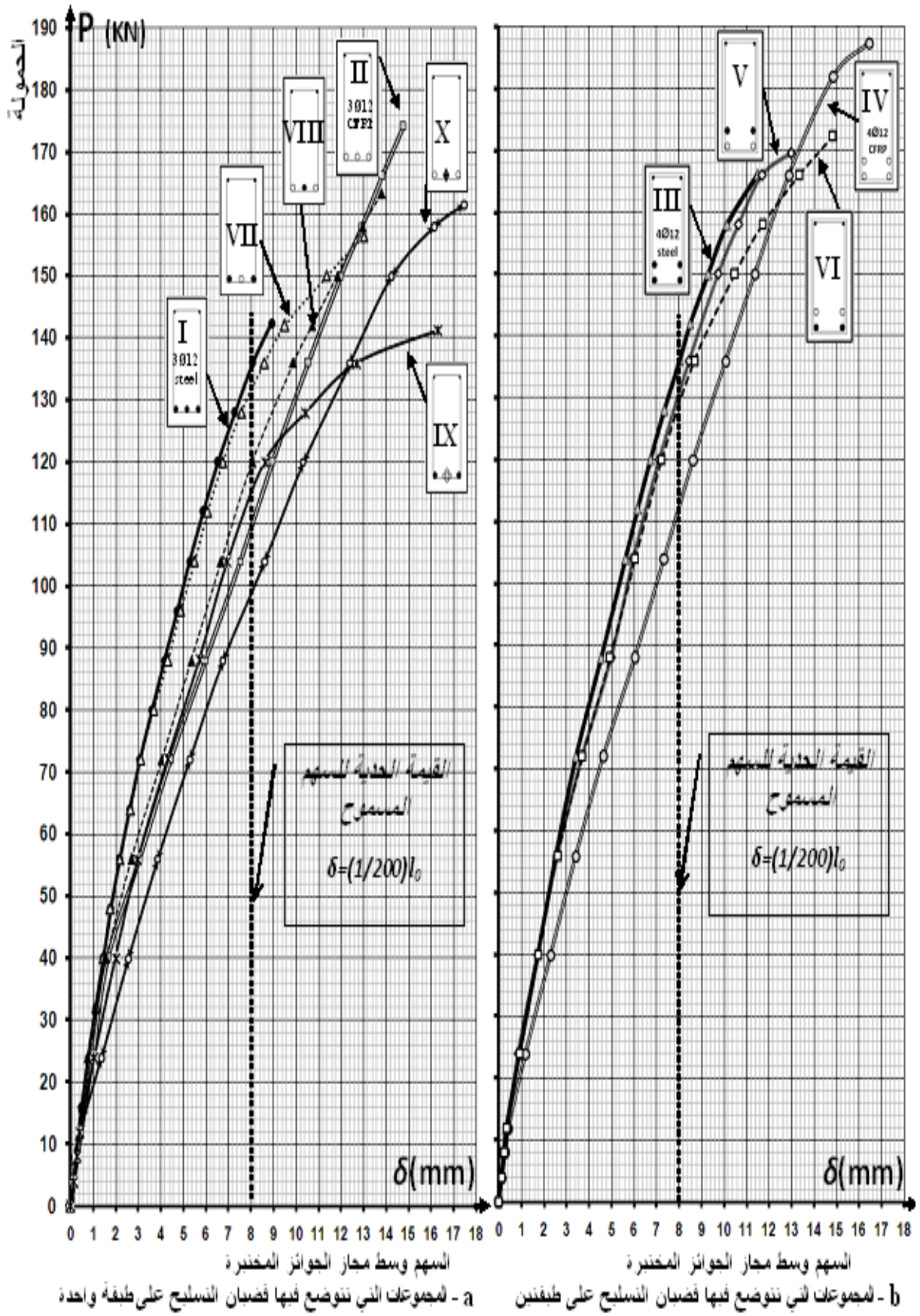
ويظهر على الشكل(2–20،–a) مقارنة بين منحنيات (حمولة– سهم) في وسط مجاز مجموعات الجوائز المختبرة(**I- II – VII- VIII- IX- X**), حيث رسم مخطط (حمولة– سهم) الناتج عن قيمة السهم الوسطية الناتجة من ثلاثة جوائز في كل مجموعة. ومنها نستنتج أن الجزء الخطي الأول من المنحنيات (حتى مستوى التحميل13KN) كان متشابهاً تقريباً لجميع الجوائز وفي نهاية المرحلة الخطية الأولية بدأت الجوائز بالتشقق، وفي الجزء الثاني من المنحنيات كانت هناك ميول مختلفة للمنحنيات تختلف عن الميل في الجزء الأول, وهذا يشير إلى أن صلابة الجوائز انخفضت بعد التشقق وأن التناقص في صلابة الجوائز كان مختلفاً.

ومن الشكل(2–20،– a) يتبين أيضا أن السهم في جوائز المجموعة (**X**) كان الأكبر، وأن درجة ميل كل منحني تزداد مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون في المقطع, ففي جوائز المجموعة السابعة (**II**) حيث التسليح بالكربون بنسبة 100% كانت درجة الميل كبيرة، واتخذ المنحني شكلاً مستقيماً إلى نهاية التحميل. إن السهم في جوائز المجموعة المعيارية (**I**) كان الأقل على كامل مجال التحميل مقارنة مع بقية المجموعات.

لتحليل النتائج المتعلقة بالسهوم لا بد من الأخذ بالحسبان الحدود القصوى المسموحة للسهوم وسط المجاز، ولإجراء المقارنة لمختلف حالات التسليح المدروسة عند قيمة محددة للسهم، اعتمدت اشتراطات الكود الروسي [41]، وفيه الحد الأقصى المسموح للسهم في الجوائز البيتونية المسلحة يساوي $\delta = (1/200)l_0$ ، حيث l_0 تساوي مجاز الجائز. وفي جوائزنا هذه القيمة تساوي **8 ملم**. وعند مقارنة الحمولات المسببة لهذه القيمة على منحنيات (حمولة – سهم) والمبينة في الشكل (2–20،– a) نلاحظ أن جوائز المجموعات (**I–II–VII–VIII–IX–X**) تصل إلى هذه القيمة وفق الحمولات التالية:(135–110–132–119–116–98)KN بالتتالي. وهذا يؤكد على ضرورة تصميم العناصر التي يحوي تسليحها على نسبٍ كبيرة من القضبان الكربونية، وفق حمولات استثمارية فقط وليست حدية.

● ● – العينات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقتين (المجموعات III- IV- V- VI).

يظهر الجدول (2–6) وكذلك الشكل (2–19،– b) مقارنة مباشرة للنتائج التجريبية لقيم السهوم الأعظمية وسط مجاز الجوائز المختبرة والتي تتوضع فيها قضبان التسليح العاملة على طبقتين. ويتبين أنه لنوع قضبان التسليح ولمكان توزع قضبان التسليح الكربونية في المقطع، تأثير كبير على قيم السهوم الأعظمية للجوائز. فعند ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية في الجوائز المختبرة والتي تساوي نسبة التسليح الكلية فيها 1.74% (المجموعات **III- IV- V-VI**)، ووفق النسب التالية:(0– 100– 50–50)% بالتتالي، يؤدي إلى زيادة قيمة السهم الأعظمي وفق النسب التالية:(0– 43.3– 12.9– 29.3)% بالتتالي.



الشكل (2–20) مقارنة منحنيات (حمولة – سهم) لمجموعات الجوائز المختبرة I –II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX، وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاثة جوائز في كل مجموعة.

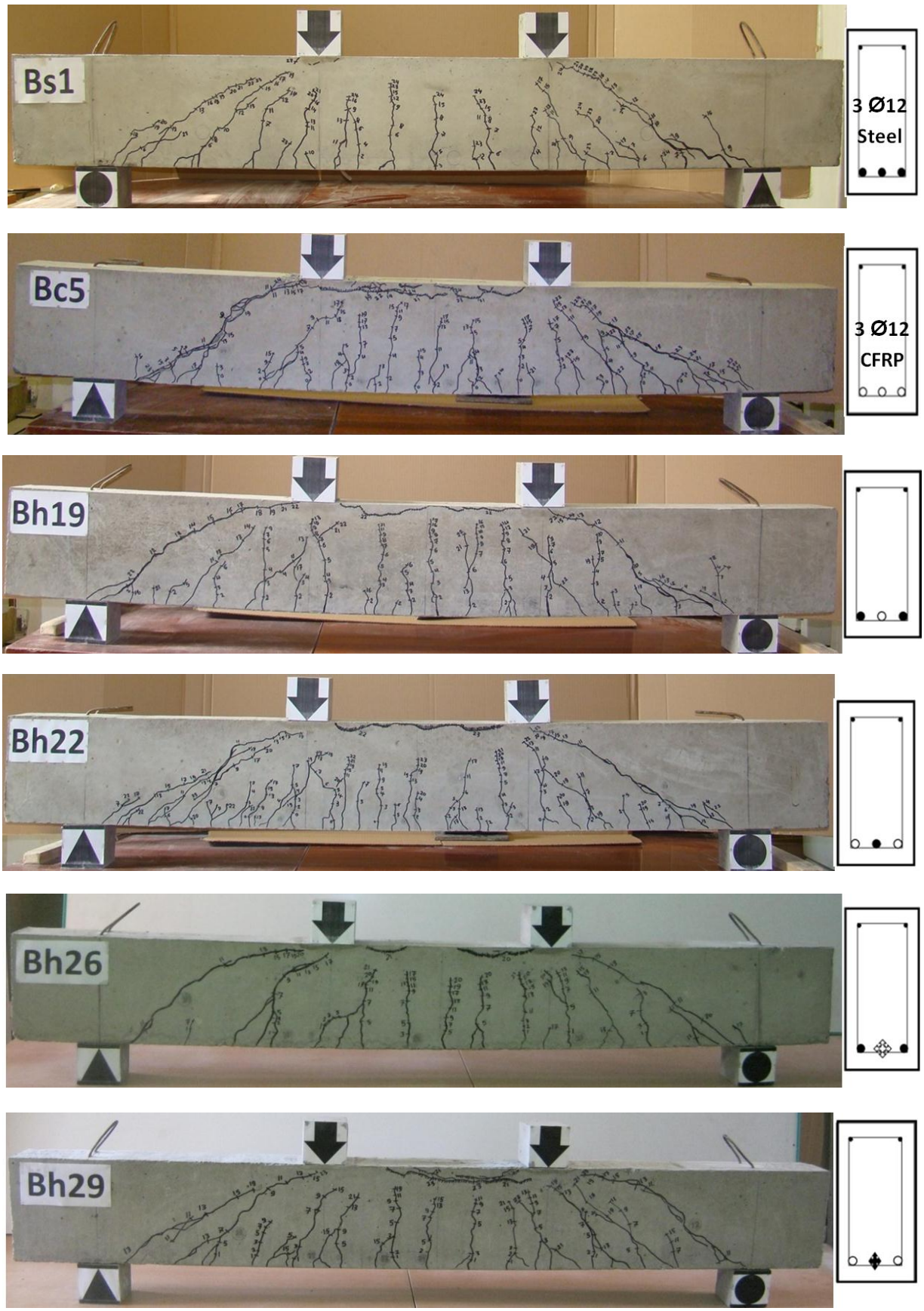
ويظهر مدى تأثير مكان توزع القضبان الكربونية في المقطع للمجموعتين**(VI-V)**، واللتان تحويان نفس نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية(50%)، حيث زاد السهم في المجموعة **(VI)**، التي تتوضع فيها القضبان الكربونية في الطبقة العلوية بنسبة (56%) مقارنة مع المجموعة **(V)** التي تتوضع فيها القضبان الكربونية في الطبقة السفلية. ويظهر على الشكل(2–20،– b) مقارنة بين منحنيات (حمولة– سهم) في وسط مجاز مجموعات الجوائز المختبرة **(III- IV -V -VI)**, حيث رسم مخطط (حمولة– سهم) الناتج عن قيمة السهم الوسطية الناتجة من ثلاثة جوائز في كل مجموعة. ومنها نستنتج أن الجزء الخطي الأول من المنحنيات (حتى مستوى التحميل 13KN) كان متشابها تقريباً لجميع الجوائز وفي نهاية المرحلة الخطية الأولية بدأت الجوائز بالتشقق، وفي الجزء الثاني من المنحنيات كانت هناك ميول مختلفة للمنحنيات تختلف عن الميل في الجزء الأول, وهذا يشير إلى أن صلابة الجوائز انخفضت بعد التشقق وأن التناقص في صلابة الجوائز كان مختلفاً.

يتبين من الشكل(2–20،– b) أيضا أن السهم في جوائز المجموعة **(IV)** كان الأكبر، ويتخذ المنحني شكلاً شبه مستقيم إلى نهاية التحميل مع وجود انحناء بسيط لحظة الانهيار، وأن درجة ميل كل منحني تزداد مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون في المقطع. كما أن السهم في جوائز المجموعة المعيارية **(III)** كان الأقل على كامل مجال التحميل مقارنة مع بقية المجموعات. وفي جوائز المجموعتين **-(VI V)** المسلحة بشكلٍ هجين يتطابق فيهما المنحنيان (حمولة– سهم) حتى الحمولة (130 KN) أي (حتى مستوى تحميل يعادل 75% من حمولة الانهيار للمجموعتين) بعد ذلك يصبح ميل منحني المجموعة **VI** أكبر حتى لحظة الانهيار.

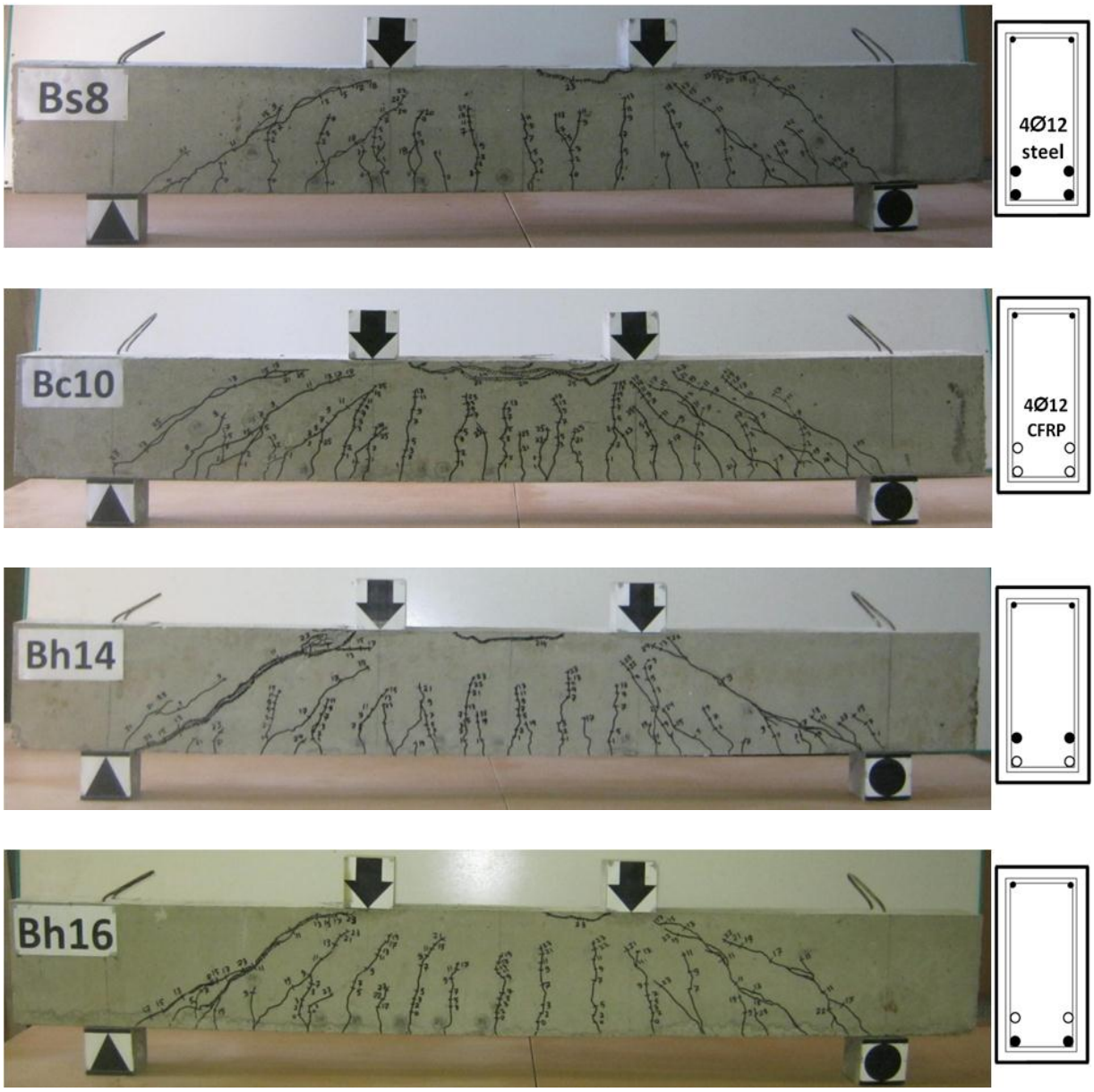
وعند مقارنة النتائج المتعلقة بالسهوم لحالة توزع القضبان على طبقتين نأخذ معيار للمقارنة وهو الحد الأقصى المسموح للسهم وسط المجاز حسب [41]، وقيمته تساوي $(8mm = l_0 / 200)$، باعتبار أن l_0= طول مجاز الجائز وهو يساوي 160 سم. فعند مقارنة الحمولات المسببة لهذه القيمة على منحنيات (حمولة – سهم) والمبينة في الشكل (2–20،– b) نلاحظ أن الجوائز المسلحة بالكامل بالكربون (المجموعة**IV**) يصل فيها السهم الحدي المسموح إلى هذه القيمة عند الحمولة (112 KN). والجوائز المسلحة بنسبة 50% بقضبان كربونية (المجموعتان **V**و **VI**) فيصل فيهما السهم الحدي المسموح إلى هذه القيمة عند الحمولة (130 KN), في حين يصل السهم الحدي المسموح في الجوائز المعيارية **(III)** إلى هذه القيمة عند الحمولة (136 KN).

2–6–3– مقارنة شكل التشققات وانتشارها وارتفاعها وعرضها في الجوائز المختبرة.

يبين الشكلان (2–21 و2–22) صور لعشر جوائز(حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة **X–IX–VIII–VII–VI–V–IV–III–II– I**) وتظهر عليها أشكال التشققات وانتشارها بالإضافة لمقاطع عرضية للجوائز.



الشكل (2–21) أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة (I –II –VII– VIII–IX–X) والتي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة.



الشكل (2–22) أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة (III–IV–V–VI).

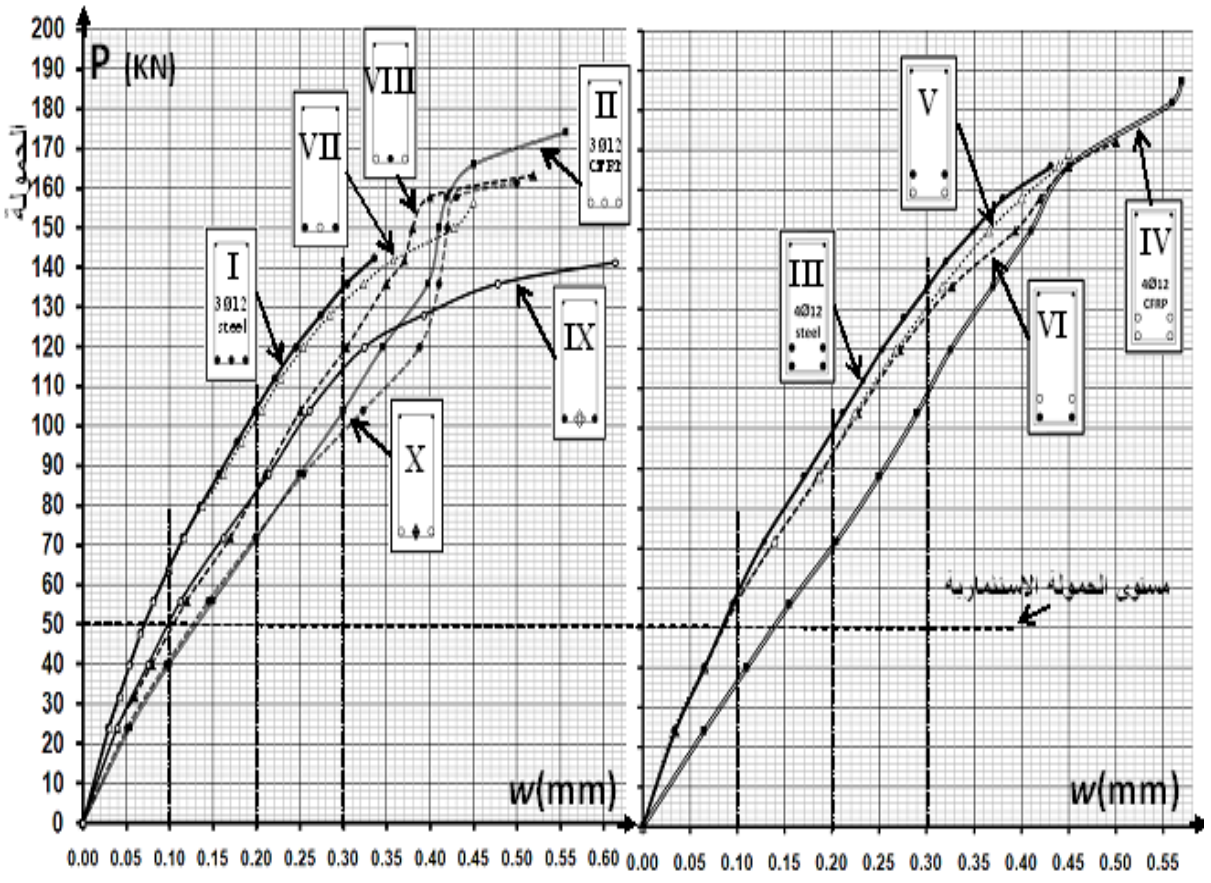
● – **المجموعات التي تتوزع فيها القضبان على طبقة واحدة (I- II – VII- VIII- IX- X).**

يبين الشكل(2–21) صورة جائز عن كل مجموعة مختبرة (المجموعات I- II – VII- VIII- IX- X) وقد حددت عليه التشققات بعد كل مستوى تحميل، ومنه يتبين أن عدد التشققات وارتفاعها يزداد مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية. ونلاحظ أن المسافة بين التشققات تتناقص مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، كما مبين في الجدول(2–6).

وعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 cm، تبين أنه عندما تزداد نسبة التسليح بالكربون في المقطع المسلح بشكلٍ هجين وفق النسب التالية:(0 –18.18– 33.3– 66.6– 74.3– 100)% يتغير متوسط عدد الشقوق وفق القيم التالية:(7- 7- 9 - 11 - 9 -13) بالتتالي، (نلاحظ مقابل النسبة 74.3% هناك 9 شقوق نتيجة التسليح بقضيب فولاذ من نوع(A500 وقطر10Ø ملم). وتتغير المسافة

بين الشقوق وفق القيم التالية:(8.9- 8.9- 6.7 - 5.3 - 6.7 - 4.4)cm بالتتالي. كما ويتغير ارتفاع الشق وفق القيم التالية:(17.5- 17.9- 21 - 17.4 -19.3 - 17.7)cm بالتتالي أيضاً.

نلاحظ في الشكل(2–23،–a) وعلى الجزء الأول من منحنيات(حمولة – اتساع الشق)، أن اتساع الشق في جوائز المجموعتين (**II** و**X**) المسلحة بنسبة (100 و74.3)% من مساحة تسليحها كربون هي الأكبر على كامل مجال التحميل ويتطابق المنحنيان حتى عرض للشق يساوي 0.25mm، والمنحني في جوائز المجموعة (**II**) يتخذ شكلاً شبه مستقيم إلى العرض 0.4mm، ثم يخف التزايد في عرض الشق بسبب تشكل شقوق جديدة ونتيجة تطور الشقوق المائلة ويعاود ازدياده لحظة الانهيار. أما الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن اتساع الشق يزداد مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية. أما اتساع الشق في الجوائز المعيارية(**I**) فكان الأقل على كامل مجال التحميل.



a - عرض الشق في الجوائز التي تتوزع فيها القضبان على طبقة واحدة

b- عرض الشق في الجوائز التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقتين

الشكل (2–23) منحنيات (حمولة – اتساع الشق) لمجموعات الجوائز المختبرة I –II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX، وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاثة جوائز في كل مجموعة.

● ● – العينات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقتين (المجموعات III- IV- V- VI).

يبين الشكل (2–22) صورة جائز عن كل مجموعة مختبرة في (المجموعات III- IV- V- VI) وقد حددت عليه التشققات بعد كل مستوى تحميل. ومنه يتبين أن عدد التشققات وارتفاعها يزداد مع ازدياد

نسبة التسليح بقضبان كربونية. ونلاحظ أن المسافة بين التشققات تتناقص مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، كما مبين في الجدول(2–6).

وعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 سم في هذه المجموعات، تبين أنه عندما يتغير توزع القضبان الكربونية والفولاذية على طبقتي التسليح ونتيجة ازدياد نسبة التسليح بالكربون في المقطع المسلح بشكلٍ هجين وفق النسب التالية:(0 –50–50– 100)%، والموافقة للمجموعات(**III- V- VI- IV**)، يتغير متوسط عدد الشقوق وفق القيم التالية(7–11– 9–11) بالتتالي. وتتغير المسافة بين الشقوق وفق القيم التالية:(8.9- 6.7– 7.6– 5.3)cm بالتتالي، كما ويتغير ارتفاع الشق وفق القيم التالية:(16.6- 17.3- 17.7 - 18.8)cm بالتتالي أيضاً.

نلاحظ من الشكل(2–23،– b) على الجزء الأول من منحنيات(حمولة – اتساع الشق) أن اتساع الشق في جوائز المجموعة (**IV**) المسلحة بنسبة 100% كربون من مساحة تسليحها هو الأكبر على كامل مجال التحميل، والمنحني يتخذ شكلاً مستقيماً، وأن جوائز المجموعتين(**V**) و(**VI**) المسلحة بنسبة 50% كربون من مساحة تسليحها كانت متماثلة في اتساع الشق إلى مستوى تحميل 130 KN، وبعده أصبحت الشقوق في جوائز المجموعة (**VI**) أوسع إلى لحظة الانهيار. أما اتساع الشق في الجوائز المعيارية (**III**) فكان الأقل على كامل مجال التحميل. وفي جوائز المجموعتين (**IV**) و(**VI**) نلاحظ على الجزء الأخير من منحنياتها توقف أو تباطؤ في اتساع الشقوق وذلك بسبب تشكل الشقوق المائلة واتساعها على حساب الشقوق الشاقولية وبسبب تشكل شقوق جديدة.

ولتسليط الضوء بشكلٍ أكبر على الفروقات في عرض الشق بين الجوائز المعيارية والجوائز الأخرى عند حمولات منخفضة، وبالاستعانة بالشكل(2–23) تم تنظيم الجدول(2–7) الذي يبين مقارنة عرض الشق في الجوائز المسلحة بالكربون أو بشكلٍ هجين مع عرض الشق في الجوائز المعيارية عند ثلاث قيم (0.1–0.2–0.3)mm والحمولات المسببة لها. ومن هذا الجدول نلاحظ أنه مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية في الجوائز المسلحة بالكربون أو بشكلٍ هجين يزداد عرض الشق، وإذا أخذنا قيمة لعرض الشق تساوي(0.2)mm ، نجد أن نسبة 0.2 إلى عرض الشق في الجوائز المعيارية(المجموعة **I**) تساوي القيم التالية:(1.74-1.05- 1.38- 1.38 – 1.74) في المجموعات(**II – VII- VIII- IX- X**) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بطبقة واحدة من القضبان. وأن نسبة 0.2 إلى عرض الشق في الجوائز المعيارية(المجموعة **III**) تساوي القيم التالية:(1.76- 1.11-1.11) في المجموعات (**IV- V- VI**) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بطبقتين من القضبان.

نلاحظ من الشكل(2–23) أنه تحت تأثير حمولة استثمارية تساوي 50 KN يكون عرض الشق في المجموعة المعيارية (**I**) مساوياً 0.07 mm ، وفي جوائز المجموعات(**II– VII- VIII- IX- X**) يساوي القيم التالية:(0.13–0.07–0.105–0.099–0.125)mm بالتتالي، أي يزداد عرض الشق مقارنة مع الجوائز المعيارية (**I**) وفق القيم التالية:(46–0–33–29–44)% بالتتالي.

الجدول (2–7) مقارنة عرض الشق في الجوائز المسلحة بالكربون أو بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون) مع عرض الشق في الجوائز المعيارية عند ثلاث قيم لعرض الشق(0.1–0.2–0.3)mm والحمولات المسببة لها.

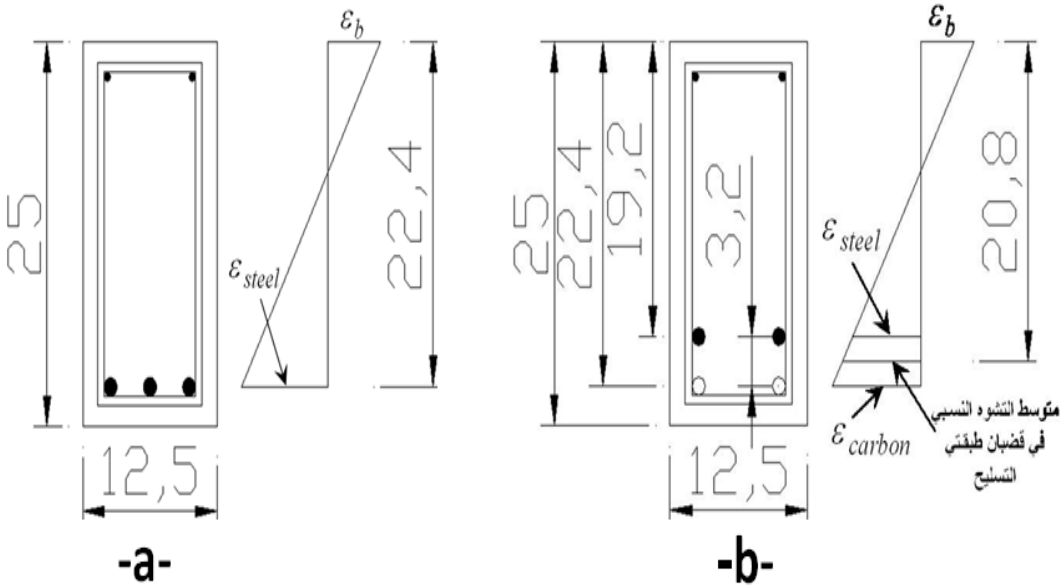
اسم وشكل مقطع المجموعة المعيارية	اسم وشكل مقطع المجموعة	عرض الشق المدروس(mm)								
		0.1			0.2			0.3		
		الحمولة المسببة لهذا العرض KN	عرض الشق المقابل للحمولة في المجموعة المعيارية ($W_{معياري}$) mm	نسبة: 0.1 $W_{معياري}$	الحمولة المسببة لهذا العرض KN	عرض الشق المقابل للحمولة في المجموعة المعيارية ($W_{معياري}$) mm	نسبة: 0.2 $W_{معياري}$	الحمولة المسببة لهذا العرض KN	عرض الشق المقابل للحمولة في المجموعة المعيارية ($W_{معياري}$) mm	نسبة: 0.3 $W_{معياري}$
I	II	40	0.055	1.82	72	0.115	1.74	104	0.195	1.54
	VII	65	0.099	1.01	102	0.19	1.05	132	0.287	1.04
	VIII	48	0.065	1.54	84	0.145	1.38	118	0.24	1.25
	IX	51	0.07	1.43	84	0.145	1.38	115	0.228	1.32
	X	42	0.058	1.72	72	0.115	1.74	98	0.18	1.67
III	IV	36	0.06	1.67	70	0.12	1.67	108	0.22	1.36
	V	58	0.095	1.05	93	0.18	1.11	130	0.28	1.07
	VI	58	0.095	1.05	93	0.18	1.11	128	0.275	1.09

يساوي عرض الشق في المجموعة المعيارية **(III)** القيمة mm0.085، وفي جوائز المجموعات**(IV - V - VI)** يساوي القيم التالية:(0.14–0.085–0.085)mm بالتتالي، أي يزداد عرض الشق مقارنة مع الجوائز المعيارية**(III)** وفق القيم التالية:(39–0–0)% بالتتالي.

2-6-4- مقارنة التشوه الحاصل في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز.

- **المجموعات التي تتوزع فيها القضبان على طبقة واحدة (I- II – VII- VIII- IX- X).**

كما ذكر سابقاً فقد لصقت في منتصف الجائز وعلى السطح البيتوني العلوي حساسات تشوه خارجية وكذلك وفي نفس المستوى الشاقولي للمقطع حساسات تشوه داخلية على قضبان التسليح كما مبين في الشكل(2–16)، ووصلت أسلاكها الكهربائية إلى محطة قياس التشوهات التي سجلت قيم التشوهات النسبية الحاصلة بعد كل دفعة تحميل في البيتون المضغوط وفي قضبان التسليح، ويبين الشكل(2–24) توزع التشوهات النسبية في المقطع البيتوني المسلح. هذا وسوف تستخدم لاحقا في القسم التحليلي من البحث القيم التجريبية للتشوه النسبي الحاصلة في قضبان التسليح والبيتون المضغوط والمبينة في الشكل (2–25) لحساب قيمة عرض الشق وفق الكودين(ACI [7] و CEB [15]).



الشكل (2–24) توزع التشوهات النسبية في مقاطع الجوائز المختبرة والمسلحة
a– بطبقة واحدة من القضبان، b– بطبقتين من القضبان (الأبعاد بـ سم).

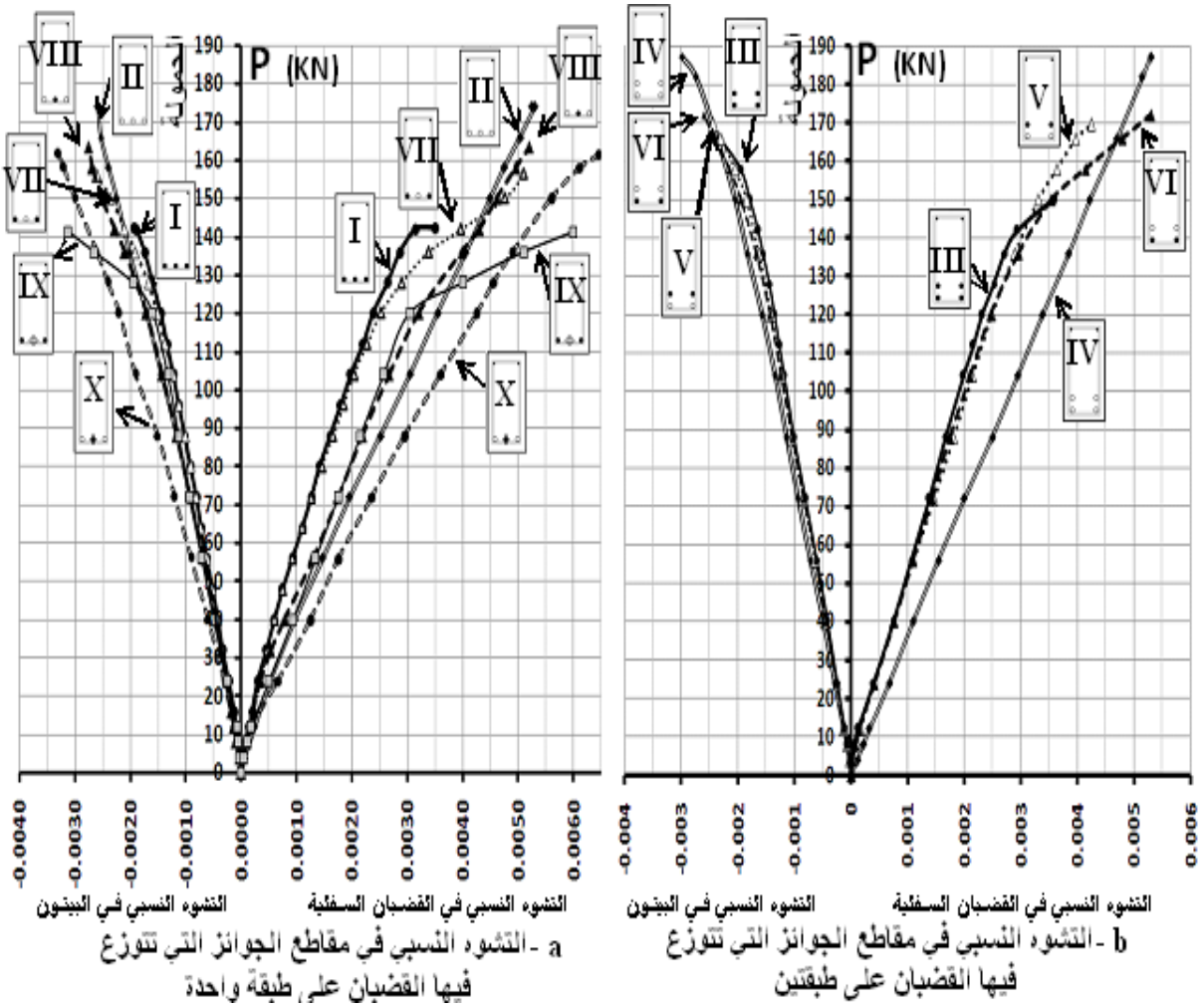
يبين الجدول(2–8) مقارنة قيم التشوهات النسبية المقاسة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة لحظة الانهيار، ومنه يتبين أن البيتون المضغوط في مجموعات الجوائز**(II-VII-X-IX-VIII)** تحطم بعد أن تجاوزت قيمة التشوه النسبي فيه القيم التالية:(0.00259–0.00261–0.00275–0.00312–0.0033) بالتتالي، في حين أن التشوه النسبي في الجوائز المعيارية لم يتجاوز القيمة(0.00193) وبالتالي لم يحصل تحطم للبيتون فيها. ومن نفس الجدول يتبين أن قيمة التشوه النسبي المقاس في قضبان تسليح المجموعات **(II-VII-VIII-IX-X)** يساوي(0.0053–0.0051–

0.0052–0.006–0.0065) بالتتالي، ولكن عند حمولات مختلفة، أما في قضبان المجموعة المعيارية **I** كان أقل وتساوي قيمته(0.0035).

الجدول (2–8) مقارنة قيم التشوهات النسبية المقاسة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح جوائز المجموعات(I – II – VII– VIII– IX– X) لحظة الانهيار.

رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها	متوسط قيمة التشوه النسبي المقاسة لحظة الانهيار	
	في قضبان التسليح	في البيتون المضغوط
I (معيارية تسليح بالفولاذ)	0.0035	- 0.00193
II (تسليح بالكربون)	0.0053	- 0.00259
VII (تسليح هجين)	في قضبان الكربون =0.0051 في قضبان الفولاذ = 0.0036 عند الحمولة (128 KN)	- 0.00261
VIII (تسليح هجين)	في قضبان الكربون =0.0052 في قضبان الفولاذ = 0.004 عند الحمولة (136 KN)	- 0.00275
IX (تسليح هجين)	في قضبان الكربون =0.006 في قضبان الفولاذ = 0.0049 عند الحمولة (136 KN)	- 0.00312
X (تسليح هجين)	في قضبان الكربون =0.0065 في قضبان الفولاذ = 0.0055 عند الحمولة (150 KN)	- 0.0033

تجدر الإشارة إلى أنه في جوائز المجموعات **(X-IX-VIII-VII)** كانت قيمة التشوه النسبي في القضبان الكربونية أكبر مما هي عليه في القضبان الفولاذية بحدود(2.6– 6.4–4.2–3.5)% بالتتالي، إلى أن يبلغ الفولاذ مرحلة اللدونة، ثم يصبح الفولاذ أكثر تشوهاً إلى لحظة الانهيار. وتوقفت الحساسات الملصوقة على القضبان الفولاذية عن إعطاء قيم للتشوه في المجموعات التالية:**(X - IX- VIII-VII)** عند القيم(0.0036–0.004–0.0049–0.0055) بالتتالي. وتظهر على الشكل (2–25،a–) مقارنة لمنحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان التسليح السفلية و(حمولة – تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة **(I- II– VII- VIII- IX- X)**, ومنها نستنتج أن التشوهات النسبية الحاصلة في القضبان تكون أكبر من التشوهات النسبية الحاصلة في البيتون عند نفس الحمولة. كما أن القضبان الكربونية تتشوه بشكلٍ خطي إلى لحظة حصول الانهيار. ويبين الشكل (2–26) مثال لحالة تحطم البيتون المضغوط لحظة الانهيار وانسلاخ حساسات التشوه الملصوقة على البيتون نتيجة تشظي البيتون.



الشكل (2–25) مقارنة بين منحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان التسليح السفلية و(حمولة – تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة I –II–III–IV–V–VI–VII–VIII–IX– X .

الشكل(2–26) مثال لتحطم البيتون المضغوط لحظة الانهيار وانسلاخ حساسات التشوه.

● ● – **العينات التي تتوزع فيها قضبان التسليح على طبقتين (المجموعات III- IV- V- VI).**

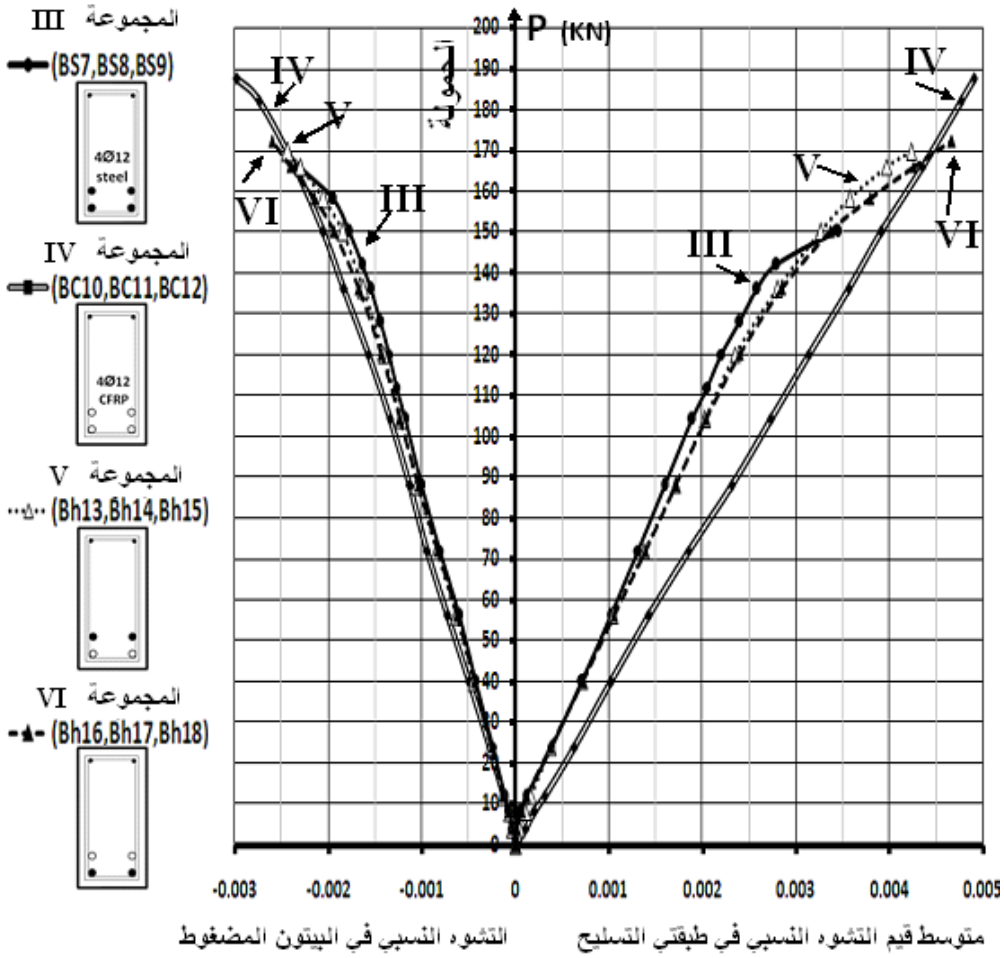
تظهر على الشكل (2–25،–b) مقارنة لمنحنيات (حمولة – تشوه) في قضبان التسليح السفلية و(حمولة – تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة (**III- IV- V- VI**) مع بقية المجموعات, وتظهر على الشكل (2–27) مقارنة لمنحنيات (حمولة – تشوه في قضبان التسليح) حيث أخذ متوسط قيمة التشوه النسبي في طبقتي التسليح على مستوى مركز ثقل القضبان كما مبين في الشكل (2–24،–b)، و(حمولة – تشوه) في البيتون المضغوط. ومنها نستنتج أن التشوهات النسبية الحاصلة في القضبان تكون أكبر من التشوهات النسبية الحاصلة في البيتون عند نفس الحمولة. ويتخذ منحني (حمولة – تشوه) منحاً خطياً في قضبان تسليح المجموعة (**IV**) من بداية التحميل وحتى لحظة الانهيار وتكون تشوهات القضبان في هذه المجموعة أكبر من بقية المجموعات. وتتماثل جوائز المجموعتين(**V** و**VI**) في قيم التشوه الحاصلة بالقضبان والبيتون حتى مستوى التحميل (130 KN) بعده تصبح التشوهات في المجموعة (**VI**) أكبر حتى لحظة الانهيار. كما أن قيمة التشوه النسبي المقاس في قضبان تسليح المجموعة المعيارية (**III**) تكون الأصغر على كامل مجال التحميل ضمن هذه المجموعات.

ويبين الجدول(2–9) مقارنة قيم التشوهات الحدية في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة العلوية والسفلية، ومنه نلاحظ أن البيتون المضغوط في مجموعة الجوائز**IV** تحطم بعد أن تجاوزت قيمة التشوه النسبي فيه القيمة(0.0029)، في حين أن التشوه النسبي في بيتون مجموعة الجوائز المعياريةIII ومجموعتي الجوائز **V** و**VI** أخذ القيم التالية:(0.0023–0.0024–0.0026) بالتتالي، ولوحظ فيها بداية لتحطم البيتون المضغوط.

ومن نفس الجدول يتبين أن التشوه النسبي في قضبان تسليح المجموعة **IV** يكون أعظمياً، أما في قضبان المجموعة المعيارية **III** يكون أصغرياً.

الجدول (2–9) مقارنة قيم التشوهات النسبية المقاسة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح جوائز المجموعات (III - IV- V- VI) لحظة الانهيار

رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها	متوسط قيمة التشوه النسبي المقاسة لحظة الانهيار	
	في قضبان تسليح الطبقة العلوية والسفلية	في البيتون المضغوط
III (معيارية تسليح بالفولاذ)	**في القضبان العلوية 0.0032 (عند الحمل 150 KN)** **في القضبان السفلية 0.0036**	**- 0.0023**
IV (تسليح بالكربون)	**في القضبان العلوية 0.0045** **في القضبان السفلية 0.0053**	**- 0.0029**
V (تسليح هجين)	**في القضبان العلوية الفولاذية 0.0042** **في القضبان السفلية الكربونية 0.0043**	**- 0.0024**
VI (تسليح هجين)	**في القضبان العلوية الكربونية 0.004** **في القضبان السفلية الفولاذية 0.005**	**- 0.0026**



الشكل (2–27) مقارنة بين منحنيات (حمولة – تشوه في قضبان التسليح) حيث أخذ متوسط قيم التشوه النسبي في طبقتي التسليح، و(حمولة – تشوه في البيتون المضغوط) لمجموعات الجوائز المختبرة III -IV- V – VI .

2–7– الاستنتاجات المتعلقة بالدراسة التجريبية.

عند إجراء مقارنة مباشرة لقيم التحمل الأعظمية وقيم السهوم وشكل التشققات وانتشارها وعرضها في الجوائز المختبرة والمسلحة وفق نسب تسليح مختلفة من قضبان الفولاذ والكربون وبتوزع للقضبان على شكل طبقة واحدة أو طبقتين يمكن كتابة النتائج التالية:

1– إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة قدرات تحملها، غير أنها تصبح أكثر تشوها (سهوم أكبر وعدد تشققات أكثر) بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط.

2– في المجموعات التي تتوضع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة والمسلحة مقاطعها وفق نسب تسليح مختلفة(0.99– 1.09–1.21)%، تبين أنه عندما تزداد نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسب التالية:(0–18.18–33.3–66.6–74.3–100) %, والموافقة للمجموعات (I- IX– VII VIII– X- II–) تزداد قدرات تحملها وفق النسب التالية:(0–0–10–15–13.4–22)% بالتتالي. أما في المجموعات التي تتوضع فيها قضبان التسليح على طبقتين والمسلحة وفق نسبة تسليح (1.74)%، فقد تبين أنه عندما تزداد فيها نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية وفق

النسب التالية:(0–50–50–100)%, والموافقة للمجموعات(III -V- VI– IV) تزداد قدرات تحملها وفق النسب التالية:(0–2.14–3.73–12.8)% بالتتالي.

