

# نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

طالبة الدراسات العليا: م. الإء محمد  
كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث  
إشراف الدكتور: أ.د.م. عبد الرحمن عيسى

## ملخص البحث

يتضمن البحث دراسة مرجعية تجريبية وأخرى عديدة باستخدام برنامج ANSYS لقوس حجري عادي وآخر مدعم بتقنية (TRM) على الوجه الداخلي له وهما معرضان لحمولة مركزة في ربع المجاز .  
درس سلوك القوسين الحجريين وشكل انهيارهما ومواقع المفاصل المتشكلة وعددها، وحمولتهما الحدية عددياً باستخدام ANSYS وتمت مقارنتها مع النتائج التجريبية .  
أظهرت النتائج توافقاً جيداً بين نتائج النموذج التحليلي بطريقة العناصر المحدودة و النتائج التجريبية ، ويؤكد بأن استخدام طريقة العناصر المحدودة ببرنامج ANSYS قادرة على توقع وتمثيل آلية الانهيار للقوس الحجري العادي والقوس المدعم بال (TRM) بشكل متوافق مع نتائج التجارب .

كلمات مفتاحية : قوس حجري , آلية الانهيار، مركبات الملاط المقوى بالنسيج ,

(TRM) , العناصر المحدودة .

# Modeling And Analysing the collapse mechanisms Of stone arches Which Strengthened With TRM By Finite Element Method

C.E Alaa Mohammed  
Dr. E Abd Alrahman Issa

## Abstract:

This research includes a reference experimental study and another numerical study using the ANSYS program for an ordinary stone arch and another strengthened by (TRM) technology on its inner face and both arches were exposed to a concentrated load in the quarter of the span.

Studying the behavior of the two stone arches , the shape of their collapse, locations of the formed joints and their number, and the ultimate loads determined numerically using ANSYS and they were compared with the experimental results.

The analysis of the results showed a good agreement between the results of the numerical models using the finite element method and the experimental results,

and confirms that the use of the finite element method in the ANSYS program is able to predict and represent the collapse mechanism of the ordinary stone arches and the strengthened one by (TRM) in a manner consistent with the results of the experiments.

**Key words** : stone arch , mechanism, TRM , Finite Element.

## 1- مقدمة البحث:

تعتبر الحجارة بمختلف أنواعها أقدم مواد البناء المستخدمة في تشييد المنشآت القديمة , وبناء العناصر الإنشائية الحاملة للأبنية التاريخية سواء كأعمدة لتحمل الأحمال الرأسية أو دعائم لتحمل الحمولات الشاقولية التي فوقها , و بسبب ضعف وقصافة الحجر عندما يعمل كدعائم أفقية و الحاجة لبناء منشآت حجرية بمجازات كبيرة وقادرة على تحمل أوزان ضخمة وكبيرة كما في القلاع الحجرية تمت الاستعاضة عن هذه الجمل الإنشائية الحجرية البسيطة المكونة من عمود ودعامة أفقية بابتكار ذكي وهو استخدام الأقواس الحجرية سواء بشكله المفرد البسيط أو بشكل ثلاثي المحاور فراغي (نظام العقود) الشكل (1).



الشكل (1) بعض نماذج الأنظمة الإنشائية الحجرية الحاملة

تتعرض الأقواس الحجرية للعديد من الأضرار مثل (تفتت الحجر نتيجة العوامل الجوية , انزلاق العناصر الحجرية المكونة لها بسبب فقدان ملاطها, تشققات قطرية في جسم القوس الحجري نتيجة الدوران التفاضلي لركائزه , الفقد في العناصر الحجرية المكونة للقوس الحجري وتساقط الحجارة نتيجة سوء قطع الحجر) كما هو موضح في الشكل (2).

وهناك العديد من التقنيات الحديثة استخدمت لتدعيم الأقواس الحجرية ومنها:

(استخدام الشدادات المعدنية الخارجية , استخدام شدادات ميكانيكية داخلية لمنع التشوهات بالاتجاه العرضي للجسر , استخدام مواد FRP مع الأيوكسي , حقن الشقوق والفواصل بين حجارة القوس باستخدام المواد الراتنجية الأيوكسية , استخدام مادة الفيروسمنت , استخدام الأوتاد والمثبتات المعدنية لربط حجارة القوس ببعضها ) كما هو موضح في الشكل (3).

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM)  
بطريقة العناصر المحدودة



الشكل (2) بعض نماذج الأقواس الحجرية المتضررة



الشكل (3) بعض تقنيات تدعيم الأقواس الحجرية

ونتيجة لغلاء مواد هذه التقنيات والحاجة لخبرات كبيرة عند استخدامها برزت الحاجة لمادة سهلة التشكيل و تحقق ما يلي (رخيصة الثمن ، وسهولة التطبيق ، ولا تؤثر على وظيفة القوس أو شكله المعماري ، وتحقق الثبات ومقاومة العوامل الجوية الضارة وعوامل الزمن ، وذات قدرة تحمل عالية لتتحمل الاجهادات الكبيرة المطبقة على الأقواس الحجرية

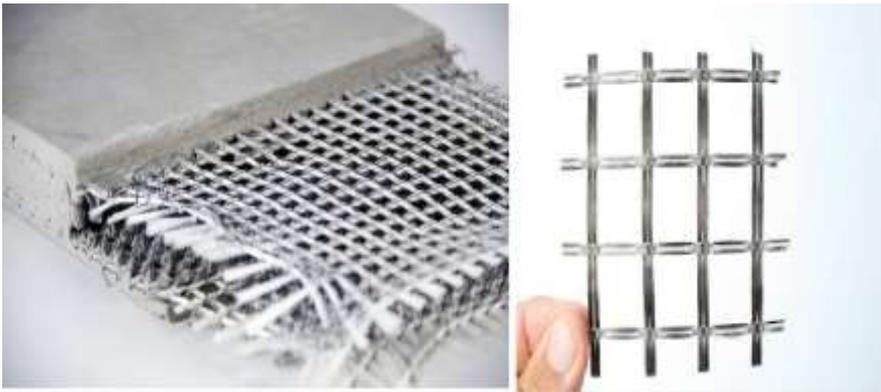
(المتضررة) وهذه المتطلبات متوفرة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج والمسماة اصطلاحاً (TRM).

يعرف (TRM) وفقاً للباحث Ernest Bernat-Maso [1] كمايلي: "يطلق على النظام الإنشائي الذي يعتمد على استخدام مادة رابطة لا عضوية وشبكة من الألياف غير الفولاذية الموضوعة فيها اسم الملاط الاسمنتي المقوى بالنسيج أو ما يصطلح عليها تقنية (TRM) وهي تقنية متطورة مشابهة لتقنية الفيروسمنت من حيث المبدأ" , وتتألف مادة TRM بشكل عام من مكونين رئيسيين هما :

1- المادة الأساس (Matrix) : الهدف منها إيصال المجهود الميكانيكي لمادة التقوية لتضمن حماية مادة التقوية من العوامل الخارجية وتشكل المادة الأساس الملاط الرابط في تقنية (TRM) , و يتكون من أساس اسمنتي , و في بعض الأحيان استخدام المونة الكلسية المائية [2].

## 2- النسيج اللاعضوي:

يتكون النسيج الأكثر استخداماً في تقنية (TRM) من ألياف المواد اللاعضوية (ألياف زجاجية , ألياف بازلتية , ألياف كربونية... إلخ) و تكون منسوجة على هيئة شبكة متعامدة , وتعد الألياف الزجاجية والبازلتية الأكثر استخداماً لما تمتلكه من خواص مناسبة لهذه التقنية ويوضح الشكل (4) مكونات مادة (TRM) .



الشكل (4) مقطع نموذجي من مادة (TRM) ونموذج عن النسيج المستخدم

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM)  
بطريقة العناصر المحدودة

---

ونظراً لامتلاك تقنية (TRM) لميزات كثيرة سنعمد في بحثنا على استخدام نموذج تجريبي مرجعي لقوس حجري مدعم بتقنية (TRM) مع بناء نموذج تحليلي باستخدام طريقة العناصر المحدودة اعتماداً على برنامج Ansys والذي يعتبر من أكثر البرامج شهرة وفعالية و سنستخدمه لعملية النمذجة و التحليل اللاخطي للأقواس الحجرية العادية المحملة في ربع مجازها والمعاد تدعيمها باستخدام تقنية (TRM) باستخدام ثلاثة طبقات من النسيج البازلتية على الوجه الداخلي للقوس الحجري , بهدف دراسة سلوكها وآلية انهيارها ومقارنته مع النتائج التجريبية.

