

تقوية الأقواس الحجرية تحت تأثير الأحمال الشاقولية باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)

الدكتور مصطفى بطيخة*

الدكتور ساطع بدوي**

باسل بقله***

(تاريخ الإيداع 19 / 6 / 2012. قُبِلَ للنشر في 13 / 12 / 2012)

▽ ملخص ▽

تم في هذا البحث دراسة تأثير البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) على رفع قدرة التحمل الحدية للأقواس الحجرية تحت تأثير الحمولات الشاقولية؛ وذلك باستخدام النمذجة العددية وفق طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Analysis) حيث تم استخدام تحليل لاخطي يأخذ بالاعتبار لاخطية المادة (Materially non-linear analysis). وقد تمت دراسة تأثير تغيير الخصائص البعدية لشريحة الـ FRP في قدرة تحمل القوس، حيث أثبت في نهاية هذه الدراسة أن استخدام سماكة صغيرة من شريحة الـ FRP، وفي أماكن موضعية محددة تؤدي إلى رفع قدرة تحمل القوس بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية : الأقواس الحجرية - أحمال شاقولية - البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) - تقوية - تحليل لاخطي.

* مدرس - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

** أستاذ - قسم هندسة الطرق و المواصلات - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

Strengthening of Masonry Arches under Vertical Loads Using Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Dr. Mustafa Batikha*
Dr. Sati Badawi**
Bassel Bakleh***

(Received 19 / 6 / 2012. Accepted 13 / 12 / 2012)

▽ ABSTRACT ▽

It is well known that arch is a main part of the historical structures. Therefore, many techniques are used to strengthen these arches. In this paper, Fiber Reinforced Polymer (FRP) is used to reinforce the arch under vertical loads. Materially Non-Linear Analysis (MNLA) is performed to demonstrate the behavior of the arch with and without the FRP. On the other hand, the effect of FRP lamina thickness and length is undertaken in this research. This paper shows that a small amount of the FRP to some local areas can enhance the ultimate strength of the arch significantly.

Keywords: Masonry Arches – Vertical Loads – Strengthening – Fiber Reinforced Polymer (FRP) – Non Linear Analysis.

* Assistant Professor, Department Of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

** Professor, Department Of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة :

تعد مادة الحجر إحدى مواد الإنشاء المهمة التي استعملت قديماً على نطاق واسع، خاصة قبل ظهور مواد الإنشاء الأخرى كالبيتون والفولاذ. والمنشآت الحجرية هي عناصر إنشائية مركبة وغير متجانسة تتألف من القطع الحجرية (Units)، (Bricks)، تربط فيما بينها المونة (Mortar)؛ إذ قامت الكودات العالمية بإعطاء مقاومة المادة الحجرية (Masonry) اعتماداً على مقاومة كل من القطع الحجرية، ومقاومة المونة معاً (Eurocode6، 2005) [1]. تبين العلاقة (1) المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية المركبة f_k (N/mm^2)، اعتماداً على الكود الأوروبي (Eurocode6، 2005) [1]:

$$f_k = k \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

حيث:

f_b : المقاومة المميزة على الضغط للقطع الحجرية (N/mm^2).

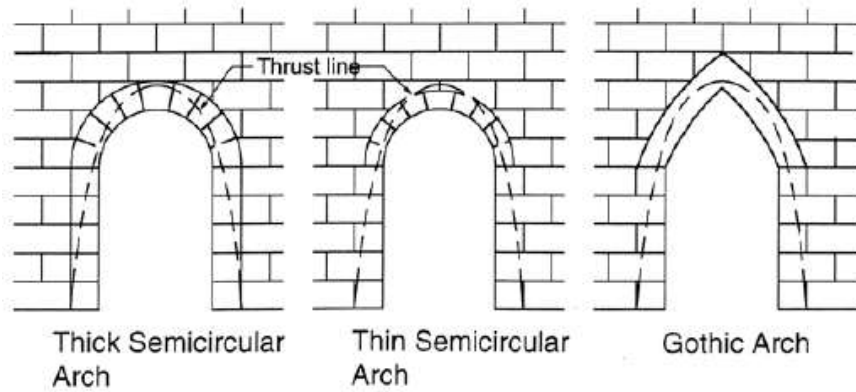
f_m : المقاومة المميزة على الضغط للمونة (N/mm^2).

α و β و K : ثوابت عددية تتعلق بسماكة المونة ونوع الحجر ويمكن أخذ قيمة $\alpha=0.7$ ، و $\beta=0.3$ للحالة العامة، أما قيم المعامل (K) فتؤخذ من الجدول (2)، والذي يعتمد على خصائص المونة وتصنيف القطع الحجرية وهذا التصنيف موضح بدوره في الجدول (1) (انظر الجداول في ملحق المقالة).

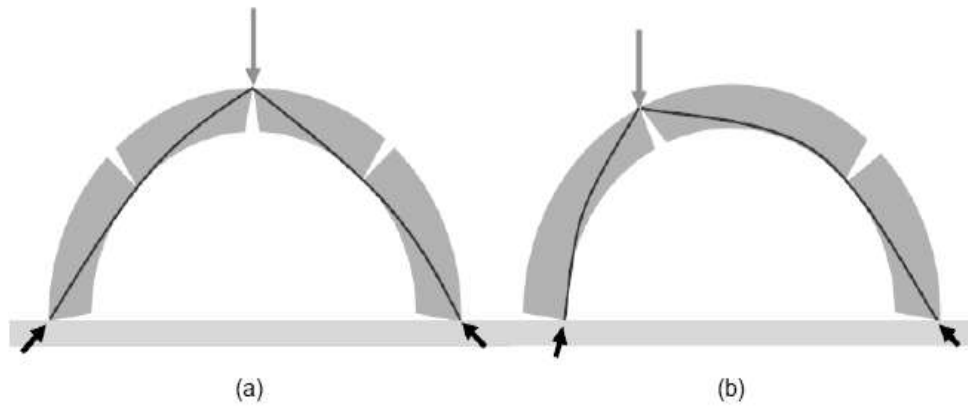
يعد الشكل القوسي من أكثر المنشآت المشكلة من الحجر؛ وذلك للتصرف الإنشائي للشكل القوسي ناهيك عن جمالية الشكل من الناحية المعمارية، حيث يولد الشكل القوسي تحت تأثير الأحمال الموزعة الشاقولية إجهادات ناظرية ضاغطة في مادة الحجر، ويمنع تشكل إجهادات شادة تؤدي إلى انفصال القطع الحجرية عند نقاط اتصالها بواسطة المونة. تختلف أشكال الأقواس الشائعة ما بين الشكل الدائري (Circular Arch)، والقطع المكافئ (Parabolic Arch)، والقوطي (Gothic Arch)؛ إذ يعد القطع المكافئ أفضل الأشكال حيث إن العزوم المتولدة فيه مساوية للصفر وبالتالي عدم تولد إجهادات شادة على المادة الحجرية، ومع ذلك فقد تم استخدام الأقواس نصف الدائرية وغيرها على نطاق واسع نظراً للسماكات الكبيرة المستخدمة وبهذا يبقى خط الضغط (قطعي الشكل) محصوراً ضمنها (Beurman، Lasell، Bjurstrom and [2]، 2009 [3]، 2009).