3– حصل انهيار الجوائز البيتونية للمجموعات(I-III-V-VI) نتيجة تطاول قضبان التسليح الفولاذية، أما جوائز المجموعات(II-X-IV) فانهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط. أما جوائز المجموعات(-VII-VIII IX) انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط ورافقه تطاول قضبان التسليح الفولاذية.

4– إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة قيمة السهم في وسط المجاز، ففي المجموعات التي تتوضع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة والمسلحة مقاطعها وفق نسب تسليح مختلفة(0.99– 1.09–1.21)%، تبين أنه عندما تزداد نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسب التالية(0–18.18–33.3–66.6–74.3–100)%, والموافقة للمجموعات(I-IX–VII- VIII-X–II) تزداد قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز وفق النسب التالية(0–82.8–46–55–95.7–66)% بالتتالي. أما في المجموعات التي تتوضع فيها قضبان التسليح على طبقتين والمسلحة وفق نسبة تسليح (1.74)%، فقد تبين أنه عندما تزداد فيها نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسب التالية:(0–50–50–100)%, والموافقة للمجموعات(III-V–VI–IV) تزداد قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز وفق النسب التالية:(0–12.9–29.3–43.3)% بالتتالي.

5– يؤدي الاستخدام المشترك للقضبان الكربونية والفولاذية في تسليح الجوائز البيتونية إلى زيادة ملحوظة في عدد التشققات وتناقص للمسافة بينها. ويزداد اتساع الشقوق الشاقولية مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية وذلك بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط. وتحت تأثير حمولات استثمارية يزداد عرض الشق في الجوائز المسلحة بالكربون بنسبة تصل إلى 46% مقارنة مع الجوائز المعيارية، وفي الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين يزداد عرض الشق بنسب تتراوح بين(0–44)% مقارنة مع الجوائز المعيارية وذلك تبعاً لنسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية.

6– تزداد قيمة التشوه النسبي في قضبان التسليح وفي البيتون المضغوط مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، وانهارت جوائز المجموعات(II-X–IV) التي تجاوز التشوه النسبي في بيتونها القيم التالية:(0.00259–0.0033–0.0029) بالتتالي، نتيجة تحطم البيتون المضغوط فيها.

7– إن اختبار طيف واسع من الجوائز البيتونية التي تتوضع فيها قضبان التسليح على طبقة واحدة أو طبقتين والمسلحة مقاطعها وفق نسب تسليح مختلفة(0.99– 1.09–1.21–1.74)%، وتزداد فيها نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسب التالية:(0–18.18–33.3–50–66.6–74.3–100)%, يوفر قاعدة بيانات واسعة من النتائج التي سيتم استخدامها في المقارنة مع نتائج الدراسة الحسابية و الدراسة التحليلية لاحقاً.

الفصل الثالث
الدراسة الحسابية

الفصل الثالث

الدراسة الحسابية

3-1- مقدمة.

3-2- البرنامج الحسابي.

3-3- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3 -5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ (جوائز المجموعة I) من خلال مثال عددي.

3-4- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون (جوائز المجموعة II) من خلال مثال عددي.

3-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

3-5-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

3-5-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

3-5-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

3-5 -4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

3-5-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين، (المجموعة VII) من خلال مثال عددي.

3-5-6- شرح للعلاقات الرياضية المستخدمة.

3-6- مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الحسابية.

3-6-1- مناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم.

3-6-2- مقارنة قيم عرض الشق التجريبية (.exp) مع القيم المحسوبة (.th).

3-6-3- مقارنة قيم عرض الشق المحسوبة على أساس قيم التشوه التجريبية ووفق الكودين (ACI و CEB) مع القيم التجريبية ومع القيم الحسابية(.th) لجميع الجوائز المختبرة.

3-6-4- مناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف.

3-7- نتائج الدراسة الحسابية.

الفصل الثالث

الدراسة الحسابية

3-1- مقدمة.

تستخدم القضبان الكربونية CFRP كبديل للقضبان الفولاذية كونها ذات مقاومة عالية على الشد ومقاومة للصدأ، غير أنها تعاني من السلبيات التالية: انخفاض معامل مرونتها، وصعوبة توفير الانتقال الفعال للقوى بين القضبان والبيتون المحيط بها، وارتفاع سعرها مقارنة بالقضبان الفولاذية، ولا يمكن تطبيق الإجراءات التحليلية وطرق الحساب والتصميم الخاصة بالمنشآت البيتونية المسلحة بالفولاذ على المنشآت المسلحة بالـFRP، لأن الشكل الهندسي وقابلية السحب ومعامل المرونة وخصائص التماسك لقضبان الـFRP تختلف عن خصائص قضبان الفولاذ التقليدية. لذلك يجب أن يدرس سلوك البيتون المسلح بـFRP بشكلٍ مستقل. وحاولت بعض الدراسات الجديدة تطوير علاقات تصميمية خاصة بالجوائز البيتونية المسلحة بالـFRP للتنبؤ بعرض التشققات والتباعد فيما بينها والسهوم وقدرة التحمل, وتبين أنه لا يمكن تطبيق القواعد المتبعة في الكود (ACI318-05 (وهو الكود الأمريكي الخاص بالعناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ[6])) بشكلٍ مباشر على العناصر المسلحة بقضبان FRP، لذلك طورت لجنة الكود(ACI440(وهو الكود الأمريكي الخاص بالعناصر البيتونية المسلحة بالـFRP [7])) علاقات رياضية للتنبؤ بالسهوم واتساع التشققات وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالـFRP، وتعتبر العلاقات الرياضية في الإصدار (ACI 440.1R-06 [7]) مهمة جداً وخطوة رائدة لاستخدام منتجات FRP في مجال الهندسة المدنية. ومع ذلك يجب التنويه إلى أن هذه العلاقات تم تطويرها اعتماداً على معطيات محددة ويتوجب تنقيح هذه العلاقات وتصحيحها بشكلٍ أفضل عندما تتاح معطيات أكثر.

ومع ظهور نوع جديد من العناصر البيتونية المسلحة تسليحاً مشتركاً(هجيناً) بقضبان فولاذية وكربونية CFRP ظهرت مشكلة في عدم وجود قواعد حسابية وتصميمية لهذا النوع من التسليح، خصوصاً وأن هذا التسليح يعتبر أمراً واعداً ومفيداً نظراً لما يحققه من قوة و قابلية للتشغيل بالإضافة للمتانة العالية والديمومة، وذلك في حال الاستعاضة عن قضبان التسليح الفولاذية في زوايا مقاطع العناصر بقضبان كربونية لا تصدأ وذات مقاومة عالية.

ويسلط هذا البحث الضوء على هذه النقطة الهامة في حساب العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين والتنبؤ بقيم السهوم وعرض التشققات وقدرة التحمل فيها، وذلك من خلال تطوير لعلاقات الكود(ACI440 [7])، واقتراح بعض التعديلات على العلاقات التي تحسب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل، ولإثبات صحة هذه المقترحات سنقارن النتائج الحسابية مع نتائج الدراسة التجريبية السابقة.

وتهدف الدراسة الحسابية إلى ما يلي:

1- تجميع العلاقات اللازمة لحساب السهم وقدرة التحمل وعرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ والمتوفرة في الكود(ACI318-05 [6])، ووضع مخطط منهجي لمراحل الحساب، ووضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL). حساب جوائز المجموعتين(I و III)المسلحة بالفولاذ عند مختلف مستويات التحميل. وحساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (I) يدوياً، وكذلك قيمة السهم، وعرض الشق فيها عند الحمولة (120 KN).

2- تجميع العلاقات اللازمة لحساب السهم وقدرة التحمل وعرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون والمتوفرة في الكود(ACI 440.1R-06 [7])، ووضع مخطط منهجي لمراحل الحساب، ووضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL). حساب جوائز المجموعتين(II و IV) المسلحة بالكربون عند مختلف مستويات التحميل. وحساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (II) يدوياً، وكذلك قيمة السهم وعرض الشق فيها عند الحمولة (120 KN).

3- تطوير علاقات لحساب (السهم وعرض الشق وقدرة التحمل) في العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون) انطلاقاً من علاقات الكود(ACI 440.1R-06 [7])، ووضع مخطط منهجي لمراحل الحساب، ووضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL). حساب جوائز المجموعات(X- IX- VIII- VII- VI-V) المسلحة بشكلٍ هجين عند مختلف مستويات التحميل. وحساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (VII) يدوياً وكذلك قيمة السهم وعرض الشق فيها عند الحمولة (120 KN).

4- التحقق من صحة العلاقات المستخدمة والمقترحة والمطورة من خلال إجراء مقارنة مباشرة للنتائج الحسابية مع النتائج التجريبية لجميع الجوائز المختبرة.

3-2- البرنامج الحسابي.

سيتم حساب قدرة تحمل جوائز المجموعات (I- II- VII) يدوياً وكذلك قيمة السهم وعرض الشق عند الحمولة (120 KN) للمجموعات التالية:

- **المجموعة الأولى (I):** هي جوائز معيارية متماثلة مسلحة بثلاثة قضبان(فولاذ A600) 3Ø12 و تسمى (BS1, BS2, BS3).

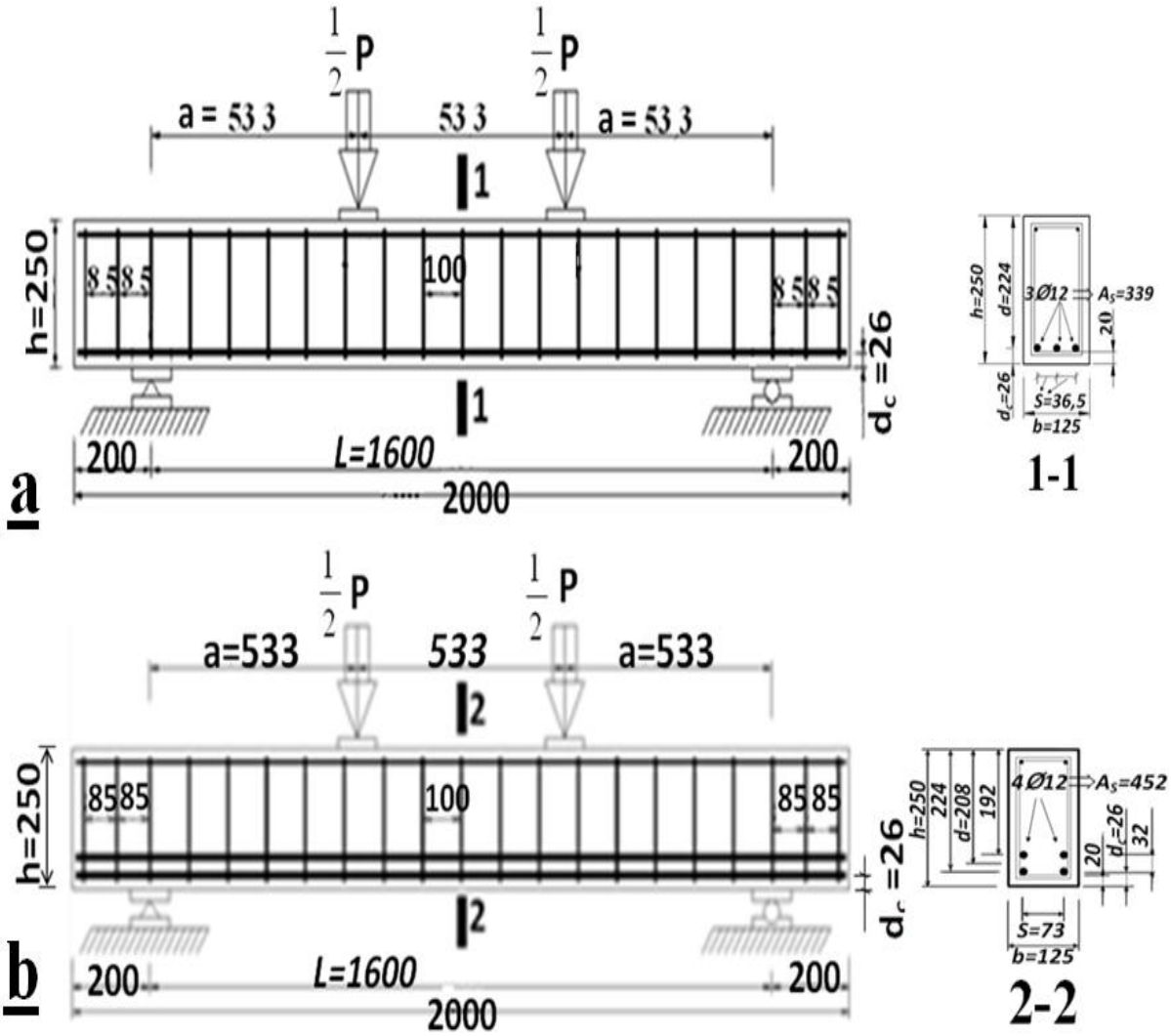
- **المجموعة الثانية (II):** هي جوائز متماثلة مسلحة بثلاثة قضبان كربونية CFRP 3Ø12 وتسمى (BC4, BC5, BC6).

- **المجموعة السابعة (VII):** هي جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين(فولاذ A600)2Ø12 + قضيب كربونCFRP 1Ø12 وتسمى (Bh19, Bh20, Bh21).

يبين الجدول(3-1) تفاصيل الجوائز البيتونية المحسوبة يدوياً، ويظهر على الشكل (3-1-a) الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المحسوبة يدوياً.

الجدول (3–1) التفاصيل المتعلقة بجوائز المجموعات المحسوبة يدوياً.

رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها	اسم الجوائز في المجموعة	نوع وعدد وقطر ومساحة قضبان التسليح		نسبة تسليح المقطع $\mu=\frac{A_{s,c}}{b.h_o}$, %	نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية %	شكل توضيحي للمقطع العرضي
		فولاذية STEEL	كربونية CFRP			
I (معيارية تسليح بالفولاذ)	Bs1 Bs2 Bs3	3Ø12 3.39 CM^2	-	%1.21	**0**	
II تسليح بالكربون	Bc4 Bc5 Bc6	-	3Ø12 3.39 CM^2	%1.21	**100**	
VII تسليح هجين (فولاذ+كربون)	Bh19 Bh20 Bh21	2Ø12 2.26 CM^2	1Ø12 1.13 CM^2	**الكلية=1.21%** فولاذ=0.81% كربون=0.4%	**33.3**	



الشكل(3–1) الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة ،a– المجموعات المسلحة بطبقة واحدة من القضبان، b– المجموعات المسلحة بطبقتين من القضبان (الأبعاد بـ ملم).

3-3- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

3-3-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

يقترح الكود الأمريكي ACI 318-05 [6] والإصدارات التي تسبقه والخاصة بالعناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ استخدام علاقة برانسون لحساب السهم, حيث يعرض تقريب برانسون علاقة لحساب عزم العطالة الفعال I_e الذي يتغير تدريجياً من عزم عطالة المقطع السليم I_g ليتحول إلى عزم عطالة المقطع المتشقق I_{cr} بعد تطبيق حمولات على العنصر ويحسب بالعلاقة(3-11) وفق تسلسل خطوات الحساب المبينة في الشكل (3-23).

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \alpha_s \; I_{cr} \quad .....(11-3)$$

وبالتالي يحسب السهم وفق العلاقة التالية: $\delta = \frac{pa}{48E_cI_e}\left(3L^2 - 4a^2\right)$.....$(12-3)$

3-3-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

يعرض الكود الأمريكي ACI 318-05 [6] والإصدارات التي تسبقه والخاصة بالعناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ علاقة لحساب الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الفولاذية كما يلي:

$f_s = M\frac{n_s d(1-k)}{I_{cr}}$.....$(14-3)$ ، ويحسب عرض الشق بالعلاقة التالية: $w = 2\frac{f_s}{E_s}\beta\,\alpha_s\sqrt{d_c^2+\left(\frac{s}{2}\right)^2}$ .....$(15-3)$

3-3-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

يحسب العزم المقاوم M_{ns} للمقاطع البيتونية المسلحة بالفولاذ وفق العلاقة التالية:

$$M_{ns} = A_s f_y\left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_c' b}\right) \quad .....(16-3)$$

وهذه العلاقة شائعة الاستخدام في الكودين ACI [6] وEurocode2 [16], وكذلك في الكود العربي السوري[43]، ولكن مع وجود العامل $(\Omega = 0.9)$، ويمكن التوصل إليها عن طريق استخدام شروط الانسجام بين التشوهات والتوازن بين القوى في المقطع.

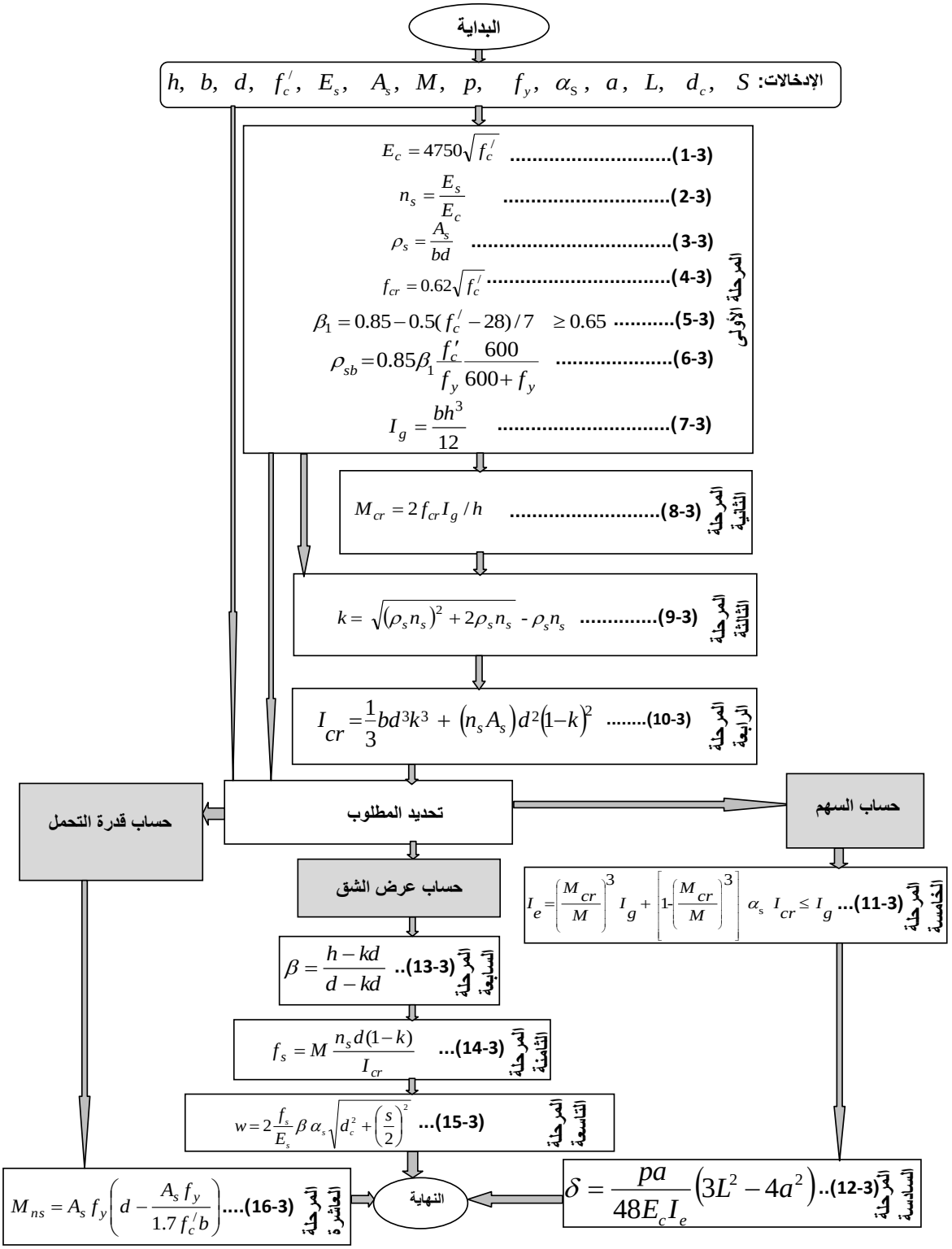
3-3-4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ.

وضع مخطط منهجي للمراحل والعلاقات اللازمة لعملية الحساب، واستناداً إلى ذلك وضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL)، وفيه تم حساب جوائز المجموعتين(I وIII) المسلحتين بالفولاذ عند مختلف مستويات التحميل. ويبين الشكل(3-2) المخطط المنهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ وجميع العلاقات الحسابية اللازمة لحساب قيمة السهم وعرض الشق وقدرة التحمل.

3-3-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ (جوائز المجموعة I) من خلال مثال عددي.

يبين الشكل(3-1-a) الأبعاد الهندسية لجوائز المجموعة (I)، ويبين الجدول(3-2) الإدخالات والخطوات الحسابية اللازمة لحساب قدرة تحمل جوائز المجموعة(I) المسلحة بالفولاذ وكذلك قيمة السهم

وعرض الشق عند حمولة ما(120 KN), والواحدات المستخدمة هي(N و mm)، ومنه يتبين أن قدرة التحمل تساوي($40,7.10^{6}$ N.mm)، وأن قيمة السهم تساوي(7,1mm)، وعرض الشق يساوي (0,2mm).



الشكل (3–2) مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان فولاذية وفق الكود ACI 318-05 [6] .

الجدول(3–2) حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة **(I)** وكذلك السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN).

مراحل الحساب		العلاقات المستخدمة
		$E_C = 4750\sqrt{f_C'} = 4750\sqrt{32,1} = 26912 \quad N/mm^2$
		$n_S = \frac{E_S}{E_C} = \frac{200000}{26912} = 7,43163$
		$\rho_S = \frac{A_S}{bd} = \frac{339}{125.224} = 0.01211$
		$f_{cr} = 0.62\sqrt{f_C'} = 0.62\sqrt{32,1} = 3,512 \quad N/mm^2$
		$\beta_1 = 0.85 - 0.5(f_C' - 28)/7 \geq 0.65 \Rightarrow \beta_1 = 0.85 - 0.5(32,1-28)/7 = 0,82 > 0,62$ OK.
		$\rho_{sb} = 0,85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \frac{600}{600+f_y} = 0,85.0,82.\frac{32,1}{622}.\frac{600}{600+622} = 0,019$
		$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{125.250^3}{12} = 1,63.10^8 \quad mm^4$
		$M_{cr} = 2 f_{cr} I_g / h = 2\ .\ 3,512\ .\ 1,63.10^8 / 250 = 4,57\ .10^6 \quad N.mm$
		$k = \sqrt{(\rho_s n_s)^2 + 2\rho_s n_s} - \rho_s n_s = \sqrt{(0,012\ .\ 7,43)^2 + 2\ .\ 0,012\ .\ 7,43} - 0,012.7,43 = 0,3437$
		$I_{cr} = \frac{1}{3} bd^3 k^3 + (n_s A_s) d^2 (1-k)^2 = \frac{1}{3}.125.224^3.0,3437^3 + (7,43.339)224^2(1-0,3437)^2 = 4,56.10^7 \quad mm^4$
		$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \alpha_s\ I_{cr} = \left(\frac{4,5.10^6}{32.10^6}\right)^3 1,63.10^8 + \left[1 - \left(\frac{4,5.10^6}{32.10^6}\right)^3\right] 0,62.\ 4,56.10^7 = 4,59.10^7 \quad mm^4$
		حساب السهم عند الحمل 120 KN: $\delta = \frac{pa}{48E_c I_e}\left(3L^2 - 4a^2\right) = \frac{120.10^3.533}{48.26912.4,59.10^7}\left(3.1600^2 - 4.\ 533^2\right) = 7,1 \text{ mm}$
		$\beta = \frac{h-kd}{d-kd} = \frac{250 - 0,3437.224}{224 - 0,3437.224} = 1,177$
		$f_s = M\frac{n_s d(1-k)}{I_{cr}} = 32.10^6.\frac{7,43.224.(1-0,3437)}{4,56.10^7} = 527 \text{ N/mm}^2$
		حساب عرض الشق عند الحمل 120 KN: $w = 2\frac{f_s}{E_s}\beta\alpha_s\sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} = 2.\frac{527}{200.10^3}.1,177.0,62.\sqrt{26^2 + \left(\frac{36.5}{2}\right)^2} = 0,2\ mm$
		حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (I): $M_{ns} = A_s f_y\left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_c' b}\right) = 339.622.\left(224 - \frac{339.\ 622}{1,7.32,1.125}\right) = 40,7.10^6 \quad N.mm$

الإدخالات	h	b	d	f_c'	E_s	A_s	M	p	f_y	α_s	a	L	d_c	S
	250	125	224	32.1	200.10^3	339	32.10^6	120.10^3	622	0,62	533	1600	26	36.5
	mm	mm	mm	N/mm^2	N/mm^2	mm^2	$N.mm$	N	N/mm^2	-	mm	mm	mm	mm

المرحلة (I)	1–3	
	2–3	
	3–3	
	4–3	
	5–3	
	6–3	
	7–3	
المرحلة (II)	8–3	
المرحلة (III)	9–3	
المرحلة (IV)	10–3	
المرحلة (V)	11–3	
المرحلة (VI)	12–3	
المرحلة (VII)	13–3	
المرحلة (VIII)	14–3	
المرحلة (IX)	15–3	
المرحلة (X)	16–3	

3-4- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

يقدم الكود الأمريكي ACI -440.1R-06 [7]علاقة برانسون المعدلة التي تحوي العامل β_d وهو عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بالـFRP وتأخذ العلاقة الشكل التالي:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr} \quad .....(23-3)$$

حيث: $\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)$.....(21-3)، وفيها ρ_f- نسبة التسليح بقضبان الـFRP , ρ_{fb}- نسبة التسليح التوازنية بالـFRP وتحسب بالعلاقة التالية: $\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$ .....(19-3)

حيث:(β_1، f_c'، f_{fu}، ε_{cu})هي بالتتالي: نسبة ارتفاع كتلة البيتون المضغوط إلى ارتفاع المحور الحيادي في المقطع، مقاومة البيتون على الضغط، مقاومة القضبان على الشد، قيمة التشوه العظمى في القضبان.

3-4-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

يقترح الباحث Forsch في الكود ACI -440.1R-06 [7]، علاقة لحساب الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الكربونية كما يلي: $f_{f,M} = M\frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}}$.....(24-3)، ويحسب عرض الشق بالعلاقة التالية: $w = 2\frac{f_{f,M}}{E_f}\beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$.....(25-3)، وقد سبق شرح الرموز في الجدول(1-4).

3-4-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

يقدم الكود ACI -440.1R-06 [7] علاقة لحساب الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الكربونية كما يلي:$f_f = \sqrt{\frac{(E_f\varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f_c'}{\rho_f}E_f\varepsilon_{cu}} - 0.5E_f\varepsilon_{cu}$.....(26-3)، واعتماداً على ذلك يمكن حساب العزم المقاوم M_{nf} للمقاطع البيتونية المسلحة بالكربون وفق العلاقة التالية:

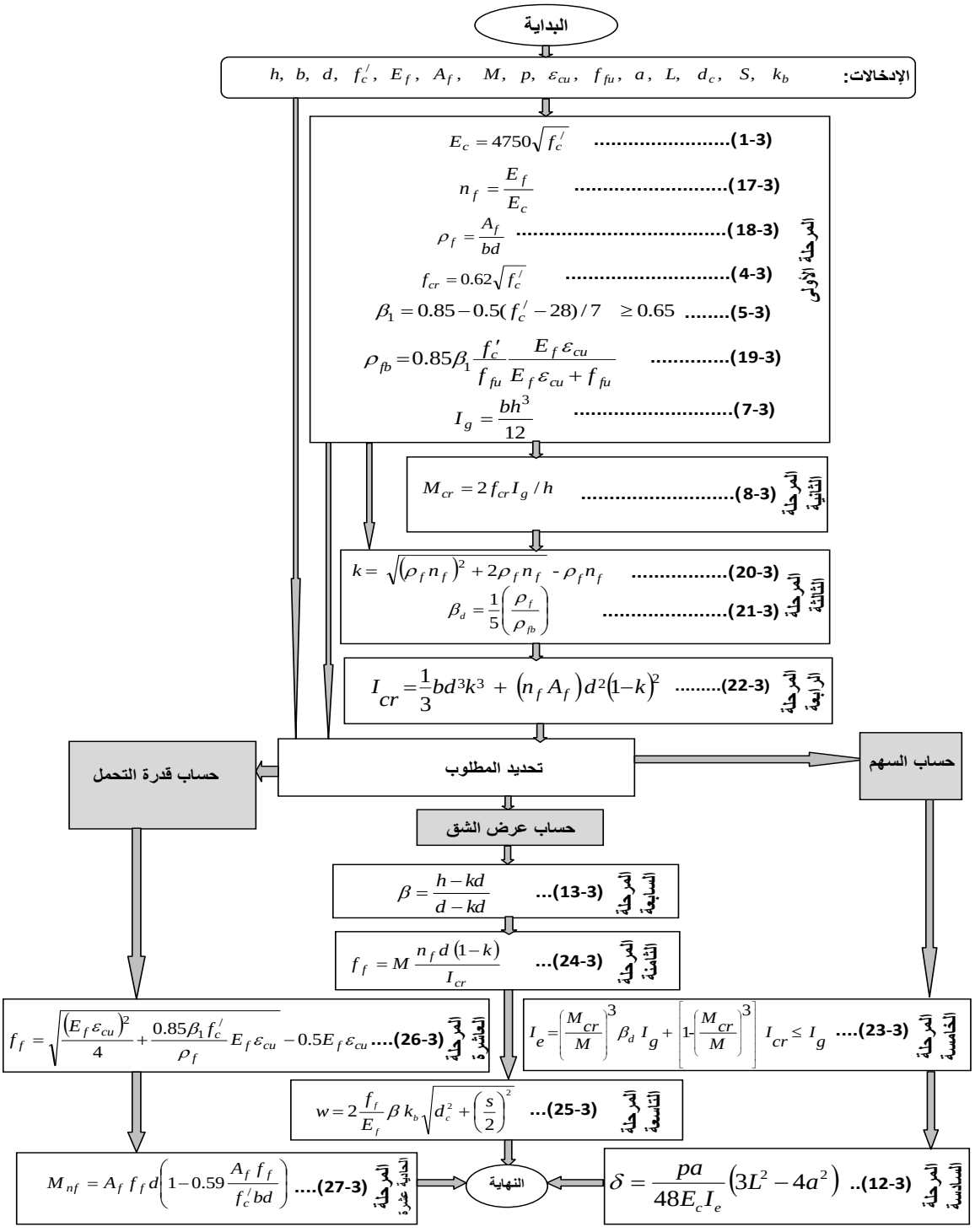
$$M_{nf} = A_f f_f d\left(1 - 0.59\frac{A_f f_f}{f_c' bd}\right) \quad .....(27-3)$$

3-4-4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

وضع مخطط منهجي للمراحل والعلاقات اللازمة لعملية الحساب، واستناداً إلى ذلك وضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL)، وفيه تم حساب جوائز المجموعتين(II و IV) المسلحتين بالكربون عند مختلف مستويات التحميل. ويبين الشكل(3-3) المخطط المنهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون.

3-4-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون (جوائز المجموعة II) من خلال مثال عددي.

يبين الشكل(3-1-a) الأبعاد الهندسية لجوائز المجموعة (II)، ويبين الجدول (3-3) الإدخالات والخطوات الحسابية اللازمة لحساب قيمة السهم وعرض الشق عند حمولة ما(120 KN)، وكذلك قدرة تحمل جوائز المجموعة(II) المسلحة بالكربون, والواحدات المستخدمة هي(N و mm)، ومنه يتبين أن قدرة التحمل تساوي(44.10^6 N.mm)، وان قيمة السهم تساوي(9,45mm)، وعرض الشق يساوي(0,46mm).



الشكل (3-3) مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان كربونية وفق الكود ACI -440.1R-06 [7].

الجدول(3–3) حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة(**II**) وكذلك السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN).

مراحل الحساب		العلاقات المستخدمة
الإدخالات		h = 250 mm; b = 125 mm; d = 224 mm; $f_c^{/}$ = 33,7 N/mm^2; E_f = 72640 N/mm^2; A_f = 339 mm^2; M = 32.10^6 $N.mm$; p = 120.10^3 N; ε_{cu} = 0,003; f_{fu} = 2215 N/mm^2; a = 533 mm; L = 1600 mm; d_c = 26 mm; s = 36,5 mm; k_b = 1,2 -
المرحلة (I)	1–3	$E_c = 4750\sqrt{f_c^{/}} = 4750\sqrt{33,7} = 27575 \ N/mm^2$
	17–3	$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{72640}{27575} = 2.634$
	18–3	$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{339}{125.224} = 0,01211$
	4–3	$f_{cr} = 0.62\sqrt{f_c^{/}} = 0.62\sqrt{33,7} = 3,59 \ N/mm^2$
	5–3	$\beta_1 = 0.85 - 0.5(f_c^{/} - 28)/7 \ \geq 0.65 \Rightarrow \ \beta_1 = 0.85 - 0.5(33,7 - 28)/7 = 0,81 > 0,62$ OK.
	19–3	$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c^{/}}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0,85.0,81.\frac{33,7}{2215}.\frac{72640.0,003}{72640.0,003 + 2215} = 0.001$
	7–3	$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{125.250^3}{12} = 1,63.10^8$ mm^4
المرحلة (II)	8–3	$M_{cr} = 2 f_{cr} I_g / h = 2 \ . \ 3,59 \ . \ 1,63.10^8 / 250 = 4,68.10^6$ N.mm
المرحلة (III)	20–3	$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2\rho_f n_f} - \rho_f n_f = \sqrt{(0,012.2,634)^2 + 2.0,012.2,634} - 0,012.2,634 = 0,2227$
	21–3	$\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \ \Rightarrow \ \beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{0,012}{0,001}\right) = 2,6$
المرحلة (IV)	22–3	$I_{cr} = \frac{1}{3} bd^3 k^3 + (n_f A_f) d^2 (1-k)^2 = \frac{1}{3}.125.224^3.0,2227^3 + (2,63.339)224^2.(1-0,2227)^2 = 3,23.10^7 \ mm^4$
المرحلة (V)	23–3	$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3\right] I_{cr} = \left[\frac{4,68.10^6}{32.10^6}\right]^3 2,6.1,63.10^8 + \left[1 - \left[\frac{4,68.10^6}{32.10^6}\right]^3\right].3,23.10^7 = 3,3.10^7 \ mm^4$
المرحلة (VI)	12–3	**حساب السهم عند الحمل 120 KN:** $\delta = \frac{pa}{48E_c I_e}(3L^2 - 4a^2) = \frac{120.10^3.533}{48.27575.3,3.10^7}(3.1600^2 - 4.533^2) = 9,45mm$
المرحلة (VII)	13–3	$\beta = \frac{h - kd}{d - kd} = \frac{250 - 0,2227.224}{224 - 0,2227.224} = 1,1493$
المرحلة (VIII)	24–3	$f_{f,M} = M \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} = 32.10^6.\frac{2,634.224.(1-0,2227)}{3,23.10^7} = 455 \ N/mm^2$
المرحلة (IX)	25–3	**حساب عرض الشق عند الحمل 120 KN:** $w = 2\frac{f_{f,M}}{E_f}\beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} = 2.\frac{455}{72640}.1,1493.1,2.\sqrt{26^2 + \left(\frac{36.5}{2}\right)^2} = 0,46 \ mm$
المرحلة (X)	26–3	$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c^{/}}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} = \sqrt{\frac{(72640.0,003)^2}{4} + \frac{0,85.0,81.33,7}{0,012}.72640.0,003} - 0,5.72640.0,003 = 546,1 \ N/mm^2$
المرحلة (XI)	27–3	**حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (II):** $M_{nf} = A_f f_f d\left(1 - 0,59\frac{A_f f_f}{f_c^{/} bd}\right) = 339.546,1.224.\left(1 - 0,59.\frac{339.546,1}{33,7.125.224}\right) = 44.10^6$ N.mm

3-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

لا تتوفر في الكودات التصميمية علاقات حسابية لحساب العناصر البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون)، وتكمن الفكرة الأساسية للبحث في اقتراح وتطوير بعض العلاقات الحسابية لتناسب التسليح الهجين وذلك لحساب قيمة السهم وعرض الشق وقدرة التحمل، حيث تم تطوير واقتراح العلاقات الرياضية اللازمة لحساب العوامل التالية: ($w, I_e, I'_{cr}, \beta'_d, k', \rho'$)، وهي علاقات تم تطويرها انطلاقاً من علاقات الكود ACI -440.1R-06 [7]، أما العلاقات $M'_{nf}, f'_f, \varepsilon'_f$ [39] فهي علاقات تناسب التسليح الهجين(فولاذ+زجاج)، وتم اقتراحها للتأكد من صحتها للتسليح الهجين(فولاذ+كربون). ويبين الجدول(3-4) مقارنة بين العلاقات الأصلية المناسبة للتسليح بالكربون والعلاقات المطورة والمقترحة لتناسب التسليح الهجين(فولاذ+كربون).

الجدول(3-4) مقارنة بين العلاقات المناسبة لحساب الجوائز المسلحة بالكربون والعلاقات المطورة والمناسبة للتسليح الهجين.

العلاقات الأصلية المناسبة للتسليح بالكربون[7]	العلاقات المطورة لتناسب التسليح الهجين(فولاذ+كربون)
$\rho_f = A_f / bd \quad .....(18-3)$	$\rho' = n_f \rho_f + n_s \rho_s \quad ....(29-3)$
$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2\rho_f n_f} - \rho_f n_f \quad .....(20-3)$	$k' = \sqrt{(\rho')^2 + 2\rho'} - \rho' \quad .....(30-3)$
$\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \quad .....(21-3)$	$\beta'_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho'}{\rho'_b}\right) \quad .....(31-3)$
$I_{cr} = \frac{1}{3} b d^3 k^3 + (n_f A_f) d^2 (1-k)^2 \quad ....(22-3)$	$I'_{cr} = \frac{1}{3} b d^3 k'^3 + (n_f A_f + n_s A_s) d^2 (1-k')^2 \quad .....(32-3)$
$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr} \quad ....(23-3)$	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \beta'_d I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \alpha_s I'_{cr} \quad .....(33-3)$
$\varepsilon_f = \frac{f_{f,M}}{E_f} = M \frac{n_f d (1-k)}{E_f . I_{cr}} \quad .....(24-3)$	$\varepsilon'_f = \frac{M}{(A_f E_f + A_s E_s) d\left(1-\frac{k'}{3}\right)} \quad .....(35-3)$ [39]
$w = 2\varepsilon_f \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad .....(25-3)$	$w = 2\varepsilon'_f \beta' k_b \alpha_s \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad .....(36-3)$
$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \quad .....(26-3)$	$f'_f = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu}\right)^2 + \left(0.85\frac{\beta_1 f'_c}{\rho_f} - \frac{A_s f_y}{A_f}\right) E_f \varepsilon_{cu}} - \frac{1}{2}\left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu}\right) \quad ....(37-3)$ [39]
$M_{nf} = A_f f_f d\left(1 - 0.59 \frac{A_f f_f}{f'_c b d}\right) \quad .....(27-3)$	$M'_{nf} = (\rho_f f_f + \rho_s f_y)\left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f + \rho_s f_y}{f'_c}\right) b d^2 \quad ....(38-3)$ [39]

3-5-1- حساب السهم في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

تم اقتراح تعديل على علاقة برانسون المعدلة بحيث تشتمل على العامل β'_d وهو عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بشكلٍ هجين وتأخذ العلاقة المعدلة الشكل التالي:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \beta'_d I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \alpha_s I'_{cr} \quad .....(33-3)$$

حيث نقترح حساب عزم عطالة المقطع المتشقق بالعلاقة التالية:

$$I'_{cr} = \frac{1}{3}bd^3k'^3 + \left(n_f A_f + n_s A_s\right)d^2(1-k')^2 \quad .....(32-3)$$

و نقترح حساب عامل تخفيض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بشكلٍ هجين بالعلاقة التالية:

$$\beta'_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho'}{\rho'_b}\right) \quad .....(31-3)$$ ، وفيها $$\rho' = n_f\rho_f + n_s\rho_s \quad .....(29-3)$$ ،

$$\rho'_b = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y}\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} \quad .....(28-3)$$

3-5-2- حساب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

تستخدم العلاقة التالية لحساب عرض التشققات: $$w = 2\varepsilon'_f\beta' k_b\alpha_s\sqrt{d_c^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad .....(36-3)$$ ، حيث:

ε'_f - التشوه النسبي الحاصل في قضبان التسليح ويحسب بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon'_f = \frac{M}{\left(A_f E_f + A_s E_s\right)d\left(1-\frac{k'}{3}\right)} \quad .....(35-3)$$

3-5-3- حساب قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

نقترح لحساب العزم المقاوم M_{nf} في المقاطع البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين العلاقة التالية:

$$M'_{nf} = \left(\rho_f f_f + \rho_s f_y\right)\left(1 - 0.59\frac{\rho_f f_f + \rho_s f_y}{f'_c}\right)bd^2 \quad .....(38-3)$$ وفيها قيمة الإجهاد في قضبان التسليح تحسب بالعلاقة التالية:

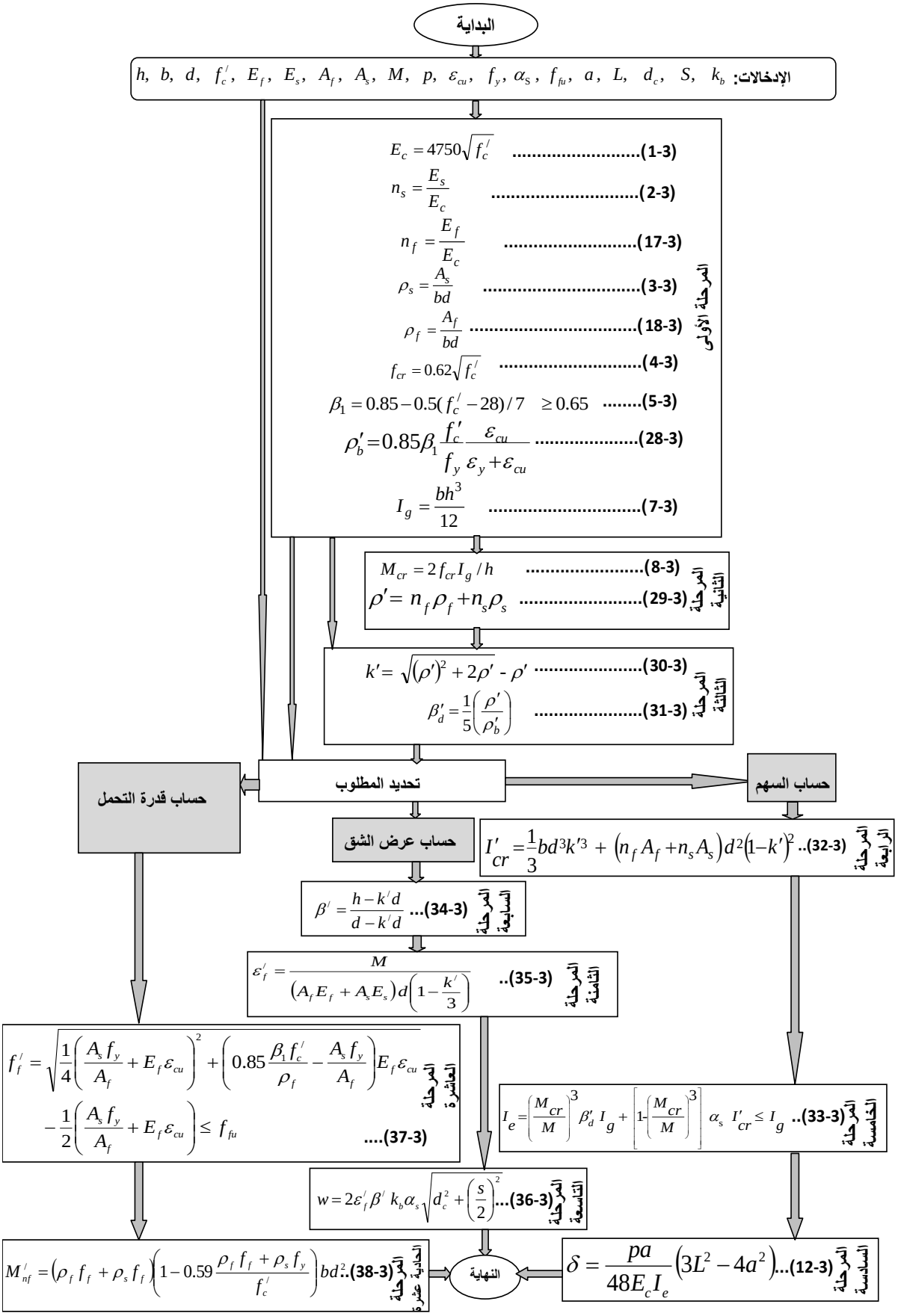
$$f'_f = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f\varepsilon_{cu}\right)^2 + \left(0.85\frac{\beta_1 f'_c}{\rho_f} - \frac{A_s f_y}{A_f}\right)E_f\varepsilon_{cu}} - \frac{1}{2}\left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f\varepsilon_{cu}\right) \quad .....(37-3)$$

3-5-4- مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون).

وضع مخطط منهجي للمراحل والعلاقات اللازمة لعملية الحساب، واستناداً إلى ذلك وضع برنامج لحساب هذه العناصر باستخدام برنامج (EXCEL)، وفيه تم حساب جوائز المجموعات (**VII-VI-V-X- IX-VIII**) المسلحة بشكلٍ هجين عند مختلف مستويات التحميل. ويبين الشكل(3-4) مخطط منهجي لمراحل حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون)، وجميع العلاقات الحسابية اللازمة لحساب قيمة السهم و عرض الشق وقدرة التحمل.

3-5-5- حساب الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين، (المجموعة VII) من خلال مثال عددي.

يبين الشكل(3-1-a) الأبعاد الهندسية لجوائز المجموعة (VII)، ويبين الجدول(3-5) الإدخالات والخطوات الحسابية اللازمة لحساب قيمة السهم وعرض الشق عند حمولة ما(120 KN), وكذلك قدرة تحمل جوائز المجموعة(VII) المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون)، والواحدات المستخدمة هي(N و mm)، ومنه يتبين أن قدرة التحمل تساوي($38,7.10^6$ N.mm)، وان قيمة السهم تساوي(8,37mm)، وعرض الشق يساوي(0,23mm).



الشكل (3–4) مخطط منهجي لمراحل حساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين اعتماداً على علاقات مطورة.

الجدول(3–5) حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة(**VII**) وكذلك السهم وعرض الشق عند حمولة (120 KN).

