دراسة التشوهات و أشكال الانهيار للأعمدة المدعمة بألياف الكربون[1]

المهندسة غادة العسراوي[2] الدكتور مأمون سمكري[3]

الملخص

تهدف الدراسة هذه إلى التعرف على التدعيم بواسطة ألياف الكربون و التعريف بهذه المواد لدراسة مدى فعاليتها في البيتون المحلي للتأكد من إمكانية استخدامها محلياً سواء لتقوية المنشآت القديمة أو الحديثة و مقارنة هذه الدراسة مع البحوث العالمية.

يتعرض البحث في البداية للدراسات و البحوث الحديثة المهتمة بتدعيم العناصر جميعاً (أعمدة،عقد اتصال الأعمدة مع الجوائز و الأساسات ....) بواسطة ألياف الكربون.

ثم يتم شرح الدراسة العملية التي تمت بإجراء تجارب على أعمدة مغلفة بألياف الكربون و دراسة التشوهات و أشكال الانهيار لها.

وأرفقت بالبحث الدراسة النظرية و العملية في المشروع حيث تم وضع المنحنيات النظرية و العملية فيه بشكل وافٍ للمساعدة في إتمام المفاهيم الواردة فيه و بلورتها.

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندسة غادة العسراوي بإشراف الدكتور مأمون سمكري.

[2] قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

[3] قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

1- مقدمة [introduction]:

تواجه هندسة البناء اليوم حاجة متزايدة لإجراء عمليات تدعيم وتقوية لمنشآت موجودة فعلاً من أجل الحول دون انهيارها، أو من أجل زيادة تحملها للحمولات المطبقة عليها، فمثلاً تحتاج كثير من الأبنية خلال مراحل استثمارها إلى تدعيم وتقوية بسبب تغير نظام خدمتها أو تضرر مواد بنائها نتيجة مرور الزمن أو الحرائق أو صدمات المركبات ،أو بسبب تعرضها لهزة أرضية أو عيوب طارئة في التربة.

فعلى سبيل المثال تتطلب أعمدة الجسور وركائزها التقوية لمقاومة الزلازل (إذا لم يكن تأثيرها مأخوذاً بالحسبان أثناء التصميم)، أو بسبب تغير وظيفة الجسر وزيادة الحمولات عليه، أو ازدياد الحجم المروري أو توضع آليات ثقيلة عليه، وأحياناً نضطر لإحداث تغيرات في الجملة الإنشائية للمبنى كإجراء فتحات في البلاطة أو إزالة بعض الجدران مما يستدعي تدعيم المنشأ في بعض عناصره.

لقد كان التوجه في الفترة الأخيرة نحو استخدام أساليب جديدة في التدعيم كالتدعيم بألياف الكربون حيث أصبح الآن من الممكن صناعة رابط من أجل تدعيم البيتون المسلح أوعناصر البناء الخشبية، و ذلك من خلال شرائح مقاومة للتآكل مصنوعة من بوليميرات مقواة بألياف الكربون أو ألياف زجاجية يربط بينها مادة لاصقة، ففي حال انهار ليف من هذه الشرائح فإن التمزق أو الشق الحاصل ليس بالضرورة أن يواصل امتداده كما يحصل في المواد المتجانسة، و إنما يمكن أن تبقى بقية الألياف مصونة وغير متأثرة بهذا الشق.

2- الهدف من البحث:

لقد قدمت العديد من البحوث و الدراسات في مجال التدعيم بواسطة ألياف الكربون وذلك من أجل تدعيم أغلب العناصر الإنشائية (أعمدة، جوائز، بلاطات، جدران، عقد اتصال الأعمدة مع الجوائز و الأساسات وإطارات .....)

و الهدف من هذا البحث هو التعرف على هذه المواد و التعريف بها لدراسة مدى فعاليتها في تدعيم الأعمدة المنفذة من البيتون المحلي للتأكد من إمكانية استخدامها محلياً سواء لتقوية المنشآت القديمة أو الحديثة و مقارنة هذه البحوث مع البحوث العالمية.

3- لمحة عن الطرق المستخدمة في تدعيم الأعمدة:

يهدف هذا البحث إلى دراسة تدعيم الأعمدة بواسطة الألياف الكربونية و لكن لضرورات المقارنة فإننا سنشرح بشكل مختصر الطرائق التقليدية المستخدمة في التدعيم حيث توجد طرائق مختلفة تتبع لنوع المنشأة سواء (بيتونية، فولاذية خشبية، حجرية.....) منها:

1- استبدال الجزء التالف: و ذلك في حالة وجود نقاط ضعف في البيتون (تعشيش مثلاً) فيتم استبدال البيتون الموجود في هذه المناطق.

2- تدعيم الأعمدة بزوايا معدنية: حيث يتم في هذه الطريقة ربط الزوايا الشاقولية بصفائح ربط أفقية عريضة.

3- تدعيم الأعمدة بقميص فولاذي من الصفائح: غالباً ما تستخدم في حالة الأعمدة الدائرية حيث تثبت شرائح أسطوانية معدنية إلى بعضها البعض بواسطة اللحام وإلى العمود بواسطة أسافين ولمراعاة العمل المشترك بينها وبين العمود يتم حقن الفراغ بواسطة الإيبوكسي.

4- تدعيم الأعمدة بعناصر فولاذية صلبة: يتم في هذه الطريقة استبدال الزوايا المعدنية الشاقولية بعناصر فولاذية أكثر صلابة مثل الأنابيب أو المقاطع المربعة المفرغة أو بشكل I، وغالباً ما تستخدم في العناصر الطويلة والتي لا تسبب زيادة مقطعها إلى إساءة معمارية.

5- القميص البيتوني: و ذلك بتغليف العمود بطبقة جديدة من البيتون المسلح.