تعد طريقة خط الضغط (Thrust Line) إحدى الطرائق المستخدمة في حل الأقواس حيث يتم رسم خط افتراضي يمثل لامركزية القوة الضاغطة على كل مقطع من مقاطع القوس (Bjurstrom and Lasell، 2009) [3]، ويبقى القوس مستقراً ببقاء خط الضغط ضمن سماكة القوس، الأمر الذي يفسر اختيار السماكات الكبيرة للقوس قديماً (الشكل 1).

إن تشكل ميكانيكية انهيار القوس تنشأ بتشكيل خمسة مفاصل في حال التناظر بالشكل والحمولات (الشكل 2-a)، وأربعة مفاصل في حال عدم التناظر (الشكل 2-b). يبين الشكل (2) أن المفصل يتشكل أسفل الحمل المركز وعند المسندين، أما المفصل الرابع فيتحدد عند نقاط تماس خط الضغط مع حدود القوس (Sanchez [4]، Beurman [2]، 2007، 2009).



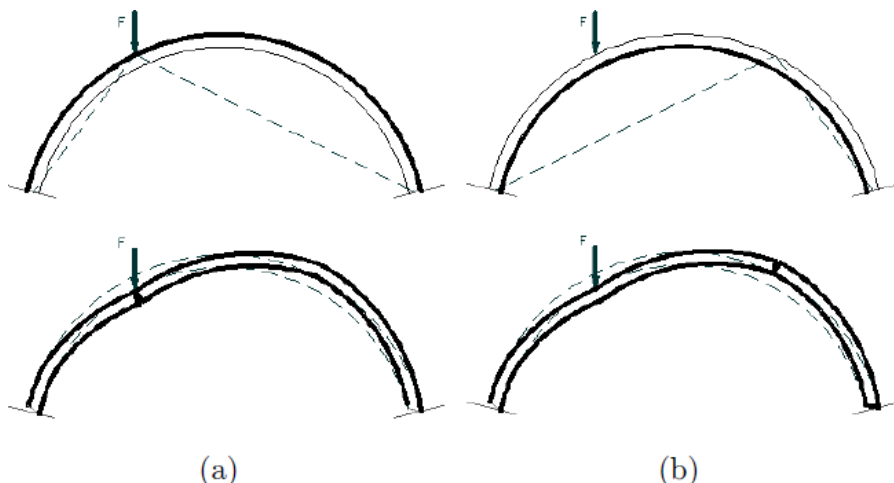
الشكل (1): خط الضغط لبعض الأشكال الشائعة للأقواس (Sanchez [4]، 2007)



الشكل (2): ميكانيكات الانهيار للقوس الحجري بتأثير الحمل المركز مع خط الضغط المحتمل (Beuerman, 2009) [2]

تمّ استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) في تقوية العديد من المنشآت البيتونية (Concrete Society, 2004) [5]، ثم التوسع في استخدامه ليشمل المادة الحجرية (Triantafillou, 1998) [6]، والخشب (Gilfillan *et al.*, 2003) [7]، والمنشآت المعدنية (Batikha, 2008) [8]. يتميز الـ FRP بالمقاومة العالية نسبة إلى الوزن والمرونة في التشكيل، وسهولة القص بالأطوال المناسبة في موقع العمل، وإكساب العنصر خاصية الممتطولية أو المطاوعة (Ductility). أما سلوك مادة الـ FRP فهو خطي مرن حتى الانهيار (Concrete Society, 2004) [5].

استُخدمت الـ FRP في تقوية الأقواس الحجرية (Sanchez, Borri *et al.*, 2002 [9]; Milani, 2007 [4]; Foraboschi, *et al.* [10], 2009 [11], 2004). ويبين الشكل (3) أن تقوية القوس بواسطة FRP قد أدت إلى انهيار القوس بتشكيل ميكانيكية بثلاثة مفاصل عوضاً عن أربعة، إلا أن مقاومة الشد العالية للـ FRP ستؤدي إلى زيادة إجهاد الضغط في الحجر، ثم انهيار القوس نتيجة تحطم الحجر (Masonry crushing).



الشكل (3) : ميكانيكيات الانهيار للقوس الحجري المقوى بشرائح الـ FRP من الوجه الخارجي (a) والداخلي (b)

[4] (Sanchez, 2007)

أهمية البحث وأهدافه :

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) في زيادة قدرة تحمل الأقواس الحجرية للأحمال الشاقولية المركزة، وتأثير تغيير الخصائص البعدية لشريحة الـ FRP (طول وسماكة) في قدرة التحمل. وتأتي أهمية هذا البحث بسبب الاستعمال الشائع للأقواس الحجرية في الأبنية التاريخية، والجسور الحجرية، حيث إنه ومع مرور الزمن لا بد لمادة الإنشاء التي تتكون منها الأقواس أن تضعف (Sanchez, 2007) [4] ، وتنخفض قدرة تحملها على الأحمال المختلفة، الأمر الذي يتطلب إيجاد طرق تقوية لرفع قدرة التحمل. وتعد مادة الـ FRP إحدى الطرق الحديثة المتبعة في ذلك.

