

مجلة العلوم وافاق المعارف

Journal of Science and Knowledge Perspectives An international scientific

Issn 2800-1273

التحليل الديناميكي للجدران الحجرية القديمة ذات المواد الرابطة المحسنة

Article title: Dynamic Analysis of Ancient Masonry Walls with Improved Bonding Materials

غادة العسراوي أستاذة باحثة في جامعة القلمون – كلية الهندسة المدنية و المعمارية ، سوريا

ghadaesrawi@gmail.com

تاريخ النشر: 2022/06 /01

تاريخ القبول: 2022/05/05

تاريخ ارسال المقال: 2022/04/30

*المؤلف المرسل : غادة العسراوي

الملخص:

.. إن الانتشار الواسع للأبنية الحجرية على مر العصور، وعدم ملاءمتها بشكل مناسب للأحمال الزلزالية، أدى إلى حدوث تشققات مختلفة تصل إلى حد الانهيار الجزئي أو الكامل، ولمعالجة هذه التشققات تم في المراحل السابقة استخدام المونة الاسمنتية في ترميم المنشآت الحجرية القديمة مما دفع لتحسين المونة الكلسية، وإعادة إحياء استعمالها بعد إدراك مساوئ المونة الاسمنتية على الحجر، إضافة إلى تأثيرها على المظهر التراثي لهذه الأوابد الأثرية. أجريت في البحث دراسة تجريبية لتحسين المونة الكلسية المحلية اعتماداً على المواد التقليدية، وإضافة الألياف الزجاجية بهدف تحسين خواصها، كما أجريت دراسة تحليلية باستخدام طريقة العناصر المحدودة للجدران الحجرية حيث اختبرت موثقيته النموذج التحليلي من خلال مقارنة نتائجه مع نتائج بحث [1]، وقد أجريت دراسة بارامترية بالإضافة الى دراسة لمنشأ تراثي وهو بوابة فروخشاهيه، بهدف دراسة فاعلية تقنيات تقوية المونة الكلسية في تحسين سلوك الجدران الحجرية تحت تأثير الأحمال الدورية، وقد أظهرت الدراسة تحسن واضح في المقاومة الزلزالية، وخاصة المطاوعة للمونة المحسنة.

الكلمات المفتاحية: مونة كلسية. ; الألياف الزجاجية ; الجدران الحجرية. ; الأحمال الدورية.....

Abstract :

The wide spread of masonry buildings throughout the ages, and their inappropriate suitability for seismic loads, led to the occurrence of different cracks to the extent of partial or complete collapse.

In order to deal with these cracks, the cement mortar was used in the restoration of old masonry structures. And the revival of its use after realizing the impact on the heritage of these archaeological sites, and the disadvantages of cement mortar on stone through the local damages between the stone interfaces , in addition to. An analytical study was carried out using finite elements methods of masonry walls where the author tested the analytical model by comparing its results with the results of research [1]. A parametric study was conducted, as well as a study of a heritage building, the Farokhshahi Gate, in order to study the effectiveness of techniques for strengthening lime mortar in improving the behavior of stone walls under the influence of cyclic loads. The study showed a clear improvement in seismic behavior and the ductility of the improved mortar.

Keywords: .; lime mortar...; . glass fiber; .. masonry. cyclic loads.... ;

مقدمة: Introduction

تشكل المنشآت الحجرية القديمة الجزء الأكبر من المنشآت الأثرية المتواجدة في سوريا، كالقلاع الشكل (1)، والجوامع الشكل (2)، حيث كان يتم البناء بدون مادة رابطة، كجامع ابن القيم الجوزية، وفي بعضها الآخر كان يتم ربط الحجارة ببعضها بواسطة مونة رابطة، ومنذ القدم استُخدمت العناصر الحجرية في البناء لتحمل القوى الشاقولية لقدرتها الكبيرة على تحمل الإجهادات الضاغطة مقارنة بالإجهادات الشد، لكن الواقع العملي يفرض بعض الأحيان تعرضها لعزوم انحناء بسبب تعرضها لقوى زلزالية مما سبب إجهادات كبيرة أدت إلى أضرار مختلفة لهذه الأوابد الأثرية.



الشكل (2) الجامع النوري في دمشق

الشكل (1) قلعة دمشق

تؤثر في مقاومة الجدران الحجرية عدد من العوامل، منها خصائص المواد المستخدمة كمقاومة كل من وحدات البناء، بالإضافة لتأثير سماكة المونة، وأسلوب البناء، ونتيجة لإدراك خواص مونة الاسمنت البورتلاندي غير المفضلة، والمتمثلة في الاساءة إلى الشكل التاريخي للجدار، إضافة إلى مساوئ أخرى كتخفيض النفوذية، وتخفيض كمية المسامات التي تعيق حركة الماء في الأبنية القديمة، وترسب الأملاح في الحجارة [2], [3]، كان لابد من العمل على إيجاد المواصفات الإنشائية المحسنة للمونة الكلسية التقليدية باستخدام المواد المحلية لاستخدامها في أعمال ترميم المنشآت الأثرية نظراً لكون هذه المواد مشابهة لما استخدم في بناء المنشآت في الأزمنة القديمة، ومتماشية في المظهر الخارجي الأثري للمبنى، ونظراً للسلوك الضعيف للمونة التقليدية تجاه الأحمال الأفقية فقد تمت إضافة المواد الحديثة للمونة كالألياف الزجاجية لتحسين سلوك الجدران الحجرية، وخاصة المقاومة الزلزالية لمثل هذه الأوابد الأثرية

1.1 مشكلة البحث:

يعتبر القرار بعد حدوث الهزات الأرضية، و الأضرار الأخرى، فيما اذا كانت المنشآت التراثية، والتاريخية قابلة للتدعيم أم لا من أعقد مسائل الهندسة الإنشائية، لان المنشآت التراثية الحجرية تتكون من عناصر غير متجانسة، لذلك لابد من عمل التحليل الإنشائي للعناصر الحاملة الرئيسية للأبنية التراثية لتحديد القوى، و الإجهادات المتولدة في هذه العناصر، و التأكد من قدرتها على مقاومة الاحمال المؤثرة على هذه الابنية، و تقييم المنشآت التراثية لمعرفة مدى مقاومتها لقوى الهزات الأرضية، ووضع برنامج لتدعيمها بغية الوصول الى السلامة الإنشائية، ولكون ضعف الروابط بين الحجارة في الأبنية التراثية سبب رئيسي في انهيار الجدران عند

تعرضها للأحمال الزلزالية، كان لابد من العمل على تقوية هذه الروابط (الملاط) بحيث تقاوم الأحمال الزلزالية باستخدام المواد الحديثة مع المحافظة على خصوصية طرازها الانشائي، و الفني معاً بحيث نحافظ على الأثر التاريخي لهذه الأبنية، وعدم تشويه منظرها .

2.1 الهدف ومجال البحث: Objective of this research

يهدف هذا البحث الى دراسة تجريبية للمونة الكلسية المحسنة مع إضافة الألياف الزجاجية، ودراسة تحليلية لجدار حجري اختبر تجريبياً تحت تأثير حمولات جانبية [1] ثم تطوير نموذج رقمي باستخدام برامج حاسوبية (Abaqus.6.14) بهدف اختبار دور المونة المحسنة في تحسين السلوك الميكانيكي للجدار، وزيادة المقاومة الزلزالية للمبنى.

يتضمن مجال البحث دراسة حقلية، ومخبرية، وتحليلية لإنجاز أهداف البحث المتمثلة في تحسين سلوك الجدران الحجرية الكلسية القديمة باستخدام المونة المحسنة .