مراحل الحساب	العلاقات المستخدمة	
	h	250 mm
	b	125 mm
	d	224 mm
	f_c'	34,8 N/mm^2
	E_f	72640 N/mm^2
	E_s	200.10^3 N/mm^2
	A_f	113,04 mm^2
	A_s	226,08 mm^2
	M	32.10^6 $N.mm$
	P	120.10^3 N
	ε_{cu}	0,003 -
	f_y	622 N/mm^2
	α_s	0,62 -
	f_{fu}	2215 N/mm^2
	a	533 mm
	L	1600 mm
	d_c	26 mm
	S	36,5 mm
	k_b	1,2 -
	الإدخالات	

مراحل الحساب		
المرحلة (I)	1–3	$E_c = 4750\sqrt{f_c'} = 4750\sqrt{34,8} = 28021 \quad N/mm^2$
	2–3	$n_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{28021} = 7,137$
	17–3	$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{72640}{28021} = 2.592$
	3–3	$\rho_s = \frac{A_s}{bd} = \frac{226,08}{125.224} = 0,008$
	18–3	$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{113,04}{125.224} = 0,004$
	4–3	$f_{cr} = 0.62\sqrt{f_c'} = 0.62\sqrt{34,8} = 3,66 \quad N/mm^2$
	5–3	$\beta_1 = 0.85 - 0.5(f_c' - 28)/7 \geq 0.65 \Rightarrow \beta_1 = 0.85 - 0.5(34,8-28)/7 = 0,8 > 0,62$ OK.
	28–3	$\rho_b' = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_y}\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} = 0,85.0,8.\frac{34,8}{622}.\frac{0,003}{0,0031+0,003} = 0.019$
	7–3	$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{125.250^3}{12} = 1,63.10^8 \quad mm^4$
المرحلة (II)	8–3	$M_{cr} = 2 f_{cr} I_g / h = 2\ .\ 3,66\ .\ 1,63\ .10^8 / 250 = 4,76.10^6 \quad N.mm$
	29–3	$\rho' = n_f\rho_f + n_s\rho_s = 2,592.0,004 + 7,137.0,008 = 0,068$
المرحلة (III)	30–3	$k' = \sqrt{(\rho')^2 + 2\rho'} - \rho' = \sqrt{(0,068)^2 + 2.0,068} - 0,068 = 0,307$
	31–3	$\beta_d' = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho'}{\rho_b'}\right) \Rightarrow \beta_d' = \frac{1}{5}\left(\frac{0,068}{0,019}\right) = 0,718$
المرحلة (IV)	32–3	$I_{cr}' = \frac{1}{3}bd^3k'^3 + (n_f A_f + n_s A_s)d^2(1-k')^2 = \frac{1}{3}.125.224^3.0,307^3 + (2,592.113,04 + 7,137.226,08)224^2.(1-0,307)^2 = 3,69.10^7\ mm^4$
المرحلة (V)	33–3	$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3 \beta_d' I_g + \left[1 - \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3\right]\alpha_s I_{cr}' = \left[\frac{4,76.10^6}{32.10^6}\right]^3 0,718.1,63.10^8 + \left[1 - \left[\frac{4,76.10^6}{32.10^6}\right]^3\right].0,62.3,69.10^7 = 3,7.10^7\ mm^4$
المرحلة (VI)	12–3	**حساب السهم عند الحمل 120 KN:** $\delta = \frac{pa}{48E_cI_e}(3L^2 - 4a^2) = \frac{120.10^3.533}{48.28021.3,7.10^7}(3.1600^2 - 4.533^2) = 8,37\ mm$
المرحلة (VII)	34-3	$\beta' = \frac{h - k'd}{d - k'd} = \frac{250 - 0,307.224}{224 - 0,307.224} = 1,168$
المرحلة (VIII)	35–3	$\varepsilon_f' = \frac{M}{(A_fE_f + A_sE_s)d\left(1 - \frac{k'}{3}\right)} = \frac{32.10^6}{(113,04.72640 + 226,08.200.10^3).224.\left(1 - \frac{0,307}{3}\right)} = 0,00298$
المرحلة (IX)	36–3	**حساب عرض الشق عند الحمل 120 KN:** $w = 2\varepsilon_f'\beta'\ k_b\alpha_s\sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} = 2.0,00298.1,168.\ 1,2.0,62.\sqrt{26^2 - \left(\frac{36,5}{2}\right)^2} = 0,23\ mm$
المرحلة (X)	37–3	$f_f' = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{A_sf_y}{A_f} + E_f\varepsilon_{cu}\right)^2 + \left(0.85\frac{\beta_1 f_c'}{\rho_f} - \frac{A_sf_y}{A_f}\right)E_f\varepsilon_{cu}} - \frac{1}{2}\left(\frac{A_sf_y}{A_f} + E_f\varepsilon_{cu}\right)$ $f_f' = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{226,06.622}{113,04} + 72640.0,003\right)^2 + \left(0,85\frac{0,8.34,8}{0,004} - \frac{226,08.622}{113,04}\right).72640.0,003} - \frac{1}{2}\left(\frac{226,08.622}{113,04} + 72640.0,003\right) = 499,7\ N/mm^2$
المرحلة (XI)	38–3	**حساب قدرة تحمل جوائز المجموعة (VII):** $M_{nf}' = (\rho_f f_f + \rho_s f_y)\left(1 - 0,59\frac{\rho_f f_f + \rho_s f_y}{f_c'}\right)bd^2 = (0,004.499,7 + 0,008.622).\left(1 - 0,59\frac{0,004.499,7 + 0,008.622}{34,8}\right).125.224^2 = 38,7.10^6\ N.mm$

3-5-6- شرح للعلاقات الرياضية المستخدمة.

نشرح فيما يلي الرموز والعلاقات الرياضية التي سبق استخدامها في الجداول:(3-2) و(3-3) و(3-4) و(3-5) وذلك بحسب ورودها في هذه الجداول، كما أن هذه الرموز موضحة على الشكل(3-1).

h – الارتفاع الكلي للمقطع(mm)، b – عرض للمقطع(mm)، d – الارتفاع الفعال(mm)، $f_c^{/}$ – المقاومة المميزة للبيتون(MPa)، E_f – معامل مرونة قضبان الـ FRP(MPa)، E_s – معامل مرونة الفولاذ (MPa)، A_f – مساحة مقطع قضبان الـ CFRP(mm^2)، A_s – مساحة مقطع القضبان الفولاذية(mm^2)، M – العزم المطبق على الجائز(N.mm)، p – الحمولة الكلية المطبقة على الجائز(N)، ε_{cu} – التشوه النسبي الأعظمي في البيتون المضغوط وهو يساوي 0.003 حسب الكود الأمريكي[7]، و0.0035 حسب الكود الأوربي[16]. f_y – إجهاد الخضوع في فولاذ التسليح (MPa)، f_{fu} – مقاومة القضبان الكربونية على الشد (MPa)، a – مجال القص (المسافة بين نقطة تطبيق القوة والمسند) (mm)، L – طول مجاز الجائز(mm)، d_c – سماكة طبقة التغطية وتقاس من السطح المشدود إلى مركز طبقة التسليح الأقرب للسطح (mm)، s – التباعد الأفقي بين قضبان التسليح في المقطع (mm)، k_b – معامل يتعلق بالتماسك بين قضبان CFRP والبيتون (هذا العامل يتراوح بين 0.6 و 1.72 وقيمته =1.2 في حالة عدم توفر معطيات تجريبية عن قضبان الـCFRP [7]).

$E_c = 4750\sqrt{f_c^{/}}$ ..... (1-3) معامل مرونة البيتون(MPa).

$n_s = \frac{E_s}{E_c}$ .....(2 - 3) نسبة معامل مرونة القضبان الفولاذية إلى معامل مرونة البيتون.

$\rho_s = \frac{A_s}{bd}$ ..... (3-3). نسبة التسليح الحقيقية بقضبان فولاذية.

$f_{cr} = 0.62\sqrt{f_c^{/}}$ ..... (4 – 3). مقاومة البيتون على الشد modulus of rupture of concrete (MPa) ([7] ACI318-05). وفي الكود [43] تأخذ هذه العلاقة الشكل التالي: $f_{cr} = 0.44\sqrt{f_c^{/}}$.

$\beta_1 = 0.85 - 0.5(f_c^{/} - 28)/7 \geq 0.65$..... (5 - 3) معامل يحدد لمقاومات البيتون التي تزيد عن (28 MPa).

$\rho_{sb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c^{/}}{f_y} \frac{600}{600 + f_y}$ ....(6 – 3) نسبة balanced effective reinforcement ratio تسليح توازني، وهي نسبة توافق حدوث انهيار للبيتون ويترافق ذلك مع حدوث تطاول في فولاذ التسليح في حالة مقاطع مسلحة على الشد فقط [30]. وهذه العلاقة تأخذ في الكود[43] الشكل التالي:

$A_{sb} = \frac{455}{630 + f_y} \cdot \frac{f_c^{/}}{f_y} bd$ = نسبة تسليح توازني [43].

$I_g = \frac{bh^3}{12}$ ....(7 - 3) قيمة عزم عطالة المقطع غير المتشقق(mm^4).

$M_{cr} = 2 f_{cr} I_g / h$.....(8 - 3) العزم المسبب للتشقق(N.mm).

$k = \sqrt{(\rho_s n_s)^2 + 2\rho_s n_s} - \rho_s n_s$ .....(9 - 3) وهو معامل يحسب للتسليح بالفولاذ.

$I_{cr} = \frac{1}{3} b d^3 k^3 + (n_s A_s) d^2 (1-k)^2$ ....(10 – 3) وهو عزم عطالة المقطع المتشقق(mm^4)

$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M}\right]^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] \alpha_s I_{cr} \le I_g$ .....(11-3) Effective moment of inertia وهو عزم العطالة الفعال للمقطع (mm^4). وفيها $\alpha_s = \frac{390}{f_y}$ وهو عامل مقترح ليناسب الفولاذ (ذو إجهاد خضوع عالي f_y (MPa)) وهو نوع الفولاذ المستخدم في البحث(A600 وA500)، أما الرقم 390 فهو متوسط قيمة إجهاد الخضوع للفولاذ العادي(MPa)، وتجدر الإشارة إلى أنه في الدراسة [18] يستخدم بدل العامل المقترح α_s عامل تعديل (Modification factor: $\gamma_G = 0,6$).

$\delta = \frac{pa}{48 E_c I_e}(3L^2 - 4a^2)$ .....(12 – 3) قيمة السهم وسط مجاز الجائز(mm).

$\beta = \frac{h - kd}{d - kd}$.....(13 – 3) النسبة بين بعد المحور الحيادي عن الوجه المشدود للمقطع إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز القضبان المشدودة في المقطع.

$f_s = M \frac{n_s d(1-k)}{I_{cr}}$.....(14 – 3) وهو الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الفولاذية(MPa).

$w = 2\frac{f_s}{E_s}.\beta\,\alpha_s \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$ .....(15 – 3) وهو عرض الشق في الجوائز المسلحة بالفولاذ(mm).

$M_{ns} = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_c' b}\right)$.....(16 – 3) قيمة عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بالفولاذ(N.mm).

$n_f = \frac{E_f}{E_c}$ ..... (17 - 3) نسبة معامل مرونة قضبان الـ CFRP إلى معامل مرونة البيتون.

$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$ ..... .(18 - 3) نسبة التسليح الحقيقية بقضبان CFRP.

$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$ .....(19 - 3) وهي نسبة التسليح الفعالة التوازنية بقضبان CFRP.

$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2\rho_f n_f} - \rho_f n_f$ .....(20 - 3) وهو معامل يحسب للتسليح بالـCFRP.

$\beta_d = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)$.....(21 – 3) وهو عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بالـCFRP.

$I_{cr} = \frac{1}{3} b d^3 k^3 + (n_f A_f) d^2 (1-k)^2$.....(22 – 3) وهو عزم عطالة المقطع المتشقق (mm^4).

$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr}$.....(23–3) وهو عزم العطالة الفعلي للمقطع المسلح بـ CFRP(mm^4).

$$f_f = M\frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} \quad .....(24-3)$$ وهو الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الـ CFRP عند تطبيق العزم M على الجائز (MPa).

$$w = 2\frac{f_{fM}}{E_f}\beta k_d\sqrt{d_c^2+\left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad .....(25-3)$$ وهو عرض الشق في الجوائز المسلحة بالـ CFRP (mm).

$$f_{fM} = \sqrt{\frac{(E_f\varepsilon_{cu})^2}{4}+\frac{0.85\beta_1 f_c^{/}}{\rho_f}E_f\varepsilon_{cu}} - 0.5E_f\varepsilon_{cu} \quad .....(26-3)$$ وهو الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح CFRP (MPa).

$$M_{nf} = A_f f_f d\left(1-0.59\frac{A_f f_f}{f_c^{/}bd}\right) \quad .....(27-3)$$ قيمة عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بالـ CFRP(N.mm).

$$\rho_b' = 0.85\beta_1\frac{f_c'}{f_y}\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y+\varepsilon_{cu}} \quad .....(28-3)$$ وهي نسبة التسليح الفعالة التوازنية للتسليح الهجين، حيث:

ε_y – تساوي التشوه في القضبان الفولاذية لحظة الخضوع.

$$\rho' = n_f\rho_f + n_s\rho_s \quad .....(29-3)$$ وهو معامل يحسب للتسليح الهجين.

$$k' = \sqrt{(\rho')^2+2\rho'} - \rho' \quad .....(30-3)$$ وهو معامل يحسب للتسليح الهجين.

$$\beta_d' = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho'}{\rho_b'}\right) \quad .....(31-3)$$ وهو عامل تخفيض يتعلق بانخفاض الصلابة على الشد في العناصر المسلحة بشكلٍ هجين.

$$I_{cr}' = \frac{1}{3}bd^3k'^3 + (n_f A_f + n_s A_s)d^2(1-k')^2 \quad .....(32-3)$$ وهو عزم عطالة المقطع المتشقق المسلح بشكلٍ هجين(mm^4).

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\beta_d' I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right]\alpha_s I_{cr}' \quad .....(33-3)$$ وهو عزم العطالة الفعلي للمقطع المسلح بشكلٍ هجين (mm^4).

$$\beta' = \frac{h-k'd}{d-k'd} \quad .....(34-3)$$ النسبة بين بعد المحور الحيادي عن الوجه المشدود للمقطع إلى المسافة بين المحور الحيادي ومركز القضبان المشدودة في المقطع المسلح بشكلٍ هجين.

$$\varepsilon_f' = \frac{M}{(A_f E_f + A_s E_s)d\left(1-\frac{k'}{3}\right)} \quad .....(35-3)$$ وهو التشوه الحاصل في قضبان التسليح الهجينة.

$$w = 2\varepsilon_f'.\beta'.k_b.\alpha_s\sqrt{d_c^2+\left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad .....(36-3)$$ وهو عرض الشق في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين (mm).

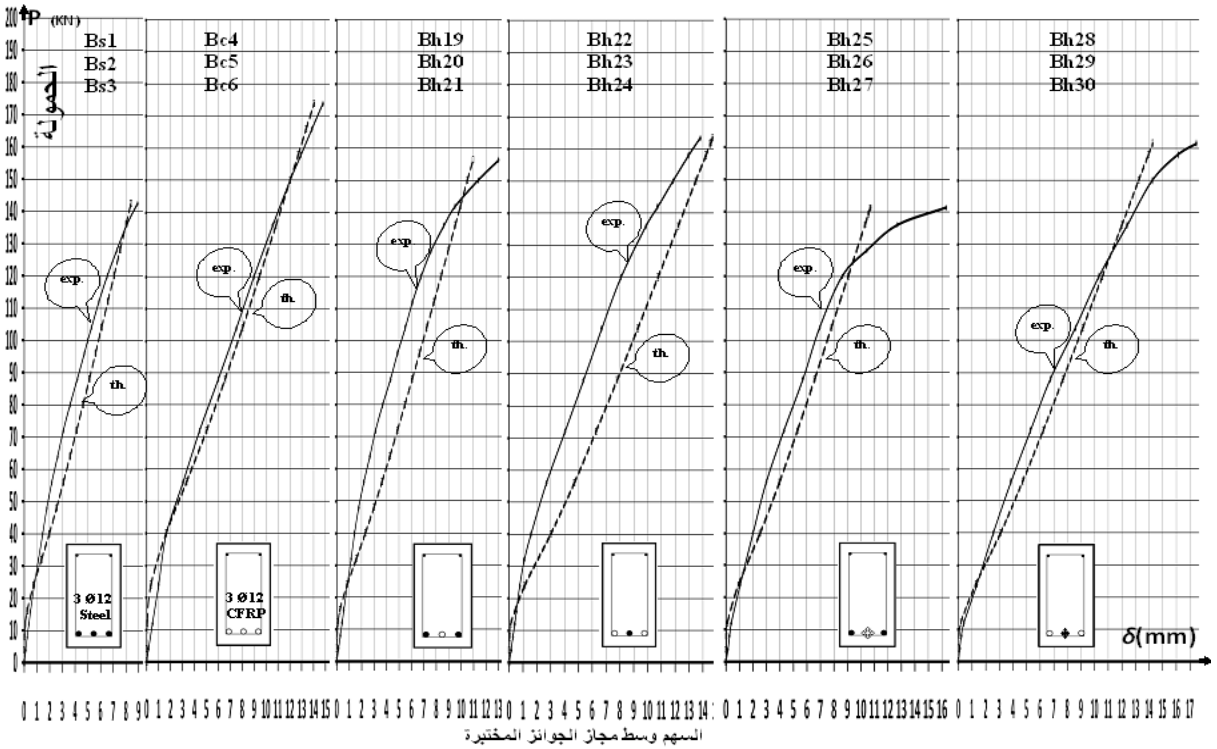
$$f_f' = \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{A_s f_y}{A_f}+E_f\varepsilon_{cu}\right)^2+\left(0.85\frac{\beta_1 f_c'}{\rho_f}-\frac{A_s f_y}{A_f}\right)E_f\varepsilon_{cu}} - \frac{1}{2}\left(\frac{A_s f_y}{A_f}+E_f\varepsilon_{cu}\right) \le f_{fu} \quad .....(37-3)$$ وهو الإجهاد الحاصل في قضبان التسليح الهجين (MPa).

$$M_{nf}' = (\rho_f f_f + \rho_s f_y)\left(1-0.59\frac{\rho_f f_f + \rho_s f_y}{f_c'}\right)bd^2 \quad .....(38-3)$$ وهو عزم الانعطاف المقاوم للجائز المسلح بشكلٍ هجين (N.mm).

3-6- مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الحسابية:

3-6-1- مناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم:

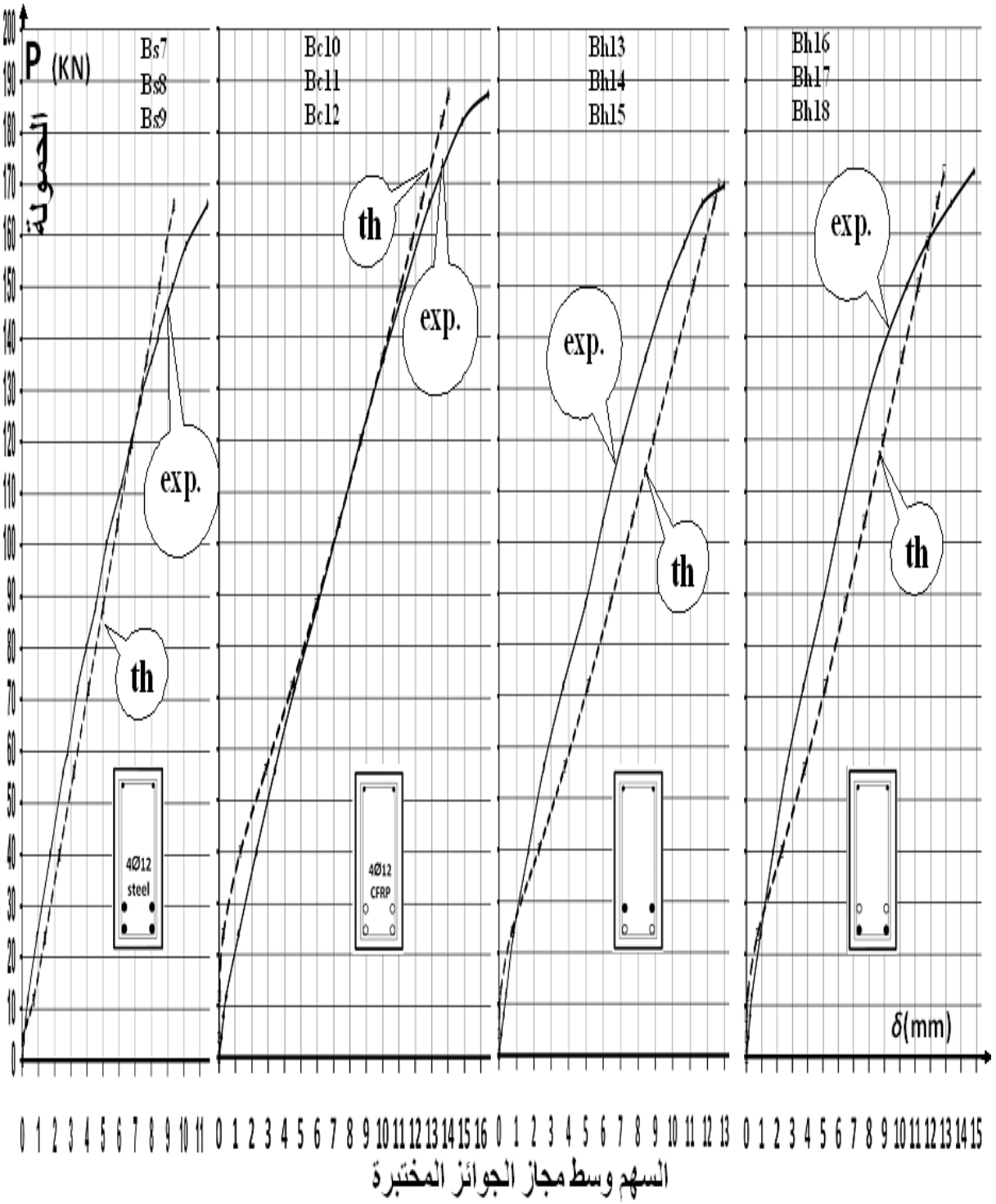
يبين الشكل(3-5) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) ومنحنيات القيم الحسابية (.th) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان، ويبين الشكل (3-6) مقارنة لهذه القيم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان، حيث أن القيم الحسابية للسهم حددت اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية والمبينة في الأشكال(3-2) و(3-3) و(3-4). ويبين الجدول (3-6) مقارنة لنسبة القيم التجريبية إلى القيم الحسابية للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة(أي النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$)، وذلك عند ثلاثة مستويات للتحميل(أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز). ومن هذا الجدول يتبين أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي(0.83-0.95-0.96-1.05) في جوائز المجموعات (I- III- II- IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 0.89، و في الجوائز المسلحة بالكربون تساوي1.01.



الشكل (3-5) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان.

كما أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي(0.76-0.72-0.91-0.93-0.79-0.82) في جوائز المجموعات (VII-VIII-IX-X- V- VI) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي0.83 في الجوائز المسلحة بطبقة

واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 0.81 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي 0.82.



الشكل (3–6) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان.

الجدول (3–6) مقارنة نسبة القيمة التجريبية(.exp) للسهم إلى القيمة الحسابية(.th)، ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$).

اسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ عند حمولة = $30\%(P_u)$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ عند حمولة = $60\%(P_u)$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ عند حمولة = $90\%(P_u)$	متوسط $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ لكل مجموعة	متوسط $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ للمجموعات المقابلة	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	0.73	0.80	0.96	0.83	0.89	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	0.79	0.96	1.11	0.95		
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	0.93	0.94	1.00	0.96	1.01	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	1.13	1.00	1.04	1.05		
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	0.61	0.72	0.94	0.76	0.83	0.82
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	0.56	0.71	0.88	0.72		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	0.82	0.86	1.05	0.91		
	X	Bh28 Bh29 Bh30	0.83	0.91	1.05	0.93		
	V	Bh13 Bh14 Bh15	0.69	0.78	0.89	0.79	0.81	
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	0.70	0.79	0.97	0.82		

3–6–2– مقارنة قيم عرض الشق التجريبية($w_{exp.}$) مع القيم المحسوبة ($w_{th.}$):

يبين الشكل (3–8) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) ومنحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان، ويبين الشكل (3–9) مقارنة لهذه القيم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان، حيث أن القيم الحسابية لعرض الشق حددت اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية والمبينة في الأشكال(3–2) و(3–3) و(3–4). ومن مقارنة نسب القيم التجريبية إلى القيم الحسابية لعرض الشق

في الجوائز المختبرة (أي النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$)، وذلك عند ثلاثة مستويات للتحميل (أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز)، يتبين أن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي(1.08–0.94–0.77–0.73) في جوائز المجموعات (I–III –II–IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 1.01، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 0.75، كما أن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي(0.99–0.94–1.18–0.90–0.77–0.80) في جوائز المجموعات (VII-VIII- IX-X- V- VI) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان الهجينة التسليح. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي 1.01 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 0.79 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي 0.90.

3–6–3– مقارنة قيم عرض الشق المحسوبة على أساس قيم التشوه التجريبية ووفق الكودين(ACI [7] وCEB [15]) مع القيم التجريبية(.exp) ومع القيم الحسابية(.th) لجميع الجوائز المختبرة.

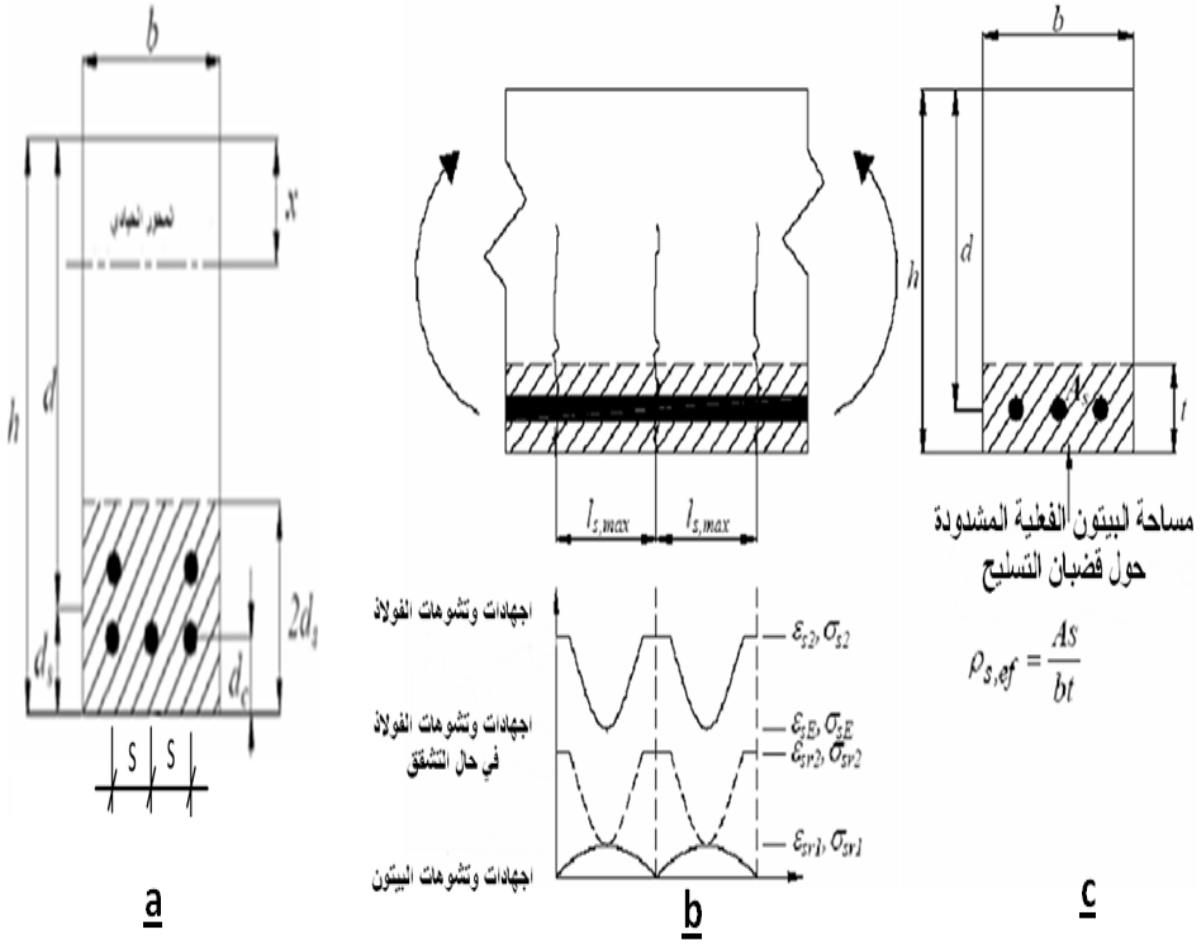
لحساب عرض الشق في جميع الجوائز المختبرة نستخدم هنا القيم التجريبية للتشوه النسبي الحاصل في قضبان التسليح وفي البيتون المضغوط والمبينة في الشكل(2–23)، ونحسب عرض الشق وفق الكودين(ACI [7] وCEB [15])، ويبين الشكل(3–7) المخططات التوضيحية اللازمة لذلك.

نستخدم علاقة الكود(ACI 318-05)[6] والخاصة بالعناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ لحساب عرض الشق اعتماداً على القيم التجريبية للتشوه الحاصل في القضبان كما يلي:

$w = 2\beta\,\varepsilon_{s,\exp.}\sqrt{d_c^2 + (s/2)^2}$ ..... (3 – 39)، حيث: $\varepsilon_{s,\exp.}$ – التشوه النسبي التجريبي الحاصل في قضبان التسليح الفولاذية ، حيث: β – تحسب بالعلاقة (3–13) .

وفيما يتعلق بالعناصر المسلحة بالكربون أو بشكلٍ هجين، نستخدم علاقة الكود ACI -440.1R-06 [7]، لحساب عرض الشق اعتماداً على القيم التجريبية للتشوه الحاصل في القضبان كما يلي:

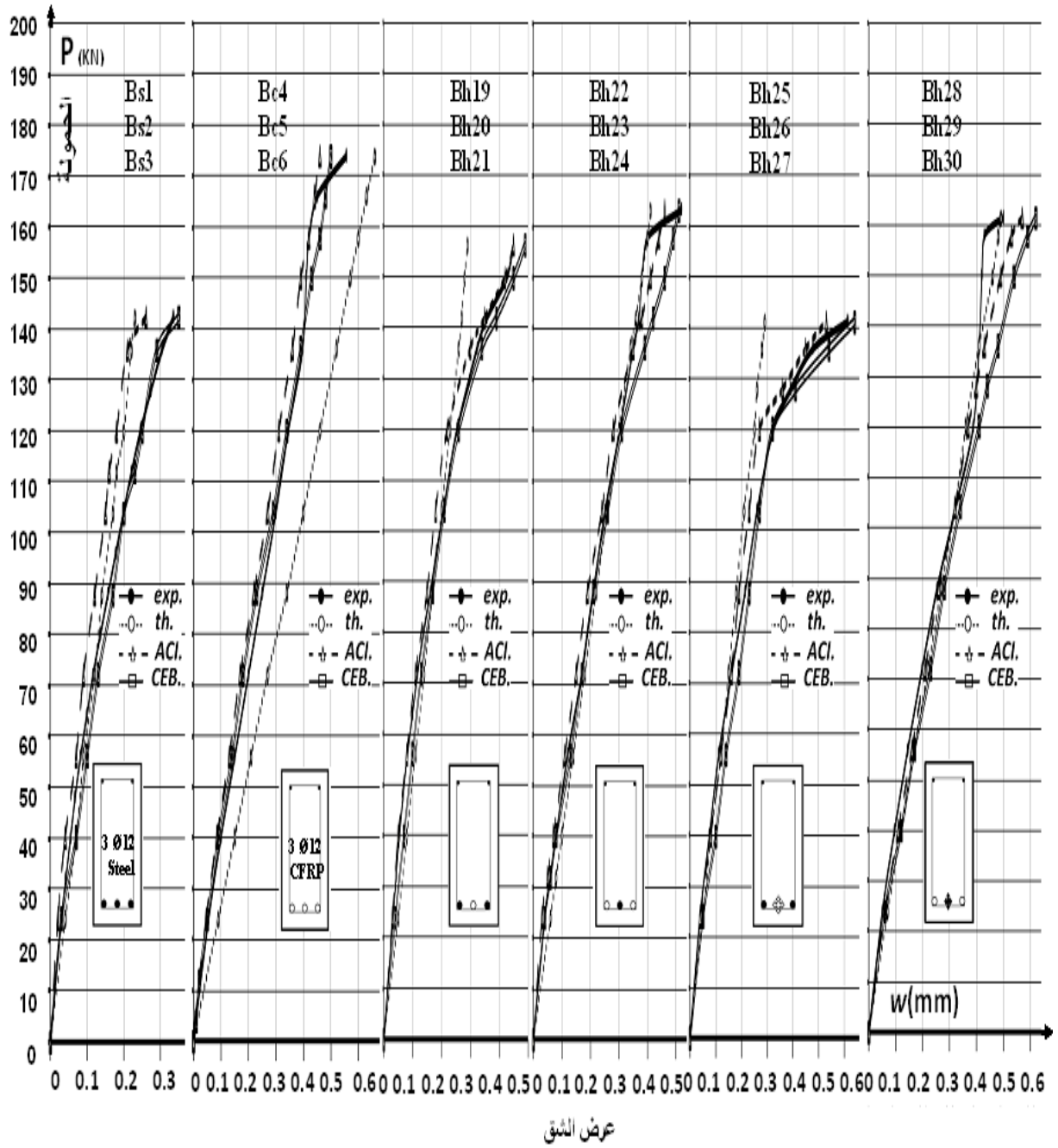
$w = 2\varepsilon_{f,\exp.}\beta^{*}\cdot k_b\sqrt{d_c^2 + (s/2)^2}$ ..... (3 - 40) ، حيث: $\varepsilon_{f,\exp.}$ – التشوه النسبي التجريبي الحاصل في قضبان التسليح، و β^{*} – تحسب بالعلاقة (3–13) للجوائز المسلحة بالكربون، وبالعلاقة (3–34) للعناصر المسلحة بشكلٍ هجين، أما k_b فقيمته تساوي 1,2 وفق[7].



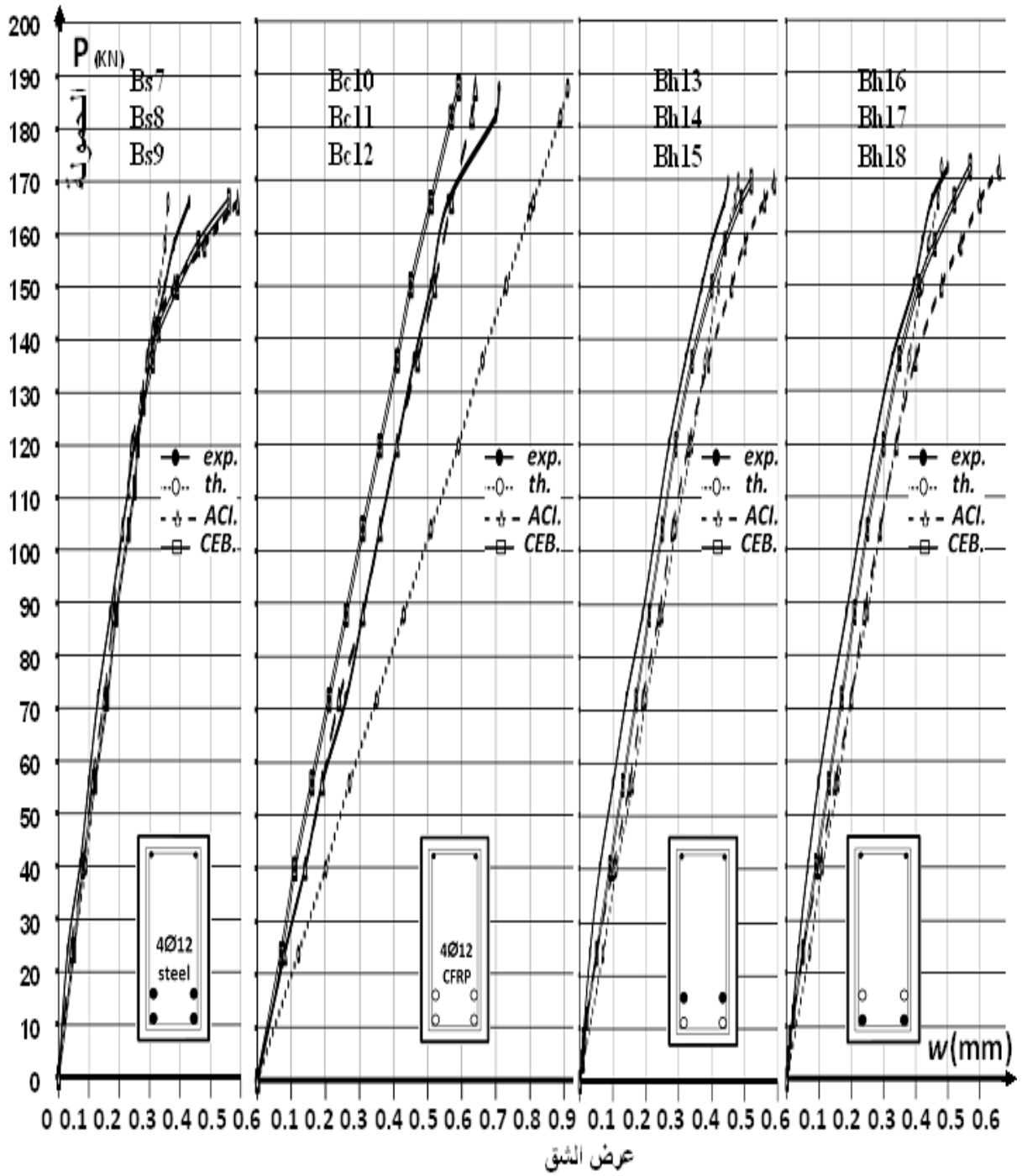
الشكل(3–7) المخططات التوضيحية لحساب عرض الشق في الكودين ACI [7] وCEB [15]،
a– مقطع عرضي للجائز البيتوني وتظهر عليه الأبعاد الهندسية اللازمة لحساب عرض الشق بحسب التقريب في الكود ACI [7]، b و c – مقطع طولي ومقطع عرضي للجائز البيتوني وتظهر عليها الأبعاد الهندسية اللازمة لحساب عرض الشق بحسب التقريب في الكود CEB [15].

أما الكود (CEB-FIP Model code 1990) [15] فيحسب عرض الشق في الجوائز البيتونية المسلحة(مهما كان نوع التسليح)، باستخدام العلاقة التالية: $w_K = l_{s,\max}(\varepsilon_{sm,\exp.} - \varepsilon_{cm,\exp.})$.....(3–41)،
حيث: $l_{s,\max}$– المسافة بين شقين متتاليين كما مبين في الشكل(3–7) وهي تحسب بالعلاقة التالية:

$l_{s,\max} = \frac{\phi_s}{3.6\rho_{s,ef}}$.....(3 -42)، وفيها ϕ_s– قطر قضيب التسليح، $\rho_{s,ef} = \frac{A_s}{bt}$....(3–43) – نسبة التسليح الفعلية مع الأخذ بالحسبان المساحة الفعلية للبيتون المتناظر حول القضبان المشدودة. $\varepsilon_{sm,\exp.}$– متوسط قيمة التشوه النسبي التجريبي الحاصل في القضبان. $\varepsilon_{cm,\exp.}$– متوسط قيمة التشوه النسبي التجريبي الحاصل في البيتون المضغوط. ويظهر على الشكلين (3–8 و3–9) بالإضافة إلى منحنيات(حمولة – عرض الشق) الناتجة تجريبياً(.exp) وحسابياً(.th)، منحيات إضافية تتوافق بشكلٍ كبير مع القيم التجريبية لعرض الشق، وناتجة عن استخدام علاقات الكودACI[7] والكودCEB [15].



الشكل (3-8) مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم الحسابية (.th) لعرض الشق مع القيم المحددة وفق الكودين ACI[7] و CEB [15] والمحسوبة اعتماداً على قيم التشوه التجريبية الحاصلة في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان.

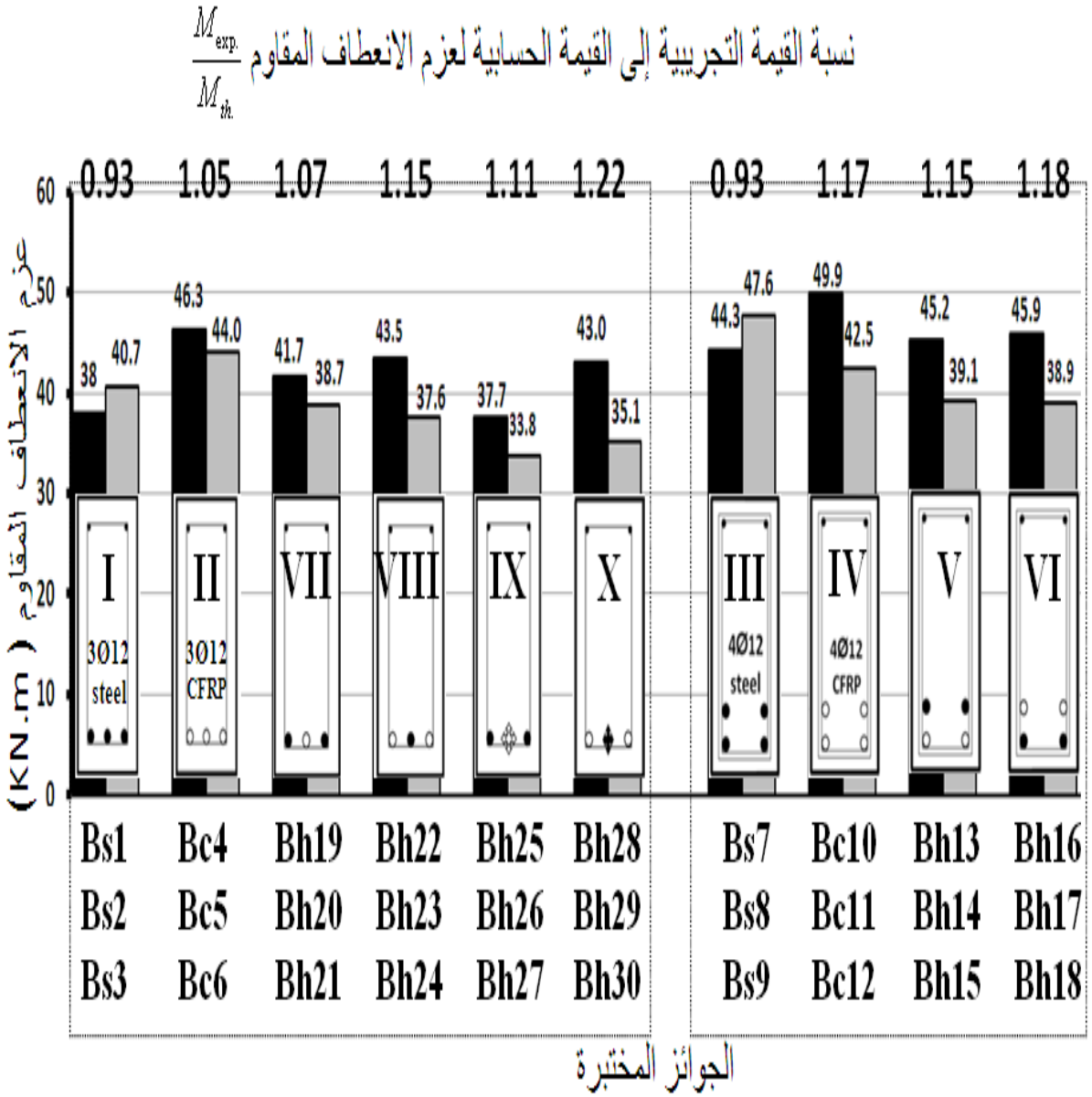


الشكل (3-9) مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم الحسابية (.th) لعرض الشق مع القيم المحددة وفق الكودين ACI[7] و CEB [15] والمحسوبة اعتماداً على قيم التشوه التجريبية الحاصلة في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان.

3-6-4- مناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف.

يبين الشكل (3-10) مقارنة بين القيم التجريبية $M_{\exp.}$ والقيم الحسابية $M_{th.}$ لعزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة أو طبقتين من القضبان، حيث أن القيم الحسابية لعزم الانعطاف

المقاوم حددت اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية والمبينة في الأشكال(3–2) و(3–3) و(3–4).



الشكل (3–10) مقارنة بين القيم التجريبية(exp.) ■والقيم الحسابية(th.)□ لعزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة.

يبين الجدول (3–7) مقارنة نسبة القيم التجريبية إلى القيم الحسابية لعزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة. ومن هذا الجدول يتبين أن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{th.}}$ تساوي(0.93–0.93–1.05–1.17) في جوائز المجموعات(I– III –II– IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{th.}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 0.93، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 1.11.

الجدول (3–7) مقارنة نسبة القيم التجريبية لعزم الانعطاف المقاوم إلى القيم الحسابية.

نوع التسليح واسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	حمولة الانهيار التجريبية $P_u\,(KN)$	عزم الانعطاف الحسابي $M_{th.}$	عزم الانعطاف التجريبي $M_{\exp.}$	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ لكل مجموعة	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ للمجموعات المقابلة	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	142.37	40.7	38	0.93	0.93	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	166	47.6	44.3	0.93		
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	173.90	44.0	46.3	1.05	1.11	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	187.30	42.5	49.9	1.17		
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	156.40	38.7	41.7	1.07	1.13	1.15
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	163.36	37.6	43.5	1.15		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	141.30	33.8	37.7	1.11		
	X	Bh28 Bh29 Bh30	161.50	35.1	43	1.22		
	V	Bh13 Bh14 Bh15	169.55	39.1	45.2	1.15	1.16	
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	172.20	38.9	45.9	1.18		

كما أن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي(1.07–1.15–1.11–1.22–1.15–1.18) في جوائز المجموعات (VII-VIII-IX-X- V- VI) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي 1.13 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 1.16 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي1.15.

3-7- نتائج الدراسة الحسابية.

عند إجراء مقارنة مباشرة للقيم التجريبية المتعلقة بالسهوم وسط مجاز الجوائز وعرض التشققات وقدرات التحمل مع القيم المحسوبة باستخدام علاقات الكودين(ACI 318-05 [6] وACI -440.1R-06 [7]) فيما يخص الجوائز المسلحة بالفولاذ أو المسلحة بالكربون، أو المحسوبة باستخدام العلاقات المعدلة والمقترحة فيما يخص الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين، يمكن كتابة النتائج والتوصيات التالية:

1- نسبة القيم التجريبية للسهم إلى القيم الحسابية($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$) تساوي القيم التالية(0.83-0.96-0.95-1.05-0.79-0.82-0.76-0.72-0.91-0.93) وذلك في جوائز المجموعات (I-II -III- IV- V- VI-VII- VIII- IX-X) بالتتالي.

2- إن متوسط نسب القيم التجريبية للسهم إلى القيم الحسابية($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي0.89، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي1.01، وهو يساوي 0.82 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

3- نسبة القيم التجريبية لعرض الشق إلى القيم الحسابية($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$) تساوي القيم التالية:(1.08-0.77-0.94-0.73-0.77- 0.80-0.99-0.94-1.18-0.90) وذلك في جوائز المجموعات (I-II -III- IV-V- VI-VII- VIII- IX-X) بالتتالي.

4- إن متوسط نسب القيم التجريبية لعرض الشق إلى القيم الحسابية($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي1.01، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي 0.75. وهو يساوي 0.90 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

5- إن حساب عرض الشق على أساس قيم التشوه التجريبية الحاصلة في قضبان التسليح والبيتون المضغوط ووفق الكودين(ACI [7] وCEB [15]) يعطي قيماً متقاربة مع القيم التجريبية لعرض الشق.

6- نسبة القيم التجريبية للعزم المقاوم إلى القيم الحسابية($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$) تساوي القيم التالية:(0.93-1.05-0.93-1.17-1.15-1.18-1.07-1.15-1.11-1.22) وذلك في جوائز المجموعات (I-II -III- IV-V- VI-VII- VIII- IX-X) بالتتالي.

7- إن متوسط نسب القيم التجريبية للعزم المقاوم إلى القيم الحسابية ($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي 0.93، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي 1.11. وهو يساوي 1.15 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

8- يؤدي استخدام العلاقات المعدلة والمقترحة لحساب السهم وعرض الشق وقدرات التحمل في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين، إلى إعطاء نتائج مرضية بالمقارنة مع النتائج التجريبية، وننصح بدراستها بمزيد من التعمق لتناسب حالات تحميل أخرى.

الفصل الرابع
الدراسة التحليلية
نمذجة وتحليل الجوائز البيتونية المختبرة باستخدام برنامج ANSYS

الفصل الرابع
الدراسة التحليلية
نمذجة وتحليل الجوائز البيتونية المختبرة باستخدام برنامج ANSYS

4-1- مقدمة.

4-2- برنامج التحليل ANSYS.

4-3- طرق نمذجة وتحليل العناصر البيتونية المسلحة:

4-4- نمذجة مكونات الجوائز المختبرة باستخدام برنامج ANSYS.

4-4-1- نمذجة البيتون المسلح باستخدام العنصر الحجمي Solid65.

4-4-2- نمذجة قضبان التسليح الفولاذية والكربونية باستخدام العنصر الخطي link8.

4-4-3- نمذجة صفائح التحميل والاستناد باستخدام العنصر الحجمي Solid45:

4-5- المراحل الأساسية في عملية النمذجة والتحليل باستخدام ANSYS.

4-5-1- رسم الشكل الهندسي للموديل(Geometry).

4-5-2- تقسيم الموديل إلى عناصر شبكية (Meshing).

4-5-3- إدخال خصائص المواد وفق برنامج ANSYS.

4-5-3-1- إدخال خصائص البيتون.

4-5-3-2- إدخال خصائص قضبان التسليح الفولاذية والكربونية.

4-5-3-3- إدخال خصائص صفائح التحميل والاستناد.

4-5-4- إعطاء الشروط الطرفية للموديلات المنمذجة (Boundary Conditions).

4-5-5- تطبيق الحمولات على الموديلات المنمذجة (Appling Loads).

4-5-6- التحليل اللاخطي للموديلات المنمذجة (Nonlinear Analyses).

4-6- أشكال التشققات في الموديلات المحللة باستخدام ANSYS.

4-7- مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج التحليل ببرنامج ANSYS.

4-7-1- مقارنة قدرة التحمل على الانعطاف.