**2 - هدف البحث :**

يتضمن البحث دراسة نظرية للمادة الحجرية المكونة للأقواس الحجرية و عددية لتأثير تدعيم الأقواس الحجرية بمادة على سلوك هذه الأقواس وتحديد آلية انهيارها تحت تأثير قوة مركزة في ربع المجاز, و يقدم البحث طريقة واضحة لبناء النموذج العددي للجسور الحجرية المدعمة ب (TRM) باستخدام طريقة العناصر المحدودة , كما يتضمن الأهداف الجزئية التالية:

1- الدراسة التجريبية المرجعية لقوس حجري محمل بقوة مركزة في ربع المجاز , وتأثير تدعيمه من الوجه الداخلي بثلاث طبقات من نسيج ألياف البازلت مع مونة اسمنتية على قدرة تحمله وشكل انهياره .

2- البحث في طرق انهيار الأقواس الحجرية وشرح بعض النظريات والطرق الحسابية المعتمدة لتوصيف آليات انهيارها .

3- وضع نموذج حاسوبي موثوق بطريقة العناصر المحدودة اعتماداً على المعطيات والنتائج التجريبية للقوسين الحجريين المحددين كدراسة تجريبية مرجعية باستخدام برنامج ANSYS وإجراء التحليل اللاخطي لهما, وتحديد إمكانية استخدامه كمنصة موثوقة لدراسة أية متغيرات أخرى.

4- مقارنة نتائج التحليل للنموذج الحاسوبي باستخدام برنامج ANSYS مع النتائج التجريبية من حيث الحمولة الحدية وآليات الانهيار وعدد وموقع المفاصل المتشكلة عند الانهيار مع للتأكد من صلاحية النموذج في توقع القيم التجريبية.

### 3- أهمية البحث :

تأتي أهمية هذا البحث من أن عملية النمذجة قد أخذت بالحسبان نمذجة مكونات الوحدة الحجرية (Masonry) المشكلة للأقواس الحجرية المدروسة من خلال تمثيل مكونات الوحدة الحجرية (القطع الصخرية والمونة ) الموضحة في الشكل (5) كل على حدة، وذلك بغية تحديد أماكن تشكل المفاصل التي تحدد ميكانيكية الانهيار بدقة , مع الأخذ بعين الاعتبار خواص سطح التماس بينهما من حيث التلاصق والانزلاق.

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة



الشكل (5) مكونات المادة الحجرية (Masonry) المستخدمة في بناء الأقواس الحجرية  
4 - الدراسة المرجعية :

تهدف المقالة لدراسة آلية انهيار القوس الحجري المعرض لحمولة مركزة في ربع المجاز وتأثير تدعيمه من الوجه الداخلي (Intros) بثلاث طبقات من النسيج البازلتية وفق تقنية (TRM) باستعمال طريقة العناصر المحدودة بحيث نأخذ بعين الاعتبار لا خطية المواد و تم بناء النموذج الحاسوبي باستخدام برنامج ANSYS اعتماداً على النموذج التجريبي المدروس من قبل الباحثين [3].

(Florentia A. Kariou, Savvas P. Triantafyllou, Dionysios A. Bournas, 2019) الذين نفذوا التجارب على قوسين حجريين أحدهما مرجعي والآخر مدعم من الوجه الداخلي بتقنية (TRM) ذات السماكة (9mm) والمكونة من ثلاثة طبقات من نسيج ألياف البازلت ضمن المونة الاسمنتية , وأبعاد الأقواس المدروسة كما يلي : (المجاز 2 متر , الارتفاع 0.5 متر , السماكة 0.1025 متر , العرض 0.44 متر ) , ومواصفات الأقواس المجربة موضحة في الجدول (1).

الجدول (1) مواصفات الأقواس المجربة

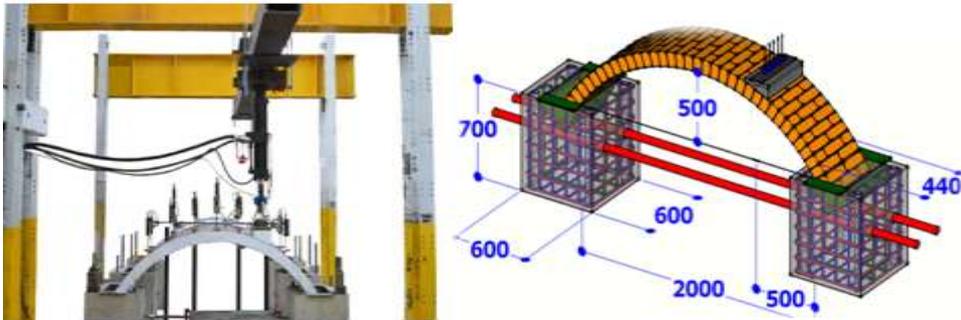
القوس	مادة TRM	السطح المقوى	عدد طبقات التقوية	سماكة طبقة التقوية (mm)
CON	-	-	-	-
B3- I	ألياف بازلتية محاكاة	الداخلي	3	9

وهذان القوسان مبنيان من القرميد الصلب مع مونة اسمنتية رابطة , وتم استخدام مونة اسمنتية كوسيط للتماسك بين نسيج ال TRM والجسر الحجري مكونة من ( اسمنت: رمل ) وفق النسبة (1:8) ونسبة الماء للخليط بلغت 0.23 , ومواصفات مونة البناء و مونة التدعيم موضحة في الجدول (2).

الجدول (2) مواصفات المونة المستخدمة في البناء ومونة التدعيم

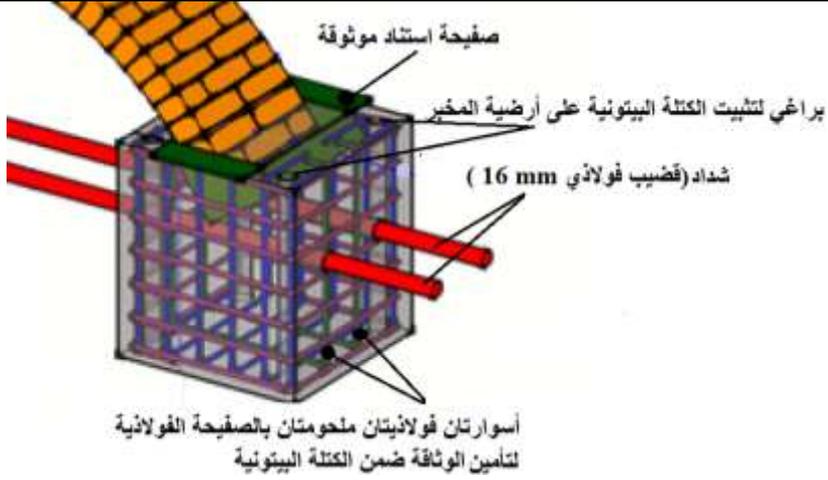
المونة المستخدمة في البناء		المونة المستخدمة في التدعيم	
مقاومة الضغط (MPa)	مقاومة الشد (MPa)	مقاومة الضغط (MPa)	مقاومة الشد (MPa)
8.1	2.8	32.8	9.8

ويستند كل من القوسين في الأطراف على صفيحة فولاذية موثوقة ضمن ركيزتين بيتونيتين مثبتتين بأرضية المخبر ببراعي وتتصلان مع بعضهما بشدادين وهما قضبان فولاذيان بقطر (16mm) لمنعهما من الانزلاق أفقياً , وتم تحميل القوسين بحمولة مركزة في ربع المجاز , ويوضح الشكل (6) النموذج الهندسي للقوس وطريقة التحميل ومواقع حساسات القياس ويوضح الشكل (7) تفاصيل الارتكاز للقوس على الصفائح المعدنية الموثوقة بقضبان إرساء ملحومة مع الصفائح ومزروعة ضمن الكتل البيتونية ومواصفات ألياف البازلت المستخدمة ضمن نسيج TRM موضحة في الجدول (3) .