نلاحظ في جميع الطرائق السابقة أن مقاطع العناصر سوف تزداد بشكل ملحوظ مما يؤدي إلى إنقاص المساحات الداخلية وتشوه التصميم المعماري، كما نرى أن هذه الطرائق تحتاج إلى يد عاملة خبيرة وبعدد كبير وتحتاج إلى أدوات ومعدات ثقيلة و مكلفة، فضلاً عن أن العناصر المعدنية ذات أطوال محددة لذلك فقد تشكل نقاط الوصل نقاط ضعف فيها. لذلك كان أمام هندسة البناء خيار آخر وهو استخدام الألياف الكربونية مع الرابط الإيبوكسي في عمليات التدعيم لعدم تماشي طرائق التدعيم التقليدية مع جميع الحالات التي يواجهها المهندس.

4- مجال استخدام الألياف الكربونية [Carbon Fibers]:

تستخدم الألياف الكربونية في تدعيم عناصر الجسور جميعاً – المباني العادية– جدران القص– خزانات الماء– الصوامع– أنفاق (طرقات– صحية).

5- ميزات الألياف الكربونية ومواصفاته:

5-1 ميزات المادة:

إن سهولة تركيب هذه المادة يجعل تنفيذها مع استمرار العمل بالمشروع ممكناً وهي لا تتطلب معدات ثقيلة كما أنه لا داعي لوصلها كونها موجودة بأطوال كبيرة، وهذه الميزات تجعلها في بعض الأحيان كافية لتكون حلاً اقتصادياً يغطي غلاء ثمنها.

لهذه المادة ديمومة كبيرة و مقاومة للتآكل و للتأثيرات الكيميائية و الأملاح و الأتربة و الصدأ وهي مادة ذات مقاومة عالية على الشد– ويمكن استخدامها تحت سطح الماء حيث لها أنواع مناسبة لكل حالة– مقاومتها للتغيرات الحرارية عالية وهي– عازلة– مقاومة للتعب– مقاومة للحرائق و لذلك تنفذ أحياناً على الأبواب ولا تتطلب قوالب (سقالة– هدم– حفر) ويمكن استخدامها في الأماكن الضيقة و الحرجة، كما يمكن استخدامها في تدعيم أعمدة الجسور دون إيقاف الحركة المرورية عليها، لها عوامل مرونة و مواصفات هندسية جيدة متوافرة بأبعاد (طول– عرض– سماكة) مختلفة، توجد ألياف باتجاه واحد أو باتجاهين ،ذات منظر جميل وصفائحها رقيقة لذا يمكن

استخدام أكثر من طبقة للتقوية، كما يمكن استخدام هذه المادة لتقوية العناصر البيتونية – الحديد– خشب– حجر.

5- 2 وصف الألياف الكربونية حسب تقرير إحدى الشركات الصانعة:

إن الصفائح الكربونية عبارة عن رقائق ذات لون أسود تركيبها مادة الأيبوكسي المسلحة بألياف كربونية بنسبة تزيد على 99%، ولها معامل مرونة E أكبر من $231000N \setminus mm^2$وتتحمل على الشد بقيمة دنيا عن $3650N \setminus mm^2$ ، وحد الانقطاع يزيد على $4100N \setminus mm^2$ مع استطالة عند الانقطاع تصل إلى1.5% ولهذه المادة كثافة تساوي $1.5g \setminus cm^3$. تمتاز هذه المواد بأنها:

- منخفضة الوزن.
- متوافرة بأي طول و لا تحتاج لوصلات.
- سهلة النقل (لفات).
- ألواح لا تحتاج إلى تحضير.
- تداخلات الصفائح و تقاطعاتها بسيطة.
- اقتصادية في التركيب فلا تحتاج إلى أجهزة للتركيب أو أيدٍ عاملة كثيرة
- متوافرة بعوامل مرونة مختلفة.
- مقاومتها ممتازة للتعب.
- يمكن الطلاء فوقها دون الحاجة لتحضير مسبق.
- مقاومة للقلويات.

أما المادة اللاصقة اللازمة من أجل لصقها على البيتون فهي مادة الأيبوكسي حيث تعطي الشركات المصنعة لها جميع التوصيات لطريقة تنفيذها كنسب المواد وطريقة المزج و اللصق و التركيب .

و عند التركيب يتم تقطيع الشرائح بالأطوال اللازمة حسب مخطط التدعيم المدروس، ويتم تنظيف السطح البيتوني بأساليب متعددة كالضرب بالرمل أو تعريض السطح

لضغط ماء عالٍ وذلك بعد تخشينه بمطرقة خشنة ثم حفه بفرشاة معدنية وذلك ليصبح السطح خشناً و نظيفاً من الغبار وخالياً من الشحوم و الزيوت و أن يكون جافاً (أعلى نسبة للرطوبة 4%) ويتم تدوير زوايا الأعمدة بنصف قطر لا يقل عن 15mm، ثم يتم تنفيذ طبقة خاصة من الإيبوكسي لتسوية السطح، وبعدها يتم إشباع الشرائح بلاصق خاص بهذه المرحلة ثم تلصق الشرائح مكانها وتتم تسويتها بتراكب لا يقل عن 10 cm.

6 - لمحة تاريخية عن البحوث التي أجريت حول التدعيم بألياف الكربون:

إن أول خبرة أكتسبت في مجال ربط البيتون مع الحديد بواسطة مادة لاصقة كانت في فرنسا حيث بدأت البحوث على تكنولوجيا العمل هذه منذ عام 1946، ثم تبعها تطبيق مباشر في أعمال تدعيم جسر لتجاوز خطأ هندسي في البناء، في حين بُدِئ باستخدام الإيبوكسي الرابط في سويسرا عام 1970 وذلك في لصق قطع البيتون من أجل الاستمرارية والسرعة في البناء، كما تم استخدامه في مناطق الشرق الأوسط حيث استخدمت تركيبة الإيبوكسي المناسبة والتي تم استعمالها في مجالات متعددة وبكميات كبيرة ولا سيَّما في أعمال تدعيم الجسور.