4-7-2- مقارنة قيم السهوم التجريبية والتحليلية وسط مجاز الجوائز.

4-7-3- مقارنة أشكال التشققات.

4-8- نتائج وتوصيات القسم التحليلي.

الفصل الرابع
الدراسة التحليلية
نمذجة وتحليل الجوائز البيتونية المختبرة باستخدام برنامج ANSYS

4-1- مقدمة:

تستخدم طريقة العناصر المنتهية (FEM) في نمذجة وتحليل المنشآت البيتونية المسلحة, وتطورت هذه الطريقة منذ الستينات لتصل إلى مستوى متقدم في محاكاة سلوك المنشآت، وهي لا تتطلب تكاليف مادية كالطريقة التجريبية, لكن للوثوق بنتائجها لا بد من وجود نتائج تجريبية وتحليلية للتحقق منها. وساهم في تطور هذه الطريقة ظهور العديد من البرامج البحثية الهندسية العالمية التي تعتمد هذه الطريقة. وتم اعتماد برنامج ANSYS في نمذجة الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو بالكربون أو بشكلٍ هجين (فولاذ وكربون)، والتي تم تحضيرها ودراستها سابقا بشكلٍ تجريبي وحسابي، وذلك باستخدام النسخة (ANSYS10) أو ما يسمى (ANSYS SAS 2005 [9]).

4-2- برنامج التحليل ANSYS:

يعتبر برنامج ANSYS من أضخم البرامج البحثية المتوفرة حالياً والذي يعتمد على طريقة (FEM)، ويتوفر منه عدة نسخ حيث تختص كل نسخة في مجال محدد ونذكر منها ما يلي:

(ANSYS Ls-Dyna , ANSYS Mechanical , ANSYS Multiphysics, ANSYS Professional)

ويبين الشكل(4-1) بيئة هذا البرنامج.

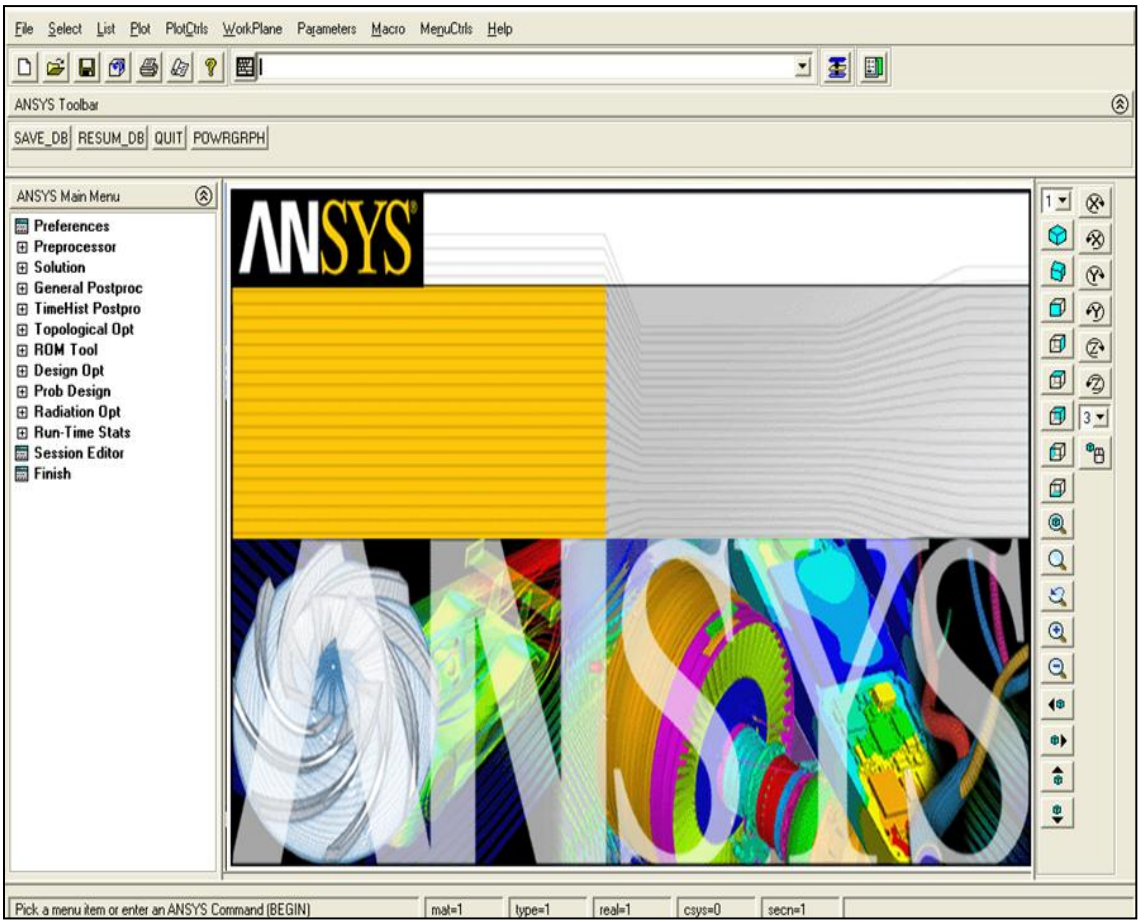
يسمح برنامج ANSYS لمستخدميه القيام بالعديد من المهمات نذكر منها[9]:

a) بناء نماذج معقدة من المنشآت أو نقلها من برامج أخرى إلى بيئته.
b) تطبيق كافة أشكال وحالات التحميل.
c) دراسة الشكل والتصميم الأمثل للعديد من العناصر والمنشآت.
d) دراسة الاستجابات الفيزيائية (مستوى الإجهاد, توزع الحرارة, توزع الحقول الكهرومغناطيسية،..الخ) للعديد من المنشآت والعناصر.

ويتوفر ضمن البرنامج ستة أنواع للتحليل الإنشائي، حيث يتم حساب انتقالات عقد العناصر ثم اشتقاق التشوهات والإجهادات وردود الأفعال منها, والنوع المعتمد في دراستنا هو التحليل الستاتيكي وهذه الأنواع هي [9]:

1. التحليل الستاتيكي (Static Analysis).
2. التحليل التوافقي (Harmonic Analysis).
3. التحليل المساعد (Modal Analysis).

4. التحليل الديناميكي الطارئ (Transient Dynamic Analysis).
5. التحليل الطيفي (Spectrum Analysis).
6. تحليل الاستقرار (Buckling Analysis).



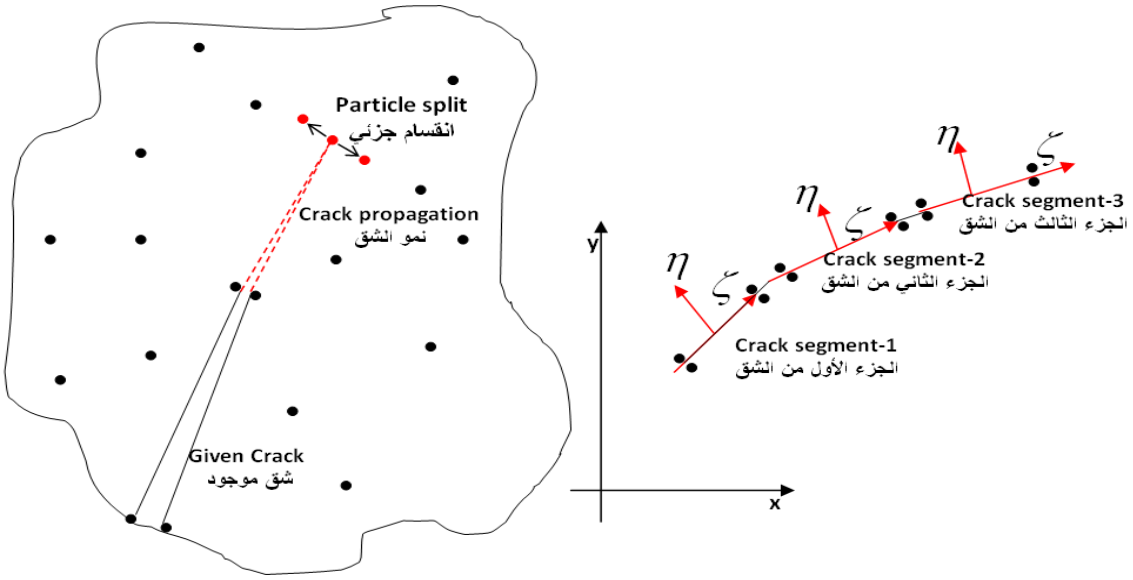
الشكل(4–1) بيئة برنامج التحليل الإنشائي ANSYS المعتمد في الدراسة التحليلية.

4–3– طرق نمذجة وتحليل العناصر البيتونية المسلحة:

تعتبر نمذجة سلوك البيتون المسلح مهمة صعبة نسبياً, بسبب عدم تجانسه وسلوكه اللاخطي بعد تشققه, بالإضافة إلى مهمة نمذجة قضبان التسليح بأنواعها (فولاذ – FRP) ضمن العنصر البيتوني والعلاقة بينها وطريقة الربط والاختلاف بالخصائص الميكانيكية[19], وتعد طريقة العناصر المنتهية طريقة هامة لمحاكاة هذا السلوك, حيث يمكن تمييز أسلوبين لنمذجة البيتون بهذه الطريقة [9].

أ - طريقة الشق المنفصل (Discrete Crack Approach).

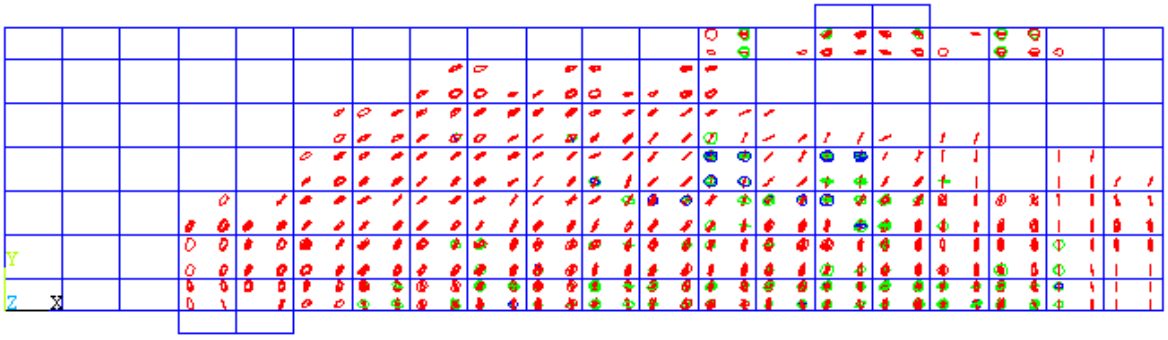
يتم استخدام عناصر ربط أو عناصر خطية لنمذجة الشقوق ذات المواقع المعروفة, ويتغير الشكل الهندسي (**topology**) للنموذج بازدياد الحمولة (ظهور تشققات) مما يحد من سهولة وسرعة تحليل العناصر, بالإضافة إلى الصعوبة الكامنة في بداية التحليل حيث يكون موقع الشق غير معروف, ويبين الشكل (4–2) هذه الطريقة.



الشكل(4–2) نمذجة البيتون بطريقة الشق المنفصل[25].

ب . طريقة الشق اللزج (Smeared Crack Approach).

يتم نمذجة التشقق كتغير في خصائص العنصر, حيث يعتبر العنصر مستمراً في بداية التحليل أي المادة متجانسة (**Isotropic**)، أي مادة متماثلة الخواص في الاتجاهات الثلاثة، ويتحول إلى مادة غير متماثلة الخواص في الاتجاهات الثلاثة، أو بكلامٍ أخر مادة غير متجانسة (**Anisotropic**) وذلك تدريجياً مع ازدياد الحمولة[19], ثم تظهر التشققات أي(يبدأ البيتون بالتحطم), حيث يتشقق العنصر عند تجاوز إجهاد الشد الرئيسي مقاومة الشد الفعلية للعنصر, وبالتالي تعطى قيمة الصفر لعامل مرونة المادة في الاتجاه الموازي لإجهاد الشد الرئيسي, ويبين الشكل (4–3) عنصراً بيتونياً تمت نمذجته بهذه الطريقة.



الشكل(4–3) نمذجة عنصر بيتوني بطريقة الشق اللزج.

4–4– نمذجة مكونات الجوائز المختبرة باستخدام برنامج ANSYS:

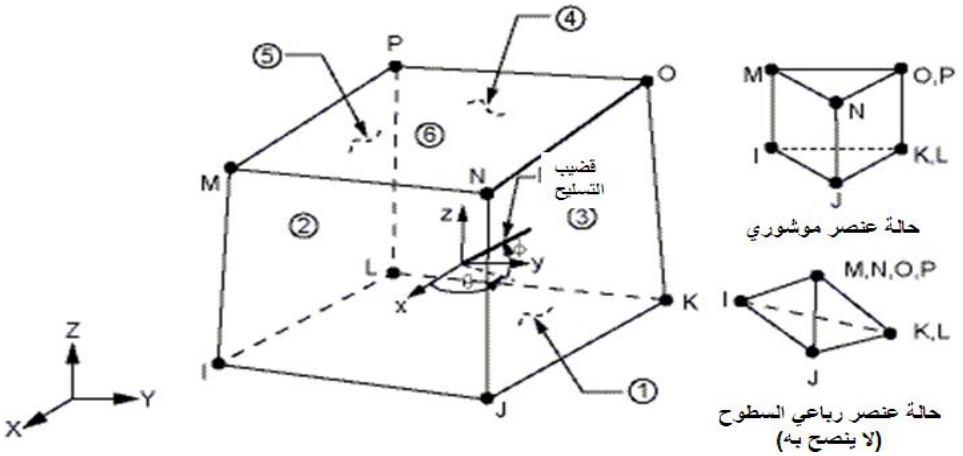
تمت نمذجة الجوائز البيتونية المسلحة تسليحاً هجيناً (فولاذ – كربون) باستخدام برنامج (ANSYS SAS 2005) بنسخته (ANSYS10), واعتمدت النمذجة المتقدمة (Advanced Modeling) لمحاكاة ظروف تجريب الجوائز في المخبر. حيث تمت نمذجة البيتون وقضبان التسليح الفولاذية والقضبان الكربونية وصفائح الاستناد والتحميل، وذلك باستخدام العناصر التي يوفرها البرنامج.

4-4-1- نمذجة البيتون المسلح باستخدام العنصر الحجمي Solid65:

تمت نمذجة البيتون في برنامج ANSYS باستخدام العنصر اللاخطي الحجمي (Solid65) الذي يعتمد على الفرضيات التالية [9]:

- يستخدم عنصر Solid65 مع أو بدون تسليح وذلك تبعاً للإدخالات.
- في بداية التحليل تعتبر مادة العنصر متماثلة الخواص (Isotropic)، مع قابليتها للتشقق والانهيار وتحولها إلى مادة غير متماثلة الخواص (Anisotropic).
- العنصر Solid65 يتألف من ثمان عقد تمتلك كل عقدة ثلاث درجات حرية هي الانتقالات باتجاه المحاور الثلاثة.
- يمتلك كل عنصر ثمان نقاط تكاملية تستخدم في إجراء تكامل غوص.
- توجد أربع مواد مختلفة ضمن العنصر, المادة الأولى هي مادة البيتون والثلاث الباقية هي خصائص قضبان التسليح بالاتجاهات الثلاثة في حال استعملت (rebar).
- يمكن من خلال هذا العنصر نمذجة السلوك الخطي واللاخطي للبيتون.

يبين الشكل (4-4) العنصر الحجمي اللاخطي Solid65 الذي يتألف من ثمان عقد تملك كلٌ منها ثلاث درجات حرية، وهي الانتقالات باتجاه المحاور الثلاثة، ويتمتع بقابلية التشقق والتحطم.



الشكل(4-4) العنصر الحجمي (Solid65) المستخدم في نمذجة البيتون[25,9].

وتعطى مصفوفة الصلابة (الإجهاد – تشوه) لهذا العنصر بالعلاقة التالية:

$$[D]=\left(1-\sum_{i=1}^{N_r}V_i^R\right)[D^c]+\sum_{i=1}^{N_r}V_i^R[D^r]_i \qquad (1-4)$$

حيث:

N_r – اتجاهات تواجد التسليح وقيمته العظمى 3.

V_i^R – نسبة التسليح الحجمية ضمن العنصر أي (حجم التسليح/حجم العنصر).

$[D^C]$ – مصفوفة (إجهاد – تشوه) لعنصر البيتون فقط.

$[D^r]$ – مصفوفة (إجهاد –تشوه) لفولاذ التسلح فقط.

ويمر البيتون أثناء التحليل بمرحلتين (التحليل الخطي والتحليل اللاخطي)

❖ **في حالة السلوك الخطي للبيتون:**

يسلك البيتون سلوكاً خطياً حتى (20...30)% من المقاومة المميزة على الضغط,وهذه القيمة تعتمد على مقاومة البيتون، إذ تزيد في البيتون عالي المقاومة. وتعطى المصفوفة $[D^C]$ بالعلاقة التالية:

$$[D^C]=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}(1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2}\end{bmatrix} \qquad (2\text{-}4\ )\ [9]$$

حيث:

E – عامل مرونة البيتون.

υ :عامل بواسون للبيتون.

❖ **في حالة السلوك اللاخطي للبيتون:**

يعتبر سلوك البيتون سلوكاً لا خطياً بعد 30% من مقاومته المميزة على الضغط، نظراً لتعرضه للتشقق, أو الزحف والتلدن أو الانهيار، وبالتالي تعدل مصفوفة (إجهاد–تشوه) حسب الحالات التالية:

– يعبر عن وجود شق في نقطة تكاملية بتغير علاقات (إجهاد–تشوه) وذلك بتخفيض مقاومة القص في مستوى الشق وبفرض عامل تخفيض القص β_t (الثابت C_1 في إدخالات البرنامج) , وتتحول المصفوفة $[D^C]$ إلى $[D_C^{ck}]$ التي تعطى بالعلاقة التالية:

$$[D_C^{ck}]=\frac{E}{(1+\nu)}\begin{bmatrix}\frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2}\end{bmatrix} \qquad (3\text{-}4\ )$$

ويدل الرمز (CK) إلى أن علاقة (إجهاد–تشوه) هي بالنسبة لنظام إحداثيات موازٍ لاتجاهات الإجهادات الرئيسية والمحور (χ^{ck}) متعامد مع وجه الشد.

ويعبر العامل (R^t) عن الانخفاض التدريجي في إجهادات الشد بعد التشقق.

– إذا كان الشق مغلقاً فإن الإجهادات الضاغطة تنتقل عبر سطوح الشق ويعبر عن هذا بعامل نقل القص β_c(الثابت C2 في البرنامج) الذي يعبر عن تشابك الحصويات وفعل (Dowel Action), وتصبح المصفوفة $[D_C^{ck}]$ كما يلي:

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}4)$$

– وإذا كان التشقق بالاتجاهين تصبح المصفوفة $[D_C^{ck}]$ كما يلي:

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}4)$$

– وإذا كان الشقان مغلقان تصبح المصفوفة $[D_C^{ck}]$ كما يلي:

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \qquad (6\text{-}4)$$

– في حالة التشقق بالاتجاهات الثلاثة تصبح المصفوفة كما يلي:

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \qquad (7\text{-}4)$$

– وفي حال كون الشقوق الثلاثة مغلقة تصبح المصفوفة كما في حالة الشقين مغلقين, وتتعلق حالة الشق (مغلق أو مفتوح) بقيمة تشوهه (ε_{ck}^{ck}) الذي يعطى بالعلاقة :

$$\varepsilon_{ck}^{ck} = \begin{cases} \varepsilon_x^{ck} + \frac{\nu}{1-\nu}\varepsilon_y^{ck} + \varepsilon_z^{ck} & \text{حالة عدم حدوث تشقق} \\ \varepsilon_x^{ck} + \nu\varepsilon_z^{ck} & \text{حالة حدوث التشقق في اتجاه y} \\ \varepsilon_x^{ck} & \text{حالة حدوث التشقق في الاتجاهين y و z} \end{cases} \qquad (8\text{-}4)$$

حيث:

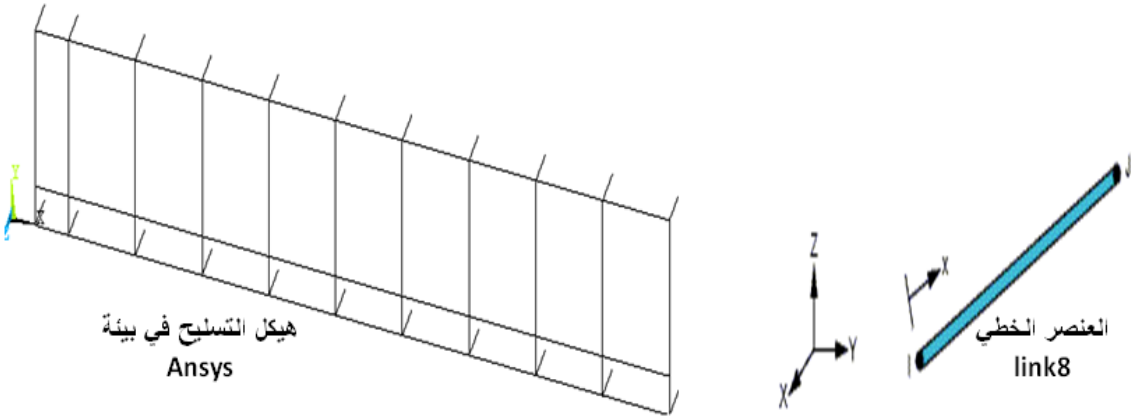
$\varepsilon_x^{ck}, \varepsilon_y^{ck}, \varepsilon_z^{ck}$ – التشوهات باتجاه الشق.

إذا كان ε_{ck}^{ck} أقل من الصفر يعتبر الشق مغلقاً, أما إذا كان ε_{ck}^{ck} أكبر أو يساوي الصفر فيعتبر الشق مفتوحاً [9].

4-4-2- نمذجة قضبان التسليح الفولاذية والكربونية باستخدام العنصر الخطي link8:

تمت نمذجة قضبان التسليح الفولاذية والكربونية وكذلك الأساور الفولاذية كعناصر خطية (Link8) كما توصي الكثير من المراجع [25,13,9]، ويشترك العنصر (Link8) مع البيتون بنفس العقد، وبالتالي فإن ارتباطه معه تام. وتجدر الإشارة إلى أن هذا العنصر لا يلحظ النتوءات في القضبان الفولاذية، أو سطح القضبان الكربونية المكسوة بالرمل، وبالتالي يغفل موضوع الاحتكاك بين القضبان والبيتون المحيط بها في عملية النمذجة، وهذا ما يؤثر سلباً على نتائج التحليل ببرنامج ANSYS.

يعتبر العنصر (Link8) عنصر شبكي فراغي يستخدم للعناصر الشبكية والكبلات والروابط, ويتألف من عقدتين (i,j) وتمتلك كل عقدة ثلاث درجات حرية وهي الانتقالات في اتجاهات المحاور الثلاثة (U_X, U_y, U_Z), ويبين الشكل (4-5) هذا العنصر, وهو يعتبر عنصر شد وضغط محوري.



الشكل(4-5) العنصر الخطي (Link8) المستخدم في نمذجة قضبان التسليح المختلفة[9].

وتعطى مصفوفة الصلابة $[K_e]$ لهذا العنصر بالنسبة لمحاوره الخاصة بالعلاقة التالية:

$$[K_e]=\frac{AE_s}{L}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (9-4)$$

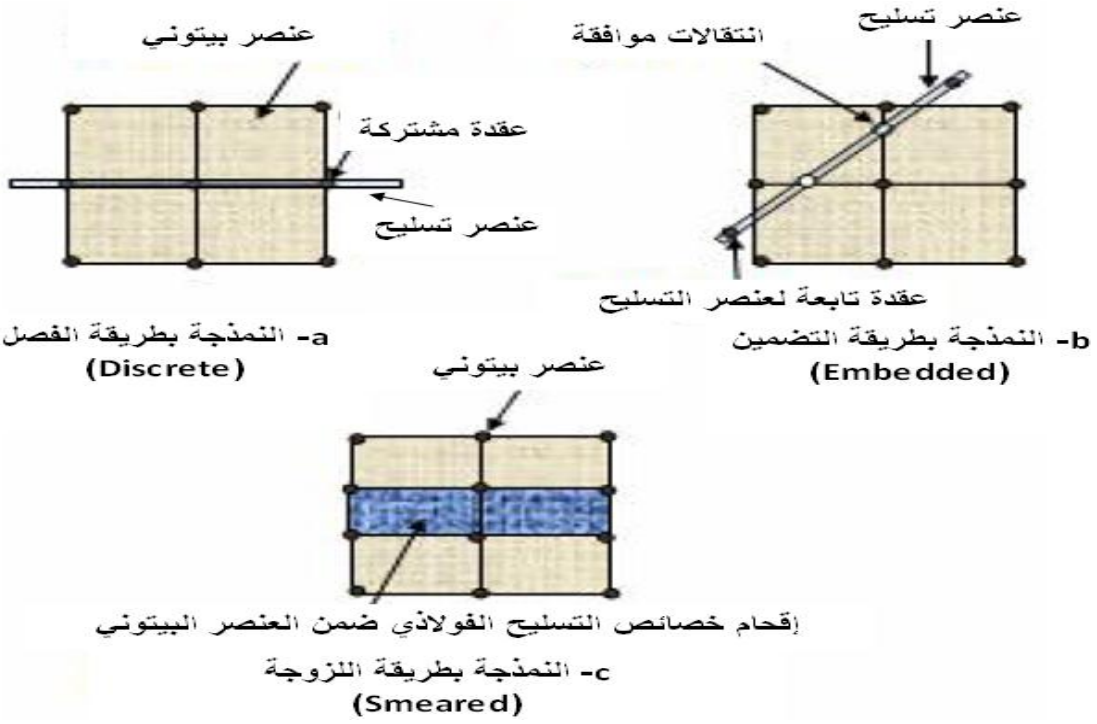
حيث:

A- مساحة المقطع العرضي للعنصر.

E_S- عامل مرونة فولاذ التسليح.

L- طول العنصر.

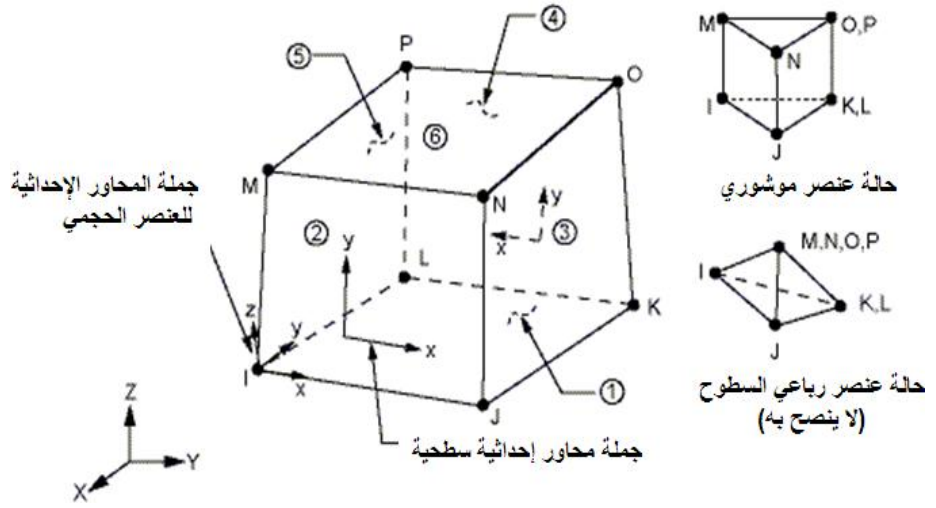
وتجدر الإشارة إلى أنه توجد ثلاث طرق لنمذجة قضبان التسليح ضمن البيتون[38,10] وهي: النمذجة بطريقة الفصل (Discrete) وهي الطريقة المعتمدة في دراستنا التحليلية، والنمذجة بطريقة التضمين (Embedded)، والنمذجة بطريقة اللزوجة (Smeared)، ويبين الشكل (4–6) الفرق بين هذه الطرق.



الشكل(4–6) طرق نمذجة قضبان التسليح ضمن البيتون[38,10].

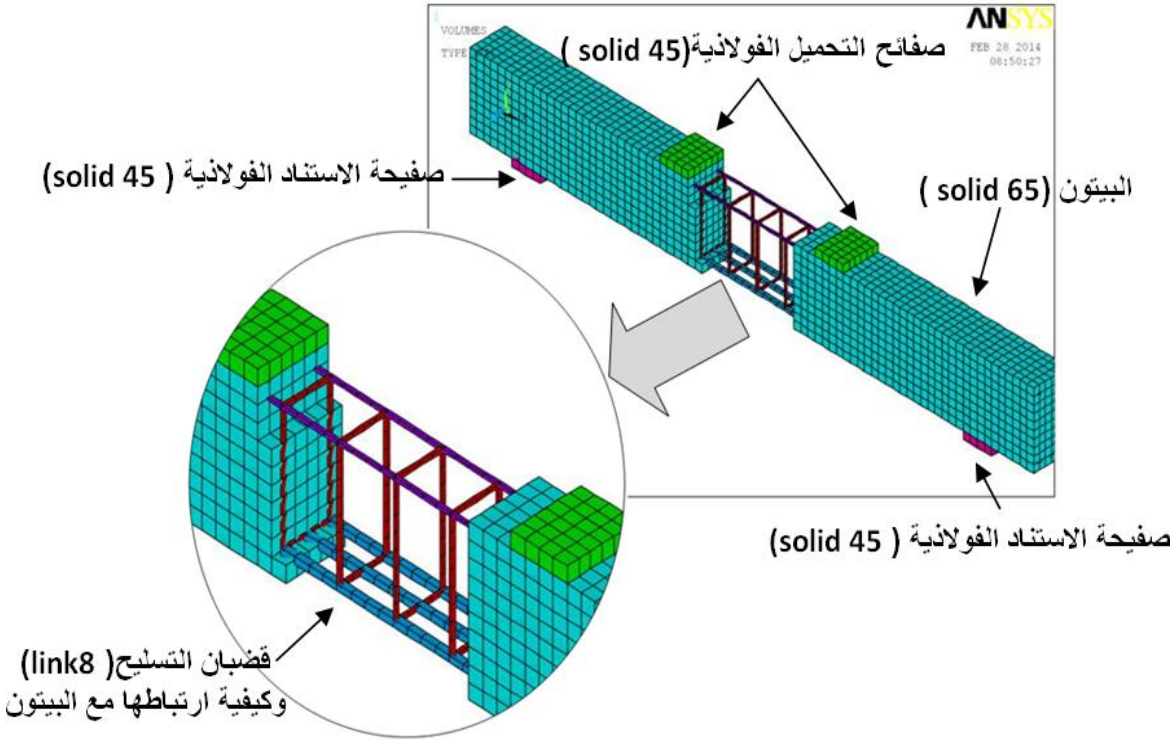
4–4–3– نمذجة صفائح التحميل والاستناد باستخدام العنصر الحجمي Solid45:

تمت نمذجة صفائح التحميل والاستناد كعناصر حجمية كما هو مبين في الشكل (4–7), حيث يتألف العنصر الحجمي(Solid45) [25,13,10,9] من ثمان عقد وتمتلك كل عقدة ثلاث درجات حرية وهي الانتقالات في اتجاهات المحاور الثلاثة (U_X, U_y, U_Z), ويتمتع هذا العنصر بخاصية التلدن, والزحف, والتشوهات الكبيرة, والانتقالات الكبيرة ويظهر هذا العنصر على الشكل(1–2).



الشكل(4–7) العنصر الحجمي (Solid45) المستخدم في نمذجة صفائح الاستناد والتحميل الفولاذية[25,13,10,9].

ويبين الشكل(4–8) كيفية نمذجة البيتون وقضبان التسليح والارتباط بينهما في بيئة برنامج ANSYS وكذلك صفائح الاستناد والتحميل.



الشكل(4–8) كيفية نمذجة البيتون وقضبان التسليح وصفائح الاستناد والتحميل.

4–5– المراحل الأساسية في عملية النمذجة والتحليل باستخدام ANSYS .

يمكن تقسيم عملية النمذجة والتحليل باستخدام ANSYS إلى ثلاث مراحل أساسية وهي مرحلة ما قبل التحليل, مرحلة التحليل، ومرحلة ما بعد التحليل[9].

- **مرحلة ما قبل التحليل (Pre-processor phase).**

تتضمن هذه المرحلة تحديد نوع التحليل(Analyses Type), والشكل الهندسي للمنشاة (Geometry), ونوع العناصر المنتهية المعتمدة للنمذجة (2D , 3D), وخواص المواد المستخدمة ومن ثم تجزئة المنشأة إلى عناصر منتهية وإنشاء الشبكة (Meshing).

- **مرحلة التحليل(Solution phase).**

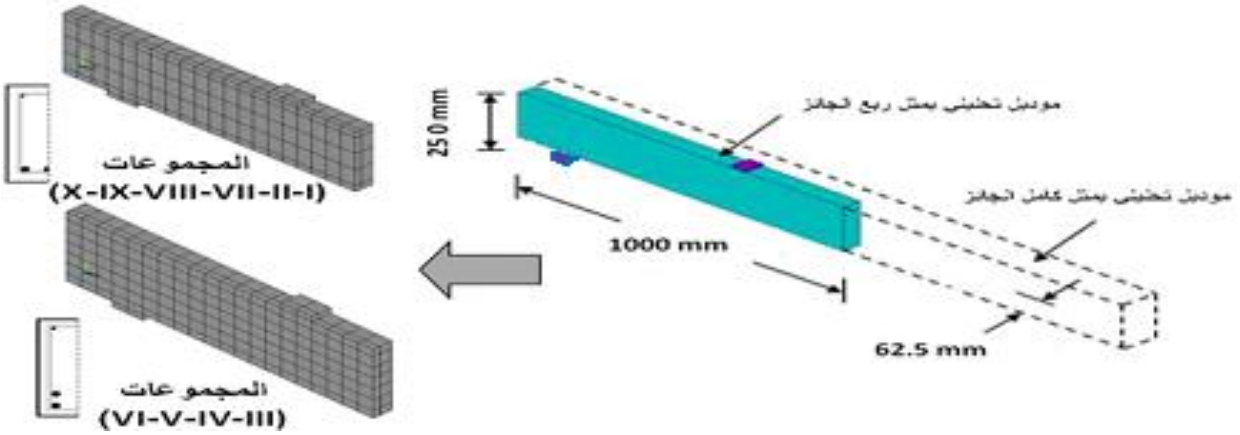
تتضمن تحديد الحمولات المؤثرة على عناصر المنشأة ونوعها وموقع تطبيقها، كما يتضمن تحديد الشروط الطرفية للمنشأة مع الأخذ بعين الاعتبار تناظر المنشاة, وقبل البدء بعملية التحليل يجب تحديد الثوابت اللازمة للتحليل حسب نوعه (خطي أو لا خطي).

- **مرحلة ما بعد التحليل (Post-processor phase).**

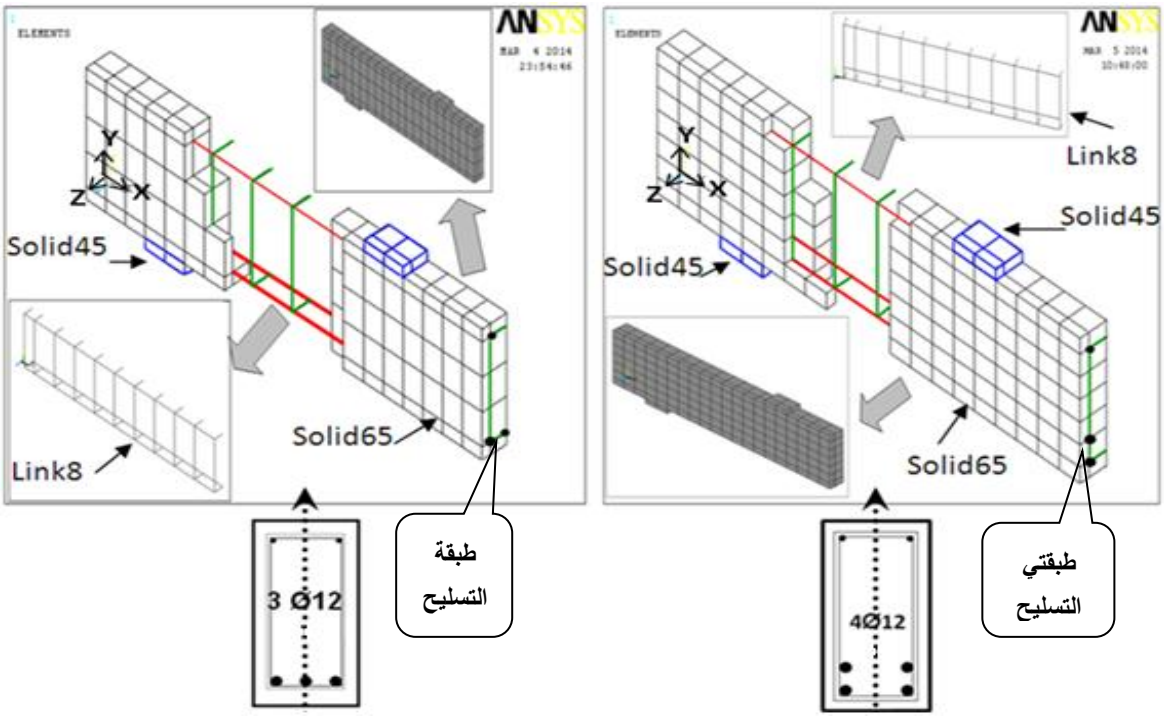
تسمى مرحلة إظهار النتائج وفيه يمكن طباعة شكل تشوه المنشأة, ردود الأفعال, انتقالات العقد, كنتورات الإجهادات والتشوهات وغيرها. ونشرح هذه المراحل من خلال النقاط التالية:

4-5-1- رسم الشكل الهندسي للموديل(Geometry):

تمت نمذجة العينات المختبرة في هذا البحث والتي هي عبارة عن جوائز بيتونية مسلحة ومتماثلة في الشكل الهندسي ومختلفة من ناحية التسليح (نوع القضبان, عددها, وأقطارها، وتوضعها) كما هو مبين في الشكل (4-9) مع مراعاة الارتباط التام بين قضبان التسليح والبيتون من خلال اشتراكهما بنفس العقد[30]. واعتمد المحور(X) كمحور طولي للموديل، والمحور(Y) يمثل المحور الشاقولي، أما المحور(Z) فهو المحور العرضي للموديل. وتوفيراً لوقت التحليل فقد تمت نمذجة ربع الجائز مع مراعاة الشروط الطرفية للموديل بحيث يسلك سلوكاً مماثلاً لسلوك الجائز الكامل [40]. ويبين الشكلان (4-9) و(4-10) شكل الموديلات التحليلية المعتمدة وبأبعاد هندسية تساوي mm(1000*250*62.5).



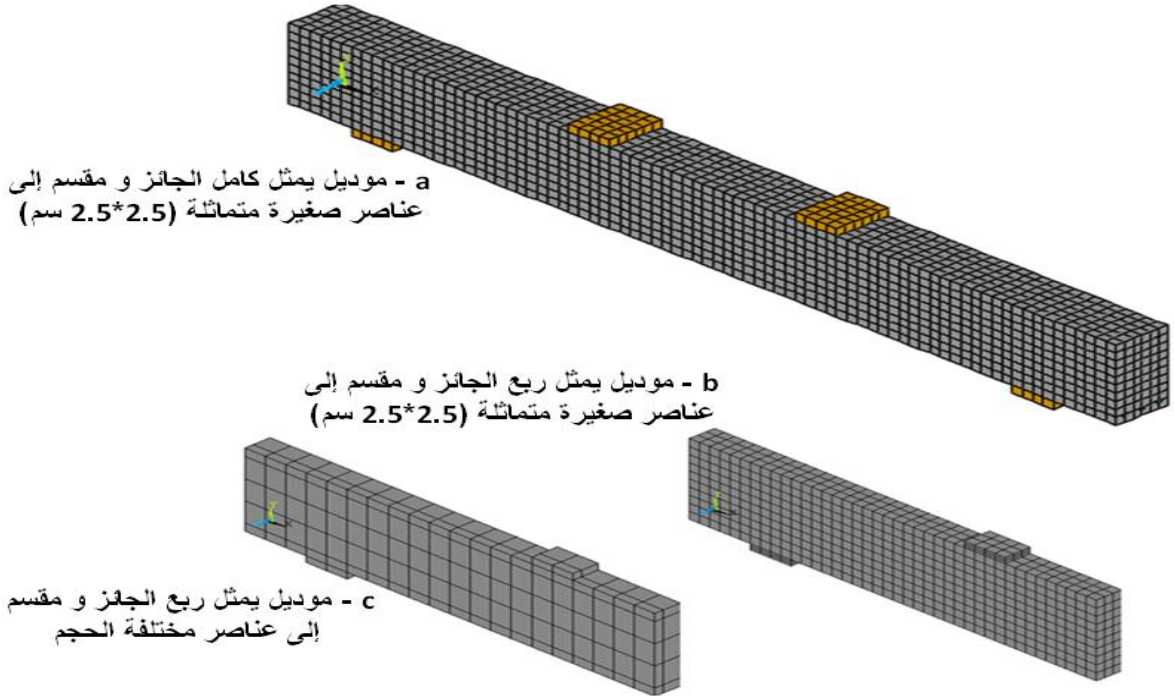
الشكل(4-9) موديل تحليلي يمثل ربع الجائز المختبر وفق المجموعات(X- IX-VIII-VII-VI-V-IV-III-II-I).



الشكل(4-10) الشكل الهندسي للموديلات التحليلية المعتمدة لحالتي التسليح بطبقة واحدة أو بطبقتين من القضبان.

4-5-2- تقسيم الموديل إلى عناصر شبكية (Meshing):

تم تقسيم النموذج في طريقة العناصر المنتهية إلى عدد من العناصر الصغيرة (Finite Elements)، وتعتبر عملية تقسيم النموذج خطوة هامة للحصول على نتائج دقيقة, وكلما زاد صغر العناصر المنتهية كلما زادت دقة التحليل[33]، ولمعرفة تأثير هذا الأمر على نتائج التحليل تمت نمذجة وتحليل جائز المجموعة (I) وفق ثلاثة موديلات مختلفة من ناحية الأبعاد وعدد وأبعاد العناصر المنتهية وكما مبين في الشكل (4-11). وتبين بعد التحليل أن الفرق في النتائج بين الموديلات من ناحية قدرة التحمل والسهم وسط المجاز بحدود (1%). ونظراً لصغر الفرق في النتائج ولطول الوقت الذي يستغرقه البرنامج في تحليل الموديلات ذات العناصر الصغيرة، تم اعتماد الموديل ذو العناصر المنتهية الأكبر الشكل (4-11- c) في كامل الدراسة التحليلية، وتجدر الإشارة إلى أن الزمن اللازم لتحليل الموديل المعتمد يساوي 8 ساعة.



الشكل(4-11) نمذجة جائز المجموعة(I) بثلاثة موديلات مختلفة بحسب حجم العناصر الشبكية.

ويبين الجدول(4-1) عدد العناصر المنتهية المستخدمة في كل موديل لحالتي التسليح بطبقة واحدة أو بطبقتين من القضبان.

الجدول(4-1) عدد العناصر المنتهية في الموديلات المحللة.

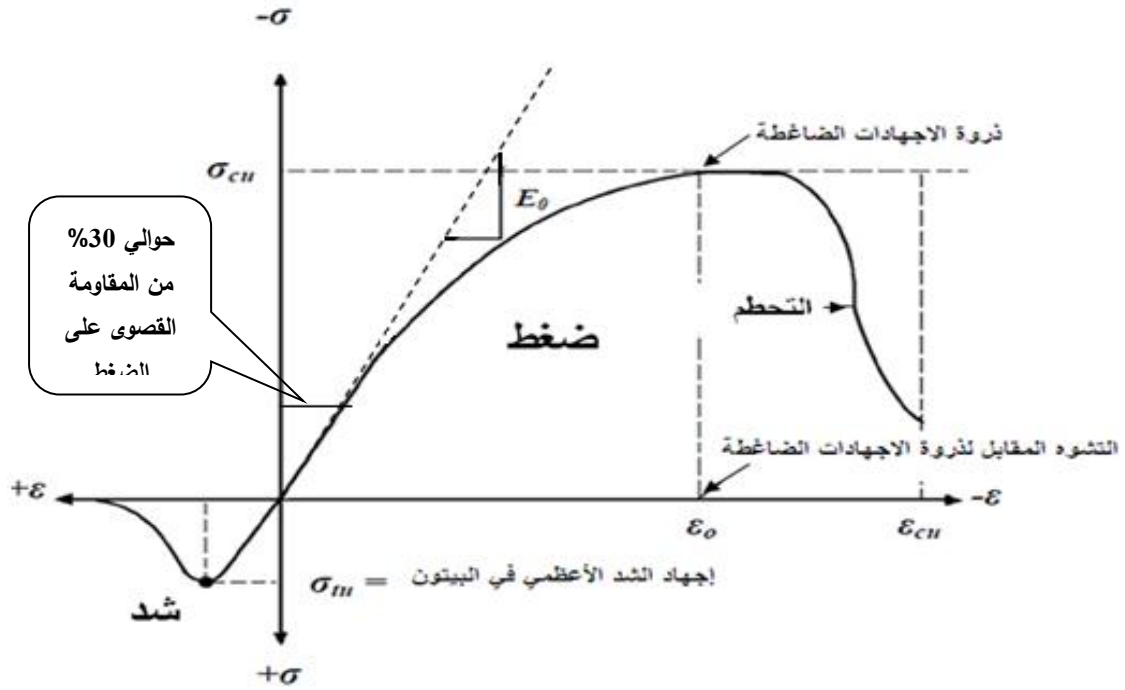
موديل المجموعات	صفيحة التحميل	صفيحة الاستناد	قضبان التسليح والأساور	البيتون	الإجمالي
X-IX-VIII-VII-II-I	4	4	112	200	320
VI-V-IV-III	4	4	434	280	722

4-5-3- إدخال خصائص المواد وفق برنامج ANSYS:

تم تحديد خصائص المواد المستخدمة واللازمة لنمذجة العناصر(بيتون, قضبان التسليح الفولاذية, قضبان الـCFRP، صفائح التحميل والاستناد) ضمن البرنامج استناداً إلى النتائج التجريبية ومواصفات الشركات المصنعة وبعض العلاقات الحسابية.

4-5-3-1- إدخال خصائص البيتون:

تعتبر نمذجة سلوك البيتون مهمة شاقة لاختلاف سلوكه في حالتي الشد والضغط, ويبين الشكل (4-12) منحني (إجهاد- تشوه) النموذجي للبيتون العادي, حيث يسلك البيتون سلوكاً مرناً خطياً حتى 30% من مقاومته القصوى على الضغط (σ_{cu})[25], ويزداد الإجهاد بعدها تدريجياً ليصل إلى مقاومة البيتون القصوى على الضغط, ثم يبدأ الجزء الهابط من المنحني, أما في حالة الشد فسلوك البيتون مرن خطي حتى يصل إلى مقاومة الشد العظمى (σ_{tu}), وبعد هذه النقطة يتشقق البيتون وتتناقص مقاومته تدريجياً حتى تنعدم [25].



الشكل(4-12)المنحني النموذجي (إجهاد - تشوه) للبيتون عند العمل على الضغط أو الشد[25] .

ويحتاج برنامج ANSYS لنمذجة سلوك عنصر بيتوني للخصائص البيتونية التالية[30]:

E_c- عامل مرونة البيتون يحدد بالعلاقة (3-1) وفق الكود ACI [6].

f'_c - المقاومة المميزة للبيتون على الضغط وهي محددة تجريبياً بالجدول(2-2) .