المبحث الأول: الدراسة التجريبية: Experimental study:

حضّرت خلطات المونة باستخدام المواد المحلية، والألياف الزجاجية، واختبارها، وتحديد مواصفاتها الميكانيكية لاستخدامها في أعمال ترميم المنشآت الأثرية نظراً لكون هذه المواد مشابهة، ومتماشية في المظهر الخارجي الأثري للمبنى مما يلغي التأثيرات السلبية لاستخدام المونة الإسمنتية على المظهر الخارجي، وعلى الحجر [4]، وقد حُددت مواد الخلطة ونسبتها بالاعتماد على منهجية الأبحاث التي درست المونة الكلسية، وهي نسب وزنية، وبالاعتماد على نتائج التحاليل التي حُصل عليها من مركز الدراسات، والاستشارات الكيميائية في جامعة دمشق لعينات المونة، ومنها نتائج التحاليل التي حُصل عليها من الدراسة الحقلية لعينات من بيت القوتلي - دمشق القديمة، مع استخدام الإضافات الحديثة لتحسين المونة الكلسية وفق ما ورد في الدراسة المرجعية.

المطلب الأول:

تم في بداية بحثنا العمل على تحضير مونة كلسية تقليدية الشكل (3)، إذ حضّرت خمسون خلطة، خمس عينات لكل خلطة ذات أبعاد (7*7*7mm)، حيث كانت نسبة الخلط 1:3 وهي نسبة الكلس للرمل الموجود في الخلطة، وكانت نسبة المياه للمواد الداخلة في الخلطة 0.18 أما نسبة الألياف الزجاجية المضافة فهي 2% من نسبة الكلس، ونسبة اللاتكس المضاف 1.5%. حضّرت خلطات من الكلس، والرمل بدون أية إضافات، كما تم تحضير خلطات من الكلس مع إضافة مواد مختلفة كمطحون الحجر، ومطحون القرميد، والبوزولان، ولتحسين خواص المونة أضيفت الألياف الزجاجية، ودُرست تأثير هذه الإضافات على مقاومة المونة، وتحسين خواصها. الجدول (1) يبين أفضل الخلطات التي أعطت نتائج جيدة .

تم تحديد أبعاد، وعدد العينات، واختبارها وفقاً للكود الاوروبي [5]، وللكود العربي للسوري للجدران الحاملة غير المسلحة في المباني [6].

الجدول (1) الخلطات المحضرة في المخبر

رقم الخلطة	الخلطة	مكونات ونسب الخلطة	المقاومة على الضغط MPa
1		كلس- رمل مازار- مسحوق الحجر الكلسي 0.5:2.5:1	1.30
2		كلس- رمل صبة- مسحوق الحجر الكلسي 0.5:2.5:1	1.60
3		كلس - رمل صبة - آجر خشن 1:2:1	2.20
4		كلس - رمل مازار - آجر خشن 1:2:1	2.10
5		كلس- رمل - آجر - بوزولان 0.25:0.25:2.5:1	2.30
6		كلس - رمل - آجر - بوزولان - ألياف زجاجية - لاتكس 0.25:0.25:2.5:1 : 2% : 1.5%	3.60 mortar2
7		كلس - رمل - آجر - ألياف زجاجية - لاتكس 0.5:2.5:1	2.80
8		كلس - رمل 3:1	1.20 mortar1

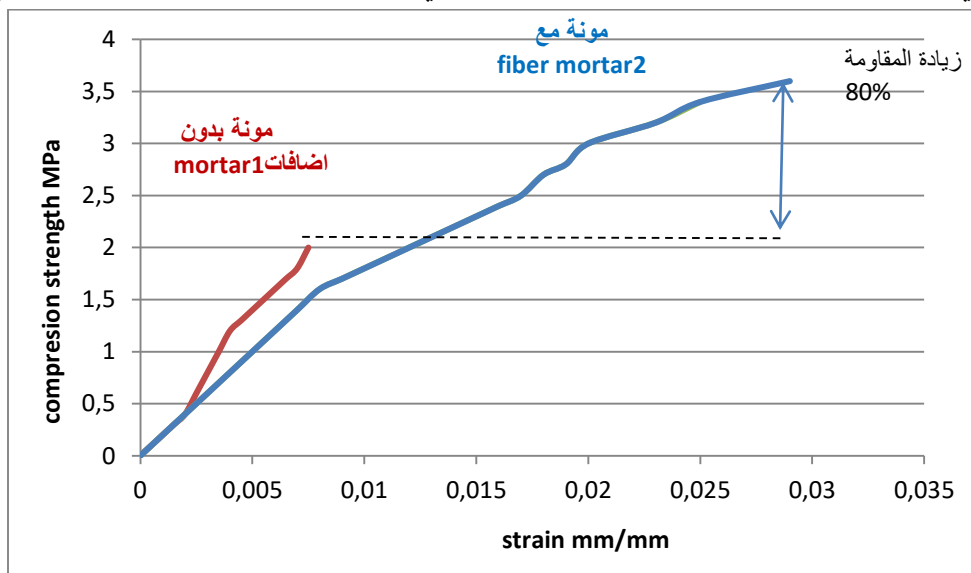
الفرع الأول:

تبين من خلال الاختبارات التي أجريت على العينات المكعبية للمونة إن متوسط مقاومة عينات المونة غير المحسنة كان 2MPa، في حين وصلت مقاومة عينات المونة المحسنة على الضغط عند إضافة الألياف الزجاجية بنسبة 2% إلى 3.6 MPa الشكل (4).



الشكل (3): عينات المونة المحضرة في المخبر والألياف الزجاجية المستخدمة

تم اختبار المونة على الشد بالانعطاف، وقد تبين من الاختبارات أن المونة الكلسية بدون إضافة الألياف الزجاجية إليها كان انهيارها مفاجئاً، ولم تتجاوز مقاومة الانعطاف 1.5MPa، في حين وصلت مقاومة الانعطاف إلى 2.6 MPa في العينات التي تم إضافة الألياف إليها كما تم تحضير عينات اسطوانية، واختبار المونة على الشد (150*300mm) وفق المرجعين [7], [8] ولم تتجاوز مقاومة الشد 0.46MPa في المونة غير المحسنة، في حين وصلت مقاومة الشد إلى 0.91MPa في العينات المحسنة ضمن البحث الحالي.



الشكل (4): التشوه - اجهاد للمونة غير المحسنة mortar1 و(مونة محسنة + ألياف زجاجية) mortar2

الفرع الثاني:

4. الدراسة التجريبية لتحديد مقاومة الحجر:

إن الكود العربي السوري للجدران الحاملة غير المسلحة في المباني قد حدد قيم المقاومات المميزة لبعض الأحجار الطبيعية دون أن يتم أي تصنيف لهذه الأحجار و وفقاً لخصائصها الفيزيائية والميكانيكية، و اكتفى بأن لا تقل المقاومة الميكانيكية المميزة على الضغط عن 15MPa ، وبالتالي اعتمد المهندسون على الخبرة العملية في اختيار الحجر المستخدم للعناصر الحاملة، واختبار عينات منها لتحديد مقاومتها دون أن تتوفر معلومات علمية دقيقة تحدد خصائص هذا النوع من الحجر أو ذاك اعتماداً على مقاومته المميزة على الضغط .

