

دراسة في الطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية

د.م تراث غريب¹

1 : مدرس في كلية الهندسة المدنية قسم الهندسة الإنشائية

ملخص البحث

يقدم هذا البحث دراسة في الطرق التخطيطية المعتمدة في تصميم المنشآت الحجرية الحاوية على عناصر قوسية والمستندة على ركائز جانبية. تم تعريف الأقواس لأنظمة انشائية حجرية مختلفة حيث تتعرض الركائز الحاملة للأقواس الحجرية لاجهادات داخلية مختلفة. يحصل انهيار الأقواس الحجرية عندما يخرج خط الضغط من سماكة القوس و يمس سطحه الداخلي أو الخارجي مسبباً دوران أو انزلاق القطع الحجرية في المفصل. هذا الانهيار يحصل مع تشكل عدد كاف من المفاصل.

بينت الدراسة أن طريقتي حساب سماكة الأقواس في العقود تعطيان قيم متقاربة من أجل الأقواس بالسماكات الدنيا عند المستوي 30°. فبلغ الفارق قيمة وسطية تساوي 8.1%. ويزداد الفرق بين طريقتي حساب سماكة الأقواس عند مضاعفة السماكة فبلغ الفارق قيمته العظمى عند مستوي المولد ووصل إلى 60%. كما بينت الدراسة أن معظم الطرق التخطيطية المعتمدة لتحديد عرض الركائز لاتأخذ بالاعتبار أثر ارتفاع الركيزة في تحديد السماكة.

كلمات مفتاحية:

المنشآت الحجرية ، أقواس ،الركائز ، الدفع الجانبي، خط الضغط، العقود الحجرية، استقرار .

A study in Geometric Methods of Designing Masonry Arches and buttresses

Dr. Turath Gharib¹

1: doctor in structure departement, Faculty of Civil Engineering

Abstract

This research presents a study of the geometrical methods used in the design of masonry structures containing arches and supported by buttresses. A definition of arches in different structural masonry systems were studied where the buttresses are subjected to different cases of internal stresses. The failure of masonry arches happens when the thrust line goes out of the thickness and becomes tangent to the intrados or extrados causing rotation or glissement of voussoirs in the hinge. This failure is accompanied with a sufficient number of sings.

The study showed that the two methods used in determining the thickness of arches in vaults give similar results in arches with minimum thickness in the 30° of the springing line. The difference is 8.1%. This difference increase and reaches 60 % in the springing line. The study revealed that most geometric methods used in determining the large of buttresses do not take in account the height of buttresses.

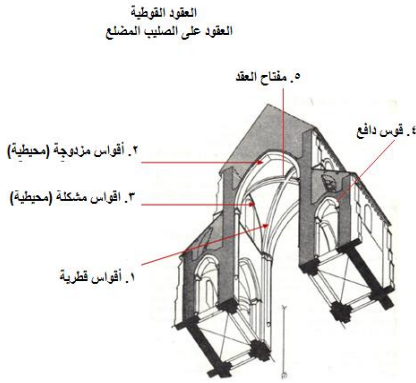
Key words:

Masonry structures, Arches, buttresses, lateral forces, thrust line, vaults, stabilization.

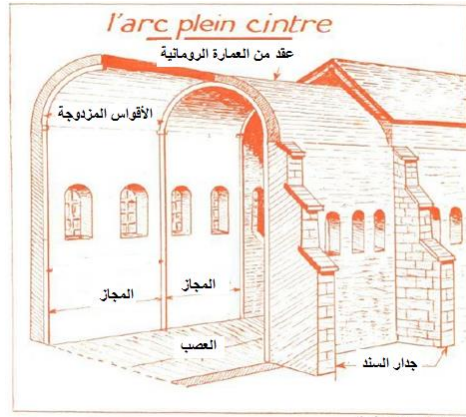
1- مقدمة البحث:

يعرف المنشأ الحجري بأنه تجمع للقطع الحجرية مع أو بدون مادة رابطة. يتأثر السلوك الميكانيكي لهذه المنشآت بحد كبير بالخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المكونة، وبهندسة الإنشاء وطبيعة الأحمال المطبقة. ميكانيكياً، يملك المنشأ الحجري خصائص غير متساوية في كل الاتجاهات وتعتبر العناصر الإنشائية الحجرية ذات مقاومة على الضغط أما مقاومتها على الشد فهي مهملة. تعتبر المنشآت الحجرية من أقدم الجمل الإنشائية، في القلاع والقصور والمدارس، الكنائس، الجسور، الأسواق، وغيرها. ومع تطور العصور وتطور المعرفة الهندسية، تغير أسلوب البناء وتم الاعتماد على عناصر هندسية جديدة لم تكن تستخدم من قبل لتأمين النقل الآمن للأحمال والحفاظ على استقرار المنشآت. وهذا ما نجده على سبيل المثال بتتبع تطور العمارة الأوروبية من الرومانية الى القوطية ثم عمارة عصر النهضة .

ولكن يقابل تلك التغيرات في الطبيعة المعمارية، كازدياد ارتفاع المباني ووجود نوافذ كبيرة ومتعددة الحاجة الى استخدام القباب المستندة على جملة من الأقواس الطرفية و القطرية والمحمولة على أعمدة حجرية أو جدران، ونظراً لنحافة هذه العناصر وتعرضها لأحمال كبيرة مائلة كان لابد من وجود عناصر سند جانبي كالأكتاف من الجدران أو الأقواس كما موضح في الشكل (1).



(b)



(a)

الشكل (1): العناصر المؤلفة للعقود الحجرية الرومانية [7] و القوطية [4]

2- المشكلة العلمية ومبررات البحث:

إن أهمية المنشآت الحجرية الثقافية والتاريخية والمعمارية وضرورة استمرارية أدائها حتى يومنا هذا يثبت أهمية الحفاظ عليها نتيجة الأحمال المختلفة التي تتعرض لها. منذ القديم استعمل البنائون القواعد الهندسية لتصميم الأقواس. ومن أجل شكل محدد للقوس تكون السماكة متعلقة بالمجاز. هذا التصميم نسبي غير معتمد على مقياس البناء أي أن النسبة الواحدة للسماكة /المجاز تطبق للمجازات من 10 إلى 100 متراً. كما تم استخدام قواعد نسبية من النوع ذاته للمشكلات الأكثر تعقيداً مثل استخدام عناصر السند الخارجي للعقود المتقاطعة. يتولد في القوس خط ضغط (عبارة عن الخط الواصل بين مراكز قوى الضغط التي تؤثر بها كل قطعة حجرية على التي تليها) بسبب الوزن الذاتي للأحجار مسببة قوى مائلة والتي يتم نقلها عبر القطع الحجرية أسفل نقاط استناد القوس في نقطة (Springer). تملك هذه القوى المائلة مركبة شاقولية ومركبة أفقية. تزداد المركبة الشاقولية ابتداءً من حجر المفتاح (Key stone) في الأعلى إلى نقاط استناد القوس (Springer). ولكن المركبة الأفقية تبقى ثابتة عبر القوس محققة التوازن للقوى الأفقية. إذاً يتولد في نقطة استناد القوس قوة مائلة يجب أن يتحملها الجدار الساند. إن التصميم الانشائي للعمارة الحجرية يتعامل مع مسألتين أساسيتين : تصميم الأقواس وتصميم العناصر الساندة التي ستتحمل القوى المنقولة إليها من الأقواس.

إن محور هذا البحث هو دراسة في استقرار الأقواس الحجرية وميكانيزمات انهيارها واستعراض طرق تحليلية وتخطيطية لتصميم الأقواس الحجرية وركائزها وذلك بتغير الارتفاع وقطر الأقواس.

3- هدف البحث:

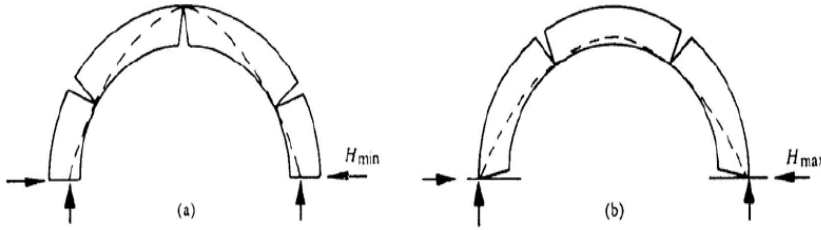
دراسة إنشاء الأقواس والعقود الحجرية وطرق انهيارها والطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية.