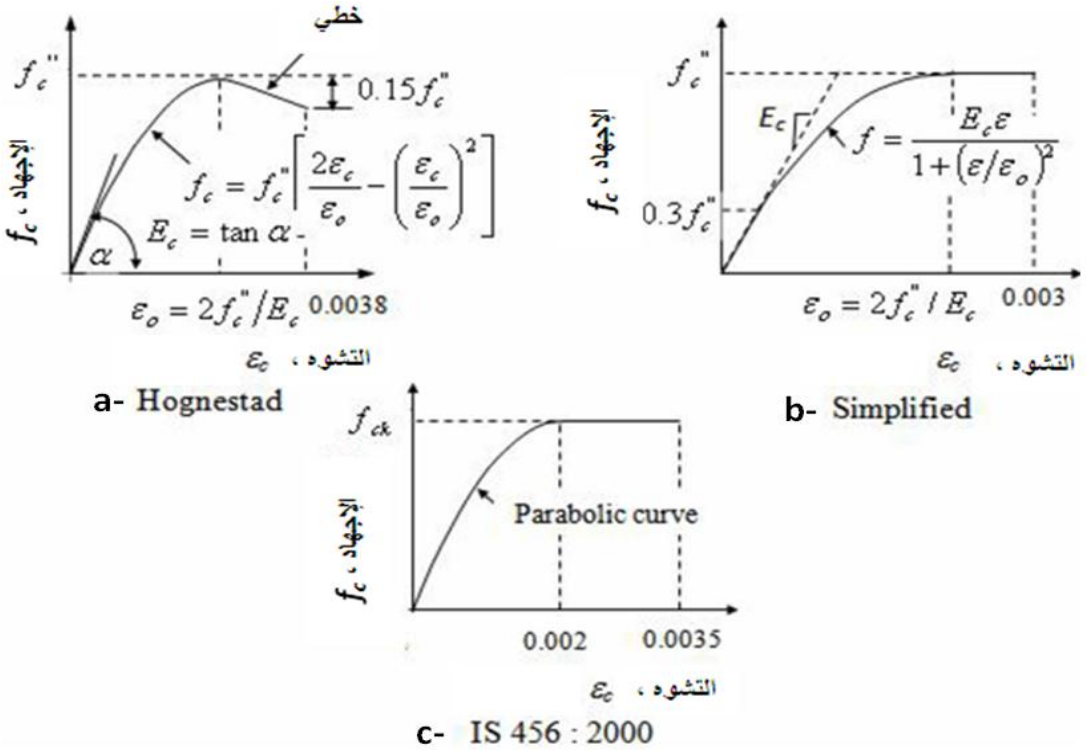
f_t - مقاومة البيتون على الشد يحدد بالعلاقة (3-4) وفق الكود ACI [6].

υ- عامل بواسون للبيتون ويساوي(0.2).

β_t- عامل نقل القص عبر الشقوق المفتوحة وتتراوح قيمته من 0 إلى 1 [9].

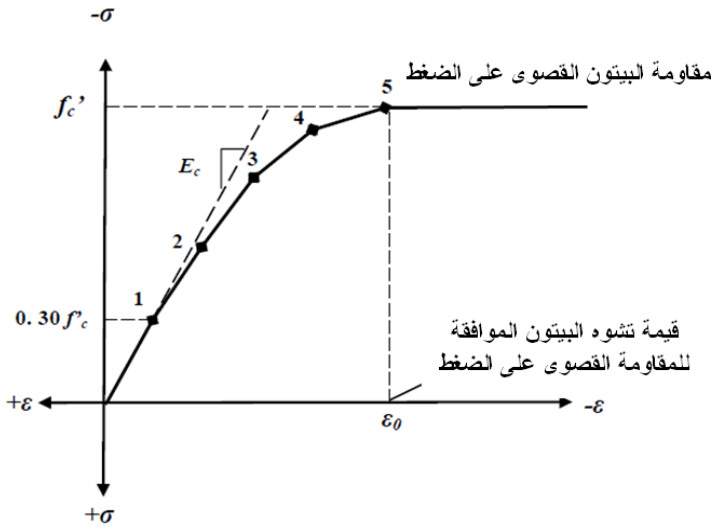
β_c– عامل نقل القص عبر الشقوق المغلقة وتتراوح قيمته من 0 إلى 1[9] .

إضافة إلى علاقة (إجهاد– تشوه) للبيتون على الضغط ويبين الشكل(4–13) منحني (إجهاد – تشوه) للبيتون المضغوط وفق تقريبات مختلفة[38]. حيث:(a – تقريب (Hognestad)، b– التقريب المبسط (Simplified)، c– تقريب الكود الهندي(IS 456:2000)).



الشكل(4–13) منحني (إجهاد – تشوه) للبيتون المضغوط وفق تقريبات مختلفة [38].

وتجدر الإشارة إلى أنه في دراستنا التحليلية تم اعتماد التقريب المبسط Simplified لمنحني (إجهاد – تشوه) في البيتون المضغوط كما مبين في الشكل(4–14) .

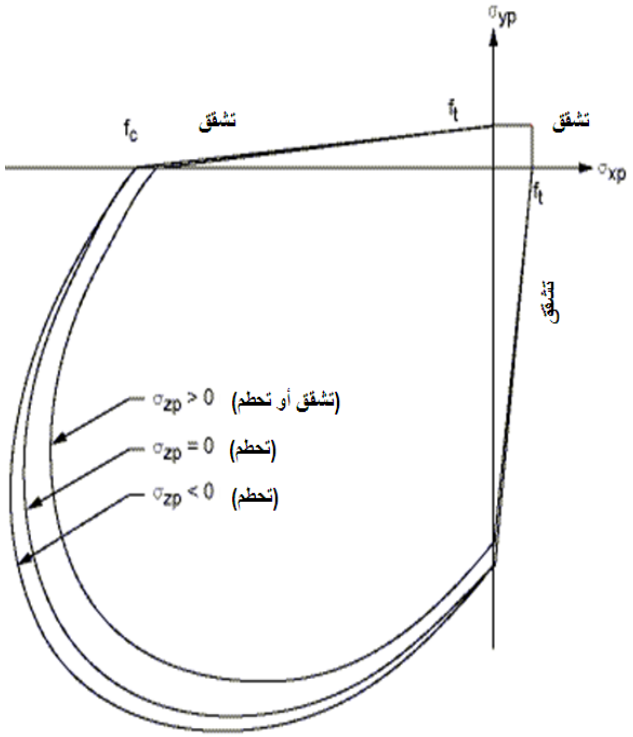


الشكل(4–14) المنحني المبسط Simplified لعلاقة (إجهاد – تشوه) الخاص بالبيتون المضغوط[22].

- معايير انهيار البيتون:

من المعروف أن انهيار البيتون يحدث نتيجة تجاوز الإجهادات الضاغطة المؤثرة لقيمة المقاومة المميزة للبيتون أو تجاوز الإجهادات الشادة لمقاومة البيتون على الشد, لذلك سنحتاج إلى إدخال مقاومة البيتون على الشد والضغط لتحديد سطح انهياره.

يوضح الشكل(4-15) سطوح الانهيار للبيتون حيث تظهر ثلاثة سطوح انهيار كمسقط في المستوي ($\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$)، وشكل الانهيار هو تابع لإشارة الإجهاد الرئيسي باتجاه Z أي σ_{zp}, على سبيل المثال إذا كان σ_{xp}, σ_{yp} سالبان (ضغط), وكان σ_{zp} موجباً (شد) بقيمة قليلة فإن التشقق سيكون باتجاه متعامد مع σ_{zp}, ولكن إذا كان $\sigma_{zp} = 0$ أو سالباً فإن البيتون سيتعرض للتحطم (crushing)[38,9] .

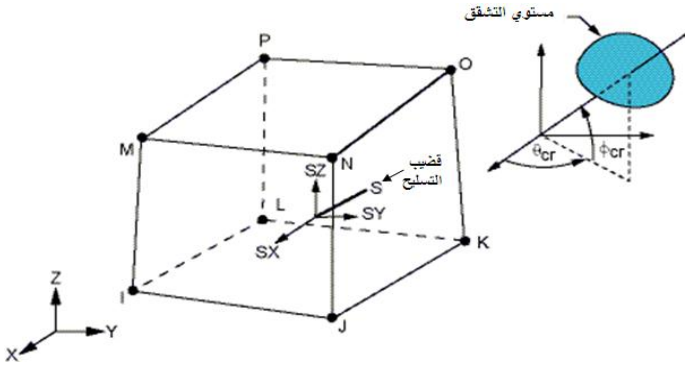


الشكل(4-15) سطوح الانهيار والتشقق في البيتون وفق برنامج Ansys [9].

يتشقق العنصر البيتوني عندما يتوضع إجهاد الشد الرئيسي في أي اتجاه خارج سطح الانهيار, وبعد التشقق فإن عامل مرونة العنصر البيتوني يصبح معدوماً في الاتجاه الموازي لاتجاه الشد الرئيسي, ويبين الشكل(4-16) مستوى التشقق واتجاهه في العنصر البيتوني Solid65.

يحدث التحطم في العنصر البيتوني Solid65 عندما تكون كل الإجهادات الرئيسية ضاغطة (سالبة) وتتوضع خارج سطح الانهيار, وبالتالي يعطى عامل المرونة العنصر البيتوني قيمة الصفر في كافة الاتجاهات, ويلغى تأثير العنصر المنتهي.

لاحظنا خلال الدراسة أنه إذا لم يتم تفعيل إمكانية تحطم البيتون ضمن البرنامج, تظهر مشاكل عدم تقارب الحل اللاخطي, ويبدأ البيتون الواقع مباشرة تحت الحمولات بالتحطم ومن ثم يبدأ البيتون المجاور بالتحطم في الخطوات اللاحقة للحمولة وبالتالي تنخفض القساوة المحلية وتظهر انتقالات كبيرة

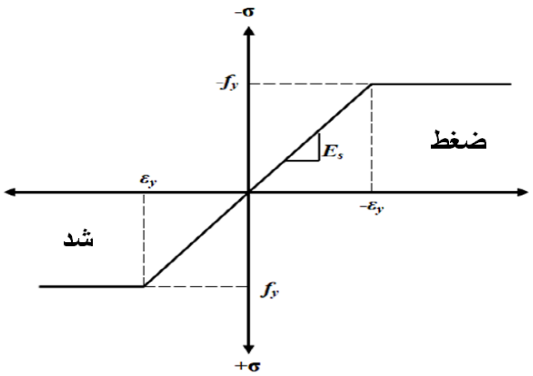


الشكل(4–16) مستوي الشق واتجاهه في العنصر(Solid65) وفق برنامج Ansys [9].

ويتباعد الحل (مشكلة عدم تقارب), وبالتالي تم تعطيل إمكانية تحطم البيتون في نموذج العناصر المنتهية, وهذا يتوافق مع العديد من الدراسات والأبحاث العالمية[33,30,22,20,19].

4–5–3–2– إدخال خصائص قضبان التسليح الفولاذية والكربونية:

تم اعتبار مادة قضبان التسليح الفولاذية كمادة (linear isotropic و bi-linear isotropic)[18] ، عند التعرض لقوى شادة أو ضاغطة ونمذجت باستخدام العنصر Link8, ويظهر الشكل(4–17) علاقة (إجهاد – تشوه) المستخدمة لفولاذ التسليح في هذا البحث, ويوضح الجدول(4–2) خواص فولاذ التسليح الطولي والعرضي. وتم اعتبار مادة قضبان التسليح الكربونية كمادة (linear-elastic)[18] ، ونمذجت باستخدام العنصر Link8، وأدخلت الخصائص التالية للقضبان الكربونية: المقاومة القصوى على الشد(2215 MPa)، معامل المرونة(72.64 GPa)، معامل بواسون(0.2).



الشكل(4–17) مخطط (إجهاد – تشوه) لمختلف أنواع قضبان التسليح الفولاذية وفق[9].

الجدول (4–2) مواصفات قضبان التسليح الفولاذية المستخدمة في نمذجة الجوائز المختبرة.

نوع قضبان التسليح	القطر (mm)	إجهاد الخضوع MPa	معامل المرونة GPa
قضبان فولاذية ملساء عالية المقاومة للتسليح العرضي والتسليح العلوي نوع B500 قضبان فولاذية محلزنة عالية المقاومة للتسليح السفلي A500 قضبان فولاذية محلزنة عالية المقاومة للتسليح السفلي A600	Ø 6 T 10 T 12	497 525 622	200

4-5-3-3- إدخال خصائص صفائح التحميل والاستناد:

تمت نمذجة صفائح التحميل والاستناد وذلك لتامين توزع أفضل للإجهادات على منطقة التحميل, حيث اعتمدنا :

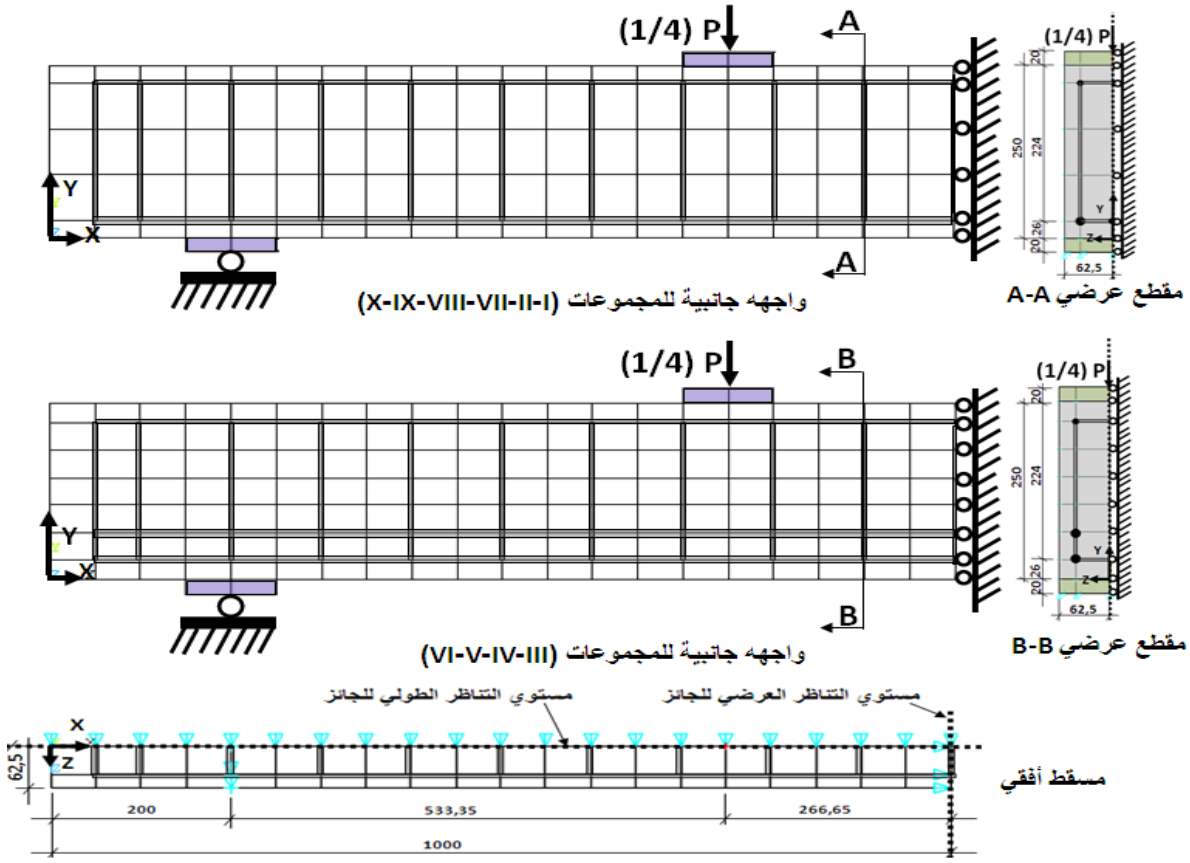
عامل مرونة فولاذ الصفائح: $E_S = 200000\ \text{MPa}$

عامل بواسون الفولاذ: $\upsilon = 0.3$

4-5-4- إعطاء الشروط الطرفية للموديلات المنمذجة (Boundary Conditions):

باعتبار الجوائز متناظرة حول المحور الشاقولي طولياً وعرضياً, قمنا بنمذجة ربع الجائز فقط مع تطبيق الشروط الطرفية المناسبة [33] ، وذلك لمحاكاة السلوك الحقيقي للجائز وهي:

- – الانتقالات باتجاه (x وz) معدومة في جميع عقد مستويي التناظر الطولي والعرضي أي: $(U_X = U_Z = 0)$.
- – تمت نمذجة منطقة الاستناد بحيث تسمح للجائز بالدوران حول المحور Z لذلك أعطيت الانتقالات باتجاه Y للمحور الوسطي فقط للمسند قيمة معدومة أي $\left(U_y = 0\right)$, ويبين الشكل(4-18) نمذجة الشروط الطرفية المطبقة على الموديلات المنمذجة.



الشكل(4-18) مقطع طولي وعرضي ومسقط أفقي للموديلات التحليلية المدروسة والشروط الطرفية المطبقة عليها (الأبعاد بـ mm).

4-5-5- تطبيق الحمولات على الموديلات المنمذجة (Appling Loads):

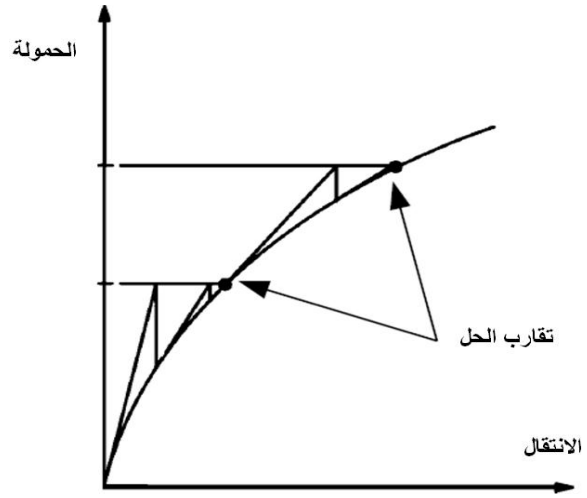
قمنا بنمذجة ربع الجائز بسبب تناظره, وبالتالي تكون القوة المطبقة على صفيحة التحميل تساوي ربع القوة التجريبية $\left(\frac{P}{4}\right)$, حيث P القوة الحقيقية المطبقة تجريبياً، وتم تطبيق هذه القوة على العقدة المناسبة في صفيحة التحميل كما هو مبين في الشكل (4-18)، وبشكلٍ تدريجي من الحمولة N(0) إلى الحمولة التي توقف فيها تقارب الحل (حمولة الانهيار).

4-5-6- التحليل اللاخطي للموديلات المنمذجة (Nonlinear Analyses):

تم تطبيق الحمولات في النموذج اللاخطي بشكلٍ متدرج, حيث قسمت الحمولة إلى عدة حمولات مرحلية تسمى خطوات الحمولة (load steps) وكل خطوة تتضمن خطوات ثانوية تسمى (sub steps), ويقوم البرنامج بتعديل مصفوفة صلابة النموذج بعد كل خطوة تحميل لتعكس التغيرات اللاخطية على الصلابة الإنشائية, ثم الانتقال إلى خطوة التحميل التالية باستخدام طريقة نيوتن – رافسون (Newton Raphson) التكرارية لتعديل صلابة النموذج تبعاً للتغيرات اللاخطية الحاصلة[33].

يستخدم نيوتن – رافسون المنهج التكراري التوازني للوصول إلى تقارب الحل عند نهاية كل خطوة تحمل ضمن حدود التحميل, ويبين الشكل(4-19) هذا المنهج بالنسبة لدرجة حرة واحدة في التحليل اللاخطي. ويقوم هذا المنهج على حساب شعاع قوى التوازن, وهو الفرق بين القوى الداخلية العائدة للإجهادات في العنصر والحمولات المطبقة, ثم التحقق من معيار تقارب الحل فإذا لم يتحقق هذا المعيار يعاد حساب قوى التوازن, وتعدل مصفوفة الصلابة, وينتقل إلى التكرار التالي وهكذا يستمر التكرار حتى تحقق معيار التقارب المحدد مسبقاً [9].

إن معيار التقارب في هذا البحث القوة والانتقال وحدود تقارب التحمل تركت حسب افتراضات برنامج ANSYS, واعتبر الجائز منهاراً عند ابتعاد الحل عن التقارب رغم إعطاء دفعة تحميل صغيرة جداً.

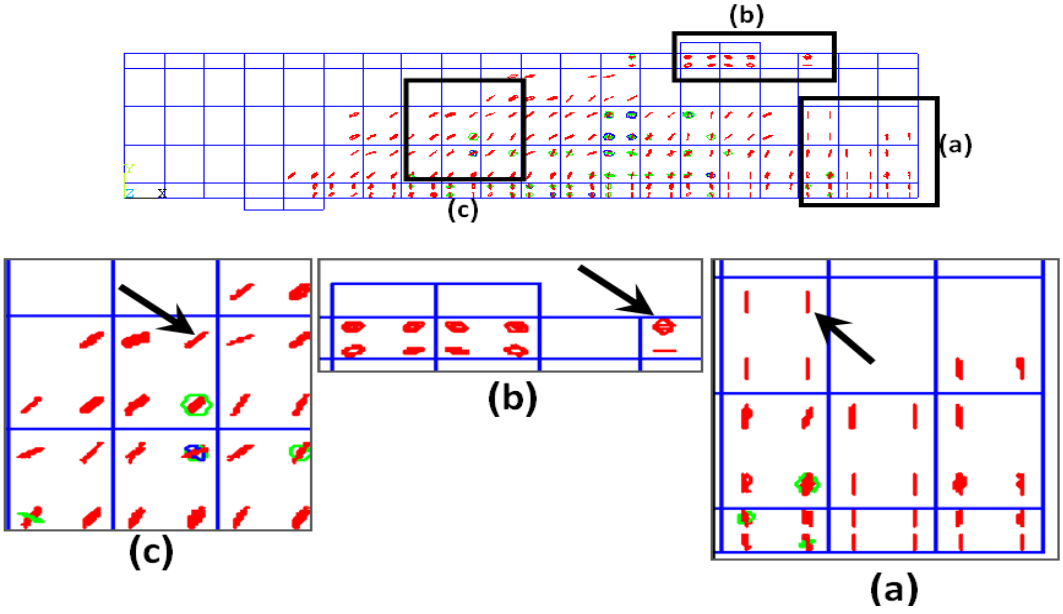


الشكل(4-19) الحل التكراري بطريقة نيوتن – رافسون (حالة تزايد الحمولة مرتين)[9].

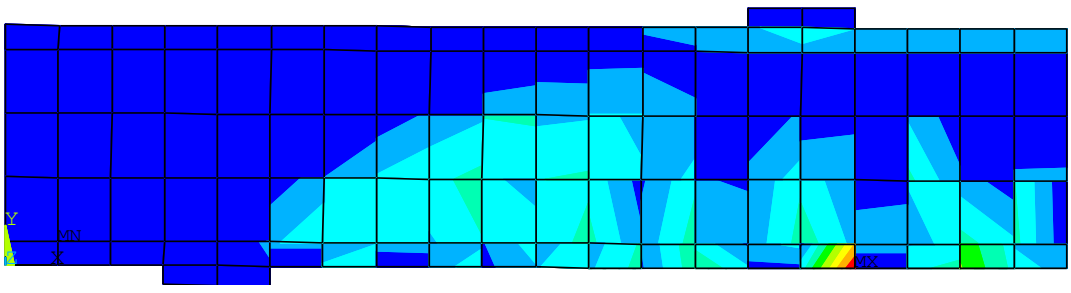
4-6-أشكال التشققات في الموديلات المحللة باستخدام ANSYS.

يتيح برنامج ANSYS إظهار التشققات الحاصلة على السطوح الخارجية للموديلات المحللة بعد الانتهاء من عملية التحليل وعند أي مستوى تحميل، ويتم ترميز الشقوق بحسب نوعها إلى ثلاثة رموز مختلفة كما مبين في الشكل(4-20)، وتتوضع هذه الرموز في زوايا العنصر المنتهي . يرمز للشقوق الناتجة عن الانعطاف بخطوط صغيرة شاقولية ، أما الشقوق الناتجة عن انضغاط البيتون (التحطم) فيتم ترميزها بدوائر صغيرة، ويتم ترميز الشقوق الناتجة عن القص بخطوط صغيرة مائلة. كما يتيح هذا البرنامج إظهار كونتورات التشوه (نوع Von Mises)[9] المسببة لهذه الشقوق من ضمن خيارات عديدة، وتظهر بعض الدراسات العالمية [33,25] هذا النوع من الكونتورات عند دراسة العناصر البيتونية المسلحة، ويبين الشكل(4-21) كونتورات التشوه المسببة للتشققات الظاهرة في الشكل (4-20) وهي تتبع لجوائز المجموعة (I).

هذا وسيتم لاحقا مقارنة التشققات الحاصلة في الموديلات المحللة وكونتورات التشوه المسببة لها، مع التشققات الحقيقية الحاصلة في العينات التجريبية.



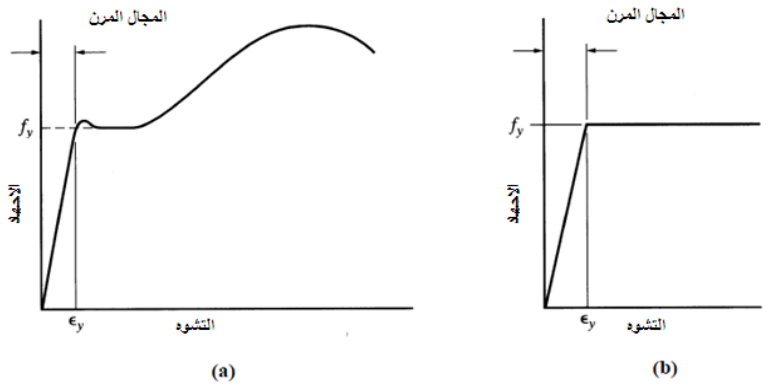
الشكل(4-20) تمثيل الشقوق برموز في نماذج العناصر المنتهية: a- رمز الشقوق الناتجة عن الانعطاف، b- رمز الشقوق الناتجة عن الضغط، c- رمز الشقوق المائلة الناتجة عن القص[25,9] .



الشكل(4-21) كونتورات التشوه (نوع Von Mises)[33,25,9] المسببة للتشققات.

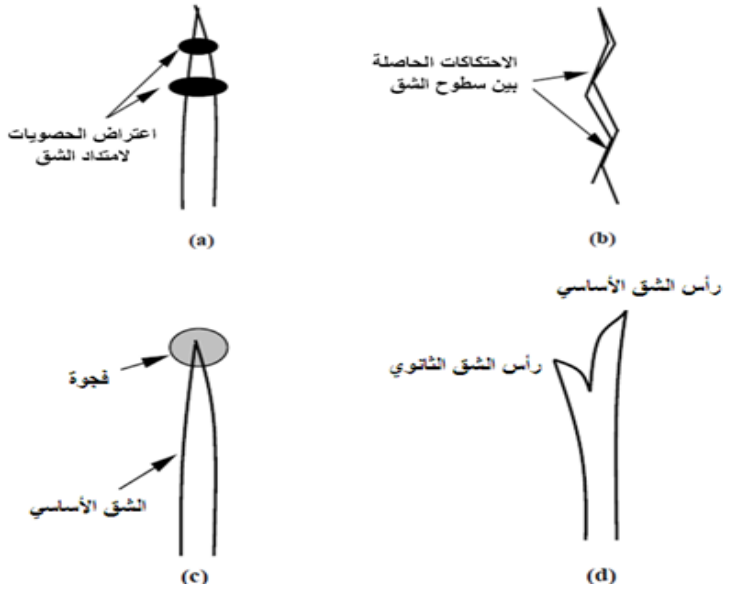
قد تختلف النتائج التحليلية الحاصلة باستخدام برنامج ANSYS عن النتائج التجريبية وذلك فيما يخص قدرات التحمل والسهوم وأشكال التشققات، ويعود ذلك للأسباب التالية:

1) – يستخدم في ANSYS منحني (إجهاد – تشوه) تمثيلي لفولاذ التسليح كما في الشكل(4–22)، وكذلك منحني (إجهاد – تشوه) مبسط للبيتون كما في الشكل(4–14)، وهذه المنحنيات تختلف عن المنحنيات الحقيقية.



الشكل(4–22) منحني (إجهاد – تشوه) لفولاذ التسليح: a– منحني حقيقي محدد بتجربة الشد، b– خط تمثيلي[25].

2) – تختلف آلية تشكل التشققات في برنامج ANSYS الذي يفترض أن البيتون مادة متجانسة التركيب، عن الآلية الحقيقية لتشكل التشققات نتيجة اعتراض بعض الحصويات لمسار الشقوق، وكذلك وجود احتكاك بين سطوح التشققات الحقيقية، أو توسع رأس الشق نتيجة اعتراضه لفجوة في البيتون، وكذلك تفرع الشق الأساسي إلى شقوق ثانوية كما مبين في الشكل(4–23).



الشكل(4–23) آلية تشكل وعمل الشقوق في البيتون: a– جسور من الحصويات تعترض الشقوق، b– الاحتكاكات التي تحصل بين السطوح المتقابلة في الشق الواحد. c– توسع رأس الشق نتيجة اعتراضه لفجوة في البيتون، d– تفرع الشق الأساسي إلى شقوق ثانوية [25].

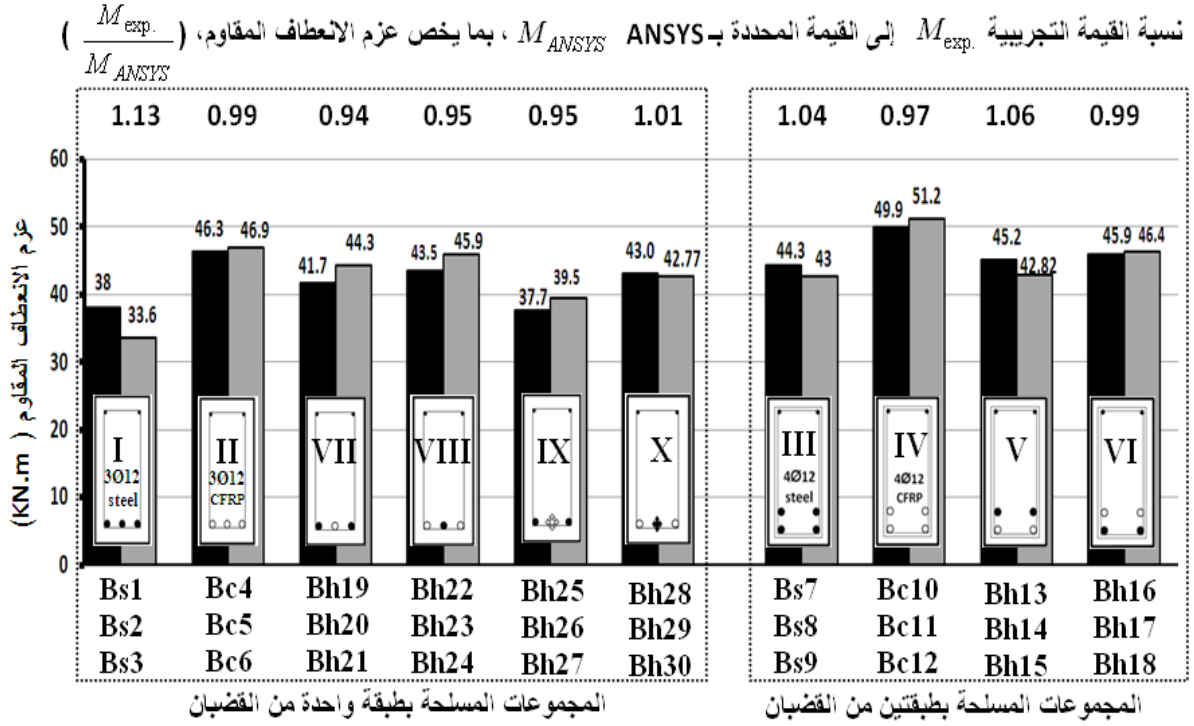
3) – تم افتراض تماسك تام بين قضبان التسليح والبيتون المحيط بها في برنامج ANSYS من خلال اتصال العقد مع بعضها في الموديل التحليلي، ولكن في الواقع لا يكون هذا التماسك تاماً في الجوائز التجريبية. وبالتالي هذه الفرضية غير دقيقة وخاصة من أجل القضبان الكربونية.

4-7- مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج التحليل ببرنامج ANSYS:

4-7-1- مقارنة قدرة التحمل على الانعطاف:

يبين الشكل (4-24) مقارنة بين القيم التجريبية $M_{\exp.}$ والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS M_{ANSYS} بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة أو طبقتين من القضبان، وكذلك نسبة القيم التجريبية إلى القيم المحددة باستخدام ANSYS ($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$).

يبين الجدول (4-3) مقارنة بين القيم التجريبية وقيم ANSYS بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة، ومن هذا الجدول يتبين أن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي(1.13-0.99-1.04-0.97-1.06-0.99-0.94-0.95-0.95-1.01) في جوائز المجموعات(X-IX-VIII-VII-VI-V-IV-III-II-I) بالتتالي، وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 1.09، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 0.98، والنسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي0.96 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة، وتساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي 0.99 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.



الشكل(4-24) مقارنة بين القيم التجريبية(■exp.)، والقيم المحددة بـ(ANSYS)□، بما يخص عزم الانعطاف المقاوم.

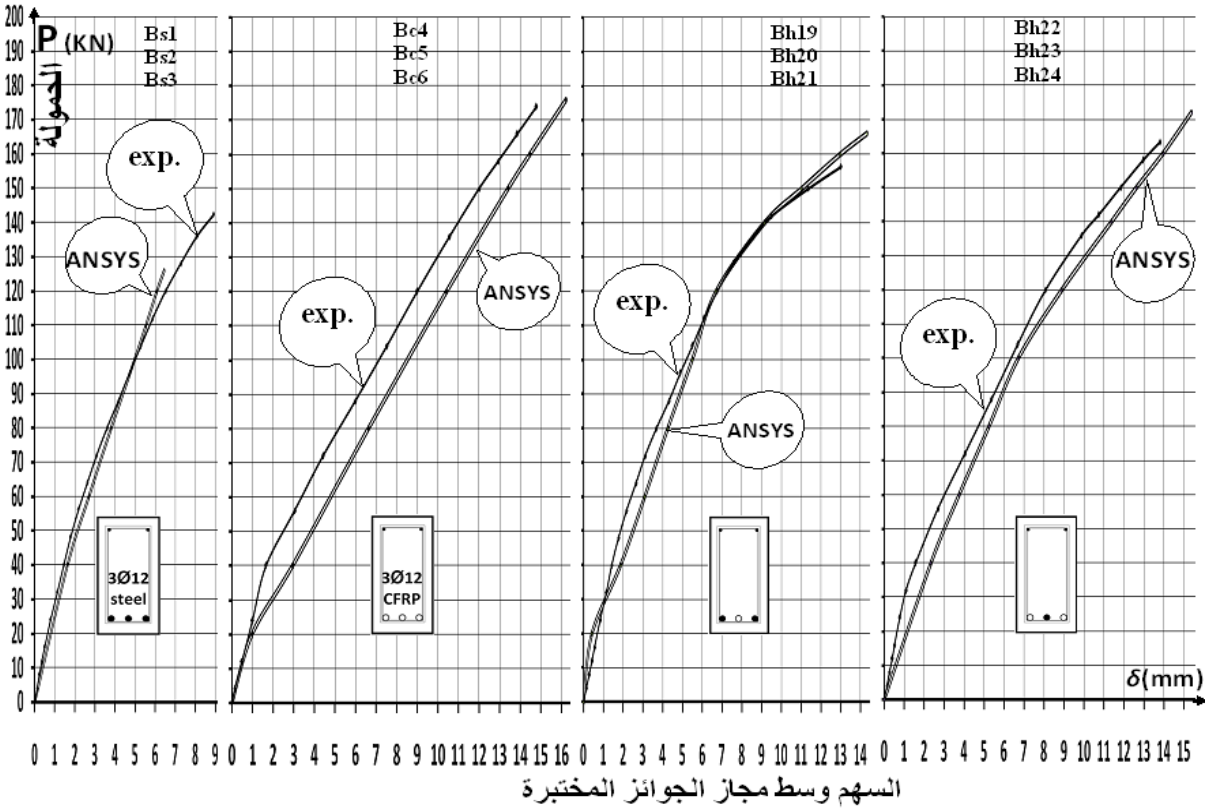
الجدول (4–3) مقارنة القيم التجريبية (.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS ، لعزم الانعطاف المقاوم.

اسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	عزم الانعطاف التجريبي $M_{\exp.}$ (KN.m)	عزم الانعطاف وفق ANSYS M_{ANSYS} (KN.m)	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ لكل مجموعة	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ للمجموعات المقابلة	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	38	33.60	1.13	1.09	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	44.3	43.00	1.04		
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	46.3	46.90	0.99	0.98	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	49.9	51.20	0.97		
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	41.7	44.30	0.94	0.96	0.99
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	43.5	45.90	0.95		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	37.7	39.50	0.95		
	X	Bh28 Bh29 Bh30	43	42.77	1.01		
	V	Bh13 Bh14 Bh15	45.2	42.82	1.06	1.03	
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	45.9	46.40	0.99		

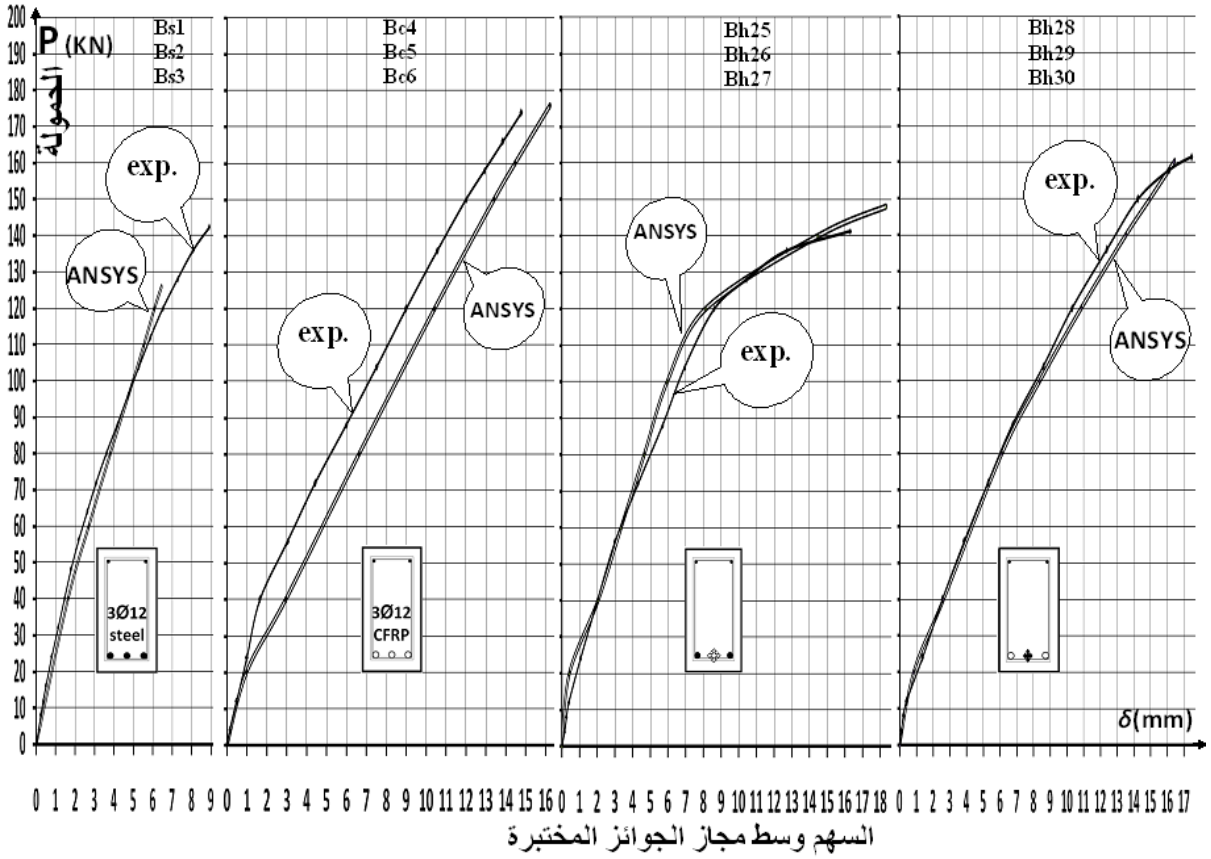
4–7–2– مقارنة قيم السهوم التجريبية والتحليلية وسط مجاز الجوائز.

يبين الشكل(4–25) مقارنة بين المنحنيات التجريبية للسهم $\delta_{\exp.}$ والمنحنيات المحددة باستخدام برنامج ANSYS (δ_{ANSYS})، بما يخص السهم وسط مجاز الجوائز المختبرة وذلك في المجموعات (I–II –VII–VIII) المسلحة بطبقة واحدة من القضبان المتماثلة القطر والمسلحة بالفولاذ أو الكربون أو بشكلٍ هجين. كما يبين الشكل (4–26) مقارنة بين المنحنيات التجريبية $\delta_{\exp.}$ والمنحنيات المحددة باستخدام برنامج ANSYS (δ_{ANSYS})، في المجموعات(IX–X) المسلحة بطبقة واحدة من القضبان المختلفة القطر والمسلحة بشكلٍ هجين، وكذلك منحنيات المجموعات(I–II) المسلحة بطبقة واحدة من القضبان المتماثلة القطر والمسلحة بالفولاذ أو الكربون.

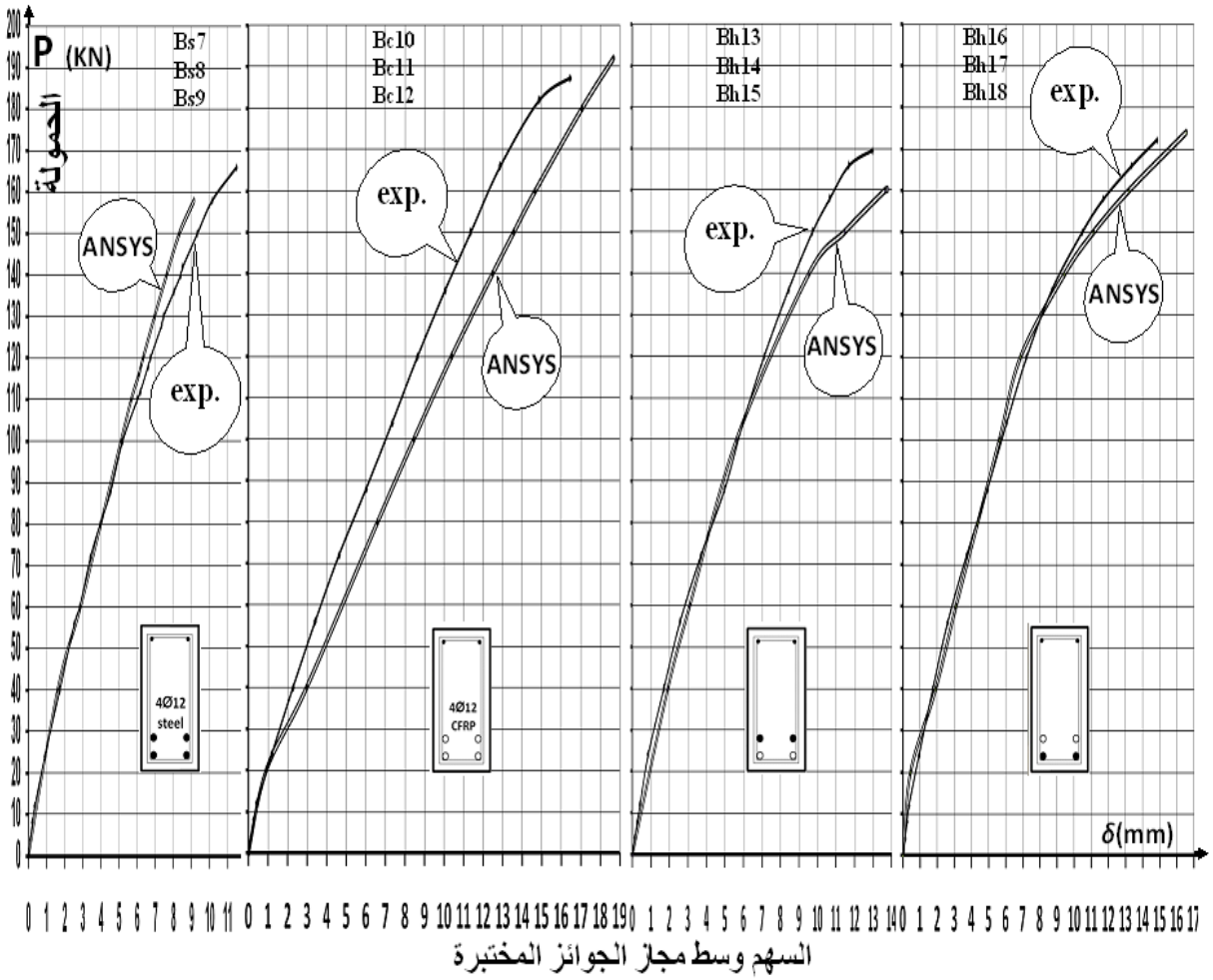
يبين الشكل (4–27) مقارنة بين المنحنيات التجريبية للسهم $\delta_{\exp.}$ والمنحنيات المحددة باستخدام برنامج ANSYS (δ_{ANSYS})، بما يخص السهم وسط مجاز الجوائز المختبرة وذلك في المجموعات (III–IV–V–VI) المسلحة بطبقتين من الفولاذ أو الكربون أو بشكلٍ هجين. ونلاحظ من الأشكال(4–25)،(4–26)،(4–27) تقارباً واضحاً بين النتائج التجريبية والتحليلية(ANSYS)، ويعود سبب وجود بعض التباين إلى ما تم شرحه سابقاً في الصفحة (175) من أسباب تعود إلى كيفية النمذجة.



الشكل(4–25) مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (I-II-VII-VIII).



الشكل(4–26) مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (I-II- IX-X).



الشكل(4–27) مقارنة القيم التجريبية(.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS، للسهم وسط مجاز جوائز المجموعات (III-IV-V-VI).

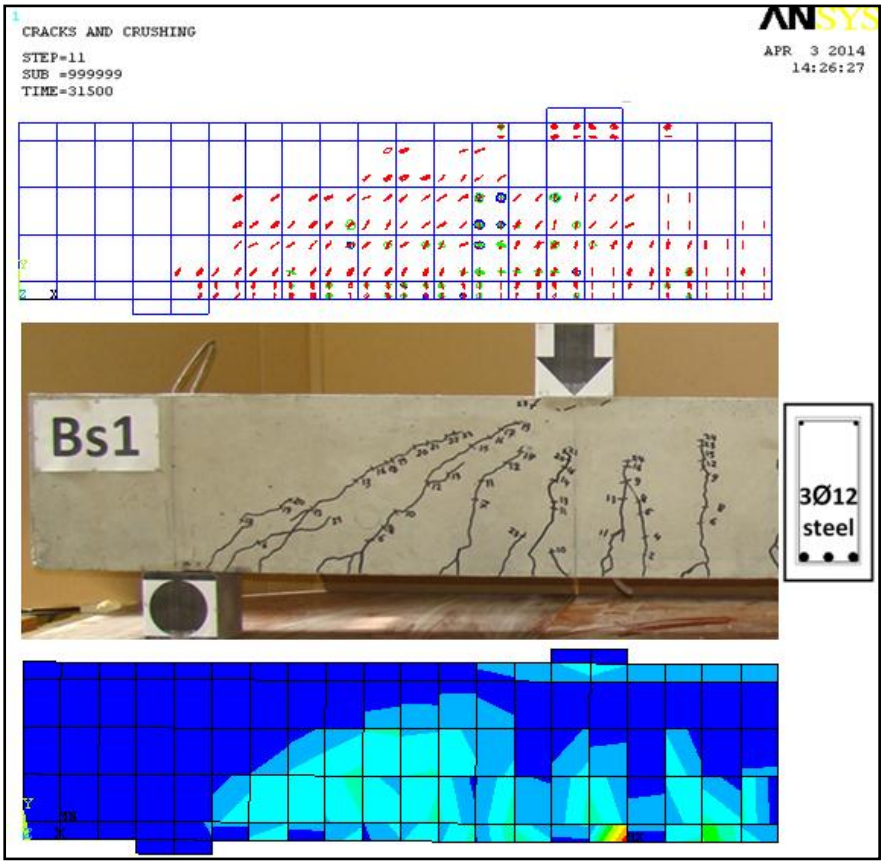
يبين الجدول (4–4) مقارنة بين القيم التجريبية $\delta_{\exp.}$ وقيم ANSYS (δ_{ANSYS}) بما يخص السهم وسط مجاز الجوائز المختبرة، وذلك عند ثلاثة مستويات للتحميل(أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز)، ومن هذا الجدول يتبين أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي(0.99–0.81–1.06–0.81–0.91–0.95–0.88–0.87–1.02–0.98) في جوائز المجموعات(I-II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X) بالتتالي، وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بالفولاذ، وتساوي 0.81 في الجوائز المسلحة بالكربون. كما أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي0.94 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة، وتساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

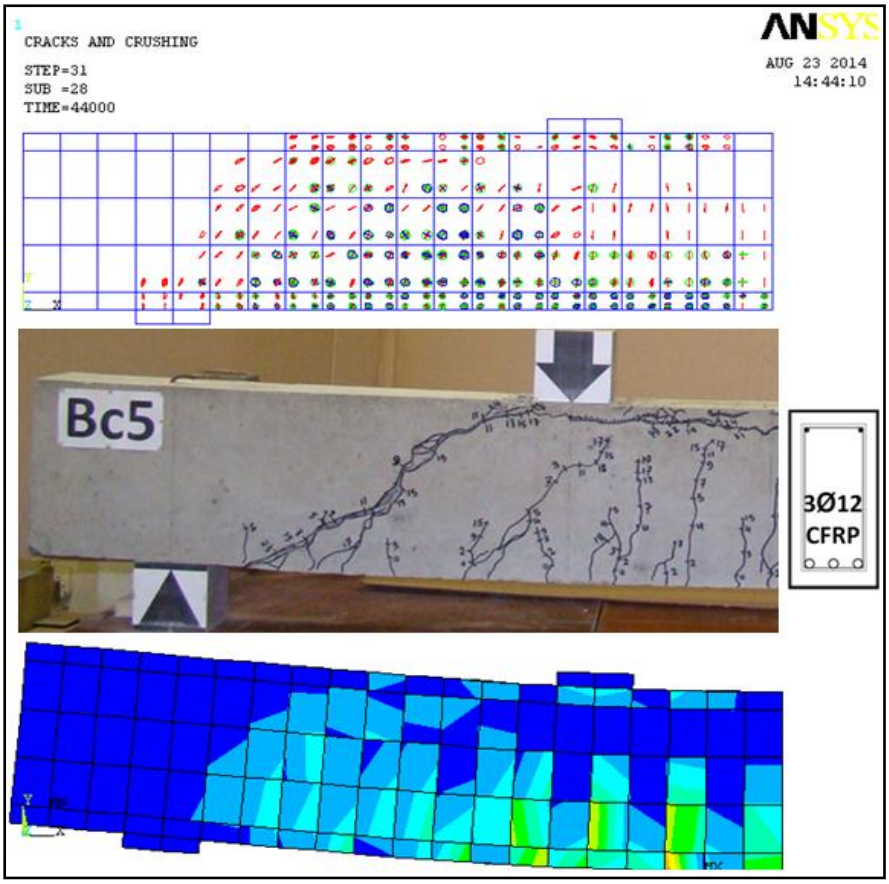
الجدول (4–4) مقارنة القيم التجريبية (.exp) والقيم المحددة ببرنامج ANSYS ، للسهم وسط مجاز الجوائز.

اسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	عند حمولة = $30\%(P_u)$	عند حمولة = $60\%(P_u)$	عند حمولة = $90\%(P_u)$	متوسط نسبة القيمة التجريبية إلى القيمة الحسابية لكل مجموعة	متوسط نسبة القيمة التجريبية إلى القيمة الحسابية للمجموعات المقابلة	
			نسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	0.89	0.98	1.11	0.99	1.03	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	1.05	1.02	1.12	1.06		
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	0.68	0.83	0.91	0.81	0.81	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	0.77	0.85	0.81	0.81		
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	0.74	0.90	0.99	0.88	0.94	0.93
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	0.76	0.94	0.93	0.87		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	1.00	1.08	1.00	1.02		
	X	Bh28 Bh29 Bh30	1.00	0.99	0.94	0.98		
	V	Bh13 Bh14 Bh15	0.88	1.00	0.85	0.91	0.83	
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	0.92	1.00	0.93	0.95		

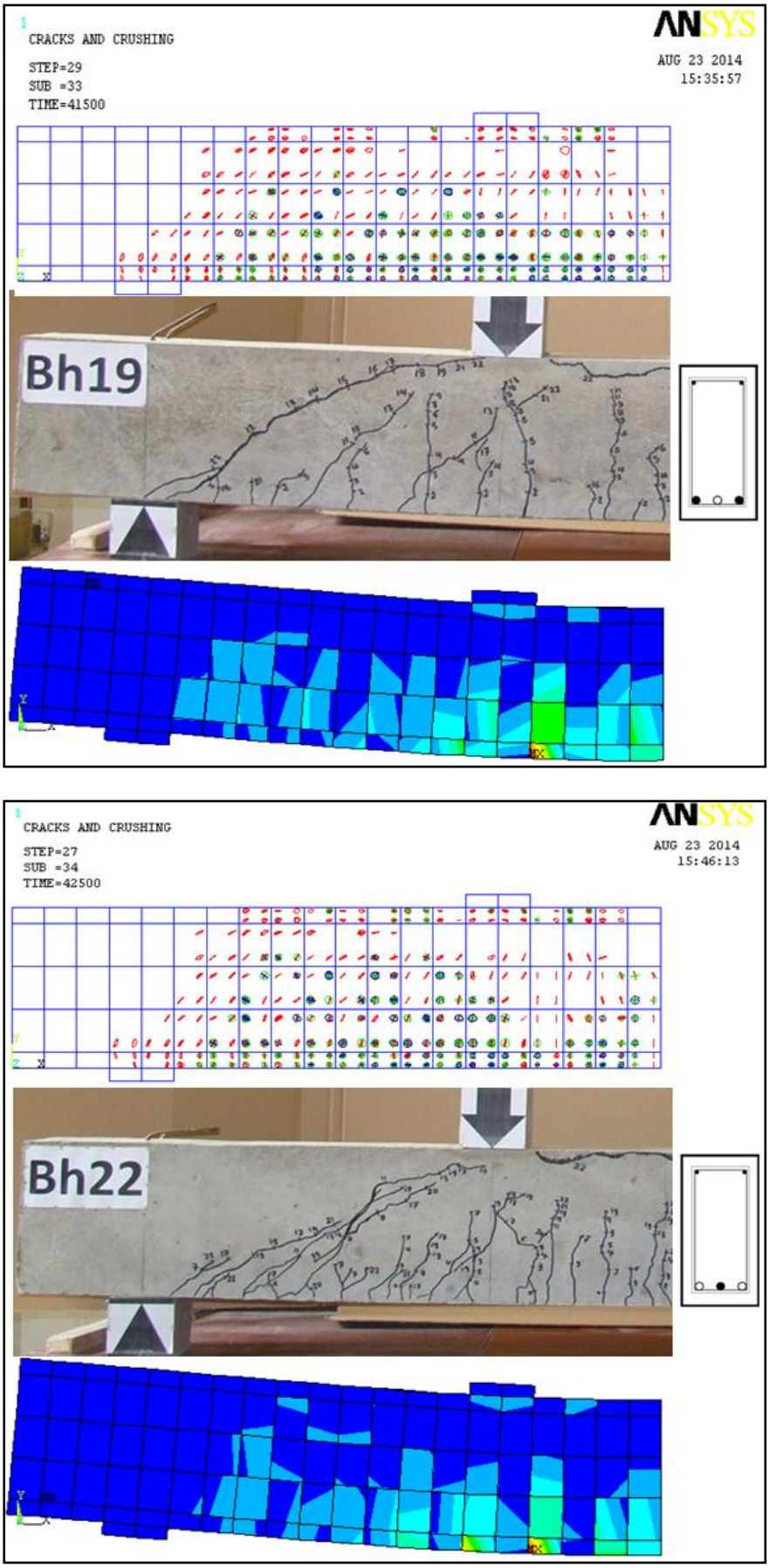
4–7–3– مقارنة أشكال التشققات.

تبين الأشكال(4–28) و(4–29) و(4–30) و(4–31) و(4–32) مقارنة بين التشققات الحاصلة في الجوائز التجريبية للمجموعات التالية:**(I–II)** و**(VII–VIII)** و**(IX–X)** و**(III–IV)** و**(V–VI)** بالتتالي، والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها. وتظهر على هذه الاشكال في الزاوية اليسرى العلوية رقم خطوات التحميل(Step) ورقم خطوات التحميل الثانوية(Sub) وقيمة الحمولة(Time) المسببة للانهيارفي برنامج ANSYS مقدرة بـ (N)، وهي تساوي ربع الحمولة الحقيقية المطبقة على الجائز الحقيقي. ومن هذه الاشكال نلاحظ تشابهاً ملحوظاً بين التشققات التجريبية وتشققات ANSYS من ناحية مناطق التواجد والانتشار والاتجاه والطول، وهذا يؤكد إمكانية البرنامج المستخدم في التحليل في محاكاة سلوك الجوائز الحقيقية من ناحية قدرة التحمل والسهوم وأشكال التشققات.

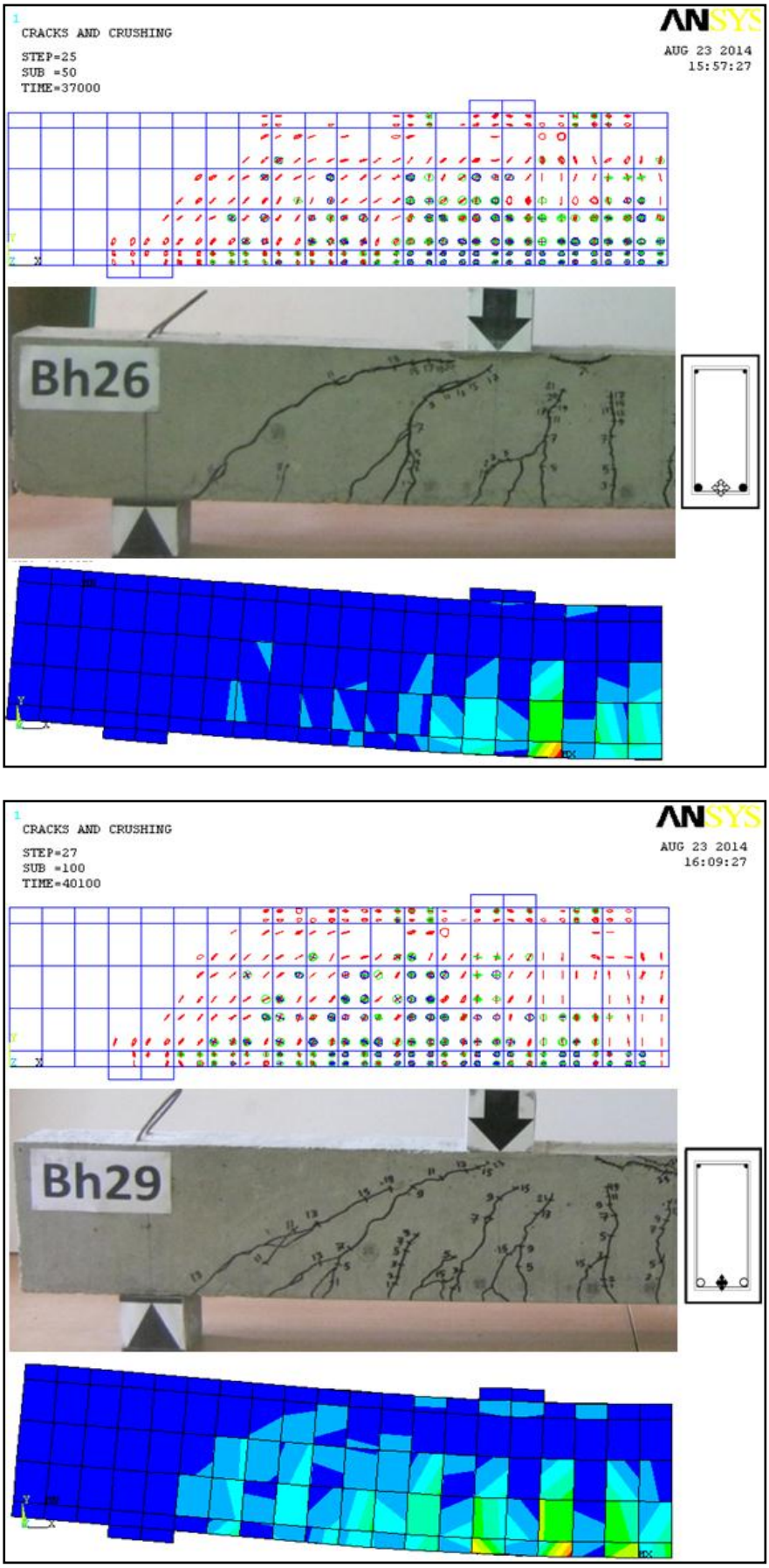




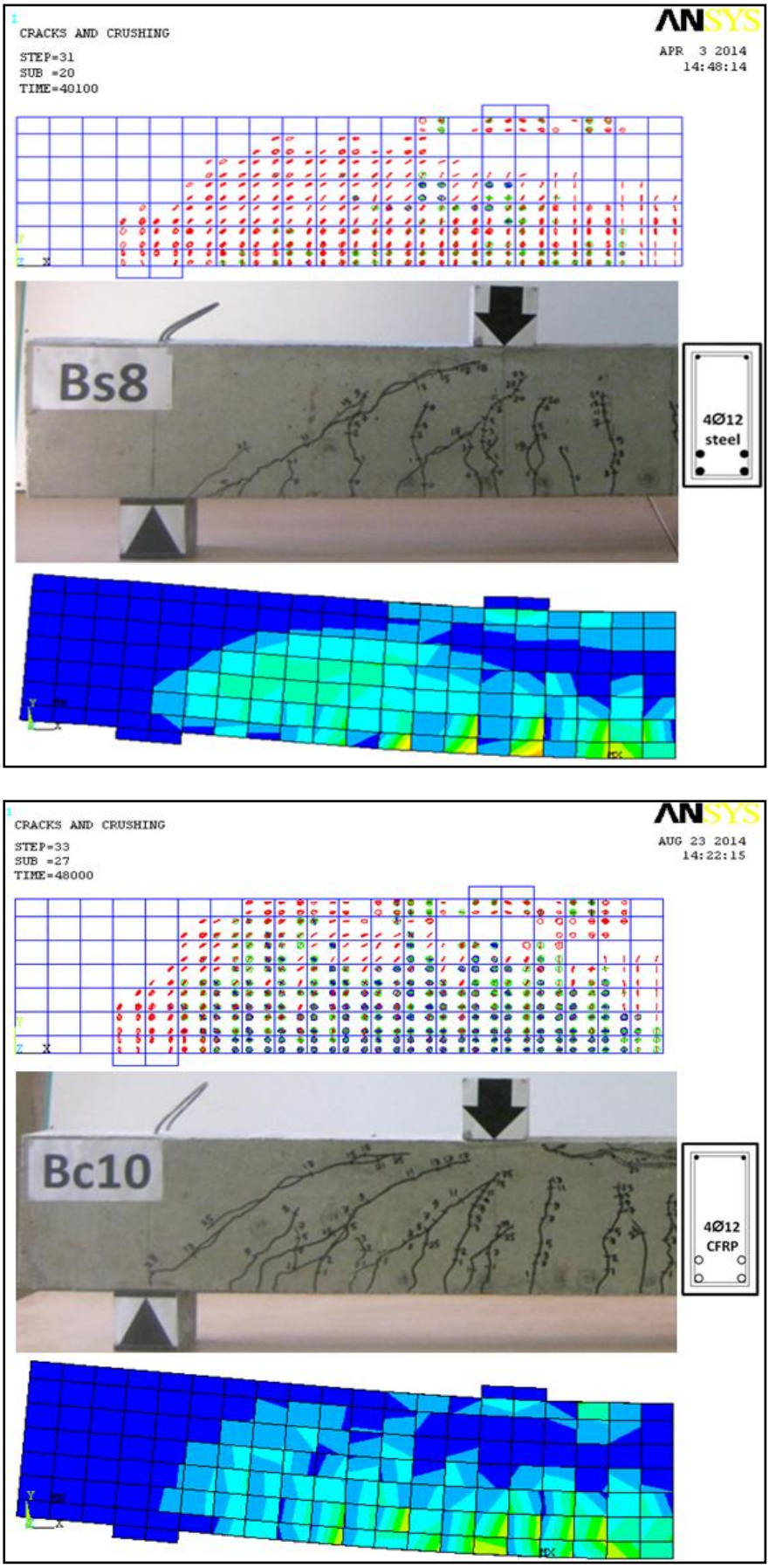
الشكل(4–28) مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(**I–II**) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها.



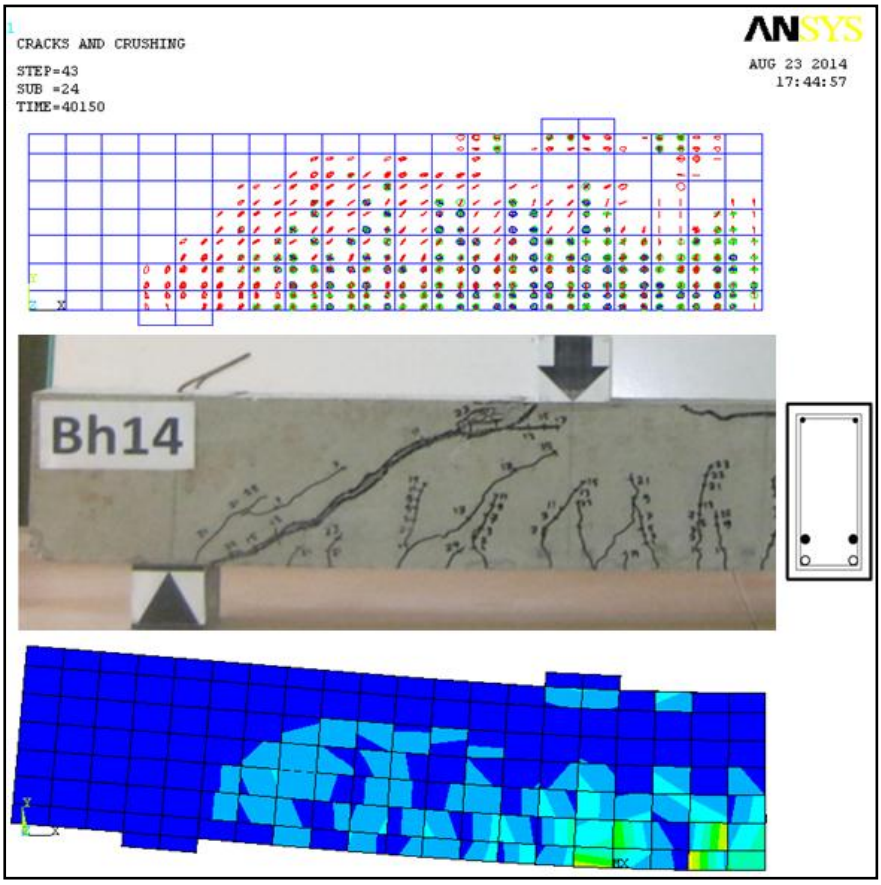
الشكل(4–29) مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(**VIII–VII**) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها.

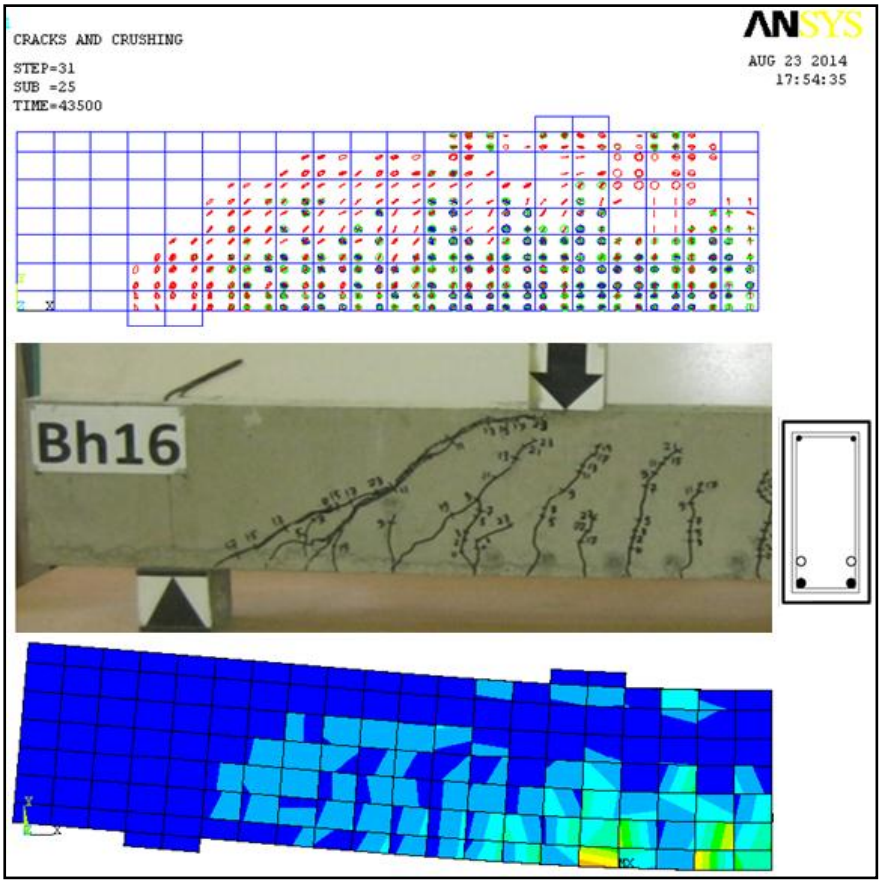


الشكل(4–30) مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(X–IX) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها.



الشكل(4–31) مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(**III–IV**) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها.





الشكل(4–32) مقارنة بين التشققات التجريبية للمجموعتين(**VI–V**) والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS وكذلك كونتورات التشوه (نوع Von Mises) المسببة لها.

4-8- نتائج وتوصيات القسم التحليلي.

عند إجراء مقارنة مباشرة للقيم التجريبية المتعلقة بقدرة التحمل والسهوم وسط مجاز الجوائز وأشكال التشققات مع القيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS فيما يخص الجوائز المسلحة على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان الفولاذية أو الكربونية أو بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون)، يمكن كتابة النتائج والتوصيات التالية:

1- نسبة القيم التجريبية للعزم المقاوم إلى القيم المحددة بـ ANSYS ($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$) تساوي القيم التالية: (1.01–0.95–0.95–0.94–0.99–1.06–0.97–1.04–0.99–1.13) في جوائز المجموعات(I-II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X) بالتتالي.

2- النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي 1.09 في الجوائز المسلحة بالفولاذ، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 0.98، والنسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي0.96 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة، وتساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي0.99.

3- نسبة القيم التجريبية للسهم وسط مجاز الجوائز إلى قيم ANSYS ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$)عند ثلاثة مستويات للتحميل(أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز) تساوي القيم التالية:(0.98–1.02–0.87–0.88–0.95–0.91–0.81–1.06–0.81–0.99) في جوائز المجموعات (I-II-III-IV-V-VI-VII-VIII-IX-X) بالتتالي.

4- النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بالفولاذ، و تساوي 0.81 في الجوائز المسلحة بالكربون. كما أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي0.94 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة، وتساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

5- أعطت طريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج ANSYS نتائج مقاربة للنتائج التجريبية بما يخص قدرة التحمل ($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ = 1.02)، والسهوم($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ = 0.92)، وأشكال التشققات في الجوائز المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو بشكلٍ هجين وعلى شكل طبقة أو طبقتين. لذلك نوصي باستخدام طريقة العناصر المنتهية في نمذجة وتحليل هذه العناصر البيتونية المسلحة.

الفصل الخامس

مقارنة النتائج Results Comparison

الفصل الخامس

مقارنة النتائج Results Comparison

5-1- مقدمة.

5-2- مقارنة النتائج التجريبية والحسابية والتحليلية باستخدام ANSYS:

5-2-1- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم:

5-2-2- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بعرض الشق:

5-2-3- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف.

5-3- الاستنتاجات conclusions:

5-4- التوصيات recommendations:

الفصل الخامس

مقارنة النتائج Results Comparison

5-1- مقدمة:

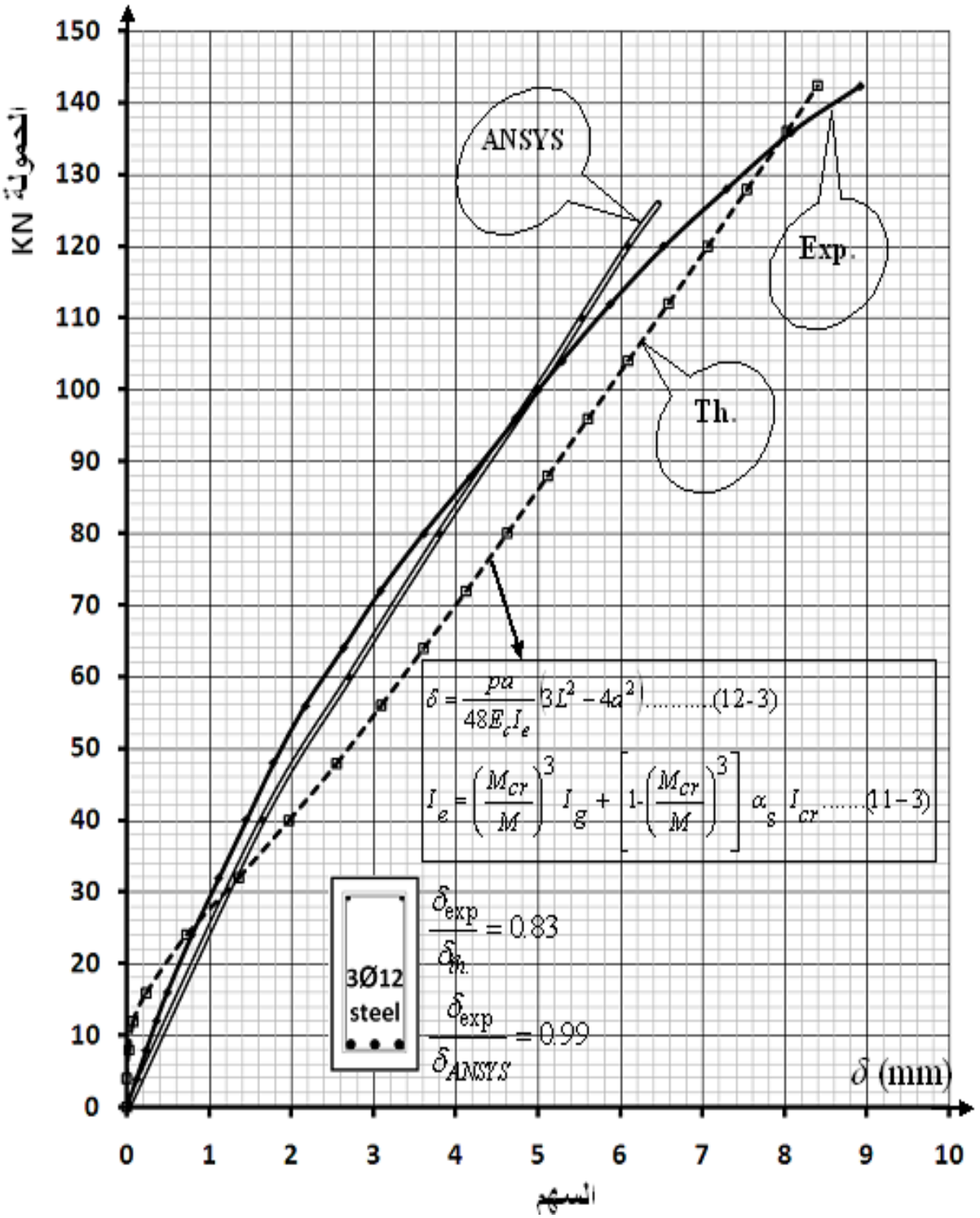
تم شرح القسم التجريبي من البحث باستفاضة بكلِّ ما تضمنه من إجراءات تحضير واختبار للعينات المدروسة ومناقشة ومقارنة النتائج المختلفة، وكذلك عرض القسم الحسابي للعلاقات اللازمة لحساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز المسلحة بالفولاذ أو الكربون والعلاقات المطورة لتناسب التسليح الهجين (فولاذ+كربون)، وحسبت في هذا القسم جميع العينات المدروسة وقورنت النتائج الحسابية مع النتائج التجريبية. وتطرق القسم التحليلي من البحث إلى كيفية نمذجة العينات المدروسة باستخدام طريقة العناصر المنتهية وتحليلها باستخدام برنامج ANSYS وعرضت وقورنت النتائج التحليلية مع النتائج التجريبية. وفي هذا الفصل ستتم مقارنة مختلف النتائج الحسابية والتحليلية والتجريبية.

5-2- مقارنة النتائج التجريبية والحسابية والتحليلية باستخدام ANSYS:

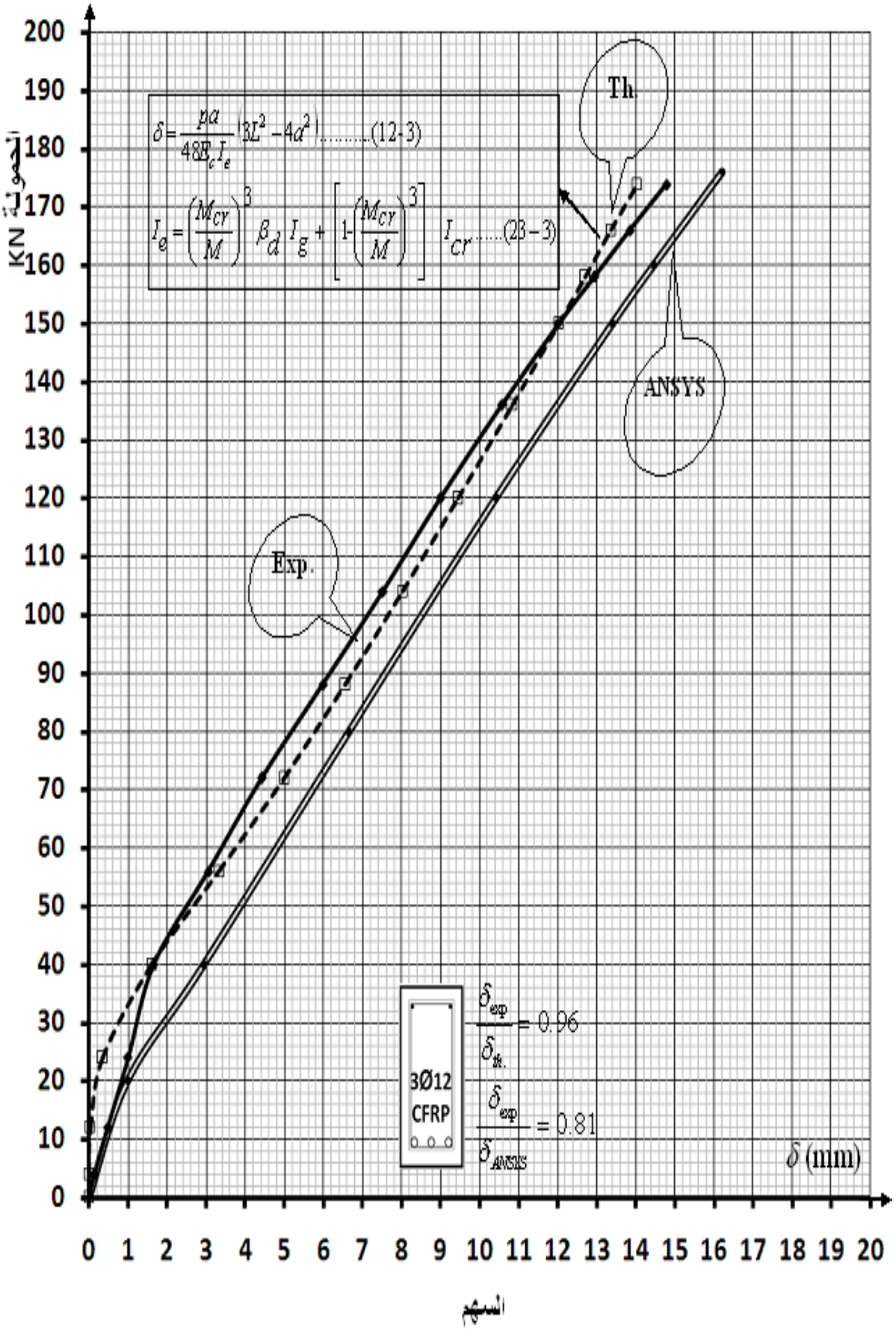
5-2-1- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بالسهوم:

تبين الأشكال من(5-1) إلى(5-10) مقارنة بين منحنيات(حمولة- سهم) للقيم التجريبية ($\delta_{\exp.}$) والقيم الحسابية($\delta_{th.}$) والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS(δ_{ANSYS}) لمجموعات الجوائز(X-IX--III-II-I VIII-VII-VI-V-IV)، ويظهر على كل شكل العلاقات الحسابية الحاكمة والمستخدمة لحساب السهم. ويبين الشكل (5-11) مقارنة بين منحنيات(حمولة- سهم) للقيم التجريبية ($\delta_{\exp.}$) والقيم الحسابية ($\delta_{th.}$) والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS(δ_{ANSYS}) والخاصة بمجموعات الجوائز(VIII-VII-II-I) التي لها نفس نسبة التسليح الكلية والمسلحة بقضبان متساوية القطر، كما يبين الشكل (5-12) مقارنة بين منحنيات(حمولة- سهم) للقيم التجريبية($\delta_{\exp.}$) والقيم الحسابية($\delta_{th.}$) والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS(δ_{ANSYS}) والخاصة بمجموعات الجوائز(X-IX-II-I) المسلحة بقضبان مختلفة القطر وذات نسبة تسليح كلية مختلفة، ويبين الشكل(5-3) مقارنة بين منحنيات(حمولة- سهم) للقيم التجريبية($\delta_{\exp.}$) والقيم الحسابية($\delta_{th.}$) والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS(δ_{ANSYS}) والخاصة بمجموعات الجوائز(VI-V-IV-III) التي لها نفس نسبة التسليح الكلية والمسلحة بقضبان متساوية القطر ومتوضعة على طبقتين. وحدد السهم وسط مجاز الجوائز المختبرة تجريبياً وتحليلياً، وحددت القيم الحسابية للسهم اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها في الدراسة الحسابية وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية المبينة في الأشكال(3-2) و(3-3) و(3-4).

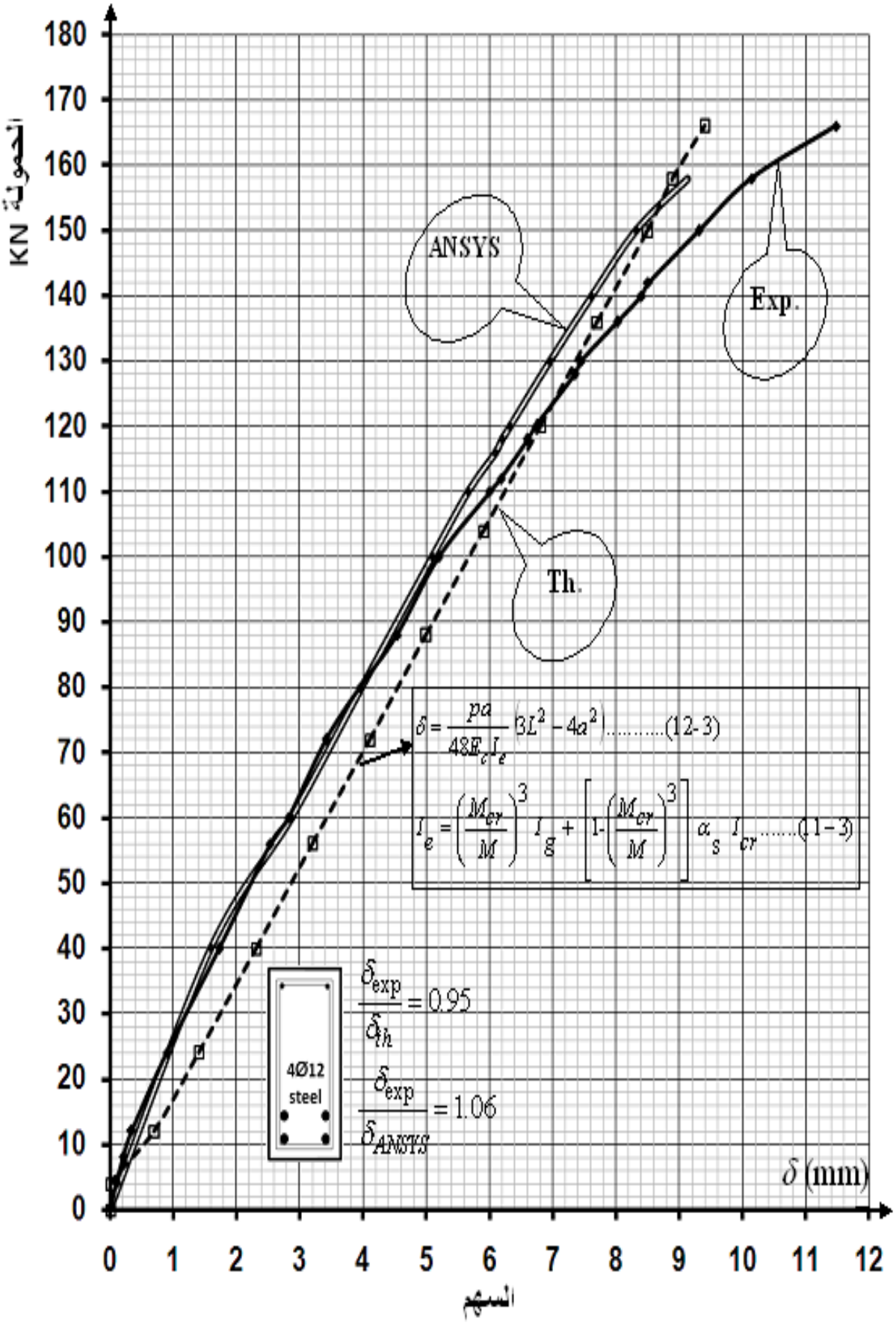
ولتسهيل عملية مقارنة النتائج ومناقشتها تم تحديد القيم التجريبية($\delta_{\exp.}$) للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة وكذلك القيم الحسابية($\delta_{th.}$) وقيم برنامج ANSYS (δ_{ANSYS}) وذلك عند ثلاثة مستويات للتحميل(أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز). وحسبت النسب $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ و $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ عند هذه الحمولات ووضعت في الجدول (5−1).



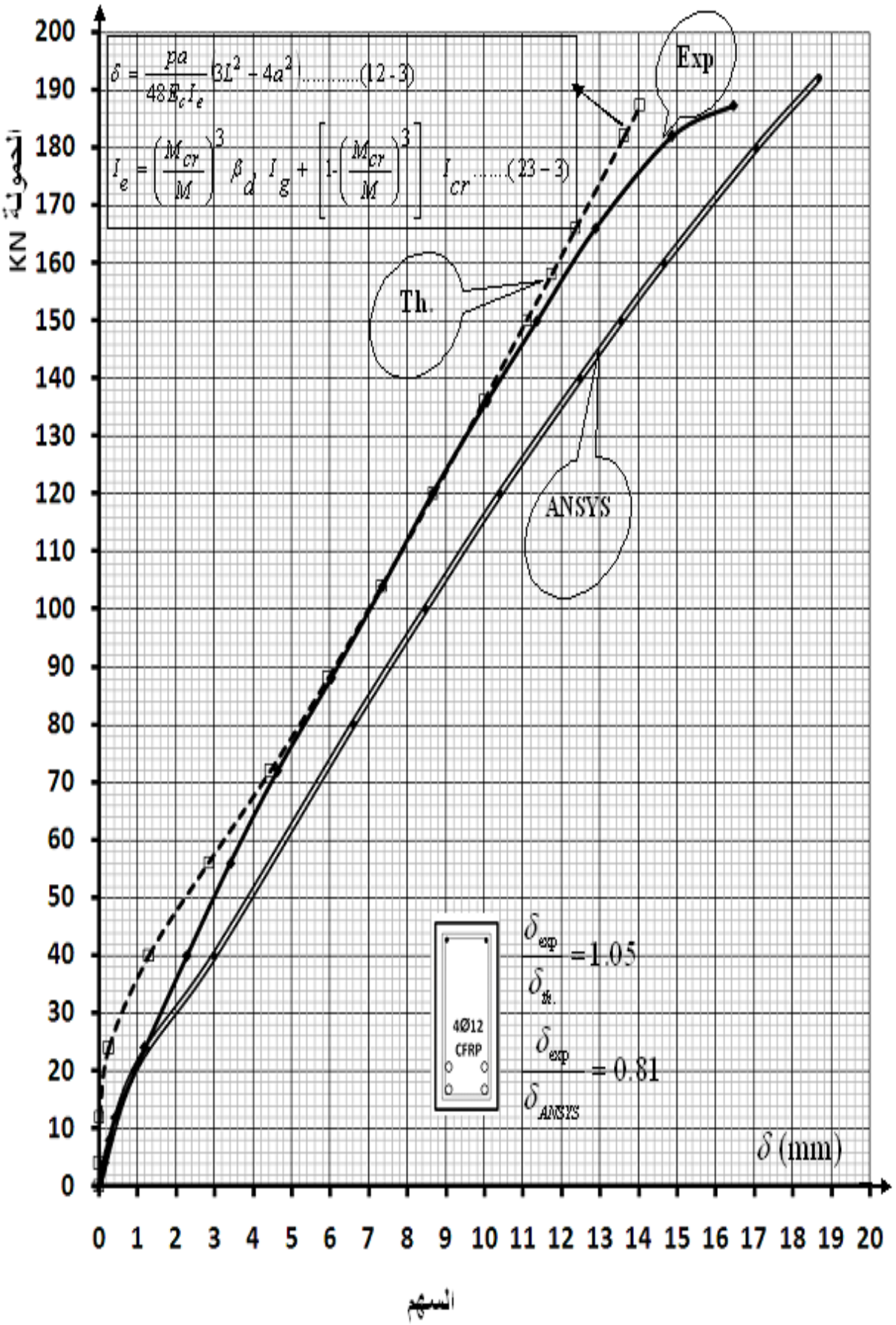
الشكل (5−1) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة (**I**).



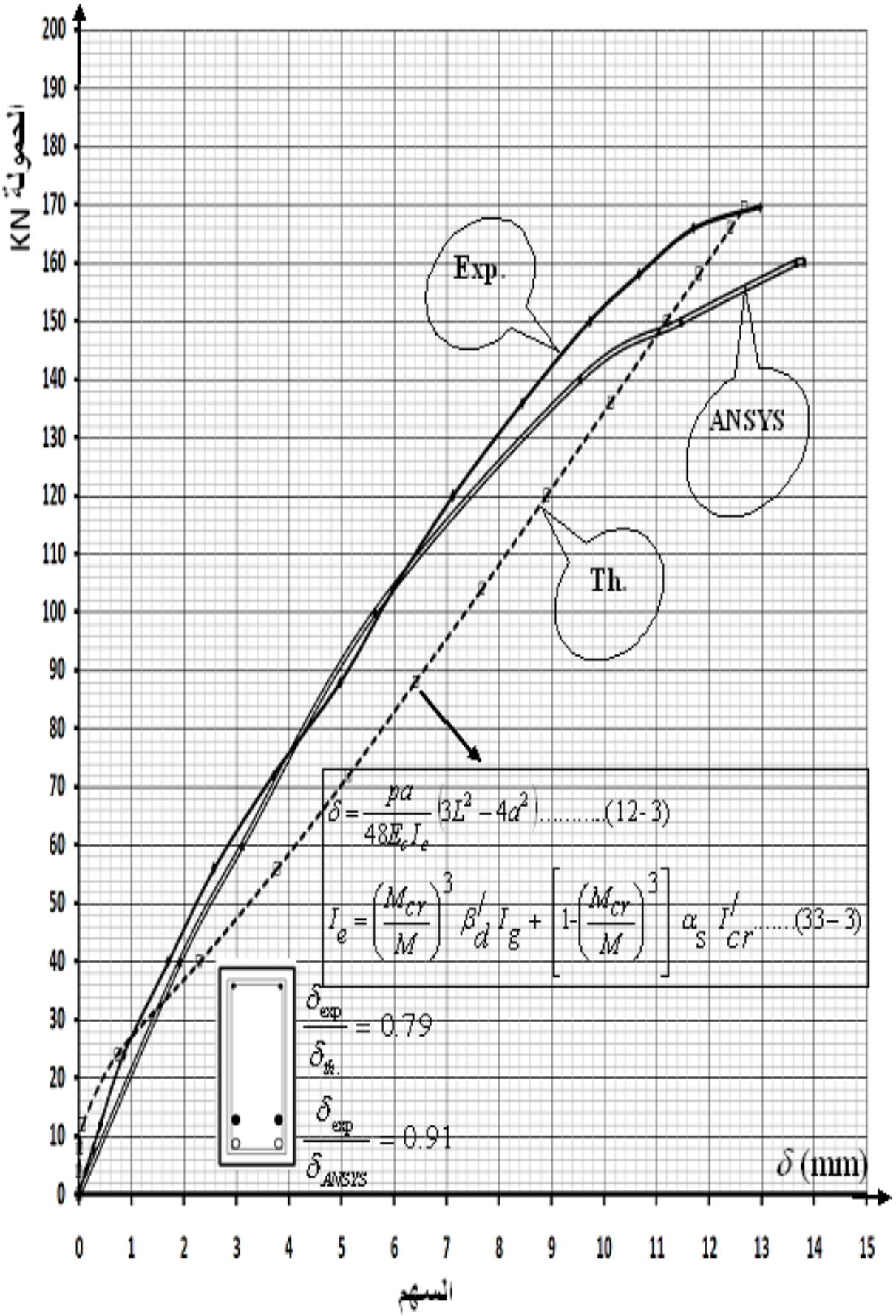
الشكل (5−2) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(II)**.



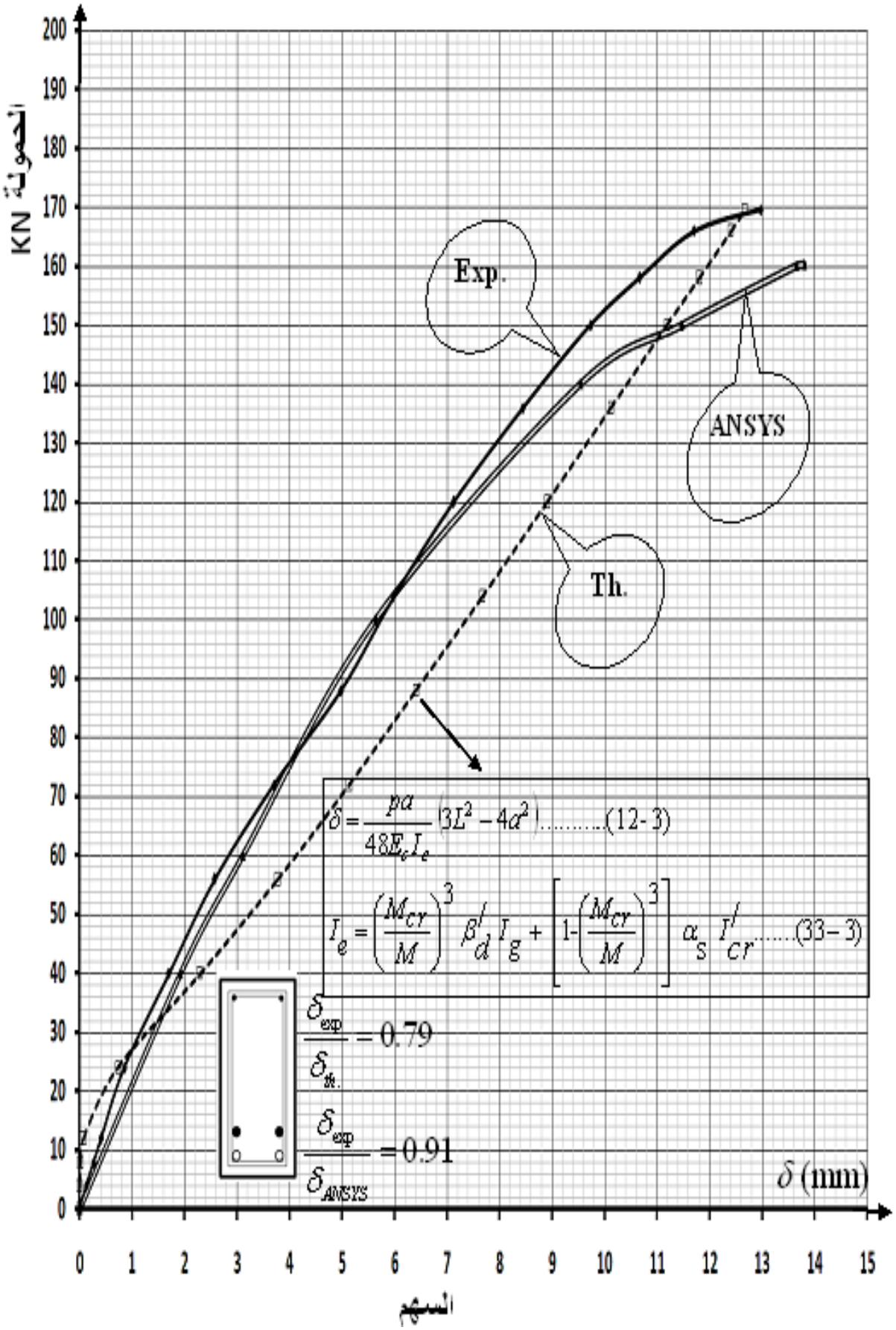
الشكل (5−3) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(III)**.



