جامعة دمشق

كلية الهندسة المدنية

قسم الهندسة الإنشائية

ميكانيكيات انهيار أقواس حجرية مدعمة بالبوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) تحت تأثير الأحمال الشاقولية

Failure Mechanisms of masonry arches strengthened by Fiber Reinforced Polymer (FRP) under vertical loads

دراسة أُعدت لنيل درجة الماجيستير في الهندسة المدنية – قسم الهندسة الإنشائية

إعداد المهندس:

خالد صادق

إشراف الدكتور:

مصطفى بطيخة

دمشق ٢٠١٤

جامعة دمشق

كلية الهندسة المدنية

قسم الهندسة الإنشائية

ميكانيكيات انهيار أقواس حجرية مدعمة بالبوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) تحت تأثير الأحمال الشاقولية

Failure Mechanisms of masonry arches strengthened by Fiber Reinforced Polymer (FRP) under vertical loads

دراسة أُعدت لنيل درجة الماجيستير في الهندسة المدنية – قسم الهندسة الإنشائية

إعداد المهندس: خالد صادق

إشراف الدكتور: مصطفى بطيخة

دمشق ٢٠١٤

ملخص البحث

Abstract

تُعتبر مادة الحجر من أقدم مواد البناء المُستخدمة عبر التاريخ ، فقد تم استخدامها كعناصر إنشائية حاملة في الأبنية القديمة، وتعتبر الأقواس الحجرية عنصر أساس في الأبنية الأثرية والجسور الحجرية القديمة، ولا يزال وقد برزت في الآونة الأخيرة ضرورة تدعيم هذه الأقواس للمحافظة على حيويتها في الخدمة إضافة إلى المحافظة على هذا التراث.

يهدف هذا البحث إلى إجراء دراسة تحليلية للتحقق من فاعلية تدعيم الأقواس الحجرية باستخدام البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) في رفع قدرة تحمل الأقواس الحجرية المعرضة لأحمال شاقولية .

تم في هذا البحث إجراء تحليل عددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) واستخدام التحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الإعتبار لاخطية المادة (Materially Nonlinear Analysis) بالإضافة إلى أخذ **أثر التماسك بين البوليميرات المسلحة بالألياف والمادة الحجرية**، إضافةً إلى أنه **تمت نمذجة الحجر والمونة كل منهما على حدة**. كما تناولت هذه الدراسة أثر تغيير المواصفات البعدية لشرائح الـFRP (السماكة –أماكن التوضع–الطول) على تغير قدرة تحمل هذه الأقواس من أجل تحقيق اقتصادية الاستخدام لمادة الـ FRP بالإضافة إلى الحفاظ على جمالية المادة الأثرية.

بينت هذه الدراسة أهمية تدعيم الأقواس الحجرية بالـFRP، حيث أن التدعيم باستخدام أطوال محددة وسماكات محددة وأماكن محددة أعطى فاعلية كبيرة في زيادة قدرة تحمل القوس.

شكر وتقدير

من لم يشكر الناس ..لم يشكر الله.

لأقدر عبر عن مشاعري لازم أكتب بالعامية ...

الدكتور مصطفى بطيخة ...كان بمثابة أب لاكتر من سنتين ورح يضل ... اتعلمت منو كتير شغلات وصار مثل أعلى الي نحو المثالية البشرية ... بغض النظر عن المعلومات الي ضفلي ياها والي كانت كتير مهمة ..بس انا رح اول انها اقل شي تعلمتا منو ..لأعطي الشغلات التانية الي علمني ياها أهميتها ... والي هي منهجية البحث العلمي ... والأهم الأخلاق والصبر الي بيتمتع فيه الدكتور مصطفى والي تكرر بمواقف كتيرة ... علمتني كتير بتشكرك كتير دكتور مصطفى وبتمنالك التوفيق بكل خطوة بتخطيها...وبتشكرك كتير على مساعدتك ومتابعتك طيلة فترة الرسالة ...

فهرس المحتويات

Table of Contents

فهرس المحتويات I

فهرس الأشكال III

فهرس الجداول VII

الرموز المستخدمة VIIVIII

فهرس المختصرات XIXII

الفصل الأول: مقدمة ١

١-١- مقدمة عن الأقواس الحجرية :(INTRODUCTION TO MASONRY ARCHES) ١

١-٢- مقدمة عن البوليميرات المسلحة بالألياف : ٣

١-٣- مشكلة البحث : (PROBLEM OF THIS RESEARCH) ٥

١-٤- الهدف من البحث وأهميته : (IMPORTANCE AND OBJECTIVE OF THE RESEARCH) ٦

١-٥- طرائق البحث :(METHODS OF THE RESEARCH) ٧

١-٦- محتويات الأطروحة :(CONTENTS OF THESIS) ٧

الفصل الثاني: دراسة مرجعية ٨

٢-١- مقدمة : ٨

٢-٢- المادة الحجرية:(MASONRY MATERIAL) ٨

٢-٢-١- المادة الحجرية وفق الكود الأوروبي:(Masonry Material According To Eurocode) ٨

٢-٢-٢- سلوك المادة الحجرية : (علاقة الإجهاد-التشوه النسبي Stress-Strain Relationship) ١٠

٢-٣- الأقواس الحجرية : (MASONRY ARCHES) ١٢

٢-٣-١- سلوك الأقواس الحجرية : (Masonry Arches Behaviour) ١٣

٢-٣-٢- طرق تحليل الأقواس الحجرية ١٤

٢-٣-٣- ميكانيكيات انهيار الأقواس الحجرية ٢٣

٢-٤- الخصائص الميكانيكية لمركبات البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP): ٢٦

(MECHANICAL PROPERTIES OF FRP COMPONENTS) ٢٦

٢-٤-١ استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت (Using FRP in Strengthening Structures) ٣٢

٢-٤-٢- استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت الحجرية ٣٣٣

٢-٤-٣- سـلوك الأقـواس المقـواة بالـ FRP وميكانيكيـات انهيـارها
(Strengthened Arches Behavior and Collapse Mechanisms) ٣٥
٢-٥- دراسات مرجعية (LITERATURE REVIEW) ٣٦
٢-٥-١- دراسة (Sanchez, 2007) : ٣٦
٢-٥-٢- دراسة (Tao et al .,2011) ٣٩
٢-٥-٣- دراسة (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) ٤٤٤
٢-٦- ملخص : ٥٠

الفصل الثالث: التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة ٥١

٣-١- مقدمة(INTRODUCTION) ٥١
٣-٢- توصيف النموذج (MODEL DESCRIPTION)..... ٥١
٣-٣- التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة ٥٢
٣-٣-١- العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS,VER12-1)..... ٥٢
٣-٣-٢- الشروط المحيطية للنموذج المدروس:(Model's Boundary Conditions)..... ٥٢
٣-٣-٣- الأحمال المطبقة على النموذج:(Load Applied to The Model)..... ٥٣
٣-٣-٤- نوع التحليل المستخدم في النموذج:(The type of analysis) ٥٣
٣-٣-٥- توصيف المواد المستخدمة في النمذجة: Used Material In The Modeling..... ٥٣
٣-٣-٦- تمثيل مادة الـ:FRP (Modelling Of FRP Material) ٦٠
-٣-٣-٧- التماسك بين الحجر والـ FRP :(Cohesion Between FRP And Masonry) ٦٠
٣-٣-٨- المرحلة الأولى من الدراسة : دراسة أثر تقارب خطوط الشبكة :(Mesh Convergence) ٦١
٣-٣-٩- المرحلة الثانية من الدراسة : النموذج المعتمد غير المدعم :(Unstrengthened Model) ٦٢
٣-٣-١٠ المرحلة الثالثة من الدراسة : النموذج المدعم (Strengthened Model)..... ٦٥
٣-٣-١١- المرحلة الرابعة من الدراسة : تأثير تغيير المواصفات البعدية لشرائح الـFRP..... ٦٦

الفصل الرابع: النتائج والتوصيات..... ٧٣

المراجع..... ٧٥

فهرس الأشكال

Figure List

الشكل (١-١): أطلال نيمقاد – الجزائر(سنة ١٠٠ م) ١
الشكل (١-٢): مكونات المادة الحجرية ١
الشكل (١-٣):مبنى الكولسيوم (Colosseum) في روما (سنة ٧٠ م) ٢
الشكل (١-٤):كاتدرائية ميلانو(سنة ١٨٩٠ م) ٢
الشكل (١-٥): قبة الصخرة (سنة ٧٠٥ م) ٣
الشكل (١-٦): خان أسعد باشا (سنة ١٧٣٥ م) ٣
الشكل (١-٧): استخدام الـ FRP في تدعيم العناصر الإنشائية المختلفة **(Taljsten, 2010)** ٤
الشكل (١-٨): استخدام الـ FRP في تدعيم الأعمدة الخشبية (Steiger,2002) ٥
الشكل (١-٩): استخدام الـ FRP في تدعيم الجوائز المعدنية ٥
الشكل (١-١٠): استخدام الـ FRP في تدعيم الأقواس الحجرية (Ricamato,2007) ٥
الشكل (١-١١): استخدام الـFRP في تدعيم القبوات (Borri etal.,2002) ٦
الشكل (١-١٢): استخدام الـ FRP في تدعيم القباب (Foraboschi,2004) ٦

الشكل (٢- ١): منحني الإجهاد –التشوه (σ-ε) للمادة الحجرية (Eurocode 6, 2005) ١١
الشكل (٢- ٢): مكونات القوس الحجري (Holmstrom,2010) ١٣
الشكل (٢- ٣): تمثيل الفعل القوسي باستعمال نموذج لكابل (Beurman,2009 ; بقلة، ٢٠١٣) ١٤
الشكل (٢- ٤): الأشكال الشائعة للكابلات عند تمثيل الفعل القوسي (بقلة ، ٢٠١٣ ;Sanchez,2007) ١٤
الشكل (٢- ٥): طرق تصميم الأقواس الحجرية (Background document.Sustainable Bridges,2007) ١٥
الشكل (٢- ٦): النماذج الهندسية في طريقة الإجهادات الأعظمية b-a ثلاثي المفاصل c-مفصلي d- موثوق من الطرفين e- الإطار الخاص(Background document.Sustainable Bridges,2007) ١٧
الشكل (٢- ٧): موقع خط الضغط ومناطق الضغط في القطاعات (Bjurstrom and Lasell, 2009) ١٨
الشكل (٢- ٨): الشبكة الخاصة (Background document.Sustainable Bridges,2007) ١٨
الشكل (٢- ٩): توزع الإجهادات ضمن المقطع العرضي حسب تغيُّرموقع خط الضغط – قاعدة الثلث الوسطي (Bjurstrom and Lasell, 2009) ١٩
الشكل (٢- ١٠): خطوط الضغط لبعض الأشكال التقليدية للأقواس (Sanchez,2007) ١٩
الشكل (٢- ١١): منطقةالضغط (Bjurstrom and Lasell, 2009) ٢٠

الشكل (٢- ١٢): شكل يوضح ميكانيكية المفاصل الأربعة (Background document.Sustainable Bridges,2007) ٢١
الشكل (٢- ١٣): مواقع المفاصل اللدنة المتشكلة (Background document.Sustainable Bridges,2007) ٢١
الشكل (٢- ١٤): القوس المستوي والقناطر الخاصة(Background document.Sustainable Bridges,2007) ٢١
الشكل (٢- ١٥): إمكانية انزلاق الكتل بين بعضها أو أن تدور حول محورها (Background document.Sustainable Bridges,2007) ٢٢
الشكل (٢- ١٦): طريقة استخدام كتل صلبة لدنة (Background document.Sustainable Bridges,2007) ٢٢
الشكل (٢- ١٧): خط الضغط الأصغري والأعظمي(Beuerman, 2009) ٢٣
الشكل (٢- ١٨): ميكانيكية االنهيارلقوس حجري خاضع لحمل مركز(Sanchez, 2007)..... ٢٣
الشكل (٢- ١٩):ميكانيكية انهيار جسر بريستود (Cavicchi and Gambarotta,2005) ٢٤
الشكل (٢- ٢٠): ميكانيكيات الانهيارللقوس الحجري بتأثيرالحمل المركز مع خط الضغط المحتمل (Beuerman, 2009)..... ٢٤
الشكل (٢- ٢١):ميكانيكيات الانهيارللقوس الحجري بتأثيرالأحمال الموزعة(بقلة،٢٠١٣Foraboschi, 2004;) ٢٥
الشكل (٢- ٢٢):ميكانيكيات الانهيار للأقواس الحجرية بتأثيرالأحمال الأفقية (De Luca et al., 2004) ٢٦
الشكل (٢- ٢٣): مخطط (Stress-Strain) لمادةالـFRP..... ٢٧
الشكل (٢- ٢٤): مجال الإجهاد- التشوه لمختلف أنواع الـFRP (Beuerman, 2009)..... ٢٨
الشكل (٢- ٢٥): الأشكال الشائعة لتوزع الألياف ضمن الـFRP (Batikha, 2008) ٢٩
الشكل (٢- ٢٦): تعريف محاور شريحة الـFRP ذات التوزع المنتظم للألياف (Batikha, 2008) ٢٩
الشكل (٢- ٢٧): مخطط توضيحي لمكونات الـFRP(بقلة ،٢٠١٣) ٣٠
الشكل (٢- ٢٨): العلاقة بين الوزن والحجم للأنواع الشائعة من الـ FRP (Batikha, 2008)..... ٣١
الشكل (٢- ٢٩): تدعيم قبة رباعية (Borri et al.,2002) ٣٢
الشكل (٢- ٣٠): استخدام الـFRP في تدعيم الأعمدة االبيتونية (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004)..... ٣٣
الشكل (٢- ٣١): استخدام البوليميرات في تدعيم المنشآت البيتونية (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004)..... ٣٣
الشكل (٢- ٣٢): الأضرار التي تصيب الأقواس الحجرية (Background document.Sustainable Bridges,2007) ٣٤
الشكل (٢- ٣٣): احتمالات انهيار جائز بيتوني مدعم بالـFRP..... ٣٥
الشكل (٢- ٣٤):تغيُّرموقع خطالضغط بتغيُّرجهة التدعيم (Islam, 2008)..... ٣٥

الشكل (٢- ٣٥):ميكانيكيات الانهيار للقوس الحجري المقوى بشرائح الـFRPمن الوجهالداخلي (a) والخارجي (b) ٣٦

الشكل (٢- ٣٦):انفصال شريحة الـFRPعن الحجر في حالة القوس المقوّى من الوجه الداخلي (Sanchez, 2007) ٣٦

الشكل (٢- ٣٧): نموذج القوس المستخدم في دراسة (Sanchez, 2007)..... ٣٧

الشكل (٢- ٣٨):العلاقة بين القوة -الإنتقال تحت القوة (Sanchez,2007) ٣٧

الشكل (٢- ٣٩):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة (Sanchez,2007)..... ٣٨

الشكل (٢- ٤٠):النموذج المدعم (Sanchez,2007) ٣٨

الشكل (٢- ٤١): العلاقة بين القوة الإنتقال للنماذج المدعمة (Sanchez,2007) ٣٩

الشكل (٢- ٤٢): آلية انهيار القوس المدعم (Sanchez,2007)..... ٣٩

الشكل (٢- ٤٣):النموذج المدروس (Tao et al .,2011)..... ٤٠

الشكل (٢- ٤٤): ميكانكية انهيار القوس غير المدعم (Tao et al .,2011)..... ٤١

الشكل (٢- ٤٥):التشققات الداخلية والخارجية(Tao et al .,2011) ٤١

الشكل (٢- ٤٦):العلاقة بين القوة -الإنتقال القطري تحت القوة قبل وبعد التدعيم(Tao et al .,2011)..... ٤٢

الشكل (٢- ٤٧): انفصال شرائح القوس الشمالي(Tao et al .,2011) ٤٢

الشكل (٢- ٤٨): مناطق انفصال شرائح الـFRP للقوس الجنوبي(Tao et al .,2011) ٤٣

الشكل (٢- ٤٩): المفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الشمالي(Tao et al .,2011) ٤٣

الشكل (٢- ٥٠):لمفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الجنوبي*(Tao et al .,2011)*..... ٤٤٤

الشكل (٢- ٥١):العلاقة بين القوة والإنتقال في كل من الدراستين (بقلة وبطيخة،٢٠١٣ ;Sanchez,2007) ٤٥

الشكل (٢- ٥٢):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في دراسة (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣) ٤٦

الشكل (٢- ٥٣):العلاقة بين القوة والإنتقال في كل من الدراستين (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣ ;Sanchez,2007) للقوس المقوى ٤٧

الشكل (٢- ٥٤):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في القوس المقوى (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣) ٤٧

الشكل (٢- ٥٥):توضع شرائح GFRP واتجاه تزايد الطول الفعال لها(بقلة وبطيخة،٢٠١٣) ٤٨

الشكل (٢- ٥٦):تأثير تغيير طول شرائح الـFRP على قدرة تحمل القوس (بقلة وبطيخة،٢٠١٣)..... ٤٩

الشكل (٢- ٥٧):تأثيرتغييرسماكة الـFRPعلىقدرةتحملالقوس..... ٤٩

الشكل (٣- ١): العنصر المستخدم في نمذجة مادة الحجر(ABAQUS Documentation)..... ٥٢

الشكل (٣- ٢): العنصر المستخدم في نمذجة سلوك المونة (ABAQUS Documentation) ٥٢

الشكل (٣- ٣): شروط استناد القوس الحجري..... ٥٣

الشكل (٣- ٤): أماكن تطبيق الحمل المركز على النموذج المدروس (ABAQUS,Ver12) ٥٣

الشكل (٣- ٥): علاقة الإجهاد - التشوه لسلوك الضغط لمادة الحجر (ABAQUS Documentation)..... ٥٥

الشكل (٣- ٦): منحني الإجهاد - التشوه لسلوك مادة الحجر على الضغط (Sanchez,2007)..... ٥٦

الشكل (٣- ٧): الشقوق الشاقولية في القطع الحجرية في تجربة (Sanchez,2007) ٥٦
الشكل (٣- ٨): مخطط الإجهاد –التشوه النسبي للبيتون على الشد (ABAQUS Documentation ver6.12,2012) ٥٧
الشكل (٣- ٩):علاقة الإجهاد - التشوه -لسلوك مادة الحجر على الشد (ABAQUS Documentation) ٥٨
الشكل (٣- ١٠):علاقة القوة -الإنتقال لسلوك النابض على الضغط ٥٩
الشكل (٣- ١١):أ-العلاقة بين الإجهاد والإنتقال لسلوك النابض على الشد ب- علاقة القوة -الإنتقال لسلوك النابض على الشد..... ٥٩
الشكل (٣- ١٢):اتجاه عمل نوابض القص..... ٦٠
الشكل (٣- ١٣):تمثيل تقريبي للحجر والـGFRP ٦٠
الشكل (٣- ١٤):العلاقة بين إجهاد التماسك والإنزلاق**(CEB-FIB,2001)**..... ٦١
الشكل (٣- ١٥):النماذج المستخدمة في دراسة أثر تقارب خطوط الشبكة ٦٢
الشكل (٣- ١٦):دراسة تقارب خطوط الشبكة (Mesh Convergence) ٦٢
الشكل (٣- ١٧):شكل القوس المستخدم في النمذجة (ABAQUS, ver12-1)..... ٦٣
الشكل (٣- ١٨):مقطع عرضي ومساقط للقوس (ABAQUS ,ver12-1)..... ٦٣
الشكل (٣- ١٩):العلاقة بين القوة -الإنتقال تحت القوة مع مقارنة مع الدراسات المرجعية ٦٤
الشكل (٣- ٢٠):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة أ- الدراسة الحالية ب -(Sanchez,2007)..... ٦٥
الشكل (٣- ٢١):القوس المدعم بشريحتي GFRP ٦٥
الشكل (٣- ٢٢):العلاقة بين القوة والإنتقال للدراسة الحالية والدراسات المرجعية ٦٦٦
الشكل (٣- ٢٣):ميكانيكية انهيار القوس المدعم..... ٦٦
الشكل (٣- ٢٤):النموذج المدعم باستخدام شريحتين GFRPF بعرض 100mm وسماكة 1mm لكل منهما .. ٦٧
الشكل (٣- ٢٥):العلاقة بين القوة - الإنتقال لكل من النماذج غير المدعمة والمدعمة بدون ومع تغيير عرض الشريحة..... ٦٧
الشكل (٣- ٢٦):أثر تغيير سماكة شريحة البوليميرات على قدرة تحمل القوس ٦٨
الشكل (٣- ٢٧):القوس المدعم بشرائح جزئية..... ٦٩
الشكل (٣- ٢٨):دراسة أثر طول شرائح الـFRP ٧٠
الشكل (٣- ٢٩):النماذج المدروسة أ- باستخدام شريحتين ب- ثلاث شرائح ج-أربع شرائح..... ٧١
الشكل (٣- ٣٠):تأثير تغيير الخصائص البعين بين الشرائح..... ٧١
الشكل (٣-٣١): تأثير تغيير العرض والتباعد بين الشرائح..... ٧٢

فهرس الجداول

Table List

الجدول(٢- ١): تصنيف القطع الحجرية وفق الكود الأوروبي (Eurocode 6 ,2005) ٩
الجدول(٢- ٢): قيم المعامل K (Eurocode,2005) ١٠
الجدول(٢- ٣): قيم معامل الأمان γm ١٢
الجدول(٢- ٤):طرق التحليل التي تعمل عليها البرامج الحاسوبية(Background document.Sustainable
(Bridges,2007 ..... ١٦
الجدول(٢- ٥): خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية ٢٦
الجدول(٢- ٦): خصائص الأنواع المختلفة للمواد الرابطة الراتنجية(Batikha, 2008) ٢٧
الجدول(٢- ٧): مقارنة بين مركبات الـFRP (Teng et al., 2002) ٢٨
الجدول(٢- ٨): نسب الكثافة لمركبات الـFRPللمنحنيات المذكورة في الشكل (٢-٢٢) (Batikha, 2008) .. ٣٢

الرموز المستخدمة

Symbols

f_k: المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية المركبة (N/mm^2).

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

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

α, β : ثوابت عددية.

k: ثابت يتعلق بنوع وسماكة المونة وبتصنيف القطع الحجرية

f: المقاومة المتوسطة على الضغط للمادة الحجرية.

f_d: المقاومة المميزة التصميمية على الضغط للمادة الحجرية المركبة

γ_m:معامل أمان يتعلق بصنف المادة الحجرية (Class)

ε_{mu}: التشوه الحدي على الضغط.

ε_{m1}: التشوه الموافق لبدء مرحلة السيلان.

E: معامل المرونة قصير الأمد للمادة الحجرية المركبة

t: ارتفاع المنطقة المستطيلة المضغوطة في القوس الحجري.

N: القوة الناظمية على المقطع العرضي في القوس .

f_c: مقاومة الضغط للحجر.

B : عرض القوس.

d: سماكة القوس.

M: عزم الانعطاف على المقطع العرضي في القوس.

y : السماكة الأصغرية للقوس (mm).

S : مجاز القوس (m).

P : الحمل الشاقولي المركز المطبق على القوس .

f_{fk} :هو إجهاد الشد الأعظمي للـ FRP

ε_f التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع.

E_f : معامل مرونة الـ FRP باتجاه الألياف.

ν_f : معامل بواسون للألياف.

E_m: معامل مرونة المادة الرابطة.

G_m : معامل مرونة القص لصفيحة الـ FRP.

ν_m : معامل بواسون للمادة الرابطة.

E_L : معامل المرونة لصفيحة الـ FRP بالاتجاه الموازي للألياف.

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

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

ν_{LT} : معامل بواسون لصفيحة الـ FRP.

Vf: نسبة حجم الألياف.

Vm: نسبة حجم المادة الرابطة، Vm=1-Vf.

ξ: معامل يسمح بأخذ تاثير طريقة رزم الألياف وتوزُّعها ضمن المادة الرابطة وشروط التحميل بعين الاعتبار،مثلاً تُستخدم قيمة (2 = ξ)في حساب ET، والقيمة (1 = ξ)في حساب GLT.

η: معامل يُعطى بالعلاقة (٢-١٢).

τ_{f1}: إجهاد التماسك الأعظمي بين الحجر والـ FRP .

f_{ctm} : المقاومة المميزة على الشد للمونة .

σ_{to}:الإجهاد الحدي للبيتون على الشد.

L_{arc}: طول القوس الكلي

فهرس المختصرات

Abbriviation's List

FRP : البوليميرات المسلحة بالألياف (Fiber Reinforced Polymers)

FEM : طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method)

MNA : لاخطية المادة . (Materially Nonlinear Analysis)

CDP: Concrete Damage Plasticity .

Ring: (وهو تطبيق حاسوبي يحسب القوة الحدية التي يُمكن أن تُطبق على القوس).

Archie-M : (تطبيق حاسوبي يستخدم في تحليل الأقواس الحجرية)

FEM Systems: (أنظمة طريقة العناصر المحدودة - Finite Element Method)

DEM Systems: (أنظمة طريقة العناصر المنفصلة - Discrete element method)

DDA Systems: (التحليل الديناميكي المضبوط –Drive Dynamic Analysis

Explicit formulae analysis: (تحليل العلاقات المعقدة) .

الفصل الأول

مقدمة

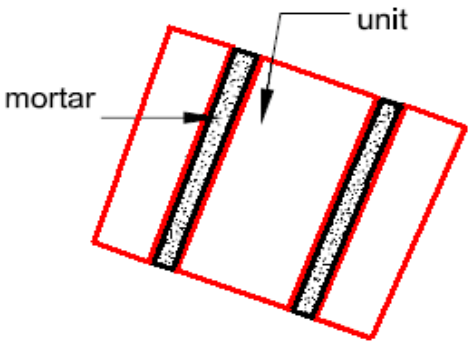
INTRODUCTION

١-١- مقدمة عن الأقواس الحجرية :(Introduction to masonry arches)

تعتبر مادة الحجر(Masonry) من أقدم مواد البناء(Construction Material)، أُنشئ من خلالها العديد من الأبنية التاريخية والتي تميزت بوجود الأقواس(Arches) والقبوات (Vaults)، فالقوس عنصر إنشائي (Structural Element) يهدف إلى نقل الحمولات (Loads) بالإضافة إلى دوره الجمالي(الشكل١-١).

الشكل (١-١): أطلال نيمقاد – الجزائر(سنة ١٠٠ م)

تتألف المادة الحجرية من مادتين أساسيتين وهما: القطع الحجرية (Bricks) والمونة (Mortar) التي تربط بينها(الشكل١-٢)،ولكل من هاتين المادتين صفاتهما الميكانيكية الخاصة،وبالتالي تُعتبر المنشآت الحجرية من المنشآت المختلطة (Composite Material).



الشكل (١-٢): مكونات المادة الحجرية

تطورت طريقة الإنشاء (Construction) باستخدام الحجر عبر القرون، حيث استخدم المصريون والبابليون الأقواس في منشآتهم، وأنشأ الآشوريون أول قبوة في المباني الحجرية، بينما لم يقتصر استخدام الرومان للأقواس الحجرية على المباني وإنما شمل الطرقات والجسوروالمدرجات(الشكل ١-٣).

الشكل (١-٣):مبنى الكولسيوم (Colosseum) في روما (سنة ٧٠ م)

استخدمت العمارة البيزنطية والرومانية الأقواس المستديرة، بينما استخدمت العمارة القوطية (Gothic Architecture) في القرن الثالث عشر الأقواس المدببة (Gothic Arches)، مثل كاتدرائية ميلانو(الشكل١-٤).

الشكل (١-٤):كاتدرائية ميلانو(سنة ١٨٩٠ م)

كما تميزت الحضارة الإسلامية ببناء الأقواس مثل قبة الصخرة التي شيدها الملك عبد الملك من مروان (الشكل ١-٥).

الشكل(١-٥): قبة الصخرة (سنة ٧٠٥ م)

كما انتشرت الأقواس الحجرية والقبوات في سوريا، ومنها على سبيل المثال خان أسعد باشا الذي بناه أسعد باشا والي دمشق في زمن العثمانيين عام ١٧٣٥ م (الشكل ١-٦).

الشكل (١-٦): خان أسعد باشا (سنة ١٧٣٥ م)

لايزال القوس حتى يومنا هذا عنصر إنشائي أساسي ولكن استخدامه امتد ليشمل مواد حديثة مثل الخرسانة المسلحة (Reinforced Concrete) والفولاذ (Steel).

يُمكن أن تتعرض الأقواس الحجرية إلى الحمولات الشاقولية سواءً كانت مركزة (Concentrated load)، أوموزعة (Distributed load) و الأحمال الأفقية كالزلازل (Seismic load) و الرياح (Wind load)، حيث سيتم التركيز في هذا البحث على الحمولات الشاقولية .

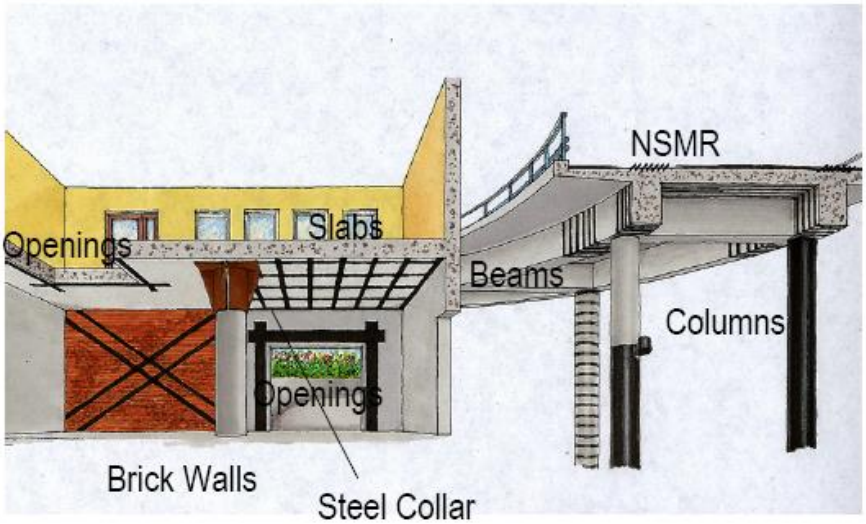
١-٢- مقدمة عن البوليميرات المسلحة بالألياف :

(Introduction to Fiber Reinforced Polymers,FRP)

بدأ انتشارالبوليميرات المسلحة بالألياف FRP في الستينات من القرن الماضي وهي المواد المؤلفة من مادتين مختلفتين متمايزتين أو أكثر، وتكون الخواص الميكانيكية (MechanicalProperties) للمنتج النهائي مغايرة لخواص أي من المواد المؤلفة.

وقد انتشرت البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) انتشارًا هائلاً خلال الفترة القصيرة من عمرها نظرًا لخواصها الميكانيكية الممتازة مقارنة بوزنها المنخفض، فدخلت في المجالات الهندسية، رغم أنها ولدت أصلا في عالم صناعة الطائرات ومركبات الفضاء، حيث تلعب خفة الوزن دورًا رئيسيًا في اختيارالمواد.
تتألف البوليميرات المسلحة بالألياف من ألياف (Fiber) تتميز بمقاومة (Strength) مرتفعة وقساوة (Stiffness) عالية كألياف الكربون (Carbon Fibers) وألياف الزجاج (Glass Fibers) مغمورة في مادة لدنة (Plastic material) أو مادة بوليميرية (Polymer) أو راتنجية (resin)خفيفة الوزن مثل البوليستير(Polyster) والإيبوكسي (Epoxy) تؤلف القالب أو المادة الرابطة (Matrix) بين الألياف، كما تقوم بنقل إجهادات القص (Shear Stresses) بين الألياف، وتأمين الحماية لها من أي مادة ضارة خارجية .

ومن أهم المزايا التي تتصف بها المواد المركبة: **مرونة التطبيق**، إذ يستطيع المهندس أن يصممها بحيث يضع الألياف وفق اتجاه الإجهادات، ممايؤدي إلى استخدام أمثل للمادة، ويؤدي بالتالي إلى انخفاض أكبر في وزن الإنشاء النهائي. وقد انتشرت المواد المركبة في كل التطبيقات الهندسية لاسيما في الإنشاءات التي تتطلب مقاومة مرتفعة مع خفة الوزن. بقي أن يُشار إلى أن السلبية الأكبر للمواد المركبة من الناحية الهندسية هو ضعف قدرتها على تحمل الحريق.
تم استخدام الـFRP في تدعيم العناصر الإنشائية المختلفة (Taljsten, 2010) كالشكل (١-٧) والذي يبين استخدام مادة الـ FRP في تقوية العديد من العناصر الإنشائية من البيتون (Concrete) كالبلاطات والجوائز والأعمدة وجدران والبلوك ، حيث تظهر مرونة التطبيق حتى في حال وجود فتحات.



الشكل (١-٧): استخدام الـFRP في تدعيم العناصر الإنشائية المختلفة **(Taljsten, 2010)**

كما تم استخدام الـFRP في تقوية المنشآت الخشبية ولاسيما الأثرية منها، حيث يبين الشكل (١-٨) عموداً خشبياً مدعماً بالـ FRP (Steiger,2002).

الشكل (١-٨): استخدام الـ FRP في تدعيم الأعمدة الخشبية (Steiger,2002)

كما تم استخدام الـ FRP في تدعيم المنشآت المعدنية، حيث يبين الشكل (١-٩) جائزاً صفائحياً معدنياً يتم تدعيمه بالـ FRP.

الشكل (١-٩): استخدام الـ FRP في تدعيم الجوائز المعدنية

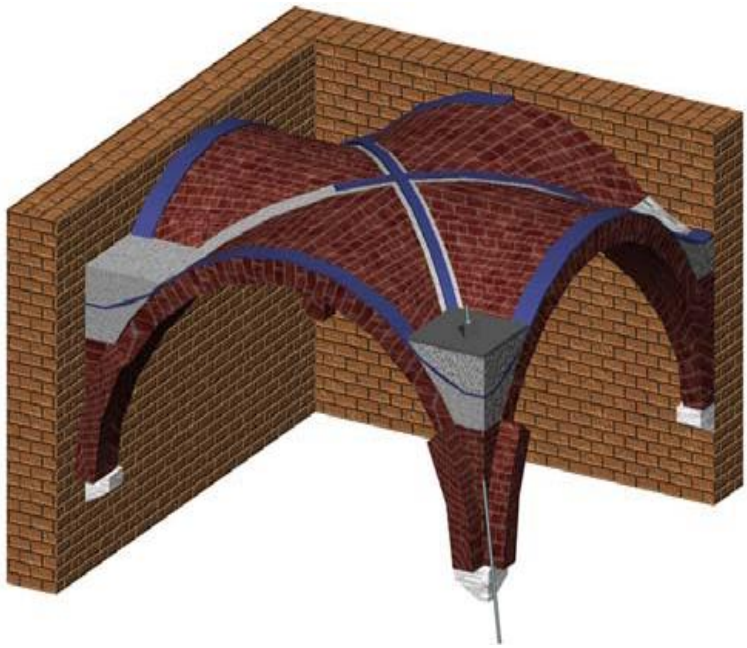
كما تم استخدام الـFRP في تدعيم المنشآت الحجرية بشكل عام والقوسية بشكل خاص حيث يبين الشكل (١-١٠) قوساً حجرياً تم تدعيمه من الخارج.