4- الدراسة المرجعية:

سوف نستعرض بعض الأبحاث التي اهتمت بدراسة تصميم واستقرار المنشآت الحجرية:
1- كان أول من تطرق للمسائل الانشائية بطريقة علمية Galileo عام 1638 ووجد أن الاجهادات الداخلية تزداد بشكل خطي مع المقياس ولذلك يجب أن تصبح العناصر الانشائية

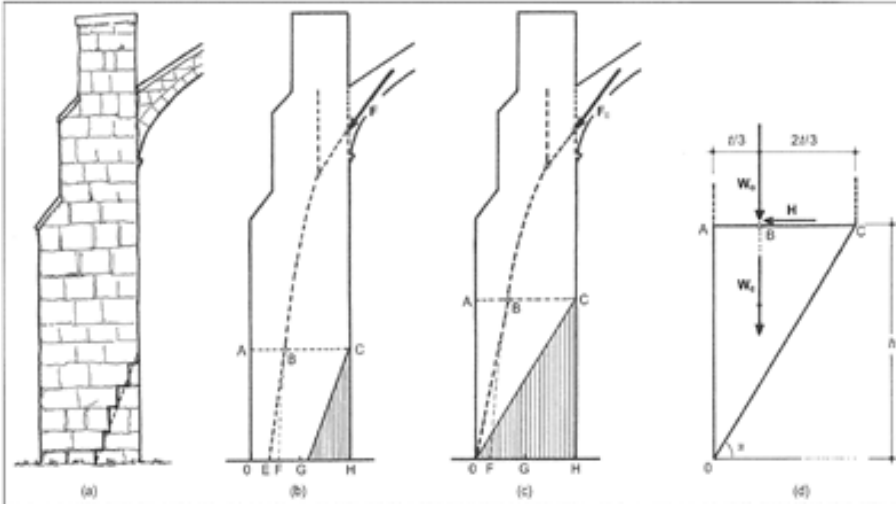
- أكثر سماكة بشكل متناسب مع ازدياد المقياس. ولكنه تطرق لموضوع المقاومة فقط في حين أن مسألة الاستقرار للأقواس الحجرية يتحكم بها الشكل الهندسي بشكل أساسي. [3]
- 2- اقترح هوك عام 1678 قوس السلسلة catenary arch وذلك بهدف الحصول على قوس يطبق دفعاً أصغرياً على الركائز. وسمي هذا القوس أيضاً بمنحني الوتر المعلق (funiculaire) وهو ذو شكل مأخوذ من سلسلة حلقات أو خيط مرن نحيف جداً متجانس وغير قابل للشد معلق بين نقطتين. يمتاز هذا القوس بأن خط الضغط يكون مركزياً تماماً فيه وهو ما لا يمكن أن يتحقق في بقية الأنواع من الأقواس.
- 3- يعتبر التحليل المرن للأقواس منطقياً حيث يتم كتابة معادلات التوازن ومعادلات التشوه المرن التي تربط بين التشوهات والقوى الداخلية، ويتم تعريف الشروط الطرفية. [1]
- 4- وفي القرن التاسع عشر بدأ البحث عن فرضيات أكثر أماناً في تصميم الأقواس، لايؤمنها التحليل المرن. [1]. وتم اعتماد الفرضيات التالية للقيام بتحليل حدي للمنشآت الحجرية. فللعنصر الحجري مقاومة ضغط لانتهائية وهو لا يملك أي مقاومة للشد كما تفترض أن الانهيار لا يحصل بسبب الانزلاق بين الحجر والملاط. تعتمد نظرية التحليل الحدي بشكل أساسي على توازن وحدة البناء ضمن المنشأ الحجري عن طريق خط الضغط (Thrust line). حيث يعرف خط الضغط بأنه خط منحنى يصل بين النقاط التي تكون على سطوح الارتباط بين الحجر والملاط بموقع تتحصل عنده القوى الضاغطة الداخلية الناقلة للأحمال الخارجية بحيث يتم التوازن. فقد اعتبر رانكين 1858 أنه يجب أن يمر خط الضغط في الثلث الوسطي للمقطع ليكون القوس آمناً [1].
- ووفق التحليل الحدي يصل المنشأ للانهيار عندما يوجد خط ضغط واحد على الأقل يقع كلياً ضمن الحجر لكنه يسمح بتشكيل عدد كافي من المفاصل تؤدي لتشكيل ميكانيزم انهيار. كما في الشكل (2).
- 5- تم تطوير نظرية التحليل الحدي وإيجاد نظرية حالة الأمان. تأخذ نظرية حالة الأمان بعين الاعتبار أن القوى الداخلية المتوازنة للقطع الحجرية والموجودة داخل القوس يجب ألا تسبب أي ضرر بمادة البناء. فلقد طور دوراند كلاي 1867 Durand-Claye طريقة لتحليل الأقواس الحجرية تسمى طريقة مناطق الاستقرار [13]. وبحسب Durand-Claye يتم

البحث عن منطقة مرور خط الضغط في المقطع والتي تتحدد بشروط التوازن والاحتكاك والممانعة للقطع الحجرية . تعتبر هذه الطريقة وسطاً بين الطريقة الحديدية و المرنة وهي تتضمن بداخلها شروط الاستقرار لكل من Persy, Navier and Michon . ووفق طريقة -Durand Claye إذا لم يكن هناك منطقة مشتركة محققة لهذه الشروط فإن القوس لا يقبل بأي حل التوازن. وإذا تم اختصار هذه المنطقة إلى نقطة واحدة فهناك حل توازن وحيد أما إذا كانت المساحة المشتركة كبيرة جداً فهذا يدل على أن أبعاد القوس أكبر من اللازم.



الشكل (2): التوضع الحدي لخط الضغط في قوس نصف دائري يخضع لوزنه الذاتي
 1995Heyman (minimum Thrustline) : a أو (Maximum thrust) : b
 (line) . [1]

6- تجدر الإشارة إلى أنه يجب الاهتمام بانتقالات ركائز الأقواس والعقود الحجرية بشكل كبير أيضاً لأنها قد تكون سبباً آخر لانتهيار الأقواس عبر تغيير موقع خط الضغط . بينت الدراسة [2] أن الدور الأساسي للركائز هو تحمل خط الضغط في الأقواس والعقود وتحمل أحمال الرياح. وبسبب الارتفاع الكبير لركائز المنشآت الحجرية فإن قيوداً أكبر توضع على مكان مرور خط الضغط من القيود المعتمدة في تصميم الأقواس. إن اعتماد عامل الأمان الهندسي الذي يسمح لخط الضغط بالبقاء ضمن منتصف الثلث الوسطي من العنصر الحجري وذلك لتجنب الاجهادات الشادة في قواعد الركائز لا يعتبر كافياً لتحقيق الاستقرار. يبين الشكل (3) تحطم ركيزة والذي يمكن أن يحصل بشكل جزئي أو بشكل تام.



الشكل (3): صورة تحطم ركيزة بشكل جزئي أو بشكل تام. [2]

وبشكل عام تنهار الأقواس الحجرية بدوران جزء من القوس حول حافة المفصل أو انزلاق قسم من القوس على الآخر أو على المساند أو بالتحطم. ويوجد عاملين رئيسيين يؤثران على نمط انهيار الأقواس الأول يتعلق بصلابة الركائز والآخر يتعلق بتناظر الأحمال الخارجية المطبقة [8]. فعندما تكون الركائز قليلة الارتفاع وذات صلابة عالية (أي نسبة ارتفاعها إلى عرضها أصغر من الواحد) يكون نمط الانهيار محلياً (Local Mechanism) حيث يحصل انهيار محلي للقوس فقط بتشكيل المفاصل الأربعة ضمن جسم القوس، دون ظهور أي مفصل في الركائز. أما عندما تكون الركائز نحيفة وقليلة الصلابة يكون نمط الانهيار عاماً (Global Mechanism) [9].

7- تختلف قواعد البناء بحسب تطور عصر العمارة فنجد ركائز من جدران ذات سماكة ثابتة أو متغيرة بدون عناصر سند. ففي العمارة الرومانية نجد ركائز من جدران (قد تحوي فتحات صغيرة) مع عناصر سند، ثم ظهرت ركائز تحوي فتحات كبيرة و مزودة بعناصر سند جانبي في العمارة القوطية. ففي العمارة القوطية يؤخذ عمق الجدار الساند مساوياً لربع المجاز. في حين تم اعتماد عمق الجدار في عصر النهضة يتراوح من ثلث إلى نصف المجاز. وكانت العقود في عصر العمارة القوطية أقل وزناً من العقود الحجرية في عصر النهضة.

5-العناصر الحجرية Masonry:

تتصف المنشآت الحجرية باستخدام مواد طبيعية في الإنشاء فتكون كلفة المواد قليلة وذات ديمومة ومقاومة للحرارة وعازلة للصوت. إلا أن من أهم سلبياتها الوزن الذاتي المرتفع ومقاومتها الضعيفة على الشد.