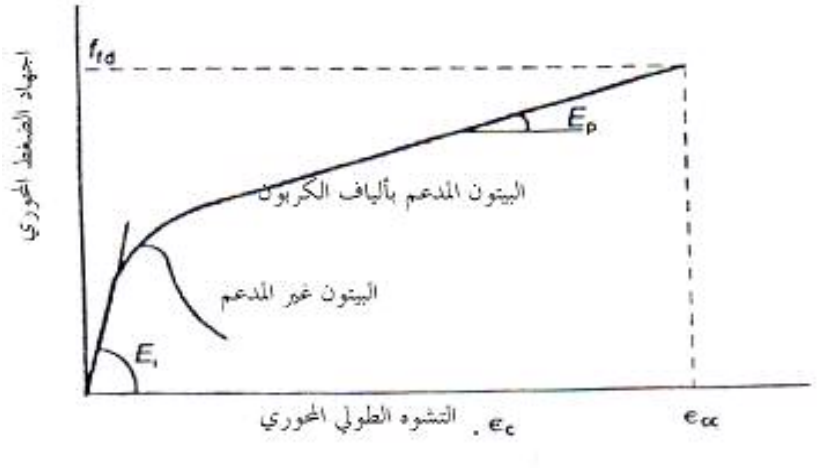
لقد أجريت بحوث كثيرة على تدعيم أعمدة الجسور في جامعة كاليفورنيا من قبل Priestley et al 1996 Seible et al 1994 Sum et al 1993 [1] حيث تم تدعيم الأعمدة الدائرية والمستطيلة والمربعة وذلك بإحاطتها بألياف الكربون ودراسةالمطاوعة (ductile) وتأثير القص، و تم التحقق من التجارب وقد أبدت ألياف الكربون خواص ميكانيكية جيدة ومناسبة لتقوية الأعمدة، كما عمل Seible et al 1995 [1] على بحث تحسين قدرة التحمل على القص و الانعطاف للأعمدة ولقد تبين للباحث أنّه:

- عند تعريض المقاطع المستطيلة لحمولة محورية يتركز جزء مهم من الضغط في الزوايا.

- إن معظم أعمدة الأبنية صممت لتحمل الحمولة المحورية فقط و لم يؤخذ تأثير الانتقال الجانبي الذي ينتج عن قوى الزلازل بالحسبان، حيث لفت الانتباه إلى هذا الموضوع في عام 1994 زلزال نورثريدج إذ انهارت العديد من الأعمدة من خلال تعرضها لحمولة محورية وانتقال جانبي معاً.

كما قام الباحثون Richart ,Mander , Jolly , Lillstone,Arduini:[2] [2]
بدراسة بديل عن التدعيم بالقميص الفولاذي و هو التدعيم بألياف الكربون و قد أوجدوا معادلات تجريبية و نظرية لحساب مقاومة الضغط للبيتون المقوى بألياف الكربون وكذلك شكل التشوه– الإجهاد في هذا البيتون.

وقد تبين نتيجة هذا البحث أن مخطط التشوه– الإجهاد للبيتون كان كما في الشكل(1):



الشكل (1) مخطط التشوه –الإجهاد للبيتون وفق تجارب Richart [2]

ووجد أنَّ سلوك البيتون المدعم بألياف الكربون يكون في البداية مشابهاً لسلوك البيتون غير المدعم حيث يكون فيه التشوه نتيجة إجهادات الشد العرضية الناتجة بسبب

الضغط المحوري. أما البيتون المدعم بألياف الكربون فإن أليافه تصبح ناشطة عند بدء التشوه الجانبي حيث تعيق الألياف هذا التشوه ومن ثَمَّ ترفع من طاقة تحمل المقطع على الاجهادات الضاغطة.

و قد استنتج الباحث من تجاربه المعادلة التي تحكم عمل البيتون المدعم بألياف الكربون على الاجهادات المحورية و هي:

$$f_{cc} = (0.75/\gamma_{mc})(Eo - Ep)\varepsilon_{cc} /[1 + \{\varepsilon_{cc}(Eo - Ep)/f_{ck}\}^{n}]^{\frac{1}{n}} + Ep\varepsilon_{cc} \qquad [2]$$

حيث:

f_{cc} : مقاومة البيتون المدعم بألياف الكربون.

γ_{mc} : عامل أمان للبيتون يفرض حسب الكود المعتمد و قد أخذ في البحث الـــسابق بقيمة1.5 وفق الكود (BS 8110:part1).

Eo : عامل المرونة التصاعدي للبيتون.

$$Eo = 9.5(f_{ck} + 8)^{\frac{1}{5}} (E_0 KN/mm^2, f_{ck} N/mm^2)$$

f_{ck} : المقاومة الأسطوانية للبيتون وتساوي $0.85 f_{cu}$.

f_{cu} : المقاومة المكعبية المميزة للبيتون غير المطوق.

Ep : عامل المرونة المماسي عند الانهيار.

$$Ep = (f_{cck} - f_{ck})/\varepsilon_{ccu}$$

f_{cck} : المقاومة المميزة للبيتون المطوق.

$$f_{cck} = f_{ck} + 4.1 * 0.85 f_{fd} t_f / R$$

f_{fd} :مقاومة الشد التصميمية العظمى لألياف الكربو .

R : نصف قطر العمود.

t_f :سماكة الألياف.

ε_{ccu} : التشوه المحوري الأعظمي للبيتون المطوق.

