

جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

دراسة انهيار البلاطات المصممة العاملة باتجاهين و المقواة باستعمال
البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية - قسم الهندسة الإنشائية

إعداد:

المهندسة كندة الشماس

إشراف:

الدكتور المهندس مصطفى بطيخة

العام الدراسي

2014

جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

دراسة انهيار البلاطات المصمتة العاملة باتجاهين و المقواة باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية - قسم الهندسة الإنشائية

إعداد:

المهندسة كندة الشماس

إشراف:

الدكتور المهندس مصطفى بطيخة

العام الدراسي

2014

لجنة الحكم السادة الأساتذة:

كلية الهندسة المدنية عضواً	المدرس في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: مقاومة المواد	أ.د. رياض العيسى جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية عضواً	الدكتور في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: الخرسانة المسلحة	د.م. عصام مالك جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية عضواً مشرفاً	المدرس في قسم الهندسة الإنشائية الاختصاص: الإنشاءات المعدنية	د.م. مصطفى بطيخة جامعة دمشق

ملخص البحث (Abstract)

تم استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) بشكل واسع في تقوية العناصر البيتونية وذلك بسبب الميزات التي تتميز بها هذه المادة من نسبة ارتفاع المقاومة إلى الوزن وسهولة في القص والتركيب في الموقع وفي أماكن صعبة يصعب الوصول إليها بالطرق التقليدية.

يهدف هذا البحث إلى تفصي أثر تقوية البلاطات البيتونية المسلحة المصمتة باستعمال الـ FRP، حيث بينت الدراسات المرجعية السابقة أن استعمال الـ FRP أدى إلى زيادة ملحوظة في المقاومة والمطاوعة معاً بالإضافة إلى تخفيض السهم الحاصل في البلاطة.

تم في هذا البحث إجراء دراسة تحليلية عددية على بلاطات بيتونية مسلحة مقواة و غير مقواة، وذلك باستعمال طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Analysis) وتحليل لاخطي يأخذ بعين الاعتبار لاخطية المادة (Materially Non-linear Analysis, MNA)، كما تم أخذ أثر التماسك بين البيتون وشرائح الـ FRP بعين الاعتبار. بين هذا البحث أن استخدام الـ FRP يؤثر على خطوط الانكسار فيؤدي إلى زيادة عرض منطقة التلدن الأمر الذي انعكس إيجاباً على المقاومة والمطاوعة (Ductility) معاً، كما تم في نهاية هذا البحث إيجاد علاقة تربط بين الخصائص البعدية للـ FRP والمقاومة والطاقة الداخلية من جهة أخرى.

شكر وتقدير

الشكر الجزيل للدكتور المهندس مصطفى بطيخة على دعمه وتوجيهاته ومتابعته المستمرة حرصاً منه على إنجاز هذا العمل بالطريقة العلمية الأفضل ، له مني الاحترام وفائق التقدير.

كما أخص بالشكر جميع أفراد عائلتي وأصدقائي على تشجيعهم ودعمهم الكبير والدائم.

فهرس المحتويات

I.....	فهرس المحتويات	
IV.....	فهرس الأشكال	
VIII.....	فهرس الجداول	
IX.....	الرموز المستخدمة	
1.....	الفصل الأول: مقدمة	
1.....	1.1 مقدمة عامة عن البلاطات البيتونية	
4.....	2.1 مقدمة عامة عن البوليميرات المسلحة بالألياف الـ (FRP)	
8.....	3.1 مشكلة البحث وأهميته	
8.....	4.1 الهدف من البحث	
8.....	5.1 طرائق البحث	
8.....	6.1 محتويات الأطروحة	
10.....	الفصل الثاني: الدراسات المرجعية	
10.....	1.2 مقدمة	
10.....	2.2 البيتون المسلح	
13.....	3.2 البلاطات البيتونية المسلحة	
14.....	4.2 تصميم البلاطات البيتونية المسلحة باستخدام طريقة خطوط الانكسار	
17.....	5.2 الخصائص الميكانيكية لمركبات الـ FRP	
24.....	6.2 استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) في تقوية البلاطات البيتونية المسلحة	
24.....	1.6.2 Mosallam and Mosalam ; 2003	
28.....	2.6.2 Limam et al ; 2003	
30.....	3.6.2 Seim et al ; 2001	
34.....	4.6.2 الشماس; 2012	
40.....	7.2 ملخص الفصل الثاني	
41.....	الفصل الثالث: التحليل الانشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة	

41	مقدمة	1.3
41	توصيف النموذج	2.3
41	التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) للبلابة البيتونية غير المقواة	3.3
41	توصيف العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)	1.3.3
42	الشروط المحيطة للنموذج المدروس	2.3.3
42	الأحمال المطبقة على النموذج	3.3.3
43	نوع التحليل المستخدم	4.3.3
43	توصيف المواد المستخدمة في النمذجة	5.3.3
48	دراسة أثر تقارب الشبكة	6.3.3
49	مقارنة النتائج التحليلية مع التجريبية	7.3.3
51	التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) للبلابة البيتونية المقواة	4.3
51	توصيف النموذج	1.4.3
51	توصيف العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)	2.4.3
52	الشروط المحيطة للنموذج المدروس	3.4.3
52	الأحمال المطبقة على النموذج	4.4.3
52	نوع التحليل المستخدم	5.4.3
52	توصيف المواد المستخدمة في النمذجة	6.4.3
52	التماسك بين البيتون وشرائح الـ FRP	7.4.3
55	مقارنة النتائج التحليلية مع التجريبية	8.4.3
59	دراسة أثر تقوية البلاطة على تغير الطاقة الداخلية (اللدنة)	5.3
60	أثر تغيير عدد طبقات شرائح الـ FRP	6.3
65	أثر التغيير في عرض شرائح الـ FRP	7.3
69	أثر التغيير في التباعد بين شرائح الـ FRP (عدد الشرائح)	8.3
73	العلاقة بين متغيرات شريحة الـ FRP والقوة الحدية	9.3
76	ملخص الفصل الثالث	10.3

78 الفصل الرابع: النتائج والتوصيات	
78 النتائج	1.4
79 التوصيات لأعمال مستقبلية	2.4
80 المراجع	

فهرس الأشكال

- 1 الشكل (1-1): صور لبعض منشآت البيتون
- 2 الشكل (2-1): مكونات عناصر البيتون المسلح
- 2 الشكل (3-1): أنواع البلاطات حسب طريقة عملها
- 3 الشكل (4-1): أنواع البلاطات حسب طريقة تشكيل البلاطة
- الشكل (5-1): نماذج لتشكل خطوط الانكسار في البلاطات بشروط استناد وأبعاد مختلفة (KENNEDY AND GOODCHILD;2003)
- 4 الشكل (6-1): مقطع عرضي في البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) (OAK RIDG NATIONAL LAB; 2012)
- 5 الشكل (7-1): أنواع البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)
- 5 الشكل (8-1): الاستخدامات المختلفة للـ (FRP) في تقوية العناصر الإنشائية
- 7 الشكل (9-1): استعمال الـ CFRP في تقوية البلاطات البيتونية لجسر (CENTRAL AVENUE BRIDGE) FYFE) (2008)
- 7 الشكل (1-2): مخطط علاقة الإجهاد – التشوه النسبي للبيتون على الضغط (EUROCODE2;2004)
- 13 الشكل (2-2): حساب البلاطات باستخدام طريقة خطوط الانكسار (KENNEDY AND GOODCHILD; 2003)
- 15 الشكل (3-2): مشروع بناء بيتوني في مدينة كاردنجتون الأوربية يبين إنشاء بلاطة الطابق الرابع
- 16 الشكل (4-2): تشكل خطوط الانكسار في بلاطة بيتونية مسلحة (KENNEDY AND GOODCHILD; 2003)
- 16 الشكل (5-2): طريقة تشكيل خطوط الانكسار في بلاطات ذات شروط استناد مختلفة (KENNEDY AND GOODCHILD; 2003)
- 17 الشكل (6-2): مخطط توضيحي لمكونات الـ FRP (REDDY;1997)
- 18 الشكل (7-2): تأثير ميل ألياف مادة الـ FRP في المادة الرابطة على مقاومتها على الشد (BAGHPOUR;2012)
- 19 الشكل (8-2): الأشكال الشائعة لتوزيع الألياف ضمن الـ FRP (BATIKHA; 2008)
- 20 الشكل (9-2): تعريف محاور شريحة الـ FRP ذات التوزيع المنتظم للألياف (BATIKHA; 2008)
- 20 الشكل (10-2): مخطط (STRESS-STRAIN) لمادة الـ FRP (CONCRETE SOCIETY; 2004)
- 21 الشكل (11-2): مجال الإجهاد - التشوه لمختلف أنواع الـ FRP (BAGHPOUR;2012)
- 22 الشكل (12-2): شكل توضيحي للانهياب الممكن للعناصر المقواة بشرائح الـ FRP (TENG ET AL; 2003)
- 24 الشكل (13-2): نموذج البلاطة البيتونية المسلحة المستخدم في الدراسة (MOSALLAM AND MOSALAM;2003)
- 25 الشكل (14-2): تقوية نموذج البلاطة التجريبية بشرائح الـ CFRP (MOSALLAM AND MOSALAM;2003)
- 26 الشكل (15-2): آلية انهيار البلاطة المدروسة بدون ومع تقوية (MOSALLAM AND MOSALAM;2003)
- 27 الشكل (16-2): علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة مع الحمولة بدون ومع تقوية (MOSALLAM AND MOSALAM;2003)
- 27 الشكل (17-2): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة – الحمولة للبلاطات قبل تقويتها وبعد تقويتها بشرائح الـ CFRP (LIMAMET AL;2003)
- 28

- الشكل (2-18): خطوط الانكسار القطرية عند انهيار البلاطة غير المقواة (LIMAM ET AL، 2003)..... 29
- الشكل (2-19): انفصال شرائح التقوية عن البلاطة المقواة عند انهيارها (LIMAM ET AL; 2003)..... 29
- الشكل (2-20): شكل توضيحي لأبعاد البلاطات وحديد التسليح (SEIMET AL، 2001) 30
- الشكل (2-21): أبعاد و توضع عناصر التقوية الـ FRP على السطح السفلي للبلاطات (SEIM ET AL ; 2001)..... 31
- الشكل (2-22): شكل توضيحي لطريقة اختبار البلاطات البيتونية المسلحة (SEIMET AL، 2001) 32
- الشكل (2-23): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة – الحمولة للبلاطات بدون تقوية (SEIM ET AL ; 2001) 32
- الشكل (2-24): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة – الحمولة للبلاطات قبل وبعد تقويتها (SEIM ET AL ;) 33
- (2001) 33
- الشكل (2-25): التشققات الظاهرة أسفل البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP عند انهيارها (SEIMET AL ; 2001) 34
- الشكل (2-26): نموذج توضيحي للبلاطة المستطيلة وطريقة التقوية (الشماس، 2012) 34
- الشكل (2-27): تقوية الوجه السفلي للبلاطة البيتونية المسلحة المستطيلة (الشماس، 2012)..... 35
- الشكل (2-28): علاقة الحمولة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة قبل وبعد التقوية لعدة نماذج تقوية (الشماس، 2012). 36
- الشكل (2-29): تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المستطيلة المقواة كالنموذج (B) مع تغيير سماكة شرائح الـ CFRP
- Toc39786081037.....
- الشكل (2-30): التشوهات النسبية الرئيسية و تغيير نماذج انهيار البلاطة المستطيلة بتغيير سماكة شرائح الـ CFRP (الشماس ، 2012) 37
- الشكل (2-31): التشوهات النسبية الرئيسية و تغيير نماذج انهيار البلاطة المستطيلة بتغيير طريقة التقوية وثبات سماكة شرائح الـ CFRP (الشماس، 2012)..... 38
- الشكل (2-32): تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المستطيلة المقواة كالنموذج (B) مع تغيير طول شرائح الـ CFRP..... 39
- الشكل (2-33): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المستطيلة المقواة كالنموذج (B) مع تغيير عرض شرائح الـ CFRP (الشماس، 2012)..... 40
- 40
- الشكل (3-1): تمثيل العنصر المساحي ذو أربع عقد (ABAQUS 6.12 DOCUMENTATION، 2012) 42
- الشكل (3-2): النموذج التحليلي للبلاطة المدروسة (ABAQUS 6.12)..... 42
- الشكل (3-3): مخطط (الإجهاد -التشوه النسبي) للبيتون في حالة الضغط (ABAQUS 6.12 DOCUMENTATION) 44
- 44
- الشكل (3-4): مخطط (الإجهاد -التشوه النسبي) للبيتون في حالة الشد (ABAQUS 6.12 DOCUMENTATION) 45
- الشكل (3-6): علاقة الإجهاد -التشوه النسبي لحديد التسليح GRADE 60 (MANZOR AND AHMAD; 2013)..... 48
- الشكل (3-7): دراسة أثر تقارب الشبكة (ABAQUS 6.12)..... 49
- الشكل (3-8): مقارنة النتائج للحمولة القصوى للبلاطة المدروسة باستخدام (ABAQUS; VER 6.12) والدراستين المرجعيات 50
- 50
- الشكل (3-9): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة في الدراسة المرجعية والدراسة الحالية (ABAQUS; VER 6.12) 51

- الشكل (10-3):** نموذج البلاطة المدروسة بعد التقوية باستخدام شرائح ال FRP باستخدام برنامج (ABAQUS VER 6.12) 51
- الشكل (11-3):** منحني علاقة الانزلاق-إجهاد التماسك لمادة ال FRP (CEP-FIP;2010) 53
- الشكل (12-3):** منحني الانزلاق – إجهاد التماسك بين البيتون وال FRP (BOND-SLIP RELATIONSHIP) 54
- الشكل (13-3):** تمثيل التماسك بين البيتون وال FRP باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 54
- الشكل (14-3):** علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة المقواة مع الحمولة بدون ومع تقوية (الدراسة الحالية) 55
- الشكل (15-3):** تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة عند النقطة (1) (ABAQUS 6.12) 56
- الشكل (16-3):** تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة عند نقطة نهاية التحميل (2) (ABAQUS 6.12) 56
- الشكل (17-3):** تشكل خطوط الانكسار في البلاطة المقواة ب FRP عند النقطة (1R) (ABAQUS 6.12) 57
- الشكل (18-3):** تشكل خطوط الانكسار في البلاطة المقواة ب FRP عند نقطة نهاية التحميل (2R) (ABAQUS 6.12) 57
- الشكل (19-3):** مقارنة للحمولة القصوى للبلاطة المقواة والدراستين المرجعيات (ABAQUS 6.12) 58
- الشكل (21-3):** علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة المقواة وغير المقواة مع تغير الطاقة الداخلية (ABAQUS 6.12) 59
- الشكل (22-3):** مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بطبقة واحدة من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 60
- الشكل (23-3):** آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بطبقة واحدة من الشرائح (ABAQUS 6.12) 60
- الشكل (24-3):** مقارنة النتائج بين البلاطة المقواة بثلاث طبقات من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 61
- الشكل (25-3):** آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بثلاث طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12) .. 61
- الشكل (26-3):** مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بأربع طبقات من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 62
- الشكل (27-3):** آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بأربع طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12) ... 62
- الشكل (28-3):** مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بخمس طبقات من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 63
- الشكل (29-3):** آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بخمس طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12) .. 63
- الشكل (30-3):** مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح ال FRP بعدد مختلف من الطبقات باستخدام برنامج (ABAQUS VER 6.12) 64
- الشكل (31-3):** علاقة تغيير الحمولة الحدية للبلاطة المقواة مع تغيير سماكة شرائح ال FRP (ABAQUS-VER6.12) 64
- الشكل (32-3):** مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح بعرض 100 MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 65
- الشكل (33-3):** آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 100 MM (ABAQUS 6.12) 65
- الشكل (34-3):** مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح بعرض 200 MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) 66

- الشكل (35-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 200 MM (ABAQUS 6.12)..... 66
- الشكل (36-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح بعرض 300 MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)..... 67
- الشكل (37-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 300 MM (ABAQUS 6.12)..... 67
- الشكل (38-3): مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح الـ FRP بعرض مختلف للشرائح باستخدام برنامج (ABAQUS VER 6.12)..... 68
- الشكل (39-3): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المقواة مع تغيير عرض شرائح الـ FRP (ABAQUS-VER6.12)..... 68
- الشكل (40-3): نموذج البلاطة المدروسة المقواة بشرائح الـ FRP بتباعد مختلف بين الشرائح (ABAQUS-VER6.12)..... 69
- الشكل (41-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=500$ MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)..... 69
- الشكل (42-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=500$ MM (ABAQUS 6.12)..... 70
- الشكل (43-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=350$ MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)..... 70
- الشكل (44-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=350$ MM (ABAQUS 6.12)..... 71
- الشكل (45-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=250$ MM والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)..... 71
- الشكل (46-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_F=250$ MM (ABAQUS 6.12)..... 72
- الشكل (47-3): مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح الـ FRP بعدد مختلف للشرائح باستخدام برنامج (ABAQUS VER 6.12)..... 72
- الشكل (48-3): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المقواة مع تغيير عرض شرائح الـ FRP (ABAQUS-VER6.12)..... 73
- الشكل (49-3): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المقواة مع تغيير مساحة وتباعد شرائح الـ FRP (ABAQUS-VER6.12)..... 74
- الشكل (50-3): علاقة تغيير الطاقة الداخلية للبلاطة المقواة مع تغيير مساحة وتباعد شرائح الـ FRP (ABAQUS-VER6.12)..... 75

فهرس الجداول

- الجدول (1-2): جدول لتصنيفات البيتون وبيبن مقاومة البيتون وتشوهات المميزة (EUROCODE2;2004) 12
- الجدول (2-2): خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية (CONCRETE SOCIETY; 2004;) 21
- BATIKHA; 2008
- الجدول (3-2): خصائص الأنواع المختلفة للمواد الرابطة الراتنجية (BATIKHA; 2008) 22
- الجدول (4-2): مقارنة بين مركبات الـ FRP (TENG ET AL.; 2002) 23
- الجدول (5-2): مواصفات مواد إنشاء البلاطات ومواد التقوية (SEIM ET AL ; 2001) 30
- الجدول (6-2): توصيف لتقوية نماذج البلاطات وملخص نتائج (SEIM ET AL ; 2001) 31
- الجدول (1-3): تلخيص النتائج التي تم الحصول عليها (الدراسة الحالية)..... 75

الرموز المستخدمة

- $\beta_{cc}(t)$: معامل يعتمد على عمر الببتون t يوم
- θ : زاوية دوران المنطقة المدروسة حول محور دورانها (m/m)
- ζ : معامل يسمح بأخذ تأثير طريقة رزم الألياف وتوزعها ضمن المادة الرابطة وشروط التحميل بعين الاعتبار، مثلاً تُستخدم قيمة ($\zeta = 2$) في حساب E_T ، والقيمة ($\zeta = 1$) في حساب G_{LT}
- η : معامل يُعطى بالعلاقة (2-14)
- ν : معامل بواسون للبيبتون غير المتشقق
- ν_f : معامل بواسون للألياف
- ν_{LT} : معامل بواسون لصفحة الـ FRP
- ν_m : معامل بواسون للمادة الرابطة
- ν_s : معامل بواسون لحديد التسليح
- δ : الانتقال الشاقولي المتوقع للقوى المطبقة على المنطقة المدروسة (m)
- ε_c : التشوه النسبي للبيبتون على الضغط
- ε_{cl} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة الضغط المتوسطة للبيبتون حسب الجدول (1-2)
- ε_{cu} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة الضغط للبيبتون عند الانهيار حسب الجدول (1-2)
- ε_f : التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع للـ FRP
- ε_y : التشوه النسبي الموافق لإجهاد الخضوع للحديد
- σ_c : إجهاد البيبتون على الضغط
- σ_{cu} : القيمة الحدية لإجهاد البيبتون على الضغط
- D : الطاقة الداخلية المهدورة
- E : الطاقة الخارجية المبذولة
- E_{cm} : معامل المرونة اللحظي التقريبي للبيبتون
- E_f : معامل مرونة الألياف.
- E_L : معامل المرونة لصفحة الـ FRP بالاتجاه الموازي للألياف
- E_m : معامل مرونة المادة الرابطة
- E_s : معامل مرونة حديد التسليح
- E_T : معامل المرونة لصفحة الـ FRP بالاتجاه العمودي على الألياف
- exp : تعني تابع أسي
- f_{cm} : مقاومة الضغط المتوسطة للبيبتون في يوم الـ 28 حسب الجدول (1-2)
- f_{ct} : القيمة التقريبية لمقاومة البيبتون على الشد المحوري
- $f_{ct,sp}$: مقاومة الشد للبيبتون عند الانفصال (*Splitting Tensile Strength*)
- f_{ctm} : مقاومة الشد المتوسطة للبيبتون ويمكن الحصول على قيمتها من الجدول (1-2) باستخدام مقاومة الضغط للبيبتون
- $f_{ctm}(t)$: مقاومة الشد للبيبتون في عمر t يوم

- $f_{cm}(t)$: مقاومة الضغط المتوسطة للبيتون في عمر t يوم
- f_{fk} : إجهاد الشد الأعظمي للـ FRP
- f_u : الإجهاد الأعظمي لحديد التسليح
- f_r : إجهاد الانقطاع لحديد التسليح
- f_y : إجهاد خضوع الحديد
- G_m : معامل مرونة القص للمادة الرابطة
- G_{LT} : معامل مرونة القص في المستوي لصفحة الـ FRP
- ℓ : طول خط الانكسار على امتداد محور دوران المنطقة المدروسة (m)
- m : العزم الأعظمي للتلدن على طول خط الانكسار المتلدن ($KN.m/m$)
- N : القوى الشاقولية المطبقة على منطقة محددة من المناطق المتشكلة بين خطوط الانكسار (KN)
- P_u : الحمولة الحديدية العظمى للبلاطة البيتونية المسلحة
- p_0 : الحمولة الحديدية العظمى الموزعة بانتظام للبلاطة بدون تقوية
- s : معامل يعتمد على نوع الاسمنت والمقاومة التي يعطيها
- V_f : نسبة حجم الألياف
- V_m : نسبة حجم المادة الرابطة
- t_f : سماكة شرائح الـ FRP
- S_f : الفراغ بين شرائح الـ FRP
- b_f : عرض شرائح الـ FRP
- a_s : مساحة قضيب التسليح
- S_s : التباعد بين قضبان التسليح
- S_{Ef} : الطاقة الكامنة للبلاطة المقواة.
- S_{Eo} : الطاقة الكامنة للبلاطة غير المقواة.
- τ : قيمة إجهاد التماسك عند النقطة المدروسة بين الـ FRP والمقطع الدعم.
- τ_m : قيمة إجهاد التماسك الأعظمي بين الـ FRP والمقطع الدعم.
- S_m : مسافة الانزلاق الموافقة لإجهاد التماسك الأعظمي.
- S_u : قيمة الانزلاق عند انفصال الشريحة بشكل تام عن المقطع وأعطيت بقيمة $0.225 mm$.
- G_f : طاقة التمزق ($Fracture energy$).

الفصل الأول

مقدمة

Introduction

1.1 مقدمة عامة عن البلاطات البيتونية

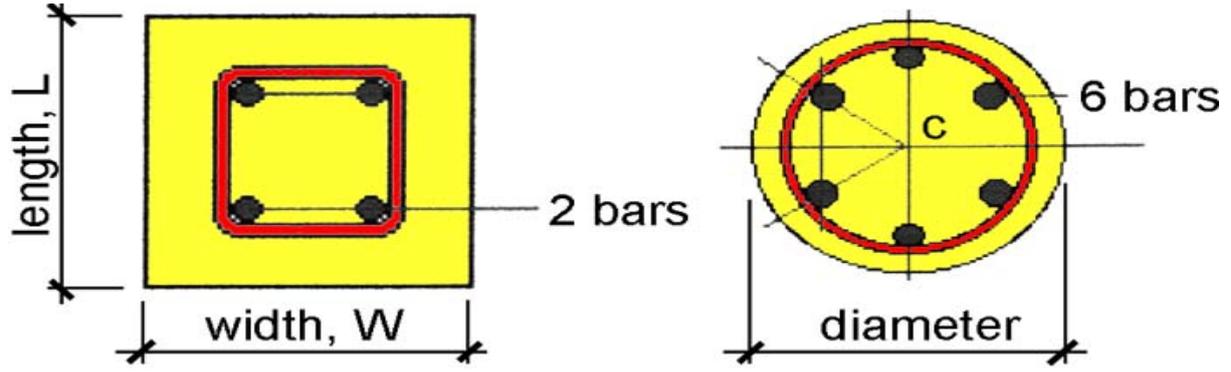
General Background on Concrete Slab

انتشر استخدام البيتون في البناء بشكل واسع واستخدم لكافة الأبنية ذات الطابق الواحد أو متعددة الطوابق وللجسور وكذلك لمنشآت الاحتواء والتخزين (الصوامع). يبين الشكل (1-1) عدداً من المنشآت البيتونية.



الشكل (1-1): صور لبعض منشآت البيتون

في الأبنية البيتونية، يشكل البيتون القالب حسب الوضع المعماري المطلوب ويعمل على مقاومة إجهادات الضغط بشكل رئيسي، وتتم إضافة حديد التسليح (*Steel Reinforcement*) في مناطق تشكل إجهادات الشد حيث يلتصق مع البيتون ويعمل على مقاومة قوى الشد، بالإضافة إلى ذلك فإن إضافة حديد التسليح يغير من طبيعة انهيار مادة البيتون الهش (*Brittle*) ويعطي المقاطع البيتونية مطاوعة (*Ductility*). يبين الشكل (2-1) مكونات عناصر البيتون المسلح .



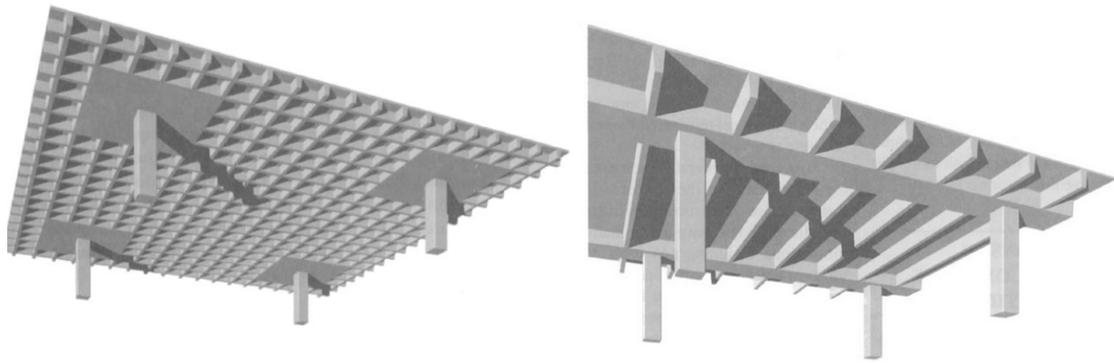
الشكل (2-1): مكونات عناصر البيتون المسلح

تنقسم العناصر الإنشائية الحاملة في منشآت البيتون المسلح حسب طبيعتها ووظيفتها إلى الجوائز والأعمدة والبلاطات والجدران والأقواس والقشريات.

البلاطات هي عناصر مستوية تشكل الأرضيات والسقوف في المباني وغالباً ما تكون معرضة لحمولة موزعة ومنتظمة (MACGINLEY and CHOO;2003). تتعرض البلاطات البيتونية المسلحة للتأثر المباشر بتراكيب من حمولات (الوزن الذاتي، الحمولات المتغيرة، أثر الحريق، حمولات الثلج، حمولات الرياح، الأثر الحراري، حمولات الطرق، حمولات النقل في الجسور... الخ).

تعمل البلاطات البيتونية على الانعطاف مما يجعل مقاومة المقطع البيتوني تعتمد بشكل أساسي على حديد التسليح، المسؤول عن مقاومة إجهادات الشد.

تصنف البلاطات البيتونية المسلحة حسب طريقة عملها إلى بلاطات عاملة باتجاه واحد (طرفان متوازيان غير مسنودين أو نسبة البعدين في المستوي أكبر من الضعف) أو بلاطات عاملة باتجاهين (مسنودة من أطرافها الأربعة ونسبة البعدين في المستوي لا تتجاوز الضعف) (Mosley and Bungey;1987، Eurocode2 ; 2004)، (الشكل 3-1: يبين نوعي البلاطات حسب طريقة عملها).



b. البلاطة العاملة باتجاهين

a. البلاطة العاملة باتجاه واحد

الشكل (3-1): أنواع البلاطات حسب طريقة عملها

تتقسم البلاطات البيتونية حسب تصميمها إلى البلاطات المصمتة (*Solid Slabs*) والبلاطات المفرغة (*Ribbed Slabs*) ذات الأعصاب باتجاه واحد أو باتجاهين يبين الشكل (4-1) أنواع البلاطات حسب طريقة تشكيلها.



البلاطة الفطرية (*Flat Slab*)

البلاطة المعصبة (*Waffle Slab*)

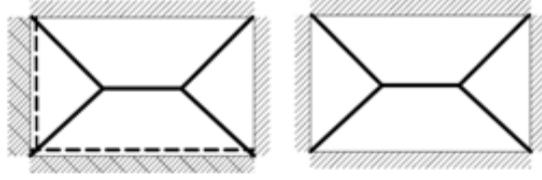


بلاطة الهوردي (*one-way ribbed slab*) البلاطة مسبقة الصنع (*Precast Slab*)

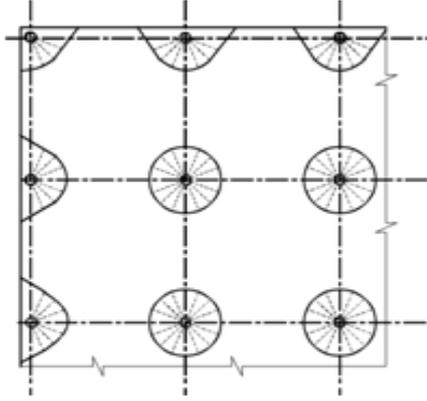
الشكل (4-1): أنواع البلاطات حسب طريقة تشكيل البلاطة

ذكر الكود العربي السوري (2004) عدة طرق لدراسة البلاطات البيتونية المسلحة المصمتة منها طرق تعتمد على التحليل المرن (طريقة الجداول وطريقة الشرائح والطريقة المبسطة)، وطريقة تعتمد على التحليل اللدن وهي طريقة خطوط الانكسار (*Yield Line Theory*) وهي الطريقة الأكثر اقتصادية في التصميم لأنها تعتمد على الوصول إلى الطاقة القصوى لمقطع البلاطة (الكود العربي السوري، 2004). تعتمد الدراسة بطريقة خطوط الانكسار على إيجاد الشكل الصحيح لميكانيزمات الانهيار للبلاطة الذي يختلف باختلاف أبعاد البلاطة وطبيعة الاستناد عند الأطراف. (Kennedy and Goodchild; 2003).

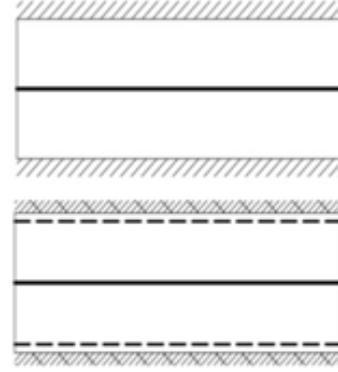
طرف حر غير مستند	-----
طرف ذو استناد بسيط	//////
طرف موشوق أو مستمر	XXXXXX
خط انكسار للعرض الموجب	-----
خط انكسار للعرض السالب	=====



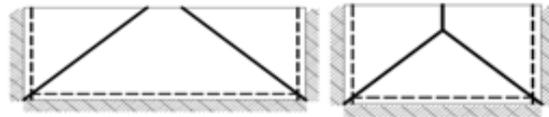
a. البلاطة العاملة باتجاهين



c. البلاطة الفطرية



b. البلاطة العاملة باتجاه واحد



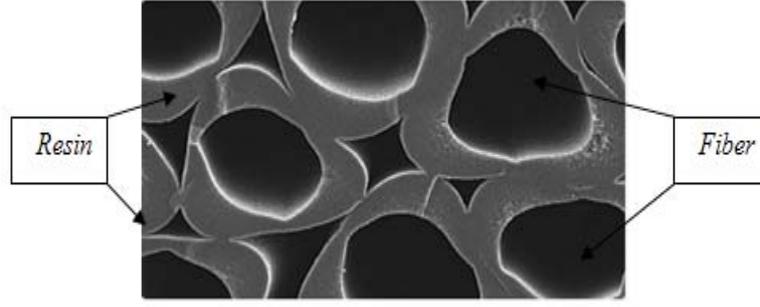
d. البلاطات مع وجود طرف

الشكل (5-1): نماذج لتشكل خطوط الانكسار في البلاطات بشروط استناد وأبعاد مختلفة (Kennedy and Goodchild;2003)

2.1 مقدمة عامة عن البوليميرات المسلحة بالألياف الـ (FRP) General Background on Fiber Reinforced Polymers (FRP)

المركب البوليميري المسلح بالألياف (Fiber reinforced Polymer) هو مادة مؤلف من الألياف (Fibres) ذات الخواص المتجانسة (Isotropic) والمغموسة ضمن مادة ذات أساس بوليميري (Resin) وهي المادة الرابطة (Matrix)، ومن هاتين المادتين المتجانستين تتشكل مادة مركبة (Composite material) ذات خواص ميكانيكية جديدة.

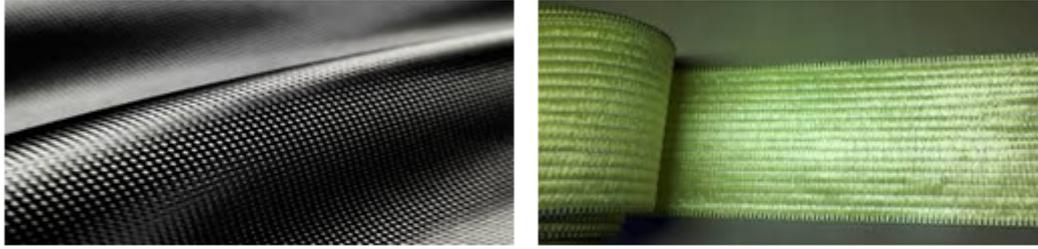
تؤمن الألياف المقاومة للمركب ككل، بينما يربط الجسم ذي الأساس البوليميري الألياف مع بعضها، وتنقل الأحمال فيما بينها وبقيّة المكونات. يبين الشكل (6-1) مقطع عرضي في البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) يوضح الألياف (Fibres) و الريزين الرابط (Matrix) بينها.



الشكل (6-1): مقطع عرضي في البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) (Oak Ridg National Lab; 2012)

تختلف أنواع الـ *FRP* وفقاً لنوع الألياف الداخلة في تركيبها والتي تصنف إلى الألياف الزجاجية (*Glass Fibres*) والألياف الكربونية (*Carbon Fibres*) والألياف الأراميدية (*Aramid Fibres*)، وبما أن كل نوع من الألياف يتمتع بخواص مختلفة فإن فعالية التقوية ترتبط بنوعية الألياف. يبين (الشكل 7-1) الأنواع المختلفة من البوليميرات المسلحة بالألياف (*FRP*).

a. البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (*CFRP*) *b*. البوليميرات المسلحة بالألياف الأراميدية (*AFRP*)



c. البوليميرات المسلحة بالألياف الزجاجية (*GFRP*)

الشكل (7-1): أنواع البوليميرات المسلحة بالألياف (*FRP*)

إن *FRP* ذو مقاومة عالية على الشد باتجاه الألياف، وهي أكبر بمرات عديدة من مقاومة فولاذ التسليح على الشد، وهناك أيضاً مزايا عديدة لاستخدام الـ *FRP* لتقوية المنشآت (*Batikha;2008, Concrete Society; 2004*) :

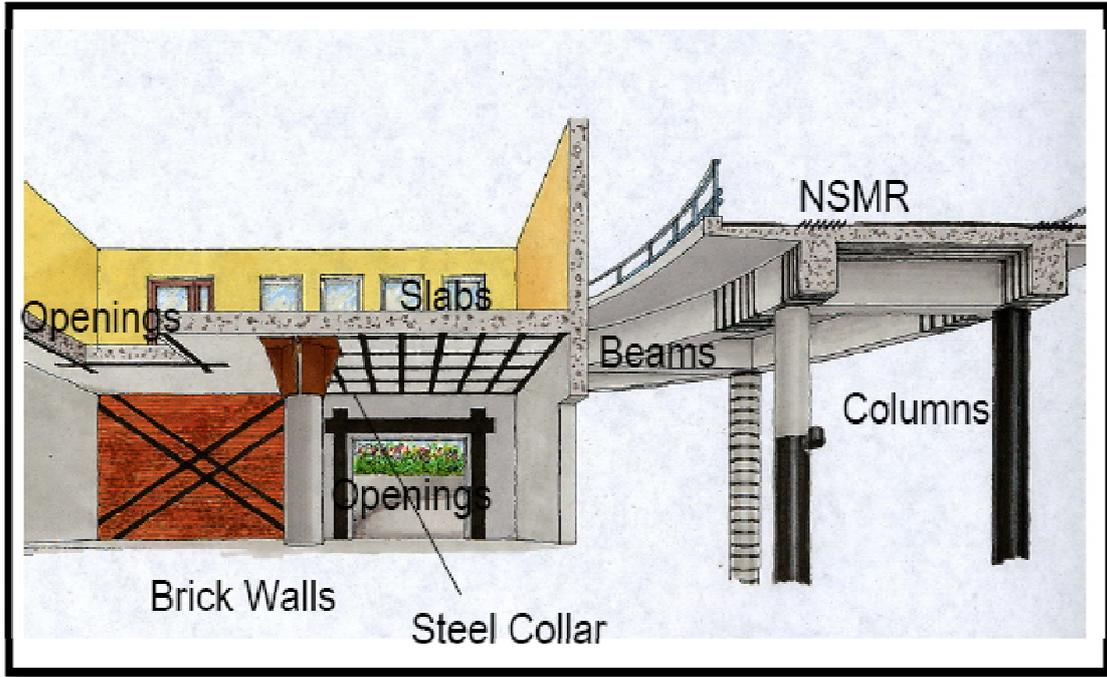
- ✓ المقاومة العالية نسبة إلى الوزن: وبالتالي لا حاجة لآليات الرفع عند التركيب ، بالإضافة إلى تخفيض اليد العاملة بنسبة كبيرة.