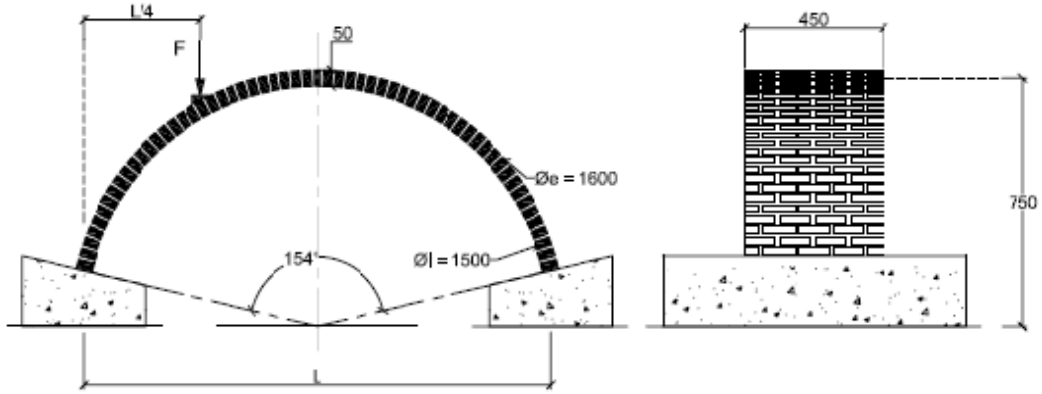
طرائق البحث ومواده :

اعتمدت في هذا البحث الطريقة التحليلية باستخدام نظرية العناصر المحدودة؛ إذ تمت المقارنة مع النتائج التجريبية التي تمّ التوصل إليها في أبحاث سابقة، وتمّ التحليل باستخدام برنامج (ABAQUS -Ver 6.5) [12] واستخدم تحليل لا خطّي يأخذ بعين الاعتبار لاختيية المادة.

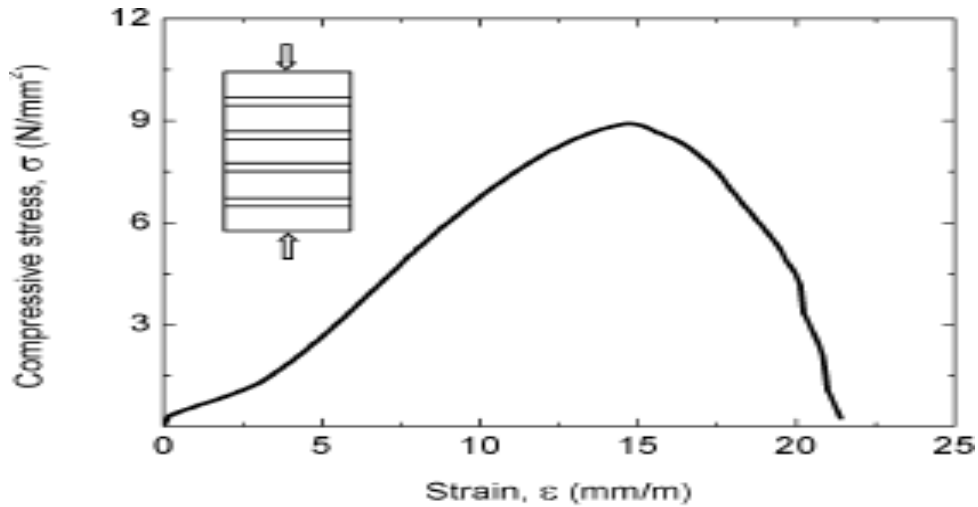
التحليل باستخدام نظرية العناصر المحدودة :

باستخدام البرنامج (ABAQUS -Ver 6.5) [12] تمت نمذجة القوس المدروس في دراسة (Sanchez, 2007) [4] ، حيث تمّ فيها إجراء دراسة تجريبية لقوس حجري معرّض لحمل شاقولي في مستوى القوس، ومطبق عند ربع المجاز. إن قطر القوس ($\phi = 1500 \text{ mm}$)، وسماكته ($t_a = 50 \text{ mm}$)، وارتفاعه ($h = 750 \text{ mm}$)، وعرضه ($B_a = 450 \text{ mm}$)، والزاوية الداخلية التي تحصره ($\theta = 154^\circ$)، مستند إلى كتلتين من البيتون (الشكل 4). استُخدمت المادة الحجرية بمعامل مرونة (Elastic Modulus) $E = 20400 \text{ MPa}$ ، ومعامل بواسون (Poisson's ratio) $\nu = 0.2$ ، وتم استخدام التحليل اللاخطي باعتماد لاختيية المادة، حيث يبين الشكل (5) مخطط الإجهاد- التشوه النسبي (Stress-Strain) لتصرف المادة الحجرية على الضغط الذي تم الحصول عليه من التجربة؛

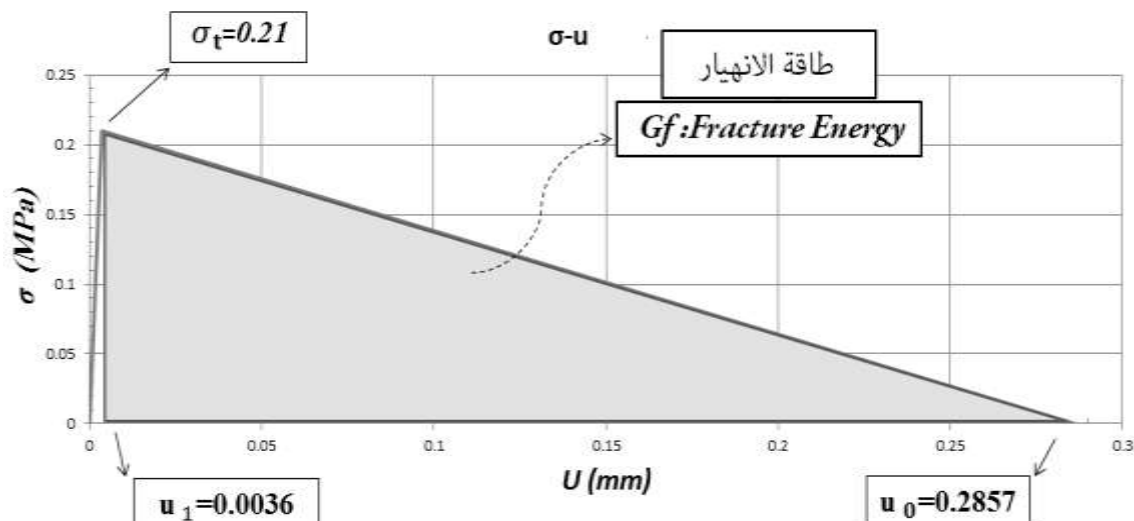
إذ يبين أن السلوك المرن ينتهي عند إجهاد صغير 0.29MPa ، ويبدأ معه السلوك اللاخطي للمادة الحجرية حتى الوصول إلى إجهاد ضغط أعظمي مقداره 9.1Mpa ، ثم تنخفض المقاومة حتى الانهيار عند تشوه نسبي (Failure stain) مقداره 0.0214 . ويبين الشكل (6) تصرف المادة الحجرية على الشد من التجربة حيث يحدث الشق الأول عند إجهاد شد 0.21MPa ، وعرض شق مقداره 0.0036mm ، ثم تنخفض مقاومة المادة الحجرية على الشد حتى الوصول إلى عرض شق مقداره 0.2857mm ، حيث تفقد المادة الحجرية القدرة على مقاومة الشد، ويمكن ملاحظة أن طاقة التمزق G_f (Fracture Energy) هي 0.03 N/mm .