الشكل (١-١٠): استخدام الـFRP في تدعيم الأقواس الحجرية (Ricamato,2007)

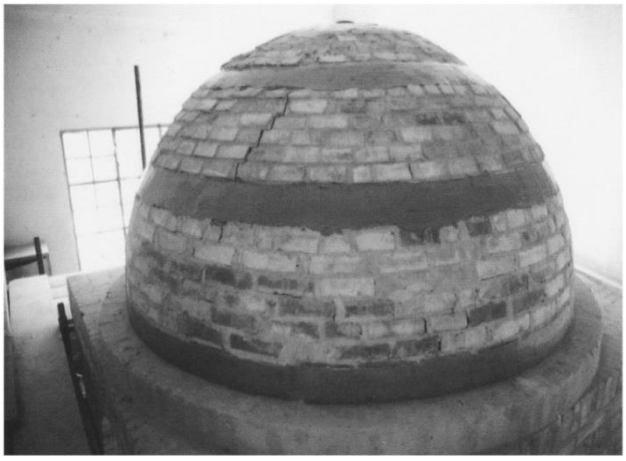
كما يبين الشكل (١-١١) مثالاً لقبوة حجرية تم تدعيمها باستخدام شرائح من الـ FRP، بينما يبين الشكل (١-١٢) استخدام الـ FRP في تدعيم القباب.

١-٣- مشكلة البحث : (Problem of this research)

تكمن إشكالية البحث في ضعف المنشآت الحجرية التاريخية سواء الأثرية منها أو التي لازالت في الخدمة كالجسور القوسية نتيجة العوامل البيئية والإهمال ، لذا لابد من البحث عن مادة فعالة لتقويتها دون أن تغير من الشكل الجمالي لهذه المنشآت .



الشكل (١-١١): استخدام الـFRP في تدعيم القبوات (Borri etal.,2002)



الشكل (١-١٢): استخدام الـFRP في تدعيم القباب (Foraboschi,2004)

١-٤- الهدف من البحث وأهميته : (Importance and objective of the research)

يهدف هذا البحث إلى تقوية الأقواس الحجرية المعرضة للأحمال الشاقولية باستخدام مادة الـFRP.

تأتي أهمية البحث مما أثبتته الدراسات المرجعية من الفاعلية الكبيرة لتدعيم الأقواس الحجرية بالـ FRP بالإضافة إلى إمكانية تطبيق هذه المادة في أماكن موضعية دون أن تؤثر على جمالية القوس الحجري.

كما أن أهمية هذا البحث تكمن في النمذجة المعتمدة من حيث نمذجة كل من القطعة الحجرية والمونة الرابطة كل على حدة مع أخذ أثر التماسك بينهما مما يميز هذا البحث عن الأبحاث الأخرى في الإقتراب من التمثيل الأكثر واقعية للتصرف الإنشائي للقوس الحجري.

١-٥- طرائق البحث :(Methods of the research)

تم في هذا البحث إجراء دراسة تحليلية عددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method –FEM) لقوس حجري معرض لحمل شاقولي مطبق في ربع المجاز و مدعم بالـFRP ، وتم استخدام تحليل لاخطي يأخذ بعين الإعتبار لاخطية المادة (Materially Nonlinear Analysis,MNA).

١-٦- محتويات الأطروحة :(contents of thesis)

تحتوي هذه الأطروحة على الفصول التالية :

الفصل الأول :

يحتوي لمحة عامة عن مفردات البحث إضافةً لإشكالية البحث والهدف منه وأهميته وطرائقه.

الفصل الثاني :

وفيه تم استعراض سلوك مادة الحجر وفقاً للكود الأوروبي، وسلوك الأقواس الحجرية وبعضاً من طرق تصميمها وميكانيكيات انهيارها تحت تأثير الأحمال الشاقولية، إضافة للتعريف بمادة الـFRP (البوليميرات المسلحة بالألياف) (Fiber Reinforced Polymers) واستخدامها في تقوية المنشآت المختلفة بشكل عام والقوسية بشكل خاص ثم تم استعراض بعض الدراسات المرجعية المتعلقة بالبحث.

الفصل الثالث :

يتضمن الدراسة التحليلية العددية التي تمت في هذا البحث باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method, FEM)، من توصيف للنموذج المستخدم وتوصيف سلوك المواد وشروط الإستناد والأحمال المطبقة ثم مناقشة النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة، حيث تمت دراسة قوس حجري غير مدعم تحت تأثير حمل مركز عند ربع المجاز، ثم تم تدعيم القوس بالـFRP ثم تم تغيير المواصفات البعدية لشرائح الـFRP.

الفصل الرابع :

يلخص النتائج التي تم التوصل إليها في الفصول السابقة إضافة إلى التوصيات لأعمال مستقبلية .

الفصل الثاني

دراسة مرجعية

Literature Review

٢-١- مقدمة :

تم في هذا الفصل استعراض المادة الحجرية وفقاً للكود الأوروبي، وسلوك المادة الحجرية بشكل عام والأقواس الحجرية بشكل خاص، ثم تم التطرق إلى طرق التحليل الإنشائي المتبعة لتحليل الأقواس الحجرية، كما تم التعريف بالبوليميرات المسلحة بالألياف واستخدامها في تدعيم المنشآت الهندسية بشكل عام والحجرية منها بشكل خاص، ثم تم التعرف على سلوك الأقواس الحجرية المقواة بالـ FRP، في النهاية تم استعراض دراسات مرجعية متعلقة بالبحث.

٢-٢- المادة الحجرية:(Masonry Material)

٢-٢-١- المادة الحجرية وفق الكود الأوروبي:(Masonry Material According To Eurocode)

تتكون المنشآت الحجرية من عناصر إنشائية مركبة غير متجانسة وهي القطع الحجرية (Bricks) والمونة (Mortar) التي تربط بينها.

يُمكن أن تكون القطع الحجرية مُشكلة من الصلصال– سيليكات الكالسيوم- البيتون المجفف بالفرن – البيتون المهوى (Autoclaved Aerated Concrete)، الحجر الصناعي المصمت(Manufactured Stone)، أو مشكّلة طبيعياً(Dimensioned natural stone units). تم تقسيم القطع الحجرية (Masonry Units) في الكود الأوروبي (Eurocode 6, 2005) إلى أربعة مجموعات (Groups) بحسب حجم الفراغات (Holes) وشكل توضعها (أفقي أو شاقولي)، ونوع مادة القطع الحجرية: سيليكات الكالسيوم (Calcium Silicate)، صلصال(Clay)، بيتون(Concrete) كما في الجدول (٢-١).

	Materials and limits for Masonry Units							
	Group 1 (all materials)		Group 2		Group 3		Group 4	
		Units	Vertical holes				Horizontal holes	
Volume of all holes (% of the gross volume)	≤ 25	clay	> 25; ≤ 55		≥ 25; ≤ 70		> 25; ≤ 70	
		calcium silicate	> 25; ≤ 55		not used		not used	
		concrete [b]	> 25; ≤ 60		> 25; ≤ 70		> 25; ≤ 50	
Volume of any hole (% of the gross volume)	≤ 12,5	clay	each of multiple holes ≤ 2 gripholes up to a total of 12,5		each of multiple holes ≤ 2 gripholes up to a total of 12,5		each of multiple holes ≤ 30	
		calcium silicate	each of multiple holes ≤ 15 gripholes up to a total of 30		not used		not used	
		concrete[b]	each of multiple holes ≤ 30 gripholes up to a total of 30		each of multiple holes ≤ 30 gripholes up to a total of 30		each of multiple holes ≤ 25	
Declared values of thickness of webs and shells (mm)	No require-ment		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 require-ment	clay	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		calcium silicate	≥ 20		not used		not used	
		concrete [b]	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

الجدول ٢-١: تصنيف القطع الحجرية وفق الكود الأوروبي(Eurocode 6, 2005)

تُحسب المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية المركبة من العلاقة (٢-١) (Eurocode 6, 2005):

$$f_k = k.{f_b}^{\alpha}.{f_m}^{\beta} \qquad (٢-١)$$

حيث:

f_k: المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية المركبة (N/mm^2).

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

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

α, β : ثوابت عددية.

k: ثابت يتعلق بنوع وسماكة المونة وبتصنيف القطع الحجرية و تؤخذ قيمه من الجدول (٢-٢). في حال كانت الأحمال مطبقة بشكل موازي لاتجاه المونة يتم ضرب قيم المعامل K بـ(0.5).

Masonry Unit		General purpose mortar	Thin layer mortar (bed joint ≥ 0,5 mm and ≤ 3 mm)	Lightweight mortar of density	
				$600 \le \rho_d \le 800$ kg/m^3	$800 < \rho_d \le 1\,300$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.					

الجدول(٢- ٢): قيم المعامل K (Eurocode,2005)

يمكن تبسيط العلاقة (٢-١) بحسب المونة المستخدمة كمايلي:

- في حالة العناصر الحجرية ذات مونة خفيفة الوزن (LightWeight Mortar) ومستخدمة بشكل عام (General Purpose):

$$f_k = k.f_b^{0.7}.f_m^{0.3} \qquad (٢-٢)$$

- في حالة العناصر الحجرية ذات طبقة رقيقة من المونة (بسماكة بين 0.5mm - 3mm) والقطع الحجرية من الصلصال من المجموعة ١ أو ٤ أو القطع الحجرية من سيليكات الكالسيوم أو القطع البيتونية المجففة بالفرن والمهوّاة:

$$f_k = k.f_b^{0.85} \qquad (٣-٢)$$

- في حالة العناصر الحجرية ذات طبقة رقيقة من المونة (بسماكة بين 0.5mm - 3mm)، القطع الحجرية من الصلصال من المجموعة ٢ أو ٣ :

$$f_k = k.f_b^{0.7} \qquad (٤-٢)$$

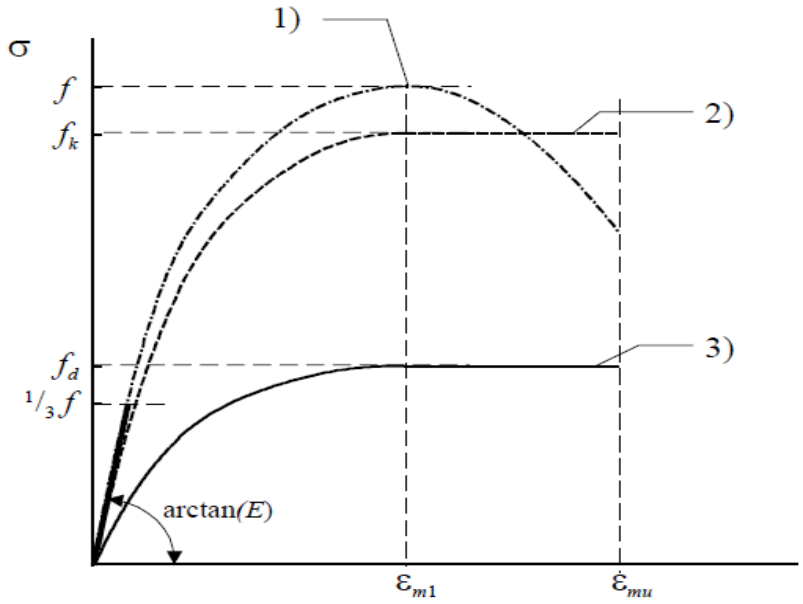
٢-٢-٢- سلوك المادة الحجرية : (علاقة الإجهاد-التشوه النسبي Stress-Strain Relationship)

يعطي الكود الأوروبي (Eurocode 6, 2005) ثلاثة منحنيات لتوصيف سلوك المادة الحجرية على الضغط(σ-ε) كما هو مبين بالشكل (٢-١)، حيث (بقلة ،٢٠١٣):

المنحني (١):هو المنحني النموذجي (Typical) والذي يعطي المقاومة المتوسطة على الضغط للمادة الحجرية(f). هذا المنحني يفترض أن السلوك يبقى خطياً حتى الوصول إلى إجهاد مقداره ثلث المقاومة المتوسطة (1/3f) بعد ذلك تدخل المادة في المرحلة اللاخطية.

المنحني(٢): هو المنحني المعدّل (Idealized Diagram /Parabolic-Rectangular) والذي يعطي المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية (f_k)، هذا المنحني يفترض أن سلوك المادة يبقى خطياً حتى إجهاد (1/3 f) ثم يدخل المرحلة اللاخطية ويكون السلوك بشكل قطع مكافئ حتى الوصول لقيمة إجهاد (f_k) عندها تدخل المادة مرحلة صغيرة ومحدودة من السيلان.

المنحني(٣): هو المنحني التصميمي(Design Diagram) والذي يعطي المقاومة التصميمية على الضغط للمادة الحجرية (f_d).



الشكل (٢- ١): منحني الإجهاد –التشوه (σ-ε) للمادة الحجرية (Eurocode 6, 2005)

حيث :

f_k: المقاومة المميزة على الضغط للمادة الحجرية المركبة.

f_d:المقاومة المميزة التصميمية على الضغط للمادة الحجرية المركبة ونحصل عليها من العلاقة (٢-٥):

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \qquad (٢-٥)$$

γ_m :معامل أمان يؤخذ من الجدول (٢-٣) وهو يتعلق بصنف المادة الحجرية (Class)، فقد تم تقسيم المادة الحجرية إلى خمسة أصناف (Class) تبعاً لطريقة التنفيذ، ومدى جودة ومراقبة التنفيذ.

Material		γ_M Class				
		1	2	3	4	5
	Masonry made with:					
A	Units of Category I, designed mortar[a]	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
B	Units of Category I, prescribed mortar[b]	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
C	Units of Category II, any mortar[a, b, e]	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0
D	Anchorage of reinforcing steel	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
E	Reinforcing steel and prestressing steel	1,15				
F	Ancillary components[c, d]	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
G	Lintels according to EN 845-2	1,5 to 2,5				

الجدول(٢- ٣): قيم معامل الأمان γm

ε_{mu} : التشوه الحدي على الضغط، تتعلق قيمته بالمجموعة (Group) التي تنتمي لها القطع الحجرية (الجدول ٢-١) كمايلي:

من أجل المجموعة (١): $\varepsilon_{mu} = -0.0035$

من أجل المجموعة (2,3,4): $\varepsilon_{mu} = -0.002$

ε_{m1} : التشوه الموافق لبدء مرحلة السيلان.

$\varepsilon_{mu} = -0.0028$ (Hendry et al., 2004)

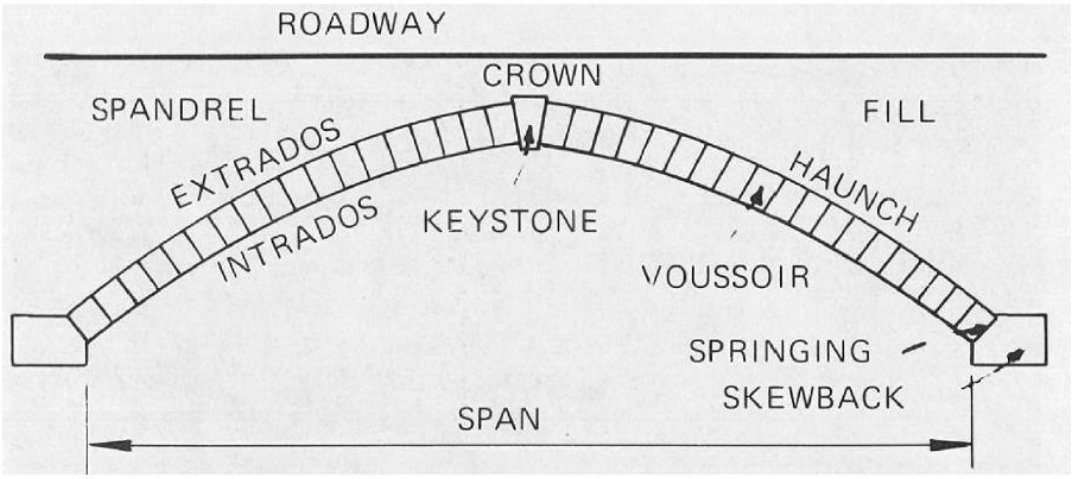
E :معامل المرونة قصير الأمد للمادة الحجرية المركبة ويعطى بالعلاقة (٢-٦).

$$E = k_e . f_k \quad : k_e = 1000 \qquad (٢-٦)$$

بالنسبة لسلوك المادة على الشد فقد قام الكود الأوروبي (Eurocode 6, 2005) بإهمال مقاومة المادة الحجرية على الشد بالاتجاه المتعامد على مستوي المونة واعتبارها مساوية للصفر.

٢-٣- الأقواس الحجرية : (Masonry Arches)

يبين الشكل (٢-٢) تعريفاً بمكونات القوس الحجري حيث يسمى السطح الداخلي (Intrados) والسطح الخارجي للقوس (Extrados)، يتم إغلاق القوس من الأعلى بقطعة من الحجر اسمها (Crown). الجدار أعلى القوس يُسمى (Spandrel) والمجاز الافقي (Span) .



الشكل (٢- ٢): مكونات القوس الحجري (Holmstrom,2010)

٢-٣-١- سلوك الأقواس الحجرية : (Masonry Arches Behaviour)

تعمل الأقواس بشكل أساسي على الضغط (Compression)، وذلك بسبب ردود الأفعال الأفقية (Horizontal Reactions) في المساند (Supports) والتي تسبب قوى ناظمية (Axial Forces) في كافة مقاطع القوس، لضمان سلوك مقبول للقوس، يجب على هذه القوى أن تكون أقرب ما يمكن لمركز ثقل المقطع العرضي، فعزوم الانعطاف (Bending Moments) غير المحبذة تنشأ نتيجة لامركزية (Eccentricity) القوة الناظمية (بقلة، ٢٠١٣ ; Beuerman,2009).

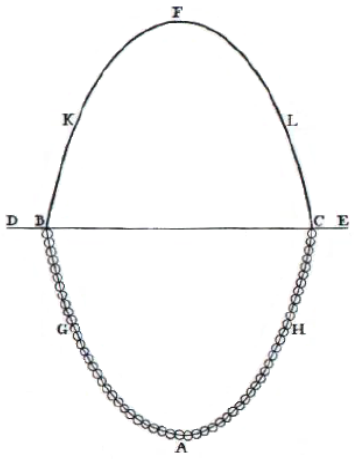
قام Robert Hooke عام ١٦٧٥ بتمثيل الفعل القوسي كمايلي:

عندما يتم تعليق كابل (Cable) بين نقطتين فإنه يتخذ شكل السلسال (Catenary Shape) تحت تأثير وزنه الذاتي (الشكل٢-٣) وعندها يكون خاضعاً لشدٍ صافٍ، ولو تخيلنا أن هذا السلسال جسم صلب وتم عكس جهته لتصبح ذروته نحو الأعلى عندها سيعمل وزنه بالاتجاه العكسي وسيتعرض الكابل عندها لضغطٍ صافٍ. أي أن هذا الشكل (السلسال) هو الشكل الأمثل للقوس من أجل مقاومة وزنة الذاتي. وعندما يكون القوس خاضعاً لحمولات أخرى غير الوزن الذاتي فإن الشكل المطلوب للقوس يمكن الحصول عليه بتطبيق حمل مكافئ على نموذج الكابل. عند إضافة عدد كبير من الأحمال على الكابل فإنه سيتخذ أحد الأشكال الثلاثة الشائعة (بقلة،٢٠١٣ ; Sanchez,2007):

الأول هو شكل القطع المكافئ (Parabola)، نحصل عليه بتطبيق أوزان متساوية بمسافات أفقية متقاربة على كامل مجاز الكابل (الشكل ٢-٤-a).

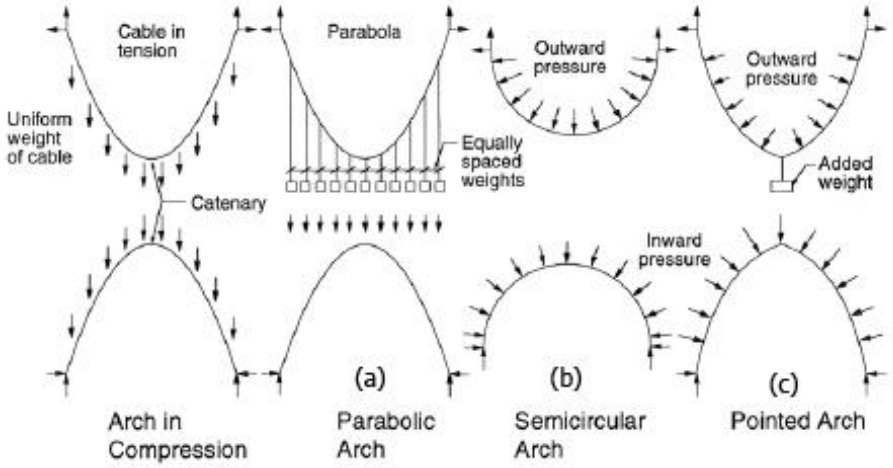
الثاني هو القوس الدائري (Circular Arc)، نحصل عليه من تطبيق أحمال قطرية متقاربة ومتساوية التباعدات فيما بينها (الشكل ٢-٤-b).

الثالث هو القوس قوطي الشكل (Gothic Arch)، نحصل عليه من تطبيق حمل مركز في وسط المجاز بالإضافة للأحمال القطرية المتساوية (الشكل ٢-٤-c).



Robert Hooke's anagram pertaining to the solution of the equilibrium in an arch.

الشكل (٢- ٣): تمثيل الفعل القوسي باستعمال نموذج لكابل (Beurman,2009 ; بقلة، ٢٠١٣)



الشكل (٢- ٤): الأشكال الشائعة للكابلات عند تمثيل الفعل القوسي (بقلة ، ٢٠١٣ ;Sanchez,2007)

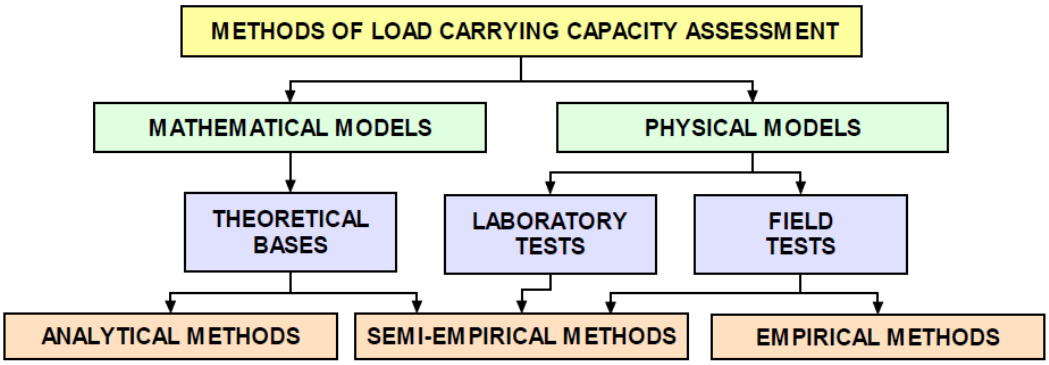
إن الحالة العملية للأحمال المطبقة على الأقواس هي أحمال شاقولية موزعة بانتظام، وبالتالي إن شكل القطع المكافئ هو الأنسب، ومع ذلك قد تم استخدام الأقواس نصف الدائرية وغيرها على نطاق واسع نظراً للسماكات الكبيرة المستخدمة وبالتالي خط الضغط (قطعيّ الشكل) يبقى محصوراً ضمنها (بقلة،٢٠١٣ ;Bjurstrom and (Lasell, 2009;Beuerman,2009

٢-٣-٢- طرق تحليل الأقواس الحجرية

(Analysis Methods of Masonry Arches)

إن التحليل الإنشائي هو عبارة عن وصف عام لتصرف المنشأ تحت تأثير القوى الخارجية، إن بعض طرق التحليل تُعطي توزع القوى الداخلية، وبعضها يتنبأ بأنماط الإنهيار أو يشير إلى مواقع تشكل المفاصل اللدنة ولكنها جميعاً تُفيد في تحديد قدرة تحمل القوس الحجري.

يبين الشكل (٢-٥) التقسيم الأساسي للطرق المستخدمة في تحديد قدرة تحمل القوس الحجري حيث تُقسم إلى طرق رياضية، ونماذج فيزيائية للمنشأ(Background document.Sustainable Bridges,2007).



الشكل (٢- ٥): طرق تصميم الأقواس الحجرية (Background document.Sustainable Bridges,2007)

إن التصنيف المقترح يميز طرق التحليل ضمن إطار المنهجية العامة (General approach) التي تقتضي تقسيم الشقين السابقين إلى ثلاث مجموعات : طرق تحليلية – طرق نصف تجريبية – طرق تجريبية، ترتكز المجموعة الأولى على تحليل نموذج رياضي مُنشأ بناءً على الأسس النظرية، و ترتكز الطرق نصف التجريبية على كل من الطرق الفيزيائية والرياضية المُنشأة بناءً على الأسس النظرية والنتائج التي تم الحصول عليها في المختبر، أما الطرق التجريبية فترتكز فقط على النموذج الفيزيائي ونتائج الاختبارات الحقلية.

يوجد العديد من الأنماط المتنوعة لطرق التحليل المتبعة لتحليل منشآت الأقواس الحجرية كمرحلة أولى أو مستوى أول (First level). للتصنيف المُقترح تم الأخذ بعين الإعتبار خوارزمية معيارية تتلاءم مع المنشأ وكمستوى أدنى (Low level) تم الأخذ بعين الإعتبار النماذج الممكنة من الناحية الهندسية والمواد.

الطرق التحليلية يُمكن أن تُقسم إلى (Background document.Sustainable Bridges,2007):

- طريقة الإجهادات الأعظمية (The maximum stress analyses):وفيها نجد النماذج التالية:
  - عصب القوس المرن (Elastic arch rib).
  - عصب القوس غير المرن (Inelastic arch rib).
  - الإطار الخاص المرن (Elastic spatial frame)
- طرق خط الضغط :(Thrust Line Analysis) وفيها :
  - خط الضغط (Thrust Line).
  - منطقة الضغط (Zone of Thrust).
  - شبكة السكة المعلقة (Funicular network).
- طرق الميكانيكيات : (The mechanism methods) وفيها:
  - الكتل الحجرية الصلبة (Rigid blocks).
  - الكتل الحجرية اللدنة الصلبة (Rigid-plastic blocks).
  - الكتل الحجرية المتعلقة بالحجم (Volumetric blocks).

يوجد للطرق التحليلية تمثيل رياضي في تطبيقات الحاسوب التي تُعطي غالباً حلولاً منفردة.

هذه التطبيقات تُعطي نظرة شاملة أو منهجية شمولية من التحليل لجميع منشآت الأقواس الحجرية مع إمكانية اعتبار التفاعل بين القوس والتربة فوقه وحتى الجدران وتغيير الإستنادات.

أكثر التطبيقات شهرة وشيوعاً :

- Ring (وهو تطبيق حاسوبي يحسب القوة الحدية التي يُمكن أن تُطبق على القوس).
- Archie-M : (تطبيق حاسوبي يستخدم في تحليل الأقواس الحجرية).
- FEM Systems: (أنظمة طريقة العناصر المحدودة -Finite Element Method)
- DEM Systems: (أنظمة طريقة العناصر المنفصلة - Discrete element method)
- DDA Systems: (التحليل الديناميكي المضبوط –Drive Dynamic Analysis)
- Explicit formulae analysis: (تحليل العلاقات التي تعتمد على الزمن)

تستخدم هذه المنهجيات الحاسوبية طرق التحليل المختلفة الموضحة بالجدول (٢-٤)حيث أن التطبيق FEM Systems يتوافق مع طرق التحليل المختلفة (الإجهادات الأعظمية-خط الضغط- طرق الميكانيكيات) بينما التطبيقاتDEM Systems أو DDA Systems أو Explicit Formulae يتوافق فقط مع (الإجهادات الأعظمية- طرق الميكانيكيات)، أما التطبيق Archie-M يتوافق مع طريقة خط الضغط، والتطبيق RING يتوافق مع الطرق الحركية (طرق الميكانيكيات).

Computer-based applications	Analytical methods		
	Maximum stress analysis	The thrust line analysis	The mechanism method
Archie-M	–	✓	–
RING	–	–	✓
FEM systems	✓	✓	✓
DEM systems	✓	–	✓
DDA systems	✓	–	✓
Explicit formulae	✓	–	✓

الجدول(٢- ٤):طرق التحليل التي تعمل عليها البرامج الحاسوبية(Background document.Sustainable Bridges,2007)

يوجد طريقة أخرى منهجية لتحليل الأقواس الحجرية وذلك باستخدام الطرق نصف التجريبية (semi-empirical methods)، على أي حال ترتكز هذه الطرق على التقنيات التجريبية مثل اختبارات المختبر و اختبارات حقلية تُشكل عادةً علاقات بسيطة وكمثال للطرق نصف التجريبية طريقة المؤسسة الهندسية العسكرية

- The MEXE method (Military Engineering Experimental Establishment)

سيتم في هذا البحث تناول الطرق التحليلية:(Background document.Sustainable Bridges,2007)

إن كلاً من طريقة الإجهادات الأعظمية وطريقة خط الضغط المطبقة في تحليل الأقواس الحجرية (تُعتبر منهجية سكونية ،بينما طريقة الميكانيكيات هي منهجية حركية.

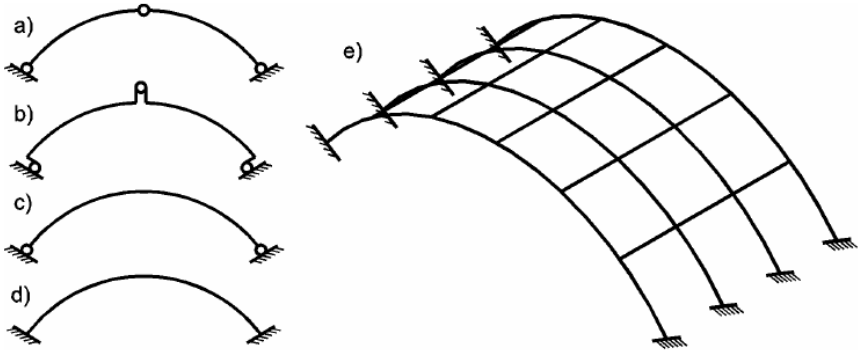
❖ طريقة الإجهادات الأعظمية (The maximum stresses analyses)

ترتكز هذه الطريقة على تحديد الإجهادات الأعظمية في عناصر المنشأ الحجري مع المقارنة مع قدرة تحمل المادة حيث يتم تطبيق معادلات التوازن السكونية.

يوجد العديد من النماذج المستخدمة في هذه الطريقة، جميعها تتألف من عناصر قضبان أحادية البعد، والإختلافات في الخوارزميات المطبقة في هذه الطريقة تعتمد على نموذج المادة المستخدم (مرنة أو لامرنة).

هذه الطرق تُستخدم بشكل أساسي للمنشآت القوسية أحادية المجاز أو متعددة المجازات بشرط معالجة كل مجاز على حدة.

يُمكن أن يكون النموذج المُستخدم **عصب قوسي** (Arch rib) وفيه يكون القوس موثوقاً من النهايتين أو ثنائي أو ثلاثي المفاصل وتتم دراسة القوس في واحدة العرض حصراً، أو إطار خاص (Special frame) وفيه يكون النظام الستاتيكي للقوس: مجموعة من الأعصاب موثوقة النهايتين المدعومة بعناصر جوائز عرضية، حيث أن كل عصب من الأعصاب يمثل العرض الموافق له من القوس (الشكل٢-٦).

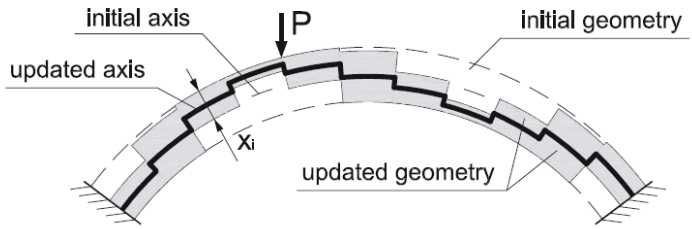


الشكل (٢- ٦): النماذج الهندسية في طريقة الإجهادات الأعظمية a-b ثلاثي المفاصل c-مفصلي d- موثوق من الطرفين e- الإطار الخاص(Background document.Sustainable Bridges,2007)

إن هذه النماذج البسيطة لتحليل مجازات الأقواس الحجرية تتعامل معهم على أساس أعصاب قوسية مصنعة من مادة مرنة .هذه الإفتراضات تجعل إجراءات التحليل مسألة نموذجية للحسابات الستاتيكية.

كطريقة مستخدمة فإنها تعطي نتائج مقبولة في القضايا التي يكون فيها الإجهادات (Stresses) مُثارة بحمولات أقل بشكل جازم من قدرة تحمل المادة . ،كما أن اختيار طريقة الحل يعتمد على الإستناد، إذا تم تقريره ستاتيكياً يُمكن الحل بمعادلات توازن للقوى الأفقية والشاقولية والعزوم (الشكل ٢-٦-a-b). إذا كانت الجملة غير مقررة ستاتيكياً (الشكل ٢-٦-c-d)، يُمكن حل القوس بشكل عام بمكاملة معادلات التوازن بإحدى طرق القوى أو الإزاحة. في النهاية تتم مقارنة الإجهادات مع المقاومة المتبقية للمادة و بهذه الطريقة يُمكن تخمين القوة الموافقة لقدرة تحمل القوس، كما تعطي هذه الطريقة فكرة عن أماكن تشكل المفاصل اللدنة (خصوصاً في القوس الموثوق من الطرفين). النموذج الآخر الذي يُمكن استخدامه هو العصب غير المرن (Inelastic Arch rib) وهذه الطريقة ملائمة للأخذ بعين الإعتبار التصرف غير المرن للحجر (لا يوجد مقاومة شد)، باستخدام الحسابات السكونية يتم تقسيم القوس إلى قطاعات (Segments) كما الشكل (٢-٧)، وتتم الحسابات في العقد الداخلية بين هذه القطاعات. يتم تطبيق تزايد للحمل الكلي وإجراء تحليل مرن يعطينا القوى الداخلية في العقد، ومن هذه القوى يتم حساب السماكة الفعالة (x_i) لكل قطاع من قطاعات القوس باستخدام قيم وسطية للقوى الداخلية (قوة من كل جانب على طرفي القطاع). السماكة الفعّالة هي السماكة دون منطقة الشد المحتملة أو منطقة التحطّم (Crushed Area)، ويتم اعتماد هذه السماكة للقطاع المدروس قبل تطبيق التزايد اللاحق

للحمولة. يتم تكرار هذه العملية حتى يتم تطبيق كامل الحمل على القوس. تفترض هذه الطريقة صلابة لانهائية بين كل قطاعين متجاورين.