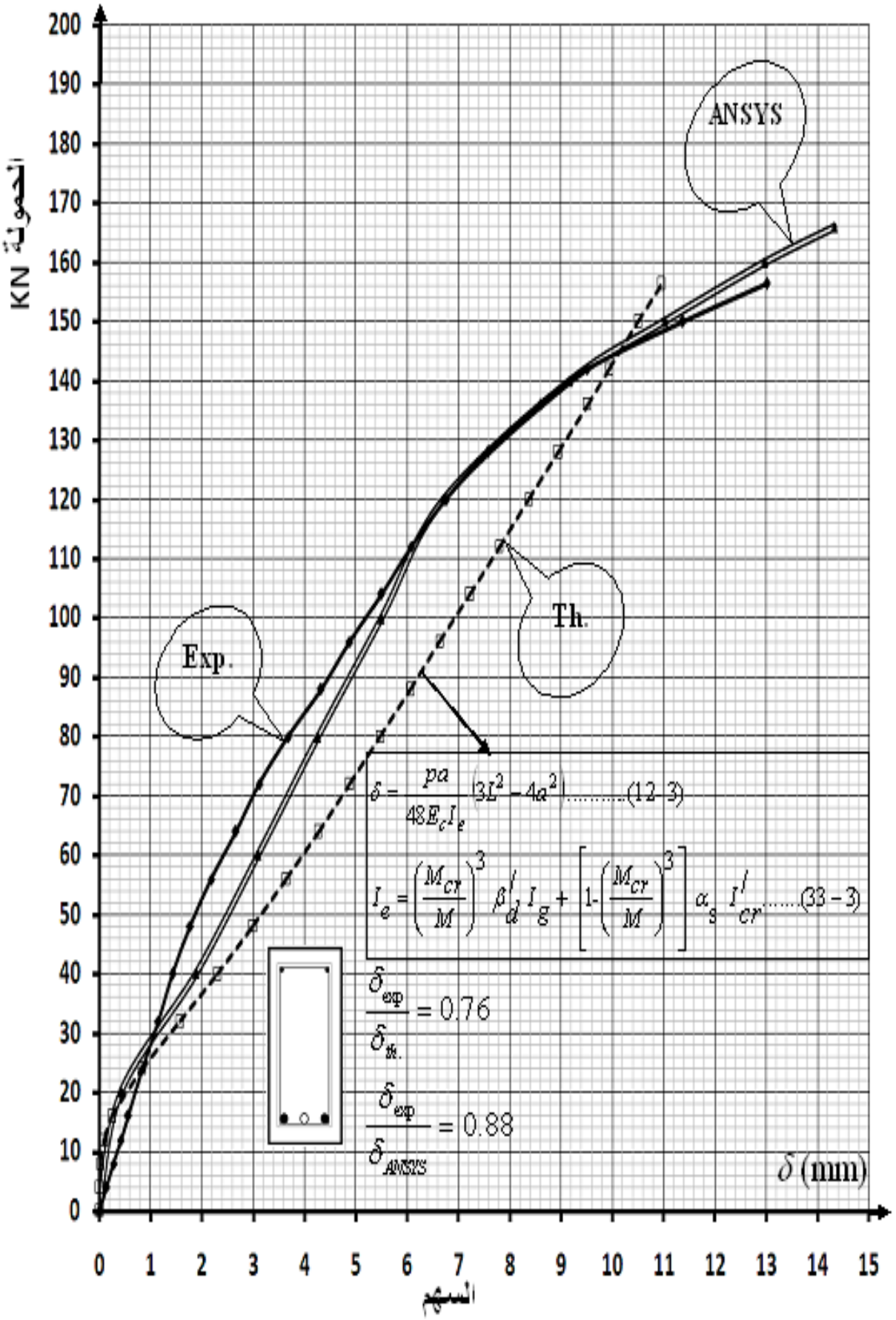
الشكل (5–4) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(IV)**.



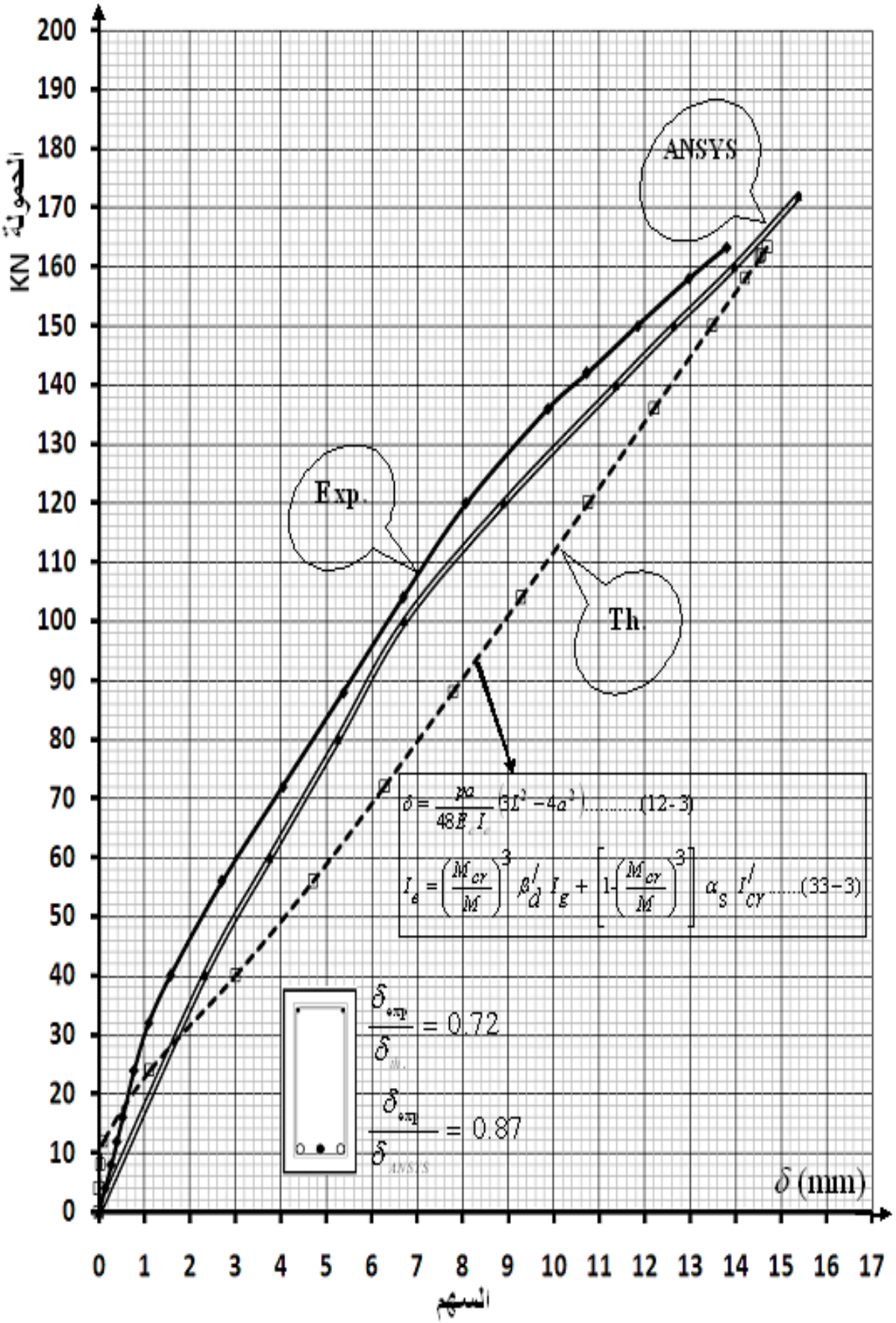
الشكل (5–5) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(V)**.



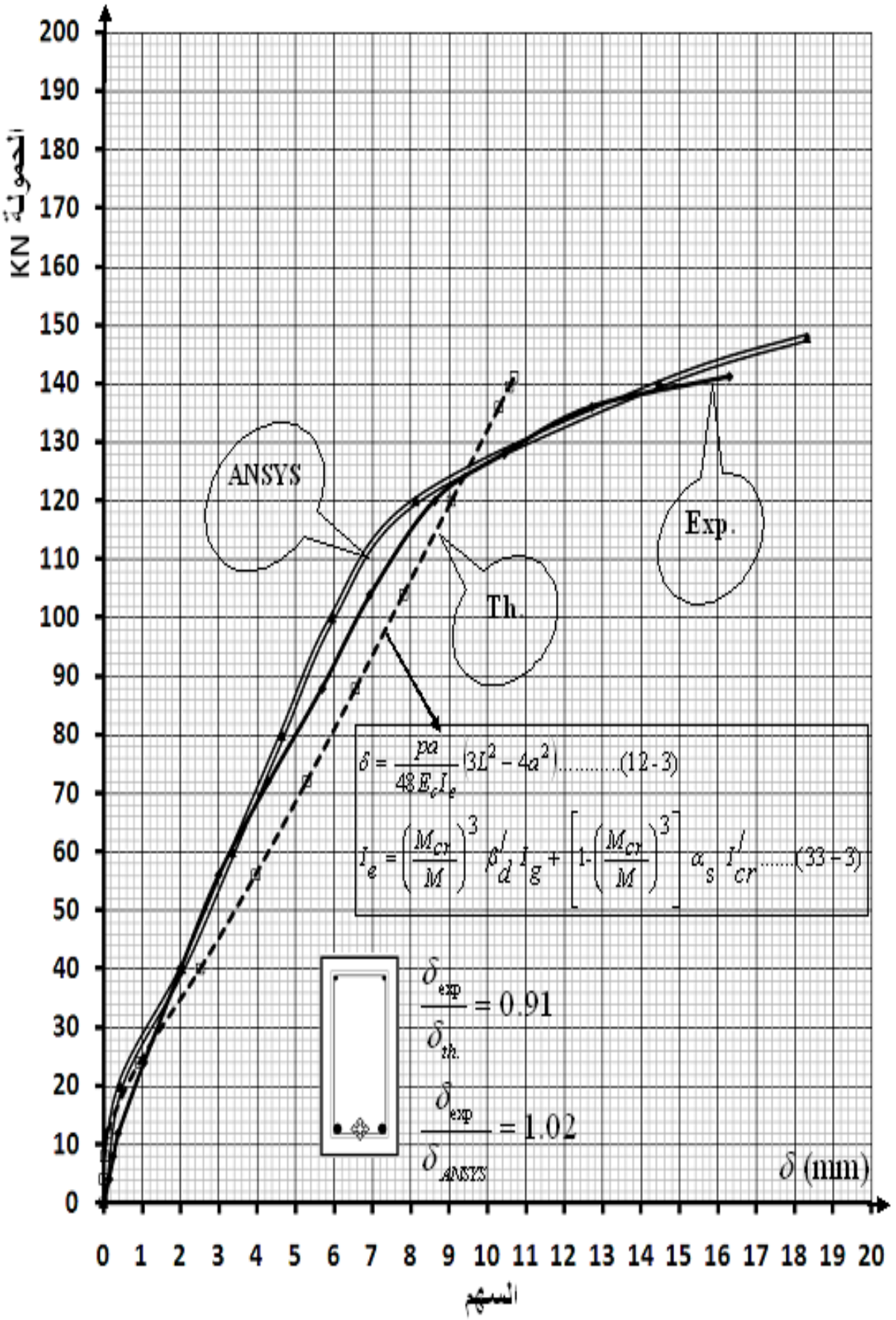
الشكل (5–6) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VI)**.



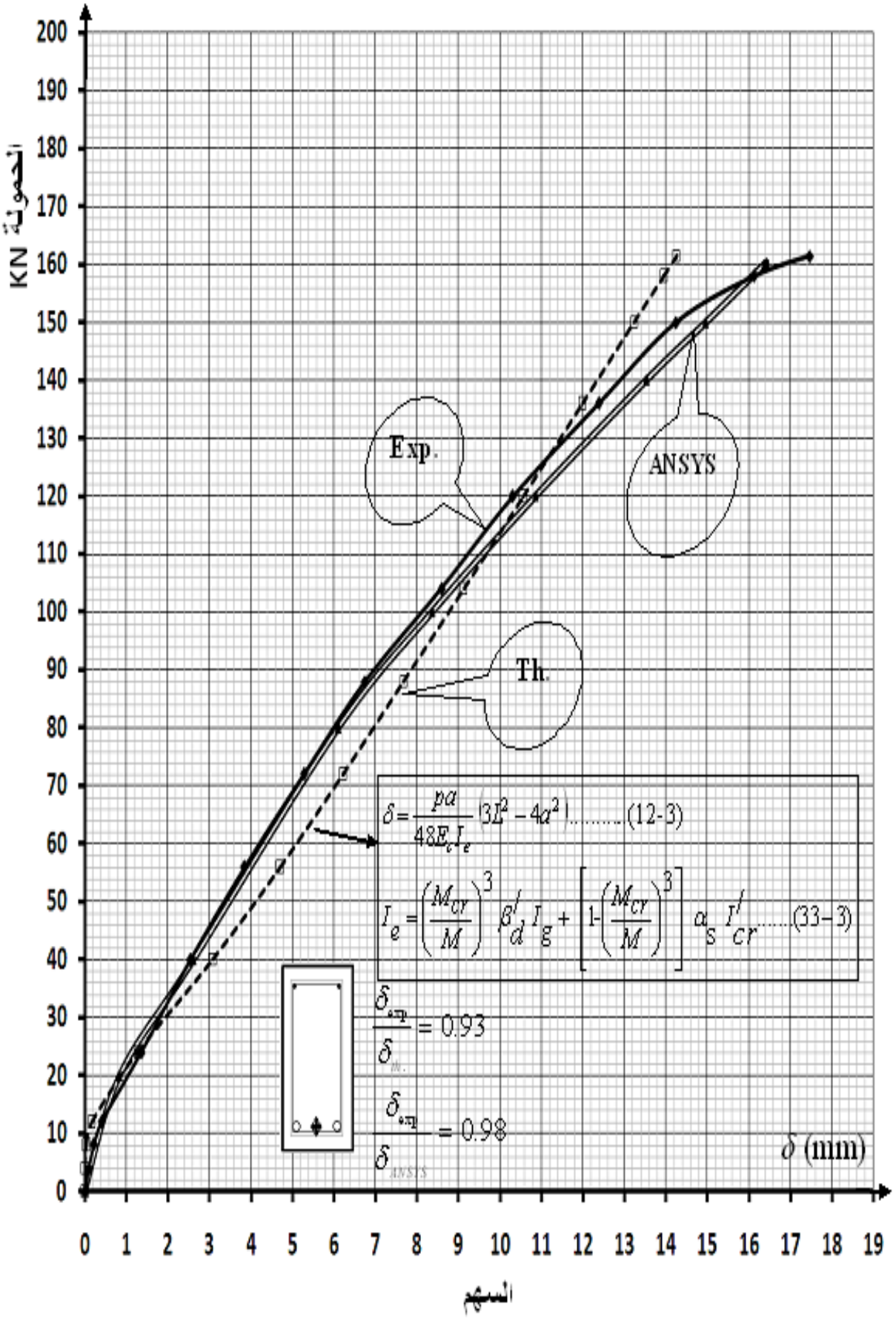
الشكل (5–7) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VII)**.



الشكل (5–8) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(VIII)**.

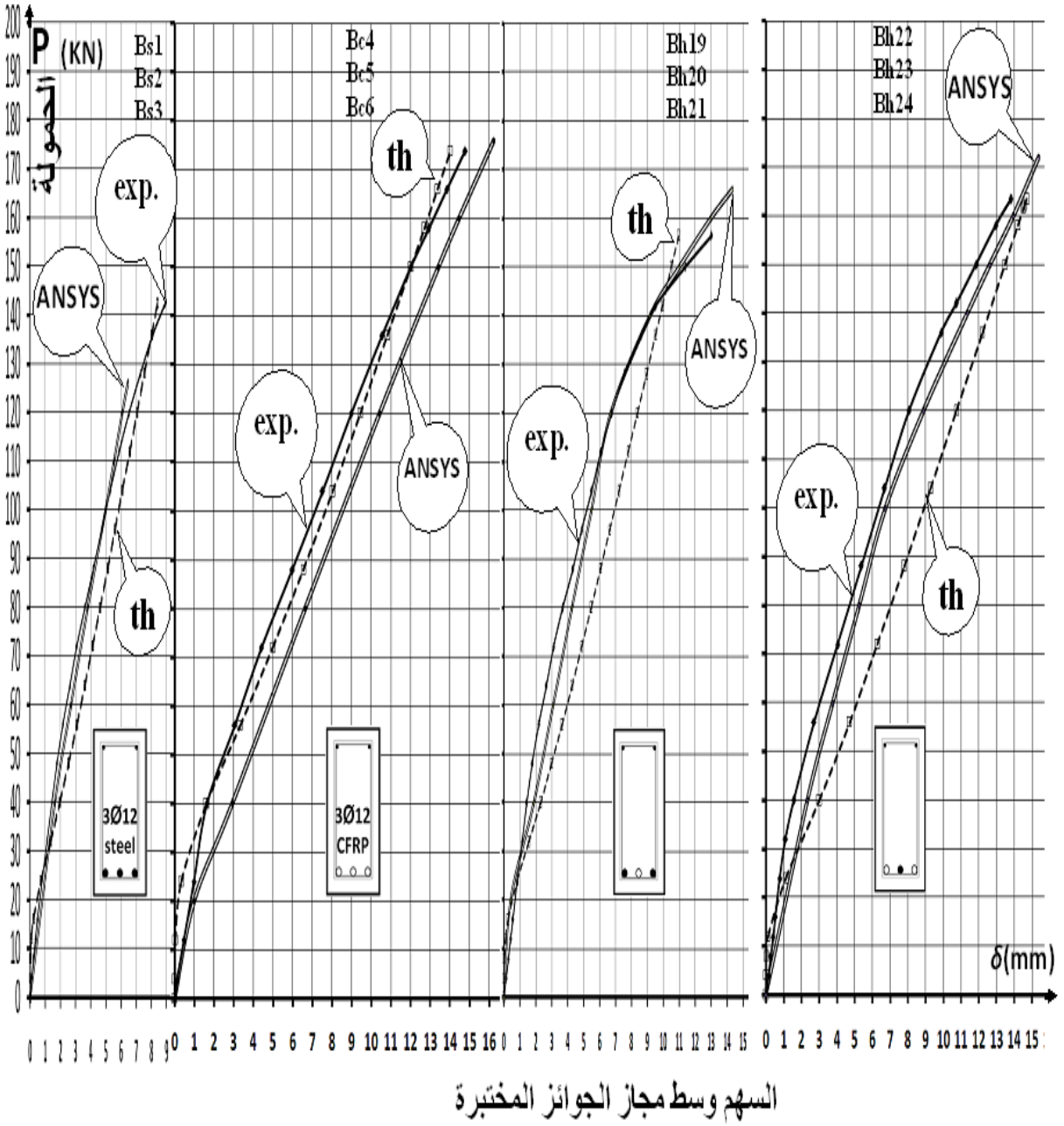


الشكل (5–9) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(IX)**.



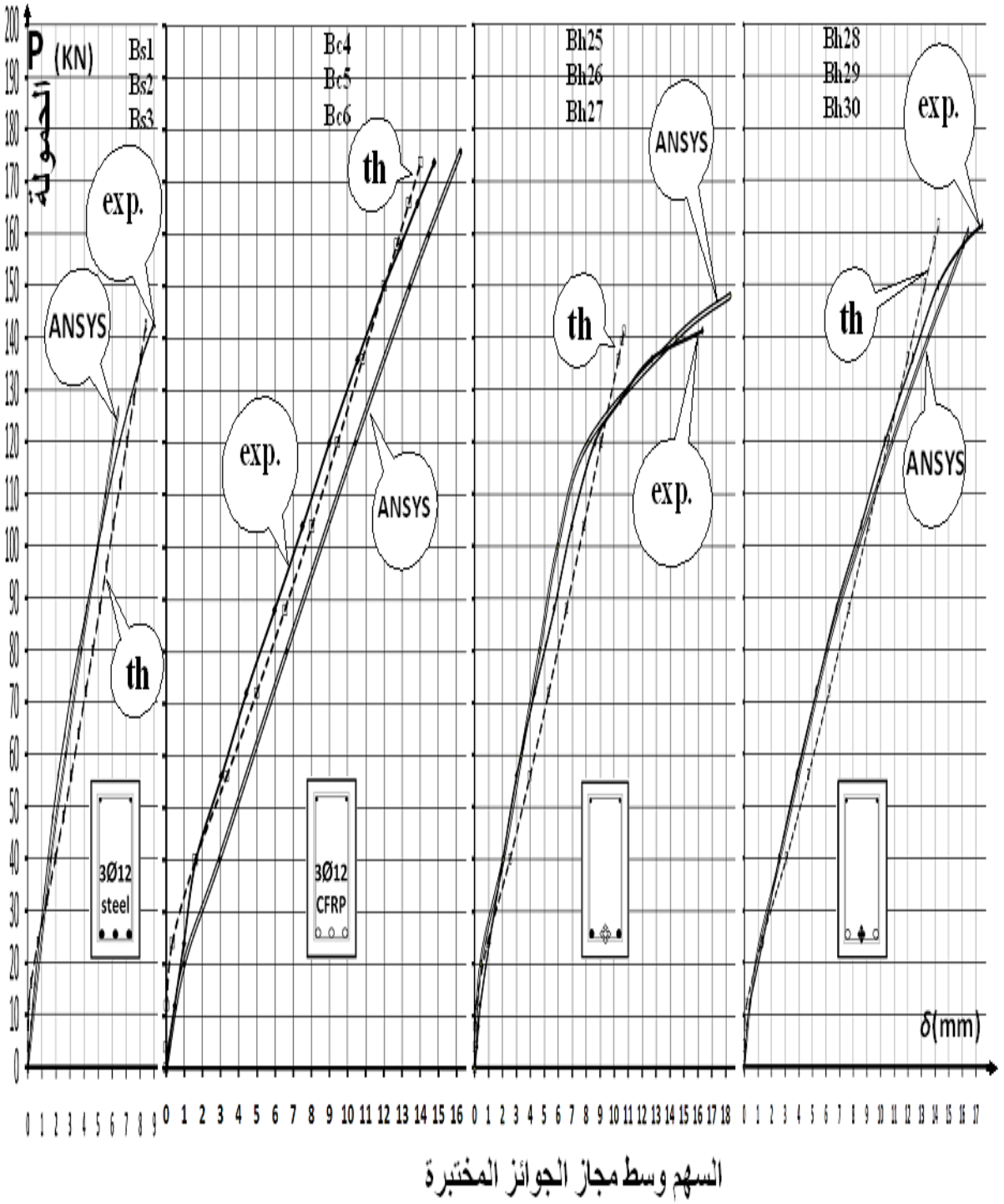
الشكل (5–10) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز جوائز المجموعة **(X)**.

ومن الجدول(5–1) يتبين أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي(1.05–0.95–0.96–0.83) في جوائز المجموعات(IV-III-II-I) بالتتالي. وبشكلٍ عام وضمن هذه المجموعات، فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 0.89، و في الجوائز المسلحة بالكربون تساوي1.01. وأن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي(0.81–1.06–0.81–0.99) في جوائز المجموعات(IV-III-II-I) بالتتالي. وبشكلٍ عام وضمن هذه المجموعات، فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بالفولاذ. وتساوي 0.81 في الجوائز المسلحة بالكربون.



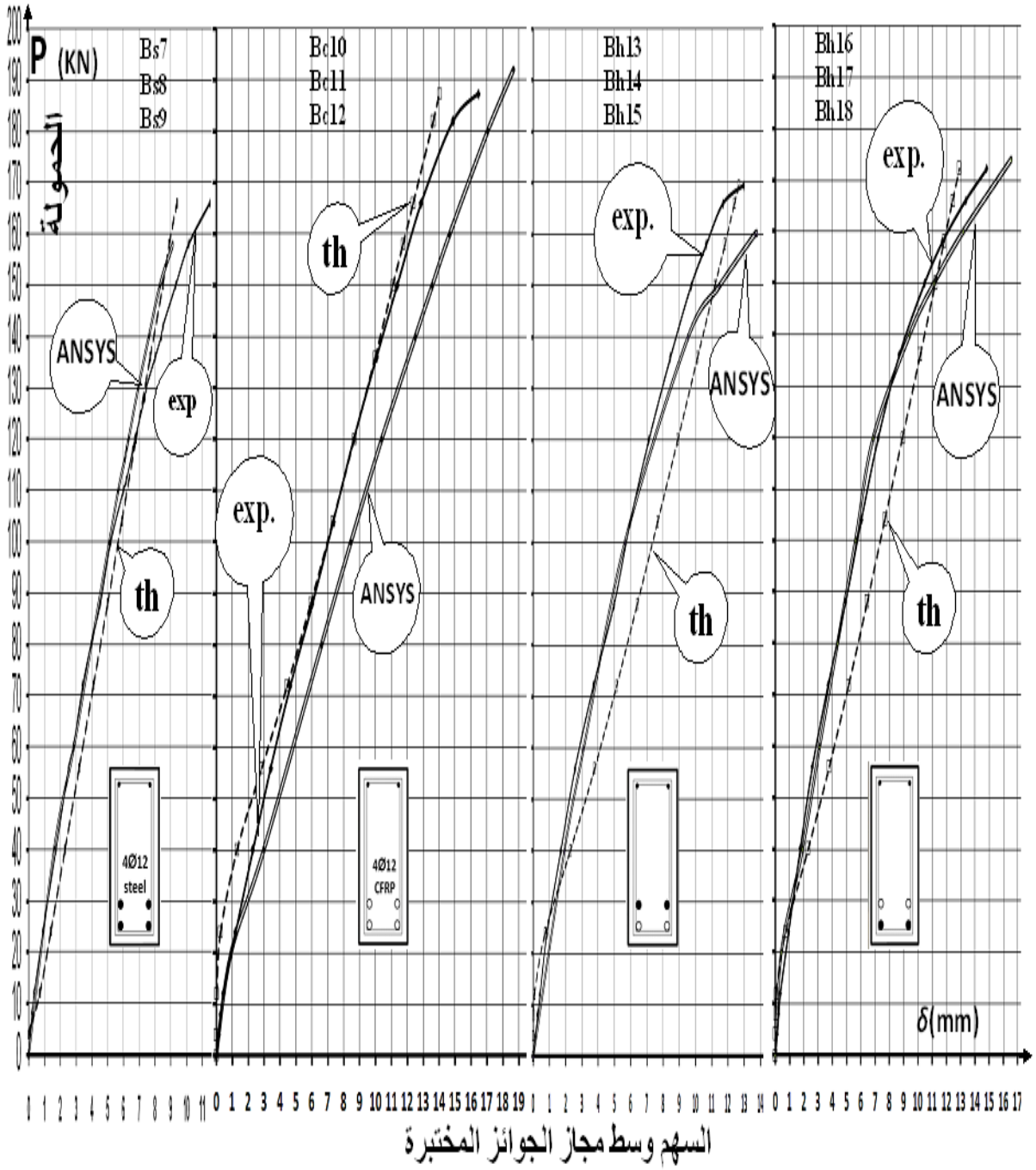
الشكل (5–11) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان المتساوية القطر.

كما أن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي(0.79–0.82–0.76–0.72–0.91–0.93) في جوائز المجموعات (VI-V - X- IX- VIII-VII) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ تساوي0.83 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 0.81 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي0.82.



الشكل (5–12) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان المختلفة القطر.

نلاحظ أيضاً من الجدول(5–1) أن النسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي(0.91–0.95–0.88–0.87–1.02–0.98) في جوائز المجموعات (X- IX- VIII-VII- VI-V) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{\delta_{exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ تساوي 0.94 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي 0.93.



الشكل (5–13) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) ومنحنيات القيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان.

الجدول(5–1) مقارنة نسبة القيم التجريبية للسهم $\delta_{\exp.}$ إلى القيم الحسابية $\delta_{th.}$ والقيم المحددة ببرنامج ANSYS ، δ_{ANSYS}.

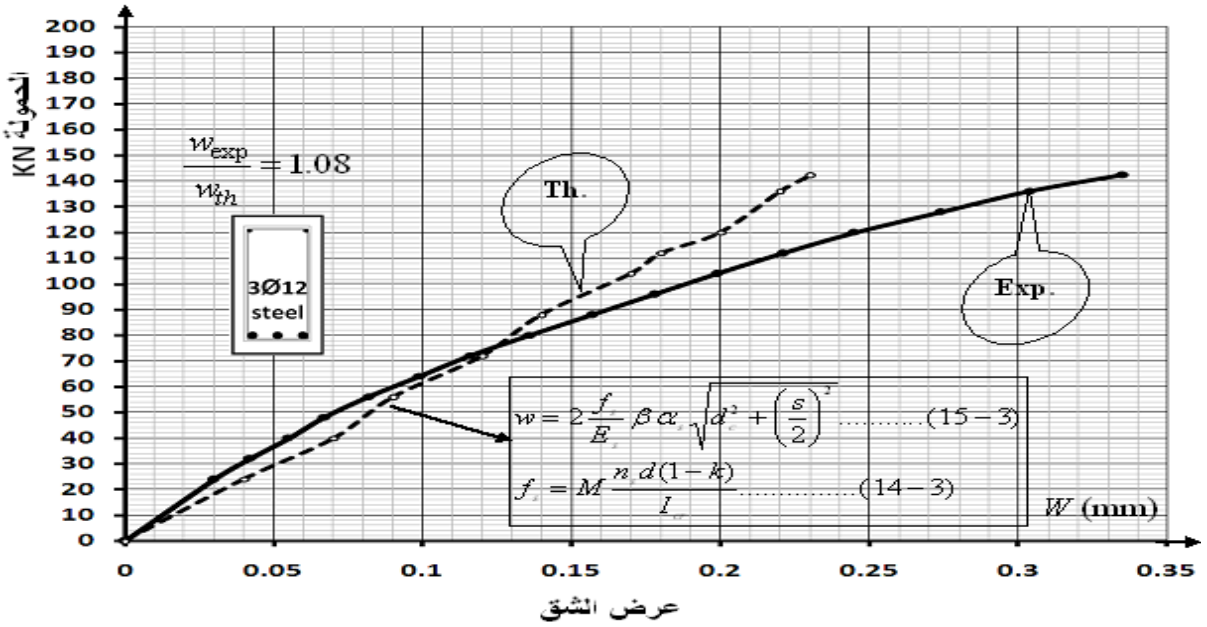
اسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	عند حمولة = $30\%(P_u)$		عند حمولة = $60\%(P_u)$		عند حمولة = $90\%(P_u)$		متوسط نسبة القيمة التجريبية إلى القيمة الحسابية لكل مجموعة		متوسط نسبة القيمة التجريبية إلى القيمة الحسابية للمجموعات المقابلة		
			نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$	نسبة $\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	0.89	0.73	0.98	0.80	1.11	0.96	0.99	0.83	1.03	0.89	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	1.05	0.79	1.02	0.96	1.12	1.11	1.06	0.95			
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	0.68	0.93	0.83	0.94	0.91	1.00	0.81	0.96	0.81	1.01	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	0.77	1.13	0.85	1.00	0.81	1.04	0.81	1.05			
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	0.74	0.61	0.90	0.72	0.99	0.94	0.88	0.76	0.93	0.82	0.83
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	0.76	0.56	0.94	0.71	0.93	0.88	0.87	0.72	0.94		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	1.00	0.82	1.08	0.86	1.00	1.05	1.02	0.91			
	X	Bh28 Bh29 Bh30	1.00	0.83	0.99	0.91	0.94	1.05	0.98	0.93			
	V	Bh13 Bh14 Bh15	0.88	0.69	1.00	0.78	0.85	0.89	0.91	0.79	0.93		0.81
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	0.92	0.70	1.00	0.79	0.93	0.97	0.95	0.82			

نستنتج مما سبق أن النسبة($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ = 1.03) أفضل من النسبة($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$=0.89) بما يخص الجوائز المسلحة بالفولاذ، وأن النسبة ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$=1.01) أفضل من النسبة ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$= 0.81) بما يخص الجوائز المسلحة بالكربون، وفيما يتعلق بالجوائز المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون) نلاحظ أن النسبة ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$ = 0.93) أفضل مع النسبة ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$=0.82)، وبالتالي يمكن ترجيح طريقة العناصر المنتهية والتحليل ببرنامج ANSYS على الطريقة الحسابية من ناحية الدقة في حساب السهم وسط مجاز الجوائز المسلحة بالفولاذ أو المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون). تعتبر نتائج الطريقة الحسابية أفضل من طريقة العناصر المنتهية والتحليل ببرنامج ANSYS في حساب السهم وسط مجاز الجوائز المسلحة بالكربون، ويعود السبب في ذلك إلى أنه تم افتراض تماسك تام بين القضبان الكربونية والبيتون في النموذج التحليلي ببرنامج ANSYS، بينما في الحقيقة هناك تناقص في هذا التماسك مع ازدياد الحمولات على الجوائز المسلحة بالكربون.

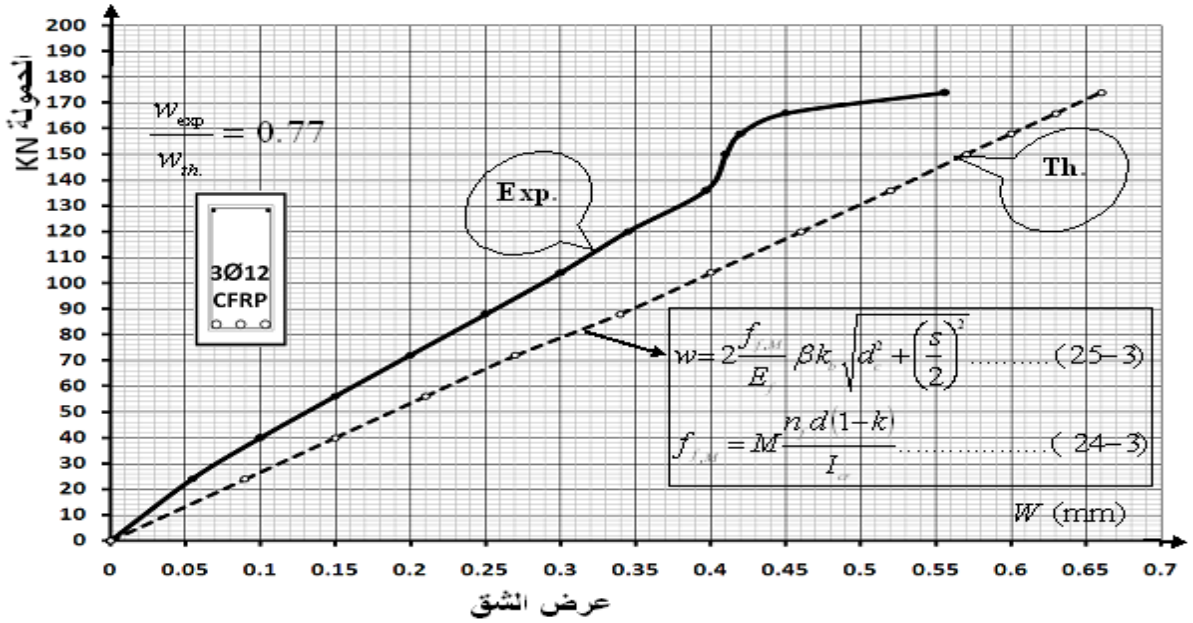
5-2-2- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بعرض الشق:

تبين الأشكال من(5-14) إلى(5-23) مقارنة بين منحنيات(حمولة- عرض الشق) للقيم التجريبية ($W_{\exp.}$) والقيم الحسابية($W_{th.}$) لمجموعات الجوائز(X-IX-VIII-VII-VI-V-IV-III-II-I)، ويظهر كل شكل العلاقات الحسابية الحاكمة والمستخدمة لحساب عرض الشق.

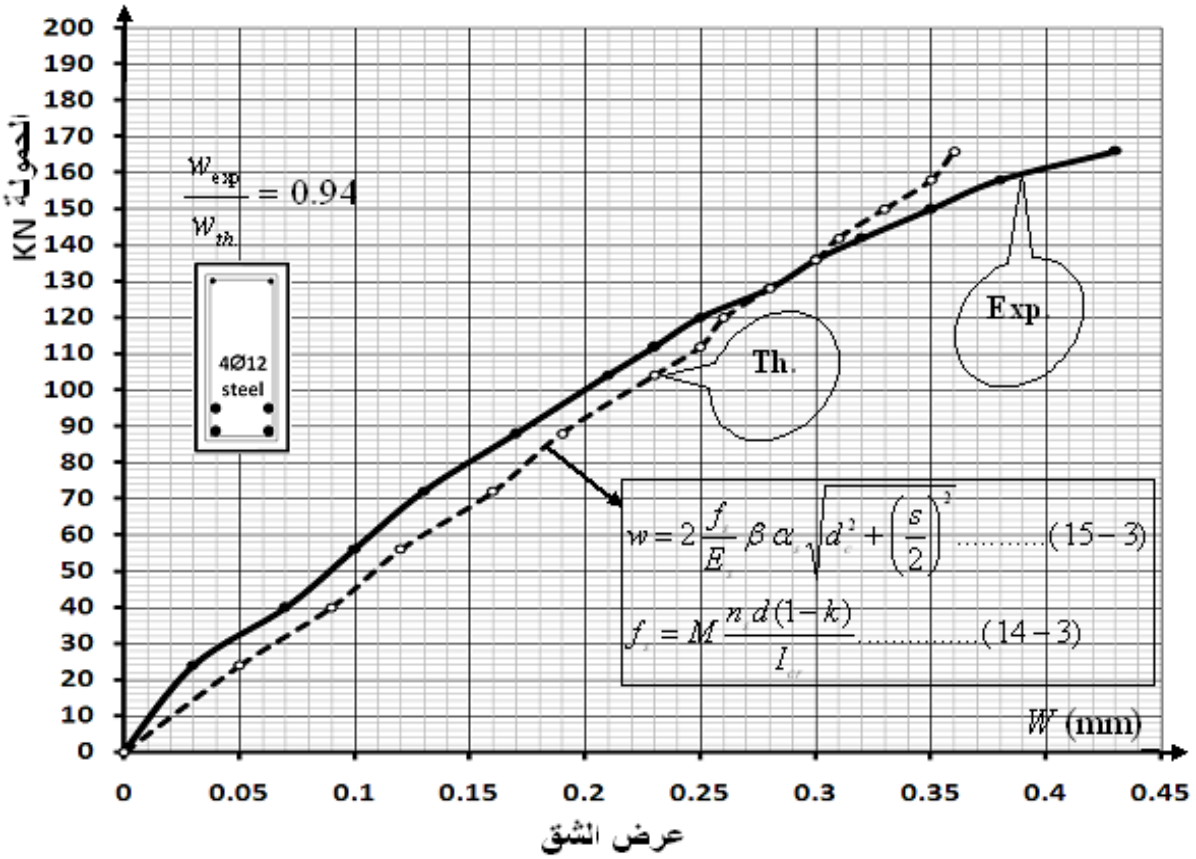
يبين الشكل(5-24) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة من القضبان، ويبين الشكل (5-25) مقارنة لهذه القيم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقتين من القضبان.



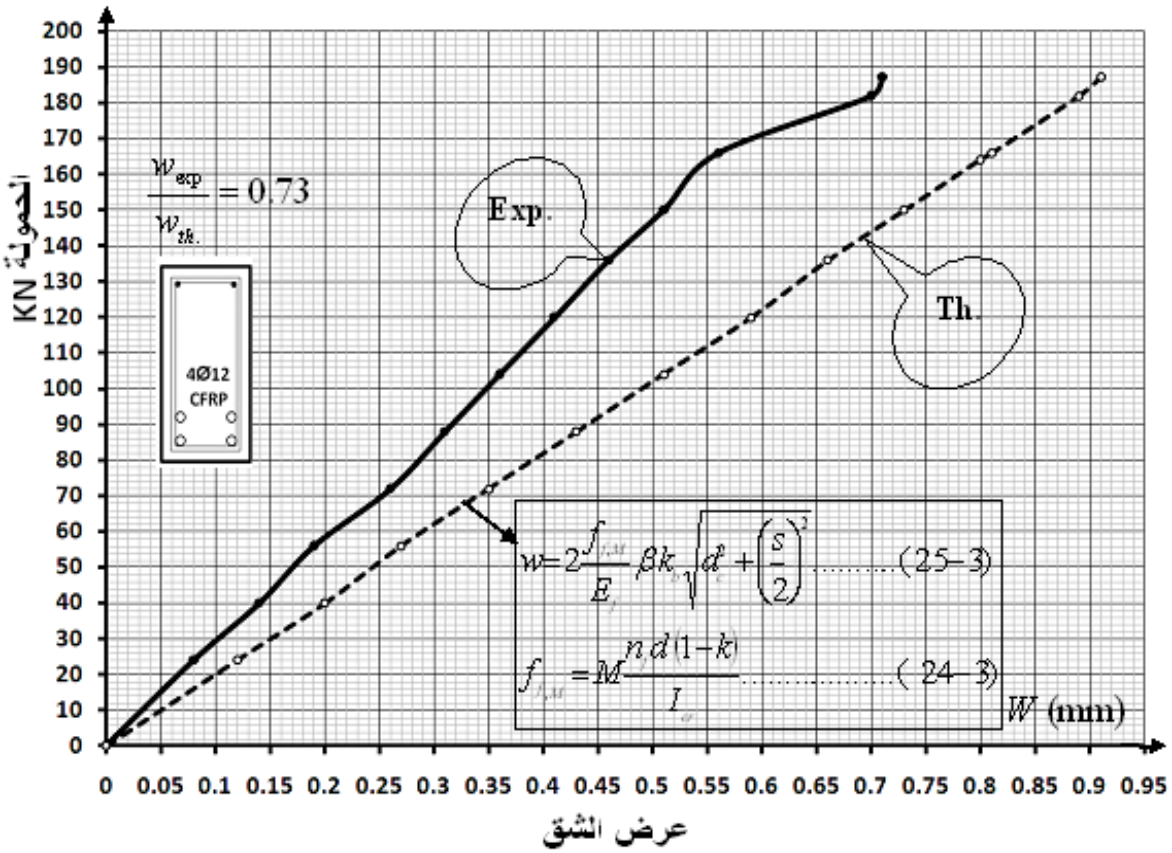
الشكل (5-14) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(I)**.



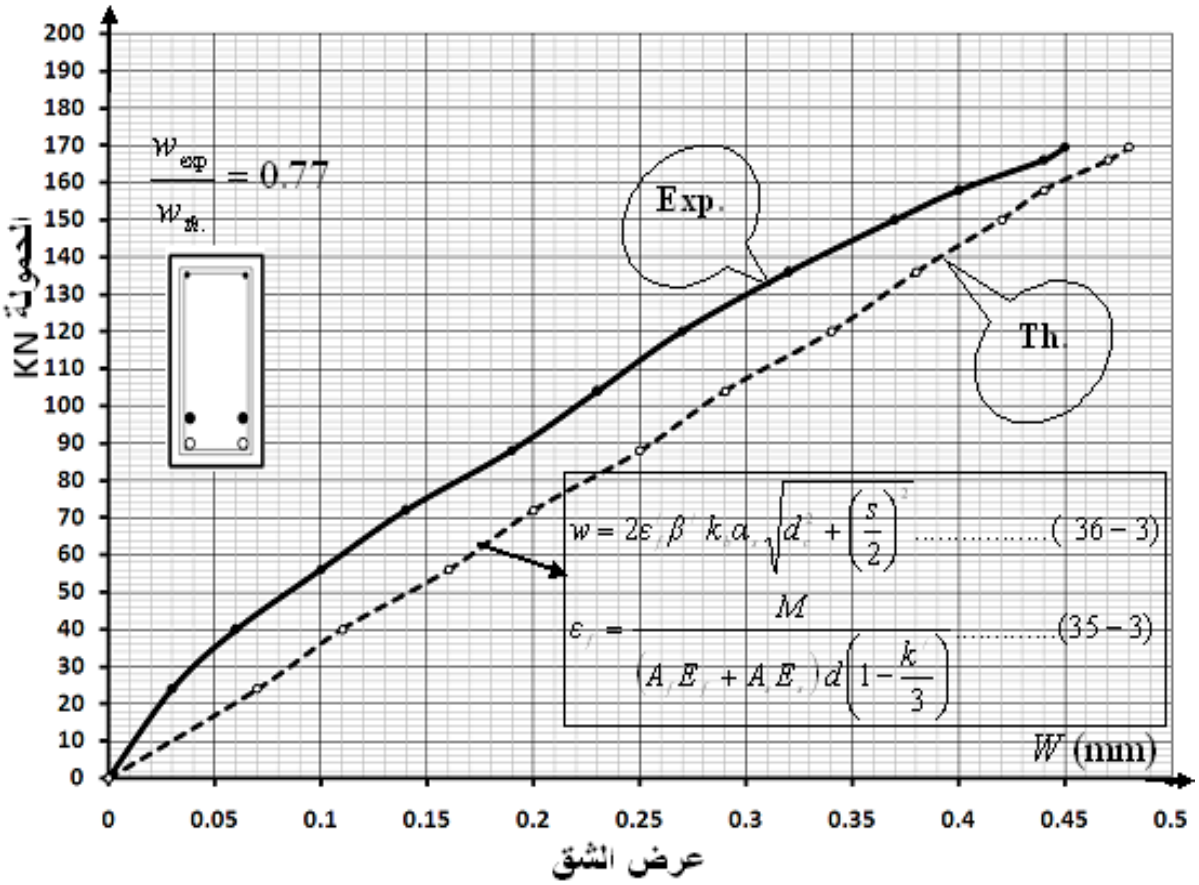
الشكل (5-15) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(II)**.



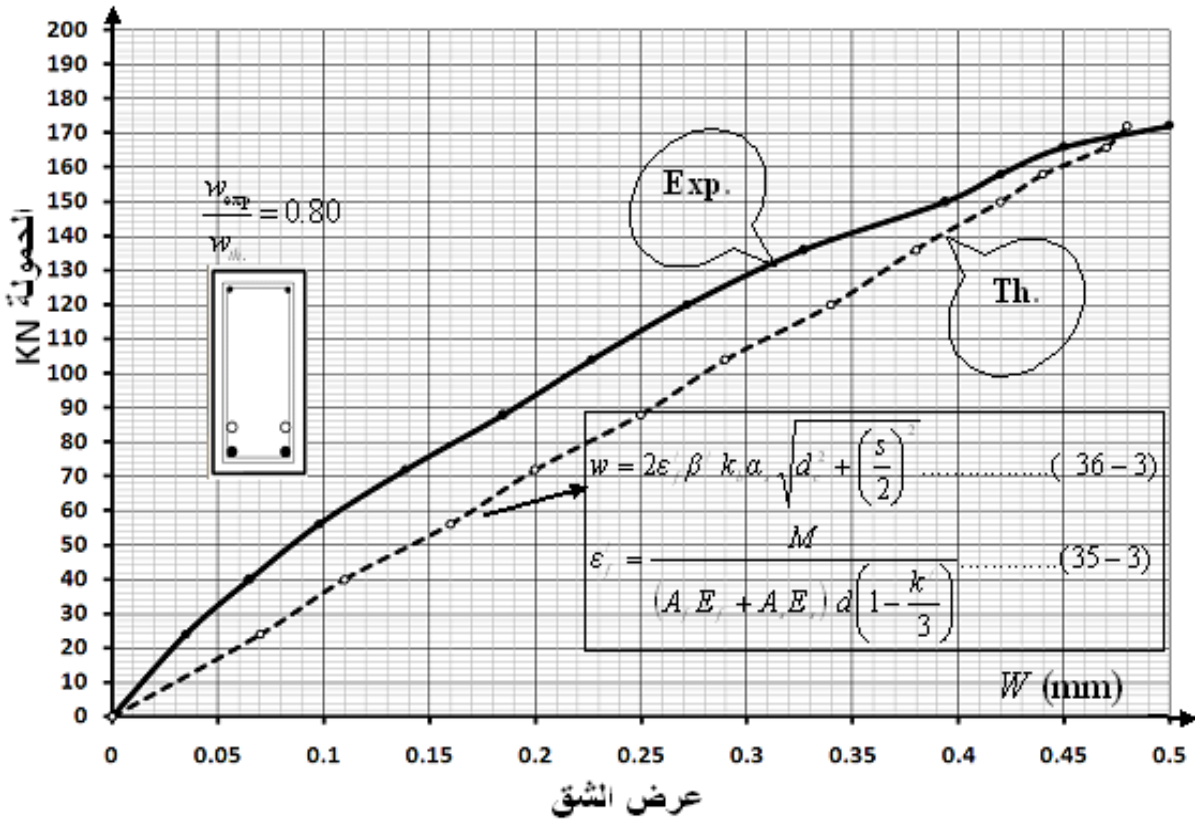
الشكل (5-16) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(III)**.