الشكل (4) : النموذج المستخدم في الدراسة (Sanchez [4], 2007)

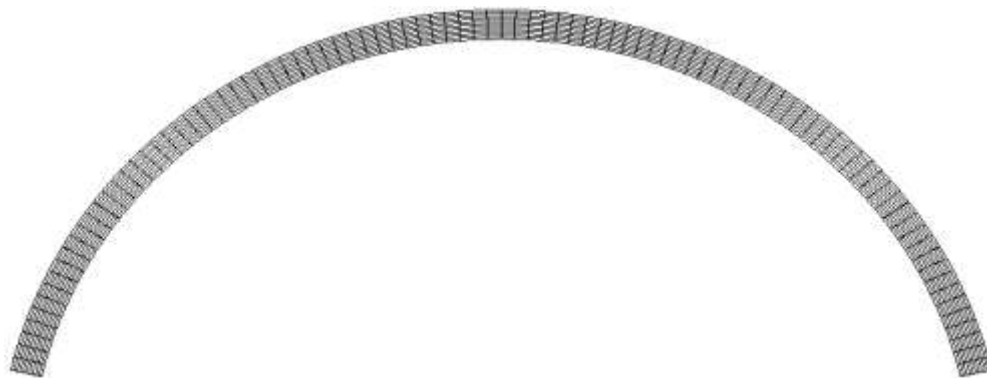


الشكل (5) : منحنى السلوك الفعلي للمادة الحجرية على الضغط (منحنى إجهاد الضغط - التشوه النسبي) (Sanchez [4], 2007)



الشكل (6) : منحنى السلوك الفعلي للمادة الحجرية على الشد (منحنى إجهاد الشد - مقدار توسع الشق)

استُعمل العنصر (S4R) في نمذجة القوس، وهو عبارة عن عنصر مساحي عام (Shell Element) بأربع عقد، وكل عقدة لها ست درجات حرية، وهذا العنصر ذو عدد مخفض لنقاط غاوس (Gauss Points). وتم اعتبار شروط الاستناد وثيقة تامة لجميع العقد عند نقاط الاستناد بما يتوافق والنموذج التجريبي. تمّت دراسة دقة الشبكة المستخدمة (Mesh Convergence)؛ وذلك للوصول للتقسيم الاقتصادي من حيث زمن التحليل ودقة النتائج معاً؛ إذ تمت دراسة دقة الشبكة لكل من السماكة وطول القوس. ويبين الشكل (7) الشبكة المعتمدة حيث تم تقسيم السماكة إلى 10 أقسام والطول إلى 94 قسماً.

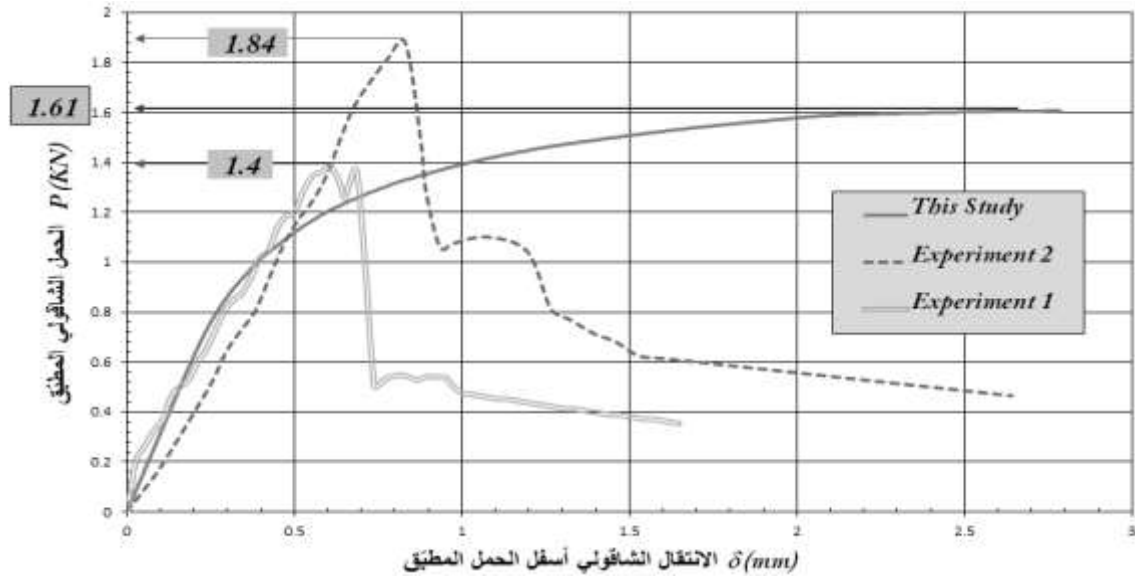


الشكل (7) : نموذج القوس باستخدام برنامج ABAQUS-ver6.5

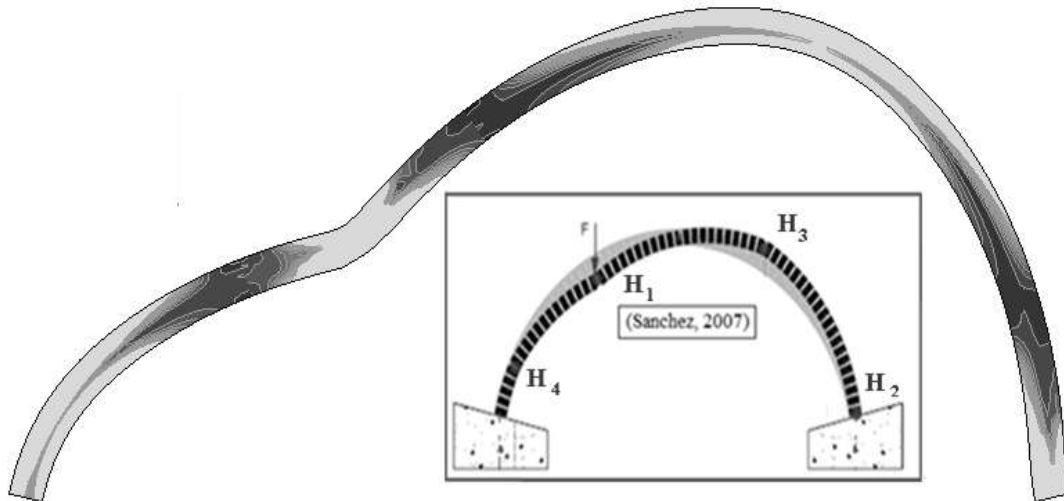
النتائج والمناقشة :