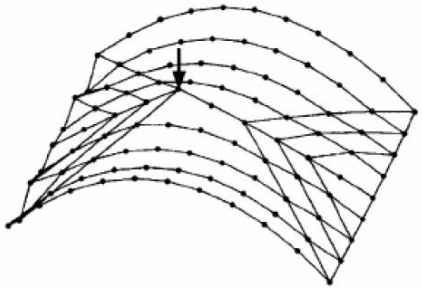


الشكل (٢- ٧): موقع خط الضغط ومناطق الضغط في القطاعات (Bjurstrom and Lasell, 2009)

❖ طريقة خط الضغط: (Thrust Line Analysis)

إن طريقة خط الضغط هي طريقة سكونية، تقوم بتحليل موقع خط الضغط ضمن القوس. إن خط الضغط يبين مواقع محصلة القوة الناظمية ضمن المقطع العرضي، والذي يعطينا لامركزية هذه القوى، بعدها يتم حساب قدرة تحمل القوس بتحديد المنطقة التي يُسمح لمحصلة القوة الناظمية أن تكون مطبقة ضمنها.

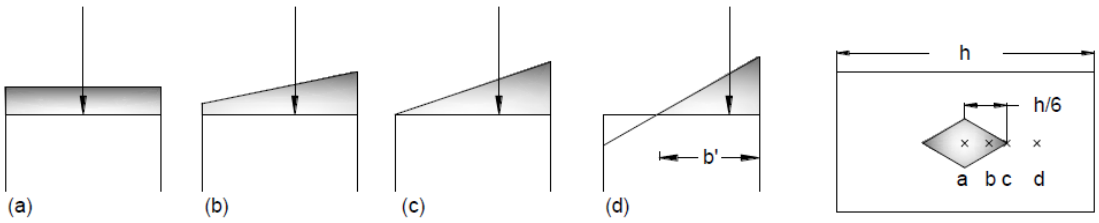
في هذه الطريقة يتم تحليل موقع خط الضغط (The line of thrust)، كما يتم تعريف الحمولة الحدية الموافقة لقدرة التحمل للقوس في هذه الطريقة بحدود موقع خط الضغط. من النماذج المُستخدمة في هذه الطريقة **نموذج العصب القوسي أو الشبكة الخاصة (Special Network)** وفيها يكون القوس موثوق النهايتين وعلى شكل شبكة مؤلفة من قضبان بشكل هندسي يتلائم مع القوى المطبقة (الشكل ٢-٨).



الشكل (٢- ٨): الشبكة الخاصة (Background document.Sustainable Bridges,2007)

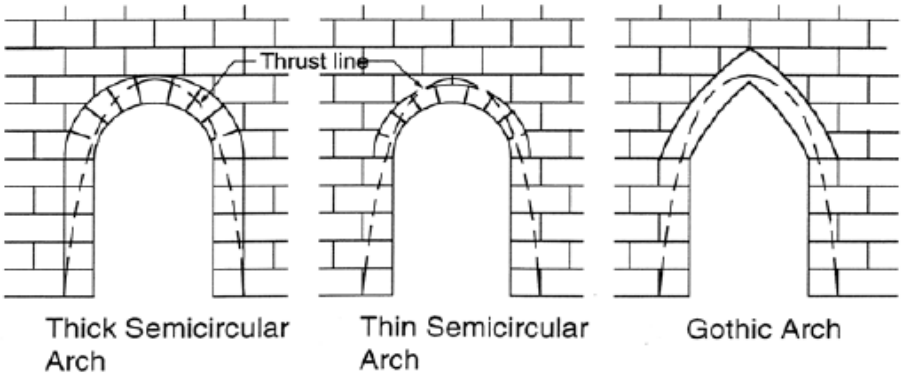
في بداية العمل بهذه الطريقة تم اعتماد قاعدة الثلث الوسطي (Middle Third Rule)، والتي تقول أنه عندما تكون القوة المحصلة الناظمية مطبقة في الثلث الوسطي لمقطع ما فلن تظهر فيه أيّة إجهادات شادة (الشكل ٢-٩)، وبهذا الافتراض كانت هذه الطريقة محافظة (Conservative) بشكل كبير، لذلك تم الاستعاضة عنها بقاعدة النصف الوسطي (Middle Half Limit)، حيث تمت زيادة المنطقة المسموحة إلى نصف المقطع بدلاً من الثلث، والنسخة الأخيرة من هذه الطريقة اعتبرت أن محصلة القوى الناظمية يمكنها أن تكون مطبقة في أي نقطة من نقاط المقطع العرضي كاملاً. تتطلب هذه الطريقة أن يصل خط الضغط إلى حواف القوس في أربعة مناطق قبل ظهور ميكانيكية الانهيار وينهار القوس. تفترض هذه الطريقة مقاومة لانهائية على الضغط للمادة الحجرية. إن هذا

الافتراض غير صحيح. لكن على اعتبار أنه بشكل عام تكون الإجهادات الضاغطة في القوس الحجري أقل من مقاومة المادة على الضغط ، لذا تكون الحمولة الناتجة قريبة من الواقع.



الشكل (٢- ٩): توزع الإجهادات ضمن المقطع العرضي حسب تغيُّرموقع خط الضغط – قاعدة الثلث الوسطي (Bjurstrom and Lasell, 2009)

عندما يتحرك هذا الخط خارج النواة المركزية المحددة بالثلث الأوسط للمقطع العرضي تبدأ التشققات بالظهور بشكل متتالي، ويبقى القوس مستقراً طالما أن خط الضغط موجود ضمن سماكة القوس. يعتمد شكل خط الضغط على الأحمال المطبقة (Sanchez, 2007). يبين الشكل (٢-١٠) خطوط الضغط لبعض الأشكال التقليدية للأقواس.



الشكل (٢- ١٠): خطوط الضغط لبعض الأشكال التقليدية للأقواس (Sanchez,2007)

للبدء بإيجاد خط الضغط لابد من أن يتم فرض قيمة ما لقوة الضغط وموقعها واتجاهها في إحدى نهايتي القوس، الأمر الذي يؤدّي إلى ثلاثة متغيرات (نقطة التأثير والاتجاه والقيمة)، وكل تركيب من هذه المتغيرات سيعطينا خط ضغط مختلف، لذلك يوجد لدينا عدد لانهائي من خطوط الضغط. وتكمن المشكلة في أنه بالرغم من إيجاد خط ضغط محتوى بأكمله داخل القوس،فإنه ليس بالضرورة أن يتصرف القوس وفقه أي تبعاً للمتغيرات التي تم اختيارها(Beuerman, 2009).

من إحدى تطبيقات طريقة خط الضغط طريقة منطقة الضغط (Zone of thrust)، تفترض هذه الطريقة مقاومة محددة على الضغط للمادة الحجرية، وهذا ما يجعل من المستحيل أن تكون محصلة القوى الناظمية مطبقة على حافة القوس و بدلاً من ذلك ستظهر منطقة مستطيلة محيطة بمحصلة القوى الناظمية. يتم حساب ارتفاع هذه المنطقة من العلاقة (٢-٧):

$$t = \frac{N}{f_c \cdot B} \qquad (٢\text{-}٧)$$

حيث:

t :ارتفاع المنطقة المستطيلة.

N :القوة الناظمية.

f_c :مقاومة الضغط.

B : عرض القوس.

وتكون محصلة القوى الناظمية مطبقة على ارتفاع t/2 (الشكل ٢-١٢). ويتم حساب معيار الانهيار عند ذلك من العلاقة (٢-٨):

$$e = \left|\frac{M}{N}\right| \leq \frac{d-t}{2} \qquad (٢-٨)$$

حيث:

d :سماكة القوس.

M :عزم الانعطاف.

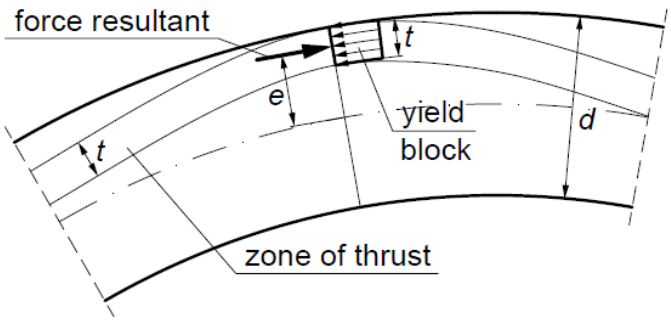


Figure 3.6 Yield block

الشكل (٢- ١١): منطقةالضغط (Bjurstrom and Lasell, 2009)

من التطبيقات الخاصة لطريقة خط الضغط طريقة السكك المعلقة (Funicular network) وفيها تتم تجزئة المنشأ الكلي إلى عناصر متصلة في عقد، وكل الحمولات الميتة منها والحية المطبقة على المنشأ هي حمولات مركزة عند هذه العقد.

❖ طرق الميكانيكيات (The mechanism methods) :

تنطلق هذه الطرق من أن القوس يحتاج لأن تنشأ ضمنه **أربعة مفاصل لدنة** لكي تتشكل ميكانيكية الانهيار، ويجب تحديد موقع هذه المفاصل.

تُعتبر هذه الطريقة من المناهج المحددة في تحليل الأقواس الحجرية ويتم فيها استخدام المنهج الحركي في الحل مع وجود افتراضات محددة تعتمد على نتائج تجارب تم اجراؤها. على أية حال فإنه يجب افتراض أو حساب مواقع المفاصل (Background document.Sustainable Bridges,2007).

إن طريقة الميكانيكيات هي منهج مبسط يستخدم نموذج افتراضي للميكانيزم التي تحدد مواقع المفاصل اللدنة. من أجل حمولة مركزة في الشكل (٢-١٢) يتشكل المفصل الأول تحت تأثير القوة المركزة، باقي المفاصل يُمكن أن

يتم تحديد موقعها عند المساند وفي الجهة المقابلة للقوة وعندها يتم الحصول على القوة الحدية التي يتحملها القوس وذلك بتشكل المفاصل الأربعة.

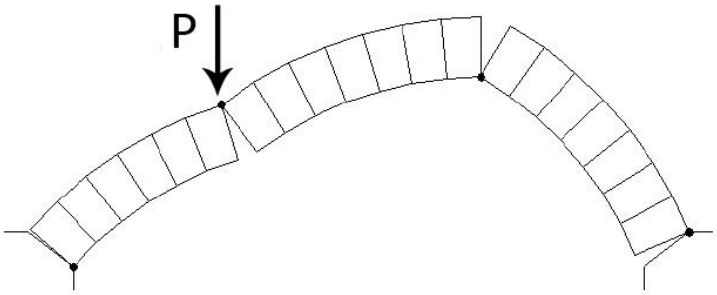
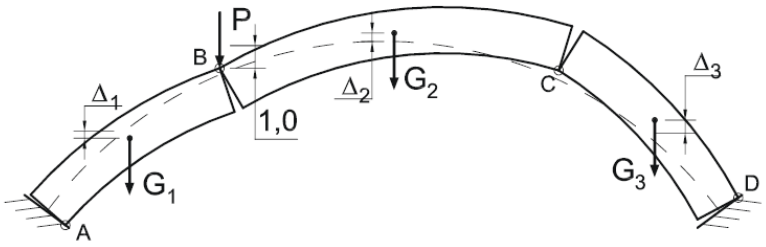


Figure 3.9 A 4-hinge mechanism

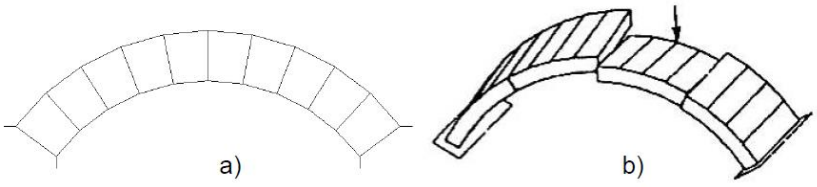
الشكل (٢- ١٢): شكل يوضح ميكانيكية المفاصل الأربعة (Background document.Sustainable Bridges,2007)

يتم الوصول إلى الحل بأخذ مجموع العزوم حول نقاط المفاصل المتشكلة مساوياً إلى الصفر أو بحل معادلات التوازن بالعمل الإفتراضي لكل أجزاء القوس مع الوزن الذاتي G_i والإزاحات الإفتراضية Δ_i كما الشكل (٢-١٣).



الشكل (٢- ١٣): مواقع المفاصل اللدنة المتشكلة (Background document.Sustainable Bridges,2007)

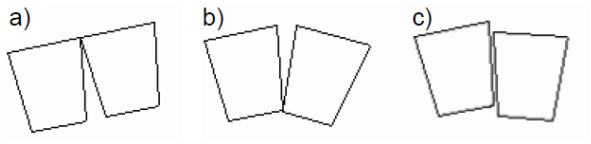
من النماذج الهندسية المطبقة في هذه الطريقة (Background document.Sustainable Bridges,2007):
القوس المستوي (قوس موثوق من الطرفين المؤلف من بلوكات مستوية – الدراسة في واحدة العرض حصرا) والقناطر الخاصة حيث القناطر موثوقة الطرفين و المؤلفة من قطع حجمية (كل بلوكة تمثل جزءاً من القوس) (الشكل ٢-١٤).



الشكل (٢- ١٤): القوس المستوي والقناطر الخاصة(Background document.Sustainable Bridges,2007)

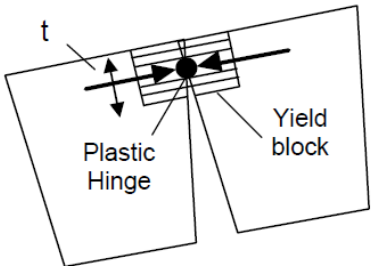
من طرق الميكانيكيات طريقة الكتل الصلبة (Rigid Blocks) وهو تحليل للكتل الصلبة المستوية، المقسمة إلى أجزاء منتظمة ولكن ليس من الضروري أن تكون بنفس العدد الموجود في القوس الحقيقي، حيث تم التحقق تجريبياً أن عدد القطع الذي يعطي نتائج قريبة من الواقع هو ٤٠ قطعة (Background document.Sustainable Bridges,2007). ومن الإفتراضات الأساسية في هذه الطريقة أن الكتل المتجاورة

تملك مقاومة لانهائية على الضغط وذات صلابة لا نهائية. عند الإنهيار يُمكن لهذه الكتل أن تنزلق أو تدور حول محورها (الشكل ٢-١٥). باستخدام طاقة التشوه الكلي الأصغرية يصبح من الممكن حساب انتقالات جميع الكتل.



الشكل (٢- ١٥): إمكانية انزلاق الكتل بين بعضها أو أن تدور حول محورها (Background document.Sustainable Bridges,2007)

وبطريقة مماثلة يمكن استخدام كتل صلبة لدنة (Rigid-Plastic Blocks) مع مقاومة محدودة للضغط، هذا يجعل من غير الممكن أن يقع المفصل على حافة القوس، وبدلاً من ذلك ستوجد منطقة بين حافة القوس والمفصل تكون فيها المادة محطمة (Crushed)، وهذه الطريقة تعتمد على التحليل اللاخطي بدلاً من التحليل الخطي، وهذا ما يعقد الحسابات (الشكل ٢-١٦).



الشكل (٢- ١٦): طريقة استخدام كتل صلبة لدنة (Background document.Sustainable Bridges,2007)

هنالك أيضاً أسلوب ثلاثي الأبعاد لهذه الطريقة تُستخدَم فيه كتل حجمية لنمذجة القوس، مع نفس الافتراضات السابقة، وهذه الطريقة من أكثر طُرق ميكانيكية الانهيار تعقيداً وتدعى (Volumetric blocks).

ومن الجدير بالذكر نظرية حد الأمان الأعلى والأدنى (Upper and Lower (Safe) Bound)، والتي حددها العالم Jacque Heyma، الذي اعتمد على التحليل الحدي (Limit Analysis)، وعلى نظرية اللدونة (Beuerman, 2009) والافتراضات التي تبنّاها هي:

- ✓ المادة الحجرية ليس لها مقاومة على الشد.
- ✓ مقاومة الضغط للمادة لا متناهية.
- ✓ لا يمكن حدوث انزلاق بين قطع الحجر، بسبب قوى الاحتكاك.
- ✓ الانهيار سيحدث نتيجة تشكل ميكانيكية انهيار لدنة (Plastic Mechanism).

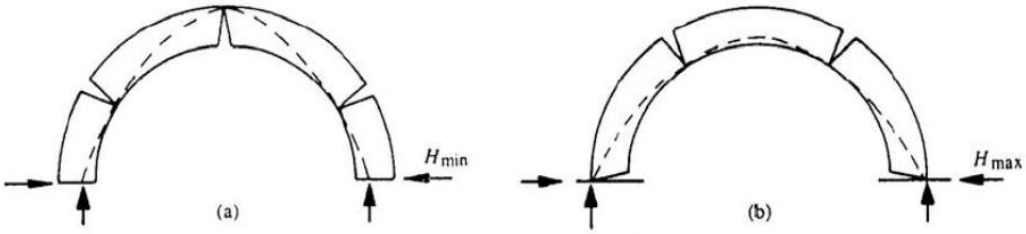
نظرية الحد الأدنى (The Lower-Bound Theorem): حددت أنه في حال تم إيجاد خط ضغط متوازن مع الأحمال الخارجية المطبقة (بما فيها الوزن الذاتي)، ويقع بكامله ضمن مادة القوس، فإن هذا القوس يكون آمناً حتى ولو لم يكن خط الضغط هذا هو خط الضغط الحقيقي، وعندها لاتوجد حاجة للتأكد من أنماط الانهيار.

نظرية الحد الأعلى(The Upper-Bound Theorem): حددت أننا إذا افترضنا ميكانيكية انهيار معينة (وبشكل اعتباطي لكن بعدد كاف من المفاصل)، وقمنا بمساواة عمل القوى الخارجية بالصفر، تنتج معنا حمولة قيمتها أكبر أو مساوية لقدرة تحمل القوس.

بالنسبة لخط الضغط الأصغري والأعظمي اللازم لاستقرار القوس يمكن تحديده بوضع ردود الأفعال بمواقع ملائمة، كما هو مبين بالشكل (٢-١٧).

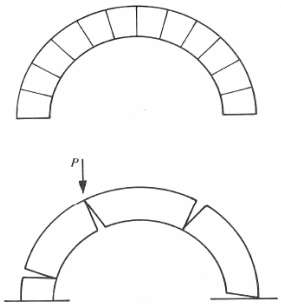
٢-٣-٣- ميكانيكيات انهيار الأقواس الحجرية

إن تصميم القوس يعتمد على تحديد السماكة اللازمة له من أجل مجاز وحمل معينين، إن كان هذا القوس يحقق السماكة المطلوبة فإنه سيتحمل الوزن الذاتي والحمل المطبق عليه مع بقاء الإجهاد بقيم منخفضة والانزياحات مهملة. فإذا تم تعريض قوس حجري إلى **حمل شاقولي مركز**(P) عند ربع المجاز فإنه يبقى مستقراً مع تزايد الحمولة (P)، لكن عند قيمة محددة لـ (P) يحصل تغيُّر مفاجئ يضع حداً لهذا الاستقرار، وعندها نكون قد وصلنا لنقطة يصبح عندها خط الضغط خارج القوس. تبقى الإجهادات منخفضة في هذه الحالة، لكن تتشكل ميكانيكية انهيار غير مستقرة بظهور أربعة مفاصل (Sanchez, 2007) كما في الشكل (٢-١٨).



Semicircular arch under self weight; (a) Minimum thrust
(b) Maximum thrust

الشكل (٢- ١٧): خط الضغط الأصغري والأعظمي(Beuerman, 2009)



الشكل (٢- ١٨): ميكانيكية انهيار قوس حجري خاضع لحمل مركز(Sanchez, 2007)

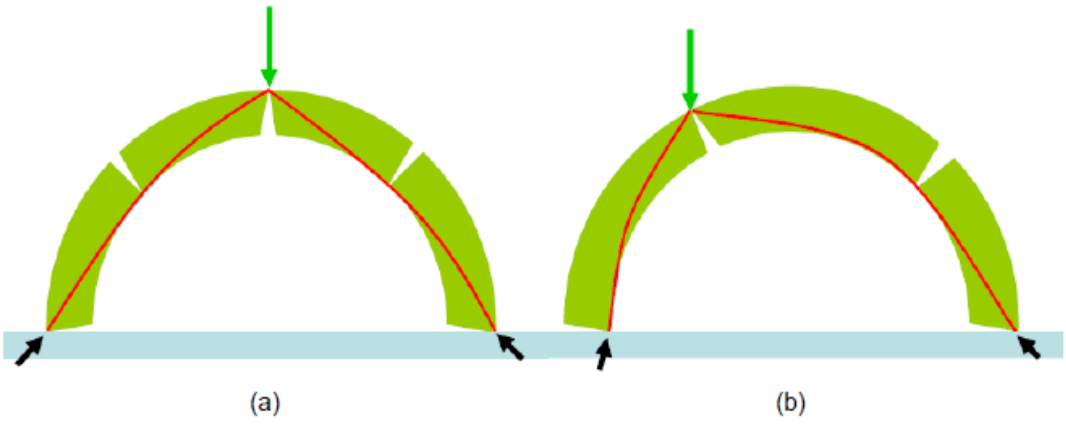
في تجربة تم إجراؤها على قوس حقيقي (جسر بريستود) (Cavicchi and Gambarotta,2005) تم تطبيق حمل مركز على ربع المجاز حتى حصل الإنهيار بتشكل أربع مفاصل لدنة، الأول تحت القوة المركزة مباشرة، والثاني في الجهة المقابلة للقوة، واثنين عند المساند (الشكل ٢-١٩).

يبين الشكل (٢-٢٠) ضرورة وجود سماكة كافية للقوس تلائم مجال خطوط الضغط الناجمة عن الأحمال المطبقة، والتي في حال كانت موزعة بشكل منتظم على القوس سيكون شكل خط الضغط بشكل سلسال (Catenary) (الشكل٢-٣)، والسماكة الأصغرية للقوس نصف الدائري يجب أن تحتوي هذا السلسال. إن خط الضغط سيتوافق مع مواقع المفاصل المتشكلة، و**عندما يصبح خط الضغط مماساً لحدود القوس فإن المفاصل ستتشكل في تلك المواقع** (Sanchez, 2007;Beuerman, 2009)، كما هو مبين بالشكل(٢-٢٠) فإن هنالك حالتين :

الأولى (a): ميكانيكية انهيار بتشكل خمسة مفاصل نتيجة التناظر.

الثانيـة (b): ميكانيكية انهيار بتشكل أربعة مفاصل نتيجة عدم التناظر.

الشكل (٢- ١٩):ميكانيكية انهيار جسر بريستود (Cavicchi and Gambarotta,2005)



الشكل (٢- ٢٠): ميكانيكيات الانهيارللقوس الحجري بتأثيرالحمل المركز مع خط الضغط المحتمل (Beuerman, 2009)

في حال كانت الأحمال المطبقة على القوس **أحمال موزعة** فستتشكل لدينا أحد ميكانيكيات الانهيار الموضحة بالشكل (٢-٢١)، والذي يبين لنا أربعة أشكال للانهيار (بقلة،٢٠١٣;Foraboschi, 2004):

الشـكل الأول: تشكُّل أربعة مفاصل، وأحد هذه المفاصل تحت منطقة تركز الأحمال.

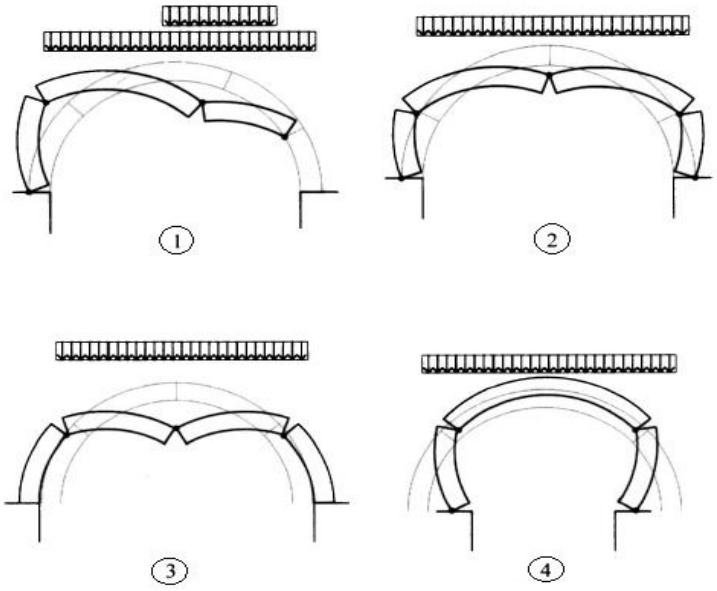
الشكل الثاني: تشكُّل خمسة مفاصل نتيجة التناظر بالشكل والأحمالK حيث يتشكل المفصل الأول في الوسط ثم يتشكل زوجان من المفاصل المتناظرة بشكلٍ متتال.

الشكل الثالث: تحصل هذه الميكانيكية في الأقواس المسطحة (Flat Arches) ذات القيمة العالية لنسبة المجاز إلى الارتفاع، ونلاحظ تشكُّل ثلاثة مفاصل، وهي ميكانيكية انهيار محلية.

الشكل الرابع: ميكانيكية نادرة الحدوث وغير هامة تحصل نتيجة حركة جانبية للأرض، نلاحظ تشكُّل أربعة مفاصل.

عند تعرض القوس **لأحمال أفقية** تنشأ ميكانيكية انهيار غير متناظرة وتتشكل أربعة مفاصل. إن ميكانيكية الانهيار الناتجة تعتمد على صلابة وضخامة الركائز. في الحالة العامة لدينا ثلاثة نماذج ممكنة للانهيار (De Luca et al., 2004):

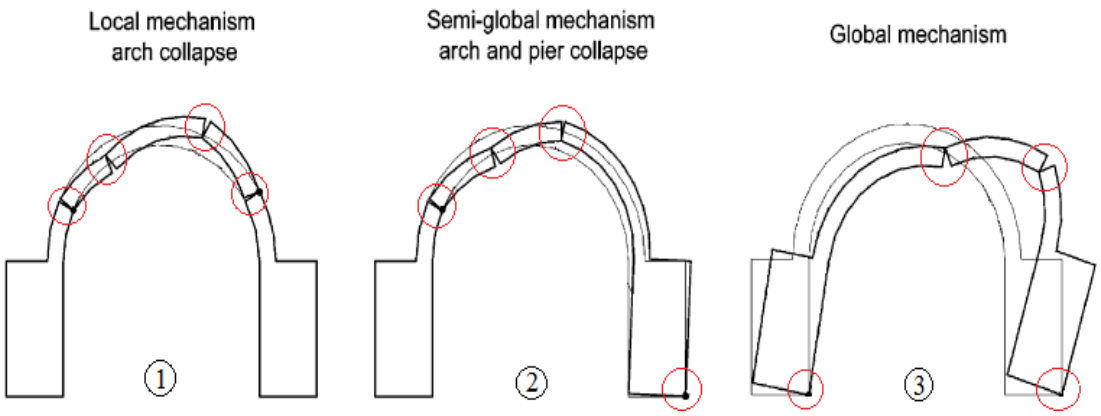
ميكانيكية انهيار محلية(Local Mechanism): حيث يحصل انهيار محلي للقوس فقط بتشكل المفاصل الأربعة ضمن جسم القوس، دون ظهور أي مفصل في الركائز. تحدث هذه الميكانيكية عندما تكون الركائز قليلة الارتفاع وبصلابة عالية، أي نسبة ارتفاع الركيزة إلى عرضها أصغر من الواحد (الشكل ٢-٢٢-١).



الشكل (٢- ٢١):ميكانيكيات الانهيارللقوس الحجري بتأثيرالأحمال الموزعة(بقلة،٢٠١٣Foraboschi, 2004;)

ميكانيكية انهيار عامة(Global Mechanism): تتمثل بظهور مفصلين في قاعدتي الركيزتين ومفصلين ضمن جسم القوس. تحدث هذه الميكانيكية في المنشآت ذات النحافة أي عندما تكون الركائز نحيفة وقليلة الصلابة، (الشكل ٢-٢٢-٣).

ميكانيكية انهيار نصف عامة(Semi-global Mechanism): تتمثل بظهور مفصل في قاعدة إحدى الركيزتين وثلاثة مفاصل ضمن جسم القوس. وهي الحالة الوسطية بين الحالتين السابقتين (الشكل ٢-٢٢-٢).



الشكل (٢- ٢٢): ميكانيكياتالانهيارللأقواسالحجريةبتأثيرالأحمالالأفقية (De Luca et al., 2004)

٢-٤- الخصائص الميكانيكية لمركبات البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP):

(Mechanical Properties of FRP Components)

تتألف البوليميرات المسلحة بالألياف (Fiber Reinforced Polymers- FRP) من الألياف (Fibers) ومادة رابطة راتنجية (Resin) (Batikha, 2008)، و تختلف خصائص مادة الـ FRP باختلاف نوع الألياف المستخدمة. يبين الجدول (٢-٥) خصائص البوليميرات المسلحة بالألياف المختلفة (كربون - أراميد- زجاج) وهي: 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 والآراميدية).

Fibre	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain to failure (%)	Density (t/m3)	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

الجدول(٢- ٥): خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية

(Technical Report No.55 of Concrete Society, 2004; Batikha, 2008)

يبين الجدول (٢-٦) خصائص الأنواع المختلفة من المواد الراتنجية (Resins) المستخدمة كمادة رابطة. إن الأيبوكسي (Epoxy) هو أكثر المواد استخداماً بسبب القيم العالية لإجهاد الشد والتشوه الحدي، وتميزه بمقاومة

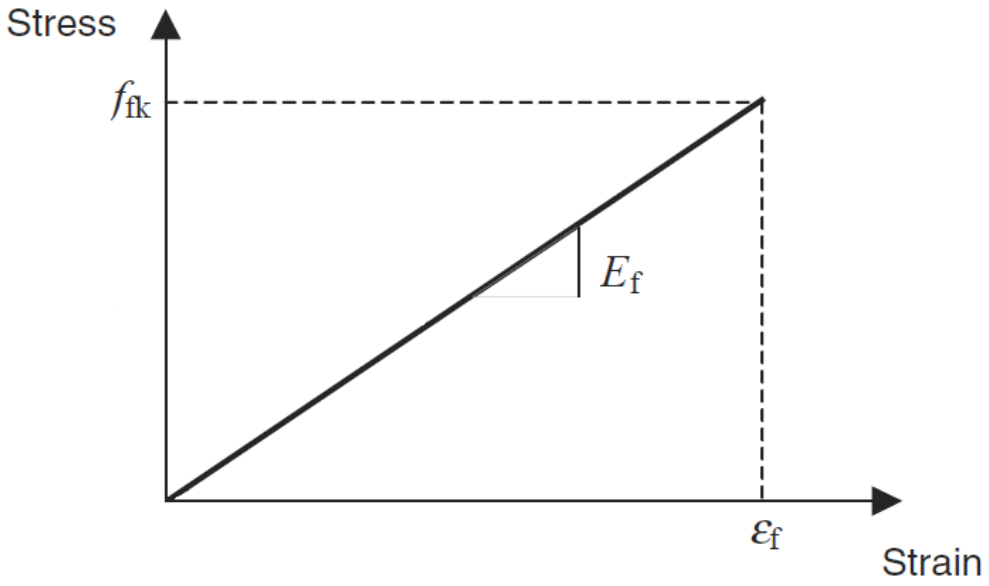
مرتفعة للعوامل البيئية والمؤثرات الكيماوية، وله قيم منخفضة للانكماش، وقدرة عالية على الالتصاق)(Batikha, 2008).

إن سلوك مادة الـ FRP سلوك خطي مرن حتى الانهيار، دون وجود حد خضوع بالمقارنة مع حديد التسليح العادي او مسبق الإجهاد، وبالتالي فإن علاقة (الإجهاد- التشوه) هي علاقة خطية مبينة بالشكل (٢-٢٣). حيث: f_{fk} هو إجهاد الشد الأعظمي للـ FRP، ε_f التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع، E_f : معامل مرونة الـ FRP باتجاه الألياف.

يبين الشكل (٢-٢٤) قيم مجال (الإجهاد- التشوه) للأنواع الشائعة من الـ FRP مع مقارنتها بمادة الفولاذ، حيث يمكن ملاحظة المقاومة العالية لمادة الـFRP، مع عدم وجود حد الخضوع الذي يتميز به الفولاذ.

Resin	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain to failure (%)	Density (t/m3)	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

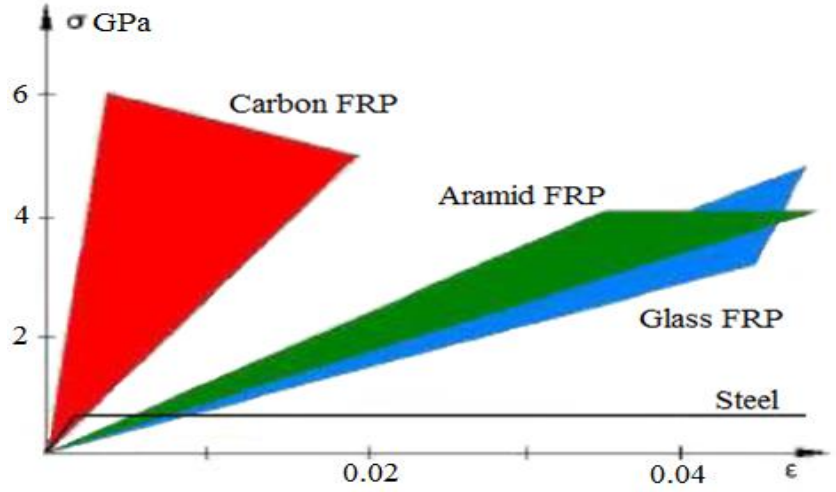
الجدول(٢- ٦): خصائص الأنواع المختلفة للمواد الرابطة الراتنجية(Batikha, 2008)



الشكل (٢- ٢٣): مخطط (Stress-Strain) لمادةالـFRP

(Technical Report No.55 of Concrete Society, 2004)

إن مقاومة الضغط للـ FRP بالنسبة للألياف الكربونية والزجاجية قيمتها قريبة جداً من قيمة مقاومة الشد لهذه الألياف، على عكس الألياف الأراميدية حيث تكون قيمة مقاومة الضغط أقل بشكل واضح (Technical Report No.55 of Concrete Society, 2004).



الشكل (٢- ٢٤): مجال الإجهاد- التشوه لمختلف أنواع الـFRP (Beuerman, 2009)

يبين الجدول (٢-٧) مقارنة بين أنواع الـ FRP من حيث إجهاد الشد والضغط ومعامل بواسون والسلوك على التحميل طويل الأمد واالسلوك على التعب والكثافة ومقاومة القلويات والسعر (Price).