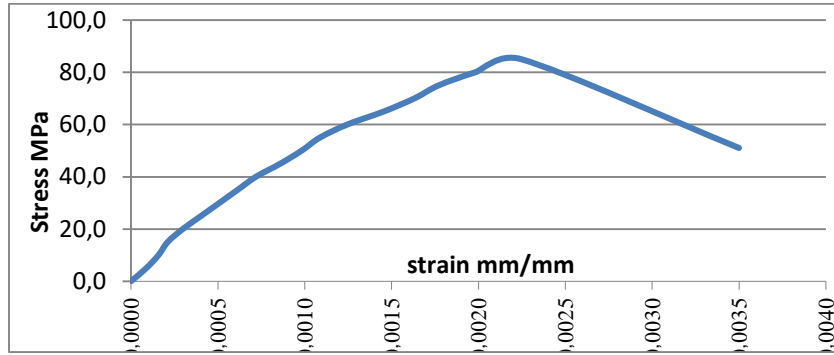
اعتمد البحث في المرحلة الأولى على دراسة الحجر الكلسي الذي تم جلبه من مقالع معروفة ، وتحديد الخصائص الميكانيكية لها، آخذين بعين الاعتبار الشروط الواردة في المواصفات القياسية السورية ، وهي مترجمة عن المواصفات الأمريكية ASTM ووفق المراجع [9] و [10] و [11] و [12]، وقد تم اختيار الحجر الرحيباني في البحث لكونه مستخدم بكثرة في أعمال البناء في دمشق، وتم حساب القيمة المميزة للمقاومة على الضغط بإجراء تجارب على عينات موشورية ذات أبعاد 10*10*20 cm على الضغط وفق الكود العربي السوري للجدران الحاملة غير المسلحة [6]، ويبين الشكل (5) و (6) إحدى العينات أثناء الاختبار، والجدول (2) يبين نتائج العينات المختبرة.

الجدول (2) مقاومة الحجر على الضغط

نوع الحجر	الأبعاد (cm)	حمولة الانهيار (KN)	المقاومة على الضغط (N/mm ²)	متوسط المقاومات (N/mm ²)
حجر كلسي (رحيباني)	10*10*20	850	85	84.6
	10*10*20	840	84	
	10*10*20	845	84.5	
	10*10*20	850	85	
	10*10*20	840	84	
	10*10*20	840	84	
	10*10*20	849	84.9	
	10*10*20	849	84.9	
	10*10*20	850	85	



الشكل (5) عينة الحجر أثناء الاختبار



الشكل (6) مخطط الاجهاد - الانفعال لعينة الحجر

تم اختبار مقاومة الحجر على الانعطاف (Modulus of Rupture معامل التمزق) و وفق التعليمات المعتمدة في المرجع [11] وكانت العينات بأبعاد $5*10*20$ حيث طبقت قوة مركزة في منتصف مجاز العينة، ويوضح الشكل (7) العينة بعد اختبارها و قد تم تحديد قيمة معامل التمزق من العلاقة:

$$R \text{ (Mpa)} = \frac{3Pl}{2bd^2}$$

يمثل b عرض مقطع العينة و d ارتفاعها، وقد بلغت متوسط قيمة معامل التمزق 4MPa .

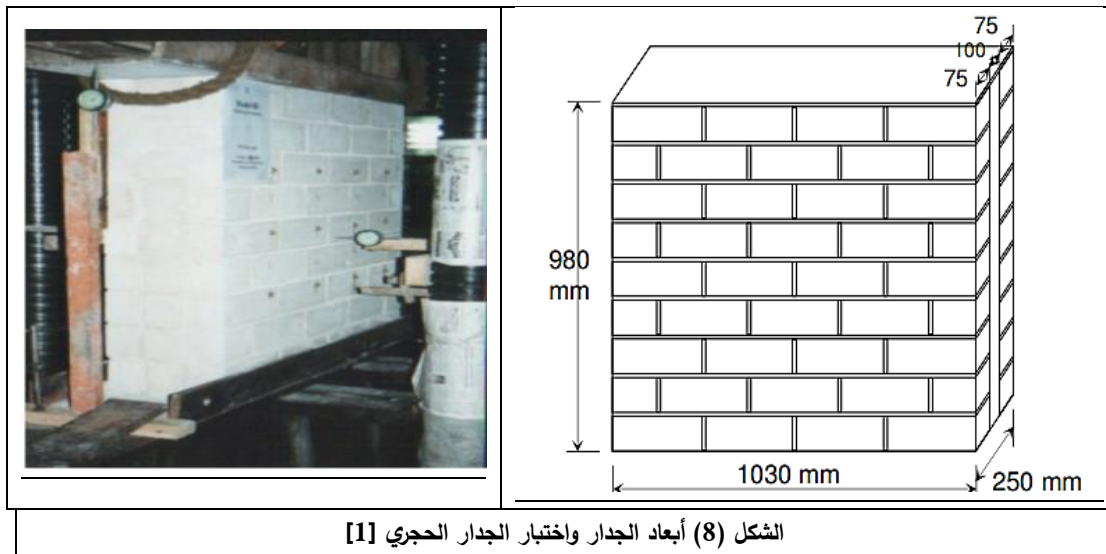


الشكل (7) عينة الحجر أثناء الاختبار على الشد

المطلب الثاني: الدراسة المرجعية:

دراسة الجدران الحجرية تحت تأثير الأحمال الجانبية:

درس (Abdo, S.) [1] سلوك الجدران الحجرية الكلسية ذات المونة الكلسية تحت تأثير الأحمال الجانبية، وتأثير تحسين المونة بواسطة الاسمنت الأبيض على سلوك الجدار، حيث اختبر الباحث تجريبياً سلوك الجدار الحجري متعدد الوراقات (Multi leaf) غير المسلح تحت تأثير الأحمال الشاقولية، والجانبية في المستوي، وقد استخدم الحجر الكلسي الطبيعي في بناء الجدار، وهياً الباحث في المختبر بيئة أقرب ما يمكن للواقع وأعتمد أبعاد للحجارة 250*100*75 mm، الشكل (8)



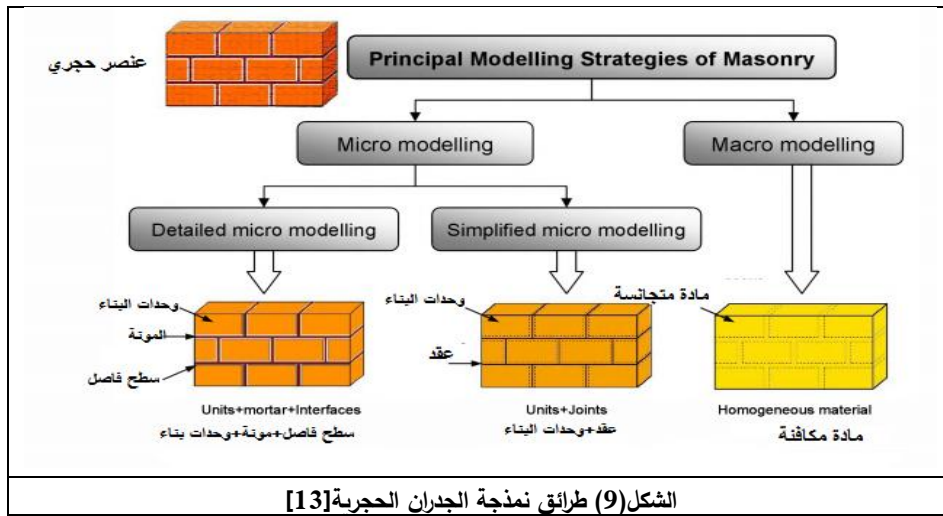
الشكل (8) أبعاد الجدار واختبار الجدار الحجري [1]

بلغت مقاومة العينات المكعبية للمونة (كلس+رمل) بعد 28 يوم 0.264 N/mm^2 دون اضافة الاسمنت أما في العينات المضاف اليها الاسمنت الأبيض فقد وصلت المقاومة على الضغط إلى 3 MPa . أما وحدات البناء فهي من الحجر الكلسي وتبلغ مقاومته على الضغط 27.4 MPa . تم اختبار عينات جدارية على الضغط حتى الانهيار لتحديد حمولة الانهيار، ومن ثم تم اختبار عينات محملة بحمولتين حمولة شاقولية تعادل 20% من قدرة تحمل الجدار، واحتفظ بمقدار القوة ثابتة خلال فترة التحميل كما تم تحميل الجدار بقوة أفقية تم تطبيقها أعلى الجدار، وتم زيادتها تدريجياً حتى الانهيار، وخلال التجربة سمح للجدار أن ينتقل في مستويه بينما منع من الانتقال خارج مستويه، وقد تم وضع مشعرات على الجدار لقياس الانتقال الأفقي، والشاقولي. أظهرت النتائج التجريبية أن نمط الانهيار المسيطر على الجدار هو انهيار على القص، وأن التشوه في الجدار حصل على شكل درج عند 80% من القوة العظمى للجدار، وإن عدد الشقوق القطرية ازداد بزيادة التحميل، وقد وصلت حمولة الانهيار إلى 100 KN . توصل الباحث إلى أن تحسين المونة يؤدي الى تحسين شكل الانهيار للجدران الحجرية فزيادة الاسمنت الأبيض الى المونة بمقدار 5% أدى الى زيادة استطاعة تحمل الجدران لتحمل الحمولة الجانبية بمقدار 67%