✓ سرعة التركيب على العناصر الإنشائية.

- ✓ زيادة أصغرية في أبعاد العناصر و أوزانها: أي الحفاظ على الشكل العام للعناصر المقواة وعدم تحميلها حمولات إضافية.
 - ✓ المتانة والديمومة (طول العمر التصميمي): وهناك العديد من الأمثلة تبين أن شرائح الـ *GFRP* المطبقة خارجياً على العناصر وبعمر 25 سنة تبقى بحالة جيدة وتحتاج فقط إلى إعادة الطلاء بشكل منتظم.
 - ✓ المرونة في التشكيل: حيث تأتي على شكل لفائف (*Rolls*) يمكن مدها بسهولة حول الأعمدة الدائرية والقشريات والسطوح المنحنية، أي أنها تتكيف بسهولة مع السطح الذي تتم تقويته.
 - ✓ مادة غير ناقلة كهربائياً وبالتالي يمكن استخدامها بشكل آمن في أنظمة التوتر العالي (عدا الـ *CFRP* فهي ناقلة للتيار الكهربائي)، وهي غير قابلة للتمغنط.
 - ✓ سهولة القص بالأطوال المطلوبة في موقع العمل، بالإضافة إلى إمكانية التراكب الشرائح بالاتجاهين نظراً للسماكات الرقيقة لهذه المادة.
 - ✓ إعطاء العنصر المدعم خاصية المطاوعة (*Ductility*)، لذلك هي ذات فاعلية كبيرة في مقاومة الزلازل.
 - ✓ إمكانية تطبيقها على الوجه الخارجي دون الحاجة للوصول إلى السطح الداخلي في حالة منشآت التخزين كخزانات المياه وصوامع الحبوب.
- ومن أهم مساوئ استخدام الـ *FRP* في تقوية المنشآت:
- ✓ الأثر البيئي نتيجة التصنيع الكيميائي لمادة الـ *FRP*، وصعوبات في إعادة التدوير وإعادة التصنيع (*Recycling*).
 - ✓ تأثير الرطوبة على خصائص الـ *FRP* في حال وصولها إلى مناطق التماس بين الألياف والمادة الرابطة نتيجة قابلية المادة الرابطة الراتنجية (*Resin*) لامتصاص المياه. لكن حالياً يتم استدراك هذه المشكلة في منتجات الـ *FRP* الحديثة لتصبح أقل حساسية للرطوبة والحرارة.
 - ✓ مشكلة الحريق: حيث أن معظم البوليميرات تتأثر بشكل كبير عند تعرضها للحريق، وذلك بسبب فقدان قدرة المادة الرابطة على التماسك عند تعرضها لدرجات حرارة معينة.
 - ✓ الكلفة المرتفعة للمواد: الكلفة المادية لشرائح الـ *FRP* أعلى من كلفة المواد المستخدمة بطرق التقوية الأخرى.

استعملت البوليميرات المسلحة بالألياف على مختلف أشكالها في تقوية وتدعيم الكثير من العناصر الإنشائية في المنشآت على اختلاف مكوناتها، فتمت تقوية عناصر البيتون المسلح (*Mosallam and Mosalam; 2003*)، والعناصر المعدنية (*Batikha; 2008*)، والعناصر الحجرية (*Foraboschi; 2004*)، والعناصر الخشبية (*Borri et al; 2005*).

كما تمت تقوية مختلف العناصر الإنشائية باستخدام هذه المركبات (الأعمدة بمختلف أشكالها، الجوائز، البلاطات، فتحات البلاطات، الجدران، فتحات الجدران، والقشريات)، الشكل (8-1) يبين استخدامات الـ *FRP* في عمليات التقوية.



الشكل (8-1): الاستخدامات المختلفة للـ (FRP) في تقوية العناصر الإنشائية

كمثال واقعي عن استخدام الـ FRP في التقوية، تمت تقوية جسر *Central Avenue Bridge* في مدينة *Burlington* في الولايات المتحدة الأمريكية حيث تم اكتشاف عدة أخطاء في حديد التسليح العلوي والسفلي في البلاطة البيتونية المسلحة وذلك بسبب خطأ في المخططات التنفيذية، فتمت تقوية البلاطة البيتونية عام 2005 م برفع قدرتها على مقاومة عزم الانحناء في عدة مناطق باستعمال شرائح من الـ CFRP (Fyfe ;2008) كما يوضح الشكل (9-1).



الشكل (9-1): استعمال الـ CFRP في تقوية البلاطات البيتونية لجسر *Central Avenue Bridge* (Fyfe ;2008)

3.1 مشكلة البحث وأهميته

Scope and Importance of this Research

تعرض معظم المباني البيتونية لتلف تدريجي لأسباب عدة بيئية أو تنفيذية، كما أن متطلبات الكودات قد تتغير وفقا للدراسات الحديثة، الأمر الذي يستدعي رفع كفاءة العناصر القديمة، بالإضافة إلى ذلك فإن الحاجة إلى تغيير الطبيعة الاستثمارية للمنشأ قد تتطلب زيادة في قدرة تحمل عناصر المنشأ. يمكن استخدام طرق تقوية تقليدية كزيادة أبعاد المقطع البيتوني أو التدعيم المعدني، إلا أن استعمال مادة الـ *FRP* قد ازداد في الآونة الأخيرة لما لها من مزايا عديدة تم ذكرها في الفقرة (1-2). تأتي أهمية هذا البحث في أنه يسלט الضوء على استخدام هذه المادة على البلاطات البيتونية المصمتة العاملة باتجاهين، سواء من ناحية رفع المقاومة وزيادة المطاوعة و تخفيض السهم .

4.1 الهدف من البحث

Objective of this Research

يهدف هذا البحث إلى دراسة أثر تطبيق مادة البوليميرات المسلحة بالألياف (*FRP*) على سلوك البلاطات البيتونية المصمتة، سواء من خلال المقاومة والمطاوعة و السهم الحاصل، كما سيتم تتبع ميكانيكيات الانهيار الجديدة والتي تتبع عملية هذا النوع من التقوية

5.1 طرائق البحث

Methods of this research

تمّ في هذا البحث القيام بدراسة تحليلية عددية باستخدام برنامج (*ABAQUS 6.12*) لسلوك البلاطة البيتونية المسلحة والتحقق من فعالة تطبيق شرائح الـ *FRP* في تخفيف السهم الحاصل وزيادة المقاومة الحدية للبلاطة. تم في هذه الدراسة إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (*Finite Element Method ;FEM*)، واستخدام تحليل لاخطي يأخذ بعين الاعتبار لاخطية المادة (*Materially Non Linear Analysis – MNA*)، كما تم أخذ أثر التماسك (*Bond*) بين البيتون وشرائح الـ *FRP*.

6.1 محتويات الأطروحة

Content of the Thesis

تمّ تقسيم هذه الأطروحة إلى أربعة فصول كما يلي:

الفصل الأول : مقدمة عامة عن البلاطات البيتونية المسلحة والبوليميرات المسلحة بالألياف، ومن ثمّ الحديث عن مشكلة البحث وأهميته والهدف من هذا البحث، وختاماً تم استعراض محتويات الأطروحة.

الفصل الثاني : مقدمة عامة عن مادة البيتون المسلح ودراسة سلوك البلاطات البيتونية المسلحة وميكانيكيات انهيارها تحت تأثير حمولات موزعة بانتظام، استعراض الخواص الميكانيكية والعلاقات التي تحكم مادة الـ *FRP* وأشكال انهياره.

ثم تم استعراض أربع دراسات مرجعية تجريبية وتحليلية، تتناول موضوع تقوية البلاطات البيتونية المسلحة باستعمال مادة الـ *FRP*، وكفاءته في رفع قدرة تحمل البلاطات البيتونية المسلحة من خلال استعراض موجز للشروط التجريبية أو التحليلية المطبقة وللنتائج التي حصل عليها الباحثون.

الفصل الثالث : حيث تم توصيف النموذج المعتمد في التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (*Finite Element Method*) وبرنامج (*Abaqus Ver6.12*) من حيث توصيف المواد الداخلة في النموذج وشروط الاستناد والأحمال المطبقة وبما يحقق هدف البحث. كما تمّ استعراض النتائج والمنحنيات التي تمّ الحصول عليها نتيجة هذه الدراسة.

الفصل الرابع : يتضمن تلخيصاً للنتائج التي تمّ الوصول إليها في الفصول السابقة ، بالإضافة إلى التوصيات الضرورية لتطوير الأبحاث والأعمال المستقبلية في هذا المجال.

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية

Literature Review

1.2 مقدمة

Introduction

تم في هذا الفصل استعراض أهم مزايا البيتون المسلح وخصائصه الميكانيكية، كما تناول تصميم البلاطات موضوع البحث بطريقة خطوط الانكسار (*Yield line method*) وميكانيكات الانهيار المحتملة، كما تم شرح خصائص مادة الـ *FRP* والتوسع في استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (*FRP*) في تقوية البلاطات البيتونية المسلحة لزيادة مقاومة البلاطة للأحمال الشاقولية والتخفيف من السهم الناتج عن تطبيق الحمولات وذلك من خلال استعراض دراسات مرجعية سابقة لنفس الموضوع .

2.2 البيتون المسلح

Reinforced Concrete

تعتبر مقاومة البيتون على الضغط من أهم خصائص مادة البيتون، ووفقا لها يصنف البيتون إلى فئات، ويتم تحديدها إما بالمقاومة الأسطوانية المميزة f_{ck} أو المقاومة المكعبية المميزة $f_{ck,cube}$ ، ويصنف الكود الأوربي (*Eurocode2,2004*) متانة البيتون على أساس المقاومة المميزة الأسطوانية f_{ck} وذلك تحديداً في اليوم الـ 28 من صب العينات الاسطوانية.

يمكن تحديد مقاومة البيتون في عدة مراحل عند اكتسابه المقاومة وذلك بالعلاقات (1-2) ، (2-2) ، (3-2) ، (4-2):

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ (MPa)} \quad \text{for } 3 < t < 28 \text{ days} \quad \dots(1-2)$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad \text{for } t \geq 28 \text{ days} \quad \dots(2-2)$$

أما من أجل قيم أكثر دقة فيجب الاعتماد على التجارب وخصوصا من أجل تحديد المقاومة المميزة على الضغط f_{ck} عند زمن اصغر من ثلاثة أيام .

إن تحديد المقاومة المميزة على الضغط f_{ck} في عُمر t يعتمد على نوع الإسمنت، درجة الحرارة والشروط المحيطة أثناء عملية الصب. ومن أجل درجة حرارة متوسطة من 20°C وشروط صب وفقا لـ EN 12390 فيتم تحديد المقاومة المميزة على الضغط f_{ck} عند أعمار مختلفة للبيتون من خلال العلاقتين (*Eurocode2,2004*) :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad \dots(3-2)$$

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \dots(4-2)$$

حيث :

$f_{cm}(t)$: مقاومة الضغط المتوسطة للبيتون في عمر t يوم.

f_{cm} : مقاومة الضغط المتوسطة للبيتون في يوم الـ 28 حسب الجدول (1-2).

$\beta_{cc}(t)$: معامل يعتمد على عمر الببتون t يوم.
 s : معامل يعتمد على نوع الاسمنت والمقاومة التي يعطيها.
 exp : تعني تابع أسي .

تعطى مقاومة الببتون على الشد المحوري وفق الكود الأوربي بالعلاقة (5-2) (Eurocode2;2004):

$$f_{ct} = 0.9 f_{ct,sp} \quad \dots(5-2)$$

حيث :

f_{ct} : القيمة التقريبية لمقاومة الببتون على الشد المحوري

$f_{ct,sp}$: مقاومة الشد للببتون على الفلق (*Splitting Tensile Strength*) نتيجة التجربة.

بين الكود الأوربي تغيير مقاومة الشد للببتون حسب عمره (Eurocode2;2004) بالعلاقة (6-2):

$$f_{ctm}(t) = (B_{cc}(t))^{\alpha} \cdot f_{ctm} \quad \dots(6-2)$$

حيث : $\alpha = 1 \dots (t < 28)$ ، $\alpha = 2/3 \dots (t \geq 28)$

$f_{ctm}(t)$: مقاومة الشد للببتون في عمر t يوم.

f_{ctm} : مقاومة الشد المتوسطة للببتون ويمكن الحصول على قيمتها من الجدول (1-2) باستخدام مقاومة الضغط للببتون

، ويعطى $B_{cc}(t)$ وفق العلاقة (4-2).

إن خواص المواد الداخلة في الببتون تحدد معامل مرونة الببتون وتعطى القيم التقريبية لمعامل المرونة بين $\sigma_c = 0$ و $0.4 f_{cm}$ وذلك للخرسانة العادية من الحصويات الكوارتزية حيث يؤخذ المعامل من الجدول 1-2 ، أما بالنسبة للحصويات من الحجر الكلسي فيجب أن تخفض القيمة بمقدار 10% ، و الحجر الرملي بمقدار 30% ، أما بالنسبة للحصويات من البازلت فيجب زيادة القيمة بمقدار 20% (Eurocode2;2004) .

يتم حساب معامل مرونة الببتون عند زمن معين من العلاقة (7-2) (Eurocode2;2004):

$$E_{cm}(t) = [(f_{cm}(t)/f_{cm})]^{0.3} E_{cm} \quad \dots(7-2)$$

حيث:

$E_{cm}(t)$: معامل مرونة الببتون عند الزمن t .

$f_{cm}(t)$: مقاومة الضغط المتوسطة للببتون في زمن t تحسب من العلاقة (6-2) .

E_{cm} : معامل مرونة الببتون في اليوم 28 .

f_{cm} : مقاومة الضغط المتوسطة للببتون في اليوم 28 .

يؤخذ معامل بواسون 0.2 للببتون غير المتشقق و بقيمة 0 للببتون المتشقق (Eurocode2;2004).

الجدول (1-2): جدول لتصنيفات البتتون وبين مقاومة البتتون وتشوّهاته المميزة (Eurocode2;2004)

Analytical relation / Explanation	Strength classes for concrete															
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90		
f_{yk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90		
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105		
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98		
f_{cm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0		
$f_{ck,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5		
$f_{ck,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6		
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44		
ϵ_{cr} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8		
ϵ_{cur} (‰)	3,5															
ϵ_{cs} (‰)	2,0															
ϵ_{csd} (‰)	3,5															
n	2,0															
ϵ_{cs} (‰)	1,75															
ϵ_{csd} (‰)	3,5															

تعطي علاقة الإجهاد – التشوه النسبي لمادة البتتون في حالة الضغط حسب الكود الأوربي (Eurocode2;2004) بالمخطط المبين بالشكل (1-2)، حيث يبدأ البتتون بسلوك مرن خطي (*Elastic*) حتى وصوله إلى قيمة إجهاد مقداره $0.4 f_{cm}$ ، ثم تبدأ المرحلة اللامرنة (*Inelastic Behaviour*) وصولاً إلى مقاومة الضغط المتوسطة للبتتون f_{cm} وهي مقاومة الضغط العظمى ثم يصل إلى الانهيار، والرموز المبينة بالشكل هي:

σ_c : إجهاد الببتون على الضغط.

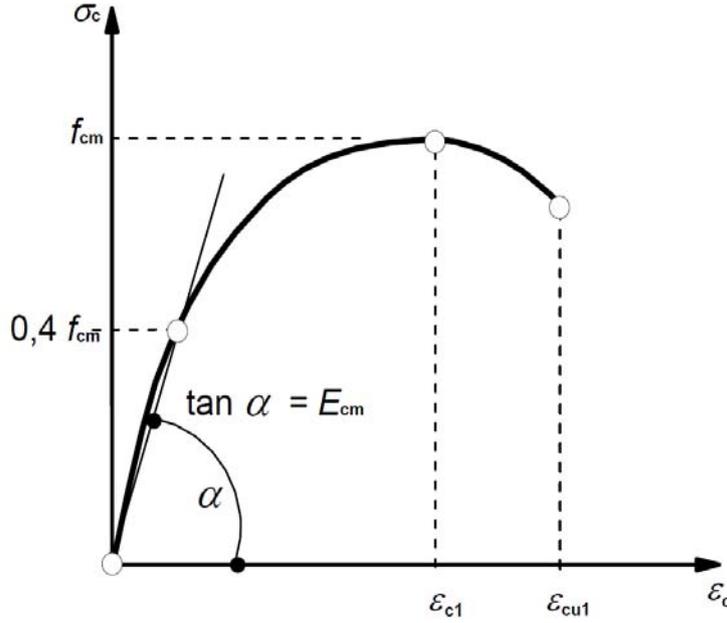
f_{cm} : مقاومة الضغط المتوسطة للببتون في يوم الـ 28 حسب الجدول (1-2).

ϵ_c : التشوه النسبي للببتون على الضغط.

ϵ_{c1} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة الضغط المتوسطة للببتون حسب الجدول (1-2).

ϵ_{cu1} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة الضغط للببتون عند الانهيار حسب الجدول (1-2).

E_{cm} : معامل المرونة اللحظي التقريبي للببتون حيث إجهادات الضغط بين $[0 - 0.4 f_{cm}]$ حسب الجدول (1-2).



الشكل (1-2): مخطط علاقة الإجهاد - التشوه النسبي للببتون على الضغط (Eurocode2;2004)

يتم حساب معامل مرونة الببتون اللحظي التقريبي الوارد في الجدول (1-2) من العلاقة (8-2) (Eurocode2;2004):

$$E_{cm}(GPa) = 22 [(f_{cm})/10]^{-0.3} : f_{cm}(MPa) \quad \dots(8-2)$$

3.2 البلاطات الببتونية المسلحة

Reinforced - Concrete Slabs

تشكل البلاطات الأرضيات والأسقف في الأبنية، وهي العناصر الإنشائية المستوية التي عادةً ما تحمل بحمولات شاقولية متعامدة مع مستويها. يمكن أن تكون البلاطات مستندة استناداً بسيطاً عند أي من أطرافها أو مستمرة فوق مسند واحد أو أكثر (MACGINLEY and CHOO;2003). تعمل البلاطات الببتونية بشكل أساسي على الانحناء (Bending) ويمكن تصميمها كالجوائز على الرغم أنها أبسط عموماً لأنه عند حساب البلاطة يؤخذ العرض المقاوم للشريحة 1m

بينما هو في الحقيقة مستمر وهذا لصالح الأمان، كما أن إجهادات القص في البلاطات عادةً منخفضة إلا في حال تواجد حمولة مركزة كبيرة على البلاطة، كما أن حديد التسليح الذي يعمل على الضغط نادراً ما يتطلب وضعه في المقطع المقاوم للبلاطة، تتم دراسة البلاطات البيتونية المستمرة بشكل أساسي لتحتمل كافة تراكيب الأحمال في أسوأ الظروف لأن هنالك فرصاً كبيرة لإعادة توزيع الحمولات في البلاطات (Mosley and Bungey; 1987).

4.2 تصميم البلاطات البيتونية المسلحة باستخدام طريقة خطوط الانكسار Design of Reinforced - Concrete Slabs by Yield Line Theory

يعتمد التصميم باستخدام طريقة خطوط الانكسار على مبدأ العمل الوهمي الشائع الاستخدام والأساس فيه هو المساواة بين العمل الخارجي و العمل الداخلي، وبمعنى آخر فإن الطاقة الخارجية المبذولة في العمل الخارجي يجب أن تساوي الطاقة الداخلية المبددة (Dissipated Energy) على طول خطوط الانكسار، والعلاقة (9-2) تبين طريقة الحساب بطريقة خطوط الانكسار (Kennedy and Goodchild; 2003):

الطاقة الخارجية المبذولة نتيجة انتقال الحمولات = الطاقة الداخلية المبددة على طول خطوط الانكسار

$$D = E$$

$$\sum(m * \ell * \theta) = \sum(N * \delta) \quad \dots(9-2)$$

حيث:

E : الطاقة الخارجية المبذولة (External Energy).

D : الطاقة الداخلية المبددة (Internal Energy) نتيجة القوى الداخلية على امتداد خط الإنكسار.

N : القوى الشاقولية المطبقة على منطقة محددة من المناطق المتشكلة بين خطوط الانكسار (KN).

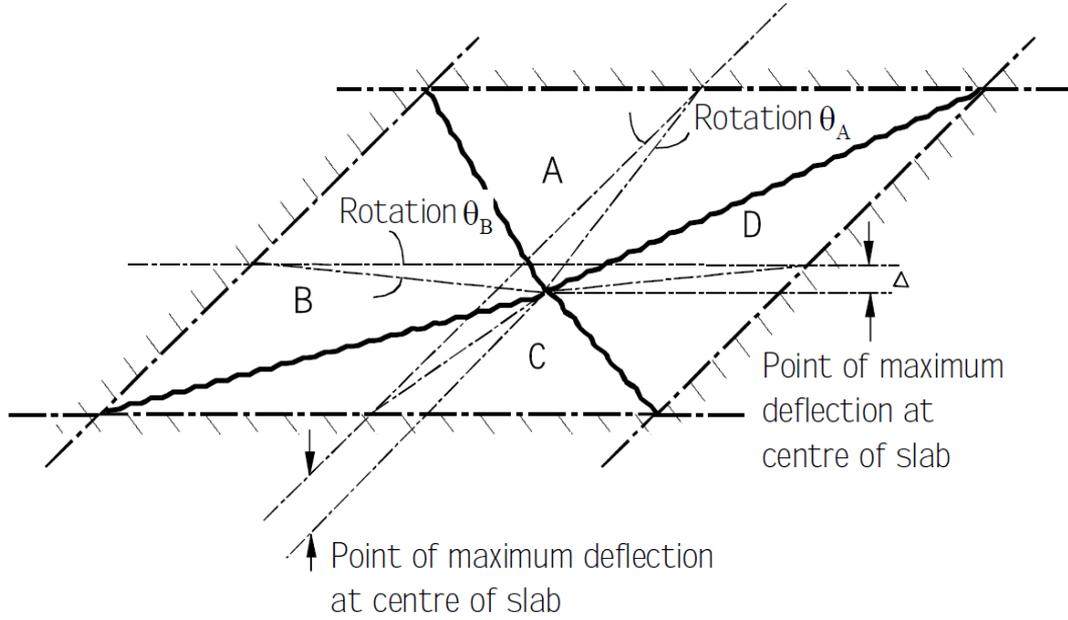
δ : الانتقال الشاقولي المتوقع للقوى المطبقة على المنطقة المدروسة (m).

m : العزم المقاوم للبلاطة على امتداد خط الانكسار (KN.m/m).

ℓ : طول خط الانكسار على امتداد محور دوران المنطقة المدروسة (m).

θ : زاوية دوران المنطقة المدروسة حول محور دورانها أو خط الانكسار (m/m).

يبين الشكل (2-2) الشكل المشوه لبلاطة بيتونية مربعة بسيطة الاستناد عند أطرافها الأربعة حيث أدت خطوط الانكسار إلى تقسيم البلاطة إلى أربع مناطق، و يظهر الانتقال الشاقولي الأعظمي عند منتصف البلاطة و زوايا الدوران لكل منطقة (Kennedy and Goodchild; 2003).



الشكل (2-2): حساب البلاطات باستخدام طريقة خطوط الانكسار (Kennedy and Goodchild; 2003)

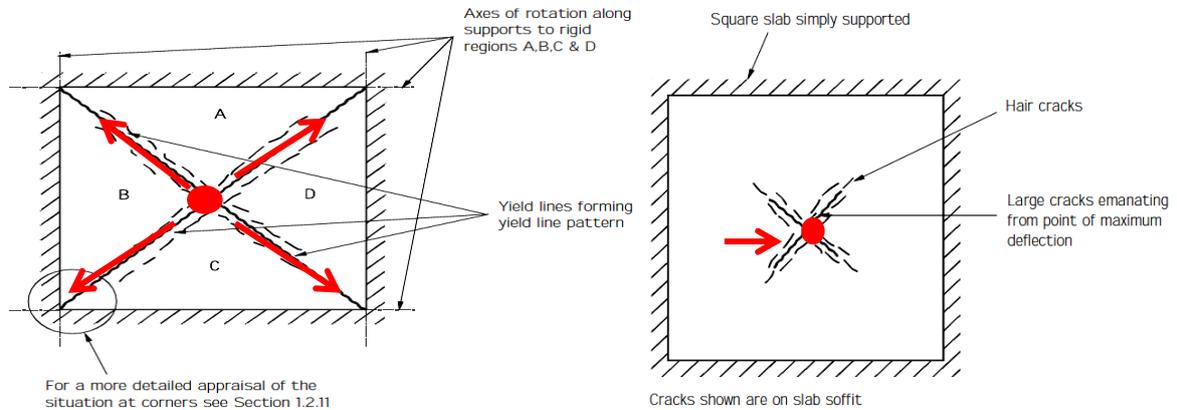
إن تصميم البلاطات باستخدام طريقة خطوط الانكسار على اعتبار دخول البيتون في المرحلة اللدنة يعتمد على دراسة ميكانيكيات الانهيار للبلاطة عند الحالة الحدية القصوى من خلال رسم خطوط الانكسار والتي هي عبارة عن خطوط انهيار في البلاطة البيتونية المسلحة حيث حديد التسليح وصل إلى حد الخضوع مع حدوث دوران لدن على امتداد هذا الخط، لذلك فإن استخدام طريقة خطوط الانكسار في التصميم يؤدي إلى تصميم أكثر اقتصادية. وهي طريقة موثوقة لتصميم البلاطات البيتونية المسلحة، فهي طريقة تستخدم خطوط الانكسار لإيجاد ميكنزم الانهيار للبلاطة في حالة الحد الأعلى (*High Limit*) للتحميل. ومن مزايا استخدام طريقة خطوط الانكسار في تصميم البلاطات البيتونية المسلحة أنها تنتج بلاطات ذات سماكة صغيرة وكميات تسليح أقل مقارنة مع غيرها من الطرق لجميع حالات التحميل للبلاطة، لهذا تكون تفاصيل حديد التسليح سهلة وتثبيتته سهل وبالتالي سرعة في إنشاء البلاطة (Kennedy and Goodchild; 2003).

يبين الشكل (3-2) بلاطة بيتونية قيد الإنشاء للطابق الرابع في بناء بمدينة كاردنجتون *Cardington* الأوربية، حيث تم تصميم نصف البلاطة البيتونية المسلحة في أسفل الصورة باستخدام طريقة خطوط الانكسار، أما القسم العلوي من الصورة فيبين النصف الآخر من البلاطة الذي صمم بالطريقة التقليدية المرنة، يوضح الشكل (3-2) اقتصادية التصميم باستخدام طريقة خطوط الانكسار، حيث كانت كمية حديد التسليح المثبت في القسم المدروس بطريقة خطوط الانكسار (T12/200 cm)، مقابل (T16/175 mm) في القسم المصمم بالطريقة المرنة التقليدية، وقد عمل كلا القسمين من البلاطة بشكل جيد عند تحميلهما وكانت القياسات للسهم في منتصف كل من القسمين متقاربة جداً عند تحميلهما بنفس الحمولة (Kennedy and Goodchild; 2003).



الشكل (3-2): مشروع بناء بيتوني في مدينة كاردينجتون الأوربية يبين إنشاء بلاطة الطابق الرابع (Kennedy and Goodchild; 2003)

يبين الشكل (4-2) السطح السفلي لبلاطة بيتونية مربعة بسيطة الاستناد عند أطرافها الأربعة تحت تأثير حمولة موزعة بانتظام على سطحها حيث تمت زيادة هذه الحمولة حتى انهيار البلاطة. حتى الوصول إلى حمولة الاستثمار كانت استجابة البلاطة مرنة وكانت أعلى إجهادات شادة في منتصف البلاطة حيث السهم الأكبر، تم ظهور التشققات الشعيرية الناتجة عن وصول إجهادات الشد في البيتون إلى حدها الأعلى بسبب عزوم الانحناء عند منتصف البلاطة، وباستمرار زيادة الحمولة يزداد عرض الشقوق الشعيرية نتيجة دخول حديد التسليح مرحلة السيلان ويبدأ تشكل خطوط الانكسار في البلاطة من نقطة منتصف البلاطة حيث إجهادات الشد الناتجة عن انحناء البلاطة أعظمية الشكل (4-2-a). ومع ازدياد الحمولة تنتشر خطوط الانكسار باتجاه أطراف البلاطة وبنفس الوقت يستمر دخول حديد التسليح مرحلة السيلان على طول هذه الخطوط. وتنهار البلاطة عند وصول الحمولة إلى حدها الأقصى حيث تقسم البلاطة إلى صفائح صلبة (D،C،B،A) كما في الشكل (4-2-b)، حيث خطوط الانكسار تشكل حدوداً لهذه الصفائح، وهذه الصفائح في الواقع تدور حول خطوط الانكسار (Kennedy and Goodchild; 2003).



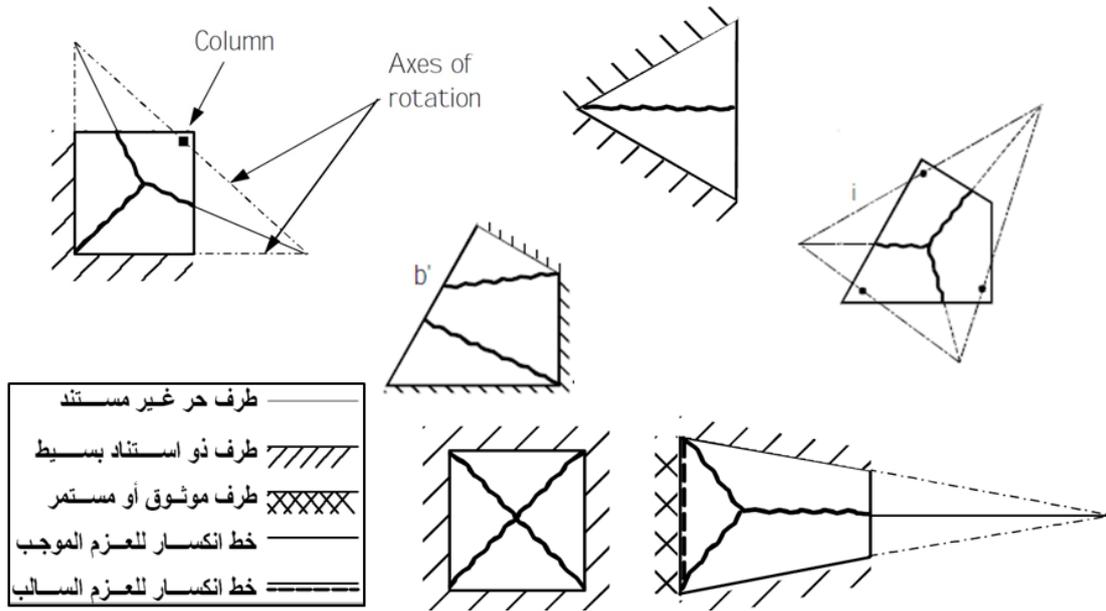
b. تشكل ميكزوم الانهيار بخطوط الانكسار (الحمولة الحديدية)

a. بداية تشكل خطوط الانكسار (حمولة الاستثمار)

الشكل (4-2): تشكل خطوط الانكسار في بلاطة بيتونية مسلحة (Kennedy and Goodchild; 2003)

إن التصميم باستخدام طريقة خطوط الانكسار يتطلب معرفة بأنماط الانهيار للبلاطات البيتونية المسلحة التي تشكلها خطوط الانكسار، و إن خطوط الانكسار التي تحدد شكل نمط الانهيار تحكمها قواعد ثابتة هي (Kennedy and Goodchild; 2003):

- خطوط الانكسار مستقيمت تمر من نقاط تقاطع محاور الدوران.
 - تمر محاور الدوران من الأعمدة وعلى امتداد خطوط الاستناد للبلاطة.
 - تنتهي خطوط الانكسار عند حدود البلاطة.
 - الأطراف المستمرة للبلاطة تصد وتبعد عنها خطوط الانكسار بينما تجذبها المساند ذات الاستناد البسيط.
- يوضح الشكل (5-2) القواعد الرئيسية لتشكل خطوط الانكسار في البلاطات ذات الأشكال غير المنتظمة ولشروط استناد مختلفة.



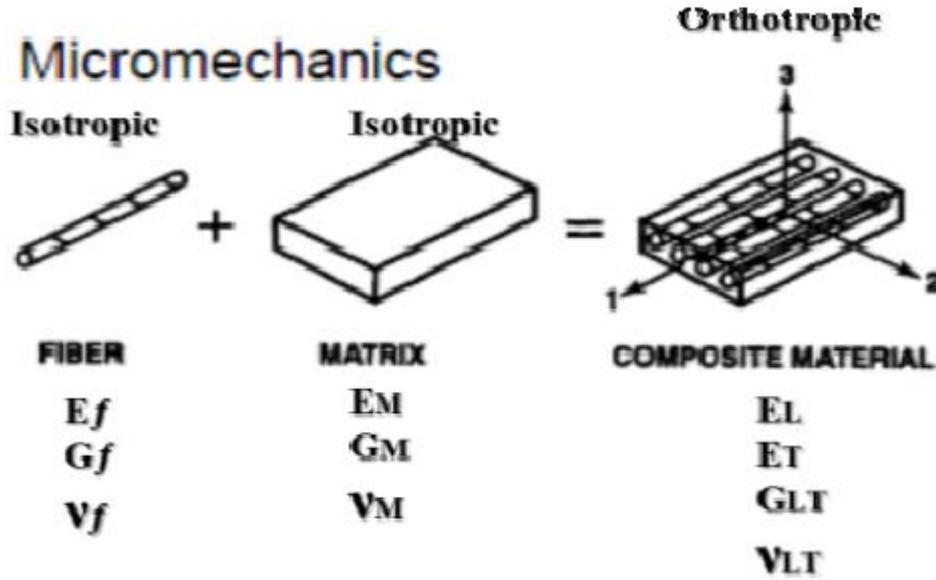
الشكل (5-2): طريقة تشكيل خطوط الانكسار في بلاطات ذات شروط استناد مختلفة (Kennedy and Goodchild; 2003)

5.2 الخصائص الميكانيكية لمركبات الـ FRP Mechanical Properties of FRP Composites

تتألف شرائح البوليميرات المسلحة بالألياف (Fiber Reinforced Polymers- FRP) من الألياف (Fiber) ويرمز لها بـ f والمادة رابطة (Matrix) ويرمز لها بـ m . لتحديد الخواص الميكانيكية لشريحة البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) فلا بد من معرفة طريقة توضع اللألياف في الشريحة المستخدمة.

تعتبر شريحة البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) مادة غير متجانسة (Orthotropic Material) أي مادة ذات خصائص ميكانيكية متغيرة بالاتجاهين، بينما تعد المواد المؤلفة لها (Isotropic Material) أي متماثلة الخواص.

من هنا ينتج للشريحة ثوابت هندسية جديدة ناتجة عن الاختلاف في الخواص بين الألياف واللاصق، وتوصف هذه الثوابت الجديدة سلوك المادة ككل كما يبين الشكل (6-2).



الشكل (6-2): مخطط توضيحي لمكونات الـ FRP (Reddy;1997)

حيث:

E_f : معامل مرونة الألياف.

ν_f : معامل بواسون للألياف.

E_M : معامل مرونة المادة الرابطة.

G_M : معامل مرونة القص للمادة الرابطة.

ν_M : معامل بواسون للمادة الرابطة.

E_L : معامل المرونة لصفحة الـ FRP بالاتجاه الموازي للألياف.

E_T : معامل المرونة لصفحة الـ FRP بالاتجاه العمودي على الألياف.

G_{LT} : معامل مرونة القص في المستوي لصفحة الـ FRP.

ν_{LT} : معامل بواسون لصفحة الـ FRP.

تُعطى الخواص الميكانيكية لمادة الـ FRP بالعلاقات التالية (Batikha; 2008):

$$E_L = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad \dots(10-2)$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad \dots(11-2)$$

حيث:

V_f : نسبة حجم الألياف.

$V_m=1-V_f$: نسبة حجم المادة الرابطة،

ξ : معامل يسمح بأخذ تأثير طريقة رزم الألياف وتوزُّعها ضمن المادة الرابطة وشروط التحميل بعين الاعتبار، مثلاً

تُستخدم قيمة ($\xi = 2$) في حساب E_T ، والقيمة ($\xi = 1$) في حساب G_{LT} .

η : معامل يُعطى بالعلاقة (12-2).