الشكل (6) أبعاد القوس المستخدم في الدراسة ومواقع الحساسات والحمولة المطبقة [3]

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

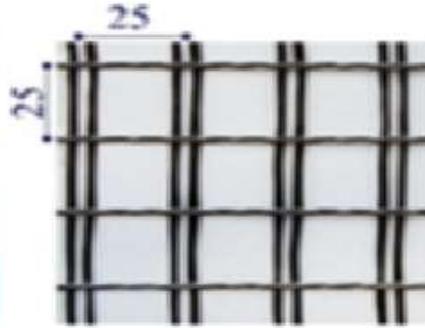


الشكل (7) تفصيل شروط استناد القوس القرميدي المستخدم في الدراسة المرجعية

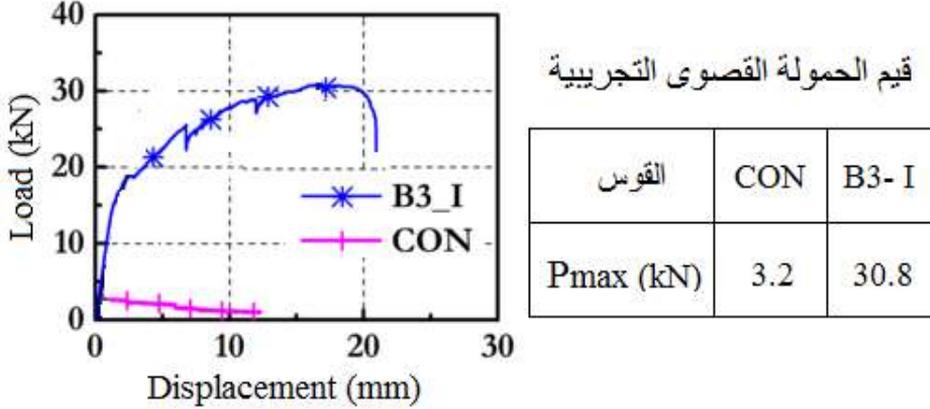
الجدول (3) مواصفات الاليف البازلتية المستخدمة ضمن نسيج TRM

الألياف	الوزن	السماكة	مقاومة الشد	معامل يونغ
	g/m <sup>2</sup>	mm	MPa	GPa
بازلت	220	0.037	1351	89

يبين الشكل (8) مراحل التدعيم بمادة TRM من الوجه الداخلي للقوس , ويبين الشكل (9) النتائج التجريبية للأقواس المجربة من منحنيات الحمولة - سهم للأقواس المجربة وقيم الحمولة التجريبية القصوى , ويبين الشكل (10) نماذج الانهيار ومواقع المفاصل المتشكلة في الأقواس المجربة .



الشكل (8) مراحل التدعيم بمادة TRM من الوجه الداخلي للقوس ونسيج ألياف البازلت المستخدم للتدعيم



الشكل (9) النتائج التجريبية للأقواس المجربة

**واستنتج الباحثون ما يلي:** تزداد قدرة تحمل القوس B3-I المدعم على الوجه الداخلي بثلاث طبقات من النسيج البازلتي بنسبة (9.6%) مقارنة مع القوس المرجعي , ويتغير موقع المفاصل تحت القوة المركزة كما تظهر العديد من الشقوق الإضافية ضمن مونة البناء مما يساعد في تبيد الحمولة الخارجية ويرفع قدرة القوس المدعم.

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة



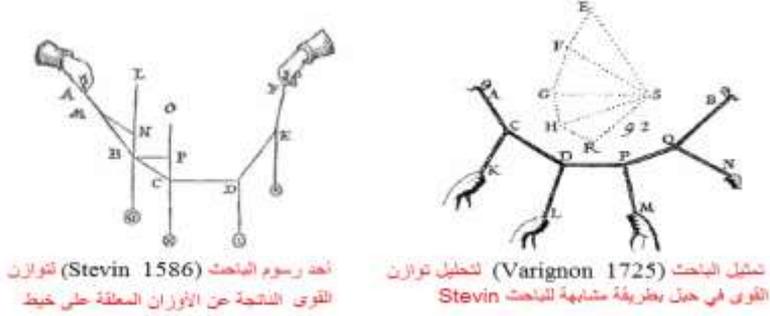
الشكل (10) نماذج الانهيار ومواضع المفاصل المتشكلة في القوسين المجريين

### 5- الدراسة النظرية :

تتضمن الدراسة النظرية شرحاً لبعض طرق تحليل الأقواس الحجرية ولنماذج انهيارها تحت تأثير الحمولات المختلفة .

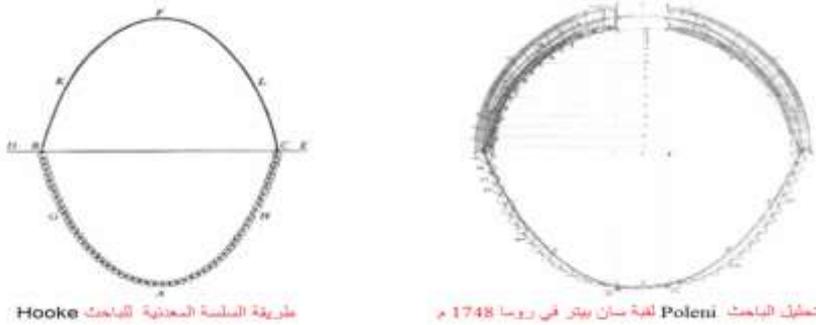
#### 5-1 طرق تحليل الأقواس الحجرية :

تعددت الطرق المستخدمة لتحليل وتوصيف سلوك الأقواس الحجرية تحت تأثير القوى الخارجية و تطورت هذه الطرق بتطور العلوم للوصول للنمذجة الحاسوبية و يعتبر الباحث (Simon Stevin's (1548-1602) [4] من أوائل الباحثين اللذين استخدموا علم توازن القوى التخطيطي من خلال استخدام المضلعات المغلقة لمحصلة القوى لتوصيف القوى الداخلية في العناصر الإنشائية المنحنية ويمكننا اعتبارها بداية للطرق التحليلية في توصيف العمل القوسي وقد تابع استخدامها وتطويرها الباحث Varignon في العام 1725 كما هو موضح في الشكل (11) .



الشكل (11) نموذج توازن القوى في حبل وفقاً لـ Stevin , Varignon [4,5]

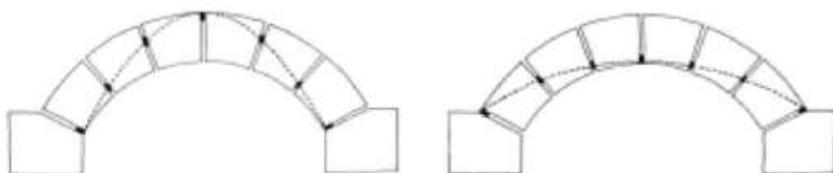
قام الباحث Robert Hooke [6] في العام 1675م بتمثيل الفعل القوسي من خلال تعليق سلسلة معدنية بين نقطتين وجعله يتدلى تحت تأثير وزنه الذاتي، بالتالي ستكون السلسلة في جميع نقاطها معرضة لشد صافي وبافتراض انها جسم صلب وليس مرن وقمنا بقلبها وتركها تحت تأثير وزنها الذاتي فإن جميع نقاطها ستخضع لضغط صافي وبالتالي يمكن الاستفادة من ذلك التمثيل لتمثيل أي حمولة مطبقة على القوس من خلال تطبيق وزن مكافئ على الكبل وبذلك نحصل على شكل الانهيار المتوقع ، وقد قام الباحث Poleni عام 1748م باستخدام فكرة لباحث Robert Hooke لتقييم أمان قبة سان بيتر المتصدعة في روما [7] كما في الشكل (12).



الشكل (12) تمثيل الباحث Poleni لقبة سان بيتر المتصدعة في روما اعتماداً على فكرة [7] Hooke

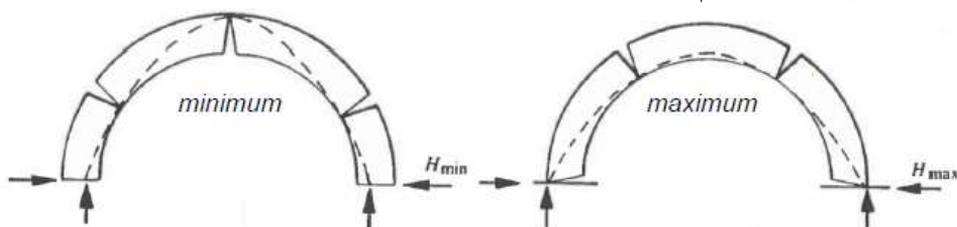
وتعتبر طريقة **خط الضغط (Thrust Line)** من أهم الطرق وأكثرها فعالية في تحليل سلوك الأقواس الحجرية وهي تطبيق عملي لنظرية السلسلة المرنة للباحث

Hooke, حيث يتم رسم خط افتراضي يمثل لا مركزية القوى الضاغطة في مركز كل قطعة من قطع القوس الحجرية , ووفقاً لافتراض الباحث Barlow(1846) [8] الحدود المحتملة لخط الضغط تبدأ عادة من الزوايا البعيدة لركائز القوس نحو ذروة المنحنى الداخلي له , أو من الزوايا القريبة لركائزه نحو ذروة المنحنى الخارجي كما هو موضح في الشكل(13).