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{fu} / \nu_c (1 + \sqrt{[f_{co} R / f_{fd} t_f]})$$

f_{co} :مقاومة الضغط للبيتون غير المطوق.

ε_{fu} :التشوه التصميمي الأعظمي لألياف الكربون.

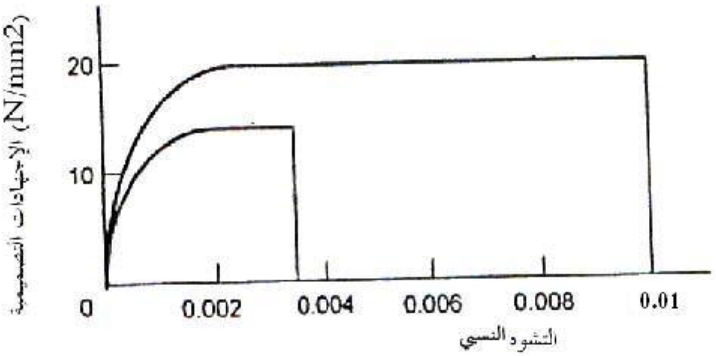
$\nu_c = 0.2$:عامل بواسون للبيتون.

ε_{cc} : التشوه النسبي المحوري للبيتون المطوق.

n:عامل تجريبي.

كما تبين في هذا البحث[2] إن أعمدة الجسورالمدعمة يمكنها أن تتحمل أيضاً حمولة أفقية ناتجة عن صدم العربات.

في هذه الحالة يجب أن تقاوم الأعمدة الحمولة المحورية مع عزم الانحناء، لذلك تم إجراء تجارب على أعمدة دائرية مغلفة بطبقتين من الألياف ذات مقاومة حدية على الشد مقدارها $360 N \setminus mm^2$ و معامل تشوه مقداره $104 KN \setminus mm^2$، و قد تبين من مخطط التشوه– الإجهاد للبيتون أنَّ تطويق المقطع بالألياف يعزز المقاومة المكعبية الفعالة للبيتون و يؤدي إلى تغييرها من f_{cu} عند تشوه 0.0035 إلى $1.5 f_{cu}$ عند تشوه 0.01 والشكل (2) يوضح نتائج هذه الدراسة.



الشكل (2) مخطط التشوه –الإجهاد للبيتون المقوى[2]

مما سبق واعتماداً على شكل منحنى التشوه– الإجهاد للبيتون المقوى وجد أنَّ المنحنى التصميمي اعتمد أيضا"على قيمة المقاومة المميزة للبيتون غير المدعم f_{cu} .

7- تأثير طريقة التدعيم بألياف الكربون في شكل الانهيار و حمولته:

هناك عدة طرائق للتدعيم بالألياف الكربونية و التي تؤثر في زيادة طاقة تحمل العمود المضغوط:

- اللف بقميص من الألياف الكربونية.
- اللف بألياف الكربون بطريقة التدعيم المسبقة الإجهاد أو غير مسبقة الإجهاد.
- الاختلاف بطريقة تحضير سطح العينات (تنظيف السطح بالفرشاة أو بواسطة ضغط الماء).
- اللف بوضع عدة طبقات من ألياف الكربون.
- اللف بواسطة صفائح مستمرة أو صفائح منفصلة.
- وضع قضبان (rods) ثم لفها بقميص من ألياف الكربون.

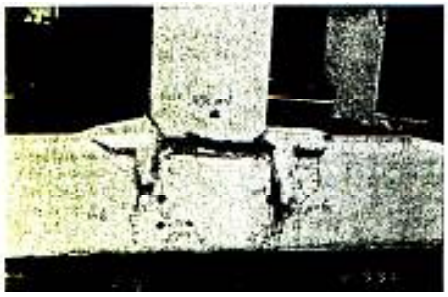
لقد تبين من البحوث التي أجريت على تدعيم الأعمدة بالألياف الكربونية أنَّ لف الأعمدة بألياف الكربون يزيد من مطاوعة الأعمدة كما تزداد هذه المطاوعة بزيادة

نسبة تسليح الألياف، وإنَّ الاستجابة للقوى المطبقة في البداية يكون مرناً ثم تبدأ الشريحة بالتمزق وقد لوحظ انقطاع الشريحة و تمزقها و حصول عملية الانهيار بشكل انفجاري مترافقاً مع تحنيب للتسليح الطولي بين الأساور، أما في الأعمدة ذات المقطع العرضي المستطيل فقد لوحظ أنَّ الانهيار يبدأ عادة بتشقق الألياف عند زوايا العمود بسبب تركز الاجهادات فيها [3].

كما تبين أنَّ الأعمدة المدعمة بألياف الكربون سواء بطريقة التدعيم المسبقة الإجهاد أو التدعيم دون سبق إجهاد أعطت النتائج نفسها في زيادة المطاوعة و القساوة، كما أنَّ إحاطة منطقة المفاصل اللدنة في العمود تؤدي إلى ارتفاع قيمة التشوهات الأعظمية في البيتون إلى 0.012 بينما الحدود التصميمية هي 0.003 –0.004 مما يؤدي إلى زيادة المطاوعة و زيادة الحمولة المحورية التي يمكن للعمود تحملها[4].