الوحدة الحجرية : تختلف المواد المكونة للوحدات الحجرية فيمكن أن تكون من مواد مختلفة صخرية أو من القرميد المصنع بالشوي أو وحدات بيتونية . ويؤدي هذا الاختلاف الى اختلاف في خصائصها الفيزيائية و الميكانيكية. كما يمكن أن تكون بسطوح مسواة أو غير مسواة. كما أن الأحجار الكبيرة و ذات المقاومة العالية تستخدم لأساسات المنشأ الحجري و للزوايا في المنشآت لأنها تكون عرضة للصدم. ويمكن لتجمع القطع الحجرية أن يكون منتظماً أو غير منتظم [10].

الملاط : يعتبر الكلس والجبس من المواد الرابطة التي تتصلب في الهواء والتي استعملت منذ القدم . فقد استخدم المصريون القدماء الكلس وكذلك وجد في آثار الرومان واليونان. يمتاز الكلس المائي عن الكلس الهوائي بوجود شوائب من الغضار بنسبة أعلى تتراوح بين 6_20 % . يتصلب الكلس في درجات الحرارة العادية من خلال تفاعل الكلس المطفاً $Ca(OH)_2$ مع غاز ثنائي أكسيد الكربون CO_2 ويساعد مزجه مع الرمل في الحصول على بنية أكثر مسامية وعلى سهولة وصول غاز CO_2 الى المزيج وبالتالي تزداد سرعة التصلب.

يستخدم الملاط الكلسي المكون من جزء كلس و 3-4 أجزاء رمل مع كمية كافية من الماء. أما الملاط الاسمنتي الكلسي فيمكن تشكيله بخلط جزء من الاسمنت مع جزء من الكلس و 6-8 أجزاء من الرمل مع كمية كافية من الماء. وبالرغم أن الملاط الكلسي الاسمنتي لا يبلغ من القوة سوى ثلثي قوة الملاط الاسمنتي الا انه أكثر لدونة والعمل به أسهل. يمكن لسطوح الانهيار أن تتشكل في الملاط الرابط كما يمكن أن يحصل الانهيار بانفصال جزئي أو كلي للملاط عن الحجر أو بتحطم الحجر [10]. يسعى البناؤون لجعل أحجار البناء متلاصقة بحيث تترك بينها أقل فراغ ممكن و يتم ملؤه بالملاط وذلك لضمان أن يتشكل الانهيار في الملاط الرابط. وفي حال غياب المادة الرابطة يوصف سطح ارتباط بين الأحجار بالجاف.

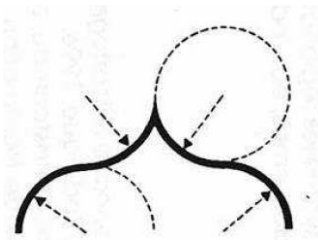
6- الأقواس في العمارة :

مهما اختلف شكل القوس معماريا فإنه يتألف من شكل منحنى بسيط أو أجزاء من منحنيات أو دوائر متقاطعة. فالأقواس ثلاثية الأوراق arcs trilobés المتواجدة في الواجهة الشرقية لكنيسة

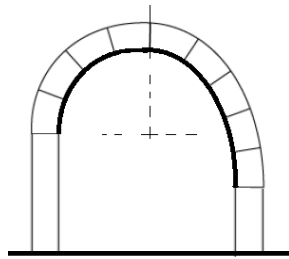
كوردو مكونة من هذا النوع من الأقواس. تتصف شكلها الهندسي بأنها مكونة من ثلاثة أقواس دائرية مراكزها هي رؤوس لمثلث متساوي الأضلاع، ونقاط تلاقي الأقواس العليا تنتمي لخطوط المتوسطات لذلك المثلث.

أما الأقواس الصاعدة arc rampant فتتولد بارتفاعين غير متساويين وتستخدم عند الربط بين عمودين غير متساويي الارتفاع بواسطة قوسين دائريين. وتتشكل هذه الأقواس بأساليب مختلفة كأن يحقق القوسان الشرط بأن يكون المماس المشترك لهما في نقطة الالتقاء أفقياً الشكل أو أن تقع نقطة الالتقاء للقوسين الدائريين على مسافة أفقية متساوية من كل عمود أو أن تتوضع مراكز كل من الدائرتين في مستوي محدد لكل منهما. كما أن بعض الأقواس المنحنية تتشكل من منحنيين لهما تقعرين متعاكسين arc en accolade. يمكن للقوس السفلي أن يكون دائرياً أما العلوي فهو قوس دائري أو منحنى من الدرجة الثالثة كما في الشكل (4).

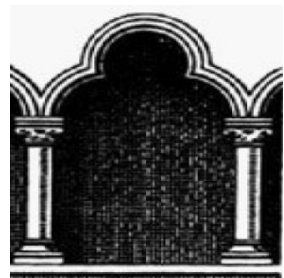
كما نذكر أيضاً القوس نصف الدائري (Plein-cintre) والأقواس المدببة (Ogive) (بثلاث نقط أو أكثر ضيقاً أو أوسع) والقوس السلسلة (Catenry) والذي يشكل منحنى سلسلة معلقة بين مسندين. القوس مقبض (Anse de panier) السلسلة يتشكل من نصف قطع ناقص وله ثلاثة مراكز. القوس المسدود يتكون من جزء مسطح يصل ربعي دائرة نصف قطر كل منها أكبر من خمس مجاز القوس. وبشكل عام نعرف القوس أو العقد الذي ارتفاعه أصغر من نصف مجازه L على أنه قوس منخفض (surbaissé) أما عندما يزيد ارتفاع القوس عن نصف مجازه يعتبر بأنه قوس مرتفع (oultrepassé). علماً أن تناقص ارتفاع القوس نسبة إلى مجازه يزيد من الدفع الأفقي للقوس على الركائز. [5]



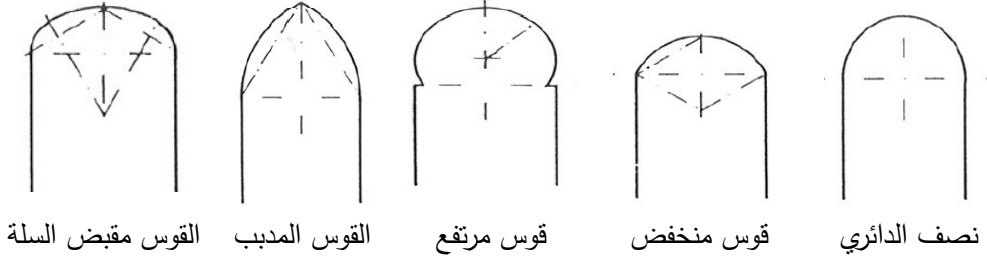
الأقواس المنحنية



الأقواس الصاعدة



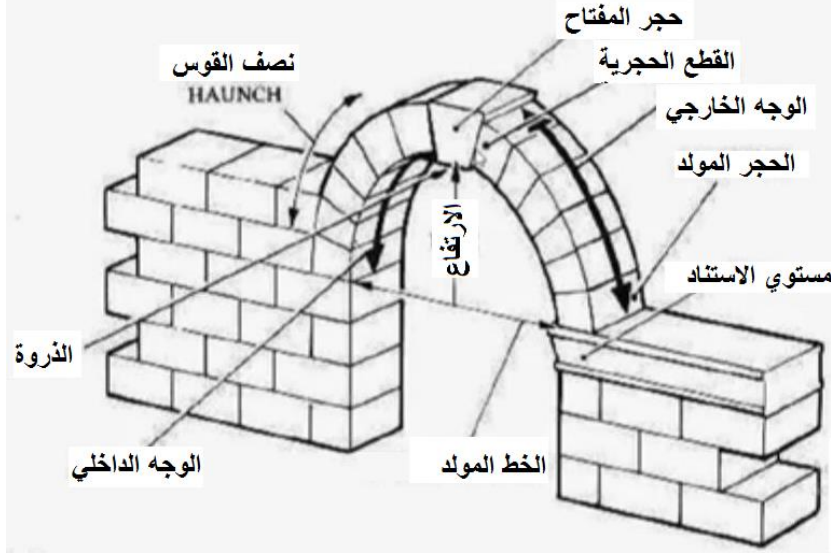
الأقواس ثلاثية الأوراق



الشكل (4): أشكال الأقواس الحجرية [5]

يسمى الحجر الموجود في قمة القوس بحجر المفتاح (Keystone) أما باقي الأحجار المقصوفة الحواف المكونة المشكلة لمنحني القوس (Voussoir). يكون الحجر الأول في مستوى الاستناد للقوس (Springer) ذو سطح مائل يسمى Skewback ، أما مسقطه الأفقي عند الجزء العلوي لركيزة الاستناد فيسمى Inpost.