الشكل(13) المواقع المحتملة لخط الضغط في الأقواس الحجرية وفقاً لـ Barlow [8]

وبين Heyman [9] أن خط الضغط يقع ضمن مجال محدد فيسبب قيمتين للدفع الأفقي أحدهما دنيا والأخرى عليا في الركائز الحاملة للقوس كما هو موضح في الشكل(14) ويبقى القوس مستقراً وأمناً طالما يقع خط الضغط بينهما ضمن حدود سماكة جسم القوس  $d$ .



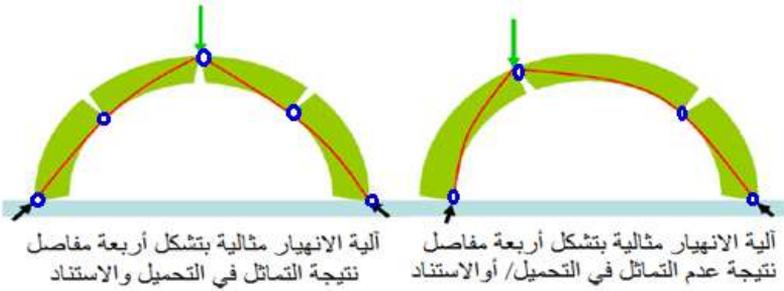
الشكل(14)المواقع الطرفية لخط الضغط في الأقواس الحجرية وفقاً لـ Heyman [9]

ووفقاً للباحث Sanchez [10] يمكننا توقع أماكن ظهور المفاصل المسببة للانهيار في الأقواس الحجرية وذلك عندما يصبح خط الضغط الخاص بالقوس مماساً لحدود هذا القوس , وهذا ما تؤكد قاعدته عدم ظهور إجهادات شادة في المقطع عند وقوع محصلة القوى في ثلثه بالتالي مع اقتراب موقع خط الضغط من ثلث سماكة المقطع الفعلي للقوس الحجري  $d$  تبدأ التشققات ضمن القوس بالظهور حتى يصبح خط الضغط مماساً لحدود القوس وعندها يصبح القوس

غير مستقر , ويحصل الانهيار للقوس عندما يلامس خط الضغط حواف القوس في أربع نقاط [19] .

## 5-2- آليات انهيار الأقواس الحجرية :

يعتبر الباحث (1730) Couplet أول من أشار إلى دور تشكل المفاصل في انهيار الأقواس الحجرية حيث اعتبر أن الانهيار يعتمد على ظهور المفاصل ووصولها الى عدد محدد يحدث عنه الانهيار , وقد اقترح لتحقيق ذلك إهمال الانزلاق بين الوحدات الحجرية الإسفينية [11], وفقاً للباحث (ROCA) [12] يجب تشكل أربع مفاصل كحد أدنى عند التحميل والاستناد غير المتماثل وخمسة مفاصل عند شروط التحميل والاستناد المتماثلين حتى يحصل الانهيار في الأقواس الحجرية كما هو موضح في الشكل (15) .



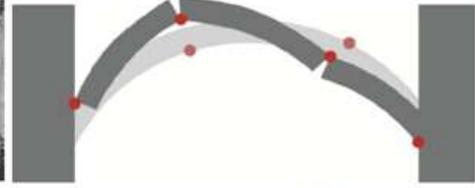
الشكل (15) آليات الانهيار مع خط الضغط تبعاً لعدد المفاصل المتشكلة [12]

وينتج وفقاً للباحث Heyman [9] الانهيار في الأقواس ذات الركائز المستقرة والمعرضة لوزنها الذاتي بالإضافة لحمل مركز في ربع المجاز بتشكل أربع مفاصل وهذا ما أكدته نتائج التجربة التي أجريت على جسر بريستود من قبل الباحثين Cavicchi A, Gambarotta [13] كما هو موضح في الشكل (16).

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM)  
بطريقة العناصر المحدودة



انهيار جسر بريستود نتيجة حمل مركز في ربع مجازه  
وفقاً ل [13] Cavicchi A, Gambarotta . (2005)



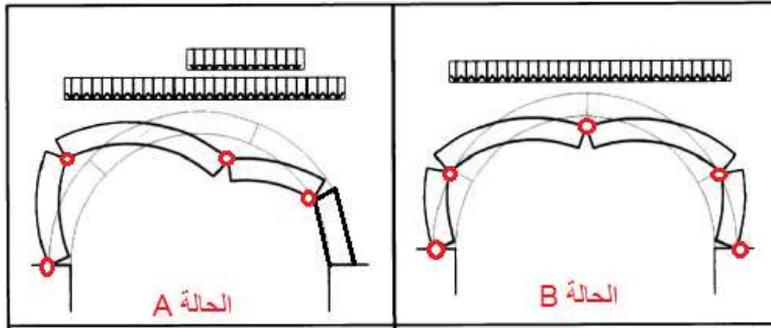
ميكانيزم الانهيار النموذجي لقوس حجري تحت تأثير حمولة  
مركزة في ربع المجاز وفقاً ل [9] HEYMAN (1966)

الشكل (16) تطابق شكل الانهيار النظري لقوس حجري مع انهيار جسر بريستود [9,13] ووفقاً للباحث Foraboschi [14] يوجد شكلان محتملان لآليات انهيار الأقواس هما :

1) انهيار ناتج عن حركة أقسام القوس : ونميز شكلين محتملين لهذا الانهيار وهما موضحان في الشكل (17) وفق ما يلي :

❖ الحالة A: يحدث الانهيار بتشكيل أربعة مفاصل نتيجة عدم انتظام الحمولة (وهي الحالة الأقرب للواقع والأكثر شيوعاً).

❖ الحالة B : يحدث الانهيار بتشكيل خمسة مفاصل نتيجة التناظر بالحمولة ويكون أحدها في منتصف القوس واثنان في المسندين واثنان متناظران بين المساند ومنتصف القوس (وهي حالة مثالية نظرية و نادرة الوجود في الواقع)

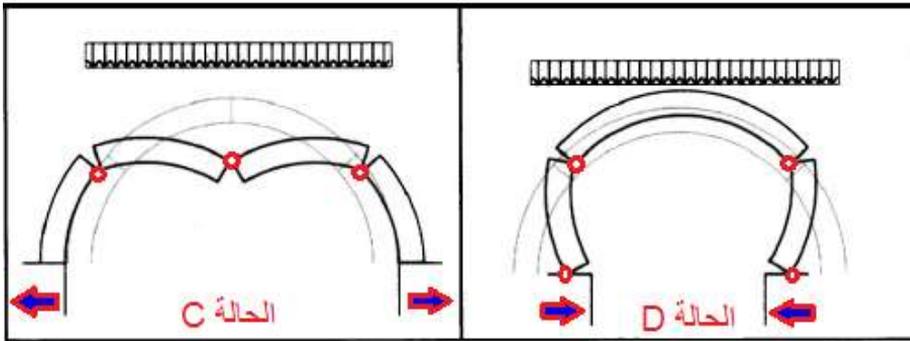


الشكل (17) الآليات المحتملة لقوس معرض لقوى موزعة نتيجة حركة أجزاء القوس

مع ثبات الركائز وفقاً للباحث Foraboschi [14]

2) انهيار ناتج عن حركة الركائز : ونميز شكلين محتملين لهذا الانهيار وهما موضحان في الشكل (18) وفق ما يلي :

- ❖ الحالة C : تحدث بتشكيل ثلاثة مفاصل فقط أحدها في منتصف المجاز والاثنتان متناظران بالنسبة لمحور القوس ولا يظهر أي مفصل في المساند وذلك نتيجة لانزلاق المساند نحو الخارج (وهذه الحالة قد تظهر أيضاً في الأقواس المسطحة أي الأقواس ذات النسبة الكبيرة بين مجاز القوس وبين ارتفاعه).
- ❖ الحالة D : تحدث بتشكيل أربعة مفاصل نتيجة حركة الركائز نحو الداخل (وهي حالة نادرة الحدوث وغالباً لا تحدث إلا عند وجود فتحات متعددة ومتجاورة للقوس).



الشكل (18) الآليات المحتملة لقوس معرض لقوى موزعة نتيجة حركة الركائز وفقاً

للباحث Foraboschi [14]

## 6- مواد وطرق البحث النظرية :

يعتبر وضع نموذج عددي ناجح ومتمق باستخدام برنامج ANSYS بحيث تكون نتائج تحليله مقارنة قدر الإمكان للنتائج التجريبية مفيداً جداً من النواحي الاقتصادية والزمنية و يمكننا من إجراء عدد غير محدود من عمليات التحليل باستخدام المتغيرات المطلوبة بالإضافة لتوفير كميات كبيرة من البيانات .