يبين الشكل (8) العلاقة بين القوة- الانتقال الشاقولي تحت الحمولة للدراسة الحالية مقارنة مع التجارب التي قام بها (Sanchez, 2007) [4] ، حيث كانت قدرة تحمل القوس 1.61kN، وهي قيمة وسطية بين قيمتي التجريبتين. لم يتم الحصول على التصرف نفسه لمرحلة ما بعد الوصول للقوة الحرجة؛ وذلك بسبب طريقة النمذجة المعتمدة حيث تمت نمذجة المادة الحجرية بوصفها مادة واحدة دون التمييز ما بين القطع الحجرية والمونة كل على حدة، وهو ما يؤثر في

الانتقال، بيد أنه يمكن الوصول إلى القوة الحرجة بهذه الطريقة، وهذه الطريقة سهلة واقتصادية في عملية النمذجة بينما أن نمذجة مادتين منفصلتين (المونة والقطعة الحجرية) هو عمل معقد. ويبين الشكل (9) التشوهات النسبية الرئيسية في النموذج المدروس (Principal strain) عند الحمولة الحرجة، حيث يبين تسلسل تشكل مفاصل ميكانيكية الانهيار ويشكل مشابه لما ورد في تجربة (Sanchez, 2007) [4] ؛ وذلك من شكل تدرج اتساع انتشار التشوهات النسبية ضمن السماكة عند كل مفصل.



الشكل (8) : مخطط الحمل المركز-الانتقال أسفل الحمل للقوس غير المقوى

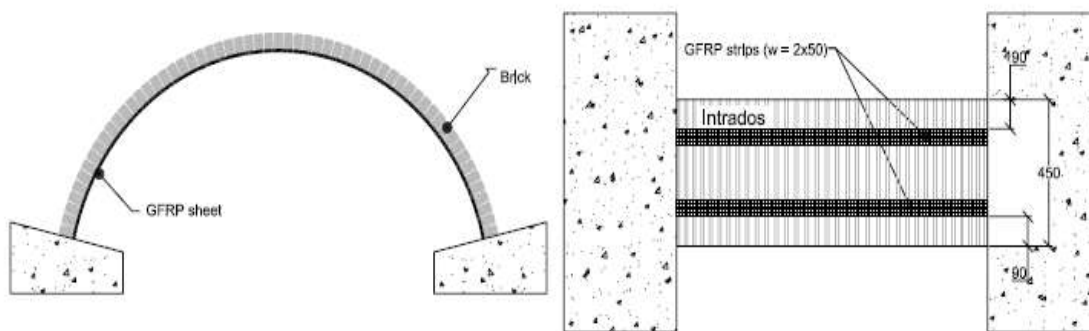


الشكل (9) : التشوهات النسبية الرئيسية (Principal strain) للنموذج بدون تقوية (ABAQUS-Ver6.5)

التقوية باستخدام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP):

تمت تقوية القوس السابق باستعمال شريحتين من الـ GFRP (بوليميرات مسلحة بالألياف الزجاجية)، عرض كل شريحة (50 mm)، وسماكتها (2 mm) على كامل طول القوس من الوجه الداخلي (Intrados)، كما هو مبين في الشكل (10). تم استخدام الألياف بمعامل مرونة باتجاه الألياف (Longitudinal Elastic Modulus) مقداره

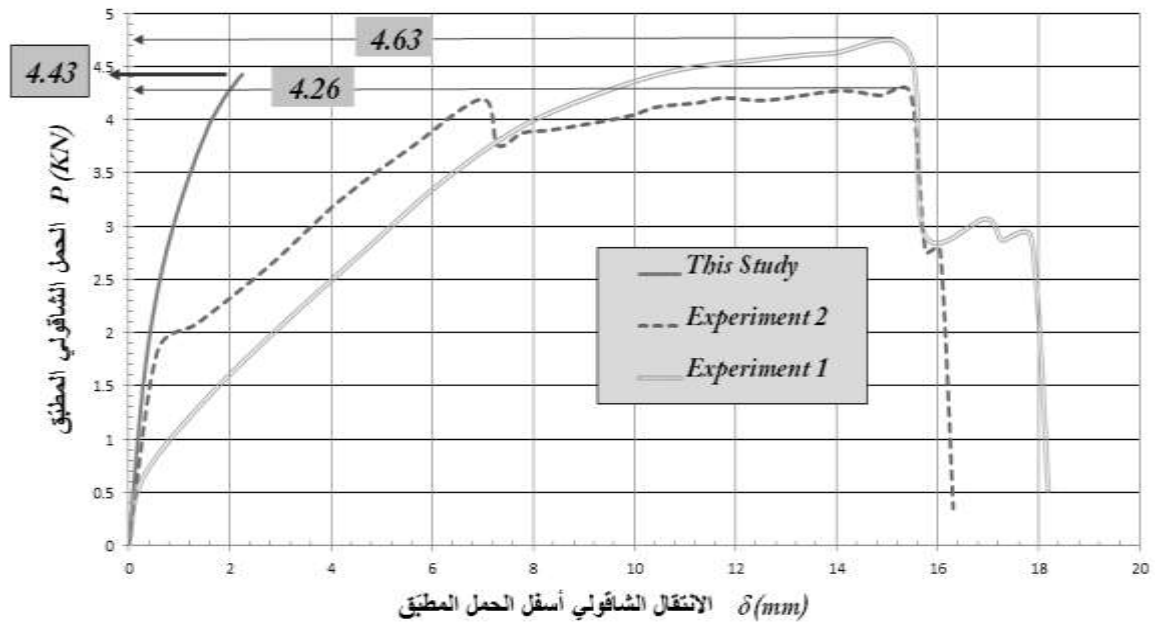
80GPa، ومعامل بواسون 0.2، وتم اعتماد إجهاد الشد (Tensile strength) لشريحة الـ FRP مقداره 1740MPa، وتشوه حدي نسبي (Failure strain) مقداره 0.03658.