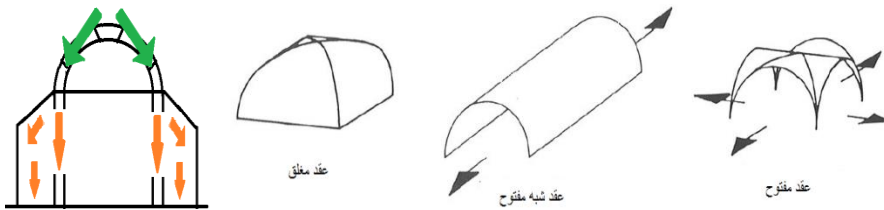
يسمى الوجه الداخلي للقوس (Intrados) أما الوجه الخارجي للقوس (Extrados) و تسمى أعلى نقطة على هذا الوجه (Crown). يعرف ارتفاع القوس (Rise) بأنه المسافة العمودية بين أعلى نقطة على الوجه الداخلي (Intrados) والخط الأفقي الواصل بين نقطتي بداية القوس المنحني المسمى خط مجاز القوس (Springing line). أما المجاز (Span): هو المسافة في الضوء بين الدعامتين. الشكل (5)



الشكل (5): عناصر الأقواس الحجرية

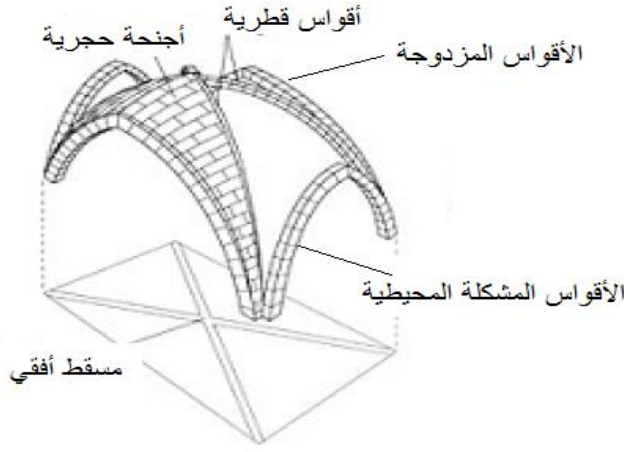
8- العقود الحجرية:

تتألف العقود الحجرية في العمارة الرومانية من الأقواس المتتالية التي تعطي الامتداد الأفقي للعقد فتسمى الأقواس المزدوجة doubleau . وتستند هذه العقود بشكل أساسي على الجدران الجانبية مسببة دفعا كبيرا في حين أن الأقواس المزدوجة تتحمل جزءا قليلا من الأحمال. وتمتاز هذه العقود بمحدودية فتحات النوافذ أسفل منها بسبب استنادها على الجدران ذات الوزن الكبير [7] كما موضح في الشكل (6).



الشكل (6): العقود الحجرية في العمارة الرومانية

أما العقود الحجرية في العمارة القوطية [6] فتتألف من أقواس حجرية يختلف دور كل منها عن غيره. فالأقواس المزدوجة المحيطة (الموجودة في أسفل الوجه الداخلي للعقد الحجري) تعطي الامتداد الأفقي للعقد ولذلك تسمى المزدوجة doubleau. والأقواس المشكلة المحيطة (الموجودة على امتداد الجدران) تحدد الشكل الهندسي للعقد الحجري ولذلك تسمى المشكلة formeret. والأقواس القطرية (عبارة عن قوس أو جزء من قوس) تشكل أعصاباً تمر من مفترق العقد وتستند على نفس المستوي الذي تتولد منه الأقواس المذكورة سابقاً كما في الشكل (7). وتمتاز هذه العقود بإمكانية وجود فتحات (نوافذ أو أبواب قوسية) أسفل الأقواس المشكلة المحيطة الموجودة على امتداد الجدران.



الشكل (7): عناصر العقود الحجرية القوطية [6]

9- مبدأ توازن الأحجار في العقود الحجرية :

يستند تصميم الأحجار voussoirs في العقود الحجرية إلى المبدأ الهندسي التالي : تكون ثلاث قوى متلاقية في نقطة في حالة توازن إذا كانت ذات نسبة متساوية مع أطوال أضلاع المثلث المتعامدة مع اتجاه تلك القوى الشكل (8). واستناداً إلى هذا المبدأ يتم تصميم سطوح الروابط بحيث تكون معامدة لخط الضغط. ويتم اعطاء الدعامات العرض اللازم بحيث يكون العقد في التوازن. تعتمد القوى في العقد على ميل سطوح الروابط وعلى كتلة الاحجار voussoirs. وبالتالي

دراسة في الطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية

أقواس قرميدية عميقة	Gauthier (1765)	$e = 0.32 + s/15$
	Dupuit (1870)	$e = (0.20s)^{1/2}$
أقواس قرميدية رقيقة	Dupuit (1870)	$e = (0.15s)^{1/2}$
أقواس قرميدية رقيقة و عميقة	Gauthey (1809)	$e = 0.33 + 0.021s$ $s \in (2 - 16)m$
		$e = 0.042s$ $s \in (16 - 32)m$
		$e = 0.67 + 0.021s$ $s > (32)m$

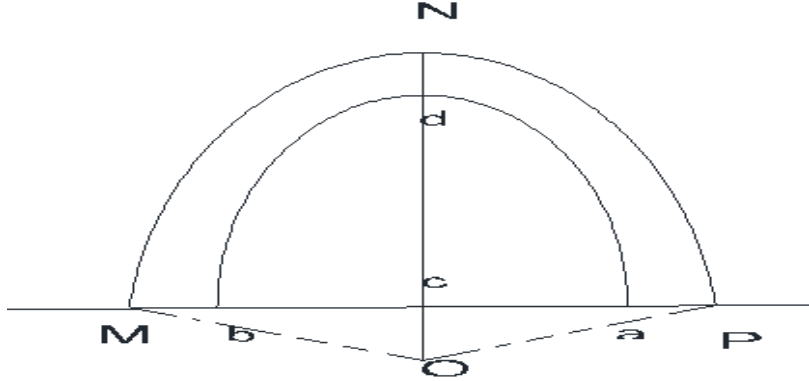
الجدول (1): علاقات حساب سماكة e الأقواس القرميدية نسبة للمجاز s [12]

11 - الأقواس في العقود:

يتم اللجوء إلى زيادة سماكة الأقواس نصف الدائرية عند نقاط الارتكاز بهدف التقليل من الأحمال على المفتاح وتحميل الجوانب من أجل حصر القطع الحجرية المتتالية. ويتم هذا الاجراء بطريقتين سيتم التطرق اليهما.

• زيادة سماكة القوس في العقود بطريقة A :

1. يتم رسم الوجه الداخلي للقوس intradose ونسميه adb
2. نحدد سماكة القوس t على المفتاح بحيث $dN = t$
3. ابتداء من النقطة C نحدد النقطة O ممدد نصف القطر الشاقولي بحيث $CO = \frac{r}{4}$
4. نرسم القوس MNP الذي مركزه النقطة O و نصف قطره ON.

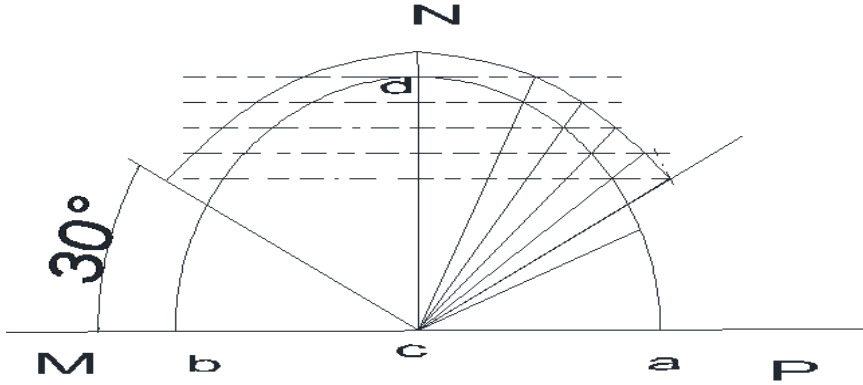


الشكل (10): الأقواس في العقود: بطريقة A

نلاحظ من الشكل (10) أنه وباتباع الطريقة A يمكن زيادة سماكة القوس البرميلي عند نقاط الاستناد

• زيادة سماكة القوس في العقود بطريقة B :

5. يتم رسم الوجه الداخلي للقوس intradose ونسميه adb
6. نحدد سماكة القوس t على المفتاح بحيث $dN = t$
7. نقسم الشاقول cd الى أقسام تساوي السماكة $dN = t$.
8. نمدد خطوطاً أفقيةً عبر هذه التقسيمات، فتقطع الوجه الداخلي للقوس.
9. نمرر أنصاف اقطار عبر هذه النقاط تخرج من المركز c.
10. ان نقطة التقاطع بين ممدد نصف القطر والخط الافقي للتقسيمه الأعلى تشكل النقاط التي سيبر منها منحنى السطح الخارجي.
11. نحدد كافة نقاط التقاطع لرسم المنحنى الخارجي ونوقف هذا المنحنى على نصف القطر الذي يشكل زاوية 30 درجة مع الخط المولد ،
12. نصل نقطة التوقف بخط مائل أو بسلسلة من الاسقاطات على الدعامة والتي نحدد سماكتها تخطيطياً.