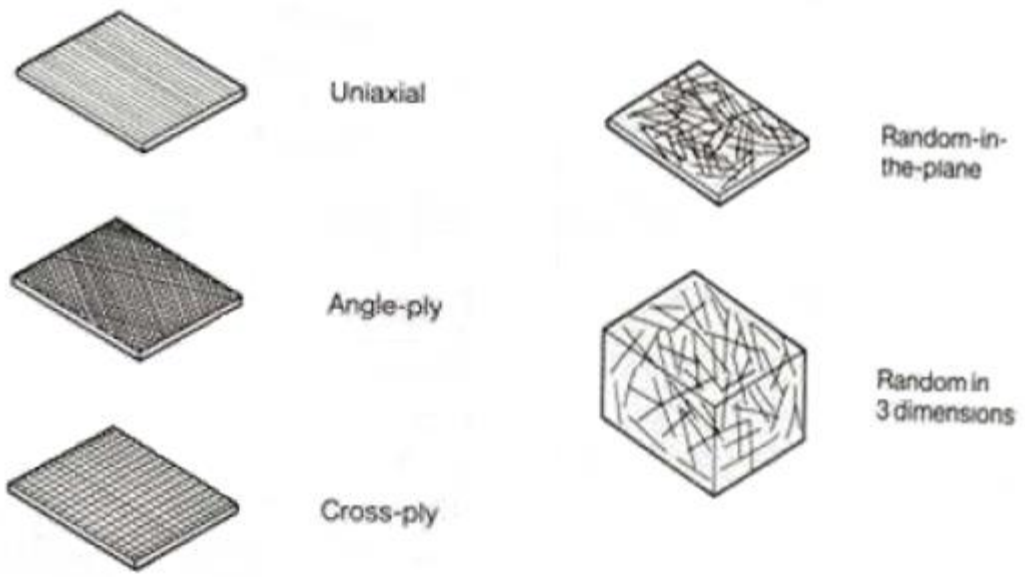
Qualitative comparison between E-glass, HT-carbon and aramid fibres

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

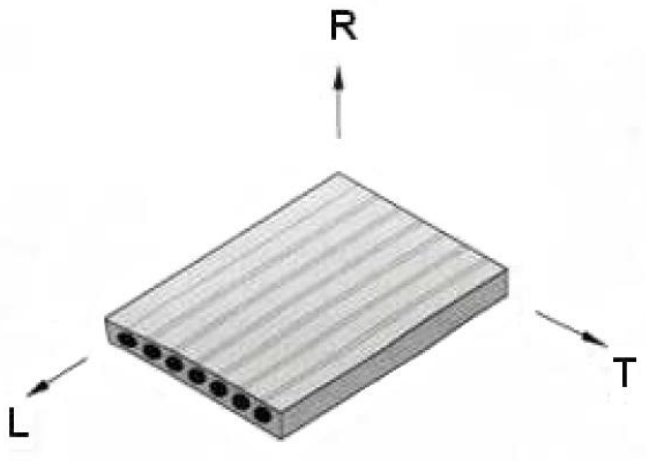
الجدول(٢- ٧): مقارنة بين مركبات الـFRP (Teng et al., 2002)

إن شكل توزع الألياف ضمن مادة الـ FRP مهم من أجل معرفة الخصائص الميكانيكية لها. يبين الشكل (٢-٢٥) الأشكال الشائعة لتوزع الألياف ضمن مادة الـ FRP.

سيتم التركيز في هذا البحث على حالة الـFRP حيث الألياف باتجاه واحد. يبين الشكل (٢-٢٦) المحاور الرئيسية لشريحة FRP ذات توزع للألياف باتجاه واحد (Uniaxial FRP Lamina).



الشكل (٢- ٢٥): الأشكال الشائعة لتوزع الألياف ضمن الـFRP (Batikha, 2008)

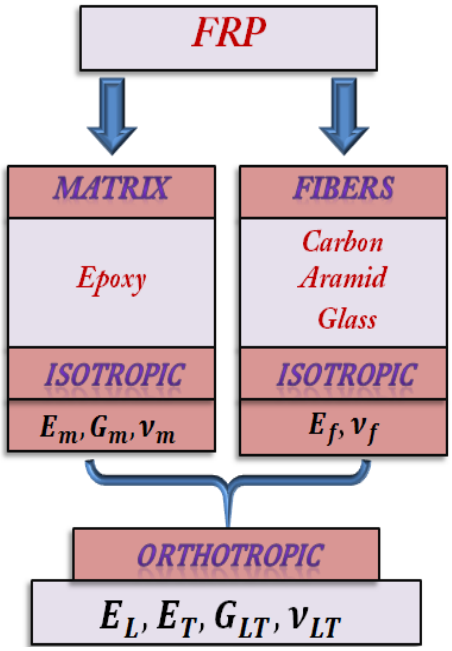


الشكل (٢- ٢٦): تعريف محاور شريحة الـFRP ذات التوزع المنتظم للألياف (Batikha, 2008)

إن الاختلاف بين خصـــائص الألياف (Isotropic Material) وخصـــائص المادة الحاضنة (Isotropic Material) يُعطي مادة ذات خصائص ميكانيكية متغايرة بالاتجاهين (Orthotropic Material) (Batikha, 2008).

إن التباعد بين الألياف ضمن المادة الحاضنة له تأثير كبير على الخصائص الميكانيكية لشريحة الـ FRP. تمَّ في العديد من المراجع اشتقاق الخصائص الميكانيكية لشريحة الـ FRP بافتراض حالة الألياف غير المتلاصقة ضمن المادة الرابطة (Astrom, 1997; McCrum et al., 1997; Vinson and Sierakowski, 1986).

يبين الشكل (٢-٢٧) مخططاً توضيحياً لمكونات الـ FRP (ألياف + مادة رابطة) وأن كل منهما مادة متماثلة الخواص (Isotropic Material)، بينما تصبح الـFRP مادة متغايرة الخواص (Orthotropic) (بقلة ،٢٠١٣).



الشكل (٢- ٢٧): مخطط توضيحي لمكونات الـFRP(بقلة، ٢٠١٣)

حيث:

E_f: معامل مرونة الألياف.

ν_f : معامل بواسون للألياف.

E_m: معامل مرونة المادة الرابطة.

G_m : معامل مرونة القص لصفيحة الـ FRP.

ν_m : معامل بواسون للمادة الرابطة.

E_L : معامل المرونة لصفيحة الـ FRP بالاتجاه الموازي للألياف.

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

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

ν_{LT} : معامل بواسون لصفيحة الـ FRP.

تُعطى الخصائص الميكانيكية لمادة الـFRP بالعلاقات التالية (Batikha, 2008):

$$E_L = E_f.V_f + E_m. \qquad (٢-٩)$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \qquad (٢-١٠)$$

حيث:

V_f: نسبة حجم الألياف.

V_m: نسبة حجم المادة الرابطة، $V_m=1-V_f$.

ξ: معامل يسمح بأخذ تاثير طريقة رزم الألياف وتوزُّعها ضمن المادة الرابطة وشروط التحميل بعين الاعتبار، مثلاً تُستخدم قيمة (ξ = 2)في حساب E_T، والقيمة (ξ = 1)في حساب G_{LT}.

η: معامل يُعطى بالعلاقة (٢-١١).

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m}-1}{\frac{E_f}{E_m}+\xi} \qquad (٢-١١)$$

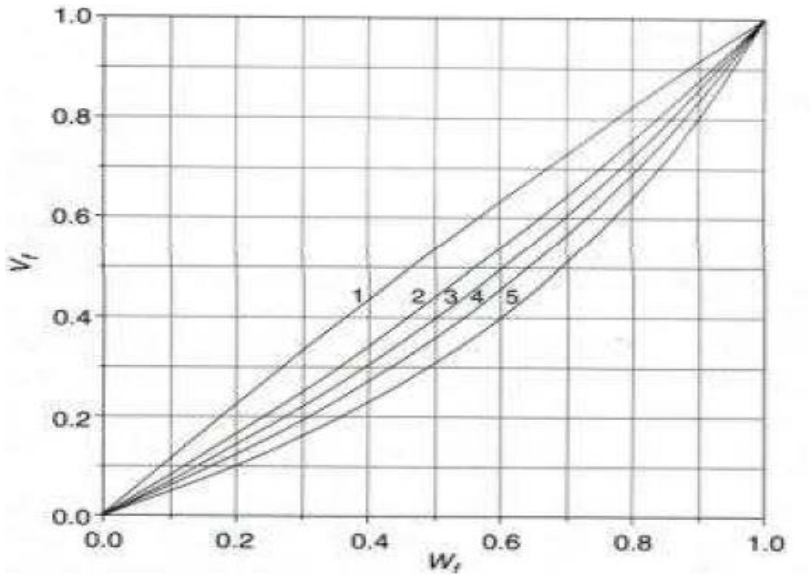
يُعطى معامل مرونة القص G_{LT} بالعلاقة (٢-١٢):

$$\frac{G_{LT}}{G_m} = \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \qquad (٢-١٢)$$

يُعطى معامل بواسون ν_{LT} (Poisson's Ratio) بالعلاقة (٢-١٣):

$$\nu_{LT} = \nu_f.V_f + \nu_m.V_m \qquad (٢-١٣)$$

يبين الشكل (٢-٢٨) مخطط للعلاقة بين نسبة وزن الألياف (W_f) ونسبة حجم الألياف (V_f)، لخمس نسب من الكثافة مبينة بالجدول (٢-٨) مع نوع الألياف المناسبة لهذه الكثافة.



الشكل (٢- ٢٨): العلاقة بين الوزن والحجم للأنواع الشائعة من الـ FRP (Batikha, 2008)

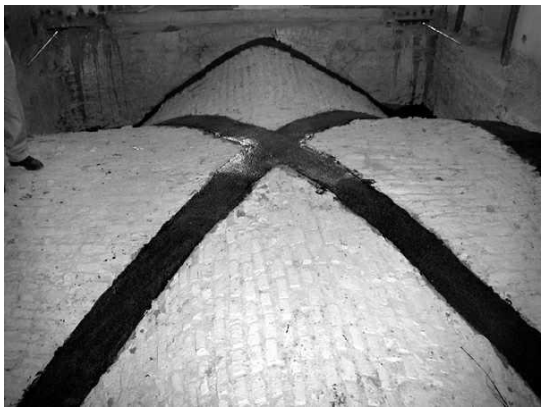
Curve number	Fibre to matrix density ratio (ρ_f/ρ_m)	Possible reinforcement type	Reinforcement density (Kg/m^3)
1	0.88	PE (Polyethylene)	970
2	1.31	Aramid	1440
3	1.55	Carbon (Low-density)	1700
4	1.82	Carbon (high-density)	2000
5	2.27	Glass	2500

الجدول(٢- ٨): نسب الكثافة لمركبات الـFRPللمنحنيات المذكورة في الشكل (٢-٢٢) (Batikha, 2008)

٢-٤-١- استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت (Using FRP in Strengthening Structures)

تمَّ استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت البيتونية (Teng et al., 2004)، والمنشآت المعدنية (Cadei et al., 2004)، والخشبية (Gilfillan, 2003)، والحجرية (Triantafillou, 1998;Bastianini et al., 2005; Oliveira et al., 2006; Sanchez et al., 2007; Milani et al., 2009). وجميع هذه الأبحاث أثبتت الفاعلية الكبيرة لمادة الـFRP في رفع قدرة تحمُّل المنشآت، وزيادة المطاوعة (Ductility).

فيمايلي بعض الأشكال في استخدام البوليميرات في تدعيم المنشآت من المواد المختلفة: حيث يبين الشكل (٢-٢٩) قبة رباعية تم تدعيمها بالـ FRP(Borri et al.,2002) ، ويبين الشكل (٢-٣٠) استخدام الـ FRP في تدعيم الأعمدة البيتونية (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004)، كما يبين الشكل (٢-٣١) استخدام البوليميرات في تدعيم فتحة في بلاطة بيتونية (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004).



الشكل (٢- ٢٩): تدعيم قبة رباعية (Borri et al.,2002)

الشكل (٢- ٣٠): استخدام الـFRP في تدعيم الأعمدة *البيتونية* (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004)

الشكل (٢- ٣١): استخدام البوليميرات في تدعيم المنشآت البيتونية (Technical Report No.55 of Concrete Society,2004)

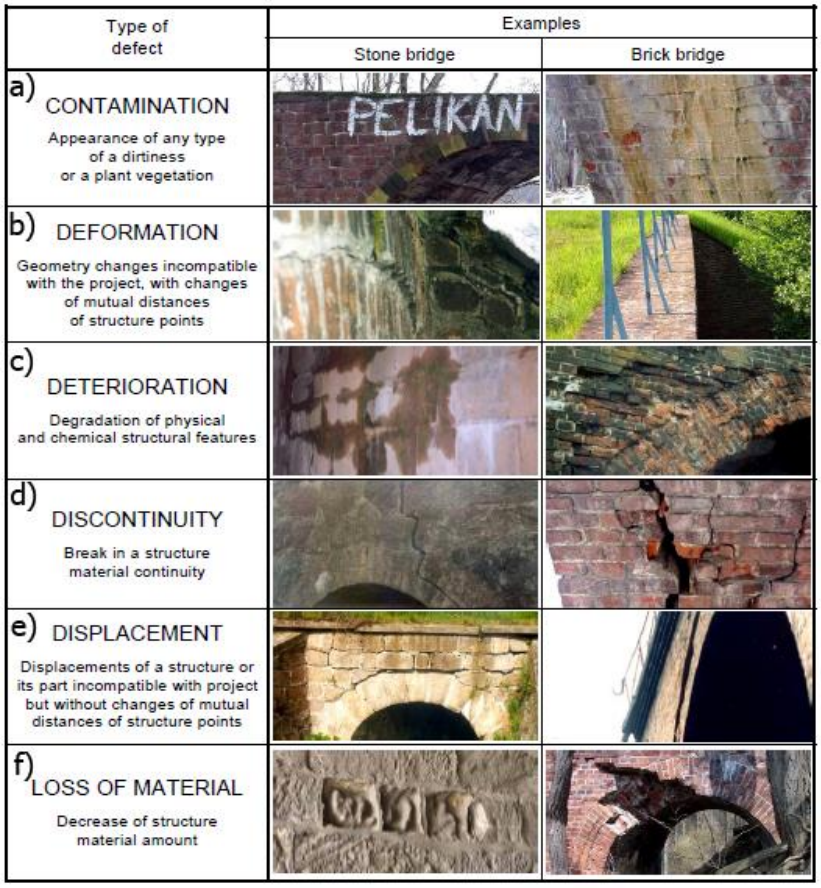
٢-٤-٢- استعمال البوليميرات المسلحة بالألياف في تقوية المنشآت الحجرية

(Using Fiber Rienforced Polymers in Strengthening Masonry Structures)

بتأثير الأحمال والبيئة المحيطة وعمر المنشأ يُمكن أن تصيب الأقواس الحجرية العديد من الأضرار تم تصنيفها كالتالي(Background document.Sustainable Bridges,2007):

- التلوث والذي يُمكن أن يكون سببه الكتابة عليها أو نمو النباتات الضارة (Contamination) الشكل (٢-٣٢-a).
- تشوه المنشأ (Deformation) الشكل (٢-٣٢-b).
- تدهور المنشأ بسبب العوامل الفيزيائية والكيميائية (Deterioration) الشكل (٢-٣٢-c).
- حصول شرخ في القوس الحجري (Discontinuity) الشكل (٢-٣٢-d).

- إزاحة (Displacement) الشكل (٢-٣٢-e).
- فقدان في المادة (Loss of material) الشكل (٢-٣٢-f).



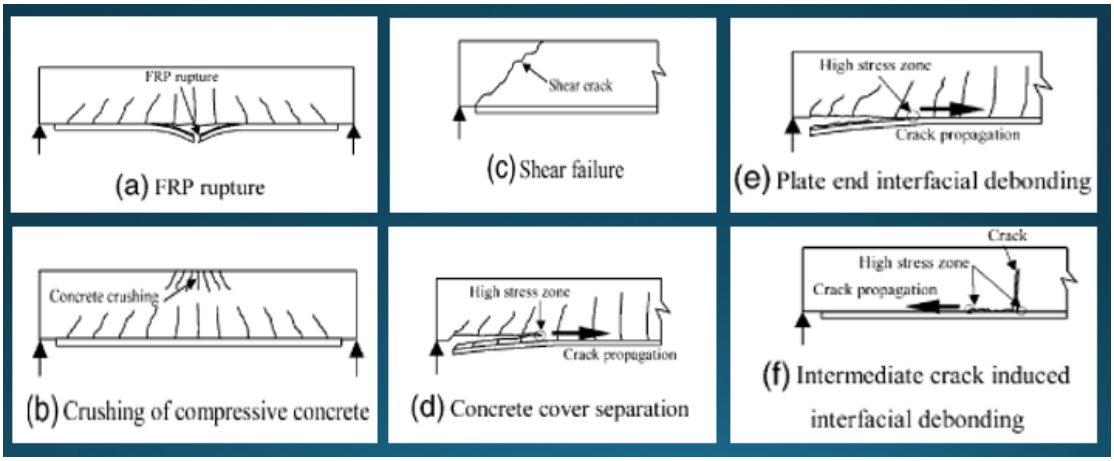
الشكل (٢- ٣٢): الأضرار التي تصيب الأقواس الحجرية (Background document.Sustainable Bridges,2007)

ظهرت ضرورة تدعيم الأقواس الحجرية لكي تتحمل قوى أكبر و التخفيف من الهبوطات الحاصلة وتأخير تشكل المفاصل اللدنة المسببة للإنهيار.

بين(Smith;2002) في الدراسة التي أجراها على تدعيم الجوائز البيتونية بالـFRP أن آلية الإنهيار يُمكن أن تتم بإحدى الإحتمالات الستة التالية :

- تمزق شريحة الـFRP كما الشكل (٢-٣٣-a).
- تحطم البيتون على الضغط في حال كانت كمية الـFRP كبيرة (الشكل ٢-٣٣-b).
- انهيار على القص (الشكل ٢-٣٣-c)، بسبب عدم كفاية تسليح القص.
- انفصال الغطاء البيتوني مع الـFRP الشكل (٢-٣٣-d).
- انفصال في المادة الرابطة بين البيتون والـFRP الشكل (٢-٣٣-e).
- حصول تشققات في الـFRP يُمكن أن تتغلغل باتجاه المسند الشكل (٢-٣٣-f).

إن الحالتين e و f هما الأكثر شيوعاً في المنشآت الحجرية.

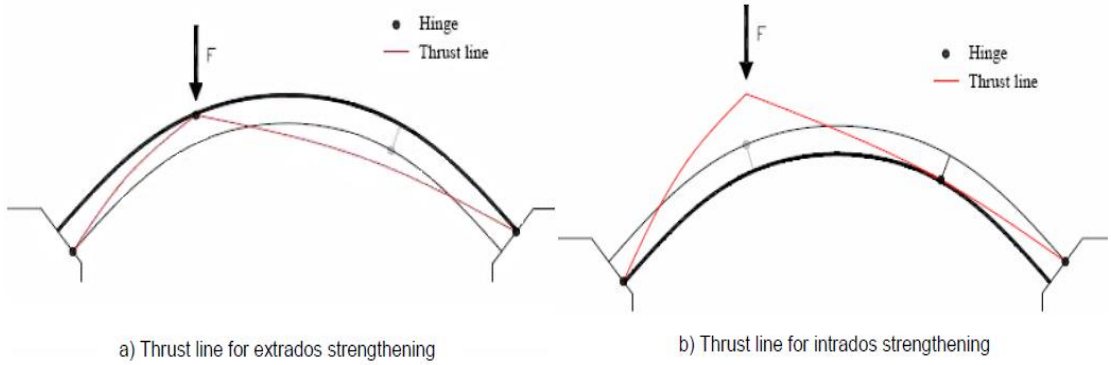


الشكل (٢- ٣٣): احتمالات انهيار جائز بيتوني مدعم بالـFRP

٢-٤-٣- سلوك الأقواس المقواة بالـ FRP وميكانيكيات انهيارها

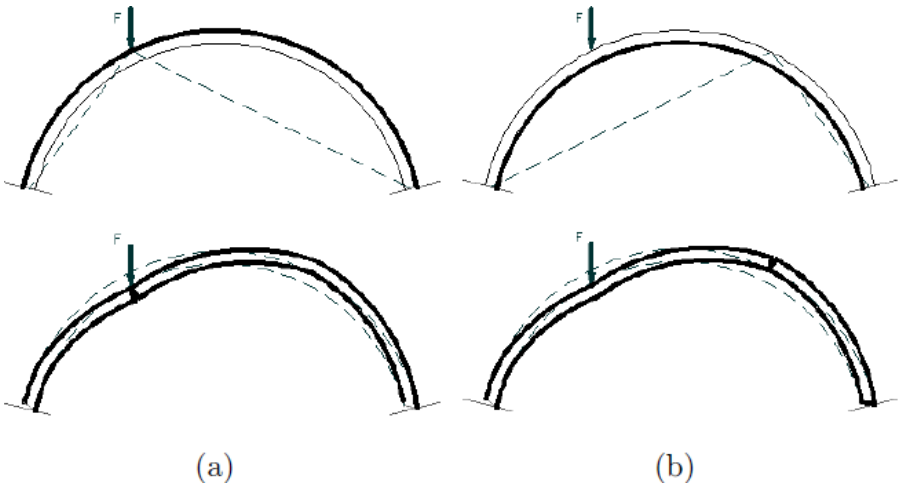
(Strengthened Arches Behavior and Collapse Mechanisms)

إن تطبيق تقوية خارجية (شرائح FRP) على الأقواس يُعدِّل في سلوكها الإنشائي، حيث أن الألياف التي تتمتع بمقاومات عالية جداً على الشد تمنع - في مناطق اتصالها بالحجر- حدوث أي شق وتباعد بين القطع الحجرية والمونة (Brick-Mortar Interface)، وبالتالي تمنع ظهور المفصل في تلك النقطة (بقلة، ٢٠١٣). وبما أن استخدام الـ FRP يعطي مقاومة لعزوم الانعطاف، فإن خط الضغط يمكن له في هذه الحالة أن يتحرك خارج سماكة القوس (الشكل ٢-٣٤) بشكلٍ آمن ودون خطورة فقدان الاستقرار والانهيار(Islam, 2008).



الشكل (٢- ٣٤):تغيُّرموقع خط الضغط بتغيُّرجهة التدعيم (Islam, 2008)

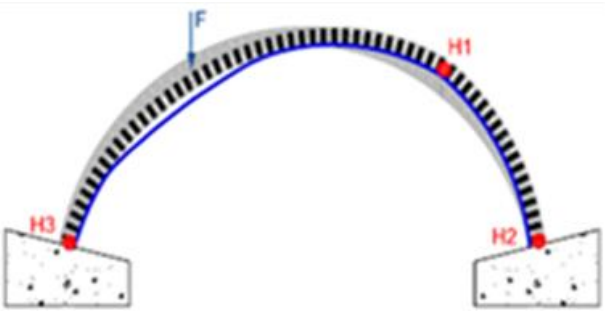
يبين الشكل(٢-٣٥) قوس حجري مقوّى بالـ FRP بحالتين: التقوية من الوجه الخارجي للقوس الشكل (٢-٣٥-a) والتقوية من الوجه الداخلي الشكل (٢-٣٥-b). يمكن في الحالتين ملاحظة عدم حدوث ميكانيكية الانهيار بأربعة مفاصل كما هو الحال دون الـFRP، حيث أن وجود الـFRP سيؤدّي إلى تشُّكل ميكانيكية انهيار بثلاثة مفاصل فقط. في حال التقوية من الخارج فإنَّ مقاومة الشد العالية للـ FRP تؤدّي إلى ازدياد إجهاد الضغط في الحجر في الجهة المقابلة للقوة ممّا يؤدّي إلى حالة انهيار القوس نتيجة تحطم الحجر (Masonry Crushing).



الشكل (٢- ٣٥):ميكانيكيات الانهيارللقوس الحجري المقوى بشرائح الـFRP من الوجه الداخلي (a) والخارجي (b)

(Sanchez, 2007)

في حالة الأقواس المقوّاة من الداخل، فإن إجهادات قص عالية تنشأ بين شريحة الـFRP والحجر، مما يؤدي إلى انفصال الشريحة عن الحجر (Detachment) كما هو مبين بالشكل(٢-٣٦).



الشكل (٢- ٣٦):انفصال شريحة الـFRPعن الحجرفي حالةالقوس المقوّى من الوجه الداخلي(Sanchez, 2007)

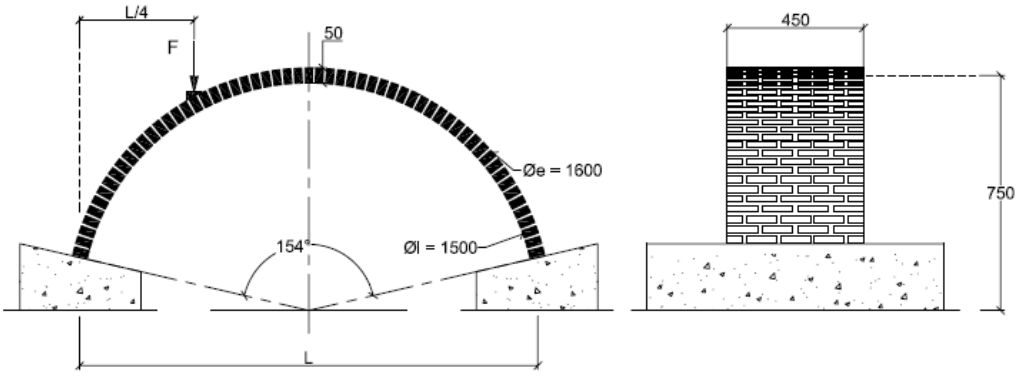
إن شكل الانهيار الناتج سيعتمد على شكل القوس والخصائص الميكانيكية للمواد (قطع الحجر، المونة، الـ FRP) وعلى كمية وموقع شرائح الـ FRP المضافة.

٢-٥- دراسات مرجعية (Literature Review)

أجريت العديد من الدراسات والأبحاث حول موضوع تقوية الأقواس الحجرية المعرضة لحمولات شاقولية باستعمال مادة الـFRP ، فيما يلي بعضاً من هذه الأبحاث :

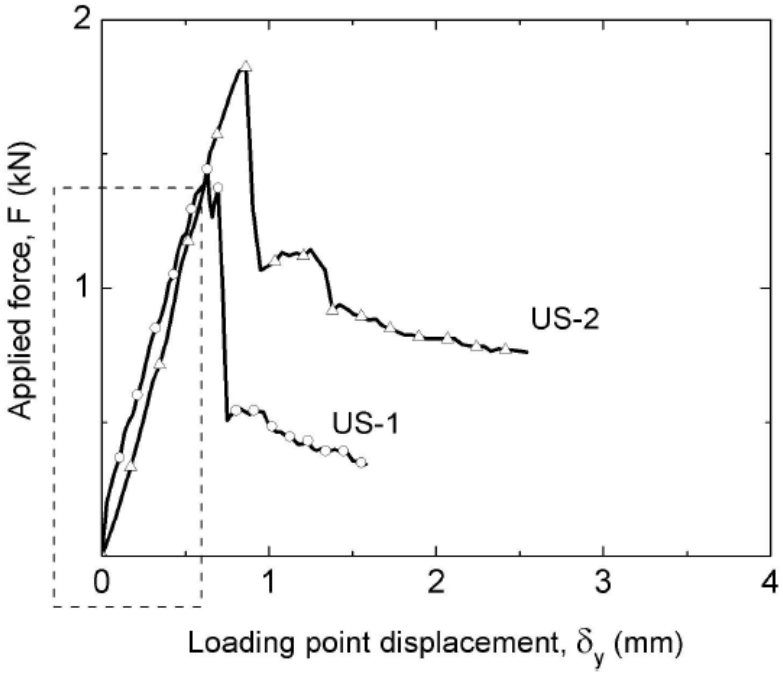
٢-٥-١- دراسة (Sanchez, 2007) :

قام (Sanchez, 2007) بإجراء دراسة تجريبية على قوس حجري طول مجازه الأفقي L=1462mm، نصف قطره الداخلي 750mm والخارجي 800 mm بسماكة مقدارها 50 mm طُبق عليه حمولة مركزة (حمولة خطية على كامل سماكة القوس) عند ربع المجاز ، يستند القوس على كتلتين من البيتون الشكل (٢-٣٧).



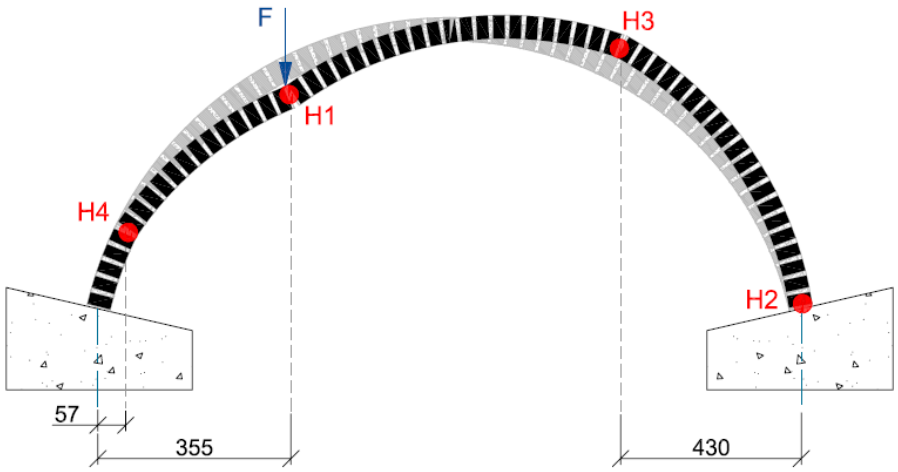
الشكل (٢- ٣٧): نموذج القوس المستخدم في دراسة *(Sanchez, 2007)*

تم في الدراسة صنع نموذجين (US-1,US-2) غير مدعمين، يبين الشكل (٢-٣٨)العلاقة بين الإنتقال تحت القوة (المحور الأفقي) والقوة المطبقة (المحور الشاقولي)، حيث يبين الشكل أن القوس سلك سلوكاً خطياً بقساوة ثابتة حتى الوصول إلى قوة أعظمية (1.43KN) للقوس US-1 و (1.92KN) للقوس US-2 ، ومن ثم حدث هبوط مفاجئ للقوة عند تشكل المفصل الأول ثم بعد ذلك استمر الهبوط بتشكل باقي المفاصل حتى الإنهيار.



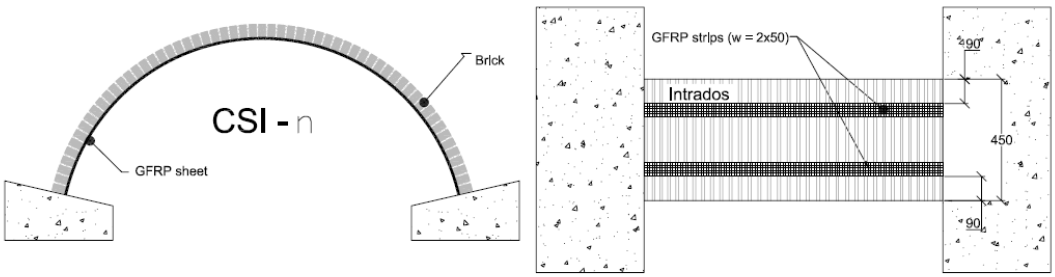
الشكل (٢- ٣٨):العلاقة بين القوة -الإنتقال تحت القوة (Sanchez,2007)

يبين الشكل (٢- ٣٩) ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في القوس الحجري غير المدعم حيث تشكل المفصل الأول تحت القوة المركزة والثاني عند الاستناد على الطرف المقابل للقوة أما المفصل الثالث فتشكل في الجهة المقابلة للقوة والمفصل الأخير تشكل بشكل قريب من الإستناد من جهة القوة ، وبتشكل أربعة مفاصل لدنة ينهار القوس (الفقرة ٢-٣-٣).



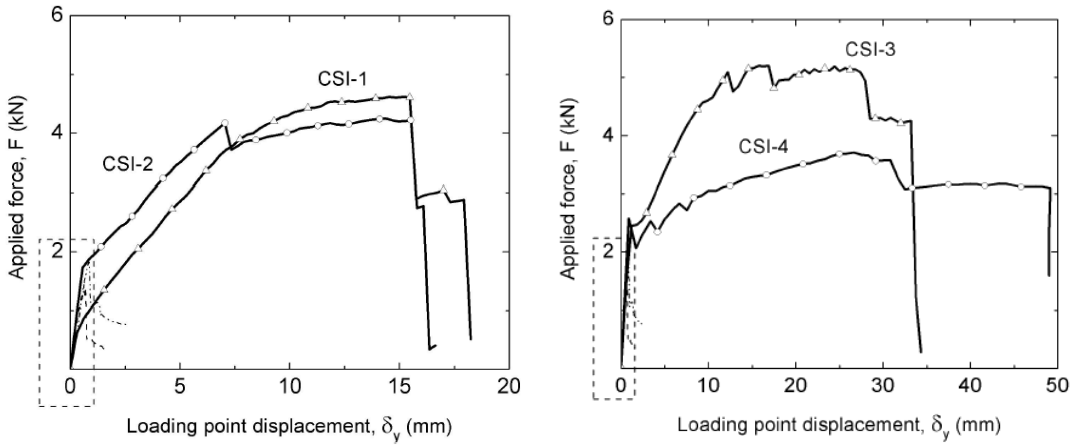
الشكل (٢- ٣٩): ترتيب تشكل المفاصل اللدنة (Sanchez,2007)

تم إنشاء أربعة نماذج مقواة من الداخل (CSI1-CSI2-CS13-CSI4) بالطريقة المبينة في الشكل (٢-٤٠) بشريحتين من الـGFRP بعرض 50mm وبسماكة 2mm. يتميز النموذجان (CSI3-CSI4) بإضافة أجهزة إرساء تمنع انفصال شرائح الـ FRP عن القوس.



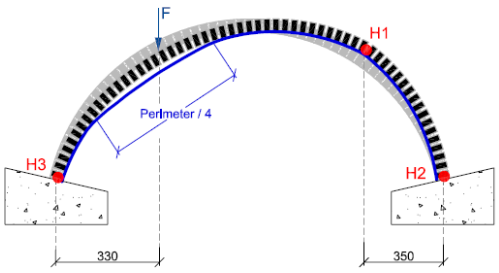
الشكل (٢- ٤٠): النموذج المدعم (Sanchez,2007)

يبين الشكل (٢-٤١) العلاقة بين الإنتقال تحت القوة (المحور الأفقي) والقوة المطبقة (المحور الشاقولي)، حيث يبين الشكل أن سلوك النماذج كان خطياً مرناً حتى الوصول إلى قيمة محددة، ثم يسلك بعدها سلوكاً لاخطياً بقساوة أقل حتى الوصول إلى قدرة التحمل العظمى (أعطى النموذج CSI1 قدرة تحمل مقدارها 4.26 KN والقوس CSI2 قدرة تحمل مقدارها 4.63KN والقوس CSI3 مقدارها 5.41KN والقوس CSI4 مقدارها 3.81 KN) ثم تتناقص هذه القوة بشكل فجائي حتى يحصل الإنهيار (الشكل٢-٤١).