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad \dots(12-2)$$

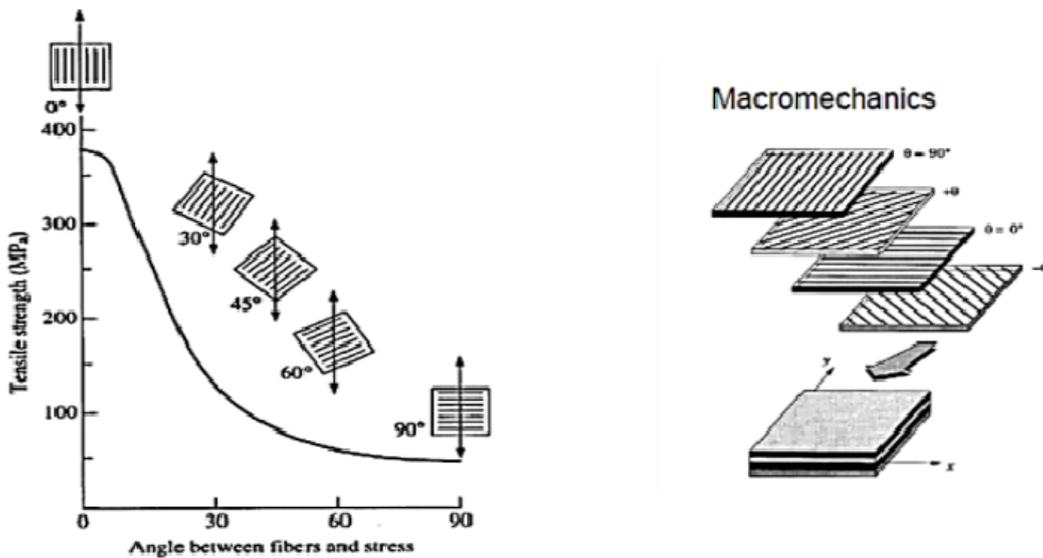
يُعطى معامل مرونة القص G_{LT} بالعلاقة (13-2):

$$\frac{G_{LT}}{G_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad \dots(13-2)$$

يُعطى معامل بواسون (ν_{LT}) بالعلاقة (14-2):

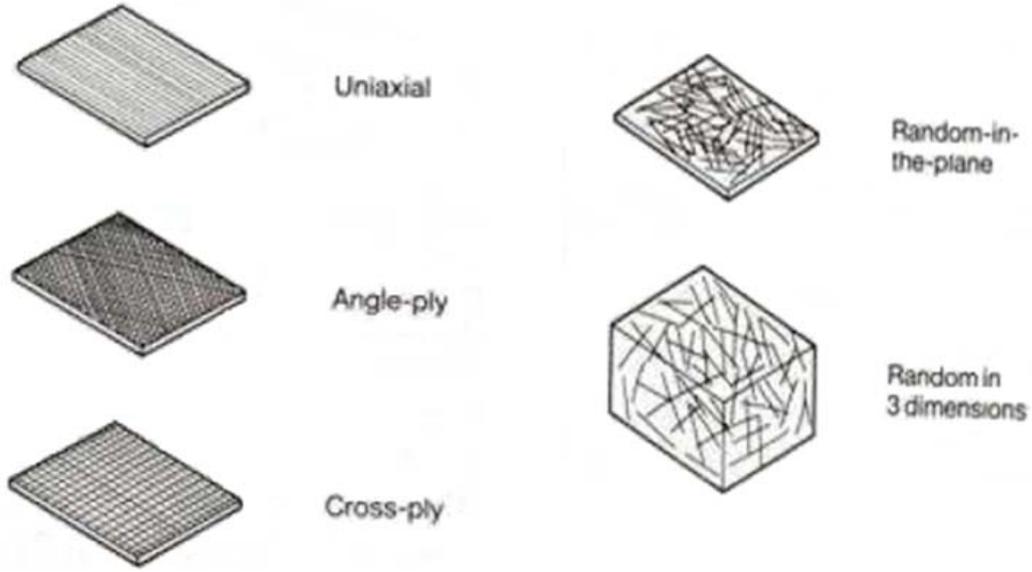
$$\nu_{LT} = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad \dots(14-2)$$

يؤثر توزع الألياف ضمن المادة الرابطة ضمن شريحة الـ *FRP* على خواصها الميكانيكية بشكل كبير، حيث يوضح الشكل (7-2) العلاقة بين ميل توزيع الألياف بالنسبة للإجهادات وتأثير ذلك على مقاومة مادة الـ *FRP* على الشد، فيلاحظ أن أقصى مقاومة على الشد تكون عندما يكون توزيع الألياف ضمن الرابط باتجاه الإجهادات المطبقة. بالمقابل، تنخفض مقاومة تلك الألياف حتى تصل إلى أخفض قيمة عندما تكون الإجهادات متعامدة مع الألياف كما يوضح الشكل (7-2).



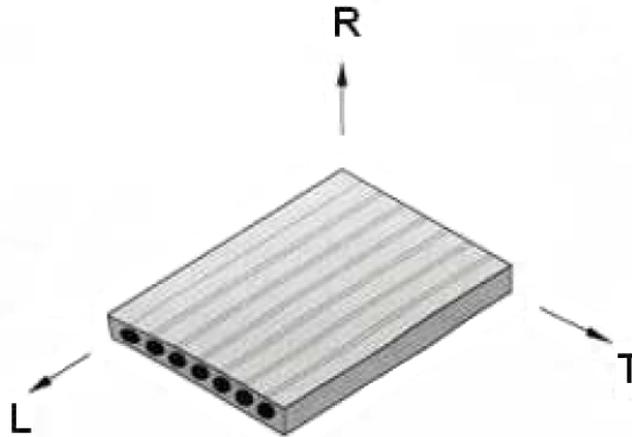
الشكل (7-2): تأثير ميل ألياف مادة الـ *FRP* في المادة الرابطة على مقاومتها على الشد (Baghpour;2012)

في بعض الأحيان قد تتوضع الألياف ضمن المادة الرابطة بشكل عشوائي أو باتجاهين كما يوضح الشكل (8-2).



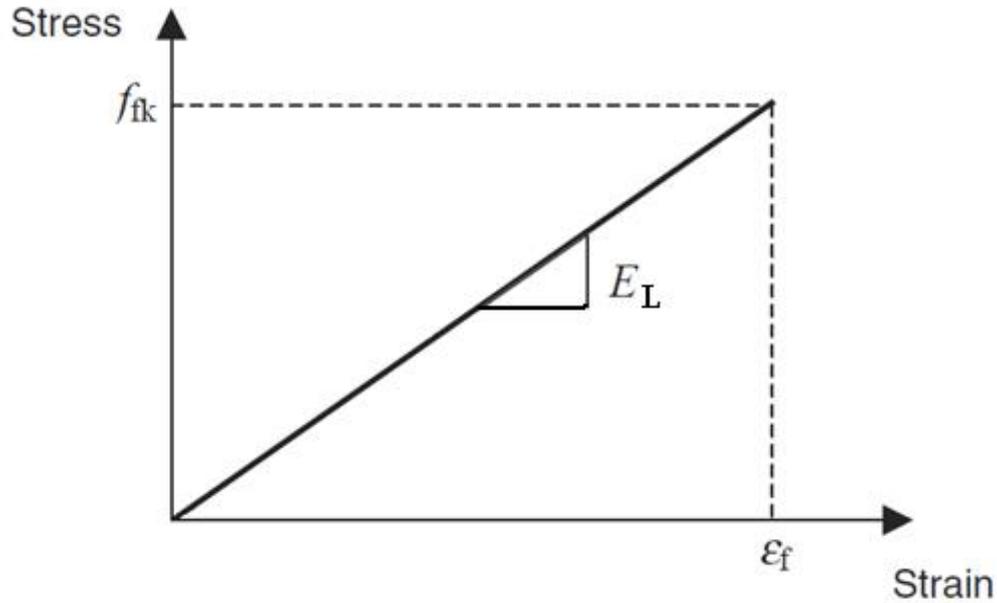
الشكل (8-2): الأشكال الشائعة لتوزيع الألياف ضمن الـ FRP (Batikha; 2008)

سيتم التركيز في هذا البحث على حالة الـ FRP حيث الألياف باتجاه واحد. يبين الشكل (9-2) المحاور الرئيسية لشريحة FRP ذات توزيع للألياف باتجاه واحد (Uniaxial FRP Lamina).



الشكل (9-2): تعريف محاور شريحة الـ FRP ذات التوزيع المنتظم للألياف (Batikha; 2008)

إن سلوك مادة الـ FRP سلوك خطي مرن حتى الانهيار، دون وجود مرحلة لاخطية أو حد خضوع واضح، وبالتالي فإن علاقة (الإجهاد - التشوه) هي علاقة خطية مبيّنة بالشكل (10-2). حيث: f_{fk} هو إجهاد الشد الأعظمي للـ FRP، ϵ_f التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع، E_L معامل مرونة الـ FRP باتجاه الألياف.



الشكل (10-2): مخطط (Stress-Strain) لمادة الـ FRP (Concrete Society; 2004)

تختلف خصائص مادة الـ FRP باختلاف نوع الألياف المستخدمة. يبين الجدول (2-2) إجهاد الشد (Tensile Strength)، ومعامل المرونة (Modulus of Elasticity)، والتشوه الحدي عند الانقطاع (Strain to Failure)، والكثافة (Density)، ومعامل التمدد الحراري (Coefficient of Thermal Expansion) لمختلف أنواع الألياف المستخدمة في عمليات تقوية المنشآت (الألياف الكربونية والزجاجية والأراميدية).

الجدول (2-2): خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية (Concrete Society; 2004; Batikha; 2008)

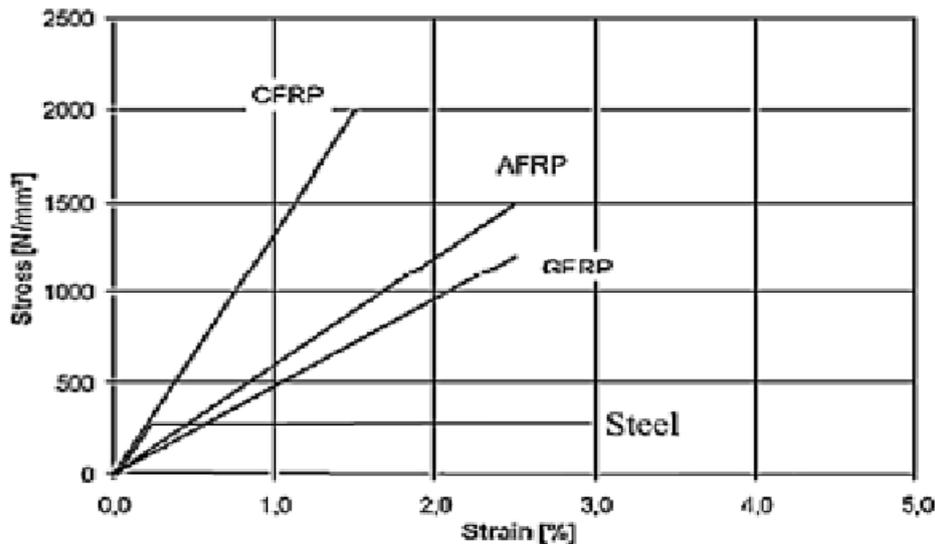
Fibre	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain to failure (%)	Density (t/m ³)	Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /C)
Carbon: High strength	4300-4900	230-240	1.9-2.1	1.8	-0.38
Carbon: High modulus	2740-5490	294-329	0.7-1.9	1.78-1.81	-0.83
Carbon: Ultra high modulus	2600-4020	540-640	0.4-0.8	1.91-2.12	-1.1
Aramid: High strength and high modulus	3200-3600	124-130	2.4	1.44	2.1
Glass	2400-3500	70-85	3.5-4.7	2.6	4.9

يبين الجدول (3-2) خصائص الأنواع المختلفة من المواد الراتنجية (*Resin*) المستخدمة كمادة رابطة في مركبات الـ *FRP*. حيث أن الإيبوكسي (*Epoxy*) هو أكثر المواد استخداماً بسبب القيم العالية لإجهاد الشد والتشوه الحدي، كما أن مقاومته مرتفعة للعوامل البيئية والمؤثرات الكيماوية، وله قيم منخفضة للانكماش، وقدرة عالية على الالتصاق. (*Batikha; 2008*).

الجدول (3-2): خصائص الأنواع المختلفة للمواد الرابطة الراتنجية (*Batikha; 2008*)

Resin	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain to failure (%)	Density (t/m ³)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /C)
Epoxy	60-85	2.6-3.8	1.5-8	1.11-1.2	0.3-0.4	30-70
Polyester	50-75	3.1-4.6	1-2.5	1.11-1.25	0.35-0.38	30-70
Phenolic	60-80	3-4	1-1.8	1-1.25	Not available	80
Polyurethane	15-25	0.5	10	1.15-1.2	0.4	40

يبين الشكل (11-2) علاقة الإجهاد - التشوه النسبي للأنواع الشائعة من الـ *FRP* مع مقارنتها بالفولاذ. حيث يمكن ملاحظة المقاومة العالية لمادة الـ *FRP*، مع عدم وجود حد الخضوع الذي يتميز به الفولاذ (*Steel*).



الشكل (11-2): مجال الإجهاد - التشوه لمختلف أنواع الـ *FRP* (*Baghpour; 2012*)

يبين الجدول (4-2) مقارنة بين أنواع الـ *FRP* من حيث إجهاد الشد (*Tensile Strength*) وإجهاد الضغط (*Compressive Strength*) ومعامل المرونة (*Young's modulus*) والسلوك على التحميل طويل الأمد (*Long-term behavior*) والسلوك على التعب (*Fatigue behavior*) والكثافة (*Bulk density*) ومقاومة القلويات (*Alkaline resistance*) والسعر (*Price*).

الجدول (4-2): مقارنة بين مركبات الـ *FRP* (Teng et al.; 2002)

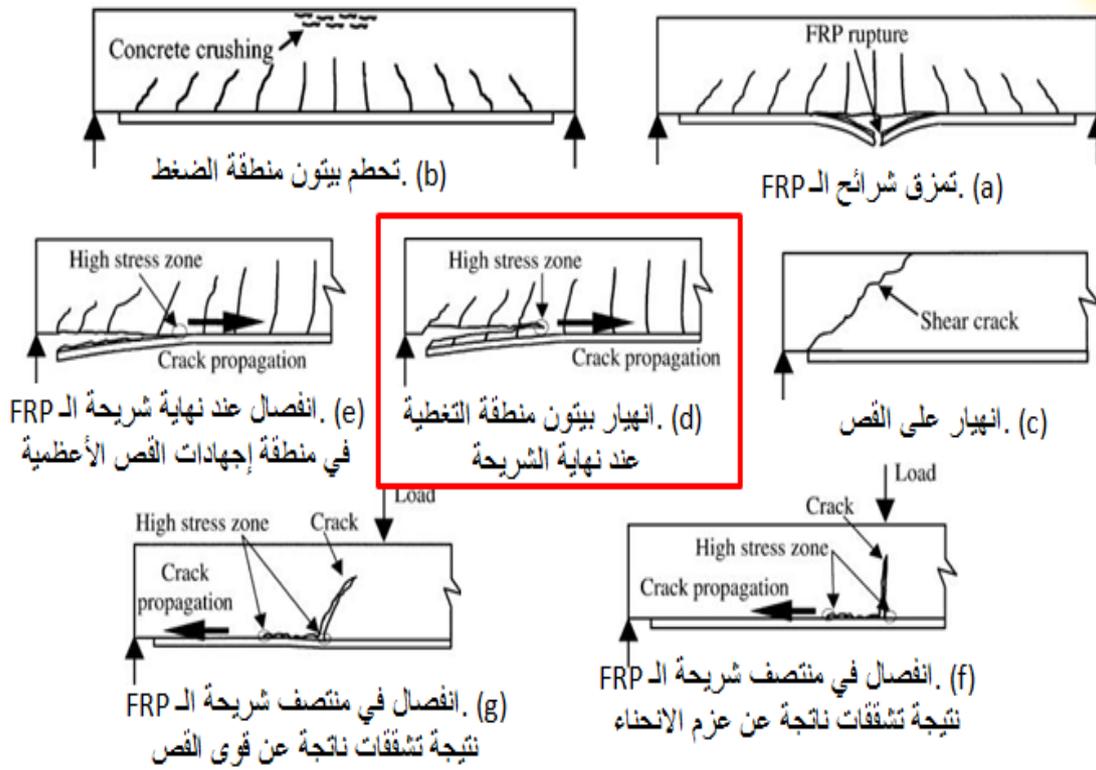
Qualitative comparison between E-glass, HT-carbon and aramid fibres

Criterion	Fibre composite sheets made of:		
	E-glass fibres	Carbon fibres	Aramid fibres
Tensile strength	Very good	Very good	Very good
Compressive strength	Good	Very good	Inadequate
Young's modulus	Adequate	Very good	Good
Long-term behaviour	Adequate	Very good	Good
Fatigue behaviour	Adequate	Excellent	Good
Bulk density	Adequate	Good	Excellent
Alkaline resistance	Inadequate	Very good	Good
Price	Very good	Adequate	Adequate

تمّ استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت من مواد مختلفة، وجميع هذه الأبحاث أثبتت الفاعلية الكبيرة لمادة الـ *FRP* في رفع قدرة تحمّل المنشآت، وزيادة المطاوعة (*Ductility*).

عند استعمال شرائح الـ *FRP* لتقوية العناصر البيتونية المسلحة تتحدد المقاومة القصوى التي يحققها العنصر بعد تقويته عبر عدة أشكال لانهييار شرائح الـ *FRP* أو انهيار العنصر المقوى وهي حسب (Teng et al; 2003): تمزق شرائح الـ *FRP* الشكل (a-12-2) عند منطقة الاجهادات الأعظمية، تحطم بيتون منطقة الضغط (الشكل b-12-2) عندما تكون نسبة التسليح أعظمية، انهيار على القص (الشكل c-12-2) غالبا ما يحدث بسبب عدم وجود تسليح قص كاف (أساور)، انهيار بيتون منطقة التغطية عند نهاية الشريحة (الشكل d-12-2) وخاصة اذا كانت الشريحة مثبتة من أطرافها، انفصال عند نهاية شريحة الـ *FRP* في منطقة إجهادات القص الأعظمية (الشكل e-12-2)، انفصال في منتصف شريحة الـ *FRP* نتيجة تغلغل وانتشار التشققات الناتجة عن عزم الانحناء (الشكل f-12-2)، انفصال في منتصف شريحة الـ *FRP* نتيجة تغلغل وانتشار التشققات الناتجة عن قوى القص (الشكل g-12-2).

والحالة الشائعة للانهييار في البلاطات البيتونية المسلحة هي الحالة (d) أي انهيار بيتون منطقة التغطية عند نهاية الشريحة.



الشكل (12-2): شكل توضيحي للانهييار الممكن للعناصر المقواة بشرائح الـ FRP (Teng et al; 2003)

6.2 استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) في تقوية البلاطات البيتونية المسلحة Using FRP in Strengthening Reinforced-Concrete Slabs

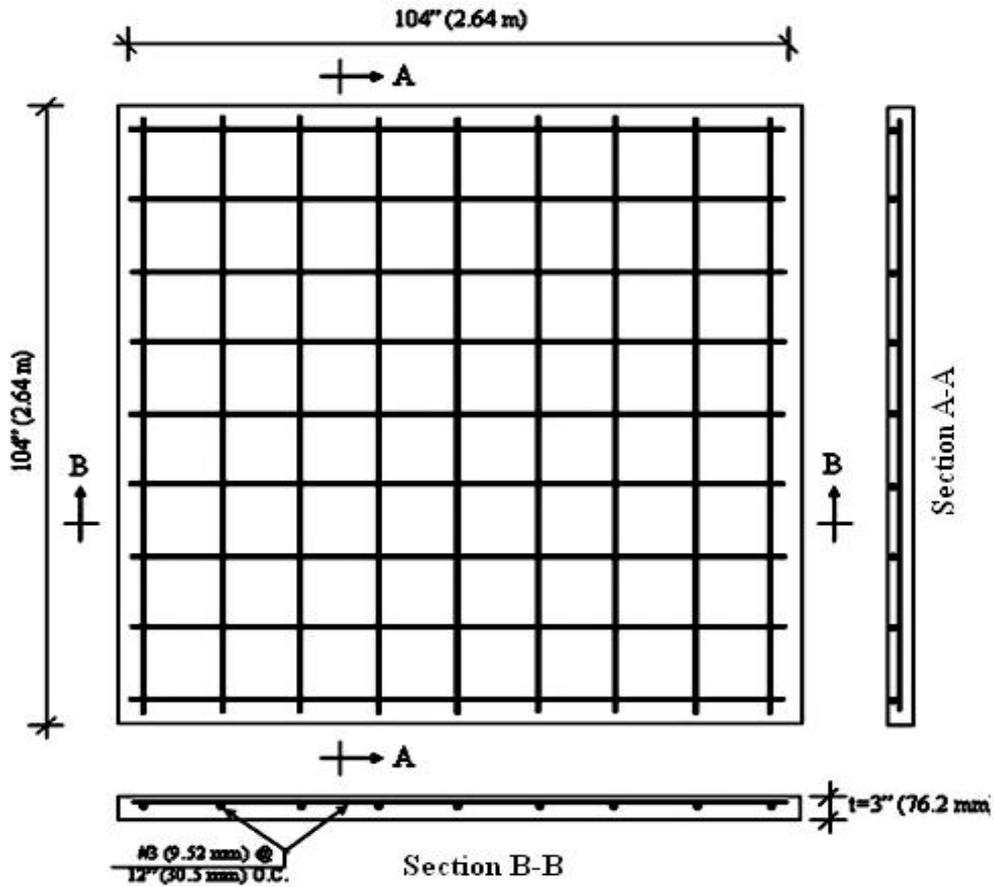
قامت العديد من الدراسات التجريبية والتحليلية بدراسة أثر تطبيق شرائح الـ FRP على المقاومة الحدية للبلاطة وأيضاً أثرها على السهم الحاصل نتيجة تطبيق حمولات شاقولية على السطح العلوي للبلاطة.

1.6.2 Mosallam and Mosalam ;2003

قام (Mosallam and Mosalam;2003) بدراسة مجموعة من البلاطات البيتونية المسلحة تجريبياً. كل نموذج عبارة عن بلاطة بيتونية مسلحة مربعة الشكل ذات استناد بسيط عند أطرافها الأربعة، بطول و عرض 2.64 m ، وسماكة 6.7 cm ، تسليح البلاطة هو قضيب تسليح بقطر 9.5 mm كل 305 mm بالاتجاهين مع الحفاظ على طبقة تغطية بيتونية لحديد التسليح 13 mm . طبقت حمولة موزعة بانتظام على الوجه السفلي للبلاطة (الوجه العلوي للبلاطة

هو المعرض للشد) باستخدام أداة صممت خصيصاً لتطبيق الحمولة بواسطة كيس فيه ماء مضغوط (*high-pressure water bag*).

قام الباحثان بتقوية البلاطات بطبقتين من شرائح من الـ *CFRP* عند الوجه المعرض للشد من البلاطة وبالاتجاهين .
 يبين الشكل (2-13) أبعاد نموذج البلاطات المجربة (Mosallam and Mosalam;2003) وتوضع رقائق الـ *CFRP* على الوجه العلوي وذلك بعرض $(B_f = 457 \text{ mm})$ ، والممتدة على كامل طول البلاطة $(L_f = 2640 \text{ mm})$ ، حيث نفذت كل من هذه الرقائق على طبقتين سماكة كل طبقة $(t_f = 0.58 \text{ mm})$ ، و التباعدات فيما بينها متساوية ومساوية لعرض الرقائق.



الشكل (2-13): نموذج البلاطة البيتونية المسلحة المستخدم في الدراسة (Mosallam and Mosalam;2003)

يبين الشكل (2-14) البلاطة المقواة قبل اختبارها على الجهاز المصمم خصيصاً لهذه التجربة، وفي أسفله كيس الماء المضغوط



الشكل (14-2): تقوية نموذج البلاطة التجريبية بشرائح الـ CFRP (Mosallam and Mosalam;2003)

قام الباحثان بإجراء عدّة اختبارات على المواد المستخدمة في بناء عيّات التجربة، فكانت المقاومة المتوسطة للضغط لخمس اسطوانات نظامية بعمر الـ 28 يوم ($f_{cm} = 33 \text{ MPa}$)، أما مقاومة الشد للبيتون (*tensile strength*) حسب التجربة في المقالة (Mosallam and Mosalam;2003)، $\sigma_{tu} = 1.85 \text{ MPa}$. مواصفات حديد تسليح البلاطة في نموذج التجربة حسب المقالة (Mosallam and Mosalam;2003) : إجهاد خضوع حديد التسليح (*Yield strength*) $f_y = 401.37 \text{ MPa}$ ، معامل مرونة حديد التسليح (*Elastic*) $E_s = 194000 \text{ MPa}$ (modulus)، ومعامل بواسون لحديد التسليح (*Poisson's ratio*) $\nu_s = 0.3$.

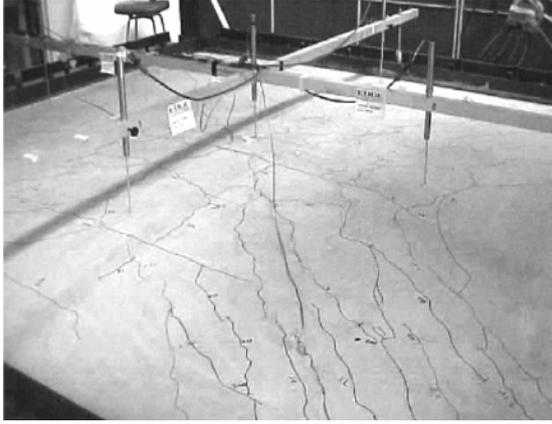
تسلك شرائح التقوية الـ CFRP على الشد سلوكاً مرناً خطياً ذا انهيار هش (*Elastic-Brittle*) كما أظهر الشكل (10-2)، وقد حددت الدراسة التجريبية لـ (Mosallam and Mosalam;2003) الخصائص الهندسية لرقائق الـ CFRP المستعملة في تقوية البلاطة البيتونية المسلحة وهي:

$$E_L = 100750 \text{ MPa} \quad \text{معامل مرونة باتجاه الألياف:}$$

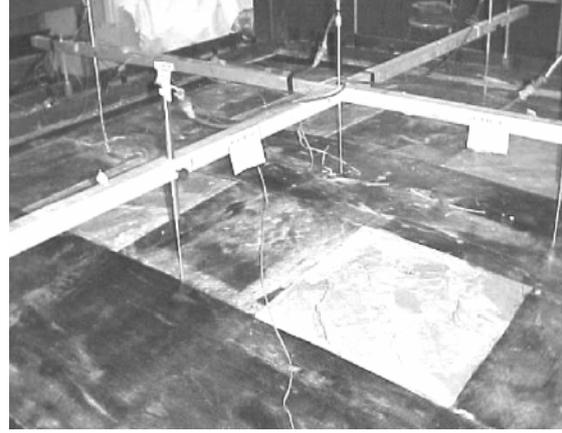
$$E_T = 1\% \text{ EL} = 1008 \text{ MPa} \quad \text{معامل مرونة بالاتجاه المستعرض للألياف:}$$

$$\varepsilon_{fu} = 1.2\% \quad \text{التشوه النسبي الحدي على الشد:}$$

يوضح الشكل (15-2) آلية انهيار البلاطة المدروسة بدون تقوية وآلية الانهيار للبلاطة مع تقوية بشرائح الـ FRP، حيث حصل الانهيار في البلاطة بدون تقوية نتيجة تشكل خطوط الانكسار على السطح العلوي للبلاطة، بينما انهارت البلاطة مع تقوية نتيجة تشكل خطوط الانكسار وانفصال شرائح الـ FRP عن بيتون منطقة التغطية .



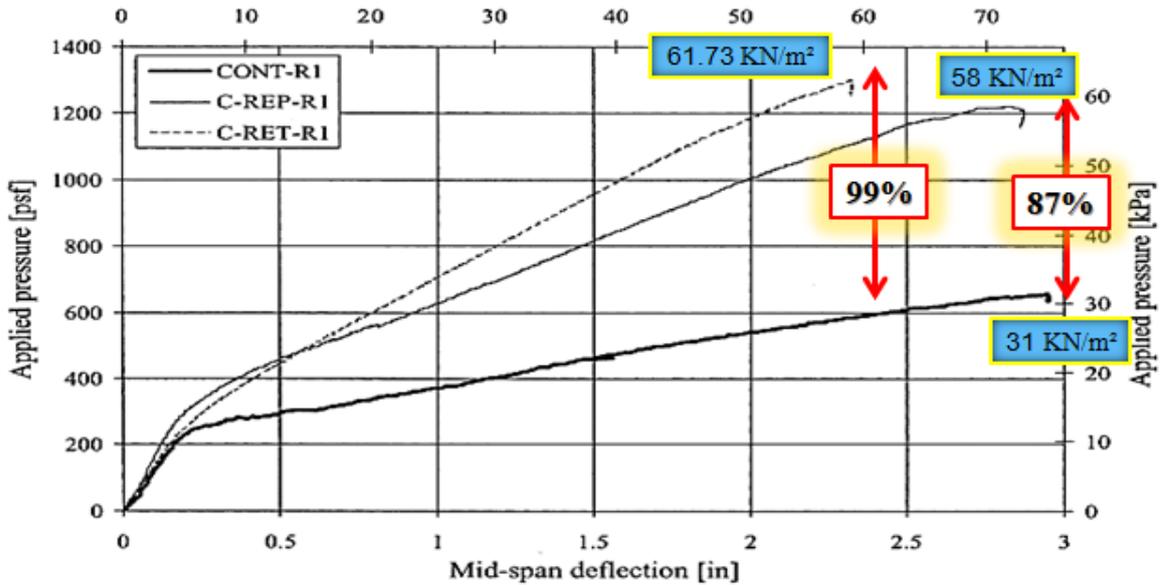
آلية انهيار البلاطة بدون تقوية



آلية انهيار البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP

الشكل (15-2): آلية انهيار البلاطة المدروسة بدون ومع تقوية (Mosallam and Mosalam;2003)

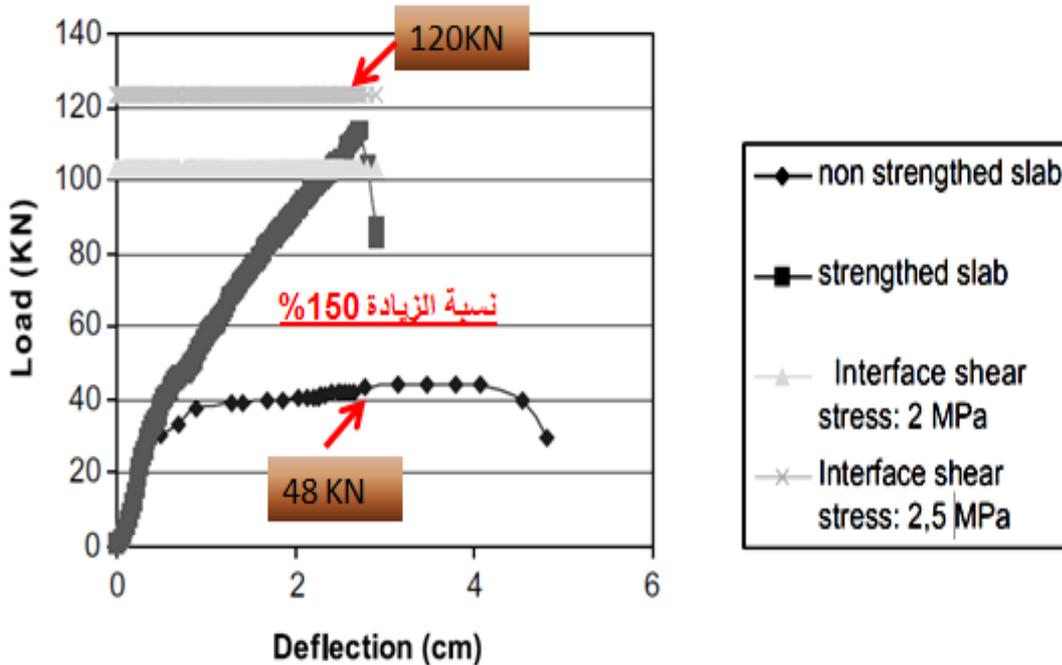
يوضح الشكل (16-2) علاقة الانتقال الشاقولي لنقطة منتصف البلاطة (*Mid-Span deflection*) مع تزايد الحمولة الموزعة (*Applied pressure*) لبلاطة بدون تقوية (*CONT-R1*) - (*non strengthened Slab*)، و لبلاطة أخرى تمت تقويتها قبل اختبارها (*C-RET-R1*) - (*Retrofitted Slab*)، وأخرى لبلاطة تمت تقويتها بعد تحميلها 85% من حمولتها الحدية (*C-REP-R1*) - (*Repaired slab*)، حيث أن حمولة الانهيار للبلاطة بدون تقوية كانت 31 KN، بينما ارتفعت حمولة الانهيار للبلاطة المقواة بعد تحميلها إلى 58 KN أي حصل الباحثان على نسبة زيادة في الحمولة الحدية للبلاطة 87%. بينما ارتفعت حمولة الانهيار للبلاطة المقواة قبل تحميلها إلى 62 KN أي حصل الباحثان على نسبة زيادة في الحمولة الحدية للبلاطة 99%، كما يمكن ملاحظة المطاوعة لجميع أنواع البلاطات بما فيها المقواة بشرائح الـ FRP .



الشكل (16-2): علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة مع الحمولة بدون ومع تقوية (Mosallam and Mosalam;2003)

قام الباحث (Limam et al;2003) بدراسة تجريبية وتحليلية لبلاطين بيتونيتين كل منهما عاملة باتجاهين وبأبعاد (7 cm، 130 cm ، 170 cm) ومسلحة بشبكة تسليح بالاتجاهين بقطر 6 mm كل 20 cm مع المحافظة على طبقة تغطية لشبكة التسليح بسماكة 17 mm حيث قام بتقوية واحدة من البلاطين بشرائح الـ CFRP عند الوجه المعرض للشد من البلاطة، بينما أبقى البلاطة الأخرى بدون تقوية كمرجع ،كانت مقاومة الضغط لببتون البلاطة بعد 28 يوم من الصب 30 MPa ومعامل مرونته 25 GPa ، وإجهاد خضوع الشد لحديد التسليح 540MPa ، ومعامل مرونته 200 GPa ، أما بالنسبة لشرائح التقوية الـ CFRP فقد كانت بسماكة 1.4 mm ويعرض 50 mm وبطول 150 cm بالاتجاه الموازي لطول البلاطة و 100 cm بالاتجاه الموازي لعرض البلاطة ، وكانت التباعد بين شرائح التقوية 15 cm ، ومعامل مرونة شرائح التقوية 160 GPa . تم سند البلاطين من أطرافهما الأربعة إسناداً بسيطاً وطبقت حمولة مركزة في المنتصف .

يبين الشكل (17-2) علاقة الانتقال الشاقولي لنقطة منتصف البلاطة (Mid-Span deflection) مع تزايد الحمولة المركزة لبلاطة بدون تقوية (non strengthened Slab) ولبلاطة أخرى تمت تقويتها قبل اختبارها (Strengthened Slab) حيث أن حمولة الانهيار للبلاطة بدون تقوية كانت 48 KN ، بينما ارتفعت حمولة الانهيار للبلاطة المقواة بشرائح الـ CFRP إلى 120 KN أي وصلت نسبة الزيادة إلى 150% . كما يظهر الشكل السلوك اللدن للبلاطة بدون تقوية وذلك بسبب حدوث سهم كبير لمنتصف البلاطة في مرحلة ما قبل حدوث الانهيار، بينما انهارت البلاطة المقواة بشرائح الـ CFRP بشكل مفاجئ هش نتيجة انفصال شرائح الـ CFRP (Limam et al;2003).



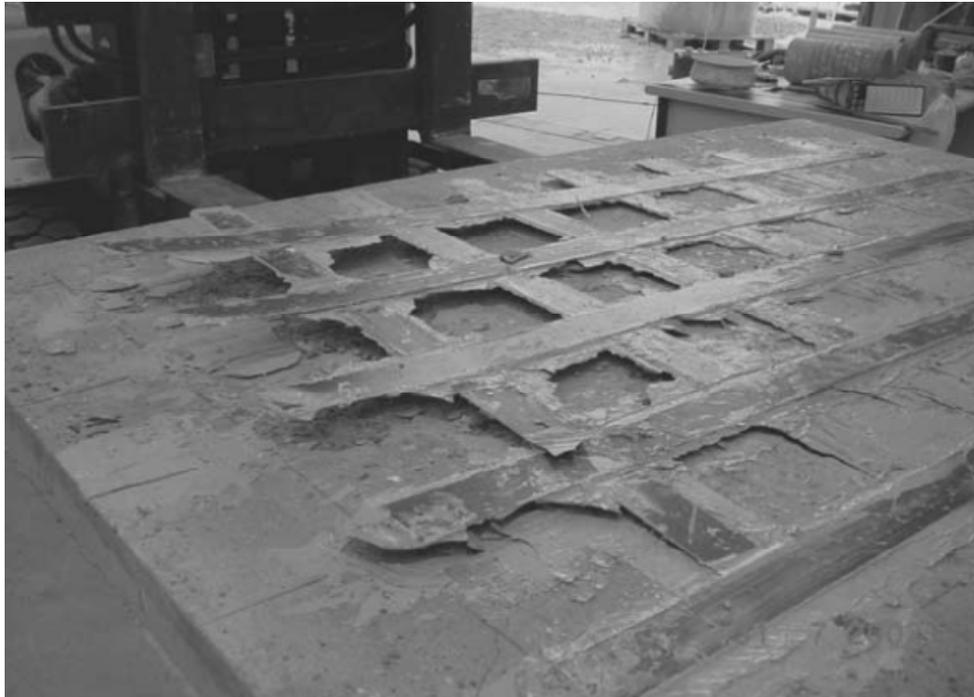
الشكل (17-2): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة - الحمولة للبلاطات قبل تقويتها وبعد تقويتها بشرائح الـ CFRP (Limam et al;2003)

يوضح الشكل (18-2) تشكل خطوط الانكسار في النموذج التجريبي (Limam et al;2003) على شكل شقوق قطرية عند الانهيار (Limam et al;2003).