الشكل (11): الأقواس في العقود : بطريقة B

كما يعطي المرجع [12] طريقة Rondelet 1832 الذي أعطى علاقة تجريبية لتحديد سماكة القوس $x = EB$ عند مستوي الركيزة التي ارتفاعها a بفرض سماكة القوس في القمة e وفق العلاقة:

$$X = \sqrt{2p + \frac{2pd + ne - 2mc}{a} + \frac{b^2}{a^2}} - \frac{b}{a}$$

$$x = \sqrt{2p + \frac{2pd + ne - 2mc}{a} + \frac{bb}{aa} - \frac{b}{a}}, \quad (1)$$

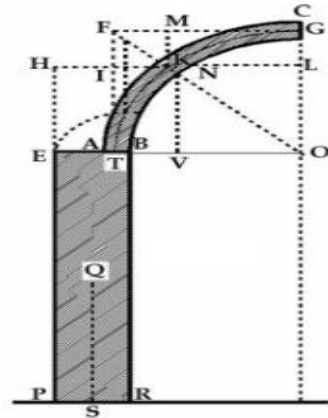
being $p = mL \times AB$, $a = PE$, $d = EH$,

$x = EB$, $m = MK \times AB$, $n = IT \times AB$

$c = iK$, $e = AB$, $b = m + n$.

The bridge is assumed safe if :

- rise/span $\geq 1/5$
- $e \geq s / 17$



الشكل (12): سماكة ركيزة القوس وفق المرجع [12]

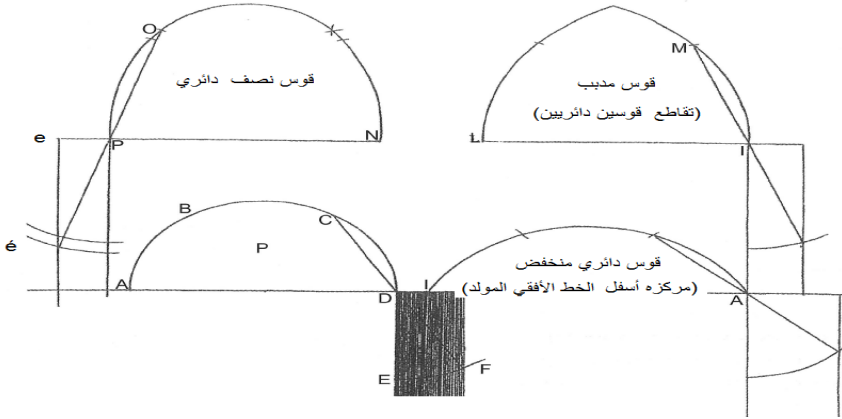
11- الطرق المعتمدة في تحديد سماكة الركائز:

تتنوع طرق تصميم الركائز فمنها طرق تخطيطية ثم تطورت إلى حسابية وهي تهدف لتحديد سماكة الركيزة كنسبة من المجاز. ويجب التأكيد أن هذه الطرق التخطيطية و العلاقات التقريبية تستخدم كدليل موجه للتصميم ويجب دوما التحقق من التصميم .

يتم تصميم الركائز لمقاومة الدفع الأفقي وتأمين الاستقرار ومقاومة الاجهاد الضاغط الناتج عن الأحمال. يمكن أن تسبب الاحمال الكبيرة انهيار جزئي أو كلي للدعامة التي تخضع لحالة اجهادية (ضغط-انعطاف) ويتشكل موشور كلي أو جزئي للانهياب[2]. فتظهر شقوق أفقية في حال كانت المقاومة على القص صغيرة و تظهر شقوق قطرية تعبر الروابط الافقية و الشاقولية[10]. إن القواعد المتبعة في تصميم الركائز للقواعد القوطية الخفيفة الوزن قد لايمكن تطبيقها للقواعد الحجرية البرميلية الثقيلة المستخدمة في العصور السابقة الرومانية و العصور اللاحقة كعصر النهضة.

1-11 تحديد عرض الركائز للأقواس القوطية:

يتم حساب عرض الركائز القوطية كنسبة من المجاز وتبلغ قيمتها في العمارة القوطية حوالي ربع المجاز[11]. مبدأ طريقة ديراند : يتم حساب سماكة الركائز بتقسيم القوس نصف الدائري PN إلى ثلاثة أقسام متساوية (في حالة القوس المدبب يقسم كل نصف قوس في نقطة الثلث). يمدد الوتر OP حتى مستوي الأرض فينقطع معها في e. نرسم قوس دائرة مركزه O ونصف قطره OP. ينقطع القوس مع ممدد الوتر OP فنحصل على النقطة é ، ننشئ شاقولا من é ينقطع مع ممدد NP في نقطة e تحدد سماكة الدعامة. من مساوي هذه الطريقة أنها لم تأخذ بعين الاعتبار ارتفاع الركيزة، كما أنه من الخطأ اعتماد هذه الطريقة للقواعد الثقيلة ذات الأقواس البرميلية (التي قوسها الداخلي نصف دائرة). يبين الشكل (13) أثر شكل القوس فالأقواس المدببة تتطلب ركائز أقل سماكة من الدائرية في حين تحتاج الأقواس الدائرية المنخفضة سماكة أكبر في الركائز بسبب زيادة الدفع الأفقي فيها.



الشكل (13): طريقة حساب السماكة لركائز الأقواس القوطية طريقة ديراند. [2]

11-2 تحديد عرض الركائز للأقواس في عصر النهضة:

استخدم في عصر النهضة الأقواس البرميلية التي احتوت نوافذ في بعض الأحيان. وأصبح تطبيق قواعد بناء الركائز المستخدمة في العمارة القوطية غير مفيدا و خاصة أن وزن هذه العقود يبلغ الضعف تقريبا من أجل المسقط الأفقي ذاته. وتراوحت السماكة للركائز بين $(\frac{المجاز}{2} - \frac{المجاز}{3})$. درس (Fray Lorenzo 1639) عرض الركائز في عمارة عصر النهضة وذلك لثلاثة أنواع من العقود الحجرية واقترح القيم المبينة في الجدول (2).

نوع الركيذة			
	جدران بمقطع ثابت	الجدران مع كتف ساند	
		سماكة الجدار	سماكة الجدار مع كتف السند
عقود من الحجر	$\frac{\text{المجاز}}{3}$	$\frac{\text{المجاز}}{6}$	$\frac{\text{المجاز}}{3} \geq$
عقود من القرميد (روابط قطرية)	$\frac{\text{المجاز}}{4}$	$\frac{\text{المجاز}}{7}$	$\frac{\text{المجاز}}{3}$
عقود قرميدية (صفيين من القرميد تقطع الروابط القطرية)	$\frac{\text{المجاز}}{5}$	$\frac{\text{المجاز}}{8}$	$\frac{\text{المجاز}}{4}$

الجدول (2): عرض الركائز في عمارة عصر النهضة لثلاثة أنواع من العقود الحجرية [2]

يبين الجدول (2) أنه في حال وجود أكتاف سائدة للعقود البرميلية فإنه يجب أن لاتقل السماكة للجدار مع الكتف عن ثلث المجاز (للتوعين الاول و الثاني من العقود) وهذا يتوافق مع قواعد التصميم في عصر النهضة في ايطاليا. في حين تعطي العمارة القوطية نسبة عرض الركيذة الى المجاز بقيمة $\frac{1}{4}$ أو أقل [2] .