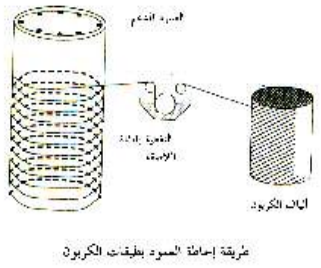
كما لوحظ أنَّ شكل الانهيار تابع لطريقة تحضير السطح و عدد طبقات الكربون فالعينات التي تم تحضير سطحها بتعريضه لضغط ماء لإزالة الغبار و البقايا و المواد الضعيفة أعطت قيمة أكبر لإجهادات الشد القطرية، و كذلك كان إسهام ألياف الكربون فيها أكبرمن العينات التي تم تحضير سطحها بتنظيفها بالفرشاة حيث وجد أنَّ حمولة الانهيار للعينات التي تم تحضير سطحها بالطريقة الأولى يزيد تقريباً بمقدار الضعف على حمولة الانهيار للعينات التي تم تحضير سطحها بالطريقة الثانية. كما أن وضع طبقات وصل من صفائح الكربون في منطقة اتصال العمود بالجائز تؤدي إلى زيادة قيمة اجهادات الشد القطرية، و تبين الأشكال (3،4) كيفية انهيار عقدة الاتصال بالحالتين المذكورتين حيث يبدأ الانهيار بظهور شقوق بشكل قطري عندما تصل اجهادات الشد القطرية إلى حد مقاومة البيتون على الشد، و هنا نلاحظ الاختلاف في شكل الانهيار بين العينة التي تم تحضير سطحها بتنظيفه بواسطة الفرشاة و العينة التي تم تحضير سطحها بتنظيفه بواسطة ضغط الماء [5].

الشكل (3) الانهيار في حال تم تحضير سطح العينة بتنظيفها بالفرشاة [5]



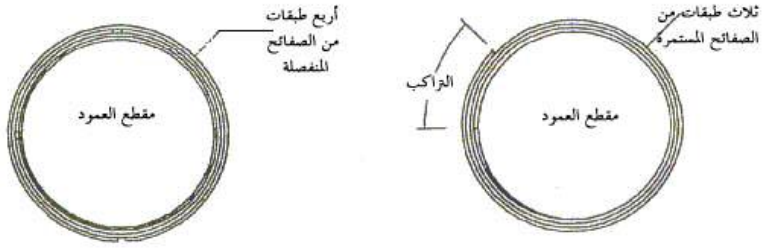
الشكل (4) الانهيار في حال تم تحضير سطح العينة بتنظيفها بواسطة ضغط الماء [5]

كما تبين من التجارب أنَّ إحاطة العمود بطبقة واحدة من الألياف يزيد من حمولة الانهيار بمقدار 21% في حين إحاطة العمود بطبقتين من الألياف يزيد من حمولة الانهيار بمقدار 51% إضافة إلى زيادة تشوهات الانهيار من1.5% عند إحاطة العمود بطبقة واحدة من الألياف إلى 5% عند إحاطة العمود بطبقتين من الألياف كما هو واضح في الشكل (5) الذي يبين زيادة التشوهات بعد تدعيم الأعمدة و طريقة إحاطة العمود بألياف الكربون [6] .



الشكل(5) طريقة إحاطة العمود بطبقات الكربون [6]

أما عندما تم تدعيم الأعمدة بواسطة قمصان مؤلفة من صفائح مستمرة وذلك بوضع ثلاث طبقات من الصفائح أو بواسطة صفائح منفصلة و لكن بوضع أربع طبقات من الصفائح كما هو موضح بالشكل (6)، وذلك من أجل التحقق من أن إحاطة أعمدة الجسور بقميص من الألياف يزيد من مقاومة القص لهذه الأعمدة عند تعرضها للزلازل. فلقد تبين أنّه لا يوجد فرق في استجابة الأعمدة سواء بتدعيمها بواسطة قمصان مؤلفة من صفائح مستمرة أو منفصلة. [7]



الشكل (6) تدعيم الأعمدة بطريقة الصفائح المنفصلة و المستمرة [7]

و لقد تبين عند تدعيم الأعمدة مع وضع قضبان (rods) ثم لفها بقميص من ألياف الكربون كما هو مبين بالشكل (7) (وذلك من أجل تأمين دعم جانبي للتسليح الطولي و من أجل إحاطة البيتون في المناطق التي يتوقع فيها حدوث مفاصل لدنة) أنَّ انهيار العمود تم بسبب تمزق شرائح الكربون إلا أنَّ التشوهات المقيسة في القميص عند الانهيار كانت صغيرة و هذا يبين ان القميص لم يقدم إحاطة ذات أهمية و لذلك كانت أسهاماته غير عملية في التقوية هذه، و لكنه كان فعالاً في تقديم دعم جانبي لقضبان التسليح.

الشكل(7) تدعيم العمود بوضع قضبان على طرفي العمود [8]

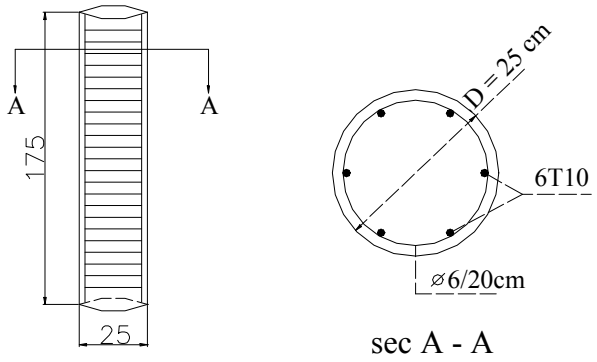
8 – الدراسة التجريبية في هذا البحث:

كما رأينا سابقاً فإن أساليب التدعيم متعددة و أحدثها التدعيم بشرائح الكربون، ويأتي بحثنا هذا محاولة لدراسة هذه التقنية ضمن واقع منشآتنا الهندسية، ومدى اقتصادية هذه الطرائق و الجدوى من استخدامها، وقد تم التركيز في هذا البحث على تدعيم الأعمدة البيتونية المسلحة(العناصر التي تتعرض بشكل أساسي لضغط محوري)، حيث تم استخدام طريقة لف الأعمدة بقميص من الألياف الكربونية مؤلف من شرائح

وذلك بعد وضع مادة الإيبوكسي كطبقة أساس لجعل السطح مستوياً، ثم لف الأعمدة بقميص من ألياف الكربون على كامل طولها وتم وضع طبقة واحدة فقط .