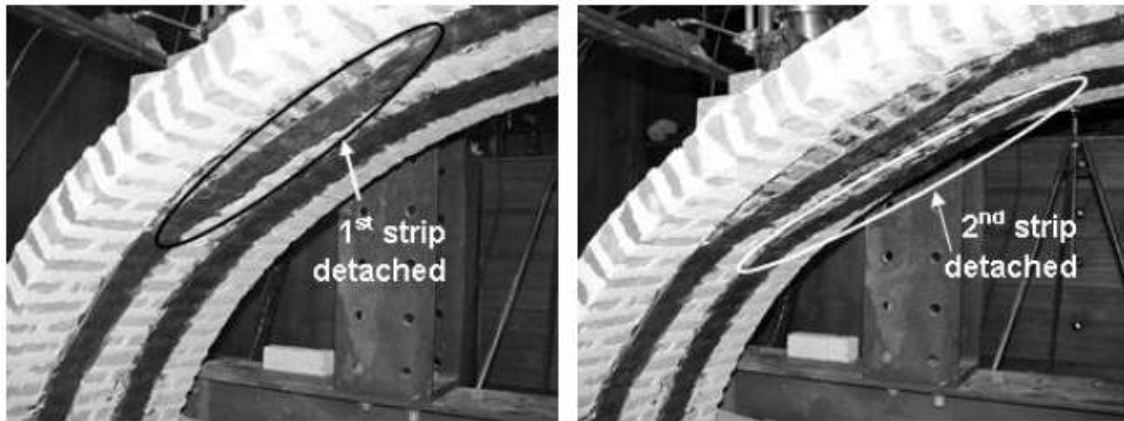
الشكل (10) : تقوية القوس الحجري بشرائح GFRP (Sanchez, 2007) [4]

استُعمل العنصر (T2D2) لنمذجة شرائح الـ GFRP، وهو عبارة عن عنصر خطّي (Truss Element) بعقدتين، ولكل عقدة درجتا حرية (انتقالان في المستوي)، وله نقطة غاوس وحيدة في منتصفه. يبين الشكل (11) منحنى الانتقال الشاقولي أسفل الحمولة المطبقة - الحمولة المطبقة لحالة القوس المقوى، ونلاحظ التطابق في قدرة تحمل القوس مع (Sanchez, 2007) [4]، حيث تم الحصول على قوة حدية مقدارها 4.43kN، وهي قيمة وسطية بين نتيجتي التجربة. لم يتم الحصول على التصرف نفسه لمرحلة مابعد الوصول للقوة الحرجة؛ وذلك بسبب طريقة النمذجة المعتمدة؛ إذ تم فرض التماسك بين شريحة الـ FRP والقوس تماماً (Perfect bond)، بينما أدت التجربة إلى انفصال شريحة الـ FRP تحت القوة الحرجة، الأمر الذي أدى إلى زيادة الانتقال في التجربة بعد الوصول إلى القوة الحدية (الشكل 12) حيث يدل التصرف الحقيقي للقوس المقوى إلى قدرة الـ FRP على زيادة المطاوعة (Ductility) مقارنة مع القوس غير المقوى، وهو إحدى فوائد الـ FRP. إن مقارنة مخططي (الانتقال - الحمولة) لحالتي القوس المقوى (الشكل 11)، والقوس غير المقوى (الشكل 8) تبين أن استعمال الـ FRP أدت إلى زيادة القوة الحدية بمقدار 175%.

يبين الشكل (13) التشوهات النسبية الرئيسية (Principal strain) في القوس المقوى، حيث يظهر التصرف الجديد للقوس بعد التقوية، وتسلسل المفاصل في الدراسة الحالية فالمفصل الأول تشكل في المنطقة المقابلة لمكان تطبيق القوة المركزة، وقد بينت التجربة أن الانهيار حصل نتيجة اكتمال انفصال شريحة الـ FRP (Sanchez, 2007) [4] وهو مالم تتناوله الدراسة الحالية بسبب فرض التماسك الكامل بين شريحة الـ FRP والقوس الحجري عند النمذجة. تمت دراسة تأثير الخصائص البعدية لشريحة الـ FRP، ويبين الشكل (14) تأثير تغيير طول شريحة الـ FRP، حيث تم التغيير ابتداء من الحمل المطبق، ويبين أيضاً أن قدرة تحمل القوس الحجري تزداد في البداية مع زيادة الطول L_f حتى تصل إلى قيمة ($L_f = 0.22 L_0$)، حيث L_0 طول الوجه الداخلي للقوس، عندها يُلاحظ ثبات في قدرة التحمل الأمر الذي يدل على أن استعمال طول صغير (تقوية موضعية - Local strengthening) من شريحة الـ FRP كافٍ لرفع قدرة تحمل القوس الحجري بشكل كبير.



الشكل (11) : مخطط الانتقال الشاقولي أسفل الحمولة المطبقة - الحمولة المطبقة

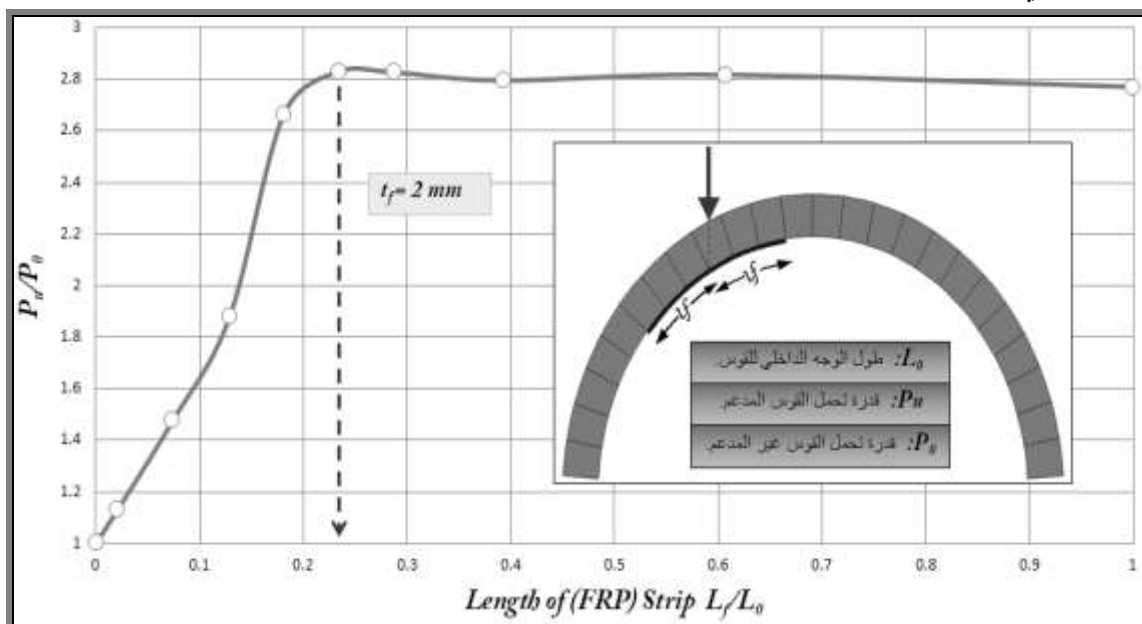


الشكل (12): انفصال شريحة الـ FRP تحت الحمولة المركزة (Sanchez, 2007) [4]