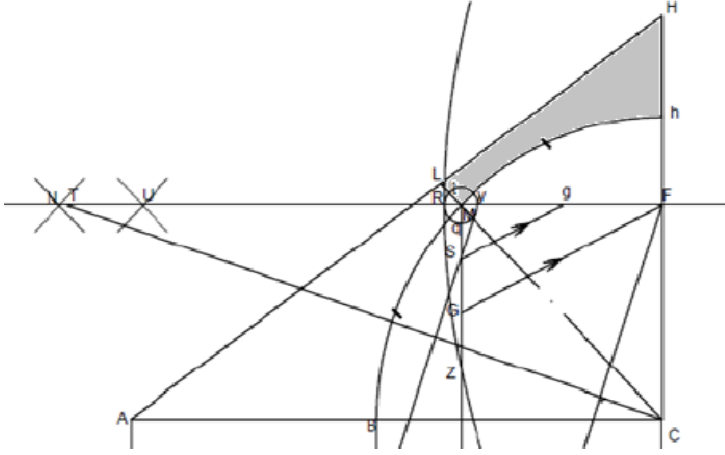
3-11 طريقة 3-11 La Hire 1640-1718: [3]

لم تأخذ هذه الطريقة التخطيطية أبعاد الركيذة بالحسبان ولذلك فإنها تستخدم كدليل موجه للتصميم مع ضرورة التحقق من التصميم . مبدأ الطريقة هو البحث عن مساحة تتوازن مع المساحة $MLHh$ أي تحقق العلاقة:

$$\sqrt{MLHh} = Mg = MG$$

التالية:

- 1) نحدد على الوجه الداخلي للقوس النقطة M بحيث: $BM = Mh$.
- 2) نصل CM ونصل $t = LM$.
- 3) نرسم مستقيماً شاقولياً MV . 4) نرسم مستقيماً أفقياً NMW يقطع CH في F .
- 5) تكون المساحة $MLHh$ مساوية إلى: مساحة المثلث (LCH) - مساحة ربع الدائرة (MCh) .



الشكل (14): طريقة **La Hire** : المساحة $MLHh$

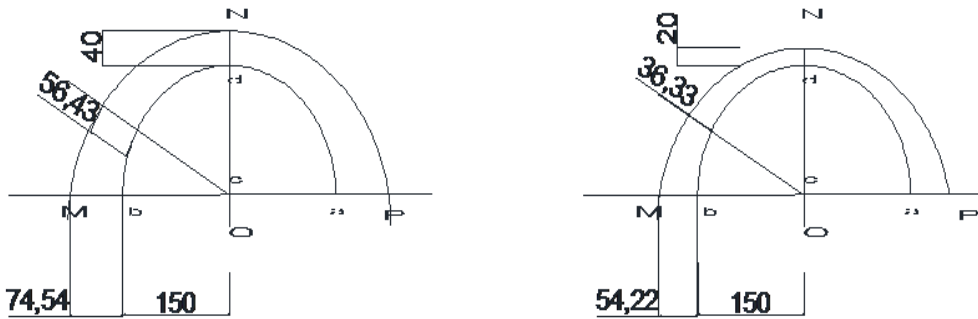
- 6) بعد حساب المساحة $MLHh$ ، نحسب الجذر التربيعي لها.
- 7) نحدد على الأفق MF طولاً Mg يساوي الجذر التربيعي للمساحة السابقة، وعلى الشاقول MV طولاً MG أيضاً يساوي الجذر التربيعي للمساحة $MLHh$.
- 8) نصل النقطتين GF .
- 9) نرسم مستقيماً موازياً لـ GF ماراً من g ، فيقطع المستقيم الشاقولي MV في النقطة S .
- 10) نرسم المستقيم VF .
- 11) نرسم مستقيماً موازياً لـ VF يمر من S ويقطع المستقيم الأفقي MF في النقطة Y .
- 12) من C ننشئ مستقيماً معامداً لـ VF ، يقطع المستقيم الأفقي FMN في النقطة T .
- 13) ابتداءً من النقطة T نحدد النقطة N بحيث يكون TN يساوي نصف طول MY .
- 14) ابتداءً من النقطة N نحدد النقطة U بحيث $NU = PV$.
- 15) نحمل على الأفقي مستقيماً FW طوله يساوي طول المستقيم FU .

- 16) نعتبر M مركز لدائرة نصف قطرها MY ، نرسم هذه الدائرة حيث نقطة تقاطعها مع المستقيم الأفقي MN هي R ، ونقطة تقاطعها مع المستقيم الشاقولي MV في q .
- 17) نرسم دائرة مركزها W نصف قطرها RW ، تقطع الشاقول MV في النقطة Z .
- 18) يكون طول المستقيم Zq هو الطول الذي نبحث عنه لتحديد سماكة الدعامة BX اللازمة لاستقرار السقف.

12- حساب سماكة القوس في العقود الدافعة:

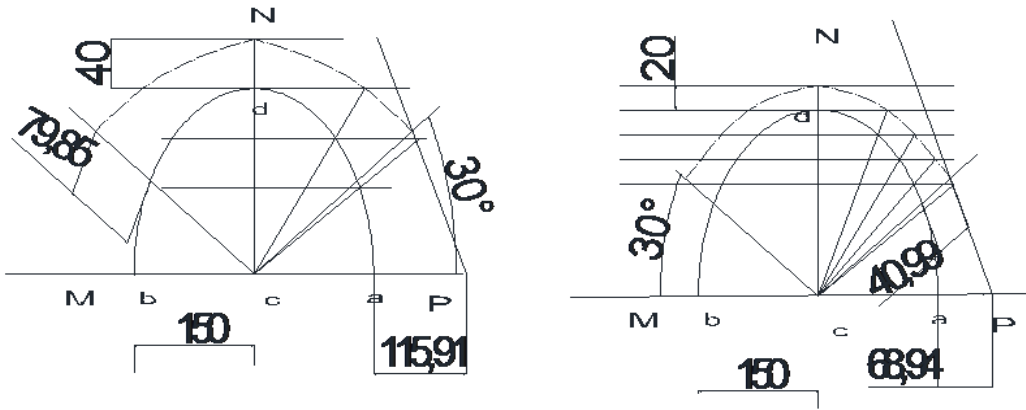
12-1 زيادة سماكة القوس في العقود الدافعة :

تم اتباع الطريقة A لزيادة سماكة القوس البرميلي من 20 cm سم عند المفتاح الى 54.22 cm عند نقاط الاستناد و من 40 cm عند المفتاح الى 74.54 cm عند نقاط الاستناد كما في الشكل (15).



الشكل (15) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة A

أما باتباع الطريقة B يمكن زيادة سماكة القوس البرميلي من $(20 - 40\text{ cm})$ عند المفتاح الى $(40.99 - 79.85)\text{ cm}$ على التوالي عند مستوي يصنع زاوية 30 درجة مع الأفق ويتمديد السماكة بشكل خطي يمس المنحني في هذه النقطة نصل إلى سماكة $(68.94 - 115.91)\text{ cm}$ عند نقاط الاستناد.



الشكل (16) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة B

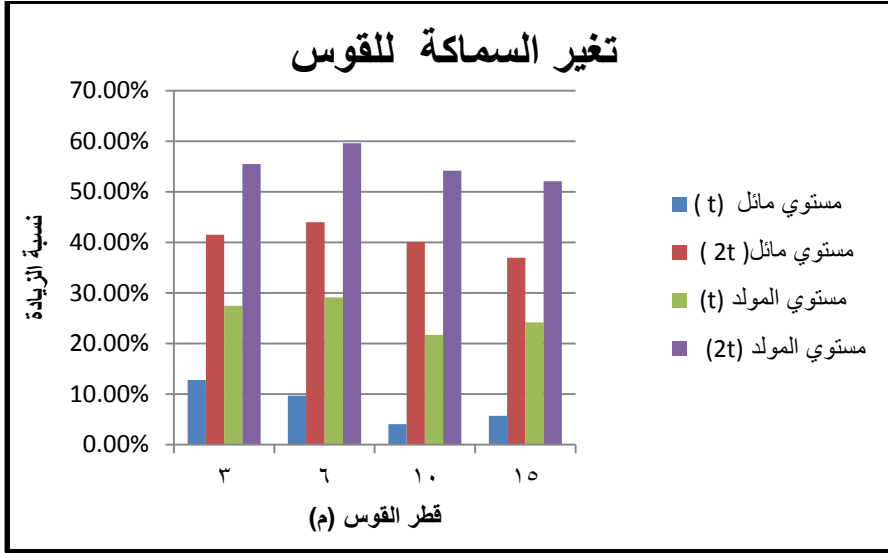
ويبين الجدول (3) تغير قيم سماكات الأقواس ضمن العقد البرميلي المحسوبة وفق الطريقتين عند مستوي الخط المولد ومستوي الزاوية 30 وذلك بتغير سماكة القوس في الذروة و نصف قطر القوس.