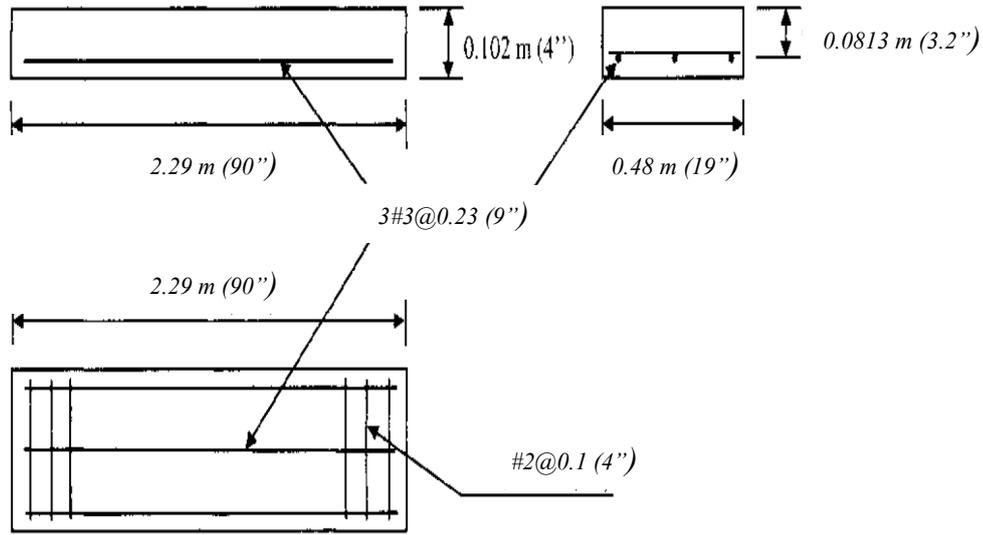
الشكل (18-2): خطوط الانكسار القطرية عند انهيار البلاطة غير المقواة (Limam et al;2003)

يبين الشكل (19-2) انهيار البلاطة البيتونية المسلحة التي تم تقويتها بشرائح من الـ CFRP حيث حدث الانهيار نتيجة انفصال لشرائح التقوية الـ CFRP عند الأطراف (Limam et al;2003).



الشكل (19-2): انفصال شرائح التقوية عن البلاطة المقواة عند انهيارها (Limam et al;2003)

قام الباحث (Seim et al ; 2001) بدراسة تجريبية على 13 نموذجاً لبلاطات بيتونية مسلحة أبعاد كل منها (2.29 m، 0.48m، 102mm) ومسلحة بثلاث قضبان قطر 9 mm في الاتجاه الطويل للبلاطة و 23 قضيب قطر 6 mm في الاتجاه القصير للبلاطة ،مع سماكة تغطية 19 mm ، يبين الشكل (20-2) أبعاد وتسليح النماذج المدروسة .



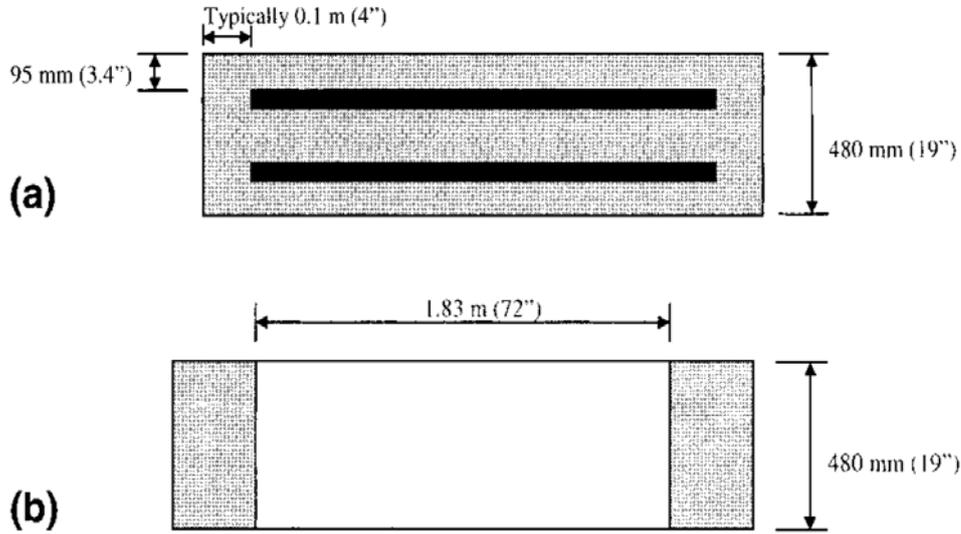
الشكل (20-2): شكل توضيحي لأبعاد البلاطات وحديد التسليح (Seim et al, 2001)

قام (Seim et al ; 2001) بأخذ بلاطتين (بدون تقوية) كنموذجين مرجعيين، وقام بتقوية باقي البلاطات على الشكل التالي : ثلاثة منها قويت من الخارج بنسيج من ألياف الكربون المشبعة بالايبيوكسي، وسبع نماذج تم تقويتها بلصق شرائح من الـ CFRP بعرض $B_f = 50 \text{ mm}$ على الوجه المعرض للشد في البيتون، وبلاطة وحيدة تمت تقويتها من خلال طبقة متقطعة من GFRP التي رشت على البلاطة، يبين الجدول (5-2) مواصفات مواد إنشاء البلاطات البيتونية المسلحة ومواد التقوية المستخدمة في تقوية البلاطات المدروسة.

الجدول (5-2): مواصفات مواد إنشاء البلاطات ومواد التقوية (Seim et al ; 2001)

Material	Thickness (mm)	Strength ^a [MPa (ksi)]	Ultimate strain	Young's modulus [GPa (Msi)]
Concrete	—	33.2 (4.82)	—	30 (4.35)
Grade 60 steel	—	Yield: 462 (67); ultimate: 765 (111)	0.0023	205 (29.73)
Carbon-fiber-reinforced pultruded strips ^b	1.19	2270 (329)	0.0122	198 (28.7)
Carbon/epoxy (1 layer) [fabric: 328 g/m ² (9.7 oz/yd ²)]	0.56	835 (127)	0.0107	77.8 (11.3)
Carbon/epoxy (2 layers) [fabric: 328 g/m ² (9.7 oz/yd ²)]	1.12	675 (97.9)	0.0120	63.8 (9.25)
Carbon/epoxy (1 layer) [fabric: 677 g/m ² (20 oz/yd ²)]	1.19	724 (105)	0.0095	91.5 (13.3)
Sprayed glass/polyester	1.70	172 (25.2)	0.0134	13.00 (1.89)
Adhesive ^c	—	24.8 (3.6)	0.0065	2.69 (0.39)

يبين الشكل (21-2) كيفية توضع شرائح وألياف التقوية على الوجه السفلي للبلاطات لصفت شرائح التقوية من الـ FRP على السطح السفلي للبلاطات بعد حكه بالفرشاة والتأكد من تنظيفه بشكل جيد. ويبين الجدول (6-2) طريقة التقوية (type of Strengthening)، وسماكة طبقة اللاصق (Adhesive layer thickness)، ونوع التماسك (bond)، وطول شرائح الـ FRP (FRP composite length).

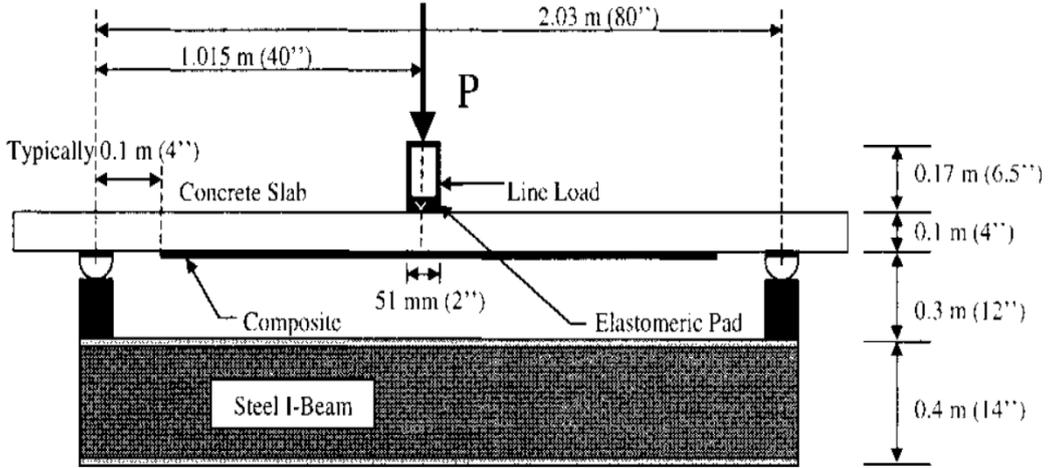


الشكل (21-2): أبعاد و توضع عناصر التقوية الـ FRP على السطح السفلي للبلاطات (Seim et al ; 2001)
(a) بلاطة مقواة بشرائح من الـ FRP ، (b) بلاطة مقواة بنسيج من ألياف الـ FRP

الجدول (6-2): توصيف لتقوية نماذج البلاطات وملخص نتائج (Seim et al ; 2001)

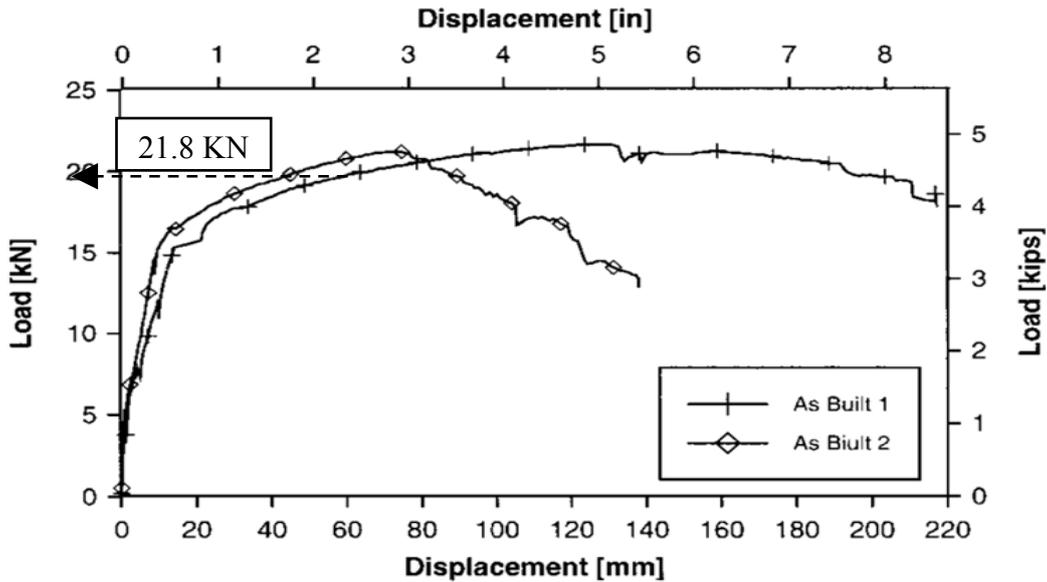
Slab designation	Type of strengthening	Adhesive layer thickness [mm (in.)]	Type of bond	FRP composite length [mm (in.)]	Ultimate load [kN (kip)]	Central point deformation at ultimate load [mm (in.)]
As-built 1	None	—	—	—	21.8 (4.9)	128.7 (5.07)
As-built 2	None	—	—	—	21.2 (4.8)	71.7 (2.82)
SIKA Carbodur strips						
S ₁₁	2 strips	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	40.8 (9.2)	26.4 (1.04)
S ₁₂	2 strips	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	42.5 (9.6)	27.9 (1.10)
S ₅	2 strips	5 (0.20)	Full length	1,830 (72)	43.2 (9.7)	24.5 (0.96)
S _{1m}	2 strips	1 (0.04)	Full length	1,460 (57.5)	41.9 (9.4)	28.4 (1.12)
S _{1s}	2 strips	1 (0.04)	Full length	1,090 (43)	32.9 (7.4)	30.7 (1.21)
S _{1pb}	2 strips	1 (0.04)	Partial lengths	1,830 (72)	38.8 (8.7)	27.5 (1.08)
S _{1eb}	2 strips	1 (0.04)	Ends only	1,830 (72)	33.7 (7.6)	24.0 (0.95)
Unidirectional carbon/epoxy						
C ₁₁	1 layer 9.7 oz/yd ²	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	61.4 (13.8)	45.7 (1.80)
C ₁₂	2 layers 9.7 oz/yd ²	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	80.8 (18.2)	43.6 (1.72)
C ₂₁	1 layer 20 oz/yd ²	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	71.3 (16.0)	39.1 (1.54)
Sprayed glass/polyester						
SG ₁	1 layer	1 (0.04)	Full length	1,830 (72)	29.4 (6.6)	37.4 (1.47)

يبين الشكل (22-2) طريقة اختبار البلاطات ومكان تطبيق القوة في منتصف البلاطة حيث تم اختبار البلاطات بواسطة آلة وكان استناد البلاطة بسيطاً ، (Seimet al ; 2001).



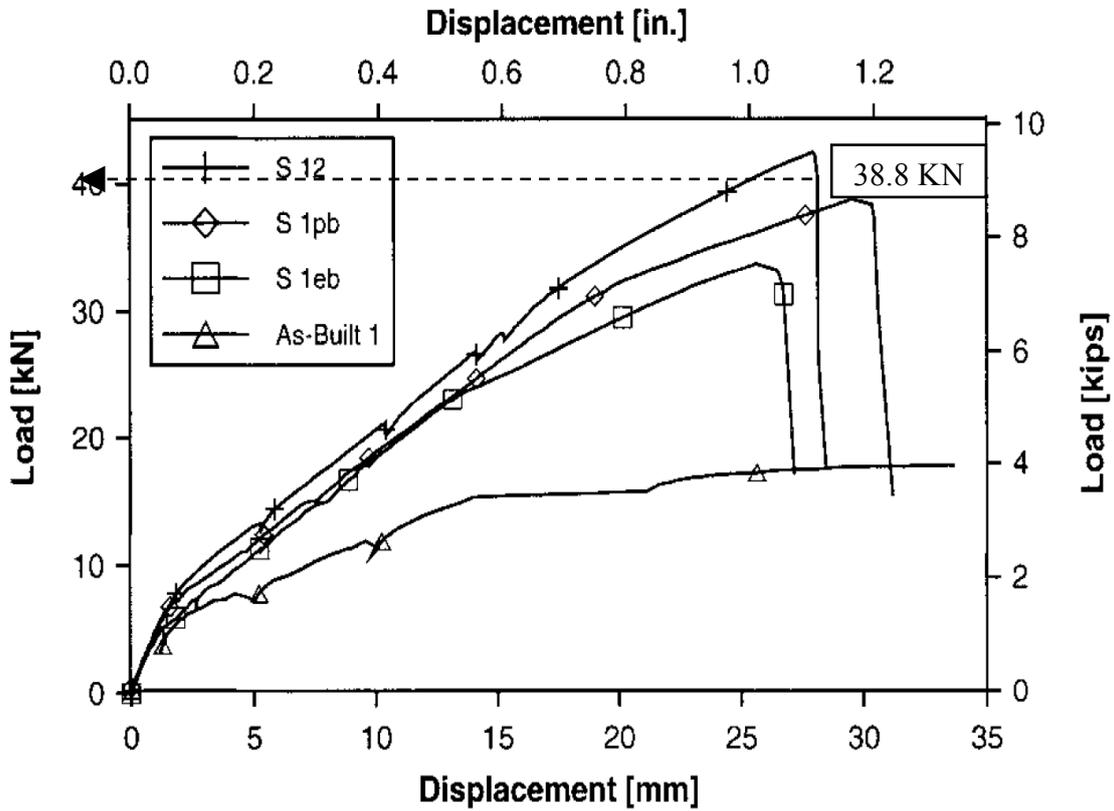
الشكل (22-2): شكل توضيحي لطريقة اختبار البلاطات البيئونية المسلحة (Seimet al ; 2001)

أظهرت البلاطتين المختبرتين كنماذج مرجعية سلوكاً مرناً مع تشوه كبير قبل الوصول إلى الانهيار الحدي الناتج عن انكسار الببتون على الضغط، وكان متوسط حمولة بدء تلدن حديد التسليح لهذه البلاطات 15.3 KN ، أما متوسط الحمولة القصوى فكانت 21.5 KN ، وذلك للقيم المأخوذة من الجدول (6-2) حيث الحمولة الحدية (Ultimate load) ،والانتقال في منتصف البلاطة عند الحمولة الحدية (Central point deformation at ultimate load). يبين الشكل (23-2) علاقة الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة مع الحمولة للبلاطات بدون تقوية (Seim et al ; 2001).



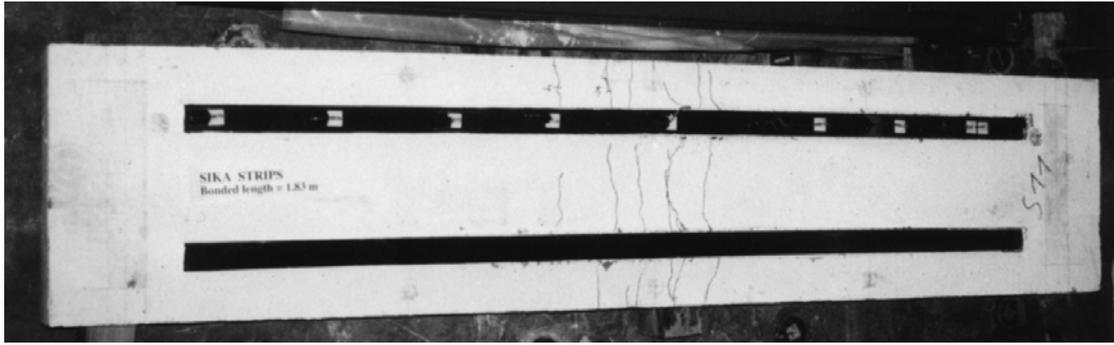
الشكل (23-2): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة - الحمولة للبلاطات بدون تقوية (Seim et al ; 2001)

تمت تقوية البلاطات باستعمال شرائح الـ *FRP* بأطوال مختلفة لهذه الشرائح ومكان ربطها مع البيتون وسماكة الايبوكسي اللاصق وذلك لدراسة تأثير كل من هذه الاختلافات على رفع حمولة الانهيار للبلاطات، حيث انهارت البلاطات بسبب تشكل تشققات بشكل كبير وانهيار طبقة تغطية حديد التسليح الرقيقة، وكانت حمولة الانهيار لمجموعة البلاطات هذه أعلى من حمولة الانهيار للبلاطات بدون تقوية بقيمة 1.9 مرة كما يوضح الجدول (6-2). يبين الشكل (24-2) علاقة الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة مع الحمولة لبلاطة بدون تقوية (*As-built1*) ومقارنتها مع بلاطات قويت بإضافة شرائح من الـ *FRP* (*S1eb*، *S1pb*، *S12*) بطرق مختلفة حسب الجدول (6-2) حيث يظهر الشكل ارتفاع حمولة الانهيار للبلاطات بعد تقويتها بمقدار الضعف تقريباً، كما يظهر الشكل انخفاض مفاجئ وكبير للقوة عند وصولها إلى الحمولة القصوى وهذا يدل على الانهيار المفاجئ للبلاطات بسبب انفصال شرائح الـ *FRP*، كما يبين انخفاض السهم في منتصف البلاطات المقواة عن البلاطة بدون تقوية. يظهر الشكل (24-2) تقارب سلوك البلاطات بدون ومع تقوية في المرحلة المرنة للبلاطة غير المقواة ويبدأ تغيير سلوك البلاطات المقواة عن غير المقواة عند الدخول في المرحلة اللدنة حيث يبدأ الـ *FRP* بأخذ الحمولات الفائضة (Seimet al ; 2001).



الشكل (24-2): مخطط الانتقال الشاقولي لمنتصف البلاطة - الحمولة للبلاطات قبل وبعد تقويتها (Seim et al ; 2001)

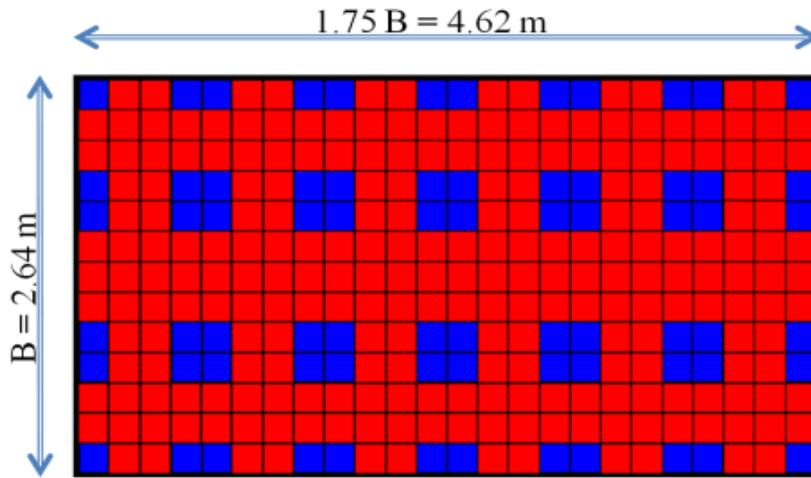
يبين الشكل (25-2) التشققات التي ظهرت على الوجه السفلي للبلاطات المقواة بشرائح الـ *FRP*



الشكل (25-2): التشققات الظاهرة أسفل البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP عند انهيارها (Seimet al ; 2001)

4.6.2 الشماس; 2012

قام الشماس بإعادة الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam; 2003) تحليلياً، وبعد التحقق من النمذجة قام بزيادة أحد أبعاد هذه البلاطة بمقدار 1.75 فأصبح طول البلاطة ($L=1.75*2.64 = 4.62 \text{ m}$)، مع المحافظة على قيمة عرض البلاطة ($B=2.64 \text{ m}$)، والمحافظة على كمية التسليح وهي قضيب بقطر 9.5 mm كل 305 mm في الاتجاهين، و بقيت البلاطة عاملة بالاتجاهين والاستناد بسيط عند أطرافها الأربعة. يبين الشكل (26-2) الوجه السفلي لنموذج البلاطة البيتونية المسلحة المقواة برقائق الـ CFRP المبني على برنامج الـ ABAQUS، حيث تمت المحافظة على العرض والسماكة والتباعدات بين رقائق التقوية للبلاطة البيتونية المسلحة مربعة في الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam; 2003)، و زيادة عدد وطول رقائق الـ CFRP بما يتناسب مع زيادة طول البلاطة.



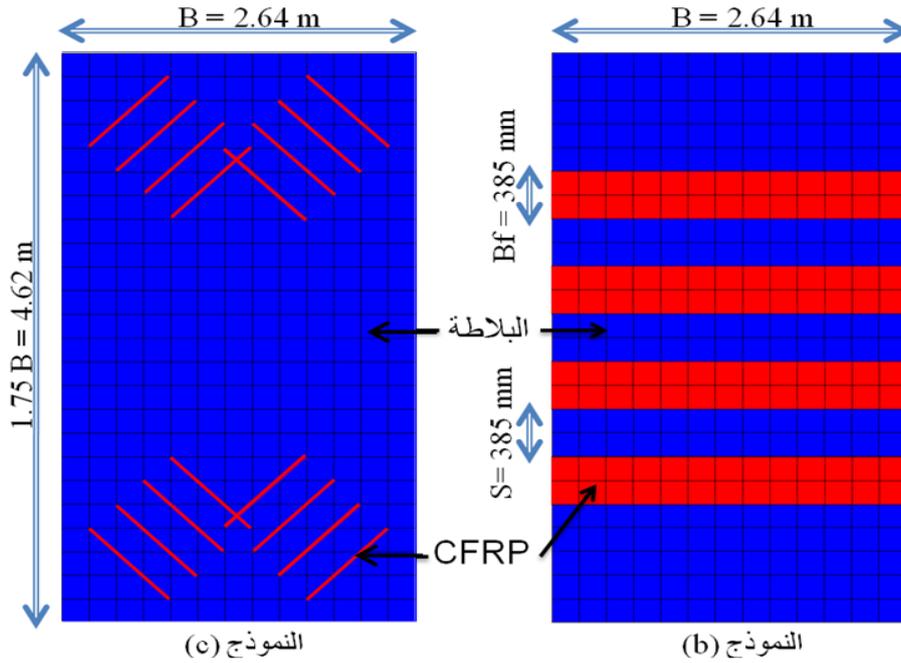
النموذج (a) لتقوية البلاطة المستطيلة

الشكل (26-2): نموذج توضيحي للبلاطة المستطيلة وطريقة التقوية (الشماس، 2012)

كانت المقاومة المتوسطة للبيتون على الضغط ($f_{cm} = 33 \text{ MPa}$)، وتم إيجاد باقي خواص مادة البيتون باستخدام علاقات من الكود الأوربي (Eurocode2; 2004) انطلاقاً من مقاومة البيتون على الضغط ($f_{cm} = 33 \text{ MPa}$) (Compressive strength). حيث يعطى معامل مرونة البيتون (Elastic modulus)، $E_{cm} = 31 \text{ GPa}$.

أما مقاومة الشد للبيتون $\sigma_{tu} = 1.85 \text{ MPa}$ (tensile strength)، تم اعتبار معامل بواسون للبيتون غير المتشقق $\nu = 0.2$ ، وفق الكود الأوربي (Eurocode2;2004).
تم اعتماد مواصفات حديد تسليح البلاطة في نموذج التجربة حسب المقالة (Mosallam and Mosalam, 2003)، فكان إجهاد خضوع حديد التسليح $f_y = 401.37 \text{ MPa}$ (Yield strength)، أما معامل مرونة حديد التسليح $E_s = 194000 \text{ MPa}$ (Elastic modulus)، ومعامل بواسون لحديد التسليح $\nu_s = 0.3$ (Poisson's ratio).
تم اعتماد طريقة (Smearred Crack Approach) في نمذجة مادة البيتون والتي تأخذ بعين الاعتبار عرض الشق وإجهاد الشد في البيتون. كما تم فرض تماسك تام (Fully bond) بين البيتون وشرائح الـ FRP.

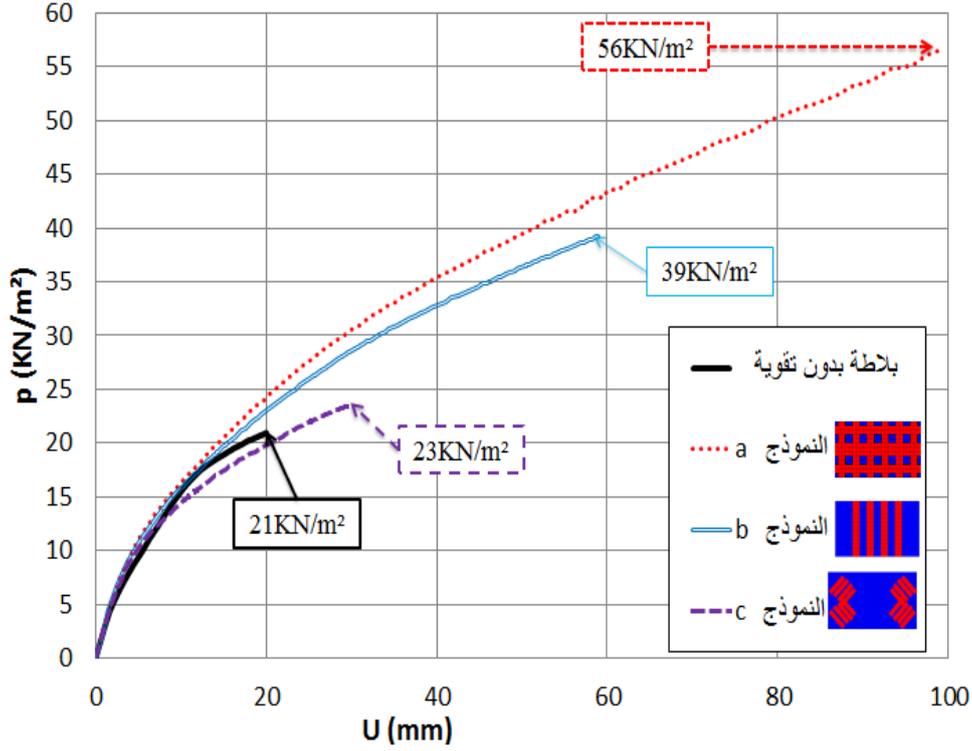
قام الباحث باختبار تقوية بلاطة بيتونية مسلحة مستطيلة الشكل وبسيطة الاستناد عند أطرافها الأربعة والمبينة بالشكل (26-2) بطريقتين جديدتين مع استخدام نفس شرائح التقوية بأبعادها وتباعداتها، فإذا كان الشكل (26-2) هو النموذج الأول وهو النموذج (a) حيث قويت كامل البلاطة على وجهها السفلي، فإن الشكل (27-2) يبين النموذجين الجديدين للتقوية (b) و (c). في النموذج (b) قويت البلاطة في منطقة المنتصف فقط وعلى الوجه السفلي وهي المنطقة التي يبدأ فيها تشكل الإجهادات الأعظمية وبالتالي خطوط الانكسار، أما النموذج (c) فقد قويت البلاطة عند أطرافها وعلى الوجه السفلي بحيث يتم تغطية خطوط الانكسار في تلك المنطقة فقط.



الشكل (27-2): تقوية الوجه السفلي للبلاطة البيتونية المسلحة المستطيلة (الشماس، 2012)

يبين الشكل (28-2) علاقة الانتقال الشاقولي لنقطة منتصف البلاطة مع الحمولة، وذلك للبلاطة البيتونية المسلحة المستطيلة بسيطة الاستناد عند أطرافها الأربعة والمقواة برفائق من الـ CFRP حسب نماذج التقوية (a) و (b) و (c)، ومقارنتها مع البلاطة بدون تقوية. يوضح الشكل (28-2) أن الحمولة الحدية للبلاطة بدون تقوية 21 kN/m^2 وازدادت لتصبح 23 kN/m^2 حسب نموذج التقوية (a) أي أن الزيادة كانت بمقدار 167%، بينما ازدادت لتصبح 39 kN/m^2

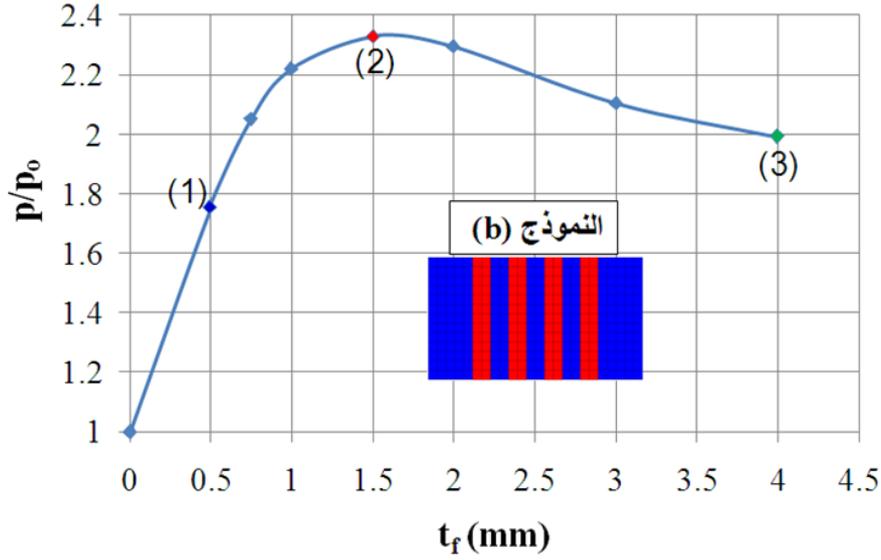
حسب نموذج التقوية (b) و كانت الزيادة بمقدار 86%، وازدادت لتصبح 56KN/m^2 حسب نموذج التقوية (c) أي أن الزيادة كانت بمقدار 10% بالنسبة للبلاطة غير المقواة، إن النموذج (a) هو الذي حقق أعلى زيادة لقدرة تحمل البلاطة عند تقوية البلاطة بالـ CFRP على كامل سطحها السفلي، ولكن النموذج (b) للتقوية حقق زيادة مقبولة في قدرة تحمل البلاطة تتجاوز 51% من الزيادة على قدرة التحمل التي حققها النموذج (a) وباستعمال كمية أقل من رقائق التقوية الـ CFRP، أما النموذج (c) فقد كانت الزيادة في قدرة تحمل البلاطة ضئيلة جداً مقارنة بالنموذجين السابقين، لذلك يتبين أن التقوية يجب أن تكون في مناطق الإجهادات الأعظمية في منتصف البلاطة لتكون ذات فعالية ملحوظة.



الشكل (28-2): علاقة الحمولة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة قبل وبعد التقوية لعدة نماذج تقوية (الشماس، 2012)

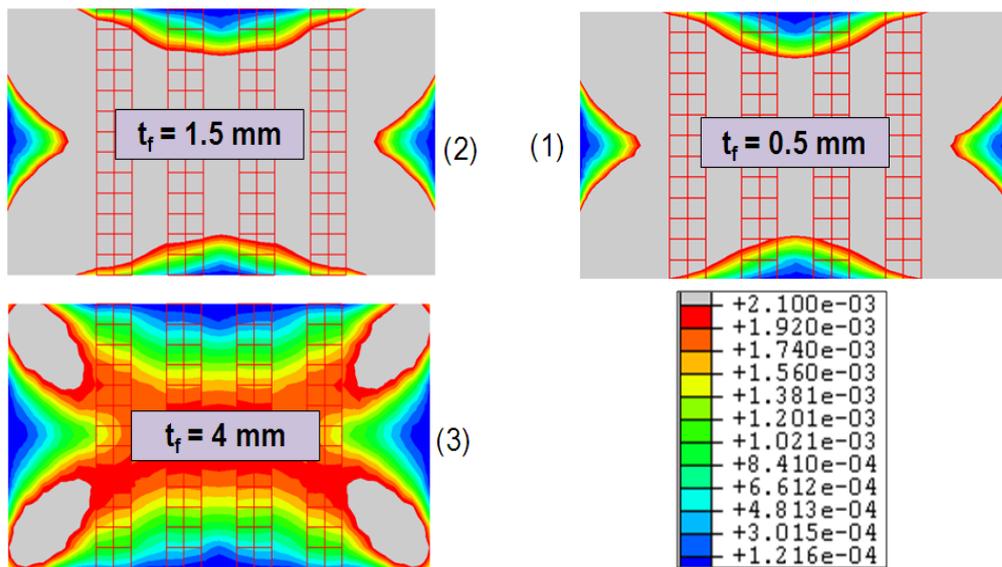
قام الباحث بدراسة اثر تغيير سماكة شرائح الـ FRP على رفع قدرة تحمل البلاطات البيتونية المسلحة مستطيلة الشكل . اعتمد في الدراسة على النموذج (b) لتقوية البلاطات البيتونية المستطيلة في المنتصف المبين في الشكل (27-2). تم تغيير سماكة شرائح الـ CFRP في النموذج (b) ابتداءً من سماكة $t_f = 0.5\text{ mm}$ وحتى سماكة $t_f = 4\text{ mm}$ ، وتم الحصول على الحمولة الحدية العظمى للبلاطة المقابلة لكل سماكة.

يبين الشكل (29-2) علاقة تغيير الحمولة الحدية العظمى (P) للبلاطات البيتونية المسلحة بسيطة الاستناد والمقواة حسب النموذج (b) وبسماكات مختلفة للشرائح منسوبة إلى الحمولة الحدية العظمى للبلاطة بدون تقوية ($P_o = 21\text{ KN/m}^2$)، حيث يبين الشكل (29-2) ازدياد حمولة الانهيار للبلاطة مع ازدياد سماكة شرائح الـ CFRP بشكل منتظم حتى الوصول إلى نقطة عظمى هي النقطة (2) عند سماكة لشرائح الـ CFRP $t_f = 1.5\text{ mm}$ بعدها تبدأ حمولة الانهيار للبلاطة بالانخفاض حتى الوصول إلى النقطة (4) المقابلة لسماكة لشرائح الـ CFRP $t_f = 4\text{ mm}$ ، أي أن السماكة المثالية لشرائح الـ CFRP لهذه البلاطة المستطيلة وطريقة تقويتها هو ($t_f = 1.5\text{ mm}$).



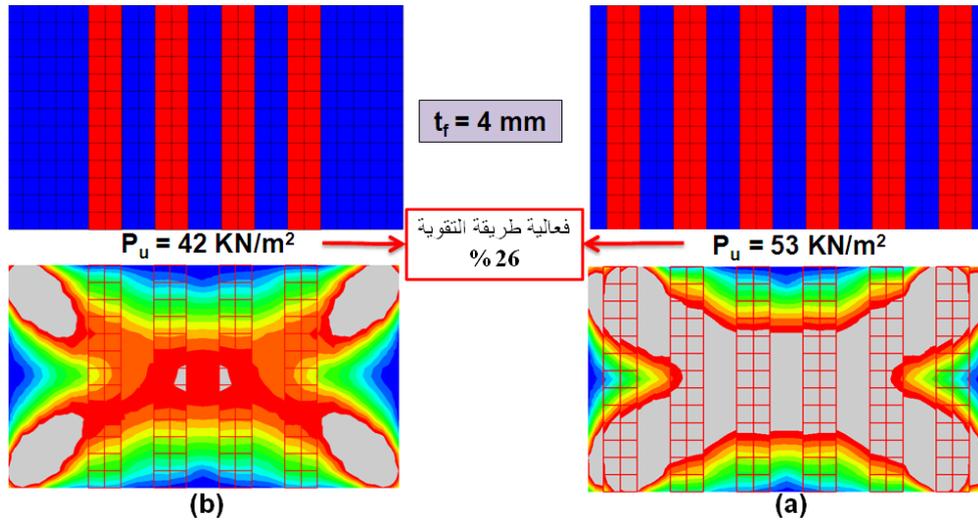
الشكل (29-2): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلطة المستطيلة المقواة كنموذج (b) مع تغيير سماكة شرائح الـ CFRP (الشماس ، 2012)

يفسر الشكل (30-2) الانخفاض الذي حصل في الحمولة الحديدية للبلطة بزيادة سماكة شرائح الـ CFRP بعد النقطة (2)، حيث يوضح التشوهات النسبية الرئيسية للبلطة البيتونية المسلحة المقواة وفق النموذج (b) والتي تحدد خطوط الانكسار في البلطة عند الوصل إلى تشوه نسبي مقابل لبدء سيلان حديد التسليح ($\epsilon_y = 0.0021$)، فعند زيادة سماكة شرائح الـ CFRP مروراً بالنقطتين (1) و (2) المبينتين على الشكل (29-2) تحافظ البلطة على ميكانيزم انهيار يماثل ميكانيزم الانهيار للبلطة بدون تقوية كما يبين الشكل (1-30-2)، (2-30-2)، أما بعد النقطة (2) يتغير ميكانيزم انهيار البلطة وتتشكل خطوط الانكسار خارج المنطقة المقواة بشرائح الـ CFRP كما يبين الشكل (3-30-2).