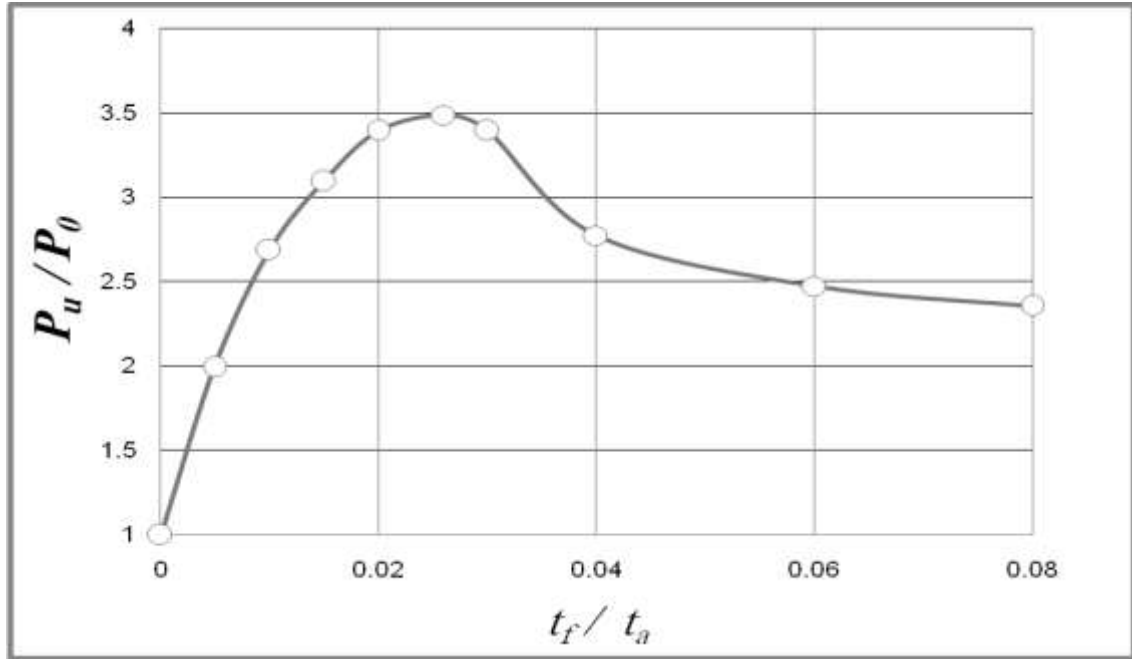


الشكل (13): التشوهات النسبية الرئيسية (Principal strain) للقوس بعد التقوية وتسلسل تشكّل مفاصل ميكانيكية الانهيار.

تم دراسة أثر تغيير سماكة شريحة الـ FRP في قدرة تحمل القوس (الشكل 15). يبين الشكل (15) أن القوة الحدية تزداد حتى قيمة عظمى عند سماكة لشريحة الـ FRP $t_f = 1.3\text{mm}$ ، ثم تبدأ القوة الحدية بالتراجع مع ازدياد السماكة. إن انخفاض القوة الحدية يعود إلى اختلاف ميكانيكية الانهيار للقوس الحجري وتسلسلها عند زيادة السماكة. يبين الشكل (16) التشوهات النسبية الرئيسية، وتسلسل مفاصل الانهيار لحالة السماكة 1.3mm بينما يبين الشكل (17) التشوهات النسبية الرئيسية وتسلسل مفاصل الانهيار لحالة السماكة 4mm . يُلاحظ أن زيادة السماكة أدت إلى تغيير مكان تشكل المفصل الأول (الشكل 17)؛ ليصبح تحت القوة المركزة، وهو انهيار يحدث على الضغط (Crushing Failure). يبين الشكل (15) أن استخدام سماكة صغيرة من شريحة FRP تؤدي إلى رفع قدرة تحمل القوس الحجري بشكل فعال.



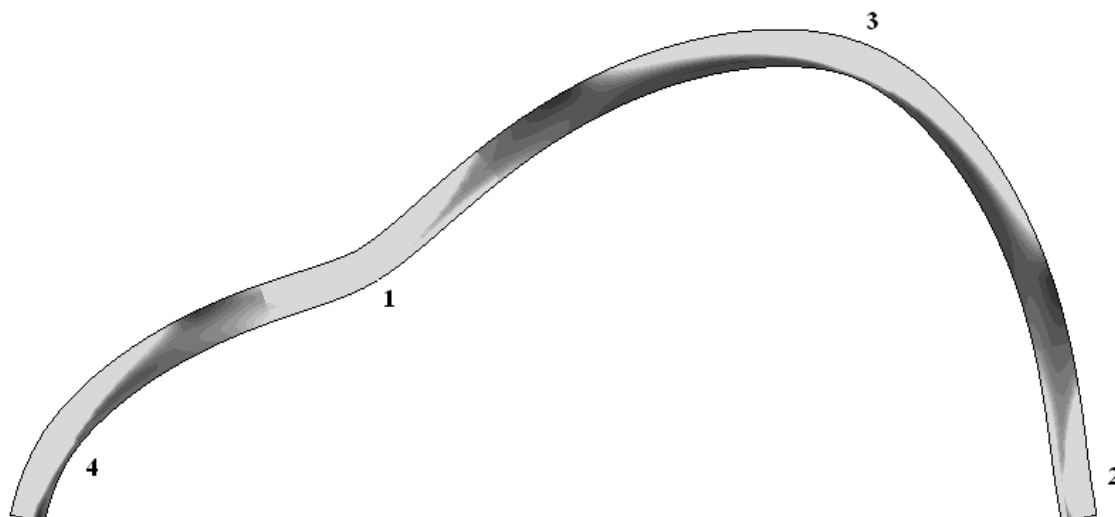
الشكل (14) : تأثير تغيير طول شريحة الـ FRP على القوة الحدية للقوس