8-1- تحضير العينات للتجربة:

تم صب أربعة أعمدة متماثلة باستخدام المواد المحلية و سلحت بتسليح طولي عالي المقاومة F_Y=494.6 N/mm^2 ، أما التسليح العرضي فكان من التسليح الأملس العادي F_Y=235 N/mm^2 كما هو مبين بالشكل (8).



الشكل (8) يبين أبعاد عينات التجارب و تسليحها .

تم اعتبار العمود A1 كعمود مقارنة دون تدعيم أما الأعمدة B1,B2,B3 فقد تم تدعيمها بقميص من ألياف الكربون مؤلف من شرائح عرضها 30cm، وذلك بعد تخشين السطح البيتوني وتنظيفه بالفرشاة ومن ثم وضع مادة الإيبوكسي كطبقة أساس لجعل السطح مستوياً و بعدها تم لف الشرائح على كامل طول العمود بتراكب مقداره 10cm بالاتجاه العرضي، و إشباعها بالإيبوكسي الخاص لهذه المرحلة و تشذيب مادة الإيبوكسي على أطرافها و لصقها لصقاً جيداً. وقد تم مزج مادتي الإيبوكسي (البيضاء A و الرمادية B بنسبة A:B=4:1) وذلك وفق توصيات الشركة المصنعة. ثم تم رش

طبقة من الرمل على السطح الخارجي و ذلك لكي يمكن وضع طبقة طينة أو دهان أو غيرها من أعمال الإكساء على سطح العمود.

بعد ذلك تمت تسوية سطوح الأعمدة العلوية و السفلية و ذلك بهدف تحقيق تطبيق القوة بشكل مركزي على العمود.

8-2-آلية الاختبار:

تم اعتماد الجملة الإنشائية المبينة حيث يوضح الشكل (9) أحد أعمدة التجربة عند بدء الاختبار.

الشكل (9) العمود المدعم و طريقة وضع أجهزة قياس التشوهات في أثناء الاختبار

ويبين الشكل (10) أحد الأعمدة التي تم اختبارها قبل القيام بالتجارب حيث تظهر فيه أجهزة قياس التشوهات الطولية و العرضية لكل من البيتون و الألياف.

الشكل (10) .أجهزة قياس التشوهات الطولية و العرضية.

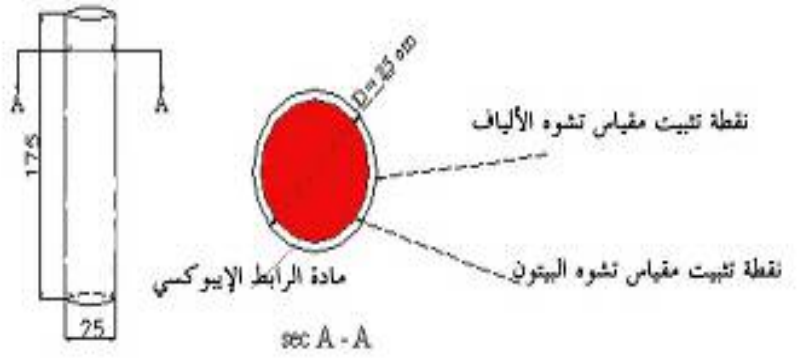
و تمت القياسات عل العمود باتجاهين:

1– في الاتجاه الطولي:

آ – قياس التشوه الطولي للبيتون: تم تثبيت مجموعة من مؤشرات القياس على مسافة بحدود 20cm من طول العمود، و تثبيت نقطتي القياس على البيتون مباشرة.

ب – قياس التشوه الطولي للبيتون على الألياف: بهدف توضيح الفرق بين تشوه البيتون و تشوه طبقة الليف، و هنا تم تثبيت طرفي مقياس التشوه على الألياف مباشرة.

2- في الاتجاه العرضي: حيث تم وضع حلقة معدنية صلدة حول العمود، و تم تثبيت أجهزة لقياس الانتقال العرضي بالنسبة لها.



و قد تمت التجارب بتحميل العمود و قراءة مؤشرات أجهزة القياس كل100kN، و من ثم تم حساب التشوه النسبي لنقطتين في المقطع العرضي و منه أمكن تحديد التشوه النسبي للبيتون المضغوط و المترافق مع القوى المطبقة.

8-3- نتائج التجارب:

- سلوك العنصر نتيجة التدعيم بالألياف:

أسهمت ألياف الكربون في تحسين طريقة عمل البيتون فقد أصبح يعمل بصورة أفضل و أصبح من الممكن الاستفادة من طاقة البيتون كاملة، حيث تبين من نتائج التجارب أن الصفائح الكربونية لم تسمح في تزايد التشوهات المرنة و من ثَمَّ فإن العمود المدعم بالصفائح الكربونية دخل عتبة المرونة- اللدونة بتشوهات أقل من العمود البيتوني المسلح، و هذا يعطي مرحلة أمان كبيرة و مرحلة استثمار جيدة وخصوصاً لتأثير الحمولات الديناميكية.

بعد ذلك تبدأ التشوهات المرنة بالتناقص و تزداد التشوهات اللدنة مع استمرار التحميل، و عند الوصول إلى مقاومة أعلى من مقاومة البيتون غير المدعم يستمر

العنصر بالتحمل فقط بفضل الألياف الكربونية التي تطوق البيتون و تدعمه و تحد من تشوهاته الجانبية.

– زيادة المقاومة:

وقد تبين من خلال التجارب على الأعمدة المدعمة بألياف الكربون فاعلية الألياف في تدعيم الأعمدة و زيادة تحملها للقوى المطبقة عليها، حيث لوحظ أنَّ القوى زادت تقريبا" بمقدار 50% عن القوى التي تتحملها الأعمدة غير المدعمة.