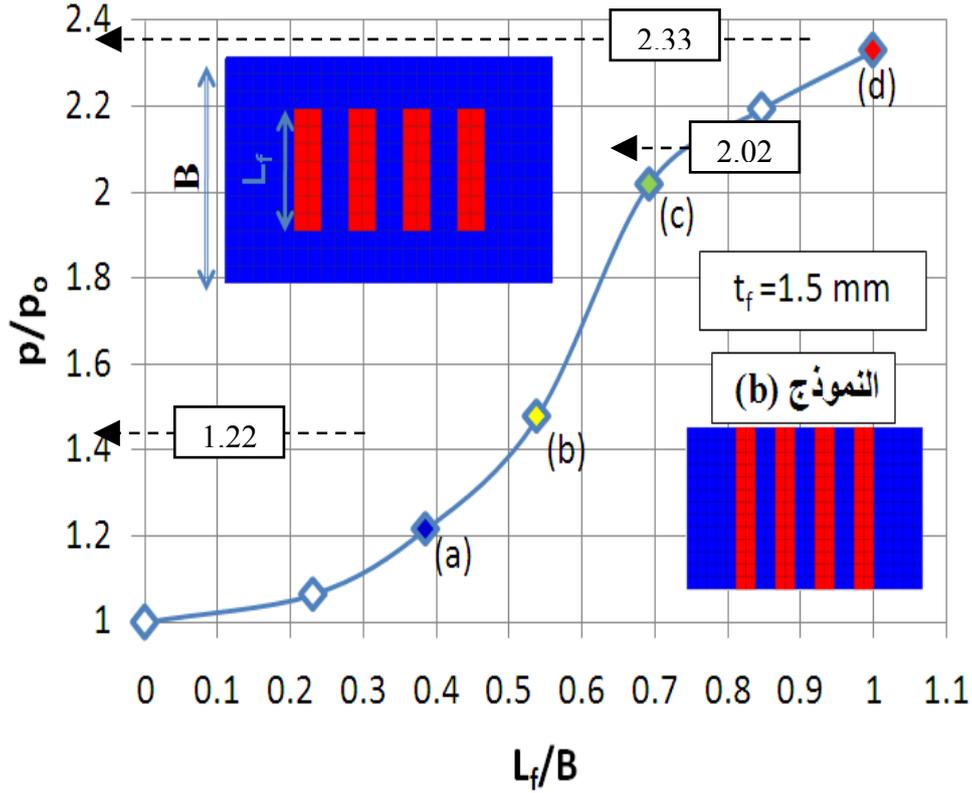
الشكل (30-2): التشوهات النسبية الرئيسية و تغيير نماذج انهيار البلطة المستطيلة بتغيير سماكة شرائح الـ CFRP (الشماس ، 2012)

قام الباحث بتعديل تقوية البلاطة حسب النموذج (b) كما في الشكل (27-2)، حيث قام بوضع شرائح على امتداد كامل طول البلاطة كما في الشكل (a-31-2) مع المحافظة على سماكة شرائح الـ $CFRP$ ($tf = 4\text{ mm}$) المقابلة للنقطة (3) والتي تغير عندها ميكانيزم انهيار البلاطة وتشكلت خطوط الانكسار خارج المنطقة المقواة بالـ $CFRP$ ، يبين الشكل (a-31-2) أن خطوط الانكسار عادت للتشكل على كامل سطح البلاطة بوضع شرائح الـ $CFRP$ على كامل طول البلاطة وأن ميكانيزم انهيار البلاطة عاد مشابهاً لميكانيزم انهيار البلاطة بدون تقوية، كما ارتفعت الحمولة الحدية للبلاطة المقواة إلى 53 KN/m^2 بعد وضع شرائح على امتداد كامل طول البلاطة، حيث كانت الحمولة الحدية للبلاطة المقواة في المنتصف فقط وفق النموذج (b) 42 KN/m^2 كما في الشكل (b-32-2)، أي ازدادت الحمولة الحدية بعد تغيير طريقة التقوية بنسبة 26%.



الشكل (31-2): التشوهات النسبية الرئيسية و تغيير نماذج انهيار البلاطة المستطيلة بتغيير طريقة التقوية وثبات سماكة شرائح الـ $CFRP$ (الشماس، 2012)

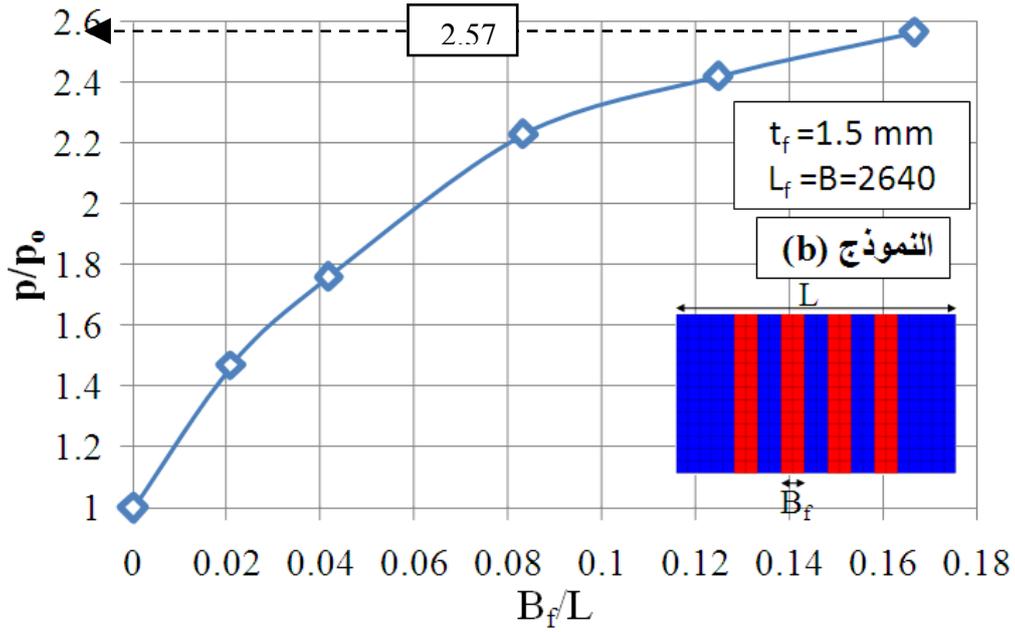
ثم قام الباحث بدراسة أثر تغيير طول شرائح الـ $CFRP$ على رفع قدرة تحمل البلاطة المستطيلة المقواة وفق النموذج (b) المبين في الشكل (27-2)، وبسماكة ($tf = 1.5\text{ mm}$)، حيث تمت زيادة طول شرائح التقوية ابتداءً من منتصف البلاطة وبشكل متناظر بالنسبة لمحورها حتى أصبحت الشرائح تغطي كامل عرض البلاطة. يبين الشكل (32-2) علاقة تغيير الحمولة الحدية العظمى (P) للبلاطة منسوبة إلى الحمولة الحدية العظمى لنفس البلاطة بدون تقوية ($P_0 = 21\text{ KN/m}^2$)، مع تغيير طول شرائح الـ $CFRP$ بشكل متناظر بالنسبة لمحور تناظر البلاطة منسوبة إلى عرض البلاطة ($B=2640\text{ mm}$)، حيث يبين الشكل (32-2) أن ازدياد الحمولة الحدية العظمى للبلاطة مع ازدياد طول شرائح الـ $CFRP$ يكون بشكل بطيء حتى الوصول إلى النقطة (a) حيث شرائح التقوية $CFRP$ تغطي 39% من عرض البلاطة، ومن بعد النقطة (a) وحتى الوصول إلى النقطة (c) أصبحت الزيادة في الحمولة الحدية العظمى للبلاطة أكبر مع ازدياد طول شرائح الـ $CFRP$ حيث كانت شرائح التقوية $CFRP$ تغطي 69% من عرض البلاطة، ثم انخفضت سرعة ازدياد الحمولة الحدية العظمى للبلاطة مع ازدياد طول شرائح الـ $CFRP$ بين النقطتين (c) و (d) حيث غطت شرائح الـ $CFRP$ كامل عرض البلاطة عند النقطة (d).



الشكل (32-2): تغيير الحمولة الحديدية للبلطة المستطيلة المقواة بالنموذج (b) مع تغيير طول شرائح الـ CFRP (الشماس، 2012)

تمت أيضا دراسة أثر تغيير عرض شرائح الـ CFRP على رفع قدرة تحمل البلطة المستطيلة المقواة، حيث تم اعتماد النموذج (b) المبين في الشكل (27-2)، مع سماكة (tf = 1.5 mm) لشرائح الـ FRP الممتدة على كامل عرض البلطة والتي أعطت أعلى حمولة حديدية عند تغيير أطوال شرائح التقوية الـ CFRP وذلك عند النقطة (d)، قام الباحث بزيادة عرض شرائح التقوية ابتداءً من نصف عرض الشريحة وبشكل متناظر بالنسبة لمحور الشريحة، وتم زيادة عرض الشرائح حتى تلاقت أطراف الشرائح مع بعضها وغطت عرض البلطة بالكامل.

يبين الشكل (33-2) علاقة تغيير الحمولة الحديدية العظمى (P) للبلطة البيتونية المسلحة ونسبة الحمولة الحديدية العظمى (P) للبلطة المقواة إلى الحمولة الحديدية العظمى لنفس البلطة بدون تقوية (Po = 21 KN/m²)، مع تغيير عرض شرائح الـ CFRP بشكل متناظر بالنسبة لمحور تناظر الشريحة ونسب عرض الشريحة إلى طول البلطة (L=4620 mm)، حيث يبين الشكل (33-2) ازدياد الحمولة الحديدية العظمى للبلطة المقواة بزيادة عرض شرائح التقوية حتى الوصول إلى تقوية كامل منتصف البلطة بشرائح التقوية.



الشكل (33-2): علاقة تغيير الحمل الحدية للبلاطة المستطيلة المقواة كالنموذج (b) مع تغيير عرض شرائح الـ CFRP (الشماس، 2012)

7.2 ملخص الفصل الثاني Summary of Chapter 2

تم في هذا الفصل استعراض أهم خواص وميزات البيتون المسلح، و البلاطات البيتونية بشكل خاص، حيث تم شرح ميكانيكيات الانهيار المحتملة في البلاطات تحت تأثير الحمولات الموزعة بانتظام، ومن ثم شرح طريقة خطوط الانكسار لتصميم البلاطات البيتونية المسلحة. من ثم تم استعراض الخواص الميكانيكية والعلاقات التي تحكم مادة الـ FRP وأشكال انهياره.

وأخيرا تم استعراض نتائج أربع دراسات مرجعية تجريبية وتحليلية تتناول موضوع تقوية البلاطات البيتونية المسلحة باستعمال مادة الـ FRP، وكفاءته في رفع قدرة تحمل البلاطات البيتونية المسلحة وتأثيره على المطاوعة والسهم الحاصل عند الانهيار. حيث بين هذا الفصل أن الدراسات المرجعية السابقة بينت زيادة الـ FRP للمقاومة بنسب قد تصل للضعف مع احتمالية الانهيار المفاجئ بسبب انفصال شرائح الـ FRP.

الفصل الثالث

التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة

Structural Analysis Using Finite Element Method (FEM)

1.3 مقدمة

Introduction

يهدف هذا الفصل إلى استعراض الدراسة التحليلية التي تمت في هذا البحث باستخدام برنامج (ABAQUS6.12-1)، لدراسة تأثير تطبيق مادة البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) على زيادة قدرة تحمل البلاطات المصمتة العاملة باتجاهين سواء من ناحية المقاومة و المطاوعة والانتقال. تم في هذا الفصل إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) واستخدام التحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non-linear analysis , MNA) و كما تم تطبيق حمولة موزعة بانتظام (Distributed load) على كامل مساحة البلاطة. يحتوي هذا الفصل توصيفا للنموذج المعتمد في التحليل، ثم خطوات التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وأخيرا نتائج الدراسة التحليلية التي تبين فعالية استخدام شرائح ال FRP في رفع قدرة تحمل البلاطة وتخفيض السهم الحاصل. كما تم في نهاية هذا الفصل دراسة تأثير تغيير الخصائص البعدية لشريحة الFRP من حيث السماكة والعرض والتباعد واستنتاج مخطط يربط بين جميع العلاقات .

2.3 توصيف النموذج

Model Description

تم تحليل النموذج المدروس تجريبيا في مقالة (Mosallam and Mosalam; 2003) المبين بالشكل (2-13) وهو عبارة عن بلاطة بيتونية مسلحة مربعة الشكل ذات استناد بسيط عند أطرافها الأربعة، بطول 2.64 m ، وعرض 2.64 m ، وسماكة 7.62 cm ، تسليح البلاطة هو قضيب تسليح بقطر 9.5 mm كل 305 mm بالاتجاهين مع الحفاظ على طبقة تغطية بيتونية لحديد التسليح 13 mm ، أي أن نسبة التسليح 0.003 ، كما تم تطبيق حمولة موزعة بانتظام على الوجه العلوي للبلاطة .

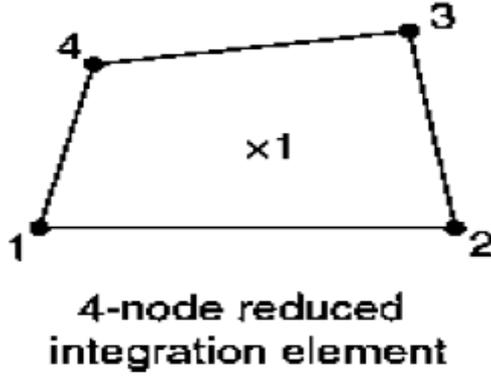
3.3 التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) للبلاطة البيتونية غير المقواة

Structural Analysis Using (FEM) for non-strengthen slab

1.3.3 توصيف العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

Elements Used in the Model using(ABAQUS6.12)

تم استخدام العنصر *S4R* لنمذجة البلاطة البيتونية، وهو عبارة عن عنصر مؤلف من أربع عقد لكل منها ست درجات حرية (ثلاثة انتقالات وثلاثة دورانات)، يبين الشكل (3-1) العنصر المساحي المستخدم.

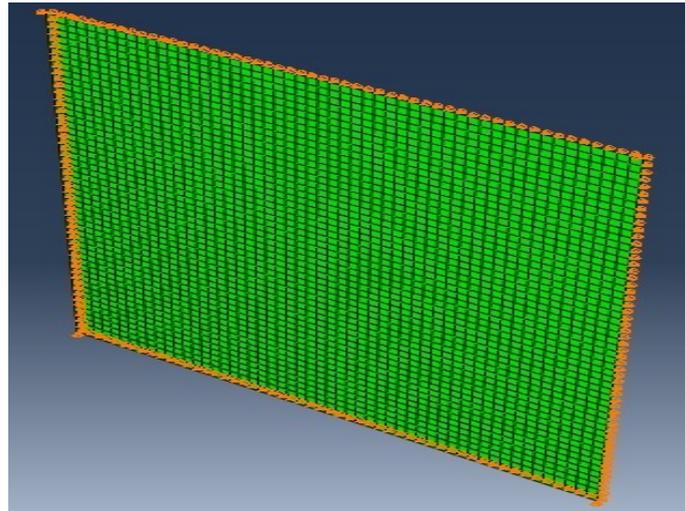


الشكل (1-3): تمثيل العنصر المساحي ذو أربع عقد (ABAQUS 6.12 Documentation، 2012)

تم نمذجة حديد التسليح باستخدام تعليمة *REBAR LAYER* المخصصة لنمذجة حديد التسليح ضمن العناصر ثنائية الأبعاد (*S4R*) في برنامج الـ (*ABAQUS*). تسمح هذه التعليمة بإدخال قطر قضبان التسليح والتباعد بينها في كلا الاتجاهين، وتحديد المنسوب الموجودة فيه طبقة التسليح. كما تحدد في هذه التعليمة خواص مادة حديد التسليح.

2.3.3 الشروط المحيطية للنموذج المدروس *Model's Boundary Conditions*

تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج المدروس كما اعتمدت في التجربة (*Mosallam and Mosalam;2003*) وهي استناد بسيط عند أطراف البلاطة (منع حركة شاقولية فقط) .



الشكل (2-3): النموذج التحليلي للبلاطة المدروسة (ABAQUS 6.12)

3.3.3 الأحمال المطبقة على النموذج *Applied Loads to the Model*

تم تطبيق حمولة موزعة بانتظام على كامل سطح البلاطة من الأعلى .

4.3.3 نوع التحليل المستخدم *Type of Analysis*

تحليل لاخطي يأخذ بعين الاعتبار لاخطية المادة (*Materially Non-linear Analysis; MNA*)

5.3.3 توصيف المواد المستخدمة في النمذجة *Material Used in Modeling*

تحتوي قاعدة بيانات برنامج (*ABAQUS 6.12 Documentation; 2012*) ثلاث طرق مختلفة لنمذجة البيتون وهي :

1. *Concrete Smearred Crack Model*

2. *Cracking Model for Concrete (Brittle Cracking Model)*

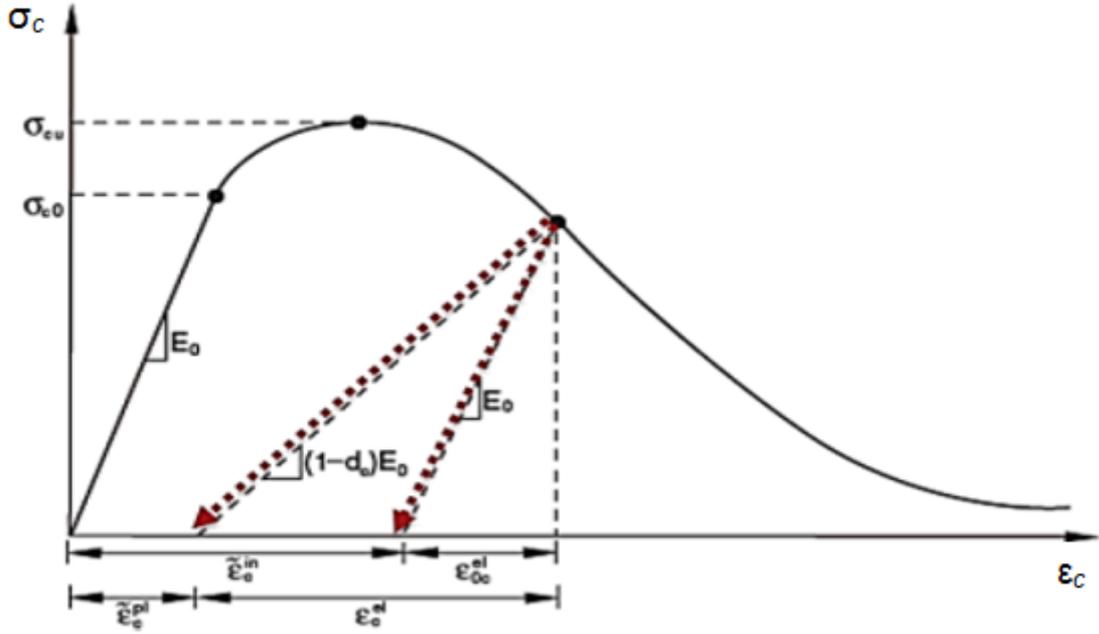
3. *Concrete Damaged Plasticity*

هذه الطرق معدة من أجل إمكانية نمذجة البيتون (*Plain concrete*) والبيتون المسلح (*Reinforced concrete*)، بالإضافة الى المواد شبه الهشة (*Quasi-Brittle Material*) مثل مادة البلوك (*Masonry*)، وذلك لجميع أنواع العناصر الانشائية كالإطارات (*Frames*)، العناصر الشبكية (*Truss elements*)، العناصر المساحية المستوية (*Shell*) والعناصر المستوية الفراغية (*Solid*).

تستخدم الطريقة الاولى في نمذجة البيتون (*Concrete Smearred Crack Model*) عندما يسبب تحميل البيتون بشكل اساسي حصول تشوهات متزايدة (*Monotonic Straining*) لذلك لا يمكن استخدامها إلا عند تطبيق حمولات متزايدة (*Pushover loading*) ولا تصلح عند تطبيق التحميل الدوري (*Cyclic loading*) وانهيار البيتون فيها إما يكون بسبب التشقق على الشد (*Tensile cracking*) أو التحطم على الضغط (*Compressive crushing*)، أما الطريقة الثانية (*Brittle Cracking Model*)، تستخدم في حالات التحليل التي يكون فيها سلوك انهيار البيتون على الضغط غير مهم حيث يعتبر سلوك البيتون على الضغط سلوكاً مرناً (*Elastic Behaviour*).

أما الطريقة الثالثة (*Concrete Damaged Plasticity*)، فتستخدم في حالات التحميل العشوائي (*Arbitrary Loading*) والذي يأخذ بعين الاعتبار تأثير إزالة القوة والتناقص التدريجي في الصلابة المرنة (*Elastic Stiffness*) في حالتي الشد والضغط بسبب التشوهات اللدنة، أيضاً تأخذ آثار استرداد القساوة المرنة (*Recovery of the elastic stiffness*) تحت تأثير التحميل الدوري (*Cyclic loading*) عند انعكاس الحمولة من الشد الى الضغط، و بناء على ما سبق نجد أن الطريقة الثالثة في نمذجة البيتون هي العامة والأفضل، وتم اعتمادها في الدراسة الحالية.

يعبر الشكل (3-3) عن منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الضغط لطريقة (*Concrete Damage Plasticity*) حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي للبيتون على الضغط (ϵ_c) أما المحور الشاقولي فيمثل إجهاد البيتون على الضغط (σ_c).



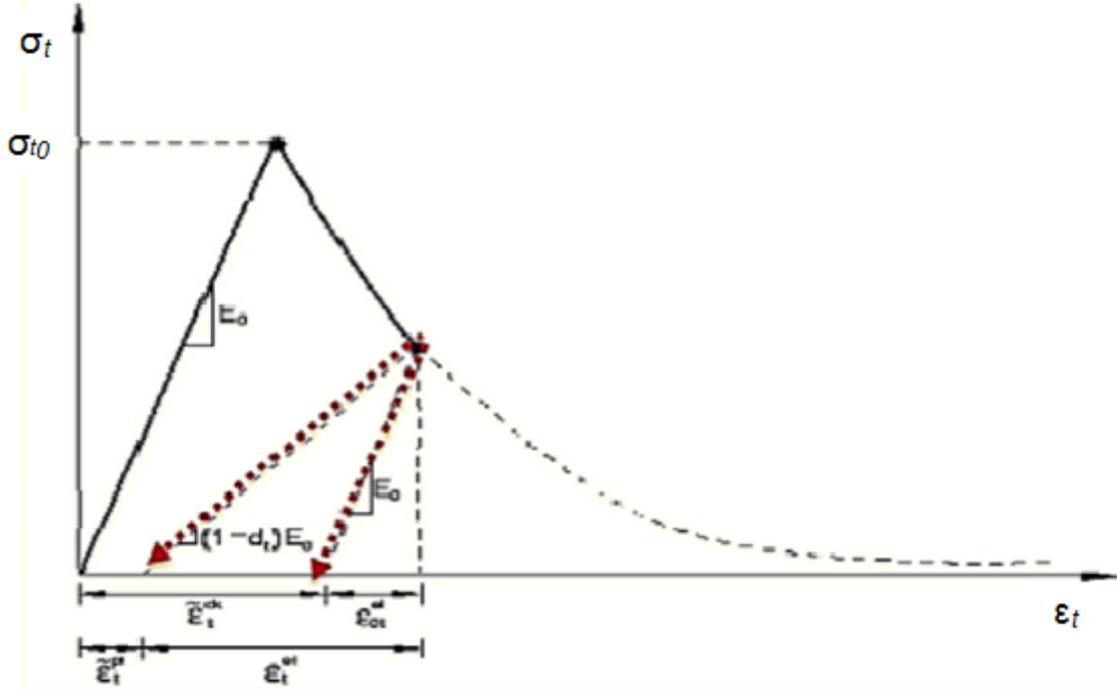
الشكل (3-3): مخطط (الإجهاد -التشوه النسبي) للبيتون في حالة الضغط (ABAQUS 6.12 Documentation)

يبين الشكل (3-3) أن البيتون يسلك سلوكاً خطياً على الضغط في المرحلة الأولى حتى يصل إلى الخضوع الابتدائي (*Initial Yield*) عند قيمة الإجهاد الابتدائي (σ_{c0}) (*Initial Stress*)، يبدأ بعدها البيتون بالدخول بمرحلة السلوك اللاخطي حيث توصف هذه المرحلة بمرحلة التقسية (*Stress Hardening*). تستمر التشوهات والإجهادات بالازدياد بشكل لا خطي حتى الوصول إلى القيمة الحدية لإجهاد البيتون على الضغط (σ_{cu})، بعد ذلك تبدأ الإجهادات بالانخفاض بشكل تدريجي مع ازدياد التشوهات وبترافق ذلك مع زيادة تشكل الشقوق واتصالها مع بعضها البعض حتى الوصول إلى الانهيار.

كما يبين الشكل أن إزالة التحميل في أي نقطة بعد الوصول إلى الإجهاد الحدي للبيتون يترافق بتناقص قساوة المادة ويتم التعبير عن ذلك بالمعامل (d_c) والذي يسمى معامل تخفيض القساوة على الضغط (*Uniaxial Compressive Damage Variable*) وتتراوح قيمته بين الصفر عندما تكون المادة غير متشققة والواحد عندما تفقد المادة كامل مقاومتها. ويعبر الخط المنقط ذي الميل $(1-d_c)E_0$ عن معامل المرونة الجديد في حالة إزالة الحمولة في مرحلة السلوك اللدن اللاخطي أما الخط ذي الميل E_0 فيعبر عن سلوك المادة بحالة السلوك المرن حيث أن E_0 هو معامل المرونة الابتدائي للبيتون.

إن انخفاض ميل الخط الأول عن الثاني بمقدار $(1-d_c)$ ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات الضغط اللدنة المتبقية (*Compressive Equivalent Plastic Strain*). وهذا لا يظهر في الدراسة الحالية، حيث أن الحمولة المطبقة هي حمولة لا دورية، أي ليس هناك حالة إزالة حمل.

يعبر الشكل (4-3) عن منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الشد المحوري لطريقة (*Concrete Damaged Plasticity*) حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي للبيتون على الشد (ϵ_t) أما المحور الشاقولي فيمثل إجهاد البيتون على الشد (σ_t).



الشكل (3-4): مخطط (الإجهاد -التشوه النسبي) للبيتون في حالة الشد (ABAQUS 6.12 Documentation)

يكون تصرف البيتون تحت تأثير الشد المحوري خطي حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الشد (σ_{t0}) الذي يترافق مع ظهور أول شق في البيتون، وبعدها يسلك البيتون سلوكاً لا خطياً حيث تبدأ التشققات بالانتشار ويصبح بالإمكان رؤيتها بالعين المجردة وتبدأ الاجهادات في هذه المرحلة بالانخفاض مع استمرار التشوهات بالتزايد وتصبح المادة ضعيفة بسبب ازدياد الشقوق واتساعها.

وبشكل مماثل لسلوك البيتون على الضغط يبين الشكل أن إزالة التحميل في أي نقطة بعد الوصول إلى الإجهاد الحدي للبيتون يؤدي إلى تناقص قساوة المادة ويتم التعبير عن ذلك بالمعامل (d_t) والذي يسمى معامل تخفيض القساوة على الشد (*Uniaxial Tension Compressive Damage Variable*) وتتراوح قيمته بين الصفر عندما تكون المادة غير متشققة والواحد عندما تفقد المادة كامل مقاومتها. ويعبر الخط المنقط ذي الميل $((1-d_t)E_0)$ عن نقصان معامل المرونة في حالة إزالة الحمولة في مرحلة السلوك اللاخطي .

إن انخفاض ميل الخط الأول عن الثاني بمقدار $(1-d_t)$ ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات الشد اللدنة المتبقية (*Tension Equivalent Plastic Strain*).

اعتمدت الدراسة الحالية لتوصيف مخطط (الإجهاد - التشوه النسبي) للبيتون على الضغط على الكود الأوروبي (*Eurocode2,2004*) ، كما ورد في الشكل (1-2) حيث تكون علاقة الإجهاد بالتشوه خطية حتى الوصول إلى قيمة إجهاد مساوية إلى $(0.4f_{cm})$ حيث أن (f_{cm}) هي المقاومة الأسطوانية للبيتون على الضغط (*Mean Value of concrete cylinder Compressive Strength*) بعدها يتحول سلوك البيتون إلى سلوك لاخطي حتى

الوصول لقيمة إجهاد أعظمي مساوية إلى (f_{cm}) ويقابلها تشوه نسبي مقداره (ϵ_{c1})، تنخفض المقاومة بعد ذلك حتى الوصول للانتهيار الذي يقابل التشوه النسبي الحدي للبيتون (ϵ_{cu1}).

بالعودة للجدول (1-2) نجد أن:

- ✓ المقاومة المتوسطة الاسطوانية للبيتون على الضغط (f_{cm}) 33MPa .
- ✓ معامل المرونة الثاني للبيتون (E_{cm}) 31500 MPa .
- ✓ التشوه النسبي للبيتون على الضغط (ϵ_{c1}) المقابل لذروة الإجهاد (f_{cm}) تؤخذ قيمته 0.2% .
- ✓ التشوه النسبي الحدي للبيتون على الضغط (ϵ_{cu1}) تؤخذ قيمته 0.35% .
- ✓ معامل بواسون للبيتون (ν) تم افتراض قيمته 0.2 وفق الكود الأوروبي.

حيث تم حساب معامل مرونة البيتون اللحظي التقريبي من العلاقة (8-2) (Eurocode2;2004).

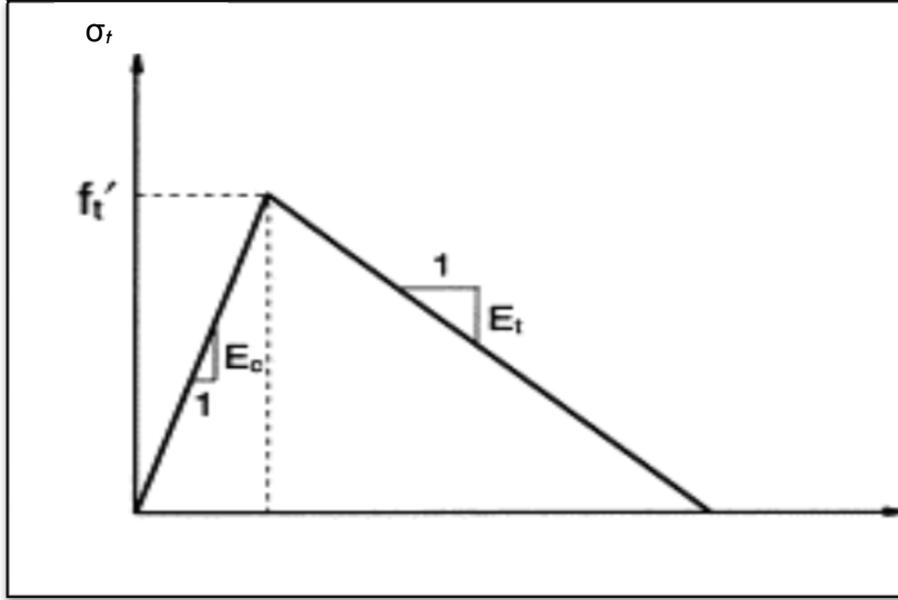
ومن أجل تحديد قيم إجهادات الضغط لنقاط منحنى (الإجهاد-التشوه النسبي) للبيتون ضمن مجال للتشوه النسبي بين الصفر وقيمة التشوه الحدي (ϵ_{cu1})، يمكننا استخدام العلاقات (Kmiecik & Kaminski;2011):

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{K\mu - \mu^2}{1 + (K - 2)\mu} \quad \dots (1 - 3)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad \dots (2 - 3)$$

$$K = \frac{1.05E_{cm} |\epsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad \dots (3 - 3)$$

أما في حالة الشد فقد اعتمدت الدراسة الحالية على منحنى خطي لعلاقة (الإجهاد - التشوه النسبي) موضح في الشكل (5-3)، تؤخذ قيمه وفقا للكود الأوروبي (Eurocode2;2004)، حيث يصل البيتون لمقاومة الشد العظمى (f_{ctm}) (*Mean Value of axial tensile Strength of concrete*) ويعطى بالعلاقة (4-3) (Eurocode2,2004) ويكون التشوه النسبي المرافق لقيمة الإجهاد الأعظمي (ϵ_{cr}) ويعطى بالعلاقة (5-3)، بعد ذلك تنخفض المقاومة تدريجيا حتى الصفر عند تشوه حدي للبيتون على الشد (ϵ_0) يعطى بالعلاقة (6-3)، وذلك على اعتبار أن البيتون يخرج عن العمل على الشد عند وصول حديد التسليح إلى السيلان.



الشكل (5-3): مخطط (الإجهاد - التشوه النسبي) للبيتون في حالة الشد (Eurocode2، 2004)

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{\left(\frac{2}{3}\right)} \quad \dots (4 - 3)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ctm}}{E_{c01}} \quad \dots (5 - 3)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{f_y}{E_s} \quad \dots (6 - 3)$$

بالاعتماد على العلاقات السابقة تم اعتماد قيمة إجهاد البيتون على الشد ($f_{ctm}=2.56\text{MPa}$) ، ($\varepsilon_{cr}=0.0000813$) و ($\varepsilon_0=0.00266$).

ذكرت الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam;2003) أن الحديد المستخدم من نوع Grade60 ومن هنا تم اعتماد الدراسة التجريبية في مقالة (Manzor and Ahmad;2013) حيث قام الباحثان بإجراء عدة تجارب على حديد التسليح Grade60 وقاما بتوصيف سلوك الفولاذ من نوع Grade 60 بالشكل (6-3).
حيث:

f_y : إجهاد الخضوع لحديد التسليح ويساوي 532MPa .

f_u : الإجهاد الأعظمي لحديد التسليح ويساوي 655MPa .

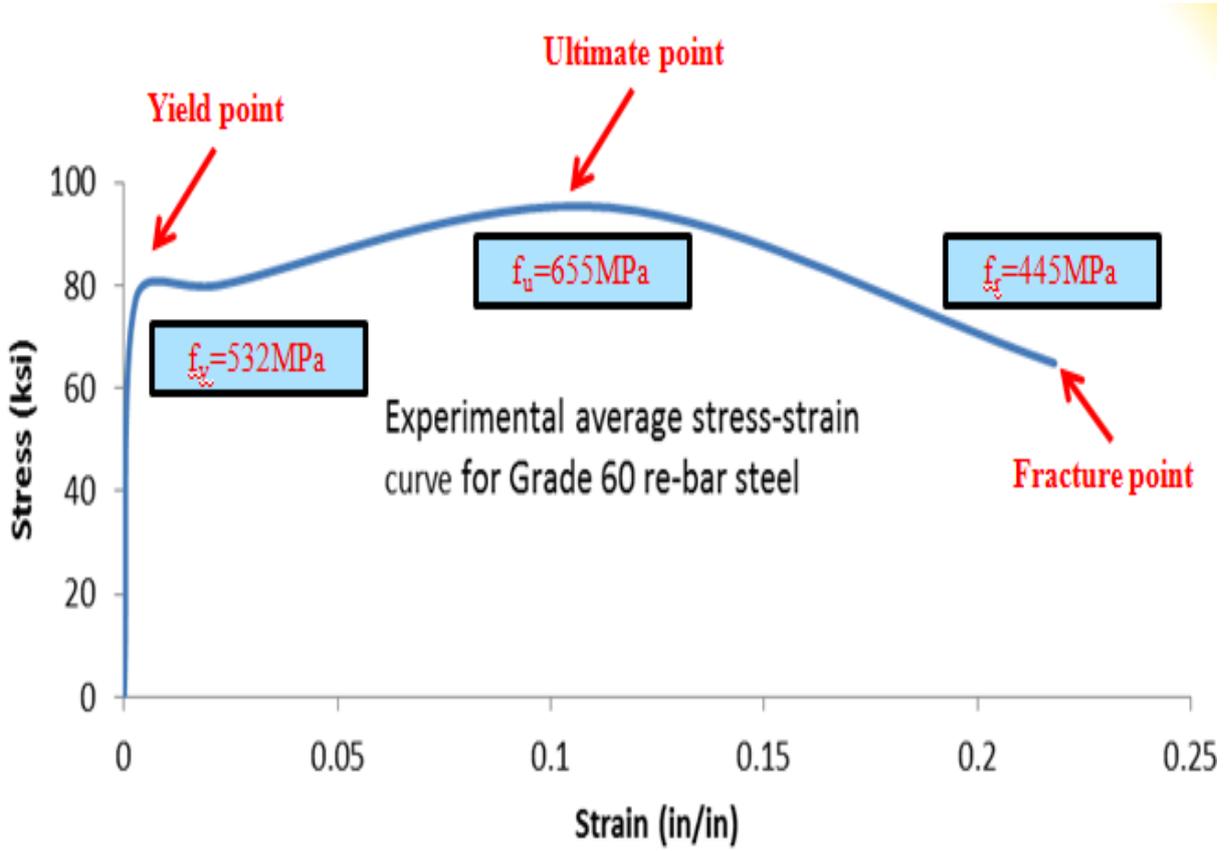
f_r : إجهاد الانقطاع لحديد التسليح ويساوي 455MPa .

أما معامل مرونة حديد التسليح (Elastic modulus) $E_s = 200000\text{MPa}$ ، ومعامل بواسون لحديد التسليح (Poisson's ratio) $\nu_s = 0.3$.

حيث يتضح من الشكل أن الحديد يسلك سلوكاً مرناً خطياً حيث تزداد التشوهات النسبية بازدياد الإجهادات حتى الوصول إلى إجهاد الخضوع (f_y) (Yield Stress) والذي يرافقه التشوه النسبي (ε_y)، بعد هذه المرحلة يسلك التسليح سلوكاً لدناً (Elastic - Plastic) حيث تزداد التشوهات بشكل كبير وتقابلها زيادة طفيفة في الإجهادات.

حيث يحسب التشوه النسبي المرافق لإجهاد الخضوع من العلاقة (7-3) حيث (E_s) معامل مرونة الحديد .