## 6-1- التوصيف الحاسوبي لنمذجة المواد:

توجد خمسة مكونات للأقواس الحجرية يجب نمذجتها ضمن الدراسة التحليلية وهي :  
 القطع القرميدية - المونة الإسمنتية الرابطة بين القطع القرميدية - سطح التماس بين القطع القرميدية والمونة الإسمنتية الرابطة بينها - صفائح الاستناد والتحميل الفولاذية -

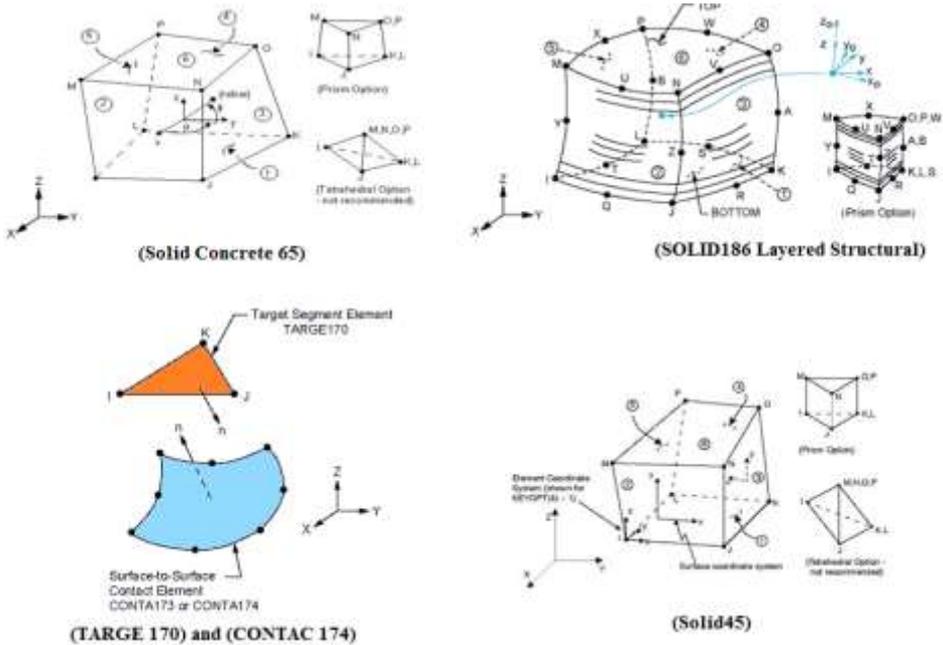
نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

مادة (TRM) المكونة من ( ثلاثة طبقات من ألياف النسيج البازلتية ضمن المونة الاسمنتية ) , وتوضح الفقرات التالية الخصائص الأساسية لهذه المكونات .  
**6-1-1- العناصر المحدودة المستخدمة في النمذجة وثوابتها الحقيقية :**  
 يوضح الجدول (4) العناصر المحدودة المستخدمة لنمذجة أجزاء الأقواس المجرية ومادة التدعيم , وهي موضحة في الشكل (19).

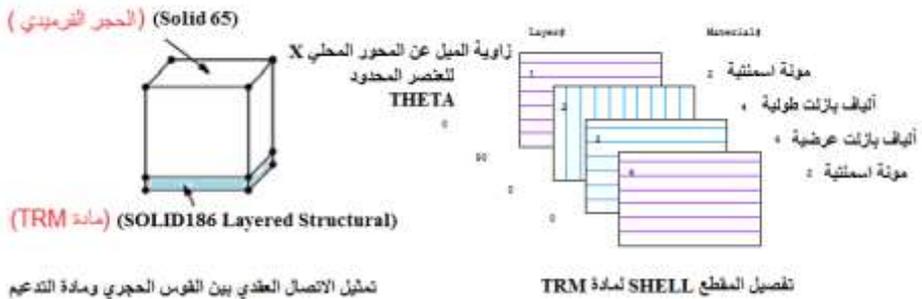
الجدول(4)العناصر المحدودة المستخدمة لنمذجة أجزاء الأقواس المجرية ومادة التدعيم

المقطع	الثوابت الحقيقية	العنصر المحدود	المكون
-	عنصر صلب بدون تسليح ضمني	Solid 65	القطع القرميدية
-	عنصر صلب بدون تسليح ضمني	Solid 65	مونة البناء
-	-	Solid45	صفائح الاستناد والتحميل
-	-	+ (Contact 174) (Target 170)	سطح التماس بين القرميد والمونة
Shell Section	-	(Solid186- Layered Structural)	<b>TRM</b>

وتفاصيل مقطع مادة التدعيم باستخدام برنامج ANSYS موضحة في الشكل (20) , وتم في دراستنا الحالية اعتماد النموذج المنفصل (Discrete Model) لنمذجة اتصال العناصر المحدودة الممثلة لمادة TRM وللقوس الحجري مع بعضها في العقد .



الشكل (19) العناصر المحدودة المستخدمة في النمذجة للأقواس الحجرية ومادة TRM [17]



تمثيل الاتصال العندي بين القوس الحجري ومادة الترميم

تفصيل المقطع SHELL لمادة TRM

الشكل (20) تفصيل مقطع Shell لطبقات العنصر المحدود

(Solid 186 Layered) المستخدم في النمذجة لمادة TRM [17]

## 6-1-2- البيانات المطلوبة لتوصيف سلوك المواد المستخدمة في برنامج Ansys:

### ❖ القرميد ومونة البناء الاسمنتية ومونة التدميم :

يتطلب برنامج ANSYS ادخال البيانات التالية والموضحة في الجدول (5) وهي:

(1) المقاومة القصوى الاسطوانية على الضغط للقرميد والمونة ( $f'_c, f'_{m1}, f'_{m2}$ ).

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقباس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

(2) معامل المرونة ( $E_c$ ): ويحسب للبيتون وللمونة الاسمنتية بالعلاقة  
 $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$  [17] , وللقرميد بالعلاقة  $E_{cb} = 400 * F_{cb}$  [19].

(3) المقاومة القصوى للبيتون على الشد ( $f_r$ ) , (4) معامل بواسون :  $\nu$  .

(5) معامل نقل القص  $\beta_r$ : يعتبر تحديد معامل نقل القص للشقوق المفتوحة والمغلقة عاملاً مهماً في نجاح النموذج الحاسوبي كي يتوافق بشكل جيد مع النتائج التجريبية.

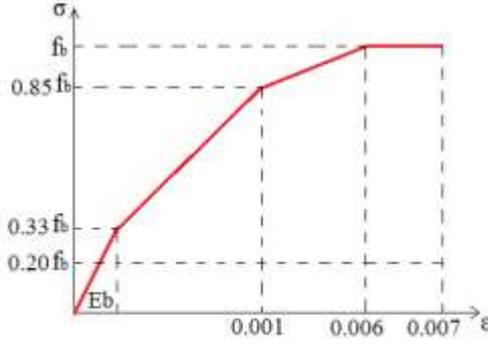
الجدول (5) الخواص الميكانيكية للمواد المعتمدة في النمذجة .

مونة التدعيم (TRM)	مونة البناء	القرميد	الواحدة	الخاصية
32.8	8.1	21.2	Mpa	المقاومة على الضغط
26917	13376	8480	Mpa	معامل المرونة
9.8	2.8	7.95	Mpa	المقاومة على الشد
0.15	0.15	0.25	-	معامل بواسون $\nu$
0.25	0.2	0.3	شقوق مغلقة	معامل نقل القص $\beta_r$
0.9	0.9	0.9	شقوق مفتوحة	

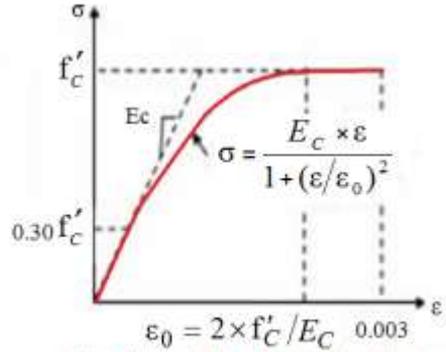
(6) علاقة (الإجهاد - التشوه) :

1- لمونة البناء الإسمنتية ومونة التدعيم بمادة TRM : يتطلب برنامج Ansys إدخال علاقة الإجهاد - التشوه للبيتون في حالة الضغط وفق تقريبات مختلفة , وفي بحثنا سنعمد التقريب المبسط (Simplified) [17].

2- للحجر القرميدي : سنعمد النموذج التقريبي المعتمد من قبل للباحث [16] ويوضح الشكل (21) النموذج التقريبي لعلاقة (الإجهاد - التشوه) للقرميد و لمونة البناء والتدعيم الاسمنتية المستخدمة في النمذجة .