السماكة المسموحة للقوس (سم) [12]	سماكة القوس (سم) الطريقة B		سماكة القوس (سم) الطريقة A		المتغيرات		رمز النموذج
	مستوي		مستوي		السمكة عند القمة (سم)	قطر القوس (م)	
المجاز 17	الخط المولد	الزاوية 30	الخط المولد	الزاوية 30			
17.65	68.94	40.99	54.22	36.33	20	3	A-D3-t
	+27.5%	+12.8%					
17.65	115.91	79.85	74.54	56.43	40	3	A-D3-2t
	+55.5%	+41.5%					
35.29	139.95	80.04		72.99	40	6	A-D6-t

	+29.1%	+9.7%	108.3 9				
35.29	237.78	162.86	149	113.12	80	6	A-D6-2t
	+59.6%	+44%					
58.82	211.53	118.9	173.7 6	114.18	60	10	A-D10-t
	+21.7%	+4.1%					
58.82	361.82	243.9	234.6 9	174.08	120	10	A-D10- 2t
	+54.2%	+40.1%					
88.24	323.26	179.2	260.3 1	169.53	90	15	A-D15-t
	+24.18%	+5.7%					
88.24	535.05	356.98	351.7 1	260.57	180	15	A-D15- 2t
	+52.1%	+37%					

الجدول (3) تغير قيم سماكات الأقواس ضمن العقود الدافعة البرميلية

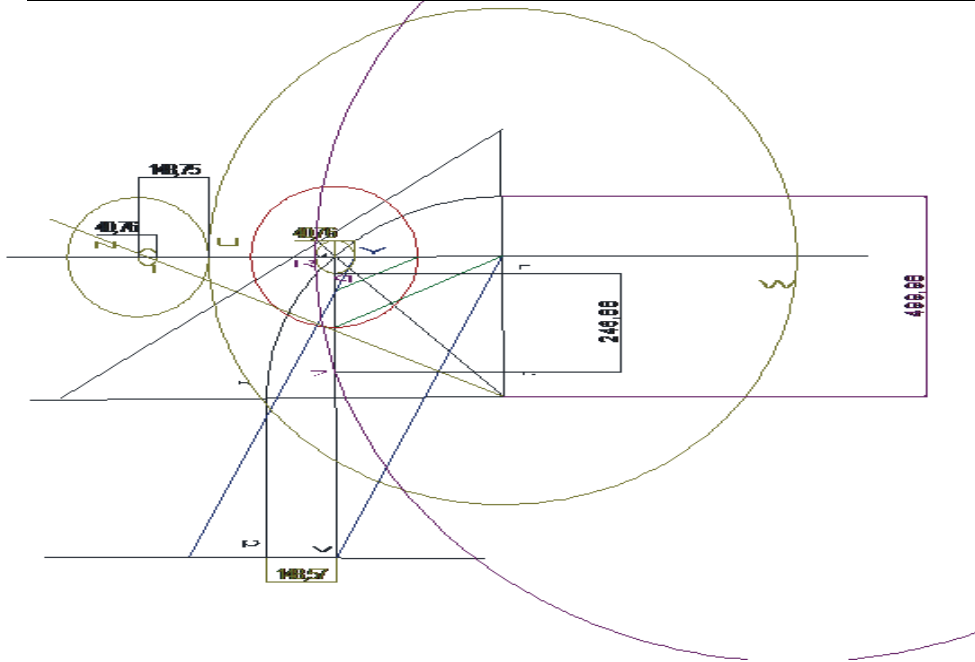
بالنسبة للأقواس ذات السماكة الدنيا ، تراوح الفرق بين طريقتي حساب السماكة بين (4.1 - 12.8%) بقيمة وسطية 8.1% عند حساب السماكة المائلة وبين (21.7 - 29.1%) بقيمة وسطية 25.62% عند حساب السماكة الأفقية عند الخط المولد. بالنسبة للأقواس بضعف السماكة، تراوح الفرق بين طريقتي حساب السماكة بين (37 - 44%) بقيمة وسطية 40.65% عند حساب السماكة المائلة وبين (52.1 - 59.6%) بقيمة وسطية 55.35% عند حساب السماكة الأفقية عند الخط المولد.



الشكل (17) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة B

2-12 حساب عرض الركائز:

تم تعيين سماكة الركيزة لعدة أقواس حجرية دائرية حاملة لجدار على امتداد المجاز والسماكة الدنيا تشكل $\frac{R}{10}$ أما السماكة عند القمة فتساوي $\frac{R}{3}$. تم تغيير ارتفاع الدعامة و مجاز القوس بهدف رصد تغير عرض الدعامة اللازمة بتغير أبعاد الجملة الانشائية والمقارنة بين قيم الطريقتين. يبين الشكل (18) طريقة حساب السماكة للنموذج A-D10-H4 وفق طريقة لاهير وهذا يتطلب عرضاً اصغرياً للدعامة يساوي 2.5 متراً وفق لاهير و 2.98 متراً وفق ديراند. حيث أعطت طريقة دولاهير قيمة أكبر لعرض الركائز في النماذج ذات المجازات الصغيرة (3-6 متراً) بفارق وصل إلى 59% بينما أعطت طريقة ديراند قيمة أكبر للسماكة في النماذج ذات المجازات الكبيرة (10-15 متراً) بفارق أعظمي وصل إلى 35.6%.



الشكل (18): طريقة حساب السماكة للنموذج A-D10-H4 وفق طريقة لاهير
والجدول (4) يبين تغير عرض الدعامه بتغير مجاز القوس الدائري ويتغير ارتفاع الركيزة. حيث
تم حساب قيمة عرض الركائز بالطريقتين المذكورتين سابقاً و هما طريقة لاهير و طريقة ديراند.

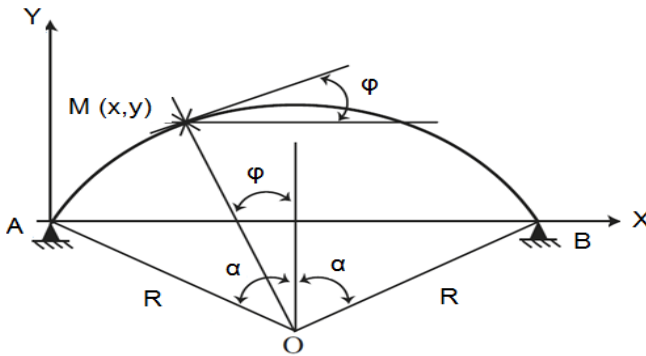
عرض الركيزة (م)		سماكة القوس			المتغيرات		رمز النموذج
الفارق %	ديراند	لاهير	السماكة عند القمة (م)	السماكة الاصغرية للقوس (م)	ارتفاع الركيزة (م)	قطر القوس (م)	
59.2	0.76	1.21	0.5	0.15	4	3	A-D3-H4
46.7	0.75	1.1	0.5	0.15	8	3	A-D3-H8
11.9	1.51	1.69	1	0.3	4	6	A-D6-H4
6	1.51	1.6	1	0.3	8	6	A-D6-H8
15.8	2.97	2.5	1.67	0.5	4	10	A-D10-H4

1.2	2.57	2.54	1.67	0.5	8	10	A-D10-H8
35.6	6.26	4.03	2.5	0.75	4	15	A-D15-H4
0.8	3.68	3.65	2.5	0.75	8	15	A-D15-H8

الجدول (4) تغير عرض الدعامة بتغير مجاز القوس الدائري وارتفاع الركيزة.

13- حساب القوى الداخلية في القوس نصف الدائري :

لدى دراسة قوس نصف دائري غير مقرر سكونيا ، يمكن حساب الاجهادات والقوى الداخلية فيه وفق ميكانيك الانشاءات والحصول على المعادلات التالية حيث تتغير قيمة الزاوية α من 90 من أجل القوس نصف الدائري إلى قيمة أكبر من الصفر من أجل قوس دائري منخفض.



الشكل (19): قوس نصف دائري بتغير الزاوية α

تم دراسة حالة تحميل بحمل شاقولي موزع بانتظام لقوس مساحة مقطعه A لثلاثة أقواس ، اثنان منها قوس دائري منخفض بزاوية α تساوي 75° أو 60° درجة. والثالث قوس نصف دائري (90°).