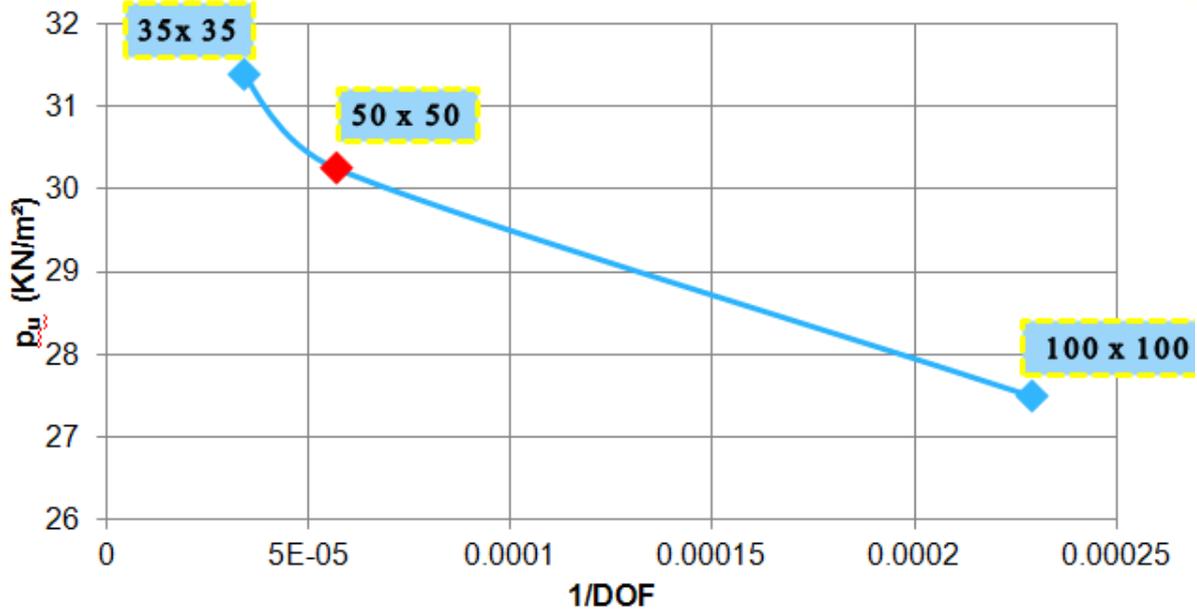
$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad \dots (7-3)$$



الشكل (6-3): علاقة الإجهاد - التشوه النسبي لحديد التسليح Grade 60 (Manzor and Ahmad;2013)

6.3.3 دراسة أثر تقارب الشبكة Mesh Convergence

تمت دراسة ثلاثة نماذج مختلفة للبلطة البيتونية بتقسيمات مختلفة للشبكة، حيث يبين الشكل (7-3) العلاقة بين مقلوب عدد درجات الحرية (DOF) على المحور الأفقي مع قوة الانهيار للبلطة البيتونية (P_u) على المحور الشاقولي للنماذج المدروسة.



الشكل (7-3): دراسة أثر تقارب الشبكة (ABAQUS 6.12).

يوضح الشكل أنه عند استخدام العنصر (S4R) بأبعاد (35*35) كانت قوة الانهيار للصفحة مساوية إلى (31.5KN) أما عندما كانت أبعاد العناصر (50*50) فكانت قوة الانهيار (30.25KN) ومن أجل تقسيمات بأبعاد (100*100) للعناصر كانت قوة الانهيار (27.7KN). يبين الشكل أن نقطتي التقسيمين (50*50) و(35*35) قد أعطيتا تقاربا في النتائج (فرق بحوالي 4%) وبالتالي لا داع لتقسيم أقل من 35*35 ولذلك سيتم اعتماد النموذج ذي التقسيم (50*50) والذي يحقق دقة مقبولة في الحل مع اقتصادية في زمن التحليل.

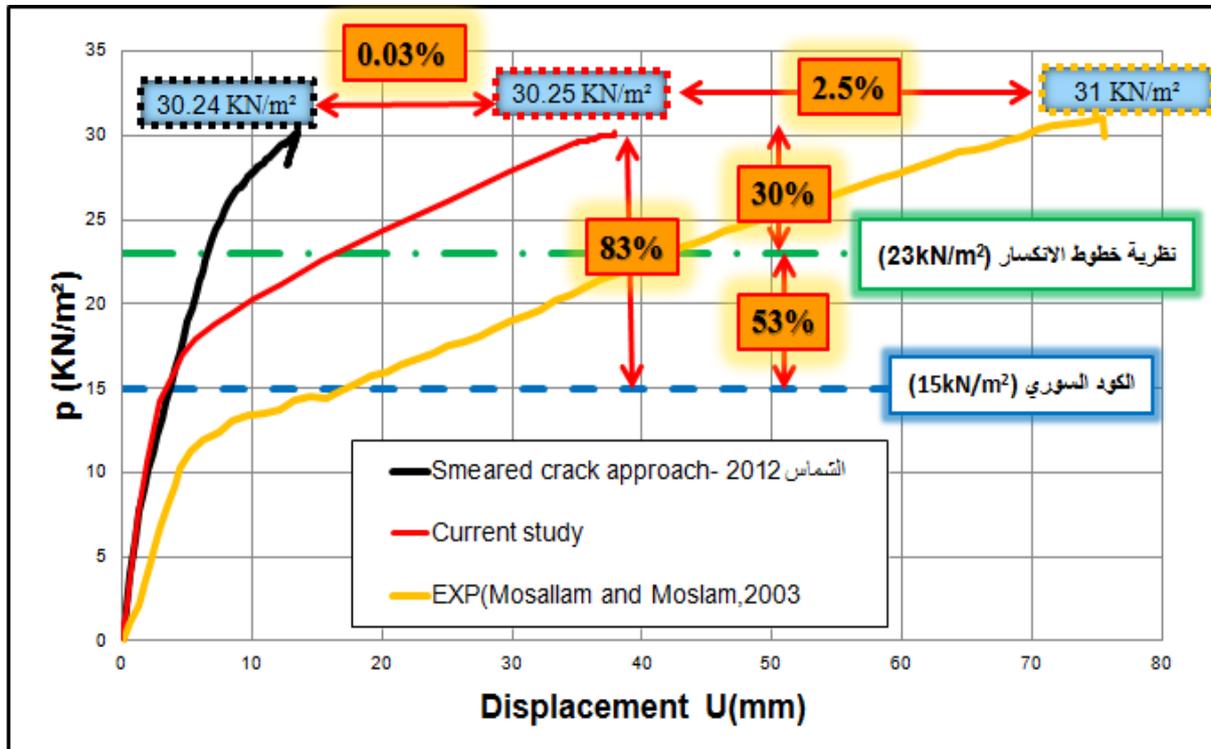
7.3.3 مقارنة النتائج التحليلية مع التجريبية

Comparing the results with literature review

يبين الشكل (8-3) علاقة الحمولة - الانتقال لنقطة منتصف البلاطة البيتونية المسلحة المربعة في الدراسة الحالية ومقارنتها مع الدراسة التجريبية لـ (Mosallam and Mosalam; 2003) والدراسة التحليلية لـ (الشماس، 2012). يوضح الشكل التقارب في حمولة الانهيار للبلاطة بدون تقوية بين النتائج التي أعطاها نموذج الدراسة الحالية باستخدام برنامج ABAQUS (30.25KN/m²) وحمولة الانهيار في الدراسة التجريبية في مقالة (Mosallam and Mosalam; 2003) (31kN/m²) والدراسة التحليلية (الشماس، 2012) (30.24KN/m²)، أما الاختلاف في التصرف بين الدراسة التجريبية والتحليلية الحالية فيفسر بأن الدراسة التحليلية الحالية وصفت تصرف البيتون بمنحنيات نموذجية مأخوذة من Eurocode2; 2004 وهي تختلف عن التصرف الحقيقي للبيتون، بالإضافة إلى الشقوق الشعرية الميكروية (Micro cracks) والتي تنشأ في البيتون قبل التحميل مما يؤدي إلى انخفاض القساوة، على عكس الدراسة التحليلية التي لا تأخذ هذه الشقوق بعين الاعتبار.

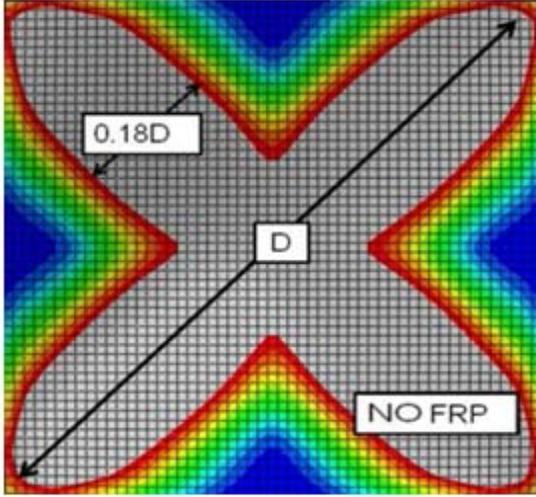
بينما يفسر الاختلاف في التصرف بين الدراسة التحليلية الحالية والدراسة التحليلية للشماس هو طريقة نمذجة البيتون حيث اعتمد الشماس طريقة (*Smeared Crack Model*) (الفقرة 3.3.5) والتي تعتمد على قيمة مقاومة الشد وعرض الشق، أما الدراسة الحالية اعتمدت لتوصيف سلوك البيتون طريقة (*Concrete Damaged Plasticity*) والتي توصف المنحنيات بأكملها .

كما يبين الشكل (8-3) نتائج الدراسة اليدوية للبلاطة بطريقة خطوط الانكسار (23kN/m^2) (Kennedy and Goodchild;2003) ، وطريقة الشرائح (15kN/m^2) (الكود العربي السوري،2004)، ونلاحظ أن السلوك الحقيقي للبلاطة يعطي حمولة انهيار أعلى من الطريقتين السابقتين، بالإضافة لذلك فإن الحمولة التي يعطيها الكود العربي السوري هي كبقية الكودات عند نهاية مرحلة المرونة (قبل بدء تشقق البلاطة) ،بينما طريقة خطوط الانكسار فتأخذ المقطع البيتوني بتوزع الاجهادات عند الحد الأقصى.



الشكل (8-3): مقارنة النتائج للحمولة القصوى للبلاطة المدروسة باستخدام (ABAQUS;Ver 6.12) والدراستين المرجعيتين

يبين الشكل (9-3) مقارنة بين شكل انهيار البلاطة غير المقواة في الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam;2003) وشكل الانهيار للبلاطة غير المقواة في الدراسة الحالية (ABAQUS;Ver 6.12) ،حيث نلاحظ تشكل خطوط الانكسار في منتصف البلاطة وانتشارها نحو الأطراف في الدراستين. كما تبين الدراسة التحليلية تشكل عرض لخط الانكسار بمقدار $0.18D$ ، حيث D المسافة بين زاويتين متقابلتين للبلاطة. إن هذا العرض هو مايفسر فرق الحمولة بين الطريقة اليدوية لخطوط الانكسار (23kN/m^2) والطريقة العددية (30.25kN/m^2)، حيث أن اليدوية تعتبر خطوط الانكسار مستقيمة دون أخذ العرض بعين الاعتبار أو مايعرف بعرض المفصل اللدن.



تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة (الدراسة الحالية)



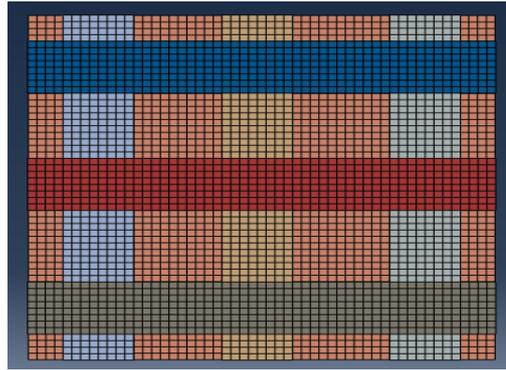
تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة (Mosallam and Mosalam ;2003)

الشكل (9-3): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة في الدراسة المرجعية والدراسة الحالية (ABAQUS; Ver 6.12)

4.3 التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) للبلاطة البيتونية المقواة Structural Analysis Using (FEM) for strengthen slab

1.4.3 توصيف النموذج Model Description

تمت تقوية البلاطة السابقة (المدرسة تحليليا) بواسطة شرائح الـ FRP بالاتجاهين كما يوضح الشكل (10-3) حيث عرض الشريحة الواحدة 400mm وبسماكة 1.2mm.



الشكل (10-3): نموذج البلاطة المدروسة بعد التقوية باستخدام شرائح الـ FRP باستخدام برنامج (Abaqus ver 6.12)

2.4.3 توصيف العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12) Elements Used in the Model using (ABAQUS6.12)

تم استخدام العنصر S4R لنمذجة شرائح الـ FRP والذي تم شرحه سابقا في الفقرة (1.3.3).

3.4.3 الشروط المحيطة للنموذج المدروس *Model's Boundary Conditions*

تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج المدروس كما اعتمدت في التجربة (Mosallam and Mosalam;2003) وهي استناد بسيط عند أطراف البلاطة (منع حركة شاقولية فقط) .

4.4.3 الأحمال المطبقة على النموذج *Applied Loads to the Model*

تم تطبيق حمولة موزعة بانتظام على كامل سطح البلاطة من الأعلى.

5.4.3 نوع التحليل المستخدم *Type of Analysis*

تحليل لاخطي يأخذ بعين الاعتبار لاخطية المادة (Materially Non-linear Analysis; MNA).

6.4.3 توصيف المواد المستخدمة في النمذجة *Material Used in Modeling*

تم استخدام نفس الخواص المستخدمة للبيتون وفولاذ التسليح في الدراسة التحليلية للبلاطة بدون تقوية (حسب الأشكال (2-1) (1) (5-3)، (6-3)).

أما مواصفات شرائح الـ *FRP* فتم اعتماد نفس الخواص المستخدمة للمواد في الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam;2003) حيث تم نمذجة الرقائق بمستوي السطح السفلي المشدود للبلاطة في النموذج العددي. تسلك رقائق التقوية الـ *CFRP* على الشد سلوكاً مرناً خطياً ذا انهيار هش (*Elastic-Brittle*) كما أظهر الشكل (2-10)، وقد حددت الدراسة التجريبية لـ (Mosallam and Mosalam;2003) الخصائص الهندسية لرقائق الـ *CFRP* المستعملة في تقوية البلاطة البيتونية المسلحة وهي:

$$\begin{aligned} E_L &= 101000 \text{ MPa} && \text{معامل مرونة باتجاه الألياف:} \\ E_T &= 3000 \text{ MPa} && \text{معامل مرونة بالاتجاه المتعامد مع الألياف:} \\ \varepsilon_{fu} &= 1.2\% && \text{التشوه النسبي الحدي على الشد} \end{aligned}$$

7.4.3 التماسك بين البيتون وشرائح الـ *FRP* *Local bond-Slip of externally bonded FRP*

أظهرت عدة دراسات مرجعية في إطار التدعيم باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف *FRP*، أهمية الربط بين الشرائح وسطح المقطع المدعم، حيث أشير في الشكل (2-12) على احتمالية حدوث الانهيار بسبب انفصال مادة الـ *FRP* مع

طبقة التغطية للبيتون بسبب تركيز اجهادات القص عند النهايات، ومن هنا تظهر أهمية نمذجة سلوك التماسك بين الـ *FRP* والمقطع المدعم .

أخذ كود التصميم *CEB-FEP;2010* أثر الانفصال بعين الاعتبار في نمذجة التماسك لمادة الـ *FRP* على السطح الخارجي للمقطع، حيث يبين الشكل (3-11) علاقة الانزلاق – إجهاد التماسك لمادة الـ *FRP* عند اتصالها مع البيتون.

يلاحظ في هذا المنحني انخفاض إجهادات التماسك بعد وصولها إلى قيمة عظمى τ_m وصولاً إلى فقدان تام للتماسك عند مسافة إنزلاق S_u .

تعطى قيمة إجهاد التماسك في المرحلة اللاخطية حتى الوصول إلى إجهاد التماسك الأعظمي بالعلاقات التالية (*CEP-FIP; Bulliten 14;2001*):

$$\tau = \tau_m (S/S_m) \dots \text{for } 0 \leq S \leq S_m \dots (3-8)$$

$$\tau = \tau_m - \tau_m (S - S_m)/(S_u - S_m) \dots \text{for } S_m \leq S \leq S_u \dots (3-9)$$

حيث:

τ : قيمة إجهاد التماسك عند النقطة المدروسة بين الـ *FRP* والمقطع المدعم.

τ_m : قيمة إجهاد التماسك الأعظمي بين الـ *FRP* والمقطع المدعم.

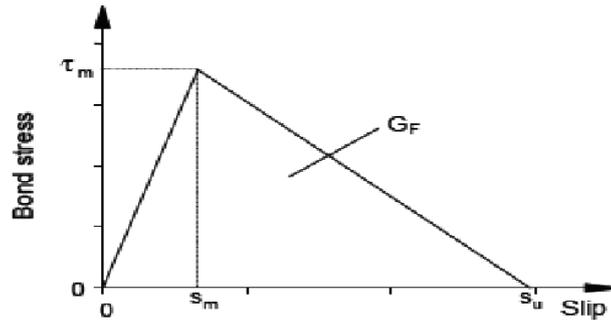
S_m : مسافة الانزلاق الموافقة لإجهاد التماسك الأعظمي.

S_u : قيمة الانزلاق عند انفصال الشريحة بشكل تام عن المقطع وأعطيت بقيمة 0.225 mm .

G_f : طاقة التمزق (*Fracture energy*).

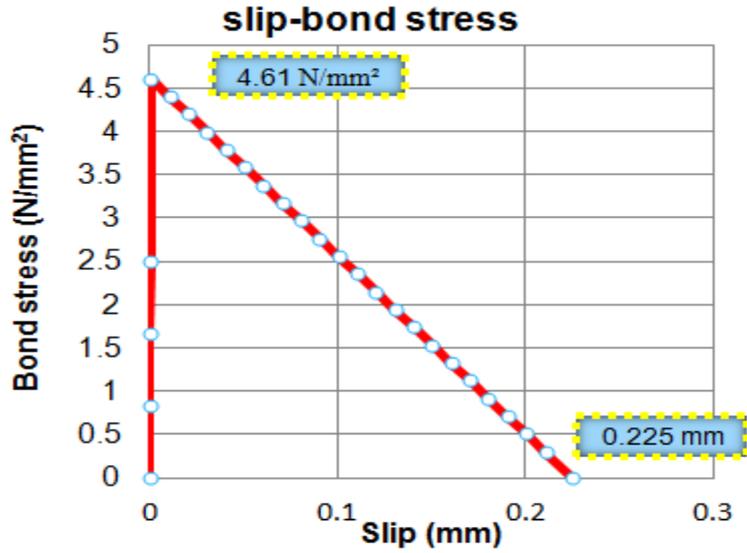
$$G_f = C_f * f_{ctm}, C_f = 0.202 \dots (3-10)$$

$$\tau_m = 1.8 * f_{ctm} \dots (3-11)$$



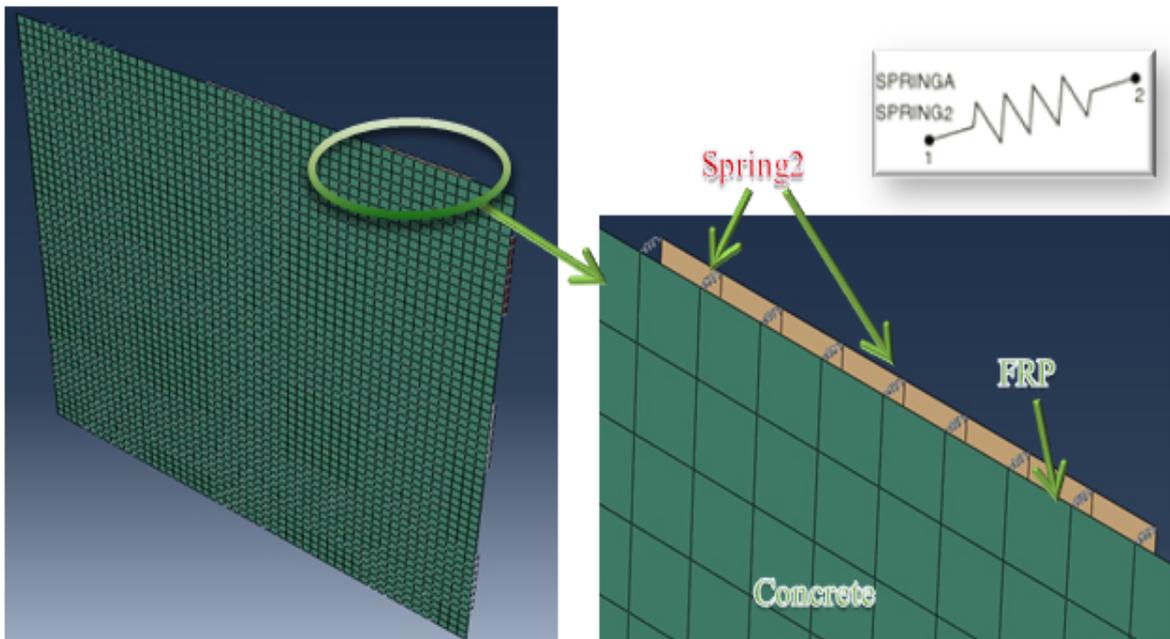
الشكل (3-11): منحني علاقة الانزلاق-إجهاد التماسك لمادة الـ *FRP* (*CEP-FIP;2010*)

مما سبق ينتج منحي الانزلاق- إجهاد التماسك لشريحة الـ *FRP* المستخدم في النمذجة كما في الشكل (3-12).



الشكل (12-3): منحنى الانزلاق - إجهاد التماسك بين الببتون وال FRP (Bond-Slip relationship)

تم تمثيل مادة الايبوكسي الرابطة بين الببتون وشرائح ال FRP في برنامج (Abaqus Ver6.12) عن طريق استخدام عناصر اتصال من النوع (Spring2) وهو نابض يصل بين عقدتين صلابته غير خطية ويتحرك وفقاً لدرجة حرية كل من العقدتين كما في الشكل (13-3)، أما مواصفات النابض فهي علاقة الانزلاق - إجهاد التماسك المبين بالشكل (12-3).

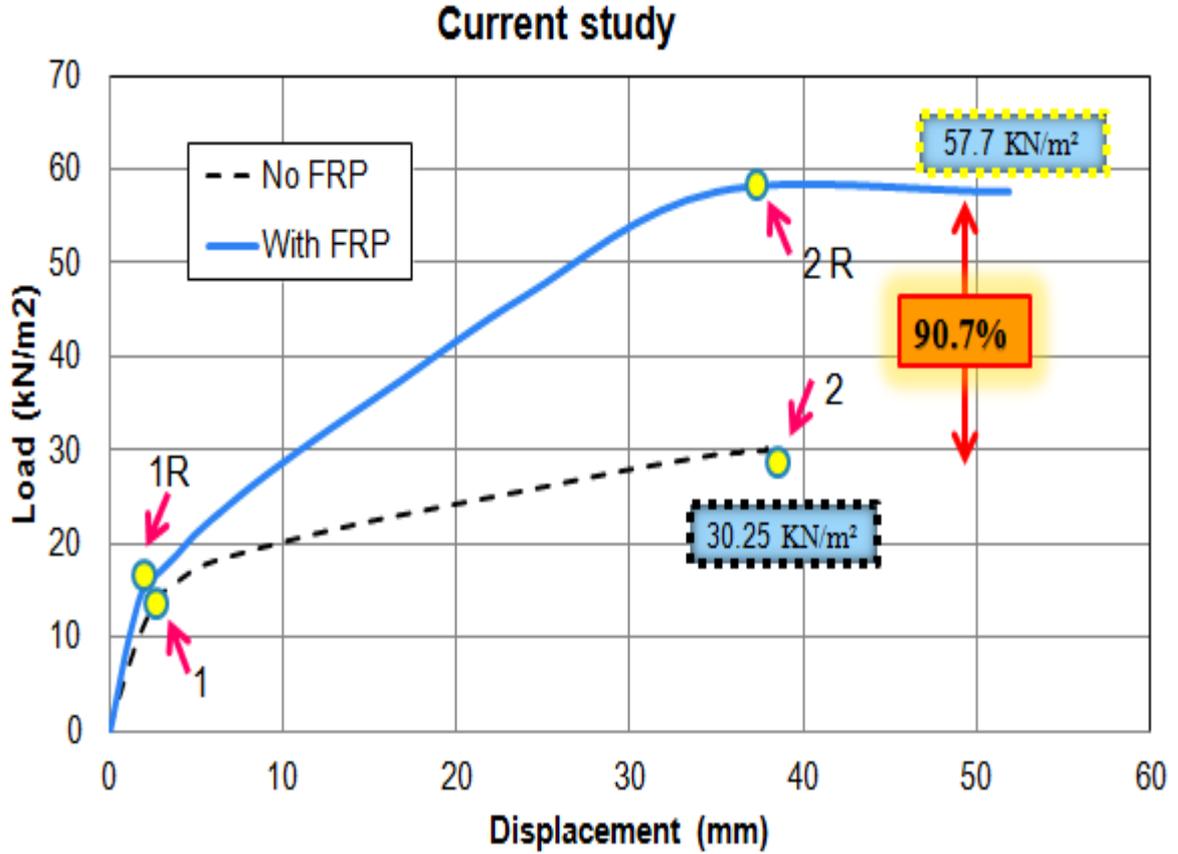


الشكل (13-3): تمثيل التماسك بين الببتون وال FRP باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

8.4.3 مقارنة النتائج التحليلية مع التجريبية

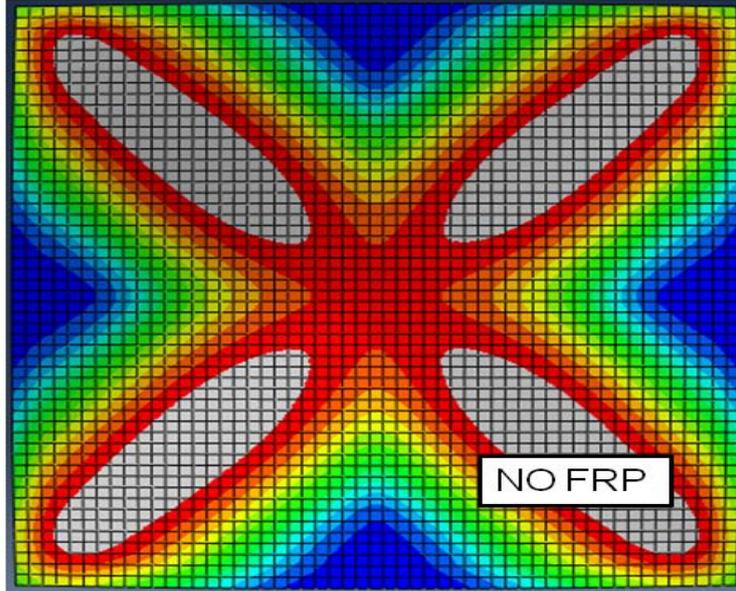
Comparing the results with literature review

يبين الشكل (14-3) علاقة الحمولة - الانتقال الشاقولي لنقطة في منتصف البلاطة للدراسة الحالية ،وذلك لبلاطة بدون تقوية (*Slab without strengthening*) وأخرى مع تقوية بشرائح الـCFRP (*Slab with strengthening*) حيث نلاحظ أن نسبة الزيادة في قدرة تحمل البلاطة بعد تقويتها وصلت إلى 90.7%.

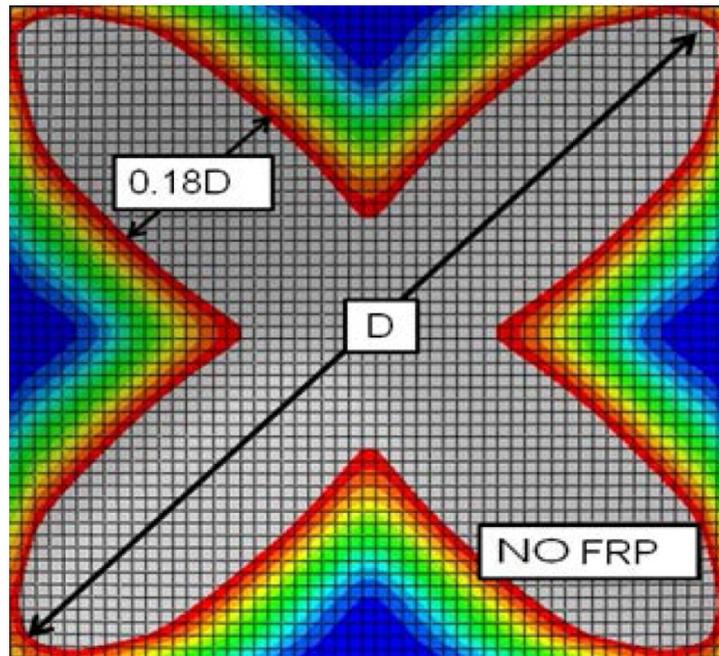


الشكل (14-3) : علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة المقواة مع الحمولة بدون ومع تقوية (الدراسة الحالية)

يبين الشكل (14-3) لحالة البلاطة بدون تقوية أن التصرف يكون خطيا مرنا حتى الوصول إلى النقطة (1) عند انتقال 4.71mm وقوة 17 kN/m^2 ، حيث يبدأ التشقق بالظهور (الشكل 3-15) وتشكل خطوط الانكسار، بينما يوضح الشكل (16-3) شكل التشقق عند نقطة نهاية التحميل (2) وانتشار خطوط الانكسار على امتداد الخطين القطريين وعرضها..

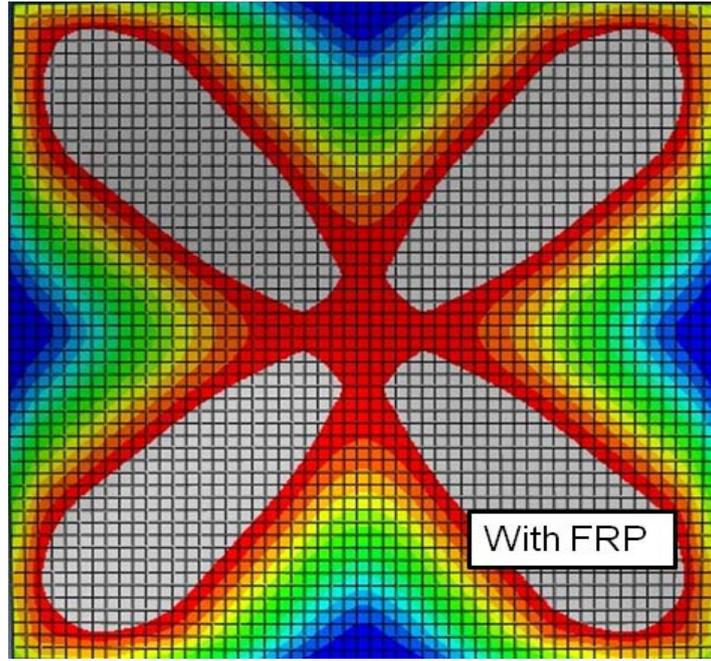


الشكل (15-3): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة عند النقطة (1) (ABAQUS 6.12)

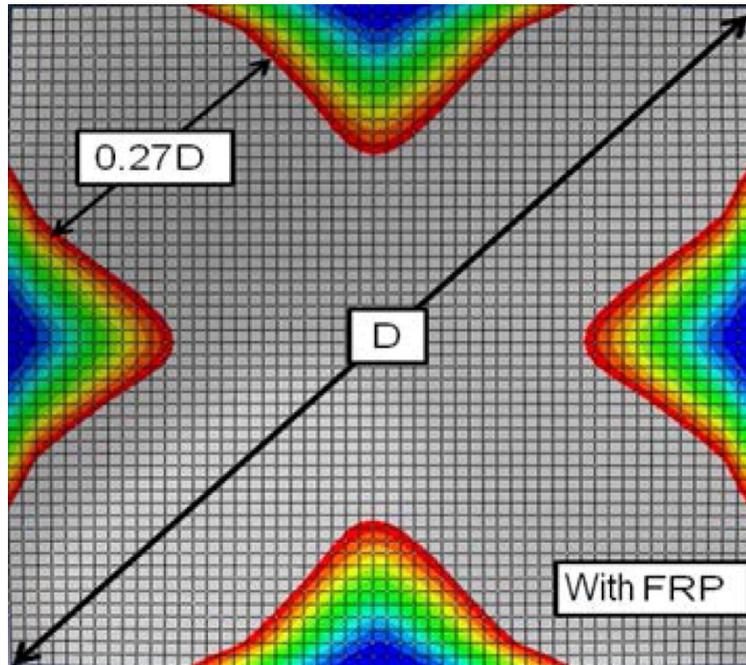


الشكل (16-3): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة غير المقواة عند نقطة نهاية التحميل (2) (ABAQUS 6.12)

كما يبين الشكل (14-3) لحالة البلاطة المقواة بـ *FRP* أن التصرف يكون خطياً مرناً حتى الوصول إلى النقطة (1R) عند انتقال 2.89mm وقوة 17.2 KN/m^2 ، حيث يبدأ التشقق بالظهور (الشكل 3-17)، بينما يوضح الشكل (3-18) شكل التشقق عند نقطة نهاية التحميل (2R) وانتشار خطوط الانكسار وعرضها.



الشكل (3-17): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة المقواة بـ FRP عند النقطة (1R) (ABAQUS 6.12)

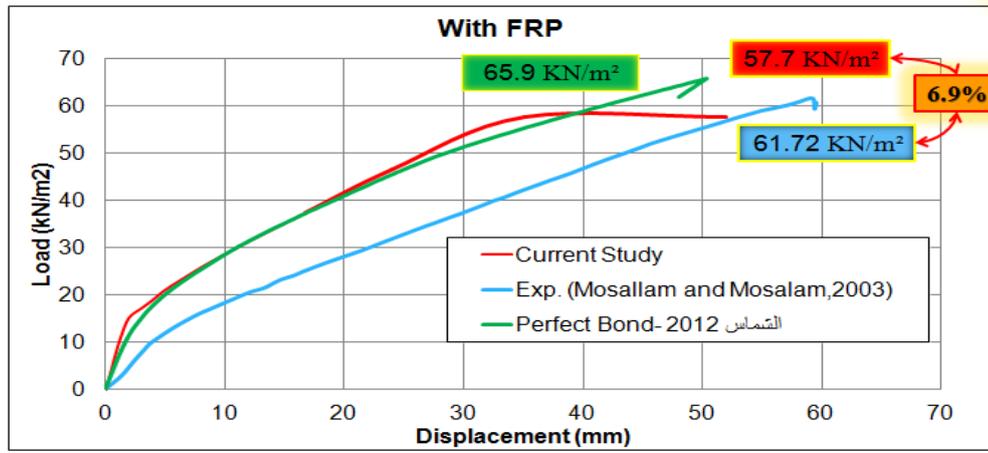


الشكل (3-18): تشكل خطوط الانكسار في البلاطة المقواة بـ FRP عند نقطة نهاية التحميل (2R) (ABAQUS 6.12)

يمكن ملاحظة أن إضافة شرائح الـ FRP أدت إلى زيادة قساوة البلاطة وذلك بسبب أن الـ FRP المضاف يلعب دورا كما فولاذ التسليح، وبالتالي تزداد نسبة تسليح البلاطة، كما أن الـ FRP يؤخر ظهور التشققات وبالتالي زيادة عطالة

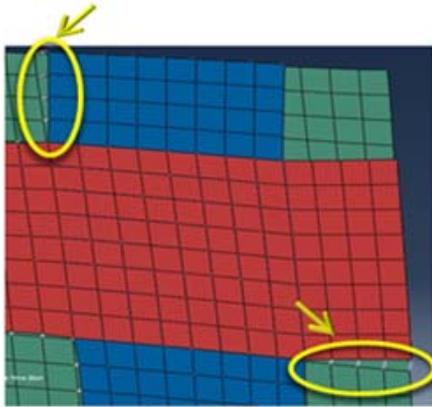
المقطع المتشقق وتخفيض الانتقال. من ناحية أخرى، تبين المقارنة بين الشكلين (3-16) و (3-18) أن عرض خطوط الانكسار لحالة البلاطة المقواة قد ازداد الأمر الذي يفسر زيادة المقاومة.

يبين الشكل (3-19) مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها في الدراسة الحالية والدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam;2003) والدراسة التحليلية (الشماس، 2012) للبلاطة المقواة. لم يتم الحصول على نفس المنحني الناتج من الدراسة التجريبية حيث تم اعتماد منحنيات نموذجية لتصرف البيتون، ولكن تم الحصول على نسبة فرق للحمولة الحديدية عن الحمولة الحديدية في الدراسة التجريبية 6.9% فقط، وكان المنحني للدراسة الحالية أفضل من المنحني الناتج عن الدراسة التحليلية للشماس حيث أنه لم يأخذ خصائص التماسك بين البيتون وشرائح التقوية الـ CFRP، و فرض التماسك بين رقائق الـ CFRP والبلاطة تماماً (Fully bond) اما الدراسة الحالية فأخذت التماسك بعين الاعتبار.



الشكل (3-19): مقارنة للحمولة القصوى للبلاطة المقواة والدراستين المرجعيتين (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (3-20) مقارنة بين شكل انهيار البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP في الدراسة التجريبية (Mosallam and Mosalam;2003) وشكل الانهيار للبلاطة المقواة بشرائح الـ FRP في الدراسة الحالية باستخدام برنامج (ABAQUS; Ver 6.12)، حيث نلاحظ انفصال شرائح الـ FRP عن بيتون منطقة التغطية عند أطراف البلاطة وتشكل خطوط الانكسار في الدراساتتين.