منحني الإجهاد-تشوه للقرميد وفقاً لـ [16]



منحني الإجهاد-تشوه للمونة الاسمنتية الرابطة وفقاً للتقريب المبسط [17]

الشكل (21) منحني (إجهاد - تشوه) للبيتون على الضغط وفق تقريبات مختلفة [6]

وقد اعتمدت علاقات التقريب المبسط (Simplified) [17] لبناء هذه العلاقة :

$$\sigma = \frac{E_C \times \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2 \times f'_C}{E_C} \quad (2)$$

$$E_C = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

حيث  $\sigma$ : الإجهاد عند أي قيمة للتشوه  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$ : التشوه عند القيمة  $f'_C$

يبين الجدولان (6) ، (7) إحداثيات نقاط المنحني المميز لعلاقة الإجهاد - تشوه المعتمدة في الدراسة التحليلية باستخدام برنامج ANSYS لكل من القرميد والمونة الاسمنتية على التوالي .

الجدول (6) إحداثيات نقاط المنحني المميز لعلاقة الإجهاد - تشوه للقرميد

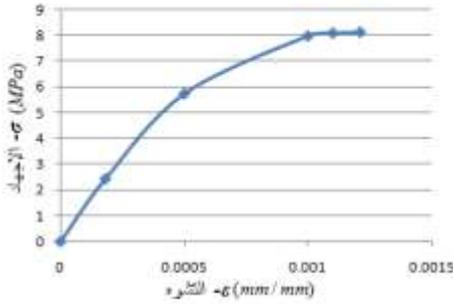
رقم النقطة	الإجهاد $f$ (MPa)	التشوه $\varepsilon$ (mm/mm)
1	6.996	0.0003233
2	18.2	0.001
3	21.2	0.006
4	21.2	0.007

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

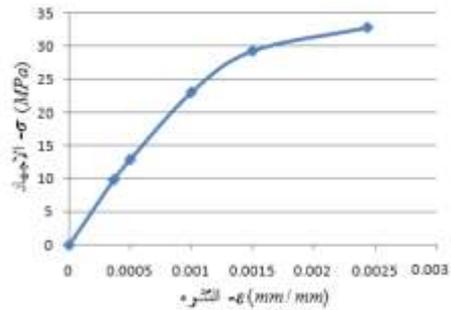
الجدول (7) إحدائيات نقاط المنحني المميز لعلاقة الإجهاد - تشوه للمونة الاسمنتية

مونة التدعيم		مونة البناء		النقطة
التشوه $\varepsilon$	الإجهاد $f$ (MPa)	التشوه $\varepsilon$	الإجهاد $f$ (MPa)	
0.000365561	9.84	0.00018	2.43	1
0.0005	12.92	0.00050	5.71	2
0.001	23.04	0.00100	7.95	3
0.0015	29.28	0.00110	7.92	4
0.0024	32.80	0.00120	8.10	5

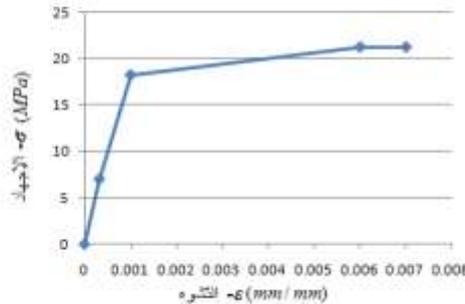
ويبين الشكل (22) منحنيات ( الإجهاد - التشوه ) للقرميد ومونة البناء ومونة التدعيم الاسمنتية المعتمدة في النمذجة .



منحني الإجهاد - تشوه لمونة البناء المعتمد في النمذجة



منحني الإجهاد - تشوه لمونة التدعيم ب-TRM المعتمد في النمذجة



منحني الإجهاد - تشوه للحجر القرميدي المعتمد في النمذجة

الشكل (22) منحنيات ( الإجهاد - التشوه ) للقرميد وللمونة الإسمنتية المعتمد في النمذجة

❖ صفات الاستناد والتحميل :

استخدم العنصر (Solid45) لنمذجة الصفائح المعدنية في منطقة الاستناد ومنطقة تطبيق الحمولة المركزة لمنع تركيز الإجهادات على عدد محدد من العقد مما يسبب انهيارها موضعياً قبل انتقال الإجهادات لباقي العناصر المحدودة، ويوضح الجدول (8) خصائص مادة العنصر (Solid45) المستخدم في النمذجة باستخدام Ansys.

الجدول (8) خصائص مادة العنصر (Solid45) المستخدم في النمذجة

Material Model Number	Element Type	Material properties	
4	Solid45	Linear Isotropic	
		EX	$2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$
		PRXY	0.3

❖ ألياف النسيج البازلتية المستخدم في طبقات TRM:

عند النمذجة الإنشائية للألياف البازلتية التسليح الرئيسي والثانوي تم افتراض أن سلوك الألياف عبارة عن سلوك مادة مرنة خطية حيث يتم الوصول إلى قوة الشد الحدية دون ظهور أي تلدن ويوضح الجدول (9) تعريف سلوك مادة ألياف البازلت المستخدمة في الدراسة التحليلية باستخدام برنامج ANSYS .

الجدول (9) توصيف سلوك مادة ألياف البازلت باستخدام برنامج Ansys

قطر الليف المستخدم	Material Model Number	Element Type	Material properties	
0.037	6		Linear Isotropic - موحدة الخواص -خطية	
			EX	$89 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$
			PRXY	0.15
			Bilinear Isotropic - موحدة الخواص -ثنائية الخطية	
			Yield Stss	$13.51 \cdot 10^2 \text{ N/mm}^2$

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

			Tang Mod	0
--	--	--	----------	---

وتمت نمذجة الألياف البازلتية كطبقة من مقطع Shell لطبقات العنصر المحدود Solid 186 Layered المستخدم في النمذجة لمادة TRM.

#### ❖ نمذجة سطوح التماس بين القرميد والمونة الرابطة وخواصها :

تم استخدام العنصرين (Target170) و(Contact 174) من اجل نمذجة اتصال (سطح-سطح) ولتمثيل الانزلاق والاحتكاك بين سطحي المونة والقرميد لتصحيح واستقرار النموذج الحاسوبي للقوس الحجري [20], ونظراً لعدم توافر خواص التماسك بين القرميد والمونة تجريبياً لذلك تم اعتماد الخواص التالية التي حددت بناء على [15] وهي :

❖ قيمة التماسك بين القرميد والمونة :  $Fa_{b-m} = 1.27 MPa$

❖ إجهاد الشد الأعظمي بين القرميد والمونة :  $Ft_{b-m} = 0.61 MPa$

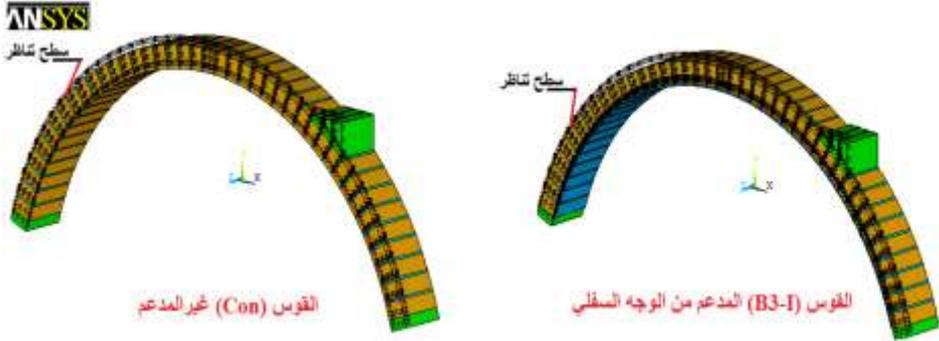
❖ معامل الاحتكاك للقرميد والمونة الاسمنتية :  $\mu_{b-m} = 0.5$