الشكل (٢- ٤١): العلاقة بين القوة الإنتقال للنماذج المدعمة (Sanchez,2007)

لجميع الحالات السابقة فإن آلية انهيار النموذج المدعم كانت بتشكل ثلاثة مفاصل لدنة موضحة في الشكل (٢-٤٢) وفق تسلسلها، ومن ثم حصل انفصال لشريحة الـFRP تحت القوة حيث أن الهبوط المفجئ والكلي للمقاومة في الأشكال الموضحة (٢-٤١) كانت بسبب اكتمال انفصال الشريحة.



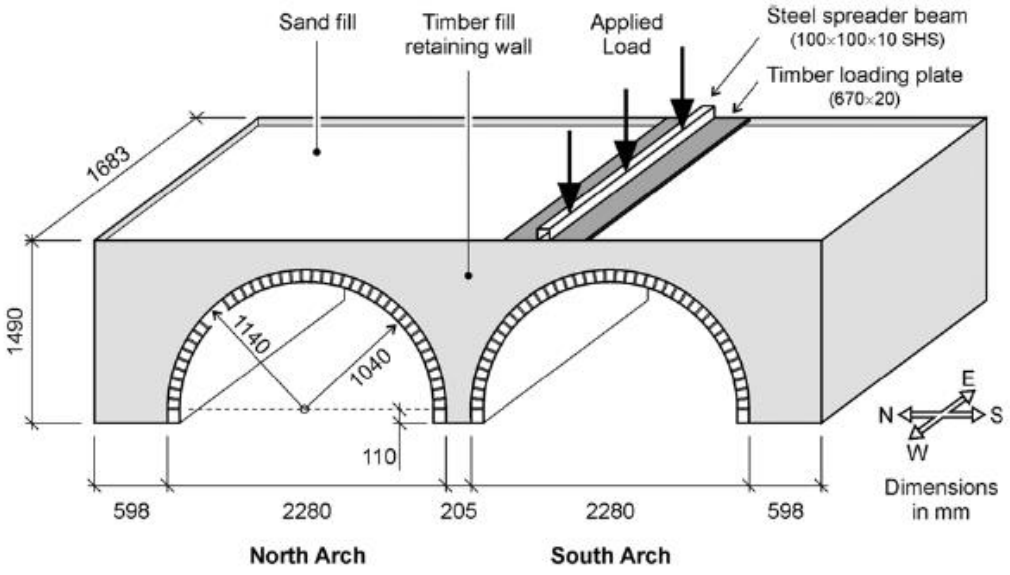
الشكل (٢- ٤٢): آلية انهيار القوس المدعم (Sanchez,2007)

٢-٥-٢- دراسة (Tao et al .,2011)

تمت الدراسة بإجراء دراسة تجريبية على قوس حجري مؤلف من فتحتين الأولى أطلق عليها اسم قوس شمالي (North Arch) والثانية قوس جنوبي (South Arch)، الأقواس غُطيت برمل مجفف مالئ بارتفاع ٣٥٠مم فوق التاج كما هو مبين في الشكل (٢-43).

تم تطبيق حمل مركز بشكل خطي على سماكة القوس عند ربع المجاز وعلى التتالي على القوس الشمالي ثم الجنوبي فتشكلت ميكانيكية الإنهيار الموضحة بالشكل (٢-٤٤)، حيث تشكل مفصل لدن تحت القوة وفي الجهة المقابلة ومفصلين عند الإستناد.

كما يبين الشكل (٢-٤٥) أماكن التشققات داخلية أم خارجية حيث تمت تسمية المفصل بالرمز C يليه مباشرة N او s (للقوس الشمالي أو الجنوبي على التوالي)، ثم مباشرة رقم أو حرف (الرقم للشقوق الداخلية والحرف للشقوق الخارجية) وتظهر المناطق في الشكل (٢-٤٤).



الشكل (٢- ٤٣):النموذج المدروس (Tao et al .,2011)

يبين الشكل (٢-٤٦) العلاقة بين القوة والإنتقال القطري تحت القوة لكل من القوسين الشمالي والجنوبي قبل التدعيم وبعد التدعيم، حيث تم تدعيم القوس الشمالي باستخدام ثلاث شرائح من الـ FRP، والقوس الجنوبي باستخدام ست شرائح، إن استجابة الأقواس قبل التقوية موضحة في الجزء السفلي من الشكل (٢-٤٦) لكل من القوسين الشمالي والجنوبي، حيث يكون السلوك خطي بدايةً ثم تبدأ القساوة بالتغير بميل صغير دون انخفاض في المقاومة حتى الوصول إلى القيمة العظمى (قبل التقوية 46.2KN للقوس الشمالي و 49.7 KN للقوس الجنوبي)، وبعد التدعيم زادت قدرة تحمل القوس الشمالي إلى 132KN بزيادة مقدارها 185% كما زادت قدرة تحمل القوس الجنوبي المدعم إلى 254KN بمقدار 411%.إن الوصول الى القيمة العظمى قبل التدعيم ترافقت مع تشكل مفصل لدن تحت القوة ، ثم تشكلت ثلاثة مفاصل لدنة ليكتمل انهيار القوس الحجري.

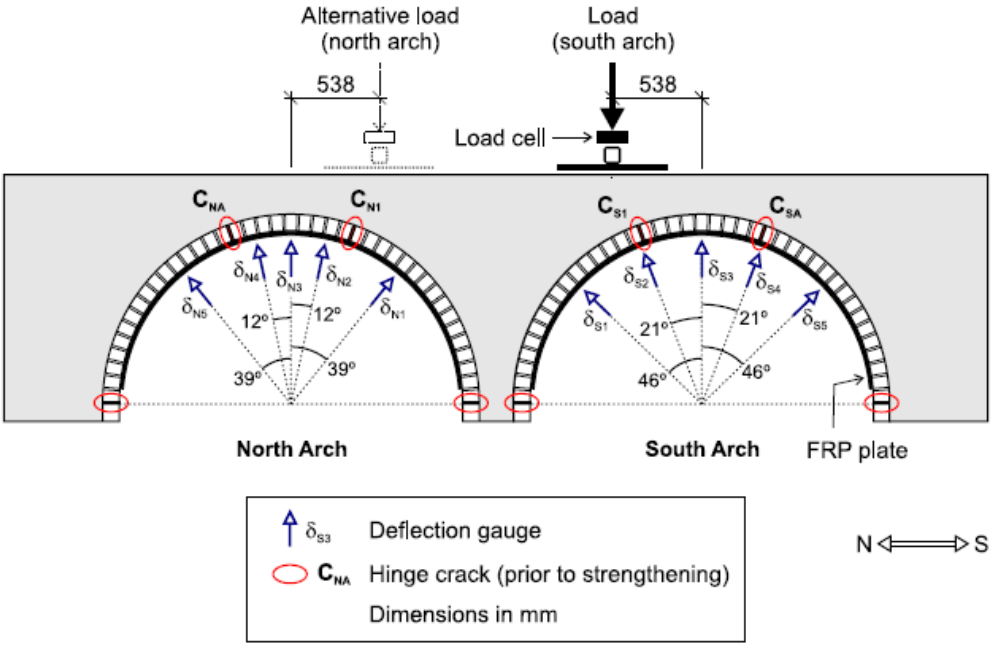
وقد بين البحث أن الإنهيار يتم باشتراك عدة ميكانيكات من الميكانيكيات التالية :

١- تشكل أربعة مفاصل لدنة (Hinge mechanicm).
٢- حصول انزلاق بين القطع الحجرية (Sliding Mechanism).
٣- انفصال شريحة الـFRP (Debonding).

هذا الإنفصال ينتج إنخفاضاً مفاجئاً في المشاركة بتحمل الأحمال من نظام التقوية .

بالنسبة لآلية انهيار القوس الشمالي المدعم: بدايةً كان سلوك القوس بعد التدعيم مشابهاً لسلوكه قبل التدعيم مع زيادة ملحوظة في القساوة حيث أن وجود الـ FRP أدى لإغلاق الشقوق وقاوم تشكلها، كما تمت مناقشته قبل التدعيم كما تشكلت مفاصل لدنة C_{N1}-C_{NA} بعد التقوية (الشكل ٢-٤٩).

يوضح الشكل (٢-٤٧) والشكل (٢-٤٨) العرض الموافق لانفصال شرائح الـ FRP لكل من القوسين الشمالي المدعم بثلاث شرائح والجنوبي المدعم بست شرائح على التوالي، حيث تظهر هذه المناطق باللون الرمادي.

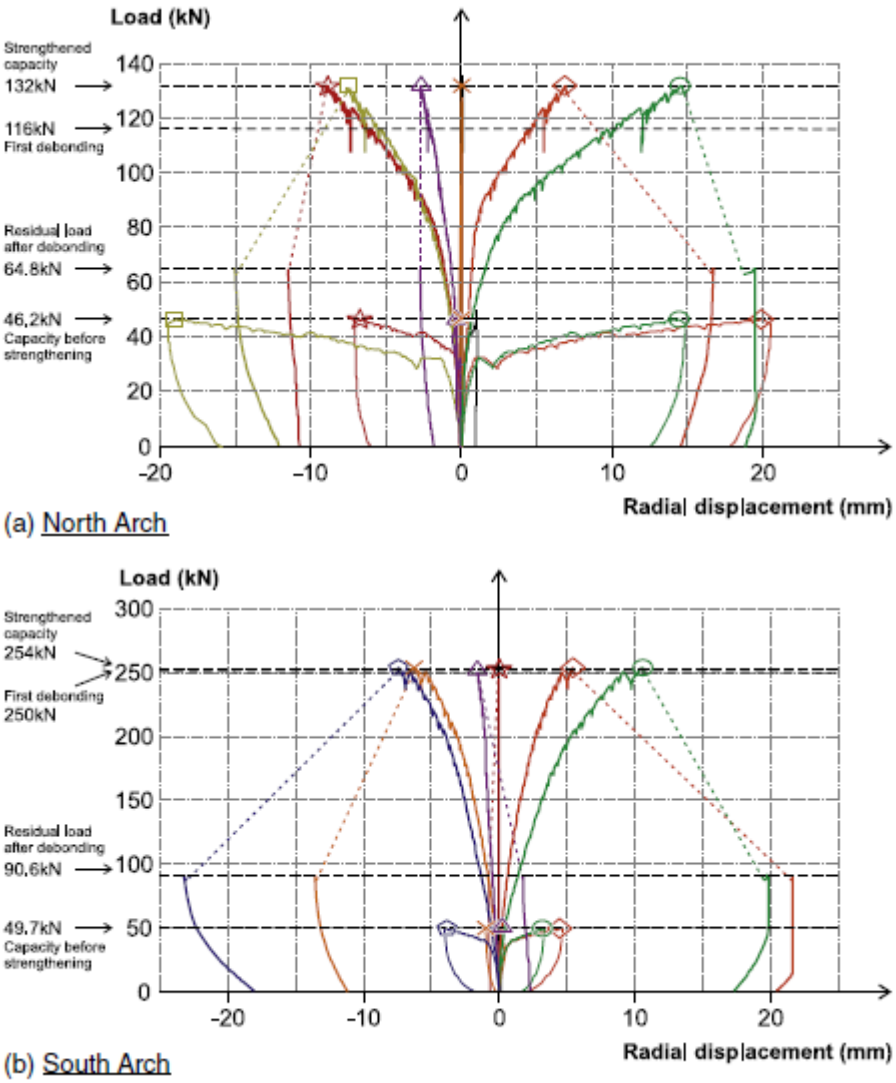


الشكل (٢- ٤٤): ميكانكية انهيار القوس غير المدعم (Tao et al .,2011)

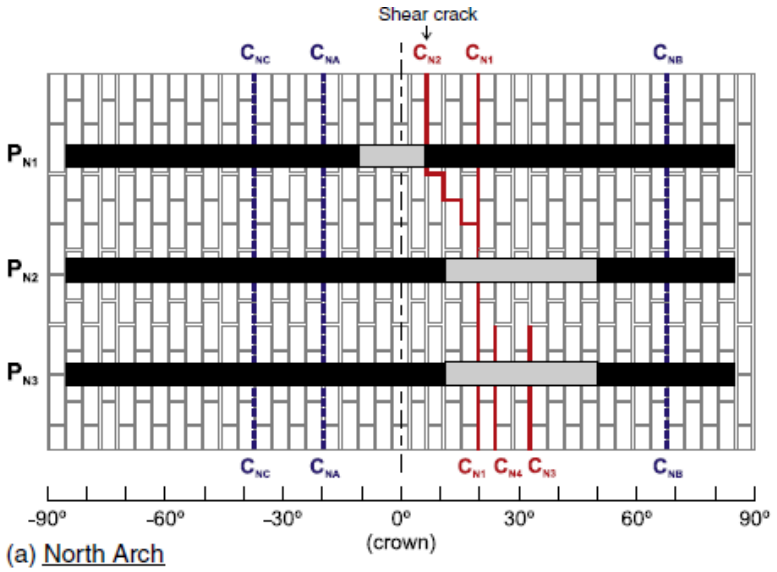
(a) Intrados crack C_{N1}.

(b) Extrados crack C_{NA}.

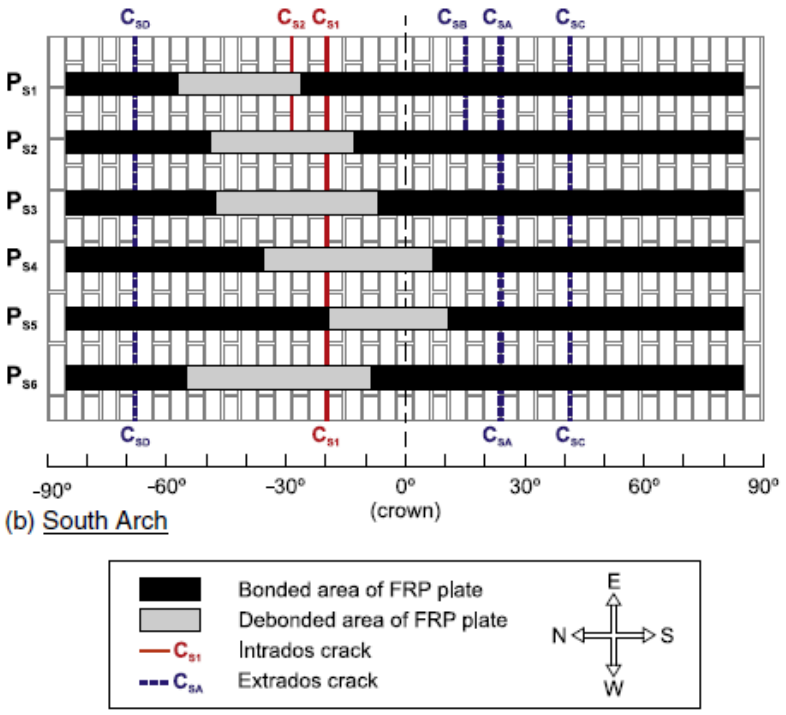
الشكل (٢- ٤٥):التشققات الداخلية والخارجية(Tao et al .,2011)



الشكل (٢- ٤٦):العلاقة بين القوة -الإنتقال القطري تحت القوة قبل وبعد التدعيم(Tao et al .,2011)

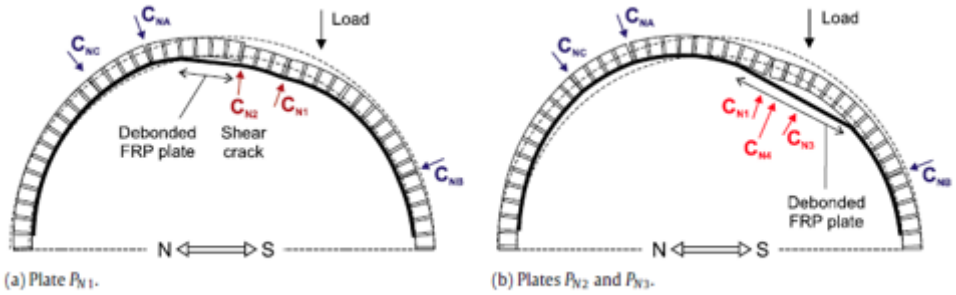


الشكل (٢- ٤٧): انفصال شرائح القوس الشمالي(Tao et al .,2011)



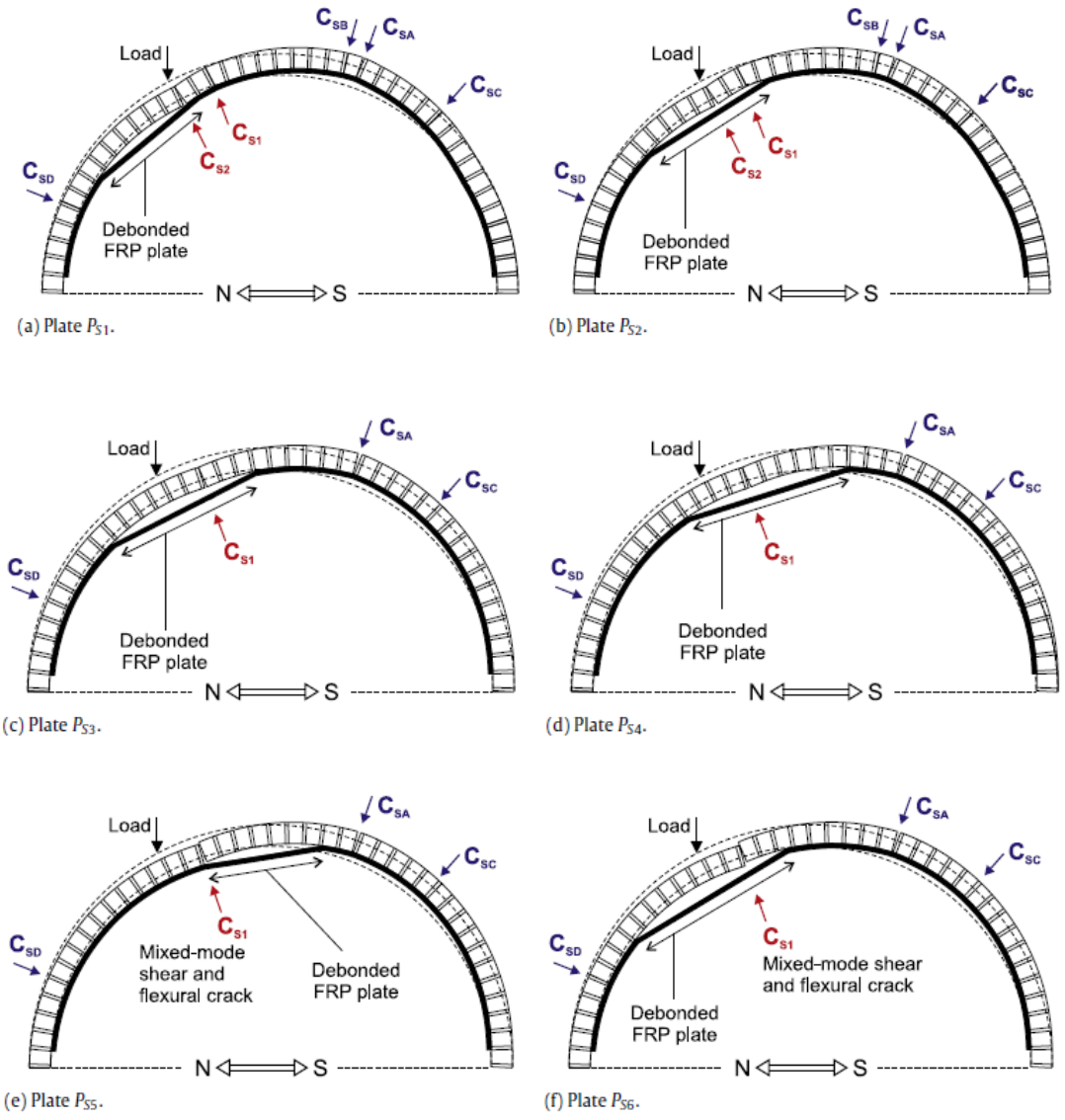
الشكل (٢- ٤٨): مناطق انفصال شرائح الـFRP للقوس الجنوبي(Tao et al .,2011)

يبين الشكل (٢-٤٩) المفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الشمالي وذلك عند كل شريحة من الشرائح الثلاث، حيث تشكلت ثلاثة مفاصل لدنة خارجية في الشرائح الثلاث وتشكل مفصلين لدنين داخليين أحدهما مترافق مع انهيار على القص في الشريحة الأولى، وتشكل ثلاثة مفاصل لدنة داخلية متجاورة تحت القوة في الشريحتين الثانية والثالثة، كمايوضح ترتيب الأحرف والأرقام ترتيب تشكل المفاصل.



الشكل (٢- ٤٩): المفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الشمالي(Tao et al .,2011)

يبين الشكل (٢-٥٠) المفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الجنوبي عند كل شريحة من الشرائح الست، حيث تشكلت ثلاثة مفاصل لدنة خارجية في اربعة شرائح وزادت إلى أربعة مفاصل لدنة في الشريحتين الطرفيتين كما تشكل مفصلين لدنين داخليين في أربعة شرائح بينما زادت إلى مفصلين لدنين في الشريحتين الطرفيتين.



(a) Plate P_{S1}. (b) Plate P_{S2}.

(c) Plate P_{S3}. (d) Plate P_{S4}.

(e) Plate P_{S5}. (f) Plate P_{S6}.

الشكل (٢- ٥٠): المفاصل المتشكلة وانفصال الشرائح في القوس الجنوبي(Tao et al .,2011)

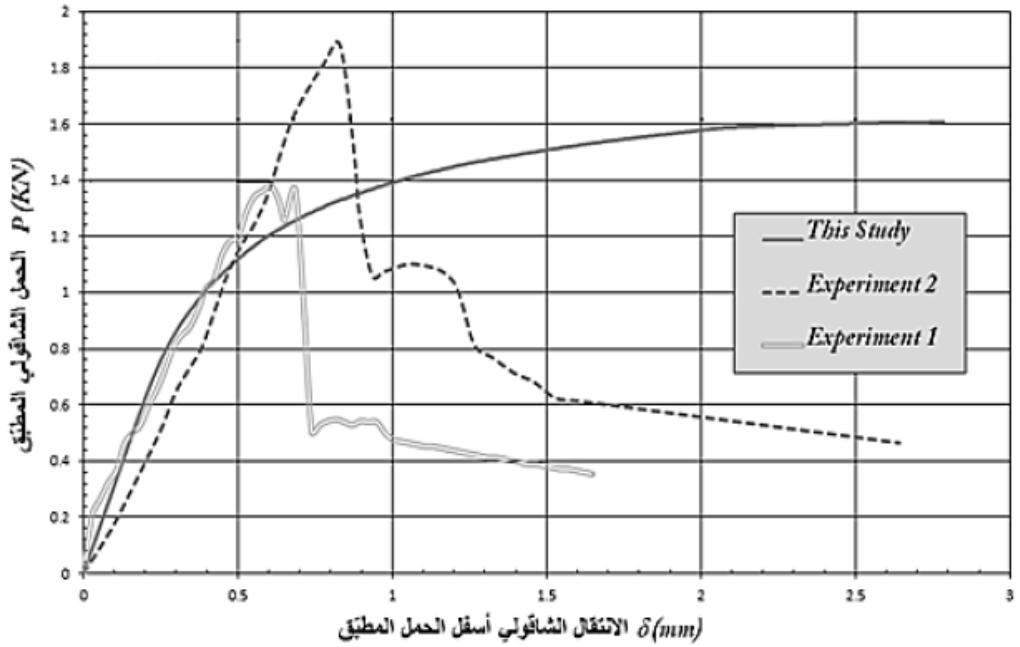
٢-٥-٣- دراسة (بقلة وبطيخة،٢٠١٣)

قام الباحثان (بقلة وبطيخة، ٢٠١٣) بدراسة تحليلية لتجربة (Sanchez, 2007) باستخدام طريقة العناصر المحدودة عن طريق برنامج (ABAQUS,VER 6-5) وتم في هذه الدراسة استخدام المادة الحجرية بمعامل مرونة (Elastic Modulus) E=2040MPa و معامل بواسون (Poisson's ratio) v=0.2. كما تم استخدام التحليل اللاخطي باعتماد التحليل اللاخطي للمادة (Materially Non-Linear Analysis,MNLA) ، تم استعمال 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 مخفَّض لنقاط غاوس (Gauss Points). كما تم اعتبار شروط الاستناد وثاقة تامة لجميع العقد عند نقاط الاستناد بما يتوافق والنموذج التجريبي.

يبين الشكل (٢-٥١) العلاقة بين (القوة- الانتقال تحت الحمولة) لدراسة (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) مقارنة مع التجارب التي قام بها (Sanchez, 2007) حيث كانت قدرة تحمل القوس 1.61kN وهي قيمة وسطية بين قيمتي التجربتين. لم يتم الحصول على نفس التصرف لمرحلة مابعد الوصول للقوة الحرجة وذلك بسبب طريقة النمذجة المعتمدة، حيث **تمت نمذجة المادة الحجرية كمادة واحدة دون التمييز مابين القطع الحجرية والمونة كل على حدة وبالتالي عدم الأخذ بعين الاعتبار احتمالية ظاهرة انزلاق القطع الحجرية بين بعضهاالبعض** وهو مايؤثر على الانتقال والسلوك مابعد الوصول للقوة الحرجة حيث يمكن ملاحظة عدم حدوث انهيار مفاجئ في نموذج (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) إلا أنه يمكن الوصول إلى القوة الحرجة بهذه الطريقة، وهذه الطريقة سهلة واقتصادية في عملية النمذجة.

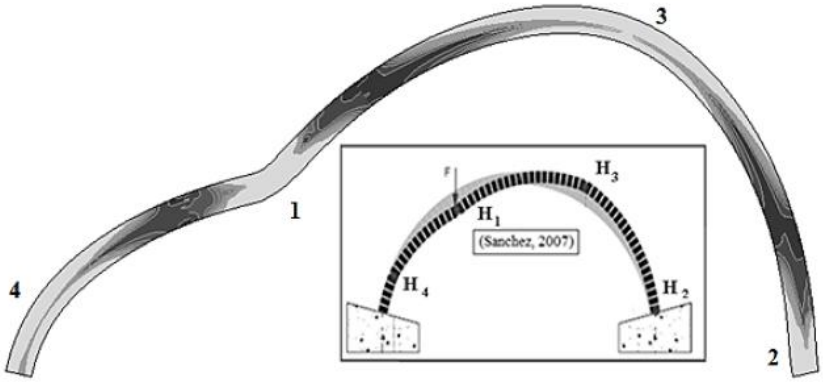
كما يبين الشكل (٢-٥٢) التشوهات النسبية الرئيسية في النموذج المدروس (Principal strain) في دراسة (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) عند الحمولة الحرجة حيث يبين تسلسل تشكل مفاصل ميكانيكية الانهيار وبشكل مشابه لما ورد في تجربة (Sanchez, 2007) وذلك من تتبع تدرج واتساع انتشار التشوهات النسبية ضمن السماكة عند كل مفصل.



الشكل (٢- ٥١):العلاقة بين القوة والإنتقال في كل من الدراستين (بقلة وبطيخة،٢٠١٣ ;Sanchez,2007)

تم بعد ذلك 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 بالشكل (٢-٤٠).تمت إضافة هذه الشرائح على النموذج المدروس بدون تقوية مع مواصفات ميكانيكية

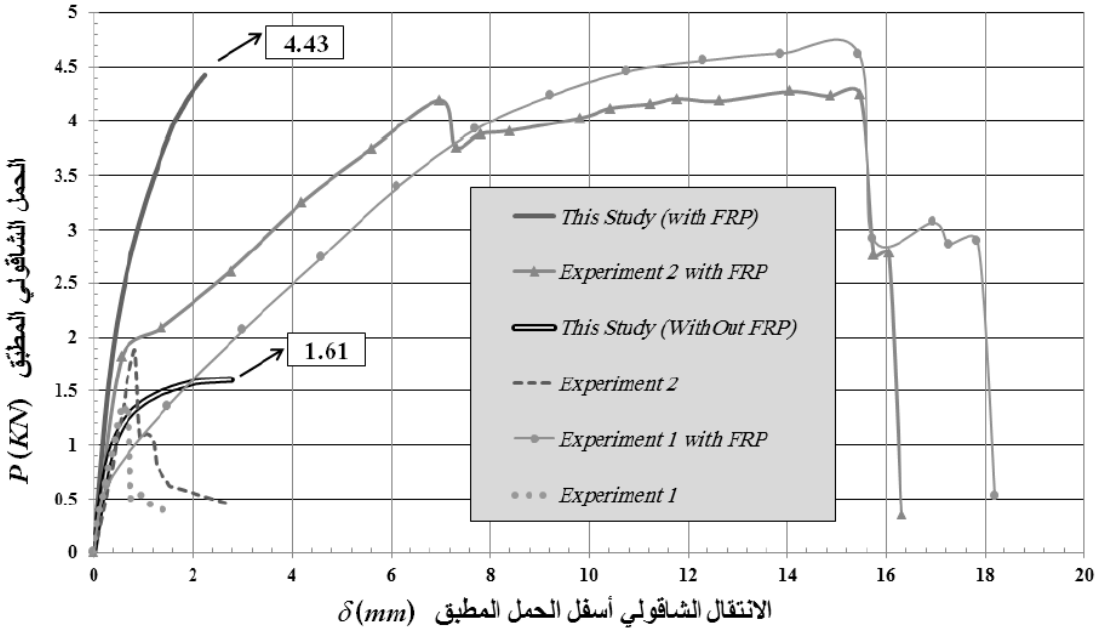
للشرائح كتلك المعطاة في دراسة (Sanchez, 2007) حيث معامل المرونة باتجاه الألياف (Longitudinal Elastic Modulus) مقداره 80GPa ، ومعامل بواسون 0.2، كما تم اعتماد إجهاد الشد (Tensile strength) لشريحة الـ FRP مقداره 1470MPa وتشوه نسبي على الانهيار(Failure strain) مقداره 0.03658.



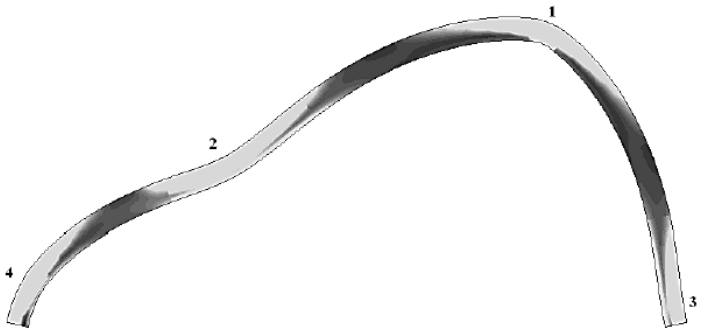
الشكل (٢- ٥٢): ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في دراسة (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣)

تمَّ استخدام العنصر (T2D2) لنمذجة شرائح الـ GFRP، وهو عبارة عن عنصر خطّي شبكي (Truss Element) بعقدتين، وكل عقدة لها درجتي حرية (انتقالين في المستوي)، وله نقطة غاوس وحيدة في منتصفه. تم فرض التماسك بين شريحة الـFRP والمادة الحجرية مثالي (Perfect bond)، وبالتالي عدم الأخذ بعين الاعتبار ظاهرة انفصال شريحة الـFRP عن القوس الحجري (Debonding).

تم تطبيق حمل شاقولي مركز عند ربع المجاز على القوس المقوى بغية المقارنة مع دراسة (Sanchez, 2007). تم الحصول على قوة شاقولية أعظمية مقدارها 4.43kN وهي مطابقة تقريباً للقيمة الوسطية في دراسة (Sanchez, 2007)(4.45kN)، إلا أن الانتقال في دراسة (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) كان صغيراً جداً مقارنة مع التجربة والتي حدث فيها الانهيار باكتمال انفصال شريحة الـFRP، ويعود ذلك إلى فرض التماسك التام (Perfect bond) بين الشريحة والمادة الحجرية مما أثر على الانتقال، وقد بينت دراسة Ricamato (2007) أنّ عدم أخذ أثر التماسك بين عناصر القوس يؤدي إلى الوصول إلى القوة الأعظمية التي يتحملها القوس دون الانتقال (الشكل ٢-٥٣).

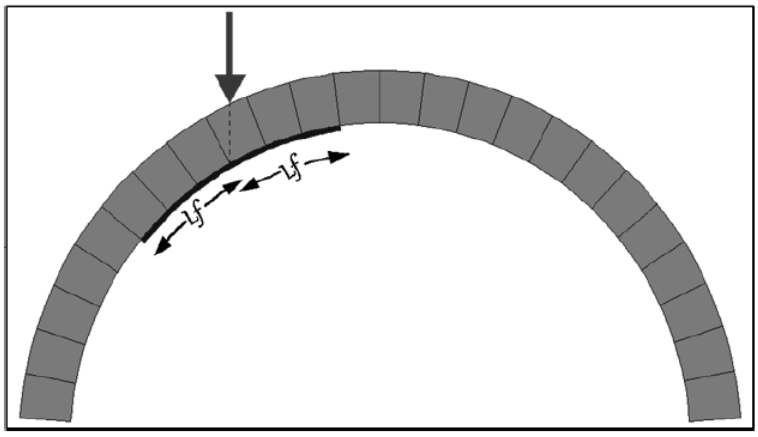


الشكل (٢- ٥٣): العلاقة بين القوة والإنتقال في كل من الدراستين (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣ ;Sanchez,2007) للقوس المقوى



الشكل (٢- ٥٤):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في القوس المقوى (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣)

تمت دراسة أثر طول شريحة الـGFRP على قدرة تحمل القوس الحجري للحمل الشاقولي المطبق، وذلك من خلال تثبيت سماكة الشريحة (2mm) وتغيير طولها انطلاقاً من نقطة تطبيق القوة وباتجاه اليمين واليسار، حيث تم البدء بطول مساوٍ للصفر (أي بدون وجود الـFRP)، ثم زيادة الطول تدريجياً (L_f) إلى يسار الحمل و(L_f) إلى يمينه ، كما هو مبين في الشكل (٢-٥٥).