لقد انهار العمود غير المدعم عند الوصول إلى القوة 1000kN في حين انهارت الأعمدة المدعمة بألياف الكربون عند قوة بحدود 1500kN مما يدل على فاعلية الألياف و تأثيرها في زيادة تحمل البيتون و زيادة الحمولات التي يمكن للأعمدة تحملها كما هو موضح بالجدول (1).

العمود	حمولة الانهيار kN	مقدار الزيادة في حمولة الانهيار
A1	1000	
B1	1500	%50
B2	1550	%55
B3	1600	%60

الجدول (1) حمولات الانهيار للأعمدة.

– زيادة التشوه الطولي عند الانهيار:

كما نجد تأثير هذه الألياف في تشوهات البيتون حيث كان ينهار البيتون عند وصول التشوهات إلى 0.003 كقيمة عظمى بينما نلاحظ في تجاربنا أنَّ التشوهات في الأعمدة المدعمة قد زادت، حيث وصلت التشوهات في الألياف إلى 0.0053، مما يدل على أنّه يوجد في البيتون تشوهات لم نكن نلاحظها لأن البيتون كان ينهار قبل الوصول إليها و لكن الألياف المحيطة بالبيتون مكنتنا من استغلال طاقة البيتون بشكل كامل، و من ثَمَّ

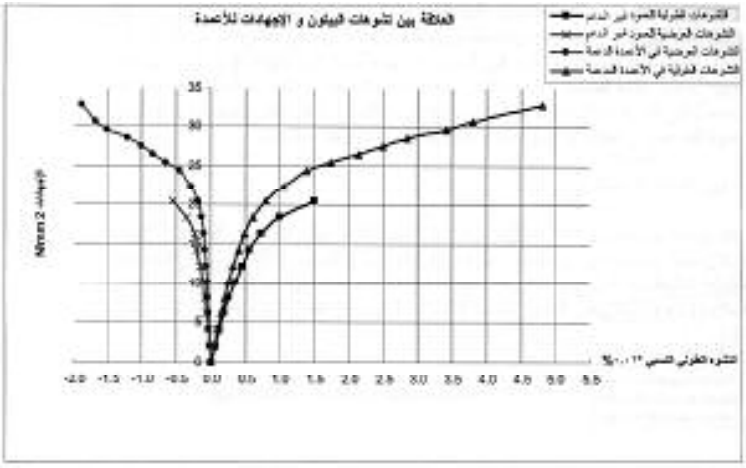
الوصول إلى تشوهات لم نكن نصل إليها، و تبين المنحنيات التشوهات الطولية و العرضية للعمود غير المدعم و الأعمدة المدعمة حيث نجد أن التشوهات الطولية للعمود غير المدعم لم تتجاوز 0.0015 (الشكل11) في حين وصلت في الأعمدة المدعمة إلى 0.0048 ،كذلك نلاحظ أن التشوهات العرضية للعمود غير المدعم بلغت 0.0006 بينما في الأعمدة المدعمة قد تجاوزت 0.0019 .

كذلك نجد أنَّ التشوهات في الألياف أكبر من التشوهات في البيتون حيث وصلت التشوهات إلى 0.0053 مما يدل على أن القميص قد شكل غلافاً حول العمود وأسهم في زيادة طاقة تحمله، و يبين الجدول (2) مقدار الزيادة في التشوهات.

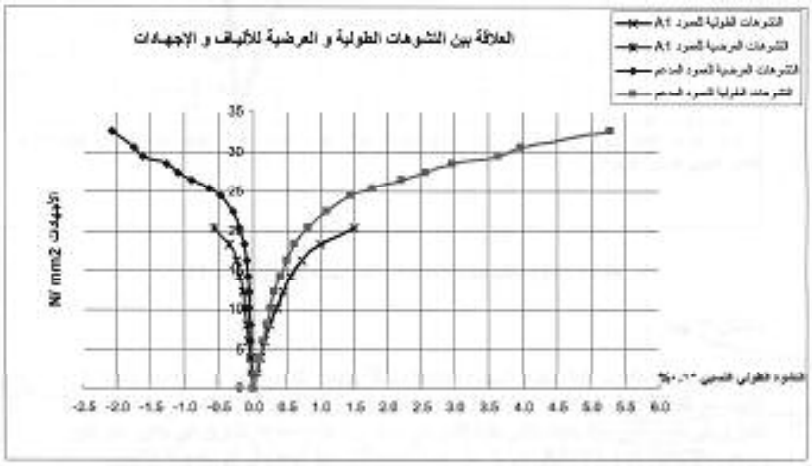
العمود	الزيادة في التشوهات العرضية* 10^{-3}		الزيادة في التشوهات الطولية* 10^{-3}	
	بيتون	ألياف	بيتون	ألياف
B1	1.2	1.4	2.3	2.8
B2	1.25	1.49	3.3	3.77
B3	1.39	1.59	3.31	3.8

الجدول (2) مقدار الزيادة في التشوهات الطولية و العرضية .

كما يبين الشكلان (11،12) التشوهات النسبية في البيتون والألياف للعمود غير المدعم و الأعمدة المدعمة.