المبحث الثاني: الدراسة التحليلية لنموذج الجدار وفق البحث [1]

المطلب الأول: الدراسة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة FEM :

تعتبر النمذجة التحليلية للجدار عامل هام في دقة النتائج، وتكون النمذجة الأفضل هي الأقرب إلى الواقع، وقد طورت طريقتين لنمذجة الأبنية الحجرية هما الأسلوب المكافئ المتجانس Macro Modeling، والأسلوب المنفصل الدقيق Micro Modeling [13]. الشكل (9) تم بناء نموذج عددي (Numerical Model) واختبرت فعاليته بمحاكاة الدراسة التجريبية [1]. تحت تأثير الحملات الجانبية، ومن ثم اختبار الجدار تحت تأثير حملات دورية (cyclic load) للتنبؤ بالسلوك الزلزالي للجدار الحجري بالمونة المحسنة باستخدام برنامج التحليل (ABAQUS ,V6.14-1) [14] الذي يعتمد بشكل أساسي طريقة العناصر المحدودة (FEM)، ويتميز البرنامج بامتلاكه مكتبة واسعة من العناصر المختلفة، والمواد مع إمكانية نمذجة تصرف المواد في المراحل الاجهادية المختلفة، إضافة لامتلاكه طرائق عديدة، ومتقدمة لربط العناصر المختلفة. كما يمكن من خلال البرنامج إجراء تحليل خطي أولاً خطي، مع إمكانية أخذ لا خطية المادة بعين الاعتبار أثناء التحليل، وهي نسخة معدلة عن طريقة (Abaqus Drucker-Prager Damage Criterion) [14] (documentation).



الشكل (9) طرائق نمذجة الجدران الحجرية [13]

1.2. تصرف المادة في حالة الضغط الأحادي المحور:

في حالة الضغط الأحادي المحور، الشكل (10) يبدأ سلوك المادة بشكل خطي مرن حتى الوصول إلى التلدن الأولي σ_c ، تتحول العلاقة بين الإجهاد، والتشوه إلى علاقة لدنة غير خطية حتى الوصول إلى الإجهاد الحدي على الضغط σ_{cu} ، وتسمى بمرحلة تقسية الضغط بعدها تبدأ مرحلة انحدار في علاقة الإجهاد - التشوه، وتمثل هذه المرحلة مرحلة ما بعد الانهيار. تنخفض القساوة المرنة للمادة نتيجة لتشقق الشقوق في هذه المرحلة، ولكن بإهمال تأثير انخفاض القساوة المرنة المذكورة آنفاً، وفي حال الحمل عند أي نقطة في هذه المرحلة تعود المادة بميل E_0 حيث E_0 هو معامل المرونة الابتدائي غير المتشقق للمادة فينشأ ما يسمى بتشوه التحطم على الضغط ϵ_c^{in} ، ويعطى بالعلاقة (1) ويعرف بأنه الفرق بين التشوه الكلي للمادة، والتشوه المرن

ε_{0c}^{el} الموافق للمادة قبل التشقق، والذي يعطى بدوره بالعلاقة (2). يعتبر تشوه التحطم على الضغط $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ من المعطيات الأساسية الواجب تعريفها في الـ ABAQUS لنمذجة مرحلة تقسية الضغط، حيث يتم تعريف مرحلة تقسية الضغط بشكل جدول من حقلين : الحقل الأول هو الإجهادات σ_c الموافقة لكل تشوه، بينما يتم إدخال تشوه التحطم على الضغط $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ في الحقل الثاني.

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (1)$$

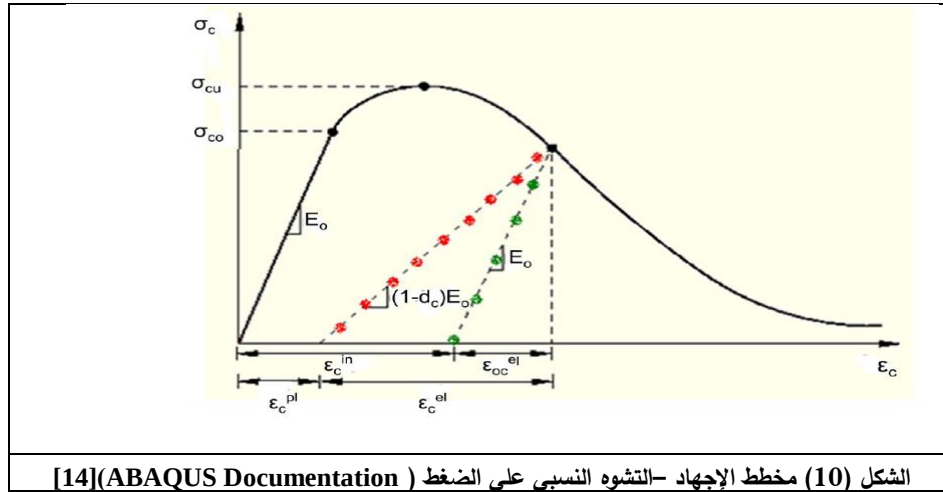
$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2)$$

يحدد انخفاض القساوة المرنة للمادة على الضغط بالمعامل d_c ، والذي يغير من تصرف المادة عند رفع الحمل عند أي نقطة في مرحلة تقسية الضغط، حيث تعود المادة بميل $(1 - d_c)E_0$ أضعف من الميل السابق، ويتوافق ذلك مع ظهور تشوهات لدنة على الضغط (Compressive Equivalent Plastic Strains) في المادة تعرف بـ $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ يمكن حساب المعامل d_c من خلال العلاقة (3) (Jankowiak and lodygowski)، [15]، وتتراوح قيمته بين الصفر عندما تكون المادة مازال سليمة غير متحطمة، إلى الواحد عندما تنهار المادة بشكل كامل.

$$d_c = (\sigma_{cu} - \sigma_c) / \sigma_{cu} \quad (3)$$

يعتمد الـ ABAQUS قيمة التشوه اللدن $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ للمادة كميّار لتقييم سطح الانهيار وميكانيكية انهيار المادة، ويقوم بحسابه بشكل آلي من خلال العلاقة (4):