#### 6-2- النمذجة الهندسية (Modeling Geometry):

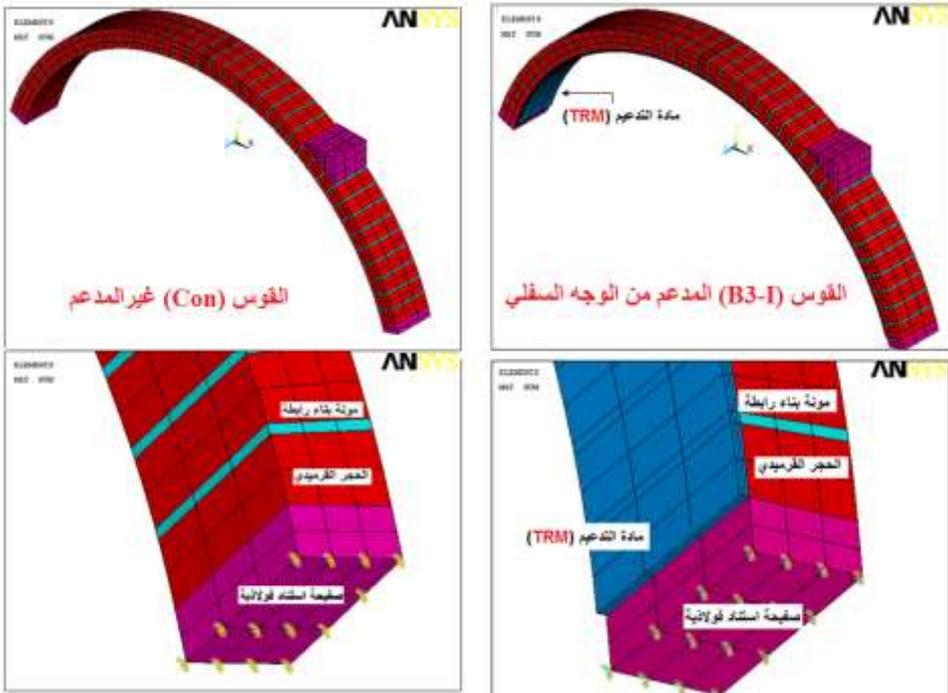
تمت نمذجة القوسين التجريبيين المرجعي والمدعم باستخدام برنامج ANSYS كما هو موضح في الشكل (23) مع الأخذ بعين الاعتبار فوائد التناظر على طول القوسين الحجريين كما هو موضح في الشكل (25) , حيث تم تمثيل مستوي التناظر بقيود مكافئة في عقد العناصر حتى نخفض من الزمن الحاسوبي ومن ذاكرة الحاسب بشكل ملحوظ , ويوضح الشكل (25) مكونات النموذج العددي بعد تقسيمه لعناصر محدودة.



الشكل (23) النموذج الهندسي للقوسين الحجريين ضمن برنامج Ansys



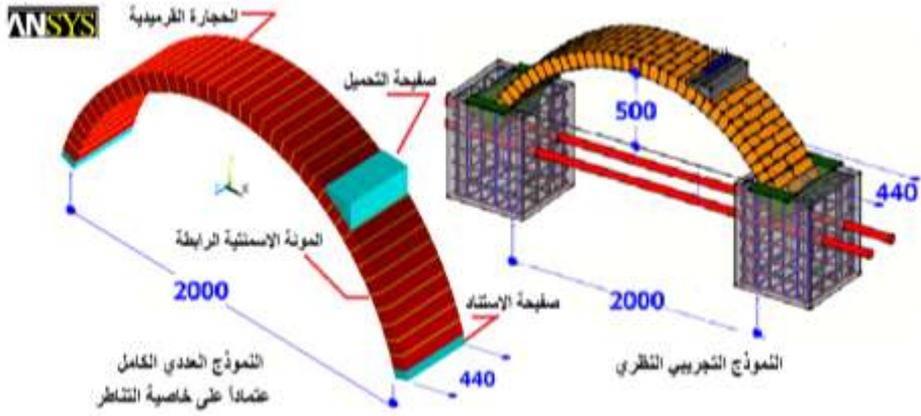
الشكل (24) تحديد سطوح التناظر طولياً ومحاكاتها لنمذجة (نصف القوسين الحجريين المرجعي و المدعم)



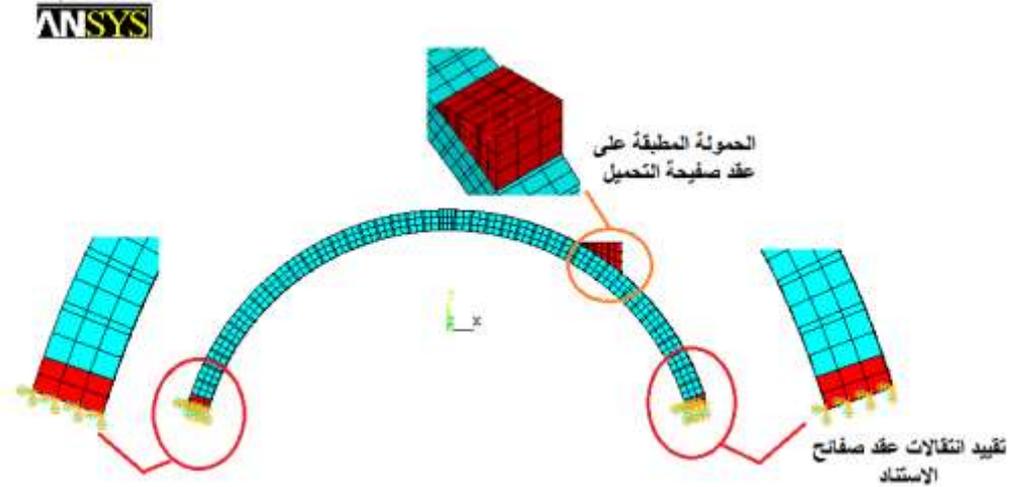
الشكل (25) مكونات النموذج العددي للقوسين الحجريين المرجعي و المدعم بعد تقسيمهما لعناصر محدودة

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة

وبالاعتماد على خاصية التناظر يمكن توضيح تشابه النموذج الكامل للقوس الحجري المنمذج باستخدام برنامج ANSYS مع النموذج التجريبي كما هو مبين في الشكل (25) (ملاحظة : يوجد جزء من الأحجار القرميدية للقوس التجريبي النظري غير ظاهر بسبب ارسائه مع صفيحة استناده ضمن الكتلة البيتونية بينما أمكن محاكاة وإظهار هذا الجزء غير المرئي باستخدام ANSYS) ، و يوضح الشكل (26) الشروط الطرفية في المساند ومكان الحمولة المطبقة على عقد صفيحتي الاستناد الفولاذيتين .



الشكل (25) تشابه النموذج الكامل للقوس الحجري غير المدعم باستخدام برنامج Ansys مع النموذج التجريبي المرجعي



الشكل (26) شروط الاستناد باستخدام Ansys للقوس المرجعي والمدعم

### 6-3- النتائج المستخلصة من تحليل القوسين الحجريين المرجعي والمدعم بطريقة

#### العناصر المحدودة:

تمت المقارنة بين نتائج التحليل العددية والتجريبية، وذلك من ناحية ما يلي :

✓ شكل آلية الانهيار وعدد المفاصل اللدنة وأماكن ظهورها

✓ قيم حمولة الانهيار .

بهدف التأكد من إمكانية الحصول على نموذج عددي موثوق باستخدام برنامج

ANSYS ومتوافق بشكل جيد مع النتائج التجريبية .

يوضح الجدول (10) نتائج حمولة الانهيار للنماذج العددية باستخدام برنامج Ansys مع

مقابلاتها التجريبية ، ويبين الشكلان (27) و (28) شكل آليتي الانهيار للقوسين

الحجريين المرجعي (B3-I) والمدعم (Con) نتيجة تشكل المفاصل عند الانهيار

تجريبياً وعددياً باستخدام برنامج ANSYS .

(ملاحظة :تم تكبير مقياس الرسم في ANSYS عدة أضعاف لتوضيح المفاصل وشكل

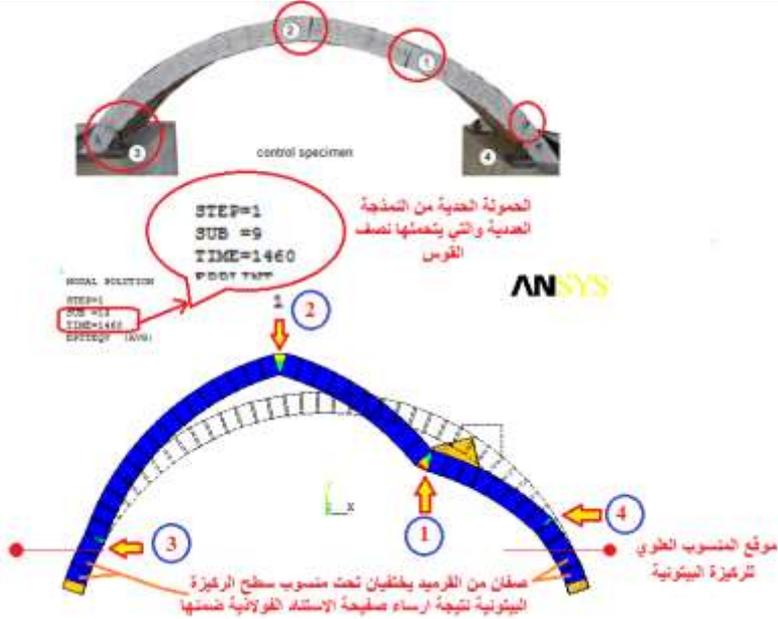
التشوه ) .