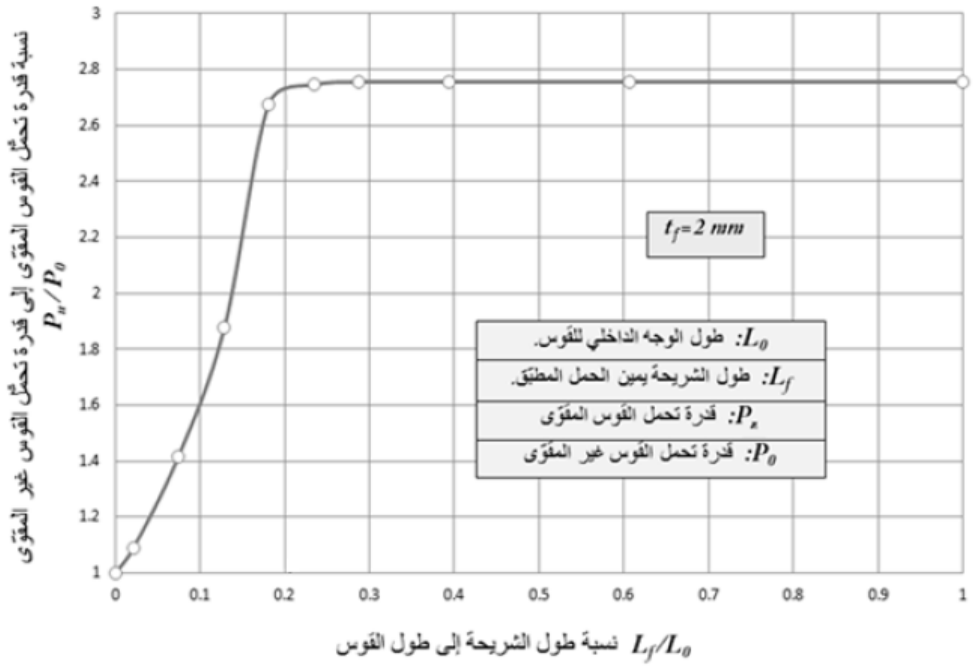
الشكل (٢- ٥٥): توضع شرائح GFRP واتجاه تزايد الطول الفعال لها(بقلة وبطيخة،٢٠١٣)

يبين الشكل (٢-٥٦) مخطط نسبة الطول L_f إلى طول القوسL_f/L_0 (المحور الأفقي)-نسبة قدرة تحمل القوس المقوى إلى قدرة تحمل القوس غير المقوى P_U/P_0 (المحور الشاقولي) ،يُمكن الملاحظة من الشكل أن قدرة تحمل القوس الحجري تزداد بشكل شبه خطي مع زيادة الطول L_F حتى الوصول إلى قيمة $L_F=0.22L_0$ تقريباً، عندها نلاحظ ثبات قدرة التحمل مع زيادة الطول L_F عند النسبة $P_U/P_0=2.75$ أي أن الطول $L_F=0.22L_0$ هو الطول الفعال لشريحة الـFRP في هذه الحالة وأي زيادة جديدة في الطول لن تكون مفيدة ولن تؤدي إلى زيادة قدرة التحمل.

وبالتالي فإن التقوية الموضعية (Local Strengthening) باستخدام أطوال محددة وصغيرة من شرائح الـFRP وفي مواضع محددة يُغني عن تقوية كامل القوس ويعطي قدرة التحمل المطلوبة.

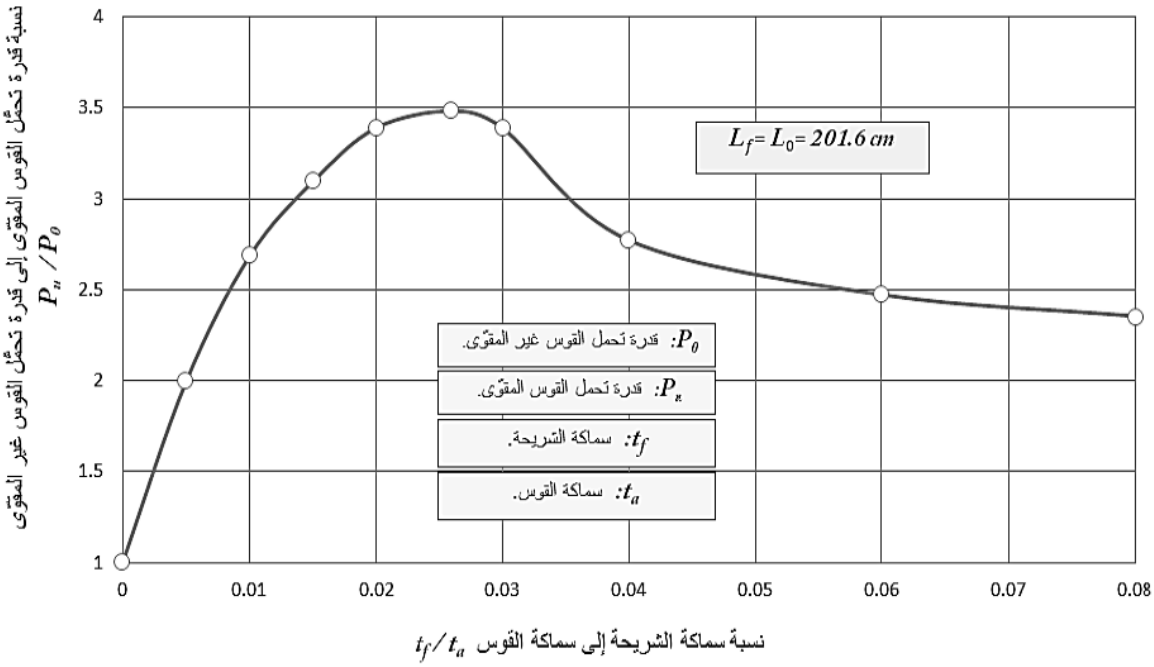
تمت دراسة أثر سماكة شريحة الـ GFRP المستخدمة في تقوية القوس الحجري على قدرة تحمله للحمل الشاقولي المطبق ، حيث تم تثبيت طول شريحة الـ FRP (استخدمت على كامل طول القوس)، وتم تغيير سماكة الشريحة ابتداءً من السماكة (t_f =0) أي دون وجود الـ FRP وحتى السماكة t_f=4mm.

يبين الشكل (٢-٥٧) علاقة نسبة سماكة شريحة الـ FRP إلى سماكة القوس t_F/t_0 (المحور الأفقي) مع نسبة قدرة تحمل القوس المقوى إلى قدرة تحمل القوس غير المقوى P_U/P_0 (المحور الشاقولي). يمكن ملاحظة أن القوة الحدية تزداد حتى قيمة عظمى (P_U/P_0=3.5) عند سماكة لشريحة الـ FRP مساويةً t_f=1.3mm يقابلها نسبة t_f/t_0=0.026 ومن ثم تبدأ القوة الحدية بالتراجع مع ازدياد السماكة .تم تفسير هذا الإنخفاض في القوة الحدية (قدرة تحمل القوس) إلى اختلاف تسلسل تشكل المفاصل التي تعطي ميكانيكية الإنهيار للقوس الحجري (بقلة وبطيخة،٢٠١٣).



الشكل (٢- ٥٦): تأثير تغيير طول شرائح الـFRP على قدرة تحمل القوس (بقلة وبطيخة،٢٠١٣)

من الشكل يتبين أن استخدام سماكات صغيرة من شرائح الـFRP يُعطي الفاعلية المطلوبة في رفع قدرة التحمل، بينما يؤدي استخدام سماكات كبيرة إلى انخفاض قدرة التحمل نظراً لتغير تسلسل تشكل المفاصل التي تعطي ميكانيكية الإنهيار.



الشكل (٢- ٥٧): تأثير تغيير سماكة الـFRP على قدرة تحمل القوس

٢-٦- ملخص الفصل الثاني :

تم في هذا الفصل استعراض خصائص المادة الحجرية و مادة الـ FRP، كما تم التركيز على ميكانيكيات انهيارالأقواس الحجرية موضوع هذا البحث المقواة وغير المقواة، والتطرق لبعض الدراسات المرجعية في هذا المجال.

مما سبق أكدت الأبحاث السابقة أن التدعيم باستخدام الـ FRP أعطى فاعلية كبيرة، وهذا مايؤكد على أهمية هذا البحث. إضافةً إلى ذلك فإن بعض الدراسات (بقلة وبطيخة،٢٠١٣) لم تأخذ بعين الإعتبار التماسك بين القطع الحجرية والمونة إضافةً إلى أن عملية النمذجة تمت باعتبار المونة والقطعة الحجرية كمادة واحدة، مما قد يسبب عدم الحصول على التصرف الحقيقي للقوس المدعم أو غير المدعم على حد سواء. في محاولة لتلافي الفرضيات السابقة، سيتم في هذه الدراسة أخذ أثر التماسك بين المونة والقطعة الحجرية من جهة وبين القطع الحجرية والـ FRP، بالإضافة إلى نمذجة كل من القطعة الحجرية والمونة كل على حدة، وذلك لإعطاء عملية التحقق من قدرة الـ FRP على رفع مقاومة القوس الحجري صورة أكثر واقعية.

الفصل الثالث

التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة

Structural Analysis Using Finite Element Method (FEM)

٣-١- مقدمة(introduction)

يتضمن هذا الفصل الدراسة العددية (Numerical Study) باستخدام طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) لقوس حجري غير مدعم (Unstrengthed Arch) بدايةً ثم تم تدعيمه بشرائح الـFRP، بهدف التعرف على الميكانيكية التي سينهار عليها القوس تحت تأثير حمل شاقولي مركز عند ربع المجاز والتأكد من فاعلية تدعيم القوس بالـFRP، ثم تم تغيير المواصفات البعدية للشرائح بغية الوصول إلى المواصفات البعدية المثلى لشرائح الـFRP.

تمت الدراسة باستخدام التحليل اللاخطي للمادة. تم تعريف العناصر المحدودة التي تم اختيارها وتوصيف المواد المستخدمة في عملية النمذجة حيث ثم تمت الدراسة على أربعة مراحل :

المرحلة الأولى: وفيها تم إنشاء ثلاثة نماذج للقوس غير المقوى بتقسيمات مختلفة للعناصر المحدودة المستخدمة بغية الوصول إلى نموذج مناسب في عملية التحليل بما يوفر في وقت التحليل دون أن يؤثر سلباً على دقة النتائج.

المرحلة الثانية: وفيها تمت نمذجة القوس غير المقوى الذي تم اعتماده في المرحلة الأولى مع استعراض ميكانيكية انهيار القوس تحت تأثير حمل مركز متزايد عند ربع المجاز، مع المقارنة مع نتائج الدراسات المرجعية السابقة.

المرحلة الثالثة: تم فيها نمذجة القوس المدعم مع استعراض آلية انهيار القوس المدعم، و المقارنة مع الدراسات المرجعية السابقة.

المرحلة الرابعة: تم فيها تغيير المواصفات البعدية لشرائح الـFRP (السماكة – التباعد بين الشرائح – موضع الشرائح)لمعرفة الخصائص البعدية الأفضل لشرائح الـFRP .

٣-٢- توصيف النموذج (Model Description)

تم تحليل النموذج المدروس تجريبياً في أطروحة الدكتوراه للباحث (Sanchez, 2007) والمبين في الشكل (٢-٣٧) وهو عبارة عن قوس حجري على زاوية 154 درجة، نصف القطر الداخلي 750 mm ونصف القطر الخارجي 800 mm، سماكة القوس 50 mm وعرض القوس بالاتجاه المتعامد مع مستوي القوس 450 mm مستند على كتلتين من البيتون.

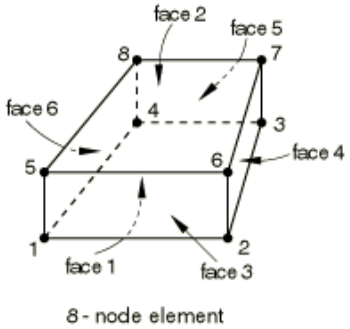
٣-٣- التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة

(Structural analysis using Finite Element Method, FEM)

٣-٣-١- العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج (ABAQUS,VER12-1)

(Used Elements in the Model with ABAQUS, VER12-1)

تم استخدام العنصر C3D8 (الشكل ٣-١) في نمذجة االقطع الحجرية (Masonry Modeling) وهو عنصر حجمي مؤلف من ٨ عقد لكل عقدة ثلاث درجات من الحرية (Degrees Of Freedom) ، ثلاثة انتقالات (ABAQUS Documentation,2012).



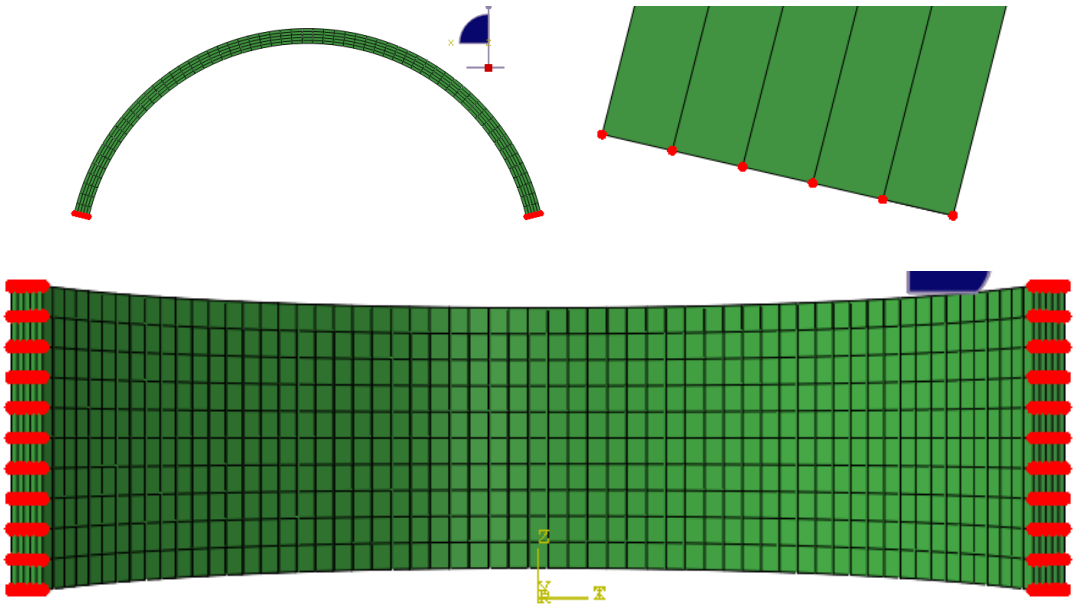
الشكل (٣- ١): العنصر المستخدم في نمذجة مادة الحجر(ABAQUS Documentation)

كما تم استخدام العنصرين Spring2, Spring A (الشكل ٣-٢) في نمذجة سلوك المونة (Mortar) وكل منهما عبارة عن عنصر خطي مؤلف من عقدتين له درجة حرية وحيدة، حيث تم تعريف نابض SpringA في اتجاه عمل القوس (يعمل على الشد والضغط – Tension And Compression only)، كما تم تعريف نابضين Spring2 يعمل كل منهما على القص (Shear) أحدهما في الإتجاه الشاقولي (Vertical) والآخر في اتجاه متعامد (Perpendicular) مع مستوي القوس.

الشكل (٣- ٢): العنصر المستخدم في نمذجة سلوك المونة (ABAQUS Documentation)

٣-٣-٢- الشروط المحيطية للنموذج المدروس:(Model's Boundary Conditions)

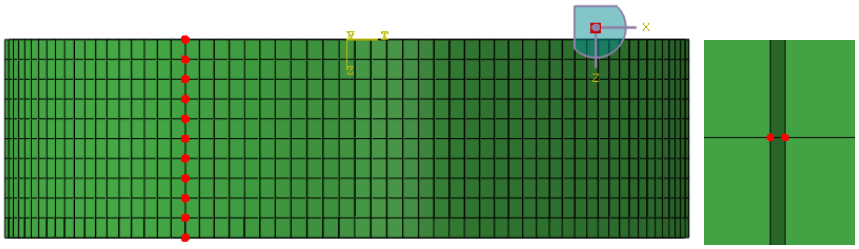
تم منع الحركة الأفقية والشاقولية (Vertical And Horizontal Motion) عند نقاط الإستناد مع القاعدة كما هو مبين في الشكل (٣-٣).



الشكل (٣- ٣): شروط استناد القوس الحجري

٣-٣-٣- الأحمال المطبقة على النموذج:(Load Applied to The Model)

تم تطبيق حمل مركز عند ربع المجاز متزايد حتى الوصول إلى حمولة الإنهيار(Failure Load) كما في الشكل(٣-٤).



الشكل (٣- ٤): أماكن تطبيق الحمل المركز على النموذج المدروس (ABAQUS,Ver12)

٣-٣-٤- نوع التحليل المستخدم في النموذج:(The type of analysis)

تم اعتماد تحليل لاخطي يأخذ بعين الإعتبار لا خطية المادة (Materially Nonlinear Analysis,MNA).

٣-٣-٥- توصيف المواد المستخدمة في النمذجة: Used Material In The Modeling

تحوي قاعدة بيانات برنامج (ABAQUS,Ver12) ثلاث طرق مختلفة لنمذجة المواد شبه الهشة (Quasi – Brittle Material) والبيتون (Concrete) والبيتون المسلح (Reinforced Concrete) وذلك لجميع العناصر الإنشائية كالإطارات (Frames)، والعناصر الشبكية (Truss Elements)، والعناصر المساحية المستوية (Shells) والعناصر المستوية الفراغية (Solids) وهي (ABAQUS Documentation,2012):

١- Concrete Smeard Cracking Model.

٢- Cracking Model for Concrete (Brittle Cracking Model).

٣- Concrete Damage Plasticit.

تُستخدم الطريقة الأولى (Concrete Smeard Cracking Model)عندما يُسبب التحميل بشكل أساسي حصول تشوهات متزايدة (Monotonic Straining) لذلك لا يمكن استخدامها إلا عند تطبيق حمولات متزايدة (Pushover Loading) ولا تصلح عند تطبيق الحمل الدوري (Cyclic Loading)، والإنهيار فيها يكون إما بسبب التشقق على الشد (Tensile Cracking) أو التحطم على الضغط (Crushing Compressive) ، أما الطريقة الثانية (Brittle Cracking Model) فتُستخدم في حالات التحميل التي يكون فيها سلوك انهيار المادة على الضغط والشد غير مهم حيث يعتبر سلوك المادة على الضغط سلوكاً مرنا (Elastic Behaviour).

تُستخدم الطريقة الثالثة (Concrete Damage Plasticity-CDP) في حالات التحميل العشوائي (Arbitary Loading) حيث يأخذ بعين الإعتبار تأثير إزالة القوة والتناقص التدريجي في الصلابة المرنة (Elastic Stiffiness) في حالتي الشد والضغط بسبب التشوهات اللدنة كما يأخذ بالاعتبار آثار استرداد القساوة المرنة (Recovery of the Elastic Stiffiness) تحت تأثير الحمل الدوري (Cyclic Loading) عند انعكاس الحمولة من الشد إلى الضغط ، سيتم في هذه الدراسة استخدام طريقة (CDP) في النمذجة.

يبين الشكل (٣-٥) العلاقة بين الإجهاد والتشوه النسبي (Stress – Strain Relationship) على الضغط المحوري لطريقة CDP حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي على الضغط ε_c والمحور الشاقولي يمثل إجهاد الضغط في البيتون σ_c فالسلوك يكون خطياً (Linear) في البداية حتى الوصول إلى قيمة الخضوع الإبتدائي σ_{c0} (Initial Yield) ، ثم يبدأ السلوك اللاخطي للمادة حيث تدخل المادة في مرحلة التقسية الإنفعالية (Stress Hardening) حيث تصل الإجهادات إلى القيمة الحدية لتحمل الحجر على الضغط (Ultimate Stress) بعدها تبدأ الإجهادات بالإنخفاض مع استمرار تزايد التشوهات في هذه المرحلة التي تسمى (Strain Softening) حيث تضعف مقاومة المادة بعد ظهور التشققات ويزداد الضعف بازدياد التشققات واتصالها في مابينها.

يتم التعبير عن انخفاض القساوة بالمعامل d_c الذي يُسمى معامل تخفيض القساوة على الضغط (Uniaxial Compression Damage Variable)، حيث تبدأ قيمته من الصفر (المادة غير متشققة) إلى الواحد (المادة تفقد كل مقاومتها). يعبر الخط المنقط ذي الميل E_0 $(1-d_c)$ في الشكل (٣-٥) عن حالة إزالة الحمولة حيث تسلك المادة سلوكاً لدناً، وبالمقارنة مع الخط ذي الميل E_0 الذي يُعبر عن سلوك المادة المرن عند إزالة الحمولة -حيث E_0 (معامل المرونة الإبتدائي INITIAL MODULUS OF ELASTICITY)- يمكن انخفاض ميل الخط الأول إلى E_0 $(1-d_c)$ بمقدارd_c وهذا ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات الضغط اللدنة المتبقية في المادة ε_c^{pl}(Compressive Equivalent Plastic Strain) التي تُعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \times \frac{\sigma_c}{E_0} \qquad (٣-١)$$

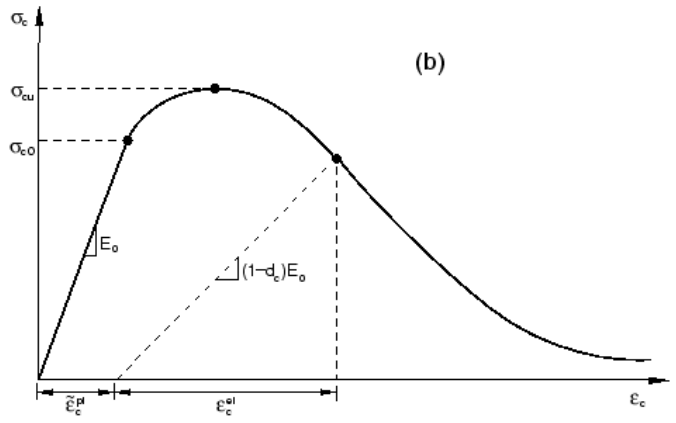
حيث ε_c^{in} التشوه غير المرن (Inelastic Strain) ويُحدد بالعلاقة (٣-٢) وهو الفرق بين التشوه الكلي الحاصل عند نقطة معينة ε_c من منحني الإجهاد –التشوه على الضغط غير المحوري والتشوه المرن عند هذه النقطة ε_{0c}^{el} (Elastic Strain) الذي ينتج من تقسيم إجهاد الضغط الناتج عند النقطة المذكورة σ_c على معامل المرونة الإبتدائي E_0 .

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (٣-٢)$$

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (٣-٣)$$

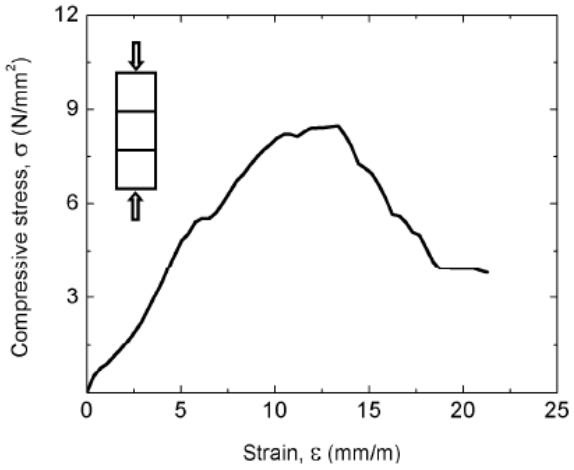
حيث d_c هو معامل تخفيض القساوة على الضغط (Uniaxial Compressive Damage Variable) ويُعطى بالعلاقة التالية :

$$d_c = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (٣-٤)$$

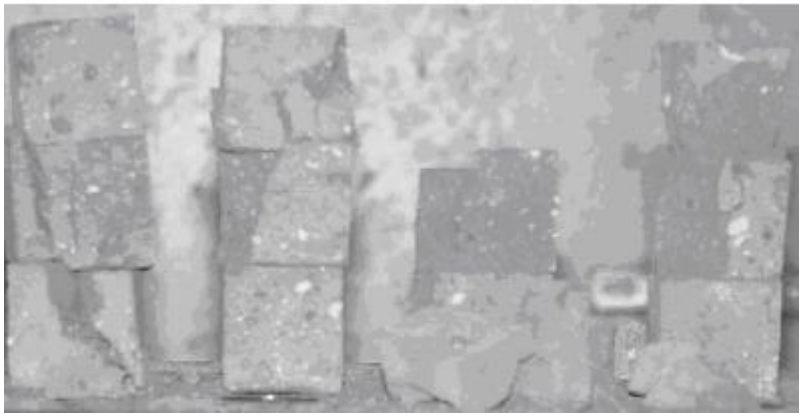


الشكل (٣- ٥): علاقة الإجهاد - التشوه لسلوك الضغط لمادة الحجر (ABAQUS Documentation)

تم في هذه الدراسة اعتماد منحني التشوه النسبي- إجهاد الضغط المبين في الشكل (٣-٦) والموافق لقيمة التشوه النسبي-إجهاد الضغط في تجربة (Sanchez,2007)، حيث يبين الشكل أن المقاومة تزداد وصولاً إلى ضغط أعظمي 8.7MPa وتشوه نسبي على الضغط 0.015 ثم تنخفض المقاومة، حيث يرافق ذلك ظهور شقوق شاقولية واضحة (الشكل ٣-٧) ومستمرة حتى الانهيار عند تشوه نسبي (Failure stain) مقداره 2.14%.



الشكل (٣- ٦): منحني الإجهاد - التشوه لسلوك مادة الحجر على الضغط (Sanchez,2007)



الشكل (٣- ٧): الشقوق الشاقولية في القطع الحجرية في تجربة (Sanchez,2007)

تم تعريف سلوك الشد للحجر بالاستفادة من (ABAQUS Documentation,2012)، حيث يكون تصرف البيتون تحت تأثير الشد المحوري خطي حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الشد σ_{to} (الشكل ٣-٨)

الذي يترافق مع ظهور أول شق في مادة البيتون، وبعد الوصول إلى الإجهاد الحدي تسلك المادة سلوكاً لاخطياً حيث تبدأ التشققات بالظهور ويصبح بالإمكان رؤيتها بالعين المجردة وتبدأ الإجهادات في هذه المرحلة بالإنخفاض مع استمرار التشوهات بالتزايد حيث تسمى هذه المرحلة بـ (Strain Softening) وتصبح المادة ضعيفة بسبب ازدياد الشقوق واتساعها، وعند إزالة الحمولة عند أي نقطة من منحني الإجهاد – التشوه النسبي تتناقص القساوة، يتم التعبير عن تناقص القساوة بالمعامل d_t (معامل تخفيض القساوة على الشد)، حيث يأخذ قيمة صفر للدلالة على المادة غير المتشققة وحتى الواحد للدلالة على المادة المتشققة والتي فقدت كامل مقاومتها، يُعبر الخط المنقط ذو الميل $(1-d_t)E_0$ (الشكل ٣-٨) عن حالة إزالة الحمولة حيث تسلك المادة سلوكاً لدناً وبالمقارنة مع الخط المنقط ذو الميل E_0 (معامل المرونة الإبتدائي Initial modulus of elasticity) الذي يُعبر عن سلوك المادة المرن عند إزالة الحمولة نُلاحظ انخفاض ميل الخط المنقط إلى $(1-d_t)E_0$ بمقدار d_t وهذا

ناتج عن انخفاض قساوة المادة عند إزالة الحمولة بسبب ظهور تشوهات لدنة متبقية في المادة ε_t^{pl} (Tensile Equivalent Plastic Strain) التي تُعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \times \frac{\sigma_t}{E_0} \qquad (٣-٥)$$

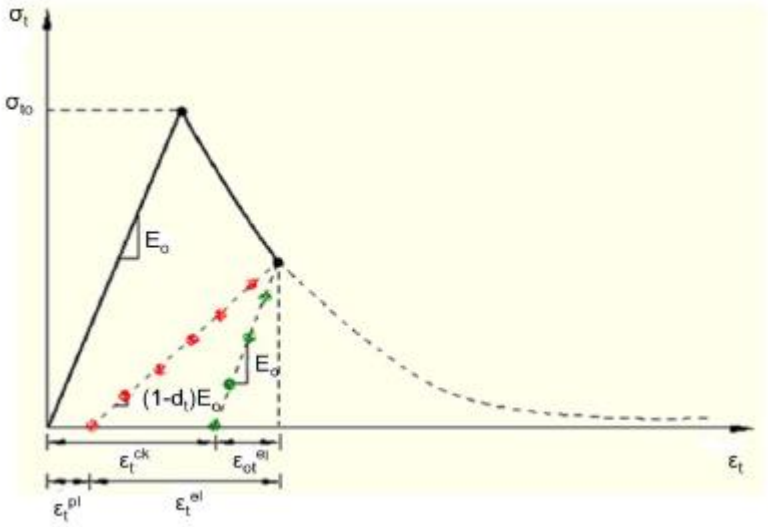
حيث ε_t^{ck} تشوه التشقق (cracking Strain) ويُحدد بالعلاقة (٣-٦) وهو الفرق بين التشوه الكلي الحاصل عند نقطة معينة ε_t من منحني الإجهاد –التشوه على الشد غير المحوري والتشوه المرن عند هذه النقطة ε_{0t}^{el} (Elastic Strain) الذي ينتج من تقسيم إجهاد الشد الناتج عند النقطة المذكورة σ_t على معامل المرونة الإبتدائي E_0 .

$$\varepsilon_t^{in} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \qquad (٣-٦)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0} \qquad (٣-٧)$$

حيث dt مُعامل تخفيض القساوة على الشد ويُعطى بالعلاقة التالية (Jankowiak and Lodygowski,2005):

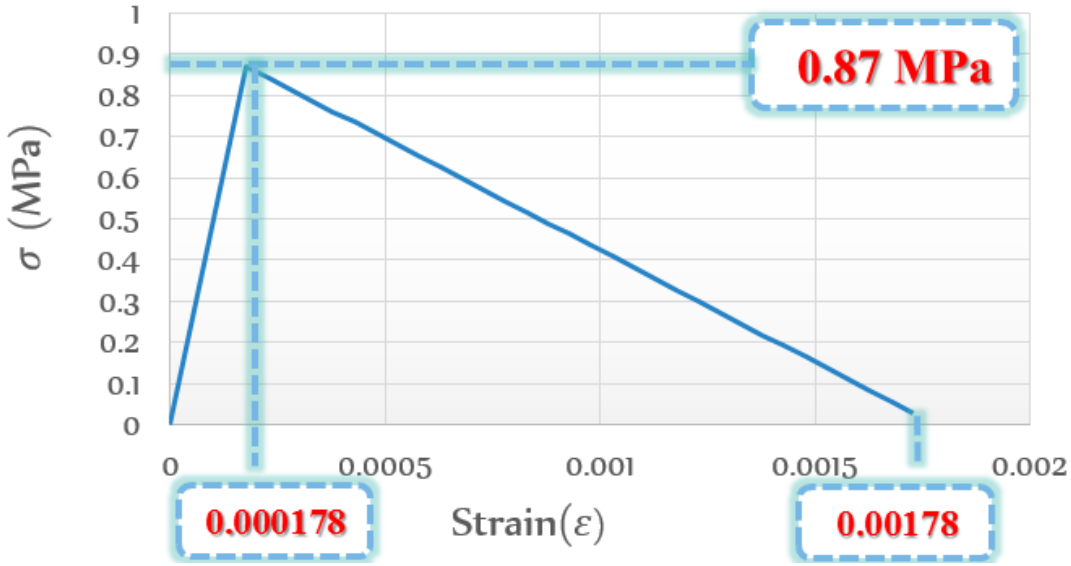
$$d_t = \frac{\sigma_{t0} - \sigma_t}{\sigma_{t0}} \qquad (٣-٨)$$



الشكل (٣- ٨): مخطط الإجهاد –التشوه النسبي للبيتون على الشد (ABAQUS Documentation ver6.12,2012)

يبين الشكل (٣-٩) علاقة (إجهاد الشد-التشوه النسبي) للحجر والمستخدم في الدراسة الحالية، حيث تم افتراض قدرة تحمل على الشد لمادة الحجر يُعادل عشر تحملها على الضغط. يكون سلوك الحجر على الشد خطي بدايةً

حتى الوصول إلى قدرة التحمل الأعظمية على الشد (0.87MPa)، ثم يتناقص وصولاً إلى قيمة الصفر عند تشوه نسبي أعظمي 0.00178 والمساو لعشر مرات التشوه النسبي عند نهاية مرحلة المرونة (0.000178) (ABAQUS Documentation,2012).

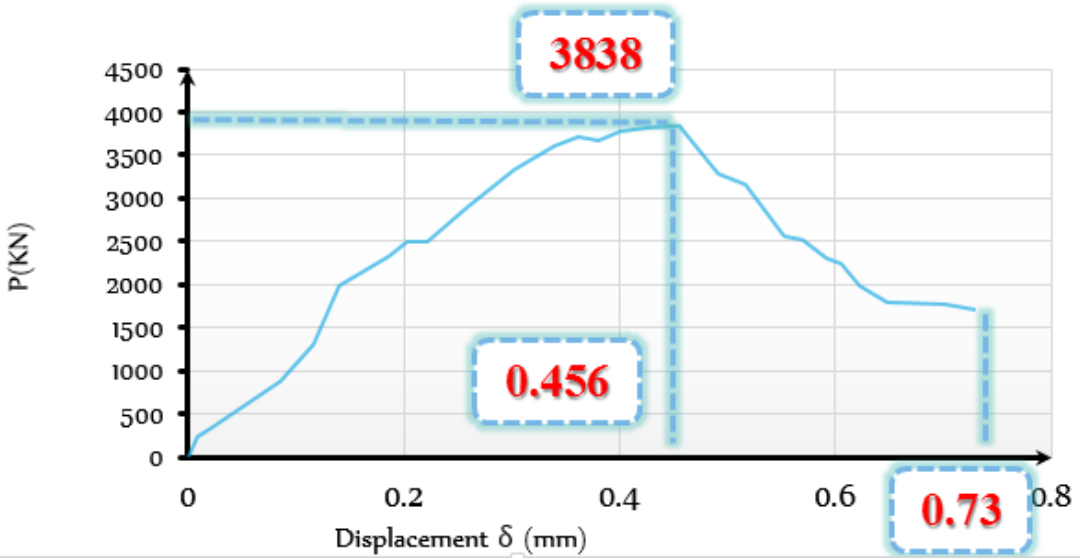


الشكل (٣- ٩): علاقة الإجهاد - التشوه -لسلوك مادة الحجر على الشد (ABAQUS Documentation)

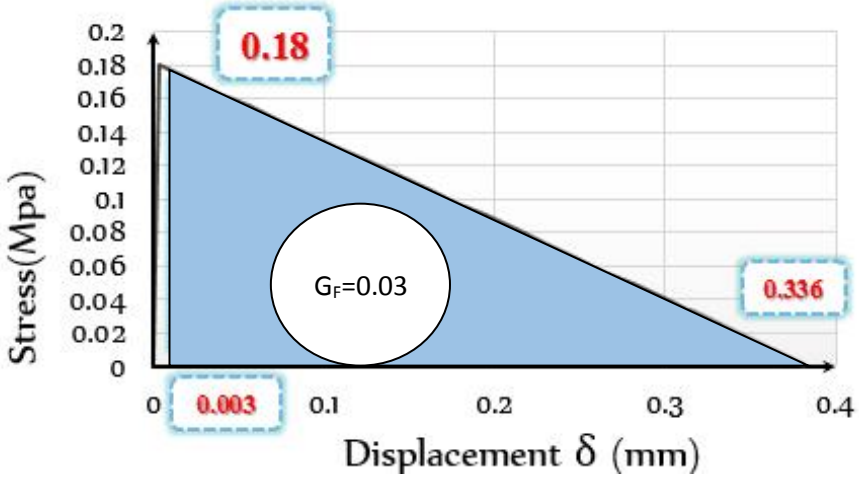
بما أن المونة قد تم تمثيلها بنابض SpringA (الشكل ٣-٢) على الضغط والشد فقد تم تمثيل سلوك هذا النابض بالشكل (٣-١٠) على الضغط، والشكل(٣-١١) على الشد، وذلك بعد ضرب قيم الإجهادات التي تتعرض لها المونة (الشكل ٣-٦) بالمساحة التي يغطيها كل نابض، وضرب كل تشوه نسبي بالمسافة بين المونة، ذلك أن انفصال الحجر يكون في المونة.