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4)$$

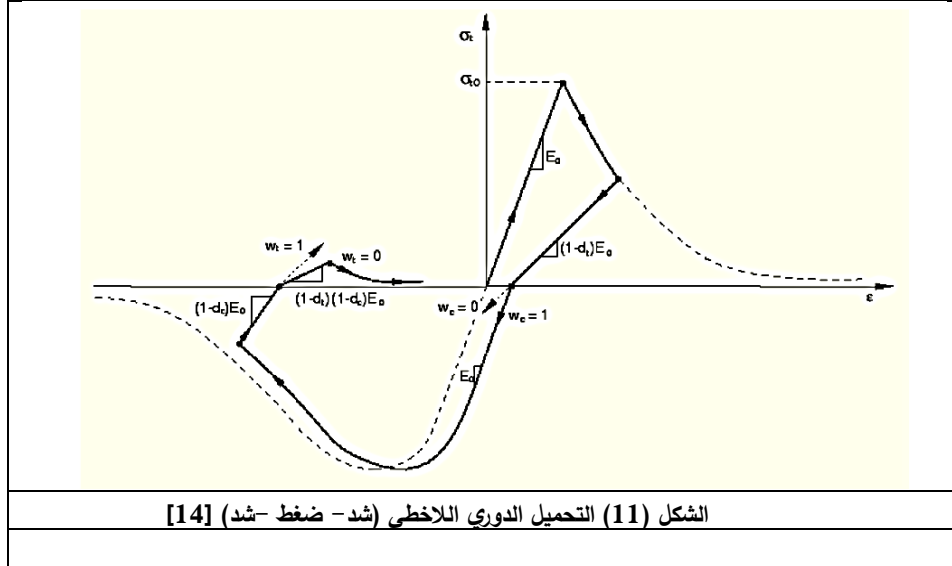


الشكل (10) مخطط الإجهاد - التشوه النسبي على الضغط (ABAQUS Documentation) [14]

2.2. تصرف المادة تحت تأثير الأحمال الدورية :

أثبتت التجارب التي أجريت على المواد ذات الانهيار الشبيه بالهش (Quasi-Brittle) أن المادة تستعيد بعضاً من قساوتها عند تحول الحمل من الشد إلى الضغط نتيجة لانغلاق بعض الشقوق المتشكلة في مرحلة الشد عند

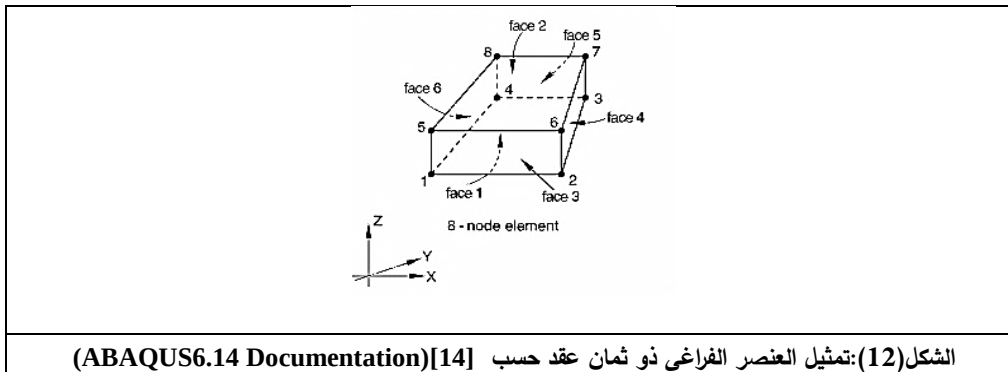
تعرض المادة للضغط، وعلى العكس عند تحول الحمل من الضغط إلى الشد فإن التشققات لا تعود لتكتسب أية قساوة. يأخذ البرنامج تأثير استعادة القساوة عند تغير الحالة الإجهادية من شد إلى ضغط أو بالعكس، من خلال عاملين هما w_c و w_t ، ويبين الشكل (11) تصرف المادة عند تغير الحمل لدورة كاملة (شد-ضغط-شد).



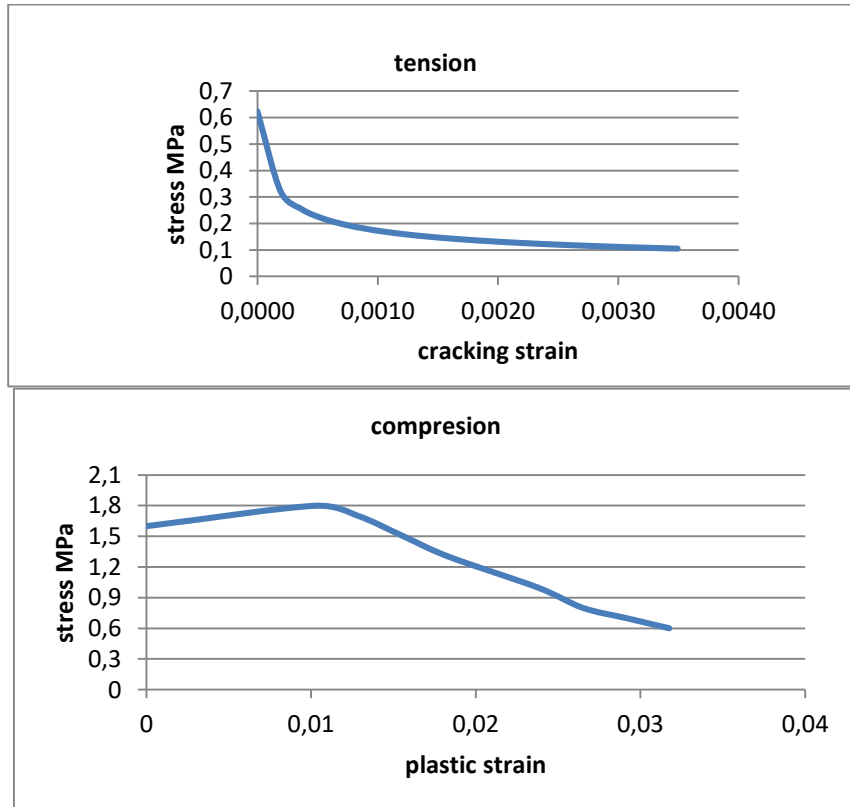
العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج ABAQUS(6.14):

تم استخدام النموذج ثلاثي البعد في النمذجة المتبعة في الدراسة، وتم استخدام عنصر الحجر، من نوع C3D8R (Solid) هو عنصر فراغي (An8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) Section مؤلف من ثمان عقد، وكل عقدة تحوي ثلاث درجات حرية (انتقالات فقط)، والرمز R للدلالة على أنه تم

تخفيض عدد نقاط Gauss إلى نقطة واحدة حيث يبين الشكل (12) العنصر الفراغي المستخدم (ABAQUS6.14 Documentation). أيضاً تم استخدام العنصر COH3D8 لنمذجة المونة، وهي عناصر لاصقة ثلاثية البعد من ثمان عقد Three dimensional cohesive element تفصل بين المادتين مع تمثيلها لمركبات الإجهاد السطحي الفاصل Traction Separation بشكل عالي الكفاءة.



لمحاكاة ترتيبات النموذج التجريبي [1] تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج المدروس كما اعتمدت في التجربة حيث تم منع العقد في أسفل الجدار من الحركة عند نقاط استناد الجدار، كما تم تطبيق حمولة شاقولية مقداره $Pu/5$ ، وحمولة جانبية عن طريق تطبيق انتقال جانبي متزايد في المستوي، ثم تم تحليل النموذج العددي باستخدام ABAQUS/Standard لإجراء تحليل ضمني (Implicit) ولا خطي (Nonlinear)، يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة، إن التحليل الضمني يعتمد على حل تكاملات معادلات الحركة باستخدام طريقة Hilber-Hughes-Taylor حيث يقوم بحل جملة معادلات التوازن اللاخطية عند كل زيادة في الزمن، ويتم الحل بالإعادة، والتكرار باستخدام طريقة (Newton's Method) تعطى قيمة زاوية التمدد $\theta = 10^\circ$ (Dilation angle)، لامركزية التدفق الكامن $\epsilon = 0.1$ ، نسبة الضغط الشائلي المحور الى الضغط الأحادي المحور $k_c = 2/3$ ، معامل اللزوجة $\mu = 0$ ، معامل استعادة القساوة على الضغط $w_c = 1$ ، معامل استعادة القساوة على الشد $w_t = 0$ ، ثم لتوصيف مادة المونة الكلسية في النموذج العددي (Numerical Model) ليحاكي الدراسة التجريبية التي قام بها الباحث [1]، تم أخذ المخططات التشوه-اجهاد وفق تجارب الباحث، وبالاعتماد على علاقات أباكوس تم الحصول على سلوك المونة الضغط، وسلوك المونة على الشد الشكل (13). كما تم رسم مخططات المونة الناتجة من البحث (الدراسة الحالية) وفق نتائج الاختبارات (الفقرة 3) التي تم الحصول عليها في مخبر كلية الهندسة، ووفق علاقات أباكوس، وتم الاعتماد على المواصفات الميكانيكية للحجر التي تم الحصول عليها من الاختبارات التي تم القيام بها في المخبر الجدول (3) وفق المراجع [9], [10], [11], [12].