الجدول (10) نتائج حمولة الانهيار للنماذج العددية باستخدام برنامج Ansys مع

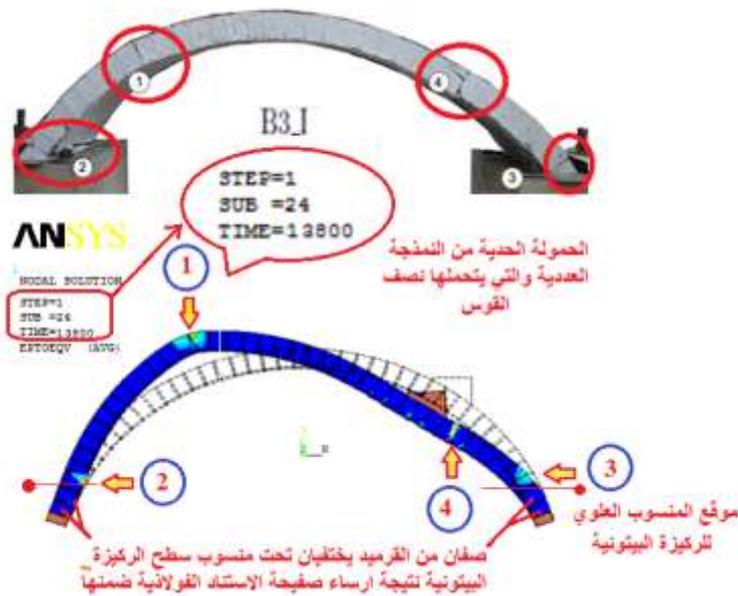
مقابلاتها التجريبية

الفرق %	حمولة الانهيار العددية (kN)	حمولة الانهيار التجريبية (kN)	القوس
8.75	2.92	3.2	Con
10.39	27.6	30.8	B3-I

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM) بطريقة العناصر المحدودة



الشكل (27) مقارنة آليتي الانهيار التجريبي والعددي وكمواقع المفاصل المتشكلة للقوس الحجري المرجعي (Con).



الشكل (27) مقارنة ميكانيزمي الانهيار التجريبي والعددي للقوس الحجري (B3-I).

1- يظهر من الشكلين السابقين (27,28) تقارب جيد في سلوك النموذج العددي للقوسين باستخدام طريقة العناصر المحدودة مع مثيليهما من الأقواس التجريبية عند الانهيار من خلال تشابه موقع ظهور المفاصل وعددها عند الانهيار للقوس المرجعي (con) مع مثيله التجريبي وكذلك الأمر بالنسبة للقوس المدعم من الوجه الداخلي (B3-I).

2- يظهر من النتائج في الجدول (10) توافق جيد في قيم حمولة الانهيار التجريبية والعددية حيث تنخفض قدرة تحمل القوس المرجعي (Con) العددية بنسبة 8.75% مقارنة مع نظيره التجريبي , وتنخفض قدرة تحمل القوس المدعم (B3-I) العددية بنسبة 10.39% مقارنة مع نظيره التجريبي .

3- الطريقة التحليلية العددية ببرنامج Ansys أعطت بعض الفروق مع النتائج التجريبية ويمكن تبرير الاختلاف بين نتائج الطريقتين بمجموعة من العوامل والتي تتعلق بشكل رئيسي حول نمذجة السلوك الإنشائي للمواد الداخلة في تركيب الأقواس الحجرية و المعتمدة في النمذجة , ومنها اختيار قيمة لمعامل نقل القص  $\beta$  , التي تمت من خلال معايرة النموذج وفق عدة قيم متغيرة كما ورد في توصيات الملحق الخاص ببرنامج ANSYS [17] , ولكن تحديد القيمة الفعلية لهذا العامل صعبة عملياً.

4- لم يغير التدعيم بال TRM من نمط الانهيار للقوس المدعم , فبقي الانهيار بتشكّل أربع مفاصل هو النمط السائد على الرغم من أن وجود طبقات TRM في حالة التدعيم من الوجه السفلي للقوس وهذا يدل على أن شكل ونوع ومكان الحمولة المطبقة هو العامل الحاكم عند تصميم الأقواس الحجرية سواء العادية أو المدعمة.

#### 9- المقترحات والتوصيات:

الدراسات المستقبلية يمكن أن تتضمن ما يلي :

- دراسة تأثير عدد الطبقات من TRM على سلوك الأقواس الحجرية المدعمة بنفس النوع من ألياف البازلت .
- دراسة تأثير تغير قطر الليف ونوعه على سلوك الأقواس الحجرية المدعمة بنفس النوع من ألياف البازلت .

## المراجع

المراجع الأجنبية:

- [1]- Ernest Bernat Maso, Lluís Gil Espert, Pere Roca Fabregat (2013), " Analysis of unreinforced and TRM - strengthened brick masonry walls subjected to eccentric axial load", Ph.D. Thesis - Terrassa, octubre de 2013.
- [2]- V. Mechtcherine, K. Schneider, W. Brameshuber, Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete, Text. Fibre Compos. Civ. Eng. (2016), <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00003-3>
- [3] - Florentia A. Kariou, Savvas P. Triantafyllou, Dionysios A. Bournas,(2019)“ TRM strengthening of masonry arches: An experimental investigation on the effect of strengthening layout and textile fibre material ”, JCOMB 6765 , Composites Part B, S1359-8368(19)30340-3.
- [4]- STEVIN, S. 1586. De Beghinselen der Weeghconst. (In The Principal Works of Simon Stevin, vol. 1, Leyden, 1955).
- [5]- Matthew J. DeJong, John Ochsendorf," As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches", Article in Nexus Network Journal · October 2006 .
- [6]- Hooke, R. 1675. A description of helioscopes, and some other instruments. London.
- [7]- Matthew J. DeJong, John Ochsendorf," As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches", Article in Nexus Network Journal · October 2006.
- [8]- Elvis Cescatti,(2016) "Combined Experimental And Numerical Approaches To The Assessment Of Historical Masonry Structures", Ph.D.Thesis, University IUAV Of Venezia ,2016.
- [9]- Heyman, J. 1966." The stone skeleton. International Journal of Solids and Structures" , 2: 249-279.
- [10]- Sanchez I.B.(2007) "Strengthening of arched masonry structures with composite materials", Ph.D.Thesis, Portugal:University of Minho,Department of Civil Engineering, 2007, 232.

- [11]-Thomas E .Beurman ,(2009)" Inventory Of Repairing And Strengthening Techniques For Masonry Arch Bridges", Master Thesis , Universitat Politècnica De Catalunya ,( 13 July 2009).
- [12]- P. Roca and C. Molins (Eds.)." Arch Bridges IV: Advances in Assessment, Structural Design and Construction". CIMNE, Barcelona, 2004.
- [13]- Cavicchi A, Gambarotta . (2005) ," Collapse Analysis Of Masonry Bridges Taking Into Account Arch-Fill Interaction " . Engineering Structures ,605-615.
- [14]- Paolo Foraboschi (2004)," Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips", JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION © ASCE / MAY/JUNE 2004 / 191.
- [15]- Andres,J. (2012)." Numerical model for nonlinear analysis of masonry walls". University of rehinisch,2012.
- [16]-Magenes.G,Morandi.P,Penna.A (2008),"D-7.1c Test Result On The Behaviour Of Masonry Under Static Cyclic In Plane Lateral Loads", Universiy Of Pravia.P129.
- [17]- ANSYS, "ANSYS User's Manual Revision 5.5"ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 1998.
- [18]- Vasudevan,G.; Kothandaraman, S. (2011)." Parametric study on Nonlinear Finite Element Analysis on flexural behaviour of RC beams using ANSYS". International journal of civil and structural engineering. Vol. 2, № 1, pp. 98-111.

المراجع العربية:

- [19]-د.مصطفى بطيخة , م. خالد صادق , (2014) , " ميكانيكيات انهيار أقواس حجرية مدعمة بالبوليميرات المسلحة بالألياف (frp) تحت تأثير الحملات الشاقولية " , أطروحة ماجستير , جامعة دمشق كلية الهندسة المدنية (2014) .
- [20] د. عماد علوش , د. سامر سليمان , م.اياد فواز الأسعد , (2015) , " تدعيم وترميم برج صافيتا باستخدام الألياف الزجاجية والأراميد " , أطروحة ماجستير , جامعة البعث - كلية الهندسة المدنية (2015) .

نمذجة وتحليل آليات انهيار الأقواس الحجرية المدعمة بمركبات الملاط المقوى بالنسيج (TRM)  
بطريقة العناصر المحدودة

---