يبين الشكل (٣-١٠) العلاقة بين القوة والإنتقال لسلوك النابض على الضغط، حيث أن مقاومة النابض على الضغط تزداد حتى الوصول إلى قوة أعظمية مقدارها (3838KN) عند انتقال محوري عند نقطة تطبيق النابض مساو لـ 0.456mm، ومن ثم تنخفض حتى الوصول إلى (1715 KN) عند انتقال محوري 0.73mm.

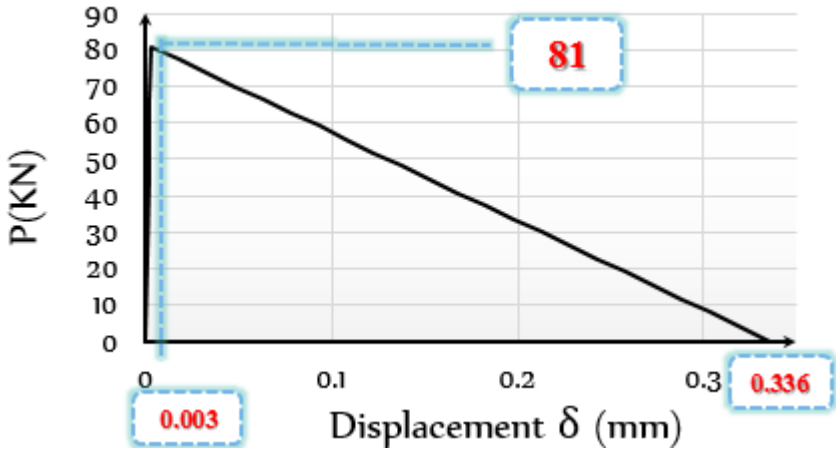
يبين الشكل (٣-١١-أ) العلاقة بين الإجهاد-التشوه النسبي لسلوك النابض على الشد حيث الحصول على قيم الشكل من التجربة (Sanchez,2007)، حيث تم فرض أن المقاومة على الشد تزداد خطياً حتى الوصول إلى إجهاد شد أعظمي 0.18MPa وعرض شق مقداره 0.003 mm وهي مرحلة صغيرة جداً نسبياً ومن ثم تنخفض المقاومة على الشد خطياً حتى الوصول إلى عرض شق مقداره 0.336mm وتم الحصول على هذه القيمة بمعرفة طاقة الإنهيار (G_F=0.03) (Sanchez,2007)، حيث تفقد المونة القدرة على مقاومة الشد ، وبضرب قيم الإجهادات بمساحة تحميل النابض والتشوه النسبي بالطول الذي يغطيه النابض نحصل على الشكل (٣-١١-ب).



الشكل (٣- ١٠):علاقة القوة -الإنتقال لسلوك النابض على الضغط



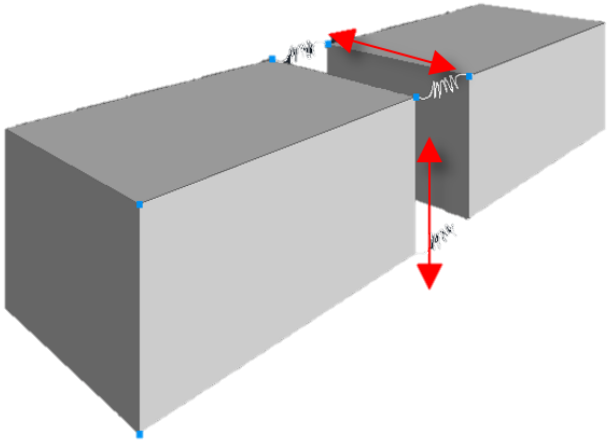
(أ)



(ب)

الشكل (٣- ١١): أ-العلاقة بين الإجهاد والإنتقال لسلوك النابض على الشد ب- علاقة القوة -الإنتقال لسلوك النابض على الشد

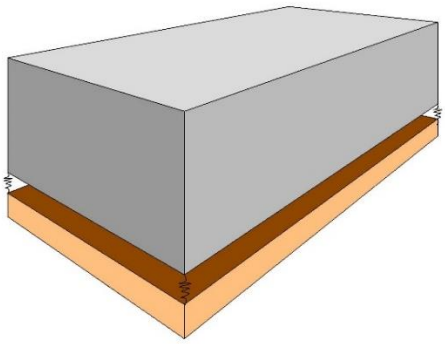
كما تم تعريف سلوك التماسك بين الحجر والمونة بنابضين (الشكل ٣-١٢) الأول في الإتجاه الشاقولي والثاني في اتجاه متعامد مع مستوي القوس ولكل منهما قساوة لانهائية (Infinity Stiffness) أي أنه تم الفرض أن الإنزلاق ممنوع بين القطع الحجرية.



الشكل (٣- ١٢):اتجاه عمل نوابض القص

٣-٣-٦- تمثيل مادة الـFRP: (Modelling Of FRP Material)

تم استخدام البوليميرات المسلحة بالألياف الزجاجية GFRP بمواصفات مأخوذة من دراسة (Sanchez, 2007) بمعامل مرونة باتجاه الألياف E_L=80000MPa، ومعامل بواسون v=0.2، وإجهاد شد أعظمي f_t=1473MPa، وتشوه نسبي حدي مقداره 3.658%. تم تمثيل الـFRP بعناصر حجمية C3D8 الشكل (٣-١٣) كتلك التي تم استخدامها لتمثيل القطع الحجرية، وهو كما تم ذكره عنصر مؤلف من ٨ عقد لكل عقدة ٣ درجات من الحرية (الشكل ٣-١).



الشكل (٣- ١٣):تمثيل تقريبي للحجر والـGFRP

٣-٣-٧- التماسك بين الحجر والـFRP: (Cohesion Between FRP And Masonry)

تم تعريف سلوك التماسك بين المادة الرابطة FRP والحجر بواسطة نوابض حيث يبين الشكل (٣-١٢) سلوك النابض على التماسك من خلال العلاقة بين الإجهاد المماسي والإنزلاق . يبين الشكل (٣-١٤) أن السلوك يكون خطياً مرناً حتى الوصول إلى إجهاد القص الأعظمي الذي تم الحصول عليه من الكود (CEB-FIB,2001) بالعلاقة:

$$T_{f1} = 1.8 \times f_{ctm} \quad (٣-٩)$$

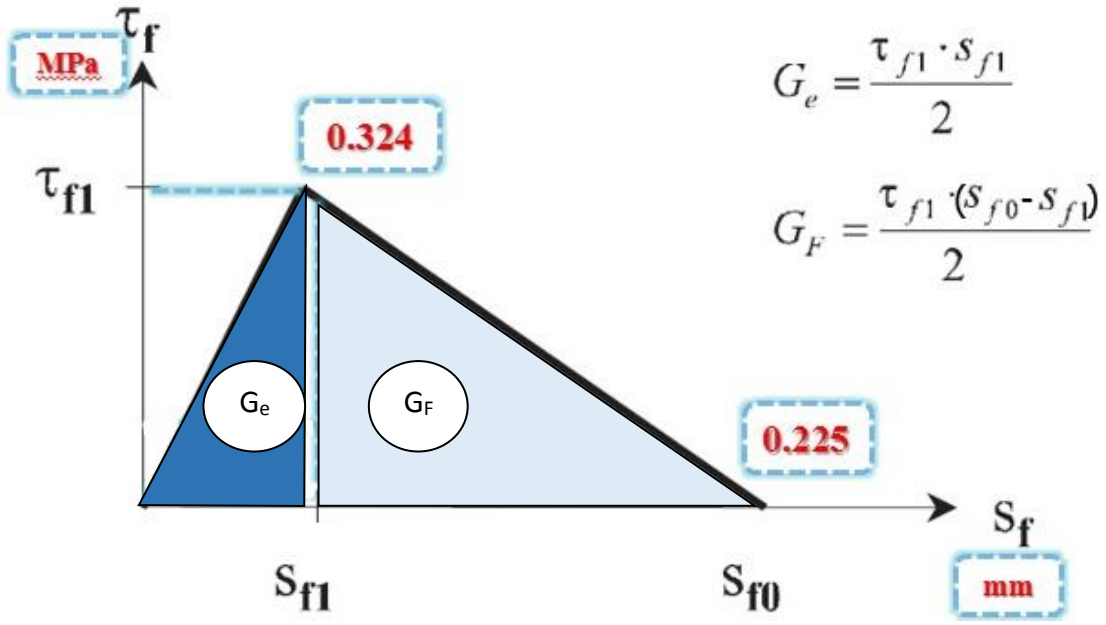
حيث:

f_{ctm} : المقاومة المميزة على الشد للمونة (0.18MPa) (Sanchez,2007).

ثم يتناقص الخط حتى الوصول إلى الإنزلاق الأعظمي بالقيمة 0.225mm ويتم حساب الإنزالاق الموافق لإجهاد القص الأعظمي بالإعتماد على طاقة الإنهيار G_f والذي يُعطى بالعلاقة :

$$G_f = C_f \times f_{ctm} \quad (٣-١٠)$$

حيث أن : $G_f = 0.202$ (طاقة التمزق) وفق (CEB-FIB,2001).

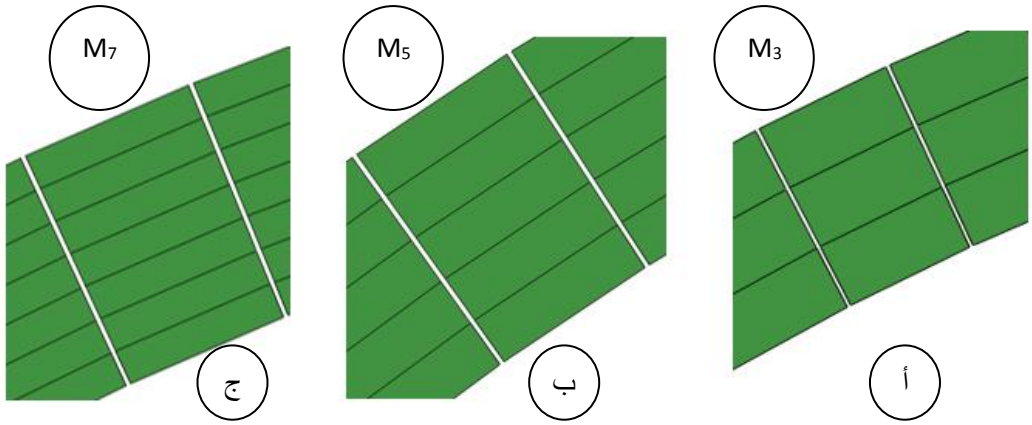


الشكل (٣- ١٤):العلاقة بين إجهاد التماسك والإنزلاق**(CEB-FIB,2001)**

٣-٣-٨- المرحلة الأولى من الدراسة : دراسة أثر تقارب خطوط الشبكة :(Mesh Convergence)

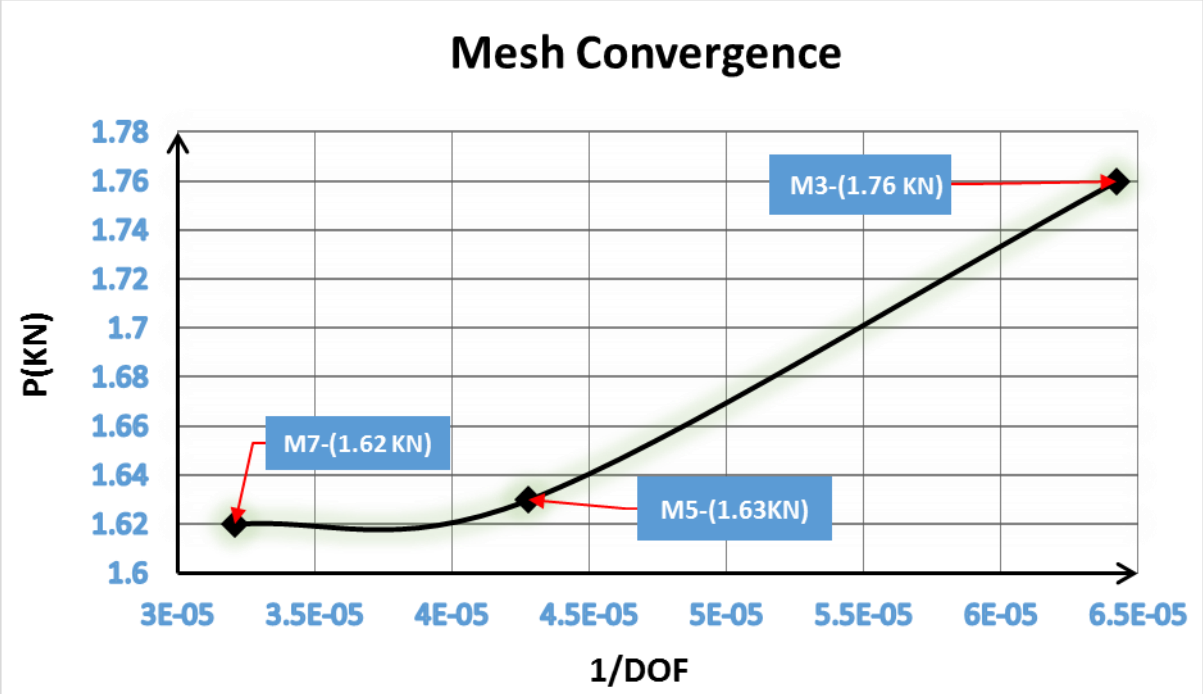
بما أن طريقة العناصر المحدودة هي طريقة عددية (Numerical Method)، لا بد من تحديد الأبعاد المناسبة للعناصر المحدودة التي سيتم اختيارها من أجل الوصول إلى تقسيم مناسب للشبكة بحيث يتم الوصول إلى اقتصادية في زمن الحل مع المحافظة على دقة النتائج.

تم إنشاء ثلاثة نماذج : النموذج الأول مقسم إلى ثلاثة أجزاء على سماكة القوس والثاني مقسم إلى خمسة أقسام على سماكة القوس والثالث مقسم إلى ٧ أجزاء على سماكة القوس (الشكل٣-١٥).



الشكل (٣- ١٥):النماذج المستخدمة في دراسة أثر تقارب خطوط الشبكة أ-النموذج المقسم إلى ثلاثة أجزاء ارتفاعاًب- النموذج المقسم إلى خمسة أجزاء ارتفاعاً ج-النموذج المقسم إلى سبعة أجزاء ارتفاعاً

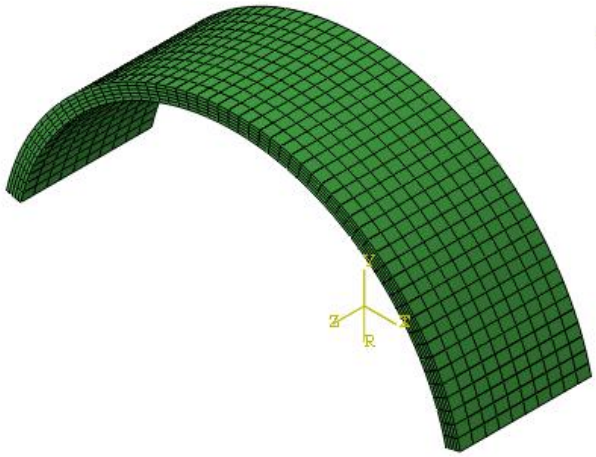
يبين الشكل (٣-١٦) العلاقة بين مقلوب عدد درجات الحرية (المحور الأفقي) و قدرة تحمل القوس لكل نموذج من النماذج التي تم إنشاؤها (المحور الشاقولي).يبين الشكل أن الفرق بين قدرة تحمل قوس النموذج (M5) والنموذج (M7) لا تتجاوز ال 1% وبناء عليه تم اختيار النموذج (M5) في الدراسة التحليلية وليس النموذج (M7) نظراً لتقارب النتائج ضمن الحدود المقبولة وبحيث نوفر في زمن التحليل ولم يتم اختيار النموذج (M3) لأنه سيعطي نتائج بعيدة عن الدقة .



الشكل (٣- ١٦):دراسة تقارب خطوط الشبكة (Mesh Convergence)

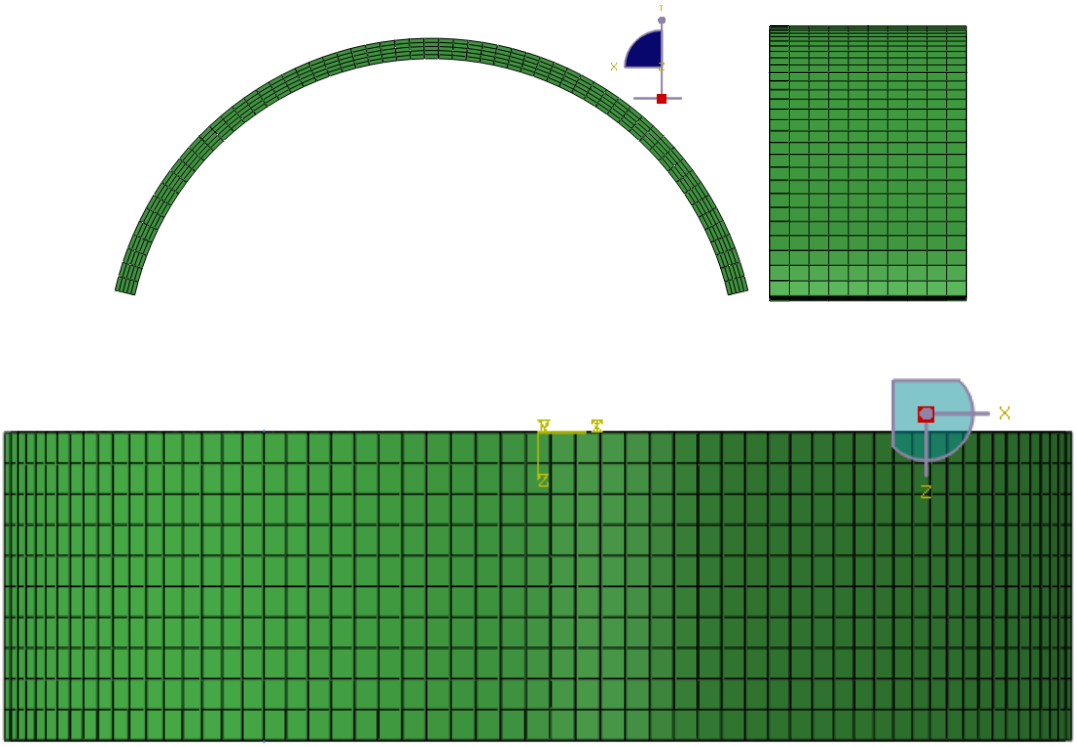
٣-٣-٩- المرحلة الثانية من الدراسة : النموذج المعتمد غير المدعم :(Unstrengthened Model)

يبين الشكل (٣-١٧) منظوراً للقوس المعتمد في النمذجة :



الشكل (٣- ١٧):شكل القوس المستخدم في النمذجة (ABAQUS, ver12-1)

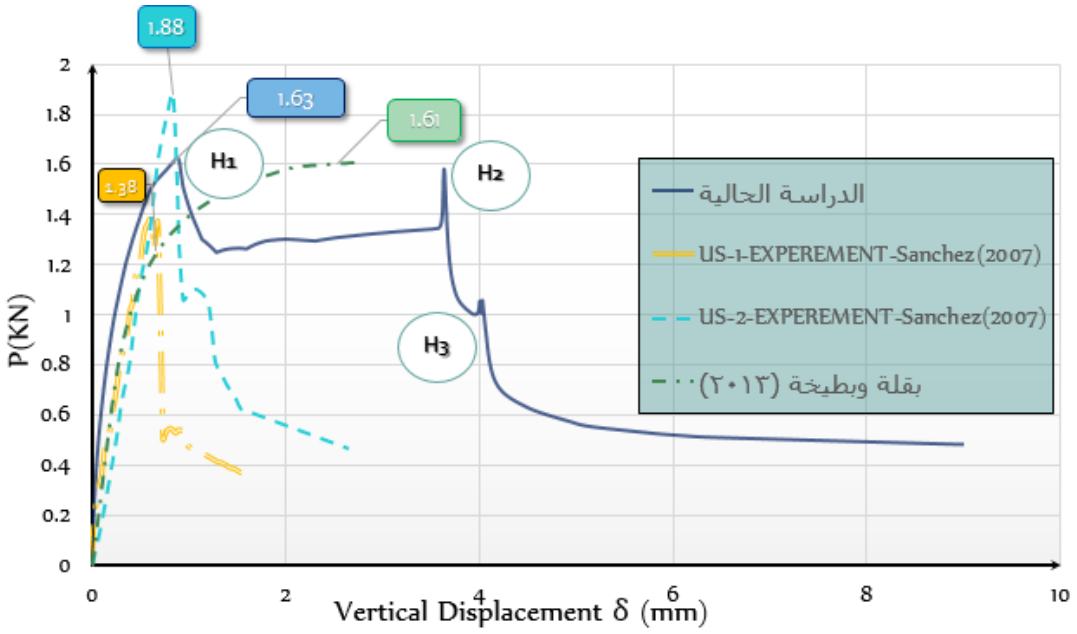
كما يبين الشكل (٣-١٨) مقطعاً عرضياً ومسقطين أحدهما جانبي والآخر من الأعلى للقوس .



الشكل (٣- ١٨):مقطع عرضي ومساقط للقوس (ABAQUS ,ver12-1)

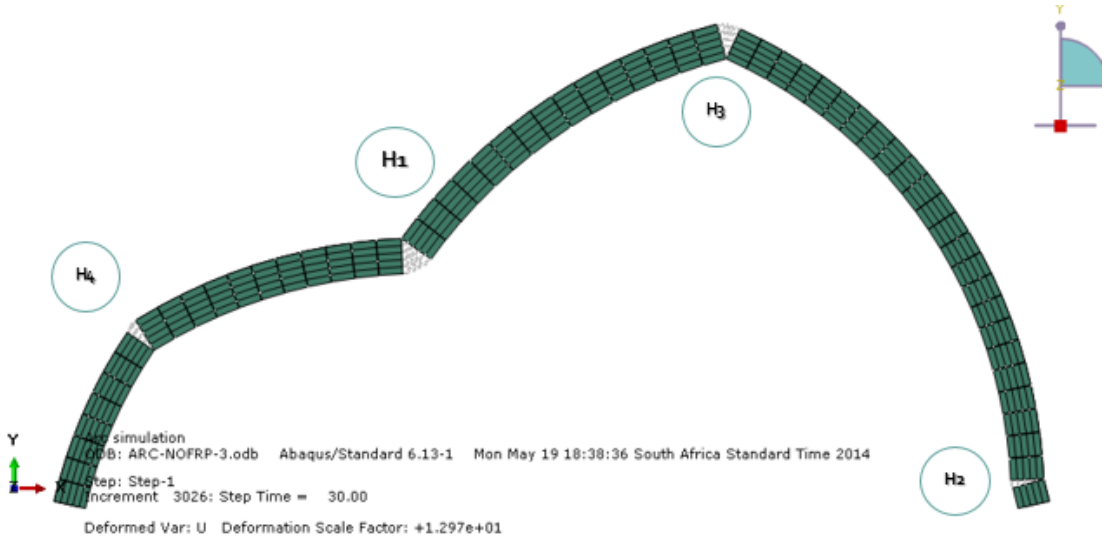
يبين الشكل (٣-١٩) العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) والإنتقال تحت نقطة تطبيق القوة (المحور الأفقي)، حيث تم الحصول على قدرة تحمل للقوس مقدارها 1.63KN وهي تمثل قيمة وسطية بين تجربتي (Sanchez,2007) (US-1,US-2) كما تم الحصول على سلوك أفضل من سلوك منحني (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣)، إذ أنه تم في الدراسة الحالية **تمثيل القطع الحجرية والمونة كل على حدة وعدم فرض التماسك الكلي كما دراسة (بقلة وبطيخة، ٢٠١٣) وبالتالي يمكن الملاحظة وبشكل واضح انخفاض المقاومة بعد الحصول على القدرة الحدية للقوس**، كما يبين المنحني أن كل انخفاض مفاجئ في القوة المطبقة يوافق تشكل مفصل لدن

والمبينة بالترتيب على المخطط والشكل (٣-٢٠)، وتجدر الإشارة هنا إلى أن سلوك القوس شبيه بسلوك قوس (Tao etal.,2011) في الشكل (٢-٤٦) من الفقرة (٢-٥-٢) من حيث المطاوعة (Ductility).

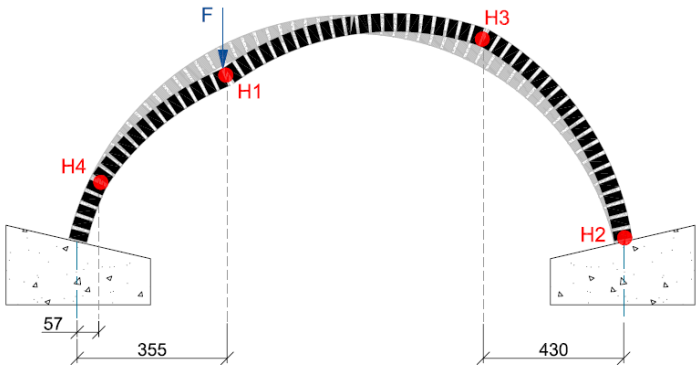


الشكل (٣- ١٩): العلاقة بين القوة -الإنتقال تحت القوة مع مقارنة مع الدراسات المرجعية

يبين الشكل (٣-٢٠) مقارنة بين ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في الدراسة الحالية ودراسة (Sanchez,2007) حيث يمثل الشكل (٣-٢٠-أ) ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في الدراسة الحالية حيث تشكل المفصل الأول (H1) تحت القوة المركزة بدايةً، ثم تشكل المفصل الثاني (H2) عند الإستناد في الجهة المقابلة للقوة، ثم تشكل المفصل الثالث (H3) في الجهة المقابلة للقوة ثم تشكلت ميكانيكية الإنهيار بتشكل المفصل الرابع (H4) قريباً من الإستناد من جهةالقوة. كما يمثل الشكل (٣-٢٠-ب) الترتيب نفسه في دراسة (Sanchez, 2007).



(أ)

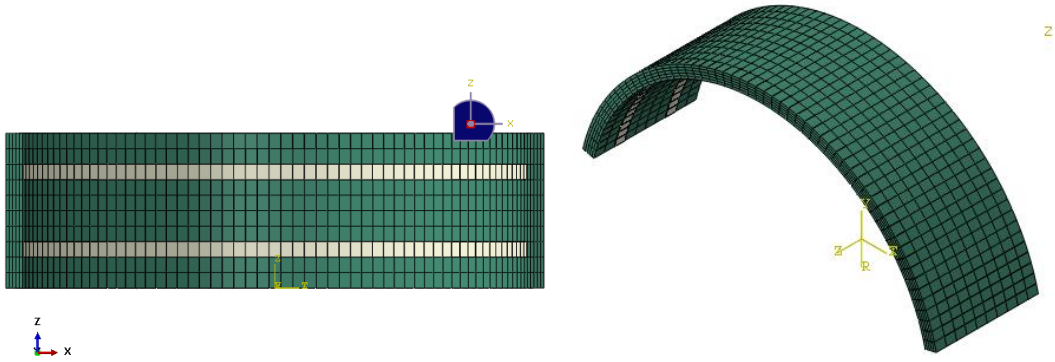


(ب)

الشكل (٣- ٢٠):ترتيب تشكل المفاصل اللدنة أ- الدراسة الحالية ب -(Sanchez,2007)

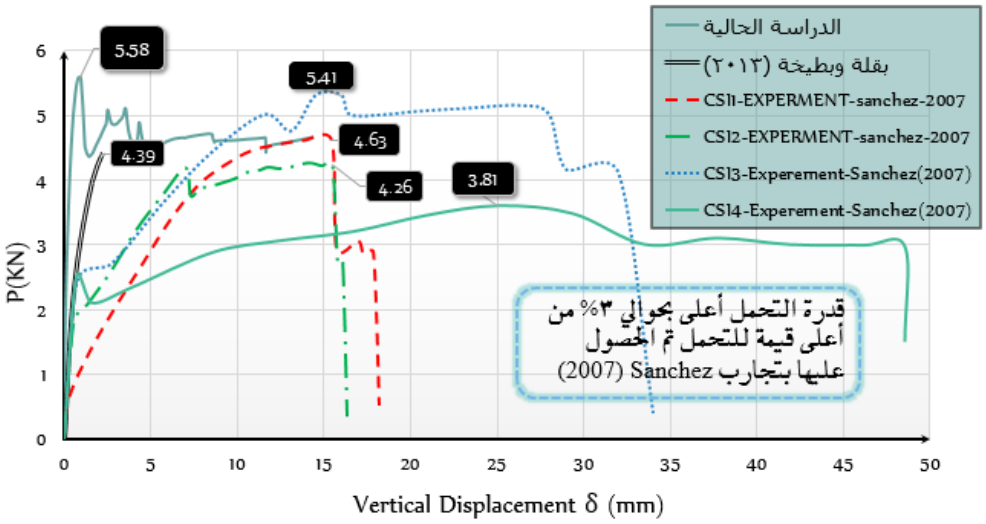
٣-٣-١٠- المرحلة الثالثة من الدراسة : النموذج المدعم (Strengthened Model)

تم تدعيم القوس الحجري بواسطة شريحتين من GFRP بعرض 50mm وسماكة 2mm لكل منهما كما هو مبين في الشكل (٣-٢١) ووفق المواصفات البعدية المبينة في الشكل (٢-٤٠) في دراسة (Sanchez;2007)، إضافةً إلى أن سلوك التماسك بين الـFRP والحجر تم أخذه من الفقرتين (٣-٣-٦ و ٣-٣-٧) على الترتيب.



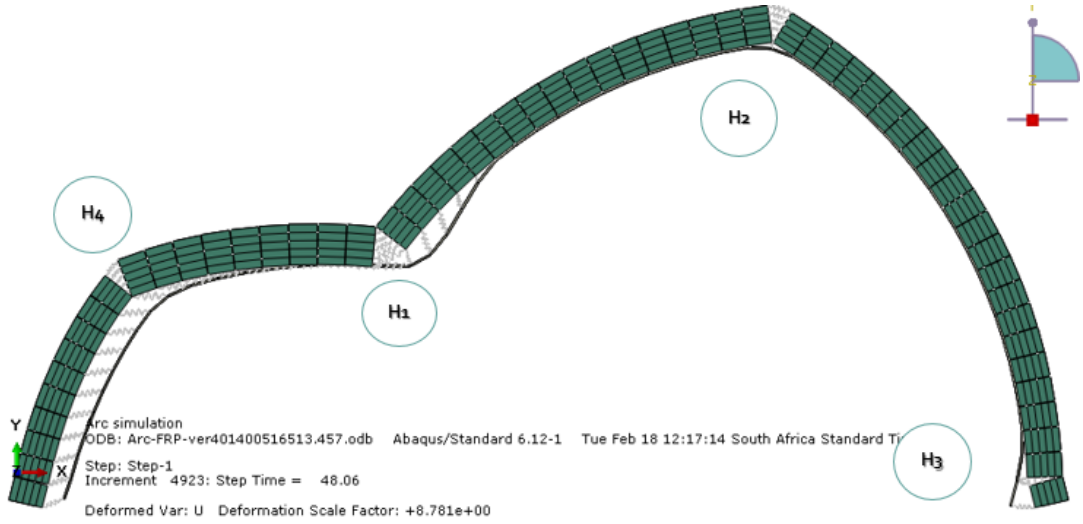
الشكل (٣- ٢١):القوس المدعم بشريحتي GFRP

يبين الشكل (٣-٢٢) العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) الإنتقال تحت هذه القوة (المحور الأفقي) لكل من الدراسة الحالية والدراسات المرجعية (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣ ; Sanchez,2007)، حيث أعطت الدراسة الحالية قدرة تحمل للقوس الحجرية مقدارها 5.58KN، وهي أكبر بمقدار 3% عن أكبر قيمة أعطتها تجارب (Sanchez, 2007) (CSI1,CSI2,CSI3,CSI4)، وقد حدث هبوط لقدرة تحمل القوس بعد هذه القوة الحدية. بإجراء مقارنة مع سلوك منحني (بقلة وبطيخة ،٢٠١٣) يمكن ملاحظة أن سلوك المنحني الحالي أفضل، حيث تم في الدراسة الحالية الحصول على آلية الانهيار و متابعة تشكل المفاصل في القوس، والتي لم توضحها دراسة (بقلة وبطيخة، ٢٠١٣) لسببين : **الأول وهو أخذ تأثير التماسك بين الـFRP و الحجر بينما تم فرض التماسك تاماً في دراسة (بقلة وبطيخة، ٢٠١٣) ، والثاني: نمذجة كل من القطع الحجرية والمونة كل منهما على حدة.**



الشكل (٣- ٢٢):العلاقة بين القوة والإنتقال للدراسة الحالية والدراسات المرجعية

يبين الشكل (٣-٢٣) ترتيب تشكل المفاصل اللدنة في النموذج المدعم حيث أنه حصل انفصال بداية تحت القوة مع تشكل مفصل عندها، ثم تشكلت ثلاثة مفاصل لدنة مبينة على الشكل (٣-٢٣) بالترتيب.