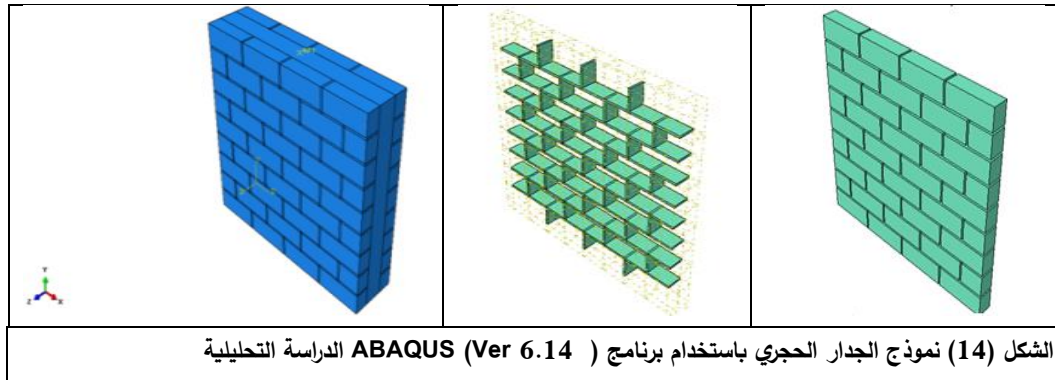


الشكل (13) سلوك المونة (وفق الدراسة التجريبية [1])

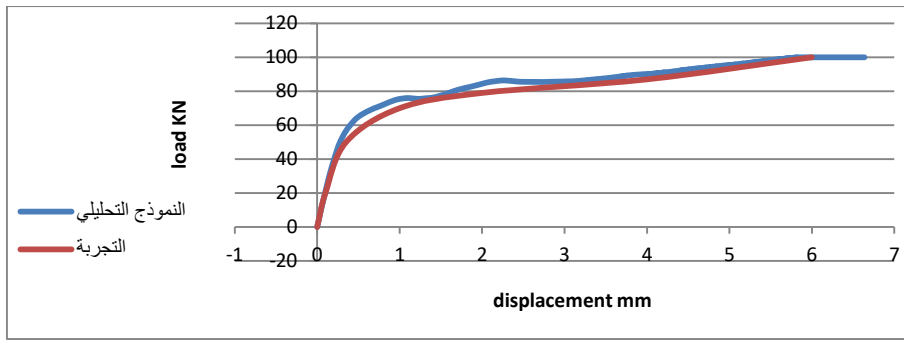
الجدول (3) المواصفات الميكانيكية للحجر والمونة المستخدمة في النمذجة وفق تجارب البحث الحالي

المواصفات الميكانيكية للمواد المستخدمة في النمذجة				
	المقاومة على الضغط	المقاومة على الشد	معامل بواسون	معامل المرونة
حجر رحيباني	50MPa	3.5MPa	0.2	E=20000MPa
المونة المحسنة (2)	3.6MPa	0.91MPa	0.25	E=2000MPa
مونة غير محسنة	2MPa	0.46MPa	0.25	E=2000MPa

لتحديد الأبعاد الأمثلية للعناصر المختلفة في النموذج التي تحقق دقة النتائج المناسبة مع زمن التحليل الأمثلي، تم دراسة تقارب الشبكة، حيث تم بناء نموذج الجدار بأبعاد مختلفة للعناصر، وقد تم اعتماد النموذج بأبعاد العناصر (mesh 50*50mm)، حيث أعطى هذا النموذج وفراً في زمن التحليل، ثم تم التحقق من نتائج النموذج العددي عن طريق مقارنتها مع نتائج الدراسة التجريبية [1]. حيث تم بناء النموذج الرياضي المبين بالشكل (14)، الذي يحاكي النموذج التجريبي للجدار.



يبين الشكل (15) مدى التقارب الواضح بين منحنى (التشوه - اجهاد) في الدارسة التجريبية، والدارسة التحليلية، وبمقارنة مقاومة الجدار في كل من النموذجين تبين أن الاختلاف وصل إلى 3%، وهي نسبة مقبولة.



الشكل (15) مقارنة بين التجربة على الجدار الحجري و النموذج التحليلي

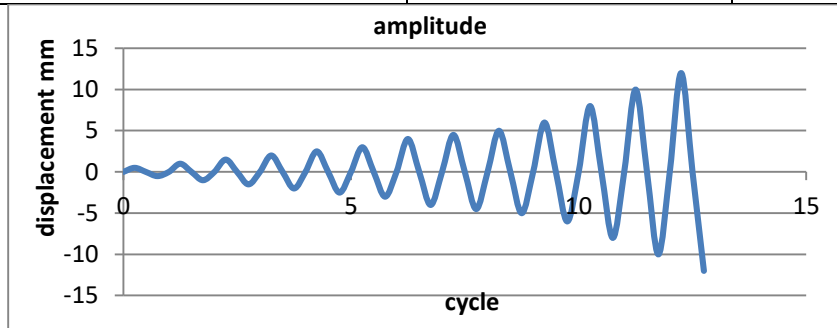
الفرع الأول:

الدراسة البارامترية على النموذج الحاسوبي المطور في البحث:

تم بناء النماذج التحليلية للجدار wall1 ذو المونة الكلسية بدون اضافات (غير المحسنة) (mortar1)، والجدار wall2 ذو المونة الكلسية المحسنة والمضاف اليها الألياف الزجاجية (mortar2) الجدول (4)، ولتطبيق الانتقالات الدورية المطبقة في مستوي الجدار تم تعريف تابع دوري للانتقالات متزايد تدريجياً حتى الوصول الى انتقال اعظمي مقداره 0.53 % من ارتفاع الجدار [16] الشكل (16) باستخدام تعليمة Amplitude .

الجدول (4) نماذج الجدران التي تم بنائها تحليلياً

نموذج الجدار	المونة	الحمولة
Wall1	Mortar1 مونة كلسية غير محسنة	حمولة شاقولية + حمولة دورية (cyclic load)
Wall2	Mortar2 مونة محسنة	حمولة شاقولية + حمولة دورية (cyclic load)