الشكل (15) : تأثير تغيير سماكة شريحة الـ FRP في القوة الحدية للقوس



الشكل (16) : التشوهات النسبية الرئيسية للقوس بعد التقوية وتسلسل تشكل مفاصل ميكانيكية الانهيار لحالة السماكة 1.3mm



الشكل (17) : التشوهات النسبية الرئيسية للقوس بعد التقوية وتسلسل تشكل مفاصل ميكانيكية الانهيار لحالة السماكة 4mm

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة الأقواس الحجرية المعرضة لحمولة شاقولية متزايدة عند ربع المجاز (وهي حالة التحميل الأساسية المستخدمة في دراسة الجسور القوسية الحجرية (Bjurstrom and Lasell, 2009) [3]), وتم إجراء نمذجة عددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وتحليل لاخطي يأخذ بالاعتبار لاخطية المادة بغية دراسة تأثير شريحة الـ FRP على رفع قدرة تحمل القوس تحت تأثير الأحمال الشاقولية.

وقد درس تأثير تغيير الخصائص البعدية لشريحة الـ FRP في قدرة تحمل القوس، حيث تم التوصل إلى أن استخدام سماكة صغيرة من شريحة الـ FRP في مواضع محددة عند ربع المجاز من الطرفين، ويطول معين (الشكل 14) يؤدي إلى رفع قدرة تحمل القوس بشكل كبير.

يوصى في الأبحاث القادمة نمذجة القطع الحجرية والمونة بشكل منفصل، ويوصى بأخذ التماسك بين الحجر وشرائح الـ FRP بعين الاعتبار؛ وذلك لدراسة التصرف الحقيقي للقوس بعد الوصول إلى قدرة التحمل الحرجة، وبيان خاصية المطاوعة (Ductility) باستخدام الـ FRP.

توضيح :

تم إجراء هذا البحث في جامعة دمشق كلية الهندسة المدنية كأحد المتطلبات لنيل درجة الماجستير في الهندسة الإنشائية، في الفترة ما بين تشرين الثاني 2010 لغاية نيسان 2012.

المراجع :

1. BS EN 1996-1-1:2005. *EUROCODE 6- Design of Masonry Structures*, Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels: CEN, 2005, 124.
2. BEUERMAN, T.E. *Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges*. Master's Thesis, University: (Universitat Politècnica de Catalunya), Spain, 2009, 106.

3. BJURSTROM, H.; LASELL, J. *Capacity Assessment of a Single Span Arch Bridge with Backfill*. Master's Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2009, 101.
4. SANSHEZ, I.B. *Strengthening of arched masonry structures with composite materials*. Ph.D. Thesis, University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal, 2007, 232.
5. CONCRETE SOCIETY. *Design guidance for strengthening concrete structures guidance for strengthening concrete structures*. Technical Report 55, 2nd.ed., Camberley, UK, 2004, 102.
6. TRIANTAFILLOU, TC. *Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates*. Journal of composites for construction, Vol. 2, N^o.2, 1998, 96-104.
7. GILFILLAN, JR.; GILBERT, SG.; PATRICK, GRH. *The use of FRP composites in enhancing the structural behavior of timber beams*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, N^o. 15, 2003, 1373-1388.
8. BATIKHA, M. *Strengthening of thin metallic cylindrical shells using fibre reinforced polymers*. Ph.D. Thesis, University of Edinburgh, Scotland, UK, 2008, 149.
9. BORRI, A.; CORRADI, M.; VIGNOLI, A. *New materials for strengthening and seismic upgrading interventions*. International Workshop Ariadne 10, Prague, Czech Republic, 2002, 1-24.
10. MILANI, G.; MILANI, E.; TRALLI, A. *Upper bound limit analysis model for FRP-reinforced masonry curved structures. Part II: Structural analyses*. Computers and structures, Vol. 87, 2009, 1534-1558.
11. FORABOSCHI, P. *Strengthening of Masonry Arches with Fibre-Reinforced Polymer Strips*. Journal of composites for construction, Vol. 8, N^o. 3, 2004, 191-202.
12. ABAQUS, Version 6.5-4. *ABAQUS/Standard User's Manual*. ABAQUS Inc., USA, 2005.

ملحق:

(جدول تصنيف القطع الحجرية، جدول حساب قيم المعامل K- انظر العلاقة 1):

الجدول 1 : المتطلبات الهندسية لتصنيف القطع الحجرية (Eurocode 6 [1]، 2005)

	Materials and limits for Masonry Units							
	Group 1 (all materials)	Units	Group 2		Group 3		Group 4	
			Vertical holes				Horizontal holes	
Declared values of thickness of webs and shells (mm)	No requirement		web	shell	web	shell	web	shell
		clay	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 5	≥ 6
		calcium silicate	≥ 5	≥ 10	not used		not used	
		concrete ^b	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Declared value of combined thickness ^a of webs and shells (% of the overall width)	No requirement	clay	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		calcium silicate	≥ 20		not used		not used	
		concrete ^b	≥ 18		≥ 15		≥ 45	
Declared values of thickness of webs and shells (mm)	No requirement		web	shell	web	shell	web	shell
		clay	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 5	≥ 6
		calcium silicate	≥ 5	≥ 10	not used		not used	
		concrete ^b	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Declared value of combined thickness ^a of webs and shells (% of the overall width)	No requirement	clay	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		calcium silicate	≥ 20		not used		not used	
		concrete ^b	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

الجدول 2 : قيم المعامل K (Eurocode 6 K [1]، 2005)

Masonry Unit		General purpose mortar	Thin layer mortar (bed joint $\geq 0,5$ mm and ≤ 3 mm)	Lightweight mortar of density	
				$600 \leq \rho_a \leq 800$ kg/m ³	$800 < \rho_a \leq 1300$ kg/m ³
Clay	Group 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Group 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Group 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Group 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Calcium Silicate	Group 1	0,55	0,80	‡	‡
	Group 2	0,45	0,65	‡	‡
Aggregate Concrete	Group 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Group 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Group 3	0,40	0,50	‡	‡
	Group 4	0,35	‡	‡	‡
Autoclaved Aerated Concrete	Group 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Manufactured Stone	Group 1	0,45	0,75	‡	‡
Dimensioned Natural Stone	Group 1	0,45	‡	‡	‡

‡ Combination of mortar/unit not normally used, so no value given.