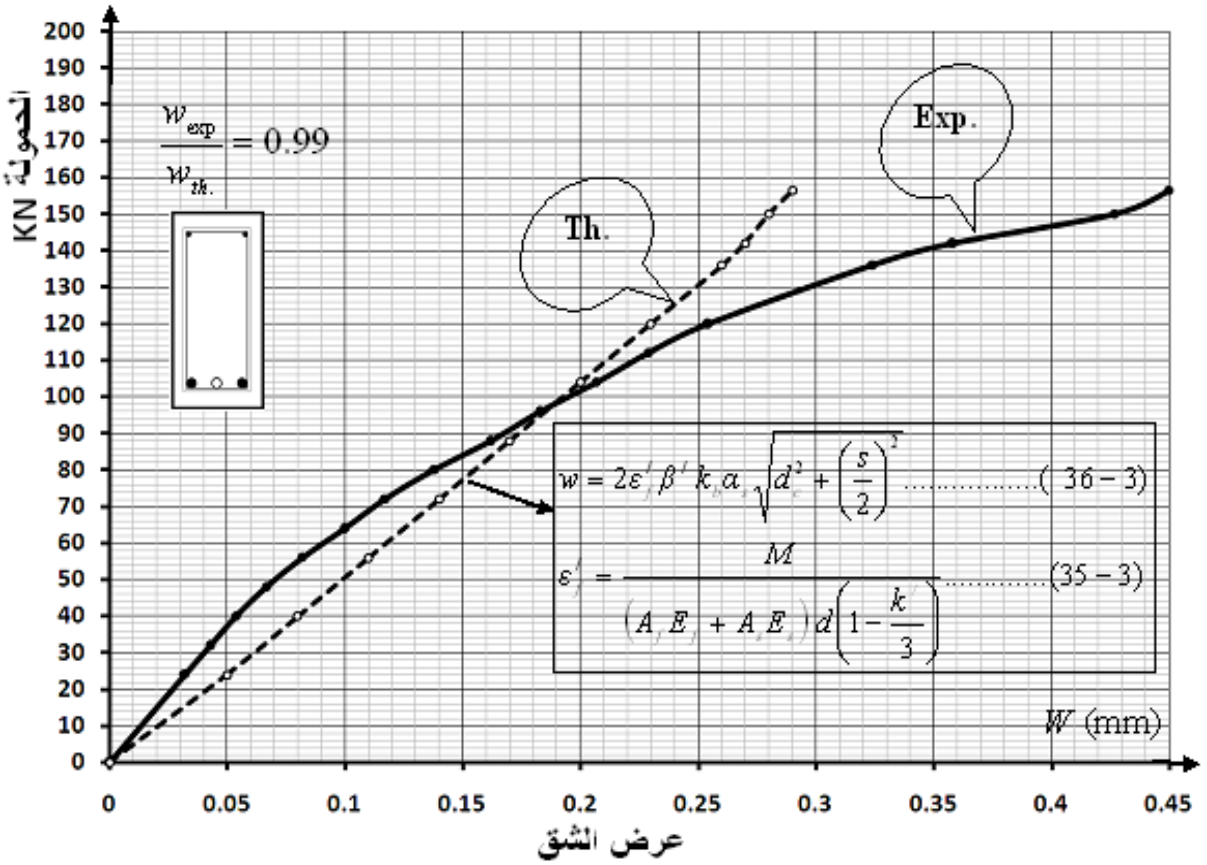
الشكل (5-17) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(IV)**.



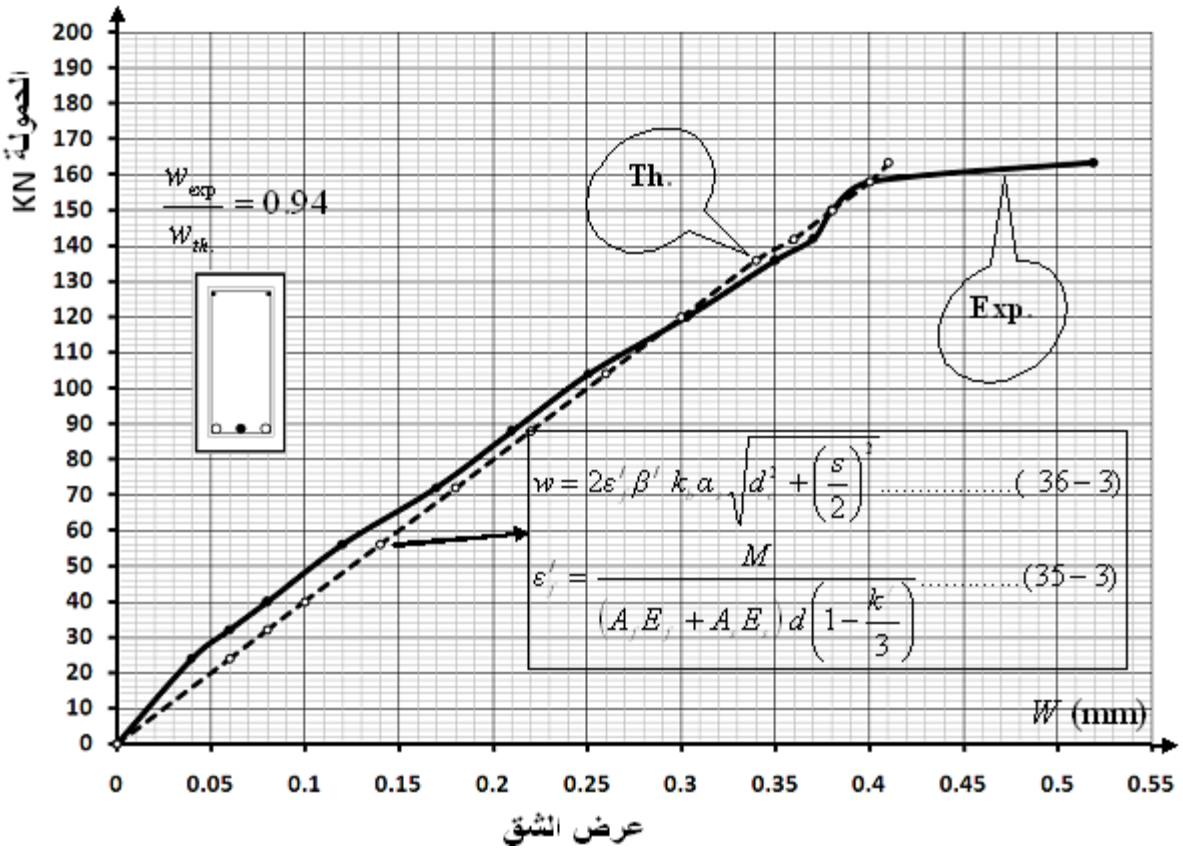
الشكل (5–18) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(V)**.



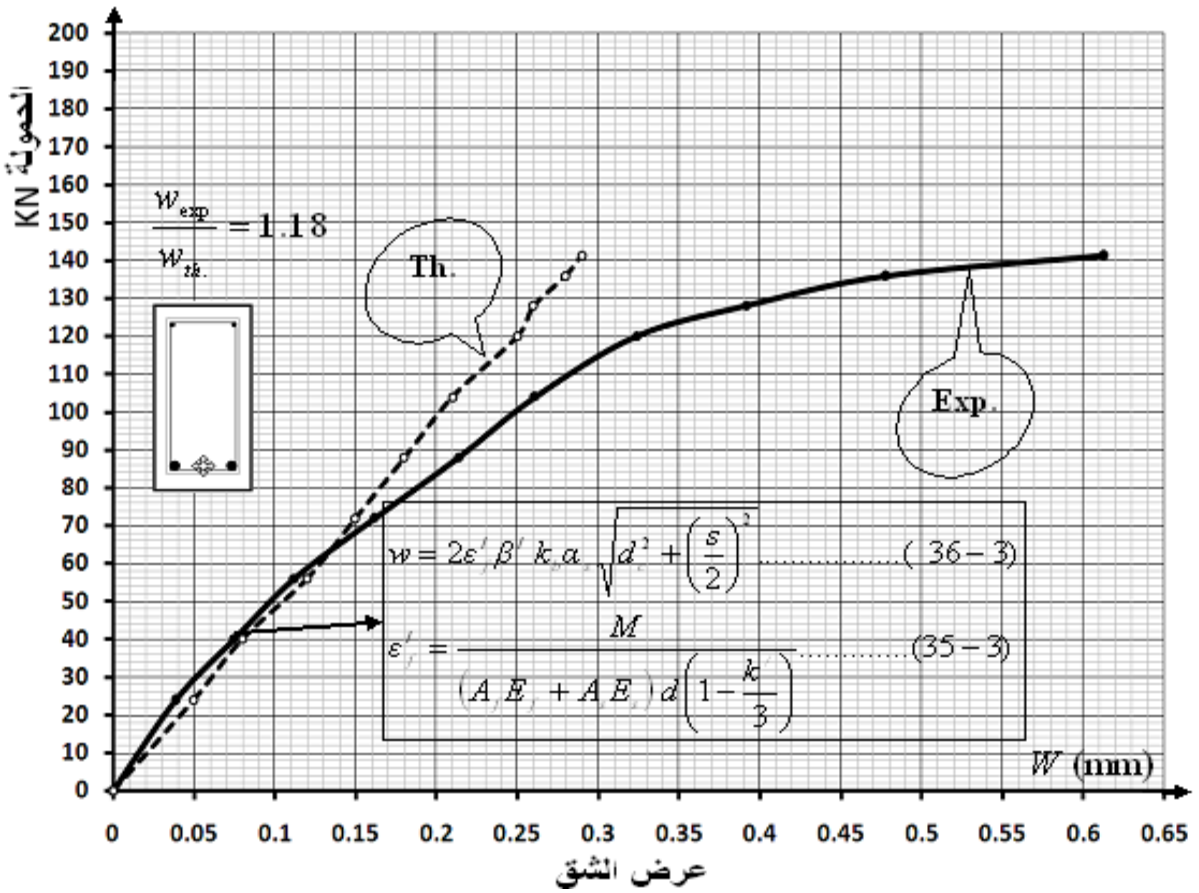
الشكل (5–19) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VI)**.



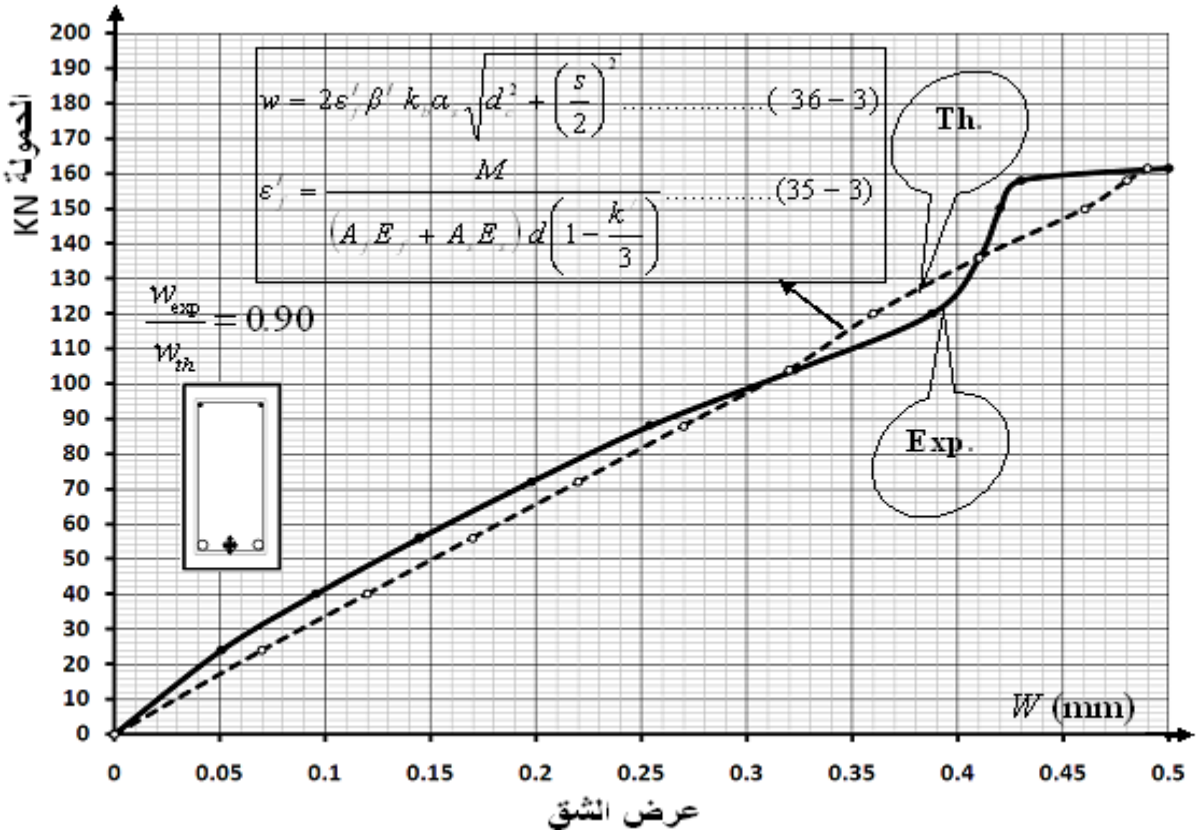
الشكل (5–20) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VII)**.



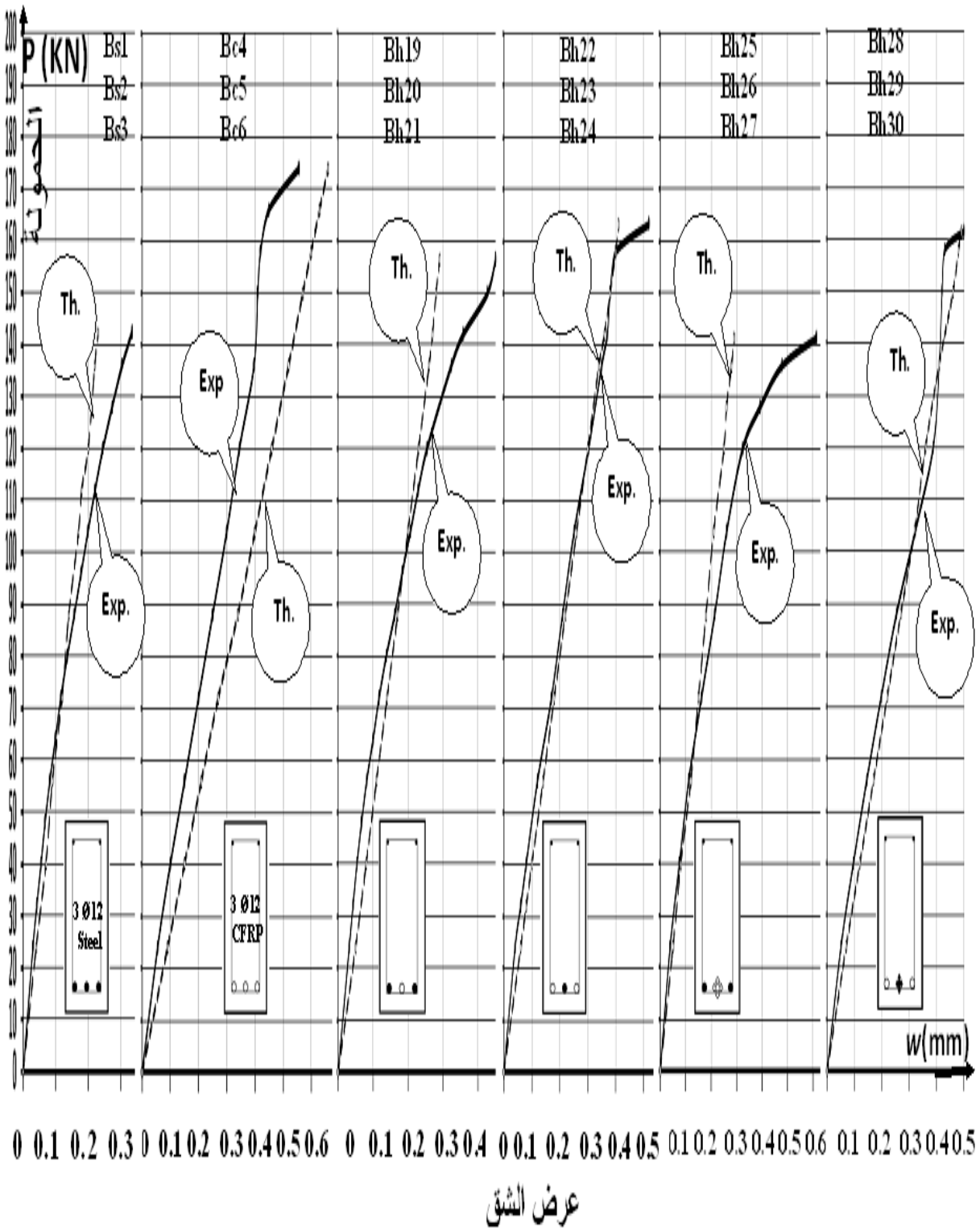
الشكل (5–21) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(VIII)**.



الشكل (5–22) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(IX)**.



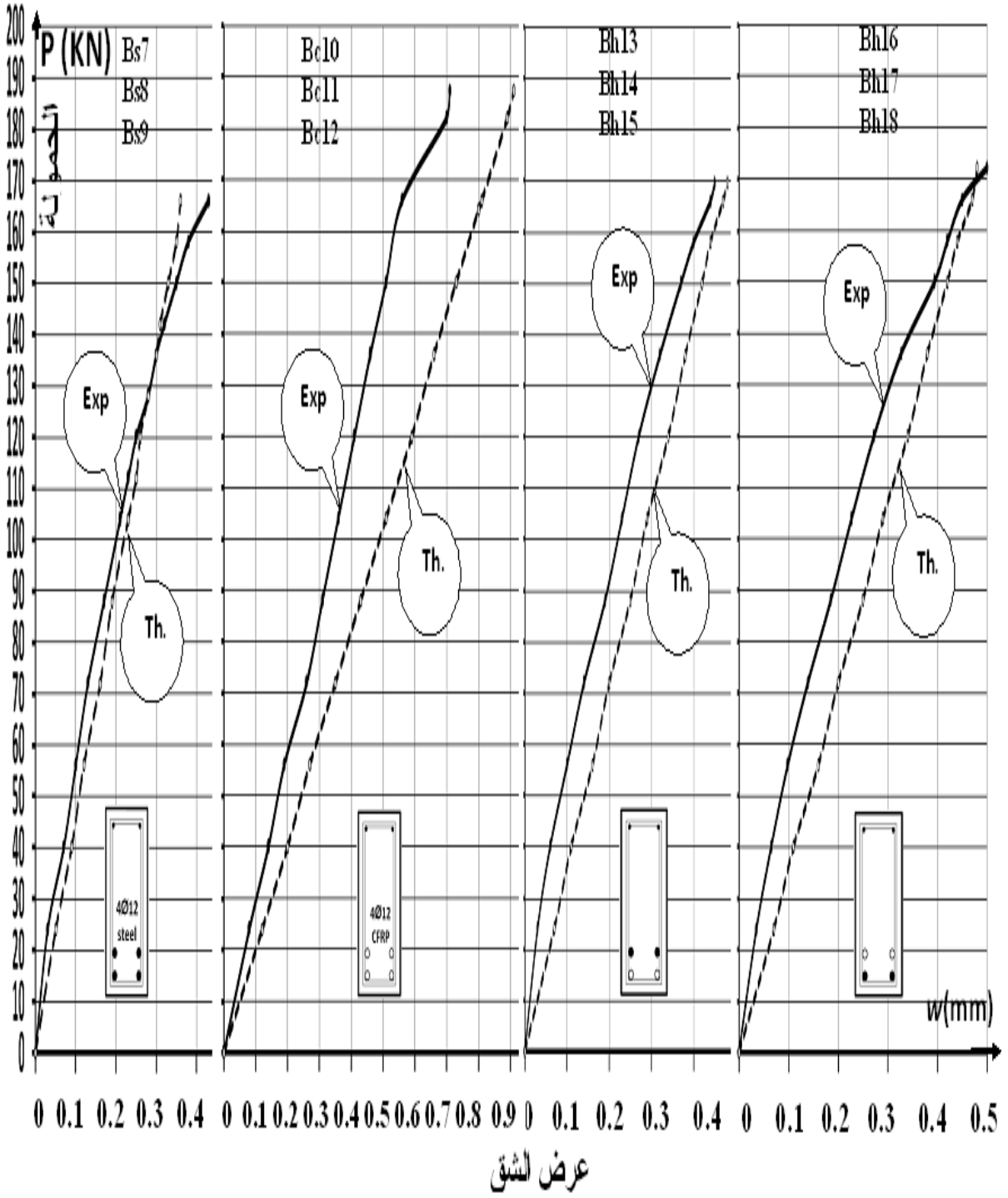
الشكل (5–23) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في جوائز المجموعة **(X)**.



الشكل (5–24) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في حالة التسليح بطبقة واحدة من القضبان.

وحددت القيم الحسابية لعرض الشق اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية والمبينة في الأشكال(3–2) و(3–3) و(3–4).

ويبين الجدول (5–2) مقارنة لنسبة القيم التجريبية إلى القيم الحسابية لعرض الشق في الجوائز المختبرة(أي النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$)، وذلك عند ثلاثة مستويات للتحميل(أي عند 30% و60% و90% من الحمولة القصوى لكل مجموعة جوائز).



الشكل (5–25) مقارنة بين منحنيات القيم التجريبية (.exp) و منحنيات القيم الحسابية (.th) لعرض الشق في حالة التسليح بطبقتين من القضبان.

الجدول (5−2) مقارنة نسبة القيم التجريبية(.exp) لعرض الشق إلى القيم الحسابية(.th)، ($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$).

نوع التسليح واسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	نسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ عند حمولة = $30\%(P_u)$	نسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ عند حمولة = $60\%(P_u)$	نسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ عند حمولة = $90\%(P_u)$	متوسط $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ لكل مجموعة	متوسط $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ للمجموعات المقابلة	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	0.86	1.11	1.27	1.08	1.01	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	0.86	0.91	1.05	0.94		
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	0.77	0.76	0.77	0.77	0.75	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	0.72	0.73	0.75	0.73		
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	0.72	1.00	1.28	0.99	1.01	0.90
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	0.84	0.97	1.00	0.94		
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	1.00	1.17	1.38	1.18		
	X	Bh28 Bh29 Bh30	0.75	1.00	0.95	0.90		
	V	Bh13 Bh14 Bh15	0.61	0.80	0.91	0.77	0.79	
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	0.64	0.79	0.98	0.80		

ومن الجدول (5−2) يتبين أن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي(0.73−0.94−0.77−1.08) في جوائز المجموعات (I-II- III-IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ في الجوائز المسلحة بالفولاذ تساوي 1.01، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 0.75. كما أن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي(0.77−0.80−0.99−0.94−1.18−0.90) في جوائز المجموعات (V-VI- VII-VIII- IX- X) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان الهجينة التسليح. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ تساوي 1.01 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح ، وهذه النسبة تساوي 0.79 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي0.90.

ومما سبق نستنتج أن النسبة ($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$=1.01) تشير إلى دقة الطريقة الحسابية في حساب عرض الشق في الجوائز المسلحة بالفولاذ، وأن النسبة ($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$=0.75) تشير إلى أن استخدام عامل التماسك (K_b =1.2) بين القضبان الكربونية والبيتون وكما يوصي الكود ACI440 [7]، أدى إلى تباعد الحل الحسابي عن القيم التجريبية في الجوائز المسلحة بالكربون. وفيما يخص الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون) نلاحظ أن النسبة ($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$=0.90) تشير إلى دقة الطريقة الحسابية المعتمدة لحساب عرض الشق في هذه الجوائز. وبالتالي أعطت الطريقة الحسابية نتائج جيدة في الجوائز المسلحة بالفولاذ وكذلك المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ+كربون)، وكانت هذه النتائج بعيدة عن القيم التجريبية في الجوائز المسلحة بالكربون ، لذلك يتطلب عامل التماسك K_b دراسة أكثر تعمقاً.

5-2-3- مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بقدرة التحمل على الانعطاف:

يبين الشكل (5-26) مقارنة بين القيم التجريبية $M_{\exp.}$ والقيم الحسابية $M_{th.}$ والقيم المحددة باستخدام برنامج ANSYS M_{ANSYS} بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة والمسلحة بطبقة واحدة أو طبقتين من القضبان، حيث أن القيم الحسابية لعزم الانعطاف المقاوم حددت اعتماداً على العلاقات التي سبق شرحها وفق تسلسل الخطوات المذكورة في المخططات المنهجية والمبينة في الأشكال(3-2) و(3-3) و(3-4)، كما يبين الشكل(5-6) مقارنة النسب ($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$) وكذلك($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$) لجميع الجوائز المختبرة.

يبين الجدول(5-3) مقارنة القيم التجريبية $M_{\exp.}$ مع القيم الحسابية $M_{th.}$ والقيم المحددة ببرنامج ANSYS M_{ANSYS} بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة، وبنفس الجدول نلاحظ نسبة القيم التجريبية إلى القيم الحسابية ($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$)، وكذلك نسبة القيم التجريبية إلى القيم المحددة ببرنامج ANSYS ($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$).

وعند مقارنة النتائج الواردة في الشكل (4-24) مع النتائج الواردة في الشكل(3-10) سنجد ما يلي:

1- في الجوائز المسلحة بالفولاذ فقط:

أ - كانت الحمولة النظرية (الحسابية) أكبر من التجريبية بحدود 7%.

ب - باستخدام ANSYS نلاحظ قدرة التحمل في ANSYS أصغر من التجريبية بنسب تراوحت بين %(13-3)، كما أنها أصغر من النظرية (الحسابية) بنسب تراوحت بين %(13-10).

2- في جميع الجوائز المسلحة بتسليح هجين أو بقضبان كربونية:

تكون فيها قدرة التحمل التجريبية أكبر من تلك التي حصلنا عليها من الدراسة النظرية (الحسابية) بنسب تراوحت بين %(15-10)، كما هو وارد في الجدول (3-7).

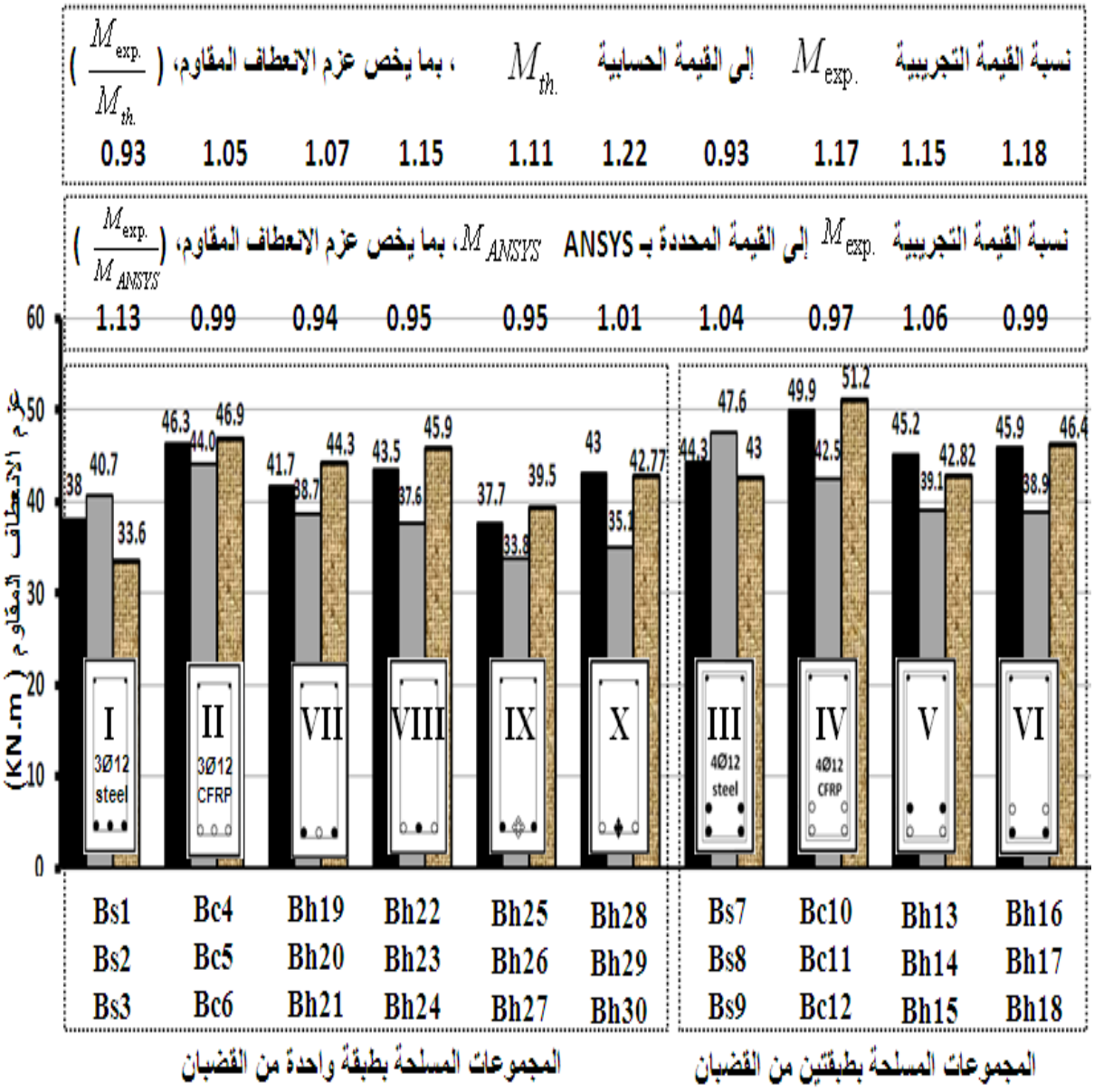
3- في جميع الجوائز المسلحة بتسليح هجين أو بقضبان كربونية وعند استخدام ANSYS:

تكون فيها قدرة التحمل التجريبية أصغر من تلك التي حصلنا عليها من استخدام ANSYS بحوالي2%، أي تقترب القيم التحليلية (ANSYS) من القيم التجريبية.

ويمكن تفسير ذلك بما يلي على الرغم من الفرضيات التي تشوبها العديد من الملاحظات:

- نمذجة التماسك بين القضبان والبيتون.
- نمذجة حلزنة القضبان الفولاذية (الاحتكاك).
- مخطط (الإجهاد – تشوه) للبيتون المفروض في النمذجة.
- اعتبار مادة البيتون مادة متجانسة.
- اختلاف مقاومة البيتون بين المجموعات المختبرة.

كل ذلك يجعل الركون إلى نتائج التحليل باستخدام ANSYS محل شك، ويؤكد على ضرورة النتائج التجريبية في إثبات صحة النتائج الحسابية وفق علاقات الكودات والعلاقات المقترحة.



الشكل (5–26) مقارنة بين القيم التجريبية(exp.) ■ ، والقيم الحسابية(th.) ▨ ، والقيم المحددة بـ(ANSYS)▣، بما يخص عزم الانعطاف المقاوم في الجوائز المختبرة.

وبالعودة إلى الجدول(5-3) يتبين أن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي(0.93-1.05-0.93-1.17) في جوائز المجموعات (I-II-III-IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 0.93، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 1.11.

الجدول(5-3) مقارنة نسبة القيم التجريبية لعزم الانعطاف المقاوم $M_{\exp.}$ إلى القيم الحسابية $M_{th.}$ وقيم M_{ANSYS} .

اسم مجموعة الجوائز		اسم الجوائز	عزم الانعطاف التجريبي $M_{\exp.}$ (KN.m)	عزم الانعطاف الحسابي $M_{th.}$ (KN.m)	عزم الانعطاف وفق ANSYS M_{ANSYS} (KN.m)	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ لكل مجموعة	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ لكل مجموعة	نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ للمجموعات المقابلة		نسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$ للمجموعات المقابلة	
تسليح بالفولاذ	I	Bs1 Bs2 Bs3	38.00	40.70	33.60	0.93	1.13	0.93		1.09	
	III	Bs7 Bs8 Bs9	44.30	47.60	42.80	0.93	1.04				
تسليح بالكربون	II	Bc4 Bc5 Bc6	46.30	44.00	46.90	1.05	0.99	1.11		0.98	
	IV	Bc10 Bc11 Bc12	49.90	42.50	51.20	1.17	0.97				
تسليح هجين	VII	Bh19 Bh20 Bh21	41.70	38.70	44.30	1.07	0.94	1.15	1.13	0.99	0.96
	VIII	Bh22 Bh23 Bh24	43.50	37.60	45.90	1.15	0.95				
	IX	Bh25 Bh26 Bh27	37.70	33.80	39.50	1.11	0.95				
	X	Bh28 Bh29 Bh30	43.00	35.100	42.77	1.22	1.01				
	V	Bh13 Bh14 Bh15	45.20	39.10	42.82	1.15	1.06		1.16		1.03
	VI	Bh16 Bh17 Bh18	45.90	38.90	46.40	1.18	0.99				

كما أن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي(1.15-1.18-1.07-1.15-1.11-1.22) في جوائز المجموعات (V-VI-VII-VIII- IX- X) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان(فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام وضمن هذه المجموعات فإن النسبة $\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ تساوي 1.13 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 1.16 في الجوائز

المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي1.15.

يتبين أيضاً من الجدول(5-3) أن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي(1.13-0.99-1.04-0.97) في جوائز المجموعات(I-II-III-IV) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بالفولاذ أو بالكربون على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام فإن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي في الجوائز المسلحة بالفولاذ 1.09، وفي الجوائز المسلحة بالكربون تساوي 0.98.

كما أن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي(1.06-0.99-0.94-0.95-0.95-1.01) في جوائز المجموعات (X- IX- VIII-VII- VI-V) بالتتالي، وهي مجموعات مسلحة بشكلٍ هجين بقضبان (فولاذية وكربونية) على شكل طبقة أو طبقتين من القضبان. وبشكلٍ عام وضمن هذه المجموعات فإن النسبة $\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ تساوي 0.96 في الجوائز المسلحة بطبقة واحدة من القضبان الهجينة التسليح، وهذه النسبة تساوي 1.03 في الجوائز المسلحة بطبقتين من القضبان الهجينة التسليح. أما في جميع الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين فإن هذه النسبة تساوي 0.99.

ومما سبق نستنتج أن النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{th.}}$=0.93) تتقارب مع النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ = 1.09) بما يخص الجوائز المسلحة بالفولاذ، وأن النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$=0.98) أفضل من النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{th.}}$ = 1.11) بما يخص الجوائز المسلحة بالكربون، وفيما يخص الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون) نلاحظ أن النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{ANSYS}}$ = 0.99) أفضل من النسبة ($\frac{M_{exp.}}{M_{th.}}$=1.15). وبالتالي يمكن ترجيح طريقة العناصر المنتهية والتحليل ببرنامج ANSYS على الطريقة الحسابية من ناحية الدقة في حساب قدرة التحمل في جميع الجوائز المختبرة.

5-3- الاستنتاجات conclusions:

عند إجراء مقارنة مباشرة للقيم التجريبية المتعلقة بالسهوم وسط مجاز الجوائز وعرض التشققات وقدرات التحمل مع القيم المحسوبة باستخدام ANSYS، ومع القيم الناتجة من استخدام علاقات الكودين(ACI 318-05 [6] و ACI -440.1R-06 [7]) فيما يخص الجوائز المسلحة بالفولاذ أو المسلحة بالكربون، أو المحسوبة باستخدام العلاقات المطورة والمقترحة فيما يخص الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين، يمكن كتابة الاستنتاجات التالية:

1- إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع الجوائز البيتونية يؤدي إلى زيادة قدرات تحملها، غير أنها تصبح أكثر تشوهاً (سهوم أكبر وعدد تشققات أكثر) بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط.

2- تحت تأثير حمولات استثمارية يزداد عرض الشق في الجوائز المسلحة بالكربون بنسبة تصل إلى 46% مقارنةً مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ، وفي الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين يزداد عرض الشق بنسب تتراوح بين(0-44)% مقارنة مع الجوائز المعيارية وذلك مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية.

3- تبقى قيم السهوم وعرض التشققات الحاصلة في الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين وبطبقتين من القضبان متماثلة إلى مستوى تحميل يساوي 75% من قدرات تحملها، دون أن يؤثر توزع القضبان الكربونية أو الفولاذية في المقطع (في الطبقة العلوية أو السفلية) على ذلك.

4- أعطت العلاقات المعدلة والمقترحة لحساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ + كربون) نتائج جيدة بالمقارنة مع النتائج التجريبية.

5- متوسط نسب القيم التجريبية للسهم إلى القيم الحسابية($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي0.89، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي1.01، وهو يساوي 0.82 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

6- متوسط نسب القيم التجريبية للسهم إلى القيم المحسوبة ببرنامج ANSYS ($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{ANSYS}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي1.03، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي0.81، وهو يساوي 0.93 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

7- متوسط نسب القيم التجريبية لعرض الشق إلى القيم الحسابية($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي1.01، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي 0.75. وهو يساوي 0.90 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

8- متوسط نسب القيم التجريبية للعزم المقاوم إلى القيم الحسابية ($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي 0.93، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي 1.11. وهو يساوي 1.15 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

9- متوسط نسب القيم التجريبية للعزم المقاوم إلى القيم الحسابية ($\frac{M_{\exp.}}{M_{ANSYS}}$) في الجوائز المسلحة بالفولاذ يساوي 1.09، وفي الجوائز المسلحة بالكربون يساوي 0.98. وهو يساوي 0.99 في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين.

5-4- التوصيات Recommendations:

1- ينصح باستخدام القضبان الكربونية بشكلٍ كلي أو جزئي (تسليح هجين) في تسليح العناصر البيتونية المعرضة لقدر كبير من التلوث أو الملوحة، وفي حالة التسليح بطبقتين ننصح بوضع القضبان الكربونية في الطبقة السفلى بالقرب من سطح العناصر، حيث يعطينا ذلك إمكانية لزيادة سماكة طبقة التغطية البيتونية الخاصة بالقضبان الفولاذية الواقعة في الطبقة العلوية لحمايتها من الصدأ.

2- أدى استخدام العلاقات المعدلة والمقترحة لحساب السهم وعرض الشق وقدرة التحمل في الجوائز المسلحة بشكلٍ هجين(فولاذ + كربون) إلى إعطاء نتائج جيدة، حيث كانت نسبة السهم التجريبي إلى السهم الحسابي($\frac{\delta_{\exp.}}{\delta_{th.}}$ = 0.82)، ونسبة عرض الشق التجريبي إلى عرض الشق الحسابي ($\frac{w_{\exp.}}{w_{th.}}$ =0.90)، و نسبة عزم الانعطاف التجريبي إلى العزم الحسابي ($\frac{M_{\exp.}}{M_{th.}}$ =1.15)، وهي نتائج مرضية بالمقارنة مع النتائج التجريبية. وتعتبر هذه العلاقات أداة بسيطة وسهلة الاستخدام في عملية الحساب، غير أنها تحتاج للمزيد من الدراسة وإجراء التجارب للتحقق من صلاحيتها لحالات تحميل أخرى.

3- يتطلب عامل التماسك K_b بين القضبان الكربونية والبيتون دراسة معمقة، لأن إعطائه قيمة تساوي 1.2 كما يوصي الكود ACI440 [7]، أدى إلى تباعد القيمة الحسابية لعرض الشق عن القيمة التجريبية في الجوائز المسلحة بالكربون.

4- اختبرت الجوائز البيتونية المسلحة بشكلٍ هجين (فولاذ+كربون) تحت تأثير حمولات قصيرة الأمد، ولا يزال سلوك هذه العناصر تحت تأثير حمولات طويلة الأمد أو حالات تحميل أخرى بحاجة للدراسة.

5- الحاجة لإصدار ملحق بالكود العربي السوري خاص بحساب وباستخدامات المواد المركبة البوليميرية FRP كمواد تقوية أو كمواد تسليح، كون سورية (وخصوصاً المنطقة الساحلية) تقع في منطقة رطبة وحارة وهذا ما يزيد من إمكانية الصدأ والتهالك في العناصر البيتونية المسلحة بالفولاذ.

References المراجع:

[1]- Abdalla, H.A.(2002). *Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Composite Structures. Vol. **6**, pp. 63-71.

[2]- Aiello, M. A.; Ombres, L. (2002). *Structural performances of concrete beams with hybrid -fiber-reinforced polymer-steel- reinforcements*. J. Compos. Constr. Vol.**6**. № **2**, pp. 133–140.

[3]- Al-Sunna, R. (2006). **Deflection Behaviour of FRP Reinforced Concrete Flexural Members.** A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The Faculty of Engineering, The University of Sheffield: UK.

[4]- American Concrete Institute, ACI. (1995). **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95)**. USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 318.

[5]- American Concrete Institute, ACI. (2003). **Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-03)**. USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 440.

[6]- American Concrete Institute, ACI. (2005). **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)**. USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 318.

[7]- American Concrete Institute, ACI. (2006). **Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-06**. Detroit, USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 440.

[8]- American Concrete Institute, ACI. (2012). **Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-12**. Detroit, USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 440.

[9]- ANSYS. (2005). **ANSYS User Manual Revision 10**. Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS ,Inc.

[10]- Ashraf, M.M. (2012). *Strengthening of concrete beams having shear zone openings using orthotropic CFRP modeling*. Ain Shams Engineering Journal. Vol.**2** , № **5** , pp.1-14.

[11]- Barris, C.; Torres, L.; Turon, A.; Baen, M.; and Catalan, A. (2009). *An Experimental Study of The Flexural Behaviour of GFRP RC Beams and Comparison with Prediction Models*. J. Composite Structures. № 10, pp. 1-32.

[12]- Benmokrane, B.; Chaallal, O.; and Masmoudi, R. (1996). *Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars*. ACI Structural Journal. Vol. **93**, № **1**, pp. 46-55.

[13]- Bokarev, S.A.; Smerdov, D.N. (2010). *The nonlinear analysis of bending reinforced concrete structures strengthened by composite materials.* Vestnik TGASU. № **2**, pp. 114-125.

[14]- BSI. (1985). **Structural Use of Concrete –Part 2**, Code of Practice for Special Circumstances (BS8110-2:1985), including amendments No. 1 (1989) and 2 (2001). England: British Standard Institution.

[15]- CEB. (1993). **CEB -FIP MODEL CODE 1990.** Brussels: Comite Euro-International du Beton, Thomas Telford Services Ltd.

[16]- CEN, EUROCODE 2 .(1992). **Design of Concrete Structures – Part 1, General rules and rules for buildings.** Brussels: Comite Europeen de Normalisation.

[17]- CSA. (2002). **Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA-S806-02)**. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association.

[18]- El-Mogy, M. (2011). **Behaviour of Continuous Concrete Beams Reinforced with FRP Bars**. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The Faculty of Graduate Studies, The University of Manitoba: Canada.

[19]- Elyasian, I.; Abdoli, N.; and Ronagh, H.R.(2006). *Evaluation Of Parameters Effective In FRP Shear Strengthening Of RC Beams Using FE Method*. Asian Journal Of Civil Engineering. Vol. **7**, № **3**, pp. 250-257.

[20]- FIB. (1999). **Structural Concrete, Textbook on Behaviour, Design and Performance, Bulletin 1**. Switzerland: Federation internationale du beton.

[21]- Houssam, A.T.; Mohamed,S.(2000). *Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars*. ACI Structure Journal. Vol.**97**, № **5**, pp. 712-719.

[22]- Ibrahim, A.; Mohammed, M. (2009). *Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates*. European Journal of Scientific Research. Vol.**30** № **4**, pp. 526-541.

[23]- ISIS. (2001). **Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, Design Manual No. 3**. Manitoba, Canada: Intelligent Sensing for Innovative Structures.

[24]- IStructE. (1999). **Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre composite Reinforcement**. London: SETO Ltd.

[25]- Kachlakev, D. (2001). **Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures strengthened With FRP Laminates**. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Civil and Environmental Engineering Department, California Polytechnic State University: USA.

[26]- Lawrence, C. B. (2006). **Composites for construction , Structural Design with FRP Materials**. New Jersey, USA: JOHN WILEY & SONS, INC.

[27]- Leung, H.Y.; Balendran, R.V. (2003). *Flexural behaviour of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars*. J. Struct. Surv. Vol. **21**. № **4**, pp.146–157.

[28]- Leung, H.Y.; Kitipornchai, S.; Balendran, R.V.; and Leung, A.Y.T. (2002). *Analytical Behaviour Of Concrete Beams Reinforced With Steel Rebars And FRP Rods*. Advances In Building Technology. Vol. **1**, pp. 803-810.

[29]- Masmoudi, R.; Theriault, M.; and Benmokrane, B. (1998). *Flexural Behaviour of Concrete Beams reinforced with Deformed Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Rods*. ACI Structural Journal. Vol. **95**, № **6**, pp. 665-676.

[30]- Mohammed, M. (2010). *Finite Element Analysis Of Shear Deficient Large Size Reinforced Concrete Beams*. Diyala Journal of Engineering Sciences. Vol. **3** , № **2** , pp. 1-15.

[31]- Muhammad, M.R.; Ali, N.; Faris, A.; and Didier, T. (2008). *Aspects of Behaviour of CFRP Reinforced Concrete Beams in Bending*. Construction and Building materials. Vol.**22**, pp. 277-285.

[32]- Saadatmanesh, H.; Ehsani, R. (1991). *Fiber composite bar for reinforced concrete construction*. Journal of Composite Materials. Vol.**25**, № **1**, pp. 188–203.

[33]- Saifullah, M.; Nasir,U.; Uddin, S.; Hossain, M.A.; and Rashid, M.H. (2011). *Experimental and Analytical Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam*. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS. Vol. **11**, № **1**, pp. 188-196.

[34]- Saikia, B. (2006). *Strength and Serviceability Performance of Beams Reinforced with GFRP Bars in Flexure*. Construction and Building Materials. Vol. **21**, № **9**, pp. 1709-1719.

[35]- Tan, K.H. (1997). **Behaviour of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams.** Proc., 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3). Japan: Sapporo.

[36]- Toutanji, H. A.; Saafi, M. (January, 1999)**. Deflection and Crack Width Predictions of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars**. Proceedings, Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. U.S.A.: Detroit.

[37]- Toutanji, H.; Deng, Y. (2003). *Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods*. Construction And Building Materials. Vol. **17**, pp. 69-74.

[38]- Vasudevan,G.; Kothandaraman, S. (2011). *Parametric study on Nonlinear Finite Element Analysis on flexural behaviour of RC beams using ANSYS.* International journal of civil and structural engineering. Vol. **2**, № **1**, pp. 98-111.

[39]- Wenjun, Q.; Xiaoliang, Z.; and Haiqun, H. (2009). *Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars*. Journal Of Composite For Construction. Vol.**13**, № **5**, pp. 350-359.

[40]- Wolanski, A. (2004). **Flexural behavior of Reinforced and prestressed concrete beams Using finite element analysis.** A Thesis submitted for the Master Degree of Science. Faculty of the Graduate School , Marquette University: Wisconsin, USA.

[41]- СП 52-101.(2003). **Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры**. ООО "Аналитих". Москва: СТ.161.

[42]- جحجاح، غاندي؛ عبود، أحمد (2009). **نظريات البيتون المسلح**. سورية: مديرية المطبوعات في جامعة تشرين.

[43]- نقابة المهندسين السوريين. (2004). **الكود العربي السوري لتصميم المنشآت بالخرسانة المسلحة وملحقاته**. الطبعة الثالثة، دمشق: نقابة المهندسين.

Abstract:

Concrete beams reinforced with carbon(CFRP) rebars exhibit large deflections and crack widths as compared to concrete beams reinforced with steel due to the low modulus of elasticity in (CFRP) rebars.

The Committee of American code ACI has provided design equations for concrete elements reinforced with steel bars, and in the subsequent versions of this code these equations had developed to be suitable for concrete beams reinforced with FRP rebars, and to predict deflections, crack widths and ultimate capacities.

Reinforcing concrete with a(hybrid) combination of steel and carbon fiber-reinforced polymer CFRP bars, which appear recently, promises favorable strength, serviceability, and durability.

But these developed equations aren't suitable for the case of hybrid reinforcement with (CFRP+ steel) rebars, so we proposed some improvements on them. To prove these improvements, ten groups of reinforcing concrete beams, were prepared and tested. In each of them three identical beams, and each group differed from others in the ratio of steel and carbon reinforcement, and in the distribution of the rebars in the section.

We modeled tested beams using FE method and analyzed them by ANSYS program.

The experimental results of deflections, crack widths and ultimate capacities were compared to the calculated results in accordance with the proposed improvements, and to the results of ANSYS, the results were satisfactory, and some of conclusions and recommendations were reached on.

Keywords: Reinforced Concrete Beams, Hybrid Reinforcement, Carbon (CFRP) Rebars, Deflection, Ultimate Capacities, Crack Width, ANSYS program.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education
Tishreen University
Faculty of Civil Engineering
Structural Department

Developing an expression to calculate the deflection in Concrete beams reinforced with hybrid (steel and CFRP) bars

(A thesis prepared to acquire the Doctor of Philosophy Degree in structural engineering)

Submitted By
Eng. **Mervat Hasan Heshmah**

Supervisor

Prof. Dr. **Ghandi Ali Jahjah**

Prof. Dr. **Ahmad Ali Aboud**

Prof. Dr. **Dmitri Rafayelovich Mailyan**

2014