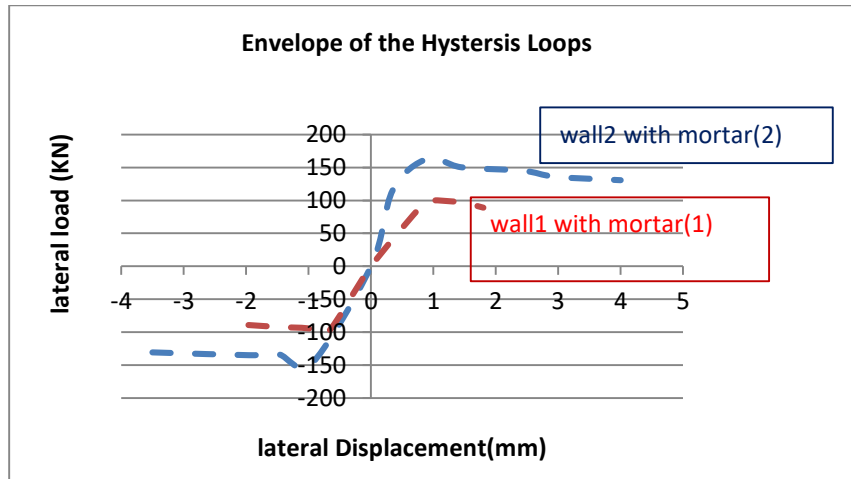


الشكل (16) مخطط التحميل المعتمد في الدراسة

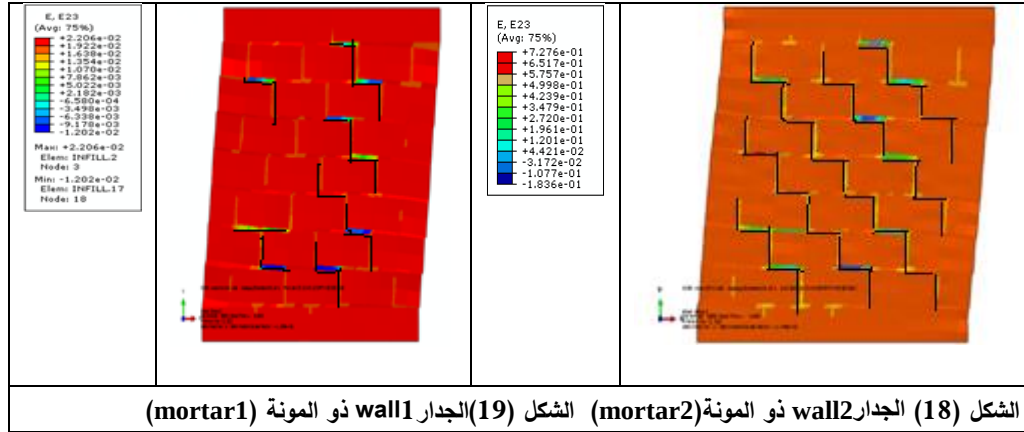
الفرع الثاني:

1.6. التحقق من خاصية المطاوعة المكتسبة في البحث:

تم رسم مغلف الحلقات الهستيرية (Hysteretic Loops) للنماذج المدروسة الشكل (17)، حيث بلغت قوة الانهيار للجدار (wall2) 161.0039KN ، وقوة الانهيار للجدار (wall1) 100.43KN ، أي أن إضافة الألياف الزجاجية إلى المونة الكلسية المحسنة زاد من المقاومة الجانبية للجملة الإنشائية بنسبة 60%، أما بالنسبة لمقارنة نتائج الانتقالات فنلاحظ أن أكبر انتقال تم الحصول عليه هو (4mm) بالنسبة للجدار (wall2) في حين لم تتجاوز الانتقالات (2mm) بالنسبة للجدار (wall1)، أي أن الانتقالات زادت بمقدار 100% عند تحسين المونة، مما يدل على دور تحسين المونة في تحسين سلوك الجدار تحت تأثير الأحمال الدورية، كما لوحظ زيادة بتبديد الطاقة بزيادة عدد دورات التحميل، واتساع الحلقات الهستيرية، وهو مؤشر على زيادة مطاوعة الجدار حيث أن إضافة الألياف الزجاجية إلى المونة الكلسية المحسنة (mortar2) زاد من مطاوعة الجدار، حيث وصل عامل المطاوعة إلى 3.25 في حين أنه لم يتجاوز 1.8 للجدار ذو المونة (morta1) بدون إضافة الألياف، وهو مؤشر على زيادة مطاوعة الجدار، وتحسين نمط الانهيار. كما تبين أن في الجدار wall2 ظهرت الشقوق على طول عقد المونة الشاقولية، والأفقية من الزاوية إلى الزاوية للجدار (shear failure) وقد زادت الشقوق القطرية على شكل (steps) بزيادة التحميل الشكل (18)، وهذا يعكس الضرر الزلزالي النموذجي، و الذي يظهر في الجدران الحجرية، وخصوصاً إذا كانت مقاومة المونة أقل بكثير من مقاومة الحجارة، أما الجدار wall1 فقد ظهرت الشقوق عند مقاومة أقل، وانهار الجدار عند شقوق قطرية أقل الشكل (19).

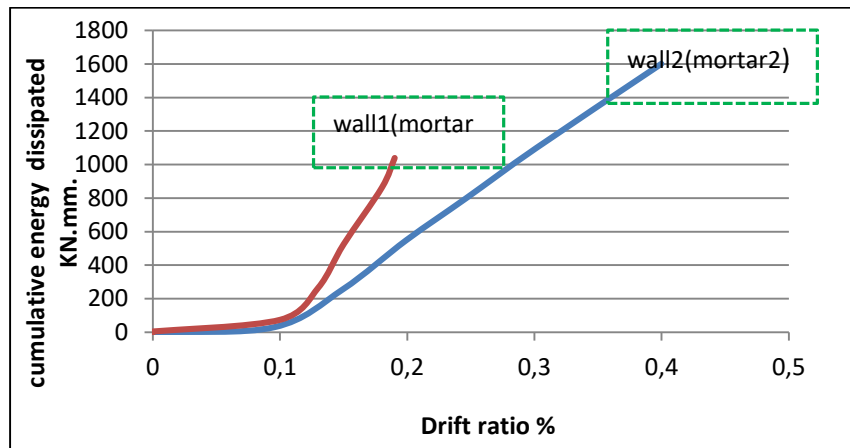


الشكل (17) مغلفات الحلقات الهستيرية للنماذج المدروسة



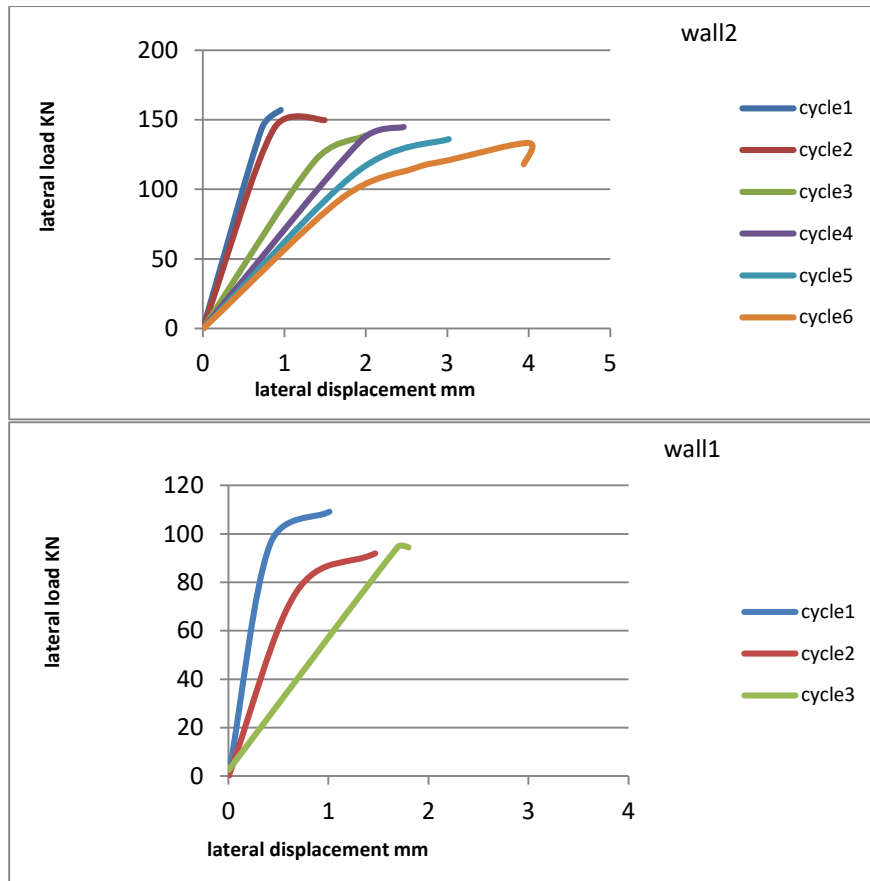
أما

بالنسبة لتبديد الطاقة، وهو مؤشر زلزالي هام فقد بينت الدراسة أثر تحسين المونة على تبديد الطاقة، حيث تم رسم علاقة الانتقال النسبي (Drift%) وتجميع الطاقة المبذولة (cumulative energy dissipated) (الشكل (20))، فقد زادت الطاقة المبذولة للجدار wall2 عن الطاقة المبذولة للجدار wall1 بمقدار 52%، الأمر الذي يؤثر على مطاوعة (Ductility) الجملة الإنشائية.