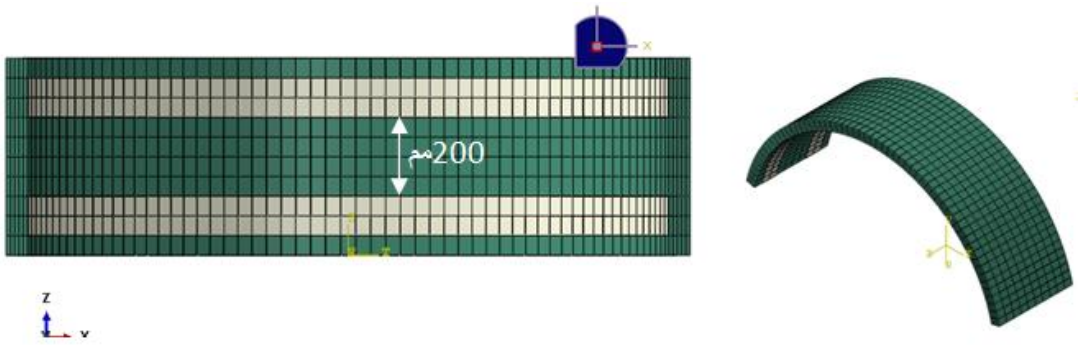
الشكل (٣- ٢٣):ميكانيكية انهيار القوس المدعم

بإجراء مقارنة مع (Sanchez, 2007) يمكن ملاحظة أن المفاصل تشكلت بداية، ومن ثم حدث الإنفصال عنده في نهاية التجربة (الشكل٢-٤٢).

٣-٣-١١- المرحلة الرابعة من الدراسة : تأثير تغيير المواصفات البعدية لشرائح الـFRP (The effect of dimensional Change of FRP strips)

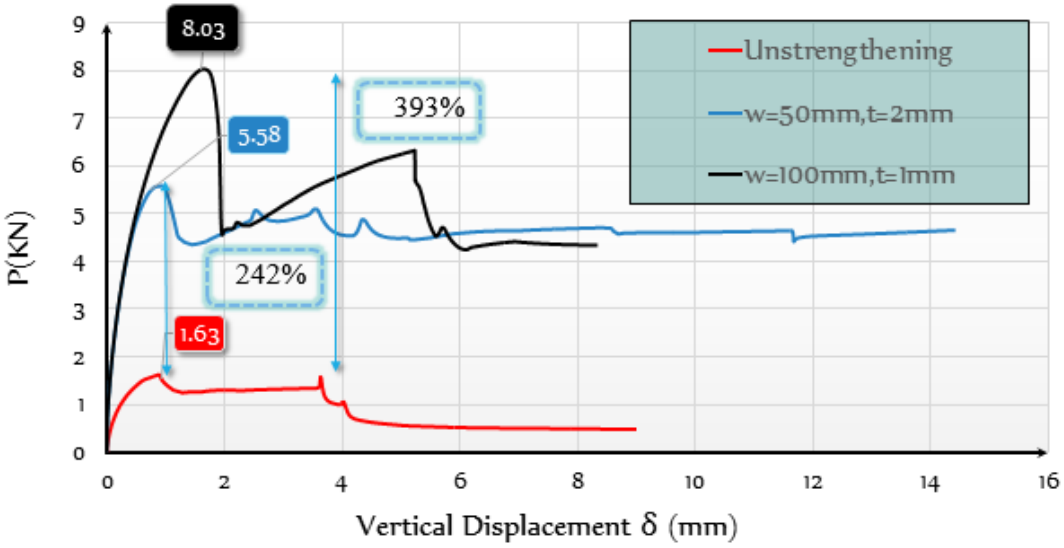
٣-٣-١١-١ تأثير تغيير عرض الشريحة: (*The effect of Strip Width*)

تم تغيير عرض شريحة الـFRP مع المحافظة على مساحتها ، حيث تم استخدام شريحتين بعرض 100mm وسماكة 1mm لكل منهما (الشكل٣-٢٤).



الشكل (٣- ٢٤):النموذج المدعم باستخدام شريحتين GFRPF بعرض 100mm وسماكة 1mm لكل منهما

يبين الشكل (٣-٢٥) العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) والإنتقال تحت القوة (المحور الأفقي) لكل من النموذج غير المدعم والنموذج المدعم قبل تغيير عرض الشريحة والنموذج المدعم بعد تغيير عرض الشريحة. بالمقارنة يُمكن ملاحظة ازدياد قدرة تحمل القوس المدعم باستخدام شريحتين GFRP بعرض 50mm وسماكة 2mm بمقدار 242%. في حين أدت زيادة عرض الشريحة مع المحافظة على المساحة إلى ازدياد قدرة تحمل القوس بمقدار 393% مما يدل على ازدياد فاعلية التدعيم بشكل كبير بزيادة عرض الشرائح بسبب زيادة توزع إجهاد القص بين شريحة الـFRP والمادة الحجرية وبالتالي انخفاض الإجهاد وتأخر انفصال شريحة الـFRP. في كلتا الحالتين، يمكن ملاحظة الهبوط المفاجئ في المقاومة بعد الوصول إلى قدرة التحمل العظمى بسبب حصول انفصال الشريحة وتشكل المفصل اللدن تحت القوة.



الشكل (٣- ٢٥):العلاقة بين القوة - الإنتقال لكل من النماذج غير المدعمة والمدعمة بدون ومع تغيير عرض الشريحة

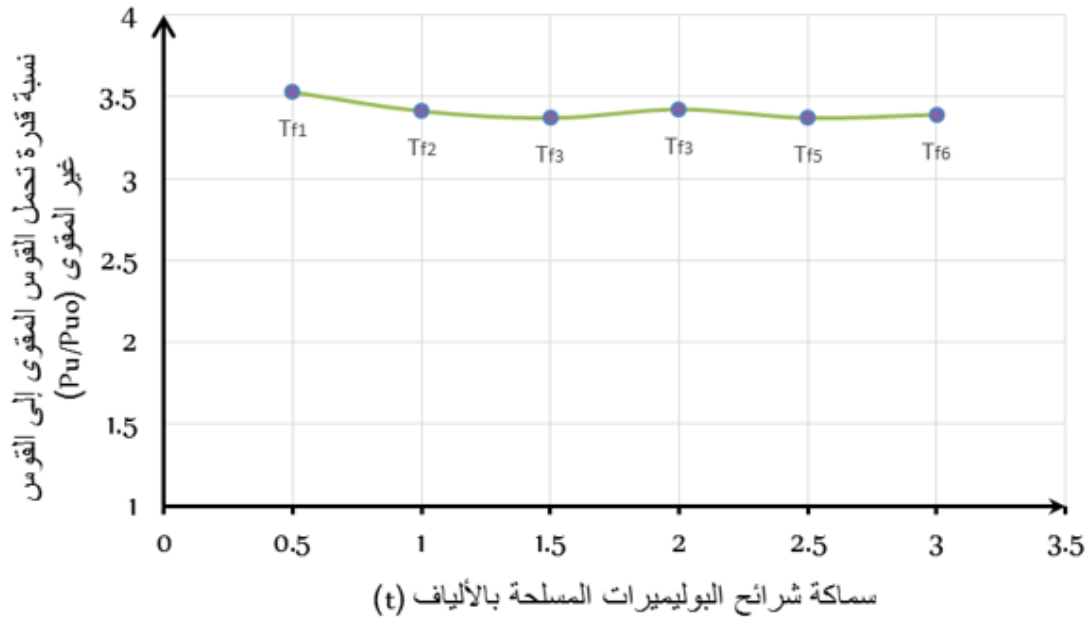
٣-٣-١١-٢ تأثير تغيير سماكة الشريحة: (*The effect of Strip thickness*)

تم تغيير سماكة شرائح الـFRP مع الحفاظ على باقي الخصائص البعدية الأخرى (الطول –العرض-العدد) أي باستخدام شريحتين كما الشكل (٣-٢١). تمت تسمية النماذج بالطريقة T_{fi}(Thickness,FRP)، يبين الشكل (٣-٢٦) العلاقة بين سماكة الشرائح (المحور الأفقي) ونسبة قدرة تحمل القوس المقوى (P_u) إلى قدرة تحمل القوس

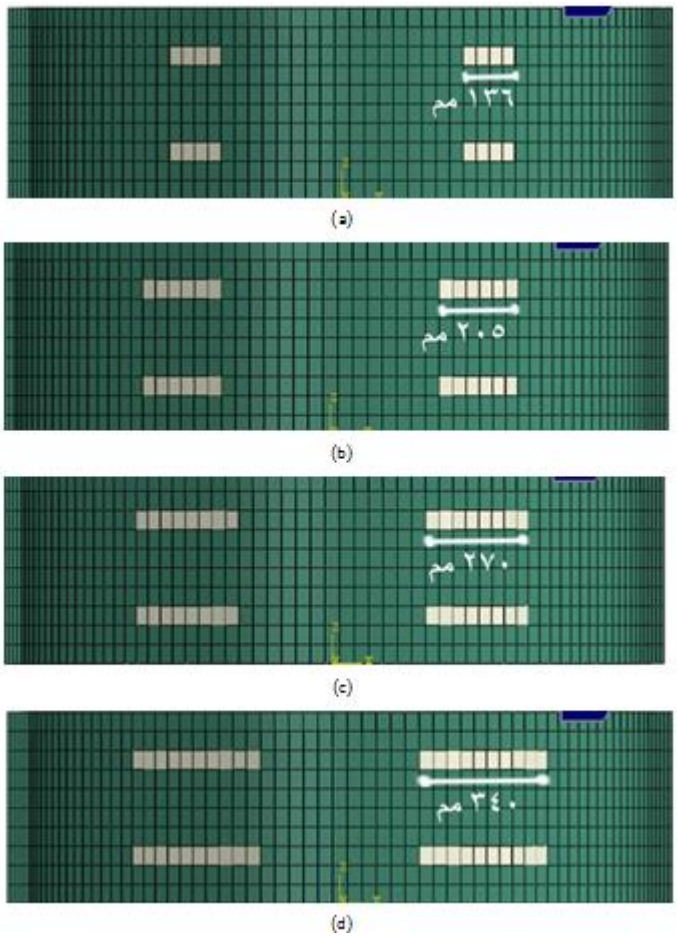
غير المقوى (P_{u0}) (المحور الشاقولي) ، حيث يُمكن استنتاج أن استخدام سماكة 0.5mm أعطت قدرة التحمل الأكبر بمقدار 5.75KN وبفرق ضئيل جداً عن النتيجة التي أعطتها أكبر سماكة 3mm وهي 5.52mm بفرق مقداره 4%، أي أن تغيير السماكة لم يؤثر على زيادة قدرة تحمل القوس بعد التقوية. يعزى ذلك إلى أن مهمة شريحة الـFRP كانت بمنع تشكل المفصل الأول عند القوة المطبقة وتأخير انفصال الشريحة عنده، وبالتالي الأهمية للتماسك بين الـFRP والمادة الحجرية وليس للمساحة.

٣-٣-١١-٣ تأثير تغيير طول الشريحة:(*The effect of Strip length*)

تم تغيير طول شرائح البوليميرات ابتداءً من نقطة تطبيق القوة وبشكل مناظر أيضاً من الجهة الثانية ، قتم صنع أربعة نماذج مسماة (L_{fi}(Local-FRP) الأول يغطي أربع قطع حجر من اليمين ومن اليسار كما هو مبين في الشكل (٣-٢٧-a)، ثم بزيادة قطعة حجرية من على يمين ويسار كل شريحة لكل نموذج جديد (الأشكال ٣-٢٧-d-c-b).

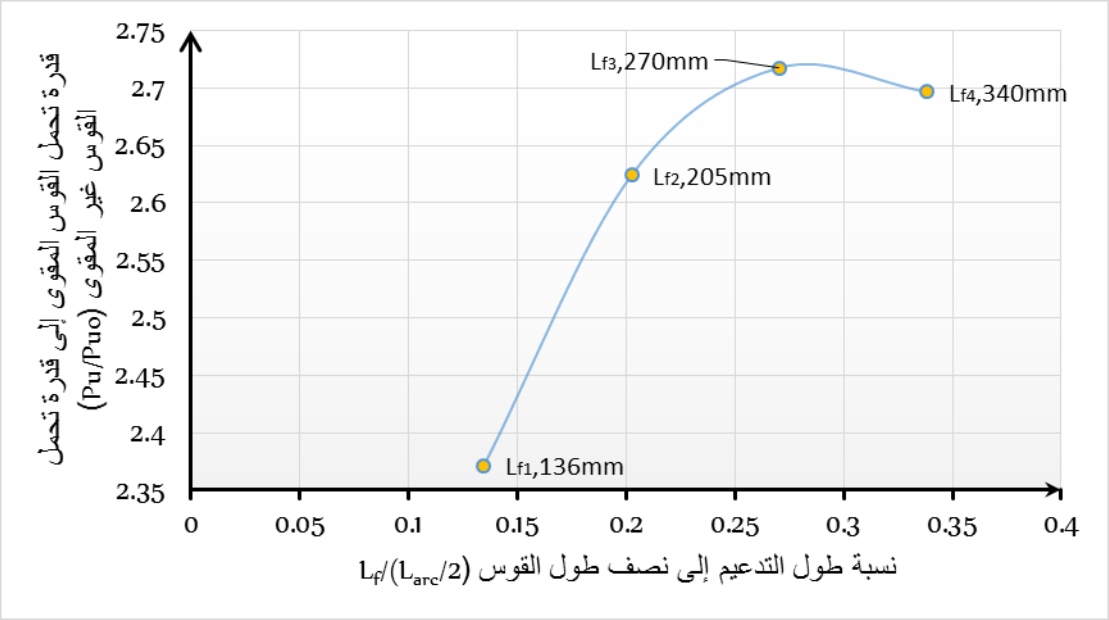


الشكل (٣- ٢٦):أثر تغيير سماكة شريحة البوليميرات على قدرة تحمل القوس



الشكل (٣- ٢٧):القوس المدعم بشرائح جزئية

يبين الشكل (٣-٢٨) العلاقة بين نسبة طول التدعيم إلى نصف طول القوس (المحور الأفقي) وقدرة تحمل القوس المقوى (P_u) إلى قدرة تحمل القوس غير المقوى(P_{u0}) (المحور الشاقولي)، حيث يُمكن ملاحظة أن استخدام شريحتي FRP على طول ١٣٦ مم من الجهتين (بطول 270mm كلي) يزيد الفاعلية ١٣٧% (حيث حصل الإنهيار بتشكل مفصل لدن تحت القوى مع حصول انفصال للشرائح بشكل تدريجي ثم تتابع تشكل المفاصل مع تتمة الإنفصال)، وتستمر النسبة بالزيادة إلى طول للشرائح كلية ٥٤٠مم حيث الفاعلية ١٧٠%، ثم تثبت بعد ذلك في مجال معين ثم تعود للزيادة عندما تغطي الـ FRP كامل طول القوس من الداخل أي عندما تغطي مناطق تشكل المفصل عند المسند المواجه للقوة، وبالتالي وضع شرائح بأطوال قصيرة يزيد الفاعلية بشكل كبير وأي إضافة عليها سيزيد من قدرة التحمل ولكن زيادة بسيطة حتى طول محدد ثم تعود إلى الزيادة عندما تغطي الشرائح كامل طول القوس. أي أن القوس بحاجة إلى أطول شرائح FRP (540mm) فقط من طول القوس الكلي (L_{arc}=2016mm) أي نسبة 27% للحصول على ارتفاع في المقاومة 170%، الأمر الذي يؤكد الإكتفاء بالتقوية الموضعية للقوس وبالتالي الإقتصادية.



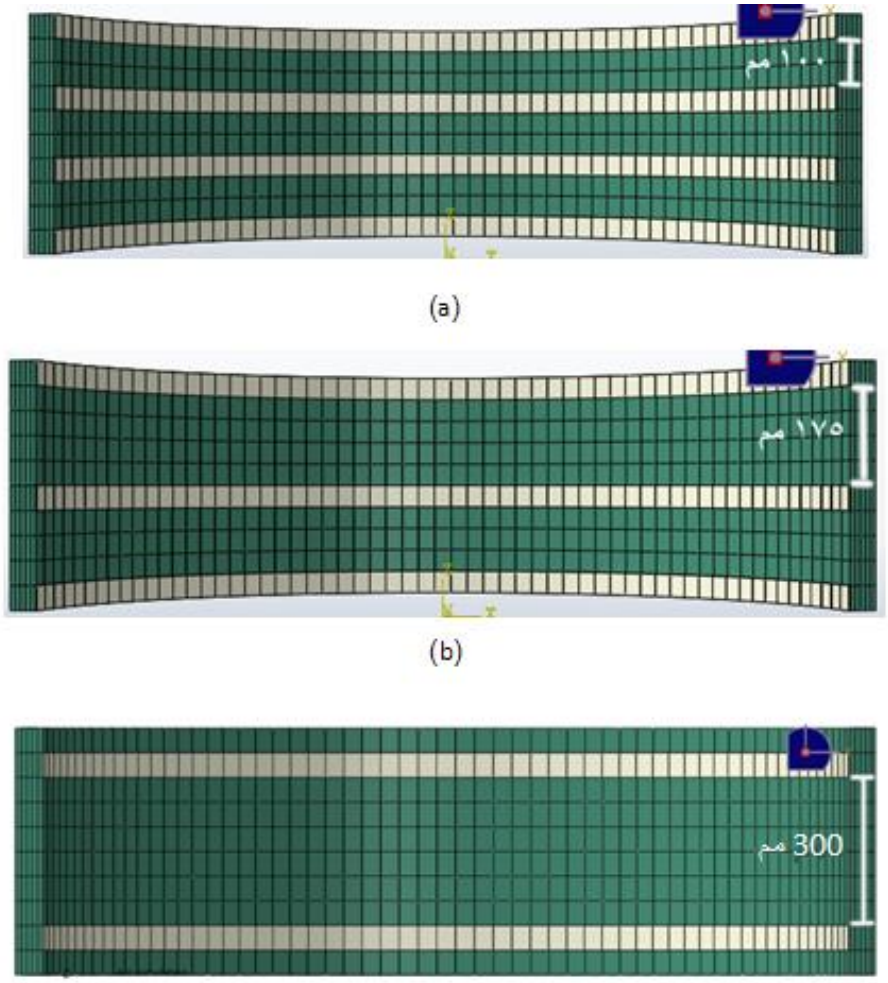
الشكل (٣- ٢٨):دراسة أثر طول شرائح الـFRP

٣-٣-١١-٤ تغيير الخصائص البعدية بين الشرائح:*Change Strip's numbers*

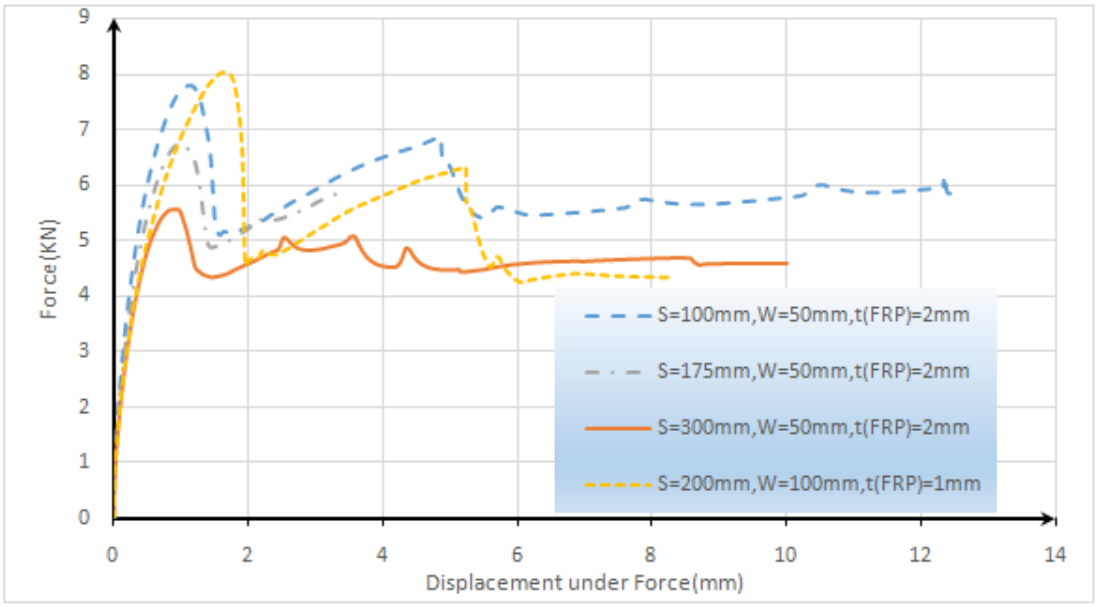
يبين الشكل (٣-٢٩-a) النموذج المدروس بتباعد بين الشرائح ١٠٠ مم، و(٣-٢٩-b) النموذج المدروس بتباعد ١٧٥ مم، والشكل (٣-٢٩-c) النموذج المدروس بتباعد ٣٠٠ مم، إضافة النموذج المدروس عند تغيير عرض الشريحة (الشكل ٣-٢٤).

يبين الشكل (٣-٣٠) العلاقة بين القوة (المحور الشاقولي) والإنتقال(المحور الأفقي) للنماذج السابقة، حيث جميع النماذج تبدي تصرفاً متشابهاً بعد الوصول إلى القيمة العظمى الحدية، كما يمكن ملاحظة أن النموذج بتباعد بين الشرائح 200mm وعرض 100mm وسماكة 1mm أعطى قوة عظمى (8kN) مقاربة للقوة العظمى للشريحة بتباعد 100mm و عرض 50mm وسماكة 2mm (7.8kN).

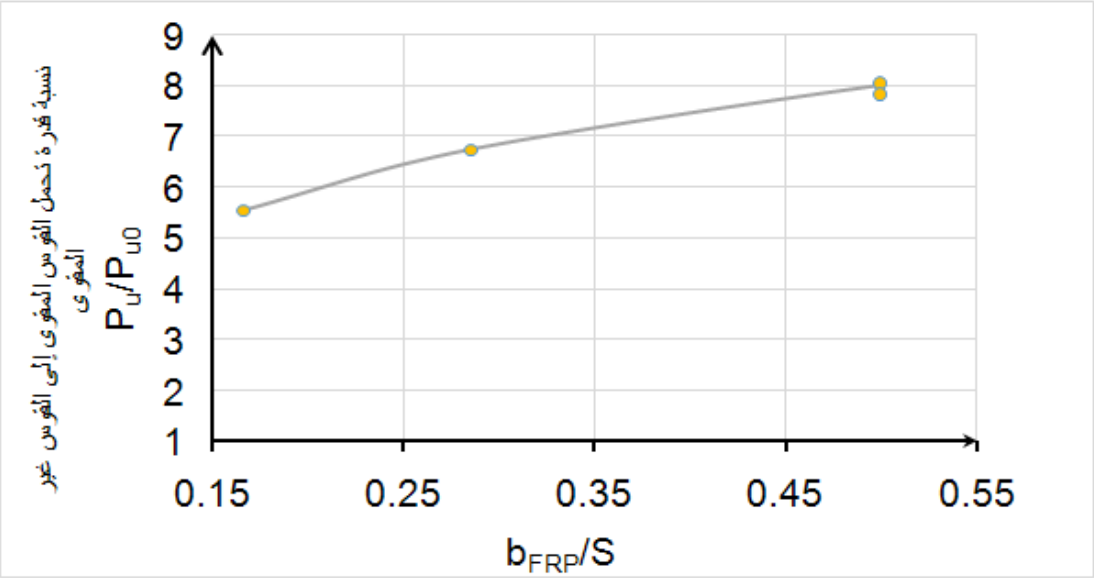
يبين الشكل (٣-٣١) العلاقة بين b_{FRP}/S (المحور الأفقي) ونسبة قدرة تحمل القوس المدعم (P_u) إلى قدرة التحمل للقوس غير المدعم (P_{u0}) (المحور الشاقولي). يُمكن ملاحظة أن العلاقة تكون شبه خطية من أجل بتغيير عرض الشريحة (b_{FRP}) منسوباً إلى التباعد بين الشرائح (S)، كما أن تطابق القوة العظمى لعرض للشرائح 100mm وتباعد 200mm مع القوة العظمى للشريحة بعرض 50mm وتباعد 100mm، أي عند الحصول على نفس نسبة b_{FRP}/S دلالة على أن قدرة تحمل القوس تخضع لهذه النسبة ولاتخضع للسماكة، وتفسير ذلك أن هذه النسبة هي من تؤثر على التماسك بين شريحة الـ FRP والمادة الحجرية، بينما لم تتأثر قدرة تحمل القوس بالسماكة (الشكل ٣-٢٦).



الشكل (٣- ٢٩): النماذج المدروسة باستخدام عدة شرائح بتباعدات مختلفة بين الشرائح



الشكل (٣-٣٠): منحني الانتقال القوة للقوس المدعم بشرائح متعددة متغيرة العرض أو التباعد أو السماكة



الشكل (٣-٣١): تأثير تغيير العرض والتباعد بين الشرائح

الفصل الرابع

النتائج والتوصيات

٤-١.النتائج:

تم في هذا البحث دراسة أثر تقوية قوس حجري باستعمال شرائح الـ FRP، حيث تم إجراء دراسة تحليلية عددية باستعمال طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Analysis) والتحليل اللاخطي والذي يأخذ بعين الاعتبار لاخطية المادة (Materially Non-linear Analysis, MNA). بالإضافة إلى ذلك تم أخذ أثر التماسك (Bond) بين القطع الحجرية والمونة وبين القطع الحجرية والـ FRP بعين الاعتبار في هذه الدراسة. من جهة أخرى، تمت نمذجة كل من المونة والقطع الحجرية كل على حدة وذلك بغية الحصول على التصرف الأقرب إلى الواقع وتعقب آلية الانهيار وتشكل المفاصل في القوس.

تم في نهاية هذا البحث التوصل إلى النتائج التالية:

١- أدت تقوية القوس الحجري إلى زيادة في قدرة تحمل القوس بشكل ملحوظ، حيث تراوحت النسب في هذا البحث إلى مابين (١٥٠% حتى ٤٠٠%)، وذلك تبعاً لتغير الخصائص البعدية لشريحة الـ FRP والتباعد بينها (الشكل ٣-٢٢ والشكل ٣-٢٥).

٢- إن زيادة عرض الشريحة مع المحافظة على المساحة يؤدي إلى زيادة للقوة الحدية عن حالة زيادة السماكة، وقد وصلت نسبة الزيادة في هذا البحث إلى حدود ٥٠%، وذلك أن زيادة العرض يؤدي إلى توزع أكبر لإجهاد القص بين شريحة الـ FRP والقطع الحجرية وبالتالي تأخير انفصال الشريحة (الشكل ٣-٢٥)

٣- تم التوصل في هذا البحث أن تغيير سماكة شريحة الـ FRP لم يؤد إلى تغير ملحوظ في المقاومة القصوى، حيث أن التماسك بين الـ FRP و القطع الحجرية هو الذي يلعب دوراً هاماً في زيادة المقاومة من خلال تأخير تشكل المفصل الأول تحت القوة المركزة عند ربع المجاز. وبالتالي فإن استخدام سماكة صغيرة بمقدار 0.5mm فقط لشريحة الـ FRP قد أدى لزيادة في المقاومة مقدارها ٢٥٠%. وفي ذلك تحقيق لاقتصادية استخدام المادة (الشكل ٣-٢٦).

٤- بينت هذه الدراسة أن استخدام تقوية موضعية كاف لزيادة قدرة تحمل القوس، حيث أن استخدام طول للشريحة كلي مساو ٢٧% من محيط القوس المدروس أدى إلى رفع المقاومة بمقدار ١٧٠%. وبالتالي لاداع لتغطية كامل مجاز القوس (الشكل ٣-٢٨).

٥- تتعلق مقاومة القوس بنسبة عرض شريحة الـ FRP (b_{FRP}) إلى التباعد بين الشرائح (S)، أي النسبة (b_{FRP}/S)، وإن زيادة هذه النسبة أدت إلى زيادة قدرة تحمل القوس بشكل شبه خطي(الشكل ٣-٣١).

٤-٢.التوصيات لأعمال مستقبلية:

١. إجراء دراسات على الأقواس باستخدام أنواع من القطع الحجرية والمونة قريبة من المواصفات المستخدمة في المباني الأثرية، ويوصى بإجراء اختبارات على هذه المواد لتوصيف مخططات سلوك المادة الحقيقي.

٢. تغيير شكل القوة من الحمولة المركزة عند ربع المجاز إلى الحمولة الموزعة وفي ذلك اقتراب للواقع، حيث أنه يصادف وجود تغطية علوية شائعة في معظم الأقواس الحجرية وبالتالي توزيع أكبر للقوة المركزة.

دراسة الأقواس الحجرية وأثر التقوية في زيادة المقاومة تحت تأثير الأحمال الزلزالية.

References

ABAQUS, Version 6.12, (2012), **" ABAQUS/Standard User's Manual** " ABAQUS Inc., USA

Bastianini F., Corradi M., Borri A. and di Tommaso A. *(2005). "***Retrofit and monitoring of an historical building using Smart CFRP with embedded fiber optic Brillouin sensors***", Construction and Building Materials*, 19, *Perugia, Italy*. 525-535

Batikha , M. (2008). "**Strengthening of thin metallic cylindrical shells using fiber reinforced polymers** ", *PhD thesis*, *Edinburgh University*, UK.

Beuerman T.E. (2009). ***"Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges"**, Master's Thesis,* University: Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

Bjurstrom H. and Lasell J. (2009). **"Capacity Assessment of a Single Span Arch Bridge with Backfill"**, *Master Thesis*, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

Betti M., Drosopoulosb G. A. and Stavroulakis G.E.(2008). "**Two non-linear finite element models developed for the assessment of failure of masonry arches** " , *C. R. Mecanique ,336, 42–53.*

Borri A., Corradi M. and Vignoli A. (2002). *"***New materials for strengthening and seismic upgrading interventions"***, International Workshop Ariadne 10, Arcchip, April 22-28, Prague, Czech Republic, cd-rom, 1-24.*

BS EN 1996-1 (2005). **Eurocode 6- Design of Masonry Structures, Part 1-1**: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels:CEN.

Cadei J.M.C., Stratford T.J., Hollaway L.C. and Duckett W.G. *(2004). "***Strengthening metallic structures using externally bonded fibre- reinforced polymers"***. CIRIA*, C595, London.

Cavicchi A, Gambarotta L (2005)." **Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch–fill interaction**", *Engineering Structures ,605–615*

CEB-FIP. (2001) , State-of-the-Art Report on Bond of Reinforcement in Concrete. State-of- Art Report Prepared by Task Group Bond Models (former CEB Task Group 2.5) FIB - Féd. Int. du Béton: 1-97.

Concrete Society (2004). "**Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials**", Technical Report 55, Camberley, UK.

D4.7.3(2007). **Methods of analysis of damaged masonry arch bridges**. Background document.Sustainable Bridges

Foraboschi P. (2004). "**Strengthening of Masonry Arches with Fibre-Reinforced Polymer Strips**", *Journal of composites for construction*, 8(3), 191-202.

Gilfillan J.R., Gilbert S.G. and Patrick G.R.H. (2003). *"***The use of FRP composites in enhancing the structural behavior of timber beams***". Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(15), 1373-1388.

HOLMSTROM k(2010) "**On engineering methods for assessment of load capacity of stone arch bridges**", *Master Thesis*, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Swede

Hendry A.W., Sinha B.P. and Davies S.R. (2004). *"***Design of Masonry Structures".** *E&FN Spon., London, UK.*

Islam R. (2008). *"***Inventory of FRP strengthening methods in masonry structures***", Master Thesis*, Department of Construction, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain

Milani, G., Milani, E. and Tralli, A. (2009). *"***Upperbound limit analysis model for FRP–reinforced masonry curved structures. Part II: Structural analyses***", Computers and structures*, 87, 1534-1558.

Oliveira, D.V., Basilio, I. and Lourenco, P.B. (2006). *"***FRP strengthening of masonry arches toward an enhanced behaviour***". In: Cruz P.J.S., Frangopol D. M. and Neves L. C., editors, "Bridge maintenance, safety, management, life-cycle performance and cost": proceedings of the International Conference on*Bridge *Maintenance, Safety and Management (IABMAS'06), Porto, Portugal, 2006, CD-ROM, 9pp.*

Maria Ricamato. (2007)." N**umerical and experimental analysis of masonry arches strengthened with FRP materials**". University of Cassino, Department of Engineering, Graduate School in Civil Engineering.

Sanchez I.B. (2007). "**Strengthening of arched masonry structures with composite materials**", *Ph.D. thesis* , University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal.

Smith S.T., Teng J.G.(2002)**."FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strengt h models ",** Engineering Structures , 24 (4)- 385–395.

*Steiger R., "**Fiber reinforced plastics (FRP) in timber structures**", EMPA, Dübendorf,Switzerland.digitalcommons.fiu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1213 &context=etd(Accessed: 08-June-2010).*

Taljsten B. (2010). *"***Repair and upgrading of concrete structures with FRP materials***", Denmark. Available at: http://oci.oulu.fi/OuluConstructionInnovations, (Accessed: 08-June-2010).*

Tao Y., Stratford T.J. and chen J.F.(2011). "**Behaviour of a masonry arch bridge repaired using fibre -reinforced polymer composites**", Journal of Engineering Structures , 33(5), 1594-1606.

Teng J.G.,Tao J.F., Smith S.T. and Lam L. (2002). *"***FRP Strengthened RC Structures***", John Wiley and Sons*, chichester, UK.

Triantafillou TC (1998). *"***Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates***". Journal of composites for construction*, 2(2), 96-104.

بقلة باسل ، بطيخة مصطفى(٢٠١٣). **"تقـوية الأقواس الحجرية تحت تأثير الأحمال الزلزالية باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)"** ، *مجلة جامعة الملك سعود (العلوم الهندسية)*، قبلت للنشر في المجلد ٢٥.

بقلة باسل (٢٠١٣). **"تقـوية الأقواس الحجرية المعرضة للأحمال الزلزالية باستعمال البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)-نمذجة عددية "**، *أطروحة ماجستير* ، جامعة دمشق ، كلية الهندسة المدنية .

ABSTRACT

Masonry material is to be considered the most ancient construction material. Where, the masonry arch is taken a significant part in historical buildings. These arches are suspected to fail because of mortar damage during long-time environment effects. Therefore, there is urgent need to strengthen these structures.

The aim of this research is to study the use of FRP as a new strengthening technique on the failure mechanics of arches under verticals loads.

Numerical analysis is performed in this study using Finite Element Analysis and Materially Non-linear Analysis (MNA). On the other hand, the bond between the FRP and the masonry material is undertaken in this research. Also, the brick unit and mortar are modeled separately to explore more real behavior for the arch.

The effect of changing the dimensional properties (Thickness, width, bond length) of FRP strips is investigated in this study. It is shown that using small amount of FRP material can enhance the resistance of arch significantly, which provides an economic application together with respect the beauty of historical buildings.

Damascus University
Faculty of Civil Engineering
Department of Structural Engineering

Failure Mechanisms of masonry arches strengthened by Fiber Reinforced Polymer (FRP) under vertical loads

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

By
Eng. Khaled Sadek
Supervisor
Dr. Mustafa Batikha

Damascus 2014