انهيار البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP (الدراسة الحالية)



انهيار البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP (Mosallam and Mosalam)

الشكل (3-20): مقارنة شكل انهيار البلاطة المقواة في الدراسة المرجعية والدراسة الحالية باستخدام (ABAQUS; Ver 6.12)

5.3 دراسة أثر تقوية البلاطة على تغير الطاقة الداخلية (اللدنة)

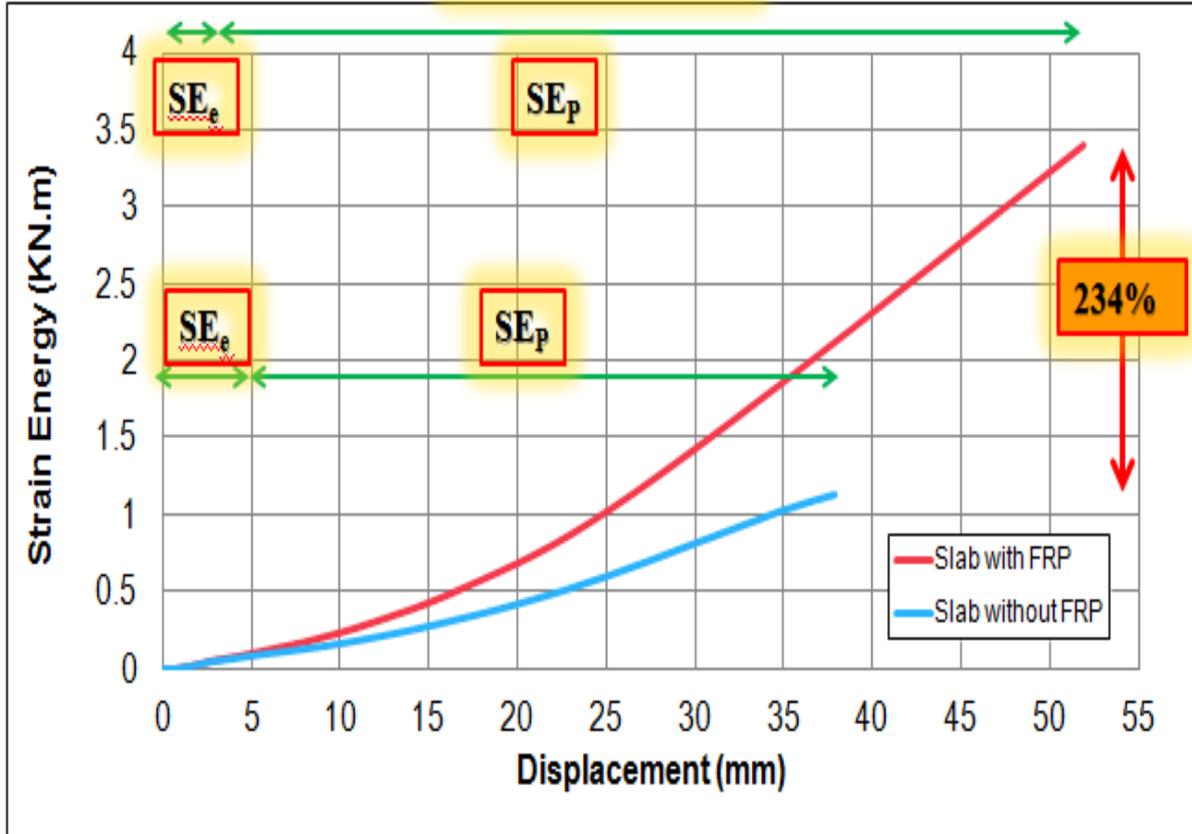
تم في هذا البحث دراسة تغير الطاقة الداخلية الكامنة أو طاقة التشوهات (*Strain Energy*) عند تقوية البلاطة بطبقتين من شرائح الـ *FRP* وبالاتجاهين. يبين الشكل (21-3) أن استخدام شرائح الـ *FRP* أدى إلى زيادة في الطاقة الداخلية المتبقية (اللدنة)، حيث أن الطاقة الداخلية تعطى بالعلاقة:

$$SE = SE_e + SE_p \quad \dots (3 - 12)$$

نلاحظ من الشكل (21-3) أنه يمكن إهمال الطاقة الداخلية الكامنة المرنة مقارنة مع اللدنة، واعتبار أن الطاقة الكامنة مساوية للطاقة الكامنة اللدنة SE_p

$$SE = SE_p \quad \dots (3 - 13)$$

مما يدل على ازدياد المطووعة باستعمال الـ *FRP*، حيث تم الحصول نتيجة التقوية بشرائح الـ *FRP* على نسبة زيادة في الطاقة الداخلية الكامنة (اللدنة) بمقدار 234%، وهو ما يقابله زيادة في عرض خط الانكسار أي زيادة منطقة التلدن.



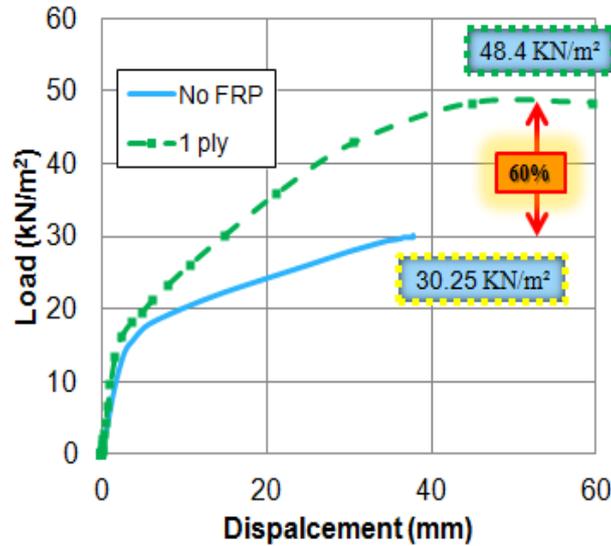
الشكل (21-3): علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة المقواة وغير المقواة مع تغير الطاقة الداخلية (ABAQUS 6.12)

6.3 أثر تغيير عدد طبقات شرائح الـ FRP

تم تغيير عدد طبقات شرائح الـ FRP المستخدمة في تقوية البلاطة البيتونية ودراسة أثر التغيير على حمولة الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة ، حيث تم تثبيت عرض الشرائح والمسافات بين الشرائح .

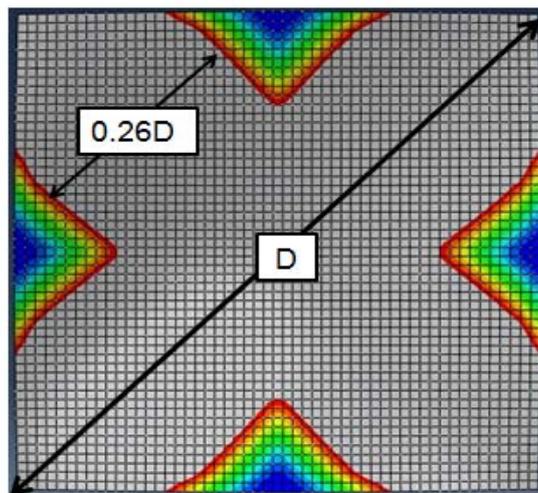
• طبقة واحدة من شرائح الـ FRP $t_f=0.58mm$

يوضح الشكل (22-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحدية لبلاطة بدون تقوية وللبلطة مع تقوية بطبقة واحدة من شرائح الـ FRP حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحدية للبلاطة نتيجة التقوية 60% .



الشكل (22-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بطبقة واحدة من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

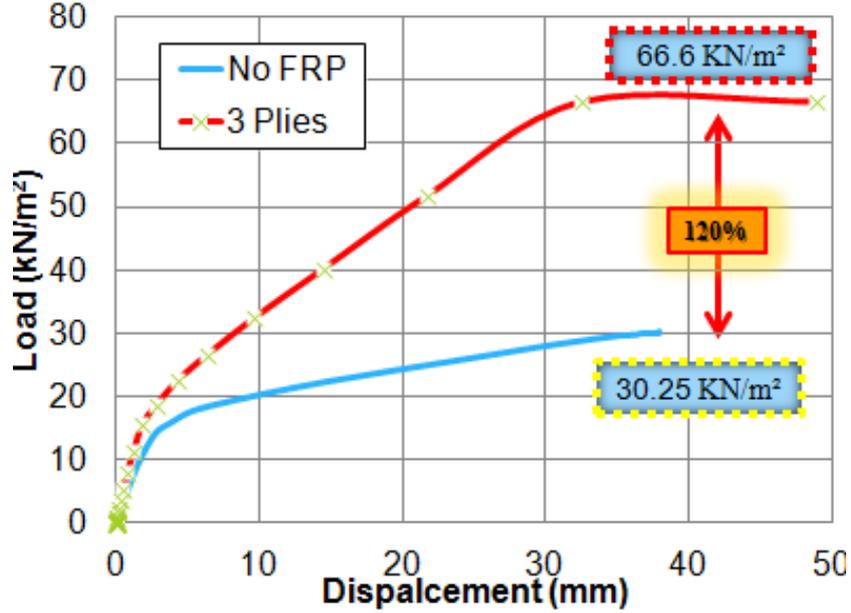
يبين الشكل (23-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بطبقة واحدة من شرائح الـ FRP ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة والتي بلغت $0.26D$ ، حيث D التباعد بين نقطتي البلاطة المتقابلتين.



الشكل (23-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بطبقة واحدة من الشرائح (ABAQUS 6.12)

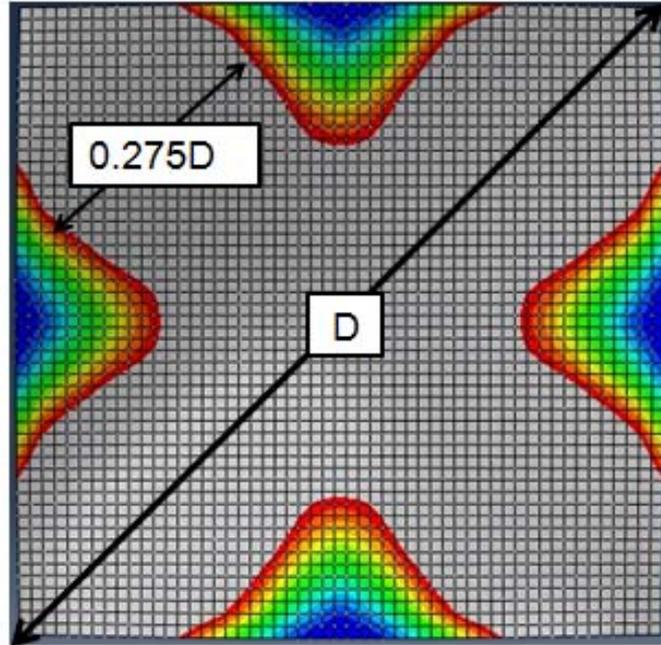
• ثلاث طبقات من شرائح الـ FRP $t_f=1.74\text{ mm}$

يوضح الشكل (24-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحديدية لبلاطة بدون تقوية وللبلطة مع تقوية بثلاث طبقات من شرائح الـ FRP حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلاطة نتيجة التقوية 120% .



الشكل (24-3): مقارنة النتائج بين البلاطة المقواة بثلاث طبقات من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

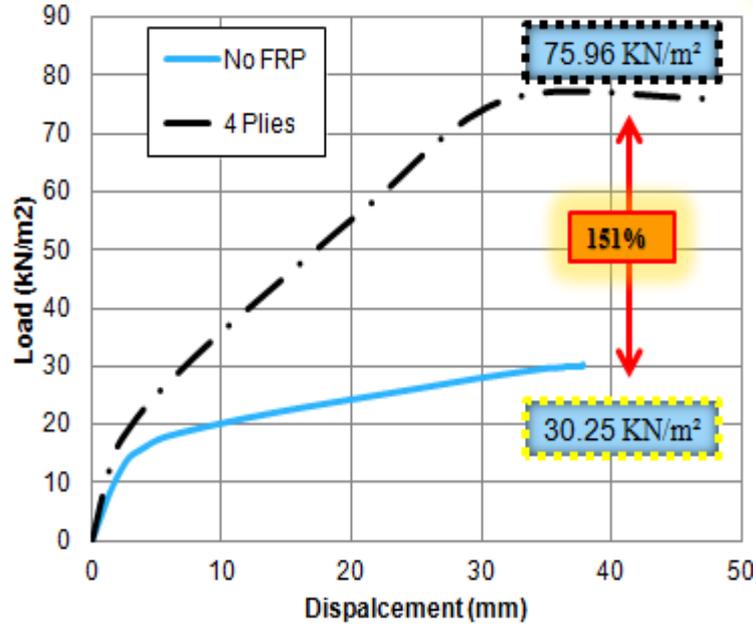
يبين الشكل (25-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بثلاث طبقات من شرائح الـ FRP ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة ($0.275D$).



الشكل (25-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بثلاث طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12)

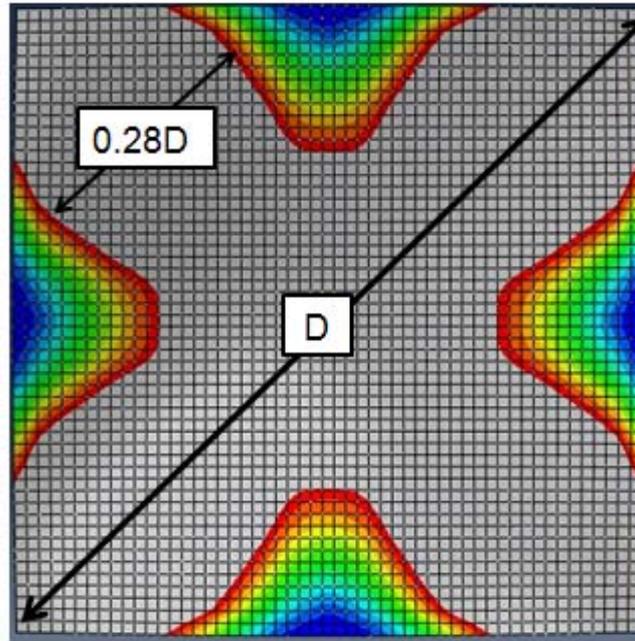
• أربع طبقات من شرائح الـ FRP $t_f=2.32\text{ mm}$

يوضح الشكل (26-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحديدية لبلاطة بدون تقوية وللبلطة مع تقوية بأربع طبقات من شرائح الـ FRP حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلطة نتيجة التقوية %151.



الشكل (26-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بأربع طبقات من الشرائح والبلطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

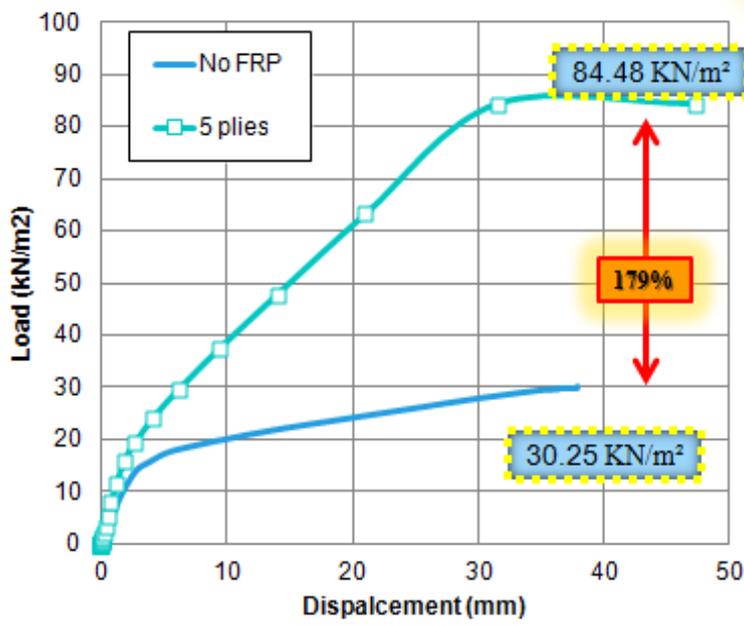
يبين الشكل (27-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بأربع طبقات من شرائح الـ FRP ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة (0.28D).



الشكل (27-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بأربع طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12)

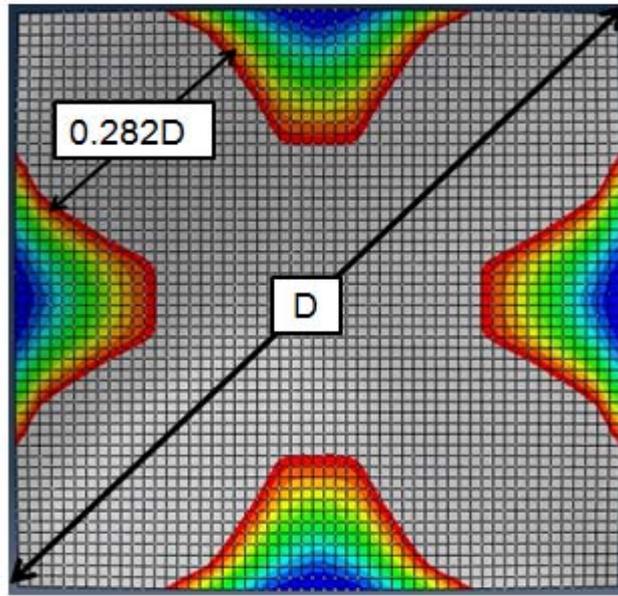
• خمس طبقات من شرائح الـ $t_f=2.9\text{ mm}$ FRP

يوضح الشكل (28-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحديدية لبلاطة بدون تقوية وللبلطة مع تقوية بخمس طبقات من شرائح الـ FRP حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلطة نتيجة التقوية 179%.



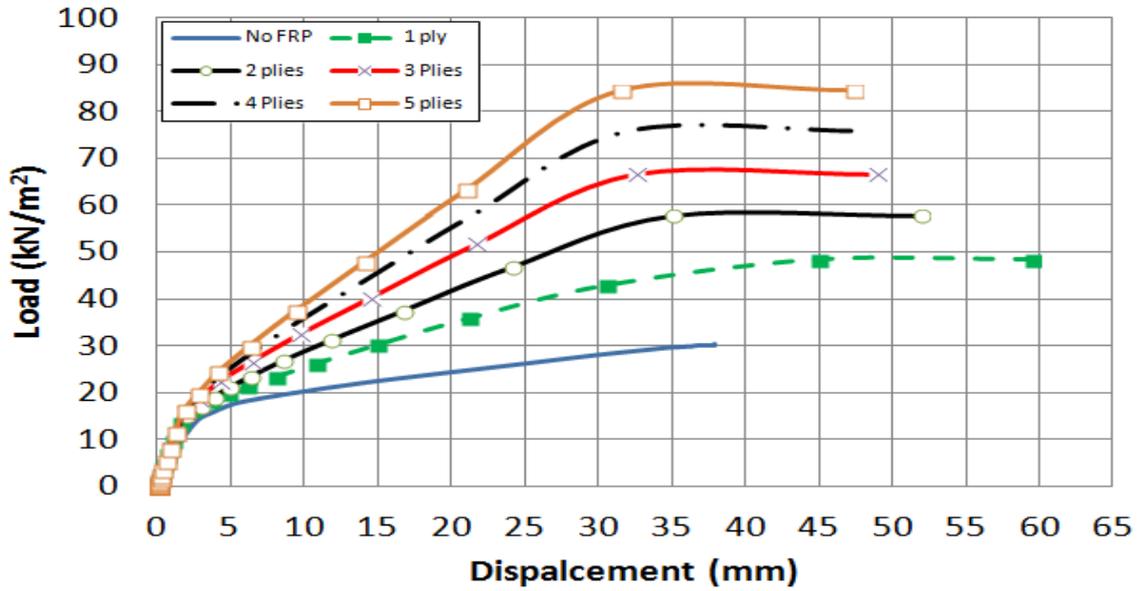
الشكل (28-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بخمس طبقات من الشرائح والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (29-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بخمس طبقات من شرائح الـ FRP ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة (0.282D).



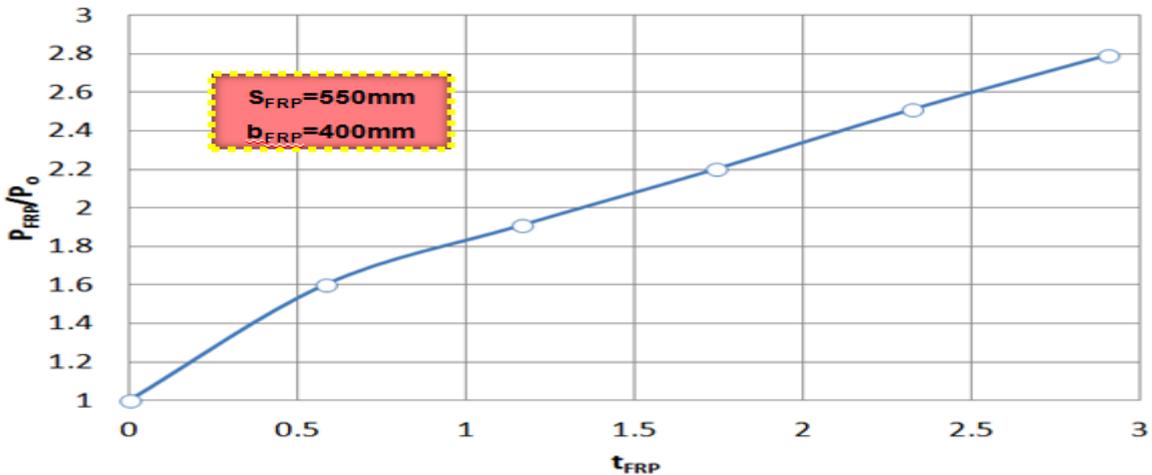
الشكل (29-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة مع تقوية بخمس طبقات من الشرائح (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (30-3) مقارنة بين النماذج المدروسة بعدد مختلف من الطبقات، حيث سماكة الطبقة الواحدة (0.58mm) كما تجربة (Mosallam and Mosalam;2003). يمثل المحور الأفقي في الشكل قيمة الانتقال الحاصل في منتصف البلاطة، أما المحور الشاقولي فيمثل الحمولة الحديدية. حيث يبين الشكل أن زيادة عدد الطبقات أدى إلى زيادة في الحمولة الحديدية، بالإضافة إلى تخفيض في الانتقال عند نفس القوة.



الشكل (30-3): مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح الـ FRP بعدد مختلف من الطبقات باستخدام برنامج (Abaqus ver 6.12)

يبين الشكل (31-3) العلاقة بين نسبة القوة الحديدية للبلاطة المقواة (P_{FRP}) إلى القوة الحديدية للبلاطة غير المقواة (P_0) وسماكة شرائح الـ FRP، حيث يبين الشكل (31-3) أن استخدام شرائح FRP لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت سماكة الشرائح أكبر، كما أن هذه العلاقة شبه خطية، ذلك أن تصرف مادة الـ FRP خطي مرن حتى الانهيار.



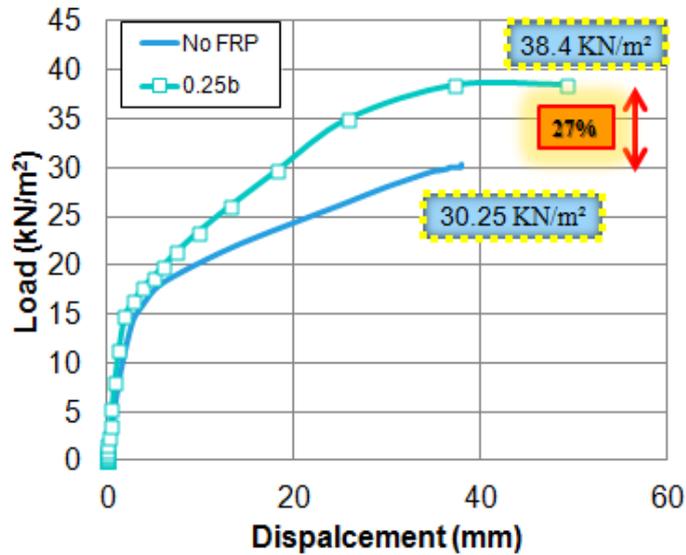
الشكل (31-3): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المقواة مع تغيير سماكة شرائح الـ FRP (ABAQUS-Ver6.12)

7.3 أثر التغيير في عرض شرائح الـ FRP

تم تغيير عرض شرائح الـ FRP للبلابة المقواة المبينة بالشكل (3-10)، ودراسة أثر التغيير على حمولة الانهيار في البلابة البيتونية المسلحة، حيث تم تثبيت سماكة الشرائح 1.16 mm وعدد الشرائح في كل اتجاه بثلاث شرائح.

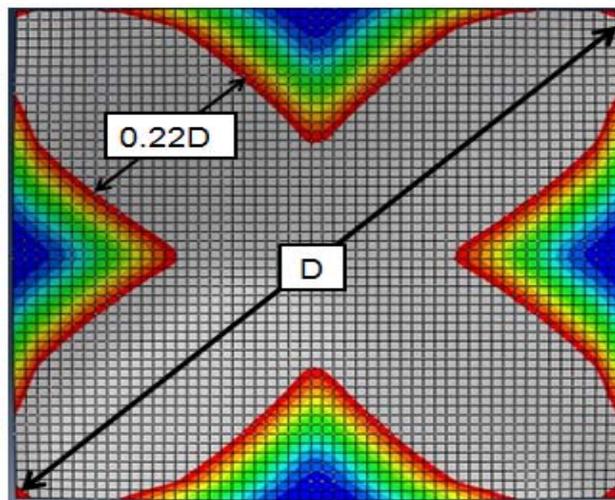
• **$b_f=100 \text{ mm}$**

يوضح الشكل (3-32) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلابة - الحمولة الحديدية للبلابة بدون تقوية وللبلابة مع تقوية بشرائح الـ FRP بعرض $0.25b=100 \text{ mm}$ حيث $b=400 \text{ mm}$ عرض الشرائح في تجربة (Mosallam and Mosalam;2003) حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلابة نتيجة التقوية 27%.



الشكل (3-32): مقارنة النتائج لنموذج البلابة المقواة بشرائح بعرض 100 mm والبلابة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS) (6.12)

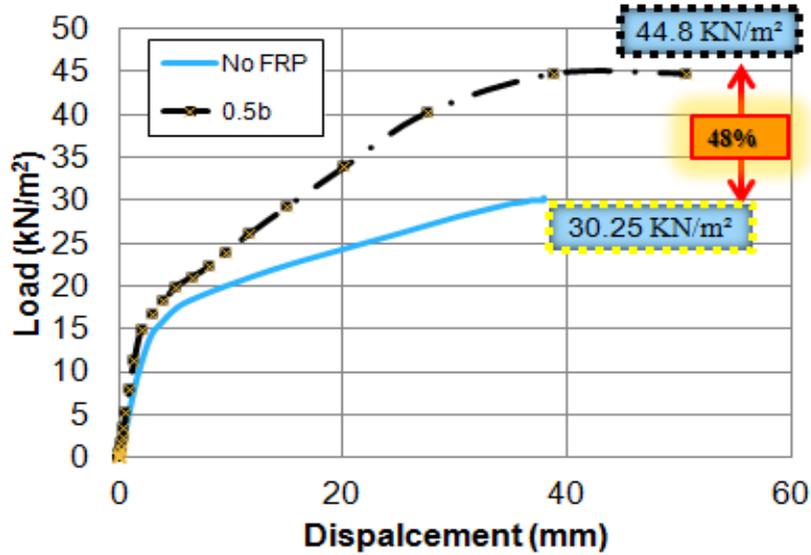
يبين الشكل (3-33) شكل خطوط الانكسار في البلابة البيتونية المقواة بشرائح الـ FRP بعرض 100 mm ، ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلابة ($0.22D$).



الشكل (3-33): آلية الانهيار في البلابة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 100 mm (ABAQUS 6.12)

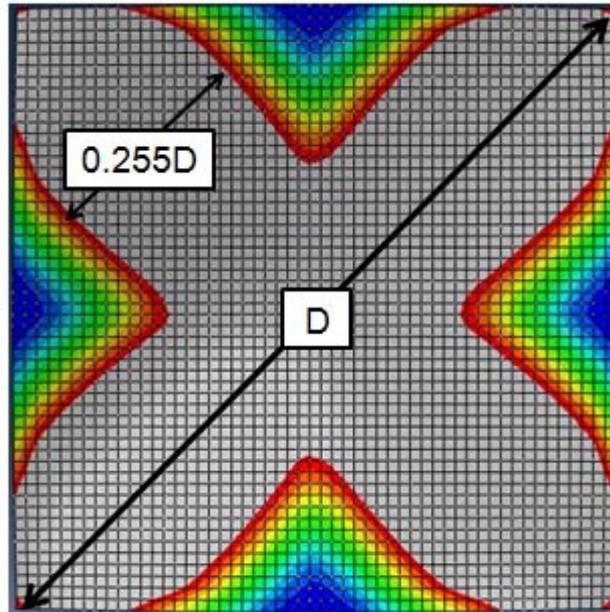
• $b_f=200\text{ mm}$

يوضح الشكل (34-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة - الحمولة الحديدية لبلاطة بدون تقوية وللبلاطة مع تقوية بشرائح الـ FRP بعرض $0.5b=1200\text{ mm}$ حيث $b=400\text{ mm}$ عرض الشرائح في تجربة (Mosallam and Mosallam;2003) حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلاطة نتيجة التقوية 48% .



الشكل (34-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح بعرض 200 mm والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

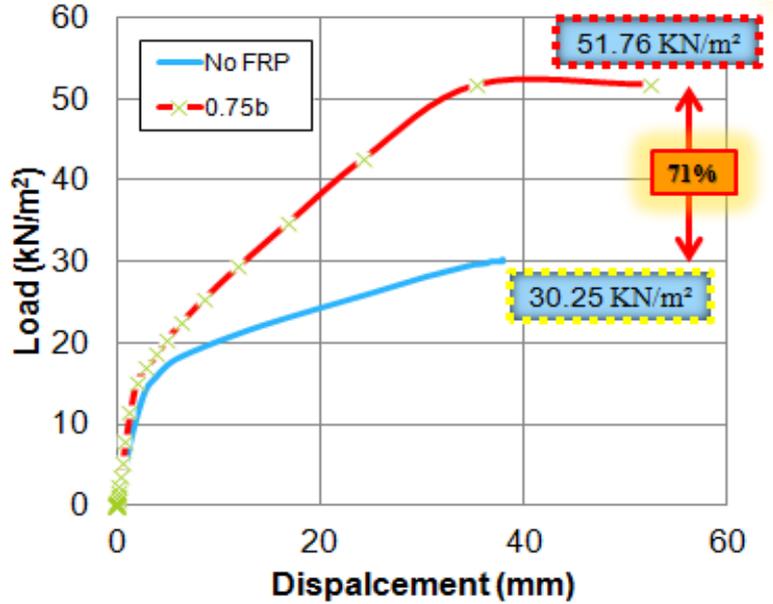
يبين الشكل (35-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ FRP بعرض 200 mm ، ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة ($0.255D$).



الشكل (35-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 200 mm (ABAQUS 6.12)

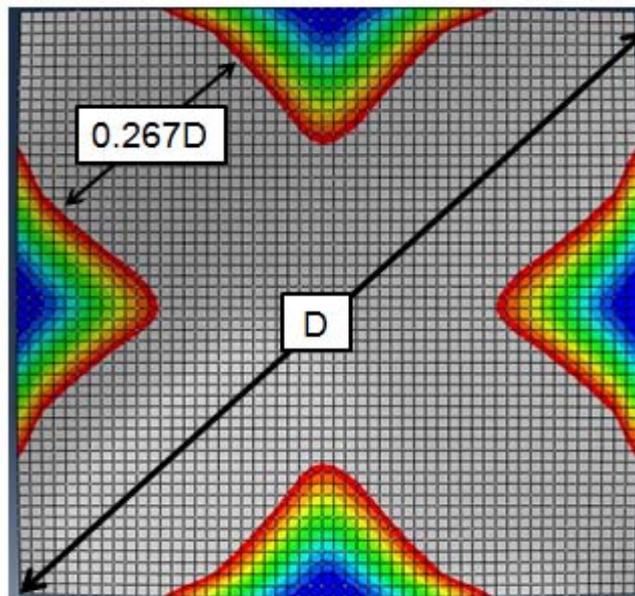
• $b_f=300\text{ mm}$

يوضح الشكل (36-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة - الحمولة الحديدية لبلاطة بدون تقوية وللبلاطة مع تقوية بشرائح الـ FRP بعرض $0.75b=300\text{ mm}$ حيث $b=400\text{ mm}$ عرض الشرائح في تجربة (Mosallam and Mosalam;2003) حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحديدية للبلاطة نتيجة التقوية % 71 .



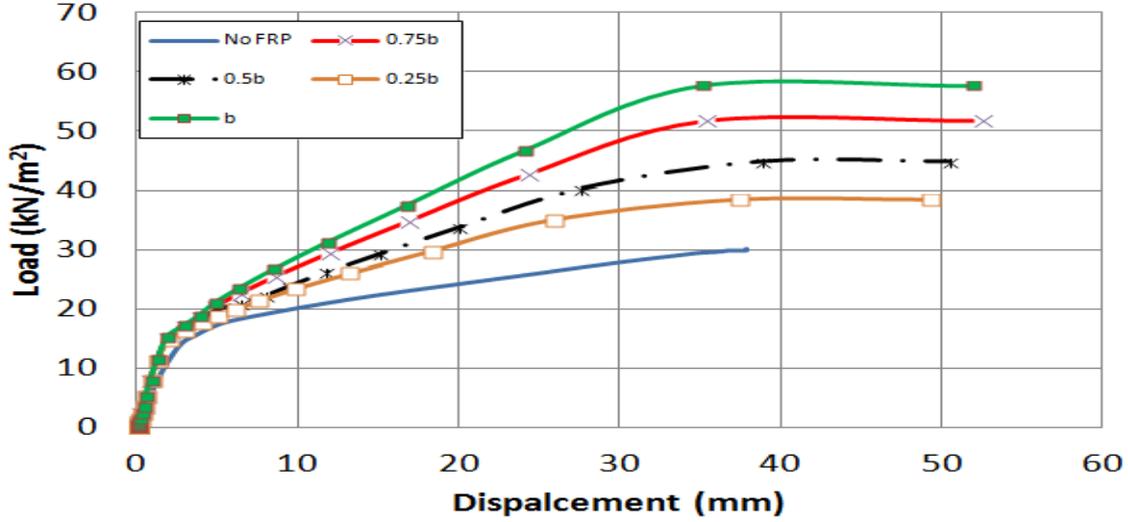
الشكل (36-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح بعرض 300 mm والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (37-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ FRP بعرض 300 mm ، ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة ($0.267D$).



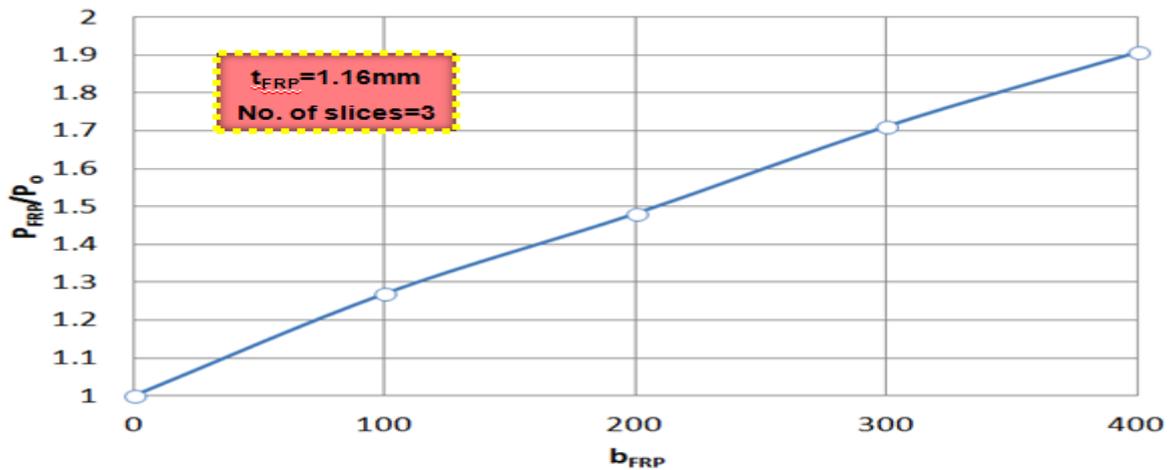
الشكل (37-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بعرض 300 mm (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (38-3) مقارنة بين النماذج المدروسة بعرض مختلف للشرائح ، حيث b هي عرض الشرائح (400mm) كما تجربة (Mosallam and Mosalam;2003). يمثل المحور الأفقي في الشكل قيمة الانتقال الحاصل أما المحور الشاقولي فيمثل الحمولة الحديدية. حيث يبين الشكل أن زيادة عرض الشرائح أدى إلى زيادة في الحمولة الحديدية، بالإضافة إلى تخفيض في الانتقال عند نفس القوة.



الشكل (38-3): مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح الـ FRP بعرض مختلف للشرائح باستخدام برنامج (Abaqus ver 6.12)

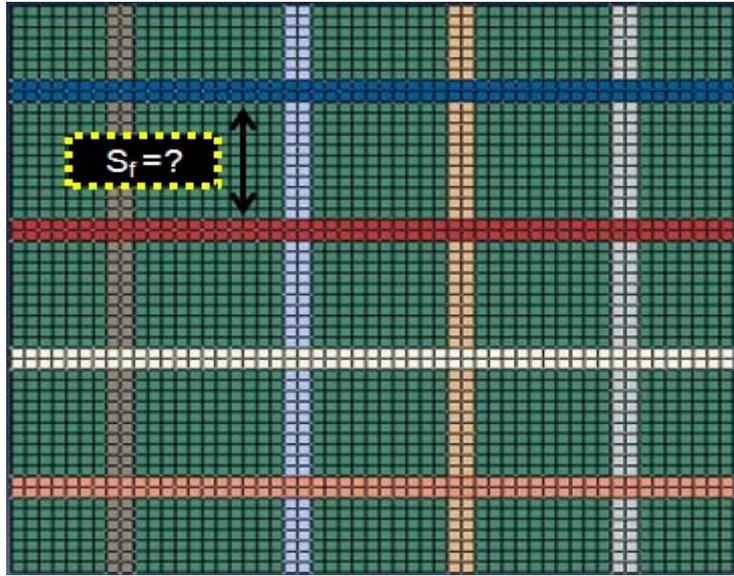
يبين الشكل (39-3) العلاقة بين نسبة القوة الحديدية للبلاطة المقواة (P_{FRP}) إلى القوة الحديدية للبلاطة غير المقواة (P_0) مع عرض شرائح الـ FRP، حيث يبين الشكل (39-3) أن استخدام شرائح FRP لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كان عرض الشرائح أكبر، كما أن هذه العلاقة شبه خطية، ذلك أن تصرف مادة الـ FRP خطي مرن حتى الانهيار.