الشكل (20) الطاقة المبذولة التراكمية و التغير في الانحراف الجانبي للجدار

تم دراسة تأثير التحميل الدوري على مقاومة الجدار، ويظهر الشكل (21) تأثير التحميل الدوري على تناقص المقاومة للجدار wall1 ذو المونة mortar1، حيث تتناقص القوة الجانبية للجدار مع زيادة عدد دورات التحميل (cycles)، وقد انهار عند عدد أقل من دورات التحميل من الجدار wall2 ذو المونة المحسنة mortar2.

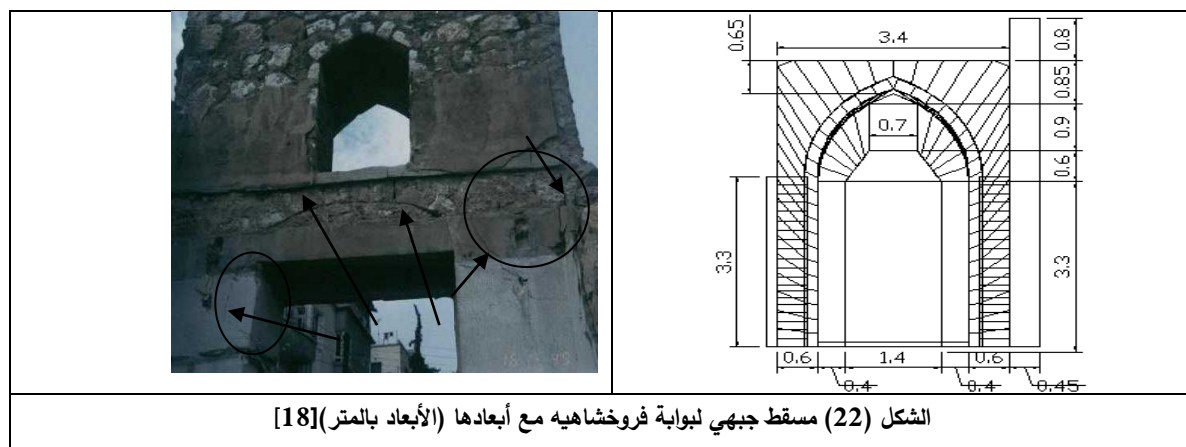


الشكل (21) تأثير التحميل الدوري على تناقص المقاومة للجدار

المطلب الثاني: دراسة بوابة فروخشاهيه (case study)

الفرع الأول:

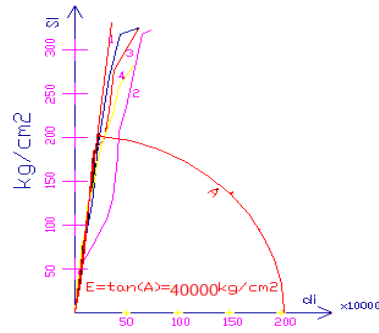
تعتبر منطقة بلاد الشام من أقدم المناطق الغنية بالحضارات، والتي تميزت بمختلف الفنون المعمارية. تنسب بوابة فروخشاهيه للأمير عز الدين فروخشاه بن شاهنشاه، صاحب بعلبك وابن شقيق السلطان صلاح الدين الأيوبي، وقد بنيت في العهد الأموي. تقع هذه البوابة في الجهة الشمالية من المدرسة الفروخشاهية، وهي مشرفة على شارع الأرجنتين مباشرة، ويظهر في الشكل (22) مسقط جبهي للبوابة مع أبعادها، ووجد أن مادة البوابة هي الحجر الكلسي الرصين، والمادة الرابطة الضعيفة (مونة كلسية مع قصر مل) [17]. في نهايات القرن العشرين قامت وزارة الأوقاف السورية بترميم بناء التربة في شهر آذار من عام 1988 ميلادية.



تم في هذا البحث اجراء دراسة تحليلية لبوابة فروخشاھيه بواسطة طريقة العناصر المحدودة (Finite element) باستخدام برنامج [18] Sap2000 v.15 ، وقد تم الرجوع إلى مديرية الآثار والمتاحف، ومديرية آثار دمشق، ووزارة السياحة، للحصول على المخططات والمعلومات المتوفرة واللازمة للدراسة التحليلية للآبدة، ومن خلال المراجع [17] - [19] - [20] - [21] لتحديد الخصائص الهندسية، والميكانيكية للحجر الطبيعي والمونة الرابطة، وقد تم بناء النماذج التحليلية لجدار بوابة فروخشاھيه وفق الابعاد الحقيقية للبوابة، وباستخدام مواصفات المواد التي تم الحصول عليها، والتي تمثل مواصفات المواد التي بنيت منها البوابة، كما تم بناء النموذج التحليلي للبوابة ذو المونة الكلسية المحسنة التي تم الحصول عليها من البحث الحالي (mortar2) وبين الجدول (5)، والشكل (23) مواصفات المواد لجدار البوابة التي تم اعتمادها في النمذجة من المراجع المذكورة، ومواصفات المواد من التجارب التي تمت في مخبر كلية الهندسة]، وقد تم استخدام macro modeling للنمذجة، ولتطبيق الانتقالات الدورية المطبقة في مستوي الجدار تم تعريف تابع دوري للانتقالات متزايد تدريجياً حتى الوصول الى انتقال اعظمي مقداره 0.53 % من ارتفاع الجدار [16]، كما تم تحليل النموذج العددي باستخدام طريقة التحميل nonlinear direct integration لإجراء تحليل لا خطي، يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non-linear Analysis MNA).

الجدول (5) مواصفات المواد لجدار البوابة

المادة	خواص المادة	قيم مرجعية [4][16] التجارب	المراجع
قطع حجر	MPa إجهاد الضغط	44	المراجع (18)
رصين كلسي	MPa إجهاد الشد	3.5	و (20) و (21)
منتظمة مع	MPa عامل المرونة	4100	و (22)
مادة رابطة	(t/m ³) الوزن الحجمي	2.4	



الشكل (23) حساب معامل المرونة لعينات الحجر والمونة للبوابة [18]

لوحظ من نتائج التحليل أن البوابة تتأثر بشكل كبير بالقوى الأفقية بحيث تتشكل إجهادات شادة كبيرة حول فتحة الباب، والنافذة العلوية في بادئ الأمر ثم تتطور في مرحلة لاحقة لتتوزع في عناصر الجدران، ومن ثم يؤدي إلى انهيار كامل للمنشأة، وتكون طبيعة الإجهادات المسيطرة، والتي تؤدي إلى الانهيار في المنشأة المدروسة نتيجة القوى الزلزالية هي الإجهادات الشادة بينما تكون باقي الإجهادات من قص وغيرها أقل تأثيراً. ويبين الجدول (6) والجدول (7) الإجهادات في البوابة وفق مونة البناء الأساسية، والإجهادات عند استخدام المونة المحسنة وفق البحث الحالي.

الجدول (6) الإجهادات في البوابة

الإجهادات في البوابة	إجهاد الشد المحوري	الإجهاد الأفقي (القص)
مونة بناء البوابة	(0.45-0.2 MPa	(0.3- 0.15) MPa
المونة المحسنة (2)	(0.8-0.45) MPa	(0.4-0.2) MPa

الجدول (7) نتائج التحليل (الإجهادات في البوابة) وفق المونة المحسنة