تم اعتبار المجاز ثابت و يساوي 10 م ونصف قطر الانحناء 5 م أما سماكة القوس فتساوي 0.6 م وعرض القوس 0.5 م والقوس يخضع لحمل شاقولي موزع بانتظام قيمته 2 t/m . تحسب القوى الداخلية لقوس دائري محمل بحمولة موزعة بانتظام على كامل المجاز بالعلاقات التالية:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{AR^2} \times \frac{4\alpha}{2\alpha - 3 \sin 2\alpha + 4\alpha \cos^2 \alpha}}$$

$$X_A = X_B = \frac{qR}{2} \times \frac{(9 - 4\alpha^2) \sin 2\alpha - 10\alpha \cos 2\alpha - 8\alpha}{2\alpha - 3 \sin 2\alpha + 4\alpha \cos^2 \alpha} \gamma$$

$$N(\varphi) = qR\varphi \sin \varphi + X_A \cos \varphi$$

$$M(\varphi) = qR^2(\alpha \sin \alpha - \varphi \sin \varphi + \cos \alpha - \cos \varphi) - X_A R(\cos \varphi - \cos \alpha)$$

$$Q(\varphi) = qR\varphi \cos \varphi + X_A \sin \varphi$$

كما يتم حساب الاجهادات النازمية الناتجة عن القوى المحورية و الانعطاف.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} y$$

أعطت النتائج مايلي :

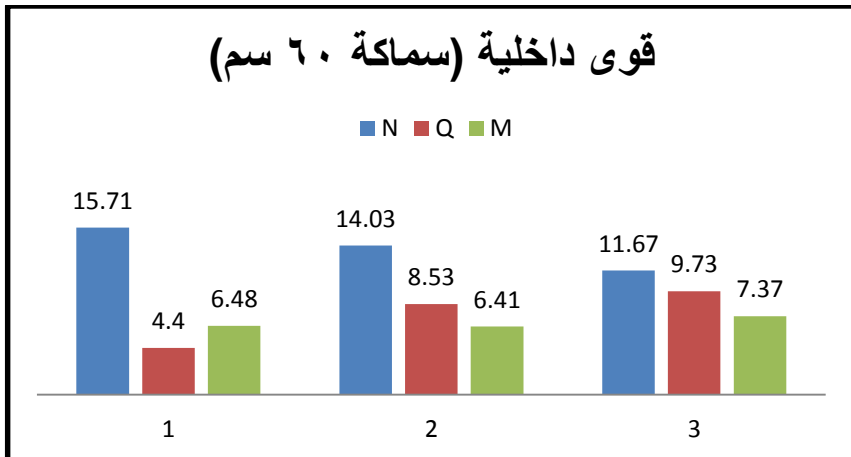
القوى الداخلية في القوس من أجل $\alpha=90$ (deg)					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	1
في القمة	0	8,8	3,94	0	t=0,6m
عند المساند	3,94	0	15,71	90	
		3,07 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	5,11	4,68	0	t=1,2m
عند المساند	4,67	0	15,71	90	
		0,46 MPa		الاجهاد الاعظمي	

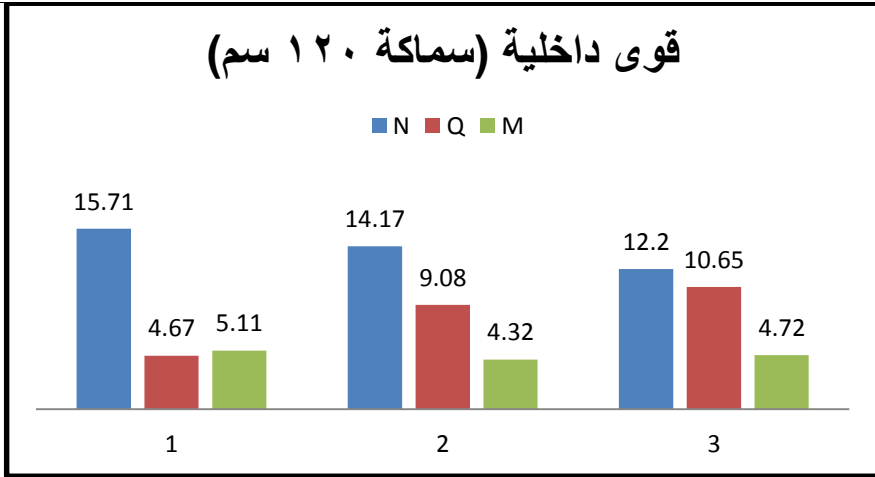
القوى الداخلية في القوس من أجل $\alpha=75$ (deg)					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	2
في القمة	0	9,59	4,47	0	t=0,6m

دراسة في الطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية

عند المساند	7,7	0	13,81	75	
		3,35 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	4,32	5,89	0	t=1,2m
عند المساند	9,08	0	14,17	75	
		0,41		الاجهاد الاعظمي	

القوى الداخلية في القوس من أجل $\alpha=60$ (deg)					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	3
في القمة	0	10,66	3,88	0	t=0,6m
عند المساند	8,59	0	11,01	60	
		3,68 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	4,72	6,25	0	t=1,2m
عند المساند	10,65	0	12,2	60	
		0,45 MPa		الاجهاد الاعظمي	





الخلاصة والنتائج:

- 1- إن طريقي حساب سماكة الأفراس في العقود تعطين قيم متقاربة من أجل الأفراس بالسماكات الدنيا عند المستوي 30 درجة. فبلغ الفارق قيمة وسطية تساوي 8.1% .
- 2- ازداد الفرق بين طريقي حساب سماكة الأفراس في العقود عند مضاعفة السماكة فبلغ الفارق قيمته العظمى عند مستوي المولد ووصل إلى 60% .
- 3- إن طريقي حساب عرض الركائز تعطين قيم متقاربة من أجل الأفراس ذات المجازات الكبيرة (10-150متراً) والدعامات المرتفعة (8 م). فبلغ الفارق قيمة عظمى تساوي 1.2%
- 4- أعطت طريقة لاهير قيمة متقاربة لعرض الركائز بتغير ارتفاع الركيزة من أجل المجاز نفسه.
- 5- أعطت طريقة ديراند قيمة متقاربة لعرض الركائز بتغير ارتفاع الركيزة من أجل المجاز نفسه باستثناء حالة النموذجين A-D15-H4 و A-D15-H8
- 6- ان هذه الطرق التخطيطية هي لتحديد الأبعاد الأولية للركائز والتي يجب التحقق من كفايتها في تحقيق الاستقرار ومقاومة عزوم الانقلاب وفي تحمل الاجهادات الحاصلة في الركيزة.
7. تتناقص القوى الناظمية عند نقاط الاستناد (بفارق أعظمي 26%) وتزداد قوة القص الدافعة عند نقاط الاستناد (بفارق أعظمي 56%) وذلك بتناقص الزاوية α (بانخفاض القوس).
8. أدت مضاعفة السماكة إلى تناقص في الاجهادات الناظمية بفارق وسطي 86.8%

التوصيات:

- 1- اعتمد هذا البحث على استخدام الطرق التخطيطية في حساب العناصر نوصي باستخدام طرق تحليلية عددية ودراسة توزع الاجهادات إضافة إلى الاستقرار.

2- نوصي بإجراء دراسة سلوك العقود الحجرية المسنودة بأكتاف جانبية والمعرضة للأحمال الأفقية.

□□□□□□□□

المراجع

- [1] Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. Santiago Huerta 2001
- [2] The safety of masonry buttresses Santiago Huerta University of Madrid, Spain. 2009
- [3] - Stabilité des constructions en Pierre : Le cas des voûtes. Barbotin Baptiste. 2007
- [4] Dessin d'observation –Cours sur Les voûtes. Yannick Brès . ENSAG 2012
- [5] –Element de Base sur la Construction en Arcs ; Voutes Coupoles une publication du SKAT Centre de Coopération Suisse pour la Technologie et le Management 1994
- [6] Histoire de l'architecture Occidentale. Jean-Yves Antoine <http://www.info.univ-tours.fr>
- [7] L'ART ROMAN . BT n°425 Mars 1959 sous la direction d'ELISE FREINET avec la collaboration des commissions pédagogiques de l'ICEM. Maquette : M.BILLEBAULT, Juillet 2011
- [8] Analytical approach to collapse mechanisms of circular masonry arch. Blasi, C., and Foraboschi, P. 1994 J. Struct. Eng., 120 8, 2288–2309.
- [9] Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips .Paolo Foraboschi .JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION ASCE / MAY/JUNE 2004 /
- [10] Turath GHARIB Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : Application aux murs en pierres calcaires L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON 1 2015
- [11] Galileo was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches . Santiago Huerta .NEXUS NETWORK JOURNAL – VOL. 8, NO. 2, 2006
- [12] Masonry Arches : Historical Rules And Modern Mechanics. Antonio Brencich and Renta Morbiducci Italy 2007
- [13] The masonry arch between «limit» and «elastic» /analysis.A critical re-examination of Durand-Claye's method. Federico Foce. Danila Aita

.Proceedings of the First International Congress on Construction History,
Madrid, 20th-24th January 2003,

□□□□□□□□