الشكل (39-3): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلاطة المقواة مع تغيير عرض شرائح الـ FRP (ABAQUS-Ver6.12)

8.3 أثر التغيير في التباعد بين شرائح الـ FRP (عدد الشرائح)

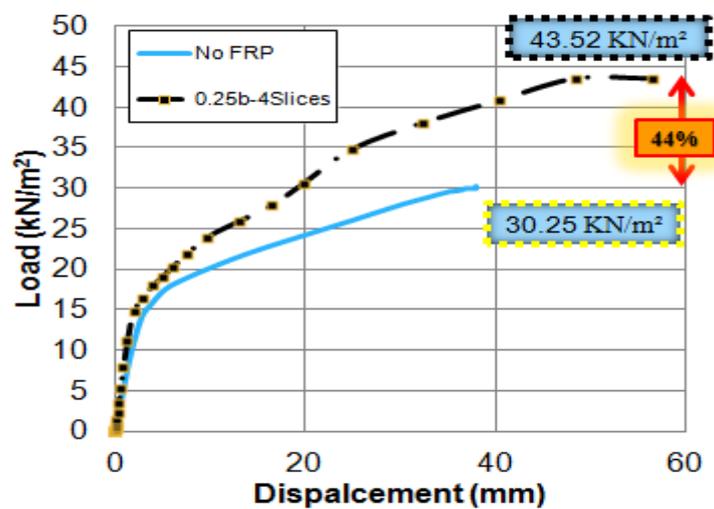
تم تغيير التباعد S_f بين شرائح الـ FRP المستخدمة في تقوية البلاطة البيتونية (الشكل 3-40)، أو بطريقة أخرى تم تغيير عدد شرائح الـ FRP المستخدمة، وذلك لشرائح الـ FRP بعرض $0.25b$ (100mm) و سماكة طبقتين من الـ FRP أي سماكة إجمالية 1.16mm لكل شريحة ودراسة أثر التغيير على حمولة الانهيار.



الشكل (3-40): نموذج البلاطة المدروسة المقواة بشرائح الـ FRP بتباعد مختلف بين الشرائح (ABAQUS-Ver6.12)

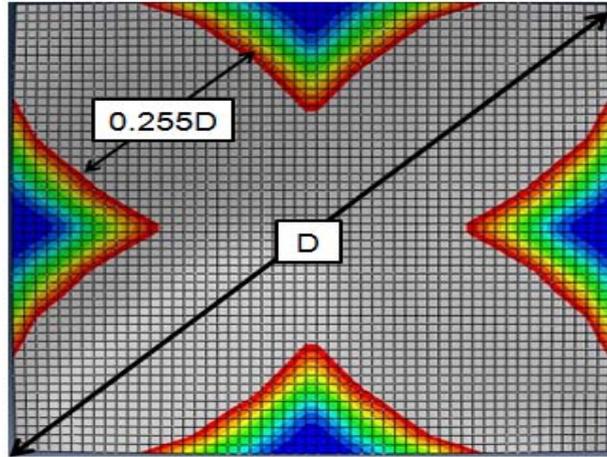
• الفراغ بين شرائح الـ FRP $S_f=500\text{mm}$

يوضح الشكل (3-41) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحدية لبلاطة بدون تقوية وللبلاطة مع تقوية بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_f=500\text{mm}$ ، حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحدية للبلاطة نتيجة التقوية 44% .



الشكل (3-41): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ FRP بفراغ بين الشرائح $S_f=500\text{mm}$ والبلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

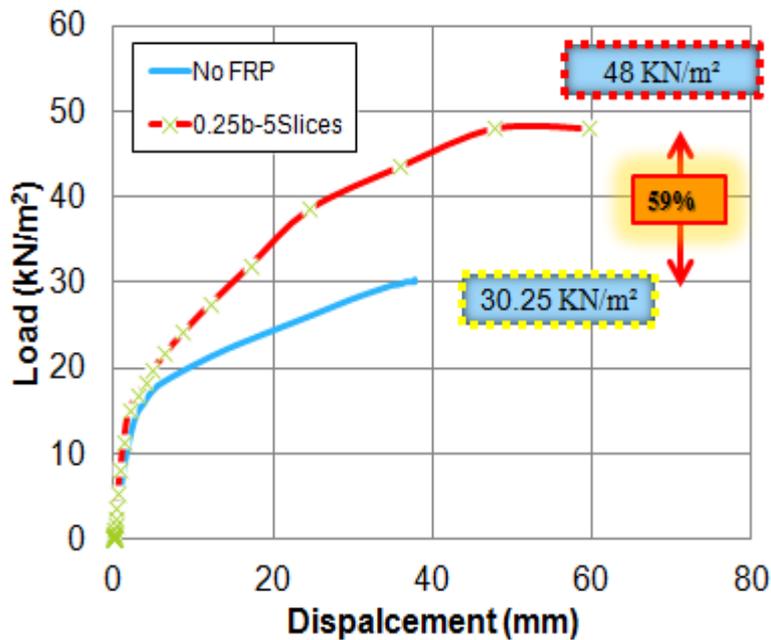
يبين الشكل (42-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=500$ mm ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة ($0.255D$).



الشكل (42-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=500$ mm (ABAQUS) (6.12)

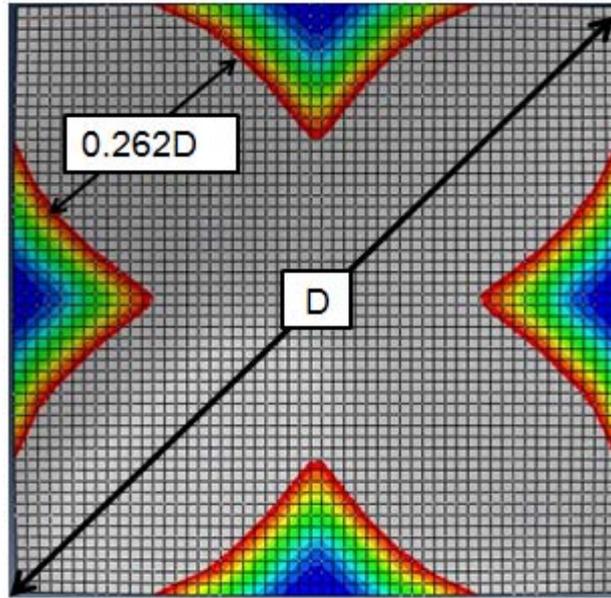
• الفراغ بين شرائح الـ *FRP* $S_f=350$ mm

يوضح الشكل (43-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحدية لبلاطة بدون تقوية وللبلابة مع تقوية بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=350$ mm، حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحدية للبلابة نتيجة التقوية 59 % .



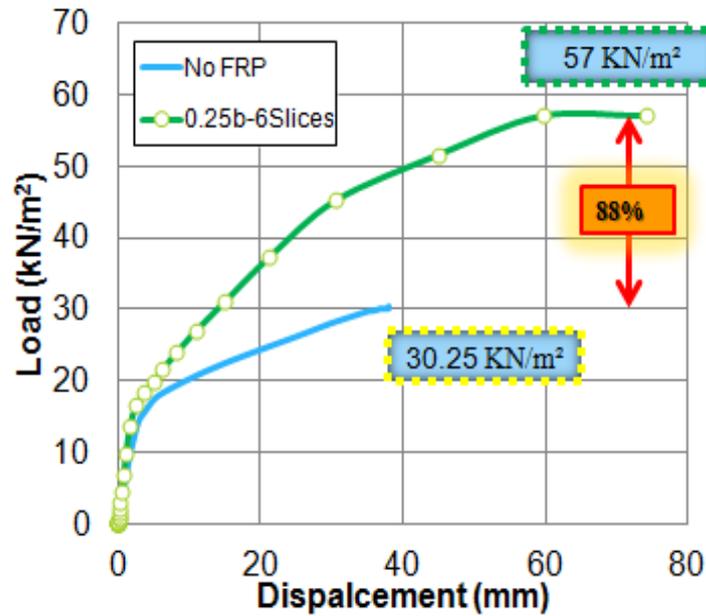
الشكل (43-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=350$ mm و البلاطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (44-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=350$ mm ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة (0.262D).



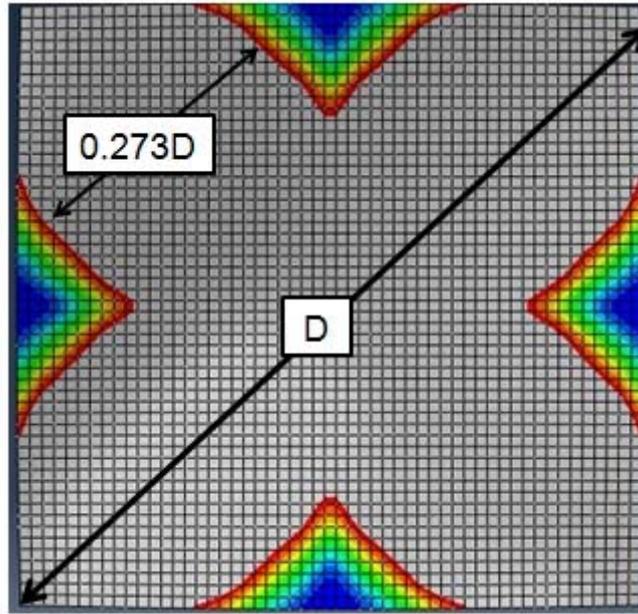
الشكل (44-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=350$ mm (ABAQUS) (6.12)

• الفراغ بين شرائح الـ *FRP* $S_f=250$ mm يوضح الشكل (45-3) علاقة الانتقال لنقطة منتصف البلاطة – الحمولة الحدية لبلاطة بدون تقوية وللبلطة مع تقوية بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=250$ mm، حيث كانت نسبة الزيادة في الحمولة الحدية للبلطة نتيجة التقوية 88 %.



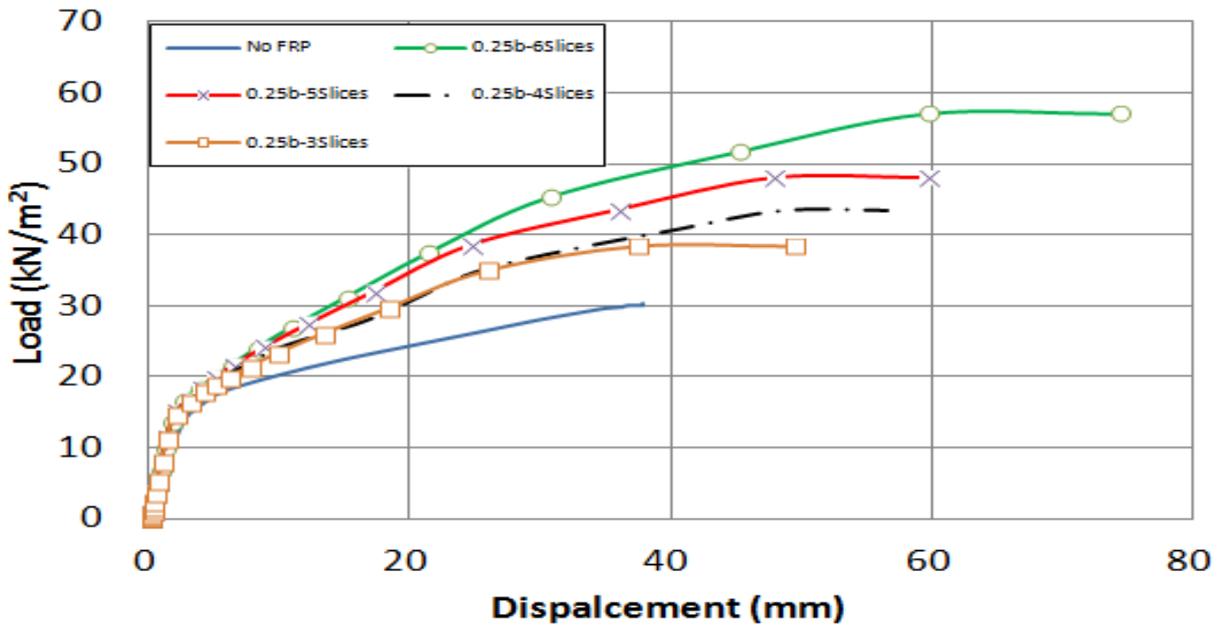
الشكل (45-3): مقارنة النتائج لنموذج البلاطة المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=250$ mm والبلطة غير المقواة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.12)

يبين الشكل (46-3) شكل خطوط الانكسار في البلاطة البيتونية المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=250$ mm ويوضح عرض منطقة التلدن الحاصلة في البلاطة (0.273D).



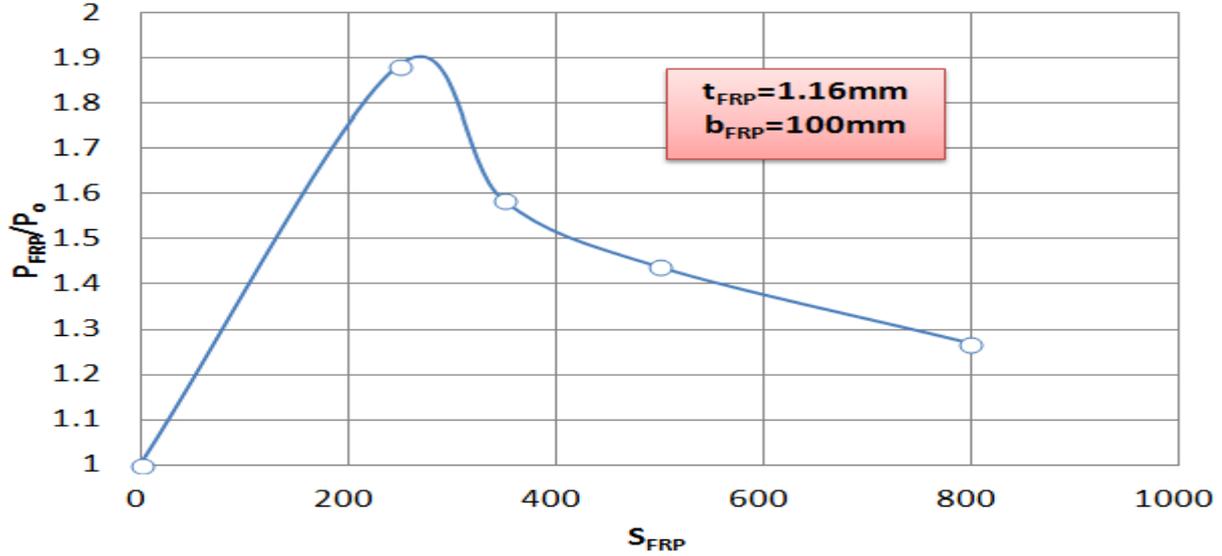
الشكل (46-3): آلية الانهيار في البلاطة البيتونية المسلحة المقواة بشرائح الـ *FRP* بفراغ بين الشرائح $S_f=250$ mm (ABAQUS) (6.12)

يبين الشكل (47-3) مقارنة بين النماذج المدروسة بعدد مختلف للشرائح. يمثل المحور الأفقي في الشكل قيمة الانتقال الحاصل أما المحور الشاقولي فيمثل الحمولة الحدية. حيث يبين الشكل أن زيادة التباعد بين الشرائح أدى إلى انخفاض في الحمولة الحدية، بالإضافة إلى زيادة في الانتقال عند نفس القوة.



الشكل (47-3): مقارنة بين النتائج لنموذج البلاطة المدروسة المقواة باستخدام شرائح الـ *FRP* بعدد مختلف للشرائح باستخدام برنامج (Abaqus ver 6.12)

يبين الشكل (48-3) تأثير تغيير التباعد بين شرائح الـ FRP على الحمولة الحدية للانهياب. حيث المحور الأفقي يمثل التباعد بين الشرائح S_{FRP} والمحور الشاقولي نسبة القوة الحدية للبلاطة المقواة (P_{FRP}) إلى القوة الحدية للبلاطة غير المقواة (P_0). يمكن من الشكل (48-3) استنتاج أن استخدام شرائح FRP لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت التباعد بين الشرائح أصغر.



الشكل (48-3): علاقة تغيير الحمولة الحدية للبلاطة المقواة مع تغيير عرض شرائح الـ FRP (ABAQUS-Ver6.12)

9.3 العلاقة بين متغيرات شريحة الـ FRP والقوة الحدية

تم إيجاد معامل ($a_s n_f t_f E_f S_s n_f / S_f E_s a_s$) مؤلف من البارامترات التي تم تغييرها في الدراسة الحالية، حيث عند قيمة ثابتة لهذا المعامل سوف نحصل على قيمة محددة لقدرة تحمل البلاطة على الانهياب .
حيث :

t_f : سماكة شريحة الـ FRP

b_f : عرض شريحة الـ FRP

S_f : الفراغ بين شرائح الـ FRP

S_s : التباعد بين قضبان التسليح

a_s : مساحة قضيب التسليح

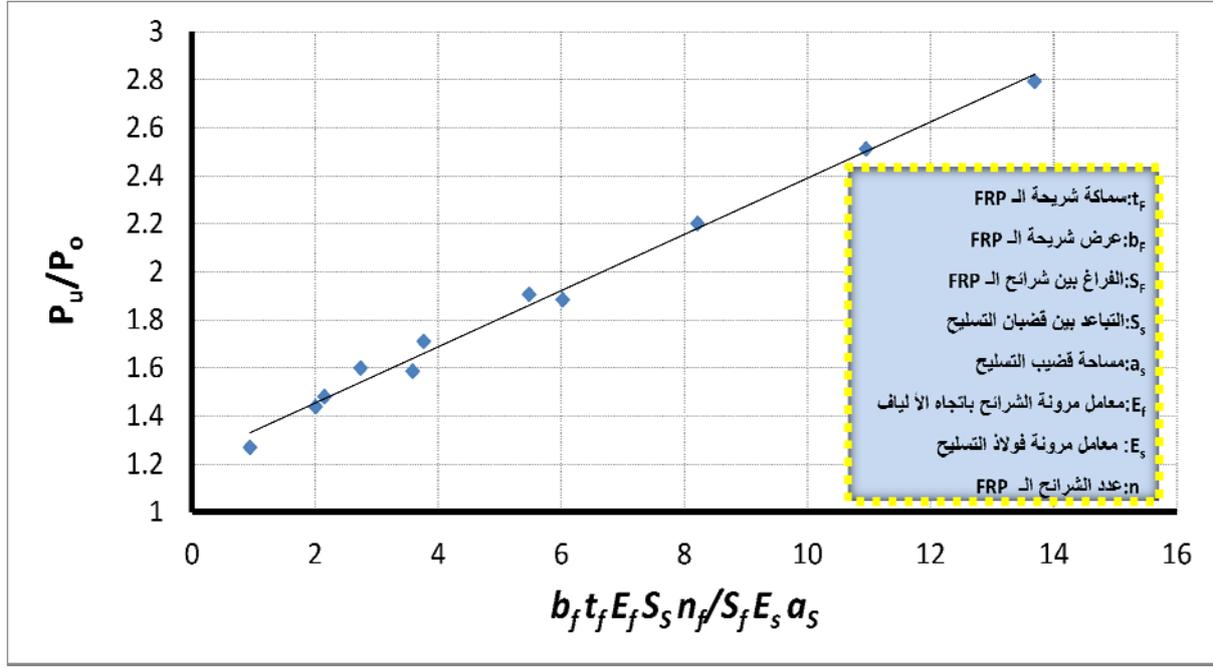
E_f : معامل مرونة الـ FRP باتجاه الألياف

E_s : معامل مرونة فولاذ التسليح

n : عدد الشرائح الـ FRP

يبين الشكل (49-3) 11 نموذجاً تحليلياً عددياً، حيث يظهر تأثير تغيير مساحة وتباعد شرائح الـ FRP الحمولة الحدية للانهياب. حيث المحور الأفقي يمثل مساحة شرائح الـ FRP منسوبة إلى مساحة التسليح في المتر الطولي (المعامل

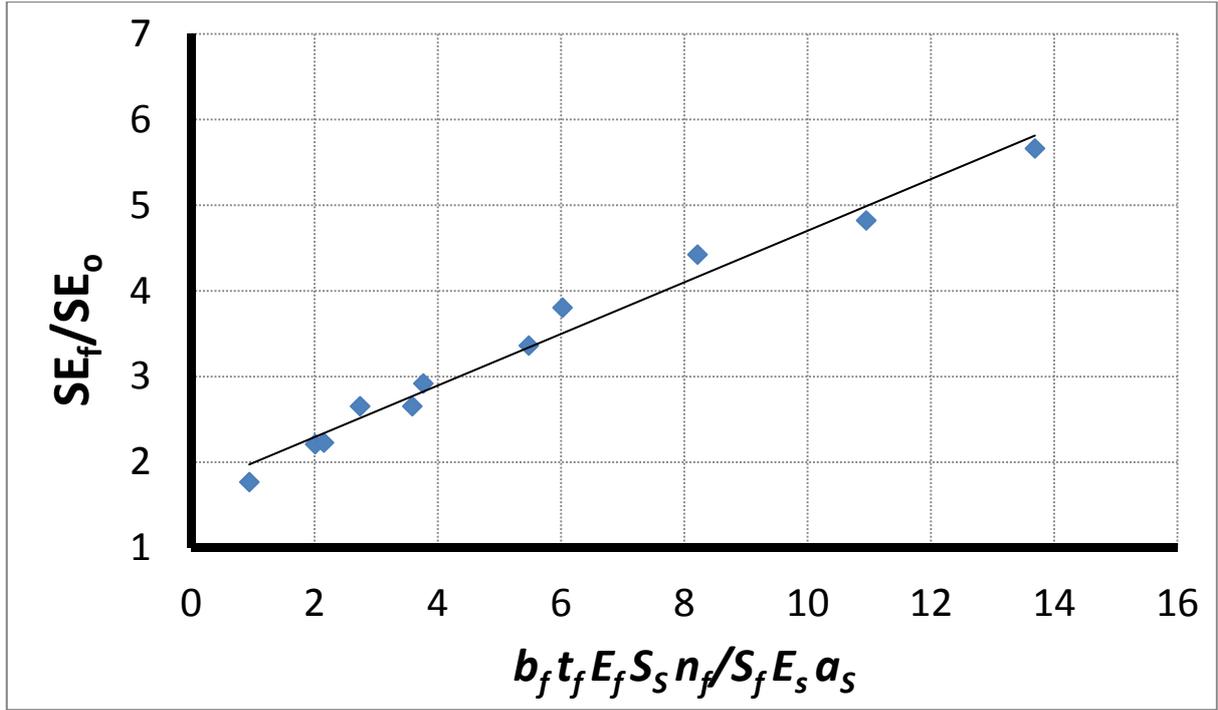
المحور الشاقولي نسبة القوة الحديدية للبلطة المقواة (P_u) إلى القوة الحديدية للبلطة غير المقواة (P_o). يبين الشكل (3-49) أن استخدام شرائح FRP لتقوية البلطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت نسبة مساحة الشرائح إلى مساحة حديد التسليح في المتر الطولي أكبر وذلك بميل ثابت يساوي إلى (0.125).



الشكل (3-49): علاقة تغيير الحمولة الحديدية للبلطة المقواة مع تغيير مساحة وتباعد شرائح FRP (ABAQUS-Ver6.12)

تم أيضا جمع النتائج التي تم الحصول عليها من الدراسة التحليلية للطاقة الكامنة الداخلية (Strain Energy) وذلك لـ 11 نموذجا في مخطط واحد لإيجاد تأثير تغيير البارامترات في البلطة المقواة المتغيرة على الطاقة الكامنة المتبقية .

يبين الشكل (3-50) تأثير تغيير مساحة وتباعد شرائح الـ FRP على الطاقة الكامنة الداخلية (اللدنة). حيث المحور الأفقي يمثل مساحة شرائح الـ FRP منسوبة إلى مساحة التسليح في المتر الطولي ($b_f t_f E_f S_s n_f / S_f E_s a_s$) والمحور الشاقولي نسبة الطاقة الكامنة الداخلية للبلطة المقواة (SE_f) إلى الطاقة الكامنة الداخلية للبلطة غير المقواة (SE_o). يظهر من الشكل (3-50) أن استخدام شرائح FRP لتقوية البلطة البيتونية المسلحة يزيد الطاقة الكامنة الداخلية كلما كانت نسبة مساحة الشرائح إلى مساحة حديد التسليح في المتر الطولي أكبر. مما يدل على ازدياد المطاوعة باستعمال الـ FRP، وإن هذه المطاوعة ترتبط خطياً بالمعامل ($b_f t_f E_f S_s n_f / S_f E_s a_s$). وذلك بميل ثابت يساوي إلى (0.3).



الشكل (50-3): علاقة تغيير الطاقة الداخلية للبلاطة المقواة مع تغيير مساحة وتباعد شرائح الـ FRP (ABAQUS-Ver6.12)

يبين الجدول (1-3) تلخيصاً للأشكال (49-3) و (50-3) والتي تستعرض النتائج التي تم التوصل إليها . حيث:

$P_{u max}$ حمولة الانهيار للبلاطة المقواة بـ FRP.

$P_{u o max}$ حمولة الانهيار للبلاطة غير المقواة.

S_E الطاقة الكامنة للبلاطة المقواة.

S_{Eo} الطاقة الكامنة للبلاطة غير المقواة.

الجدول (1-3): تلخيص النتائج التي تم الحصول عليها (الدراسة الحالية)

$\frac{S_E}{S_{Eo}}$	$\frac{P_{u max}}{P_{u o max}}$	عرض منطقة التلدن	S_E (KN.m)	$P_{u max}$ (KN/m ²)	عدد شرائح الـ FRP المستخدمة	أبعاد شرائح الـ FRP (mm)			أبعاد البلاطة البيتونية المسلحة (mm)		
						S_f	t_f	b_f	t	b	L
1	1	0.18 D	1.13	30.25	0	0	0	76.2	2640	2640	
3.36	1.908	0.27 D	3.79	57.7	3	550	1.16	400	76.2	2640	2640

2.65	1.6	0.26 D	3	48.4	3	550	0.58	400	76.2	2640	2640
4.42	2.202	0.275 D	5	66.6	3	550	1.74	400	76.2	2640	2640
4.82	2.51	0.28 D	5.45	75.96	3	550	2.32	400	76.2	2640	2640
5.66	2.79	0.282 D	6.4	84.48	3	550	2.9	400	76.2	2640	2640
1.77	1.269	0.22 D	2	38.4	3	800	1.16	100	76.2	2640	2640
2.23	1.48	0.255 D	2.52	44.8	3	700	1.16	200	76.2	2640	2640
2.92	1.71	0.267 D	3.3	51.76	3	600	1.16	300	76.2	2640	2640
2.21	1.438	0.255 D	2.5	43.52	4	500	1.16	100	76.2	2640	2640
2.65	1.586	0.262 D	3	48	5	350	1.16	100	76.2	2640	2640
3.8	1.88	0.273 D	4.3	57	6	250	1.16	100	76.2	2640	2640

10.3 ملخص الفصل الثالث

تم في هذا الفصل توصيف النموذج المعتمد في التحليل، ثم خطوات التحليل الانشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وأخيرا تم شرح نتائج الدراسة التحليلية التي تبين فعالية استخدام شرائح الـ *FRP* في رفع قدرة تحمل البلاطة وتخفيض السهم الحاصل بعد دراسة، حيث تم تغيير عدة برامترات لشرائح الـ *FRP*، فعند تغيير عدد طبقات شرائح الـ *FRP* تبين أن زيادة عدد الطبقات أدى إلى زيادة في الحمولة الحدية بالإضافة إلى تخفيض في الانتقال عند نفس القوة، وعند تغيير عرض شرائح الـ *FRP* تبين أن زيادة عرض الشرائح أدى إلى زيادة في الحمولة الحدية بالإضافة إلى تخفيض في الانتقال عند نفس القوة، كما تبين نتيجة دراسة تغيير التباعد بين الشرائح، أن استخدام شرائح *FRP* لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت التباعد بين الشرائح أصغر.

تمّ استعراض النتائج ورسم المنحنيات التي تمّ الحصول عليها نتيجة هذه الدراسة وذلك لإحدى عشر نموذج تتغير فيها بارمترات شرائح التقوية ومقارنة النتائج مع دراسة مرجعية تجريبية. وفي نهاية هذا الفصل تم استنتاج معامل $(b_f t_f E_f S_s n_f / S_f E_s a_s)$ يؤثر على قدرة تحمل البلاطة بعد التقوية، وإن العلاقة بين هذا المعامل وقدرة تحمل البلاطة المقواة منسوبة لقدرة تحمل البلاطة غير المقواة خطية. كما تم دراسة تأثير استخدام الـ *FRP* على تغير الطاقة الداخلية المتبقية (اللينة)، حيث تبين ازدياد المطاوعة باستعمال الـ *FRP*، وإن هذه المطاوعة ترتبط خطياً بالمعامل $(b_f t_f E_f S_s n_f / S_f E_s a_s)$.

الفصل الرابع النتائج والتوصيات

Conclusion and Recommendation

1.4 النتائج

تم في هذه البحث دراسة أثر إضافة شرائح الـ *FRP* على رفع قدرة تحمل البلاطات البيتونية المصمتة تحت تأثير الأحمال الشاقولية الموزعة بانتظام، ودراسة أثر إضافة هذه الشرائح على المطاوعة. حيث تم إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (*Finite Element Method*) واعتماد التحليل اللاخطي والذي يأخذ بعين الاعتبار لاختية المادة (*MNLA, Materially Non-Linear Analysis*). كما تمت دراسة أثر التماسك (*bond*) بين البيتون وشرائح الـ *FRP* وأثر تغيير المواصفات البعدية لشريحة الـ *FRP* على رفع مقاومة البلاطة.

كما تمت مقارنة هذه الدراسة مع دراسة مرجعية تجريبية للتأكد من صحة النتائج التي تم الحصول عليها. في نهاية هذا البحث تم استنتاج ما يلي:

1. أدت التقوية باستعمال شرائح الـ *FRP* إلى رفع قدرة تحمل البلاطة البيتونية المسلحة حيث وصلت نسبة الزيادة في هذا البحث إلى 180%، وتغير هذه المقاومة مع تغير الخصائص البعدية لشريحة الـ *FRP*.
2. أدت التقوية إلى انخفاض سهم البلاطة البيتونية المسلحة وبالتالي زيادة القساوة، كما ارتبطت نسبة التخفيض بالخصائص البعدية لشريحة الـ *FRP*، حيث يؤدي الـ *FRP* دوراً كزيادة فولاذ التسليح كما أنه يؤدي إلى تأخر الشقوق وبالتالي زيادة عطالة المقطع المتشقق.
3. إن استخدام شرائح *FRP* لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت سماكة الشرائح أكبر، كما أن العلاقة العكسية بين نسبة القوة الحدية للبلاطة المقواة (P_{FRP}) إلى القوة الحدية للبلاطة غير المقواة (P_0) وسماكة شرائح الـ *FRP* شبه خطية، حيث أن تصرف مادة الـ *FRP* خطي مرن حتى الانهيار.
4. إن استخدام شرائح *FRP* لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كان عرض الشرائح أكبر، كما أن العلاقة العكسية بين نسبة القوة الحدية للبلاطة المقواة (P_{FRP}) إلى القوة الحدية للبلاطة غير المقواة (P_0) و عرض شرائح الـ *FRP* شبه خطية.

5. إن استخدام شرائح *FRP* لتقوية البلاطة البيتونية المسلحة يعطي فعالية أكبر كلما كانت التباعد بين الشرائح أصغر.

6. تم في هذا البحث إيجاد معامل يؤثر على قدرة تحمل البلاطة بعد التقوية، ويعطى هذا المعامل بالشكل $(b_f t_f E_f S_S n_f / S_f E_s a_s)$ ، وإن العلاقة بين هذا المعامل وقدرة تحمل البلاطة المقواة منسوبة لقدرة تحمل البلاطة غير المقواة خطية وبميل ثابت (0.125).

7. أدى استخدام الـ *FRP* إلى زيادة في الطاقة الداخلية المتبقية (اللدنة)، الأمر الذي يدل على ازدياد المطاوعة باستعمال الـ *FRP*، وإن هذه المطاوعة ترتبط خطياً بالمعامل $(b_f t_f E_f S_S n_f / S_f E_s a_s)$ وبميل ثابت (0.3). إن هذه المطاوعة بدت واضحة وذلك بالحصول على عرض تلدن أكبر لخطوط الانكسار عند استخدام الـ *FRP* وهو الأمر الذي أدى لزيادة في المقاومة أيضاً.

2.4 التوصيات لأعمال مستقبلية

من أجل أعمال مستقبلية في نفس الموضوع يوصى بما يلي:

1. إعادة الدراسة على بلاطات مستطيلة ودراسة تأثير تغيير نسبة بعدي البلاطة على عملية التقوية.

2. دراسة أثر تغيير شروط الاستناد على عملية التقوية.

المراجع References

- ABAQUS, Version 6.12 ,(2012). “**ABAQUS/Standard User's Manual**” , ABAQUS Inc, USA.
- Baghpour.Salar, (2012). “**Fiber Reinforced Polyester Composite**”. *Chapter 6, Licenses in Tech Creative commons Attribution License* (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>).
- Batikha M. (2008). “**Strengthening of thin metallic Cylindrical shells using fiber reinforced polymers**”, *Ph. D. Thesis*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Borri A., Corradi M. and Grazini A. (2005). “**A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials**”. *Composites: Part B*, 36, pp 143-153.
- BS-EN 1-1-1992 (2004). **Eurocode2 -Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**, Brussels:CEN.
- CEB-FIP.(2001), “**Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**”.*Fib Bulletin 14: fib Technical Report in spring 2001 by fib Task Group 9.3 FRP(Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures and the Chairman of Commission 9.*
- Concrete Society (2004). “**Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials**”, *Technical Report 55*, Camberley, UK.
- Enochsson O., Lundqvist J., Taljsten B., Rusinowski P. and Olofsson T. (2007). “**CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs –An experimental and numerical study**”.*Construction and Building Materials*, 21, PP 810–826.
- Foraboschi P. (2004). “**Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips**”. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No.3, PP 191-202.
- FYFE COMPANY PROFILE (2008). TYFO® FIBRWRAP® SYSTEMS, 8380 Miralani Drive, Suite A, San Diego, CA 92126, Available at: <http://www.fyfeco.com/projects/pdf/chambers-hotel.pdf>
<http://www.fyfeco.com/projects/pdf/encore->

hotel.pdfhttp://www.fyfeco.com/projects/pdf/central-avenue-bridge.pdf
(Accessed: 03-May-2013).

- Kennedy G. and Goodchild C. (2003). "**Practical yield line design**". *British Cement Association*, UK.
- Kmiecik P. and Kaminski M. (2011). "**Modeling of Reinforced Concrete Structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration**", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, XI(3), 624-636.
- Limam O., Foret G. and Ehrlacher A. (2003). "**RC two-way slabs strengthened with CFRP strips: experimental study and a limit analysis approach**". *Composite Structures*, 60, PP 467-471 .
- Macginley T. J. and CHOO B. S. (2003). "**Reinforced Concrete Design Theory and Example Second edition**". *Taylor & Francis*, London.
- Manzor S. and Ahmad S. (2013). "**Ccharacteristics of grade 60 and grade 72.5 re-bars in Pakistan**", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, pp-667-673.
- Mosallam A. S. and Mosalam K. M. (2003). "**Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates**". *Construction and Building Materials*, 17, pp 43-54.
- Mosley W. H. and Bungey J. H. (1987). "**Reinforced concrete design**". *MacMillan Education Ltd*, Third Edition, London.
- Reddy J.N , (1997). "**Mechanics of laminated composite plates**". *CRC press, New York*.
- Seim W., Ho`rman M., Karbhari V. and Frieder Seible (2001). "**External FRP post strengthening of scaled concrete slab**". *Journal of Composites for Construction*, 2, pp 67-75.
- Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T. and Lam L. (2002). "**FRP Strengthened RC Structures**". *John Wiley and Sons*, Chichester, UK.
- Teng J.G., Smith S.T., Yao J. and Chen J.F. (2003). "**Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs**". *Construction and Building Materials*, 17, pp 447-462.

الشماس طارق (2012). "تقوية البلاطات البتونية المسلحة المصمتة ذات شروط الاستناد المختلفة باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)" رسالة ماجستير، جامعة دمشق، سوريا.

الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة (2004)، الطبعة الثالثة، دمشق 2004، منشورات نقابة المهندسين، سوريا.

Abstract

Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) has widely taken place to strengthen Reinforced-Concrete structures because FRP has many advantages: high strength to weight ratio, easily cut on site and easy to be used in difficult places compared to traditional rehabilitation methods.

This research aims to evaluate the effect of using FRP on strengthening RC solid slabs where many previous works confirm that FRP can provide both resistance and ductility to these slabs.

In this study, Finite Element Method (FEM) is performed using Materially Non-linear Analysis (MNA) to RC slabs with and without FRP retrofit material. On the other hand, bond between FRP and concrete surface is not ignored in this work.

This investigation shows that using FRP affects significantly the yield lines occurred in the RC slab. It is explored that the width of the yield line increase which explain the gain in both the resistance and ductility. Moreover, a relationship between dimensional properties of FRP and resistance is obtained at the end of this research.

Damascus University
Faculty of Civil Engineering
Department of Structural Engineering

**The failure of two-way solid slabs strengthened by Fiber Reinforced
Polymer (FRP)**

Thesis Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of
Science in structural Engineering

By

Kinda Al-Shammas

Supervisor

Dr Mustafa Batikha

Damascus 2014