الشكل (11) التشوهات الطولية و العرضية في البيتون للعمود غير المدعم و الأعمدة المدعمة

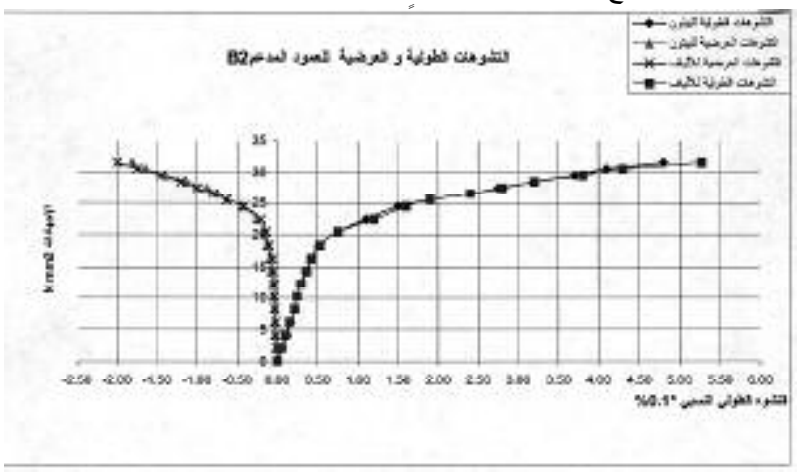


الشكل (12) التشوهات الطولية و العرضية في الألياف للعمود غير المدعم و الأعمدة المدعمة

و بمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في بحثنا مع نتائج البحث الذي قام به Richart(راجع لمحة تاريخية ص4) حيث نلاحظ في الشكل(2) ص(6) أنَّ التشوهات في العمود غير المدعم قد وصلت إلى 0.0038 و في العمود المدعم وصلت إلى 0.01 أي زادت التشوهات تقريباً بمقدار ثلاثة أضعاف، بينما انهار العمود غير المدعم في التجربة المنفذة من قبلنا عند الوصول إلى تشوهات 0.0015 كما هو موضح في الشكل (11) في حين وصلت التشوهات في العمود المدعم إلى 0.0048 أي زادت النسبة أيضا" بحدود ثلاثة أضعاف.

- **دور المادة اللاصقة:**

و لقد وجدنا من منحنيات التشوه أنَّ وجود المادة اللاصقة قد جعل كلاً من البيتون و الألياف يعملان معاً، حيث تبين من نتائج أجهزة القياس الطولية و العرضية أنَّ الفارق بين التشوهات الطولية للألياف و البيتون و التشوهات العرضية للألياف و البيتون ضئيل كما هو واضح في الشكل (13) و من ثَمَّ فإن المادة اللاصقة قد مكنت البيتون من العمل المشترك مع الألياف بشكل كافٍ.



الشكل (13) التشوهات الطولية و العرضية للعمود المدعمB2

– شكل الانـهيار:

عند القيام بالتجربة ومراقبة انهيار العمود كنا نلاحظ أنَّ انهيار العمود يبدأ بسماع صوت تمزق الألياف،و لكن التمزق الحاصل لم يواصل امتداده كما يحصل في المواد المتجانسة و إنّما انحصر التمزق في الشريحة نفسها حيث تبقى بقية الشرائح تعمل ولا يتابع بعدها التمزق في باقي الشرائح ويوضح الشكلان (14،15) شكل تمزق هذه الصفائح، وذلك عند الوصول إلى حمولة الانهيار.

الشكل (14) العمودB2 في نهاية الاختبار و شكل الانهيار(لاحظ تمزق الشرائح)

الشكل (15) العمودB3 في نهاية الاختبار و شكل الانهيار

6- نتائج البحث:

- لقد أظهرت التجارب أنَّ هذا الأسلوب من التدعيم ذو فعالية جيدة في رفع قدرة تحمل العنصر على الاجهادات الضاغطة و كذلك في زيادة قساوته.
- لقد لوحظ زيادة في حمولة الانهيار بحدود 50% من الحمولة التي تتحملها الأعمدة البيتونية دون تدعيم.
- كما تبين فاعلية هذه الألياف في تحسين طريقة عمل البيتون حيث أصبح يعمل بصورة أفضل وأمكن الاستفادة من طاقته كاملة.
- إن تدعيم العمود بإحاطته بألياف الكربون أمكن من إيصال التشوهات الطولية و العرضية في العمود إلى قيم لم يكن بالإمكان الوصول إليها في الأعمدة غير المدعمة و ذلك قبل حصول الانهيار الكلي.

وبشكل عام فإن اختباراتنا أكدت ما تم الحصول عليه في نتائج التجارب العالمية، فجميع النتائج التي حصلنا عليها هي مقاربة لما تم توضيحه في نتائج البحوث المجراة. (راجع لمحة تاريخية ص4).

المراجع

1– المؤتمر العربي الخامس للهندسة الإنشائية (طرابلس الجزء الثاني 1993).

2-Richart , Mander ,Jolly ,lillstone . (2000)
"Strengthening Concrete Structures Using Fibre Compoisite Materials".

3-Kirk .J. Nosho ,Gregory A .Mackae and F .Stanton (1999).
"Performance of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with Carbon - Fiber Confinement' .

4-Edward R . Fyhe , Duane J . Gee Peter B .Milligan
"Composite Materials for Rehabilitation of Civil Structures and SeismicApplications".

5-Janos Gergely , Ghris P .Pantelides , and Lawrence D.Reavely Members .ASCE . (2000)
Shear Strengthening of RCT-Joints Using CFRP Composites," October1.

6-Nordic Road &Transport Research, [Norwaegian Public Road Administration] No 2 2000
." Strengthening with Carbon Fibres "

3

7-Y .Xio , G.R . Martin , and H . WU (2000)
"Prefabricated Composite Jacketing for Enhancing Shear Strength of Bridge Columns " .

8-AASHTO (1996), Standard Specifications for Highway Bridges, "Sixteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C."

9-Seible, F. and Innamorato, D (1995), "Earthquake Retrofit of Bridge "Columns with Continuous Carbon Fiber Jackets," Report to Caltrans, Division of Structures, La Jolla, CA, 56 pp."

تاريخ ورود البحث إلى جامعة دمشق2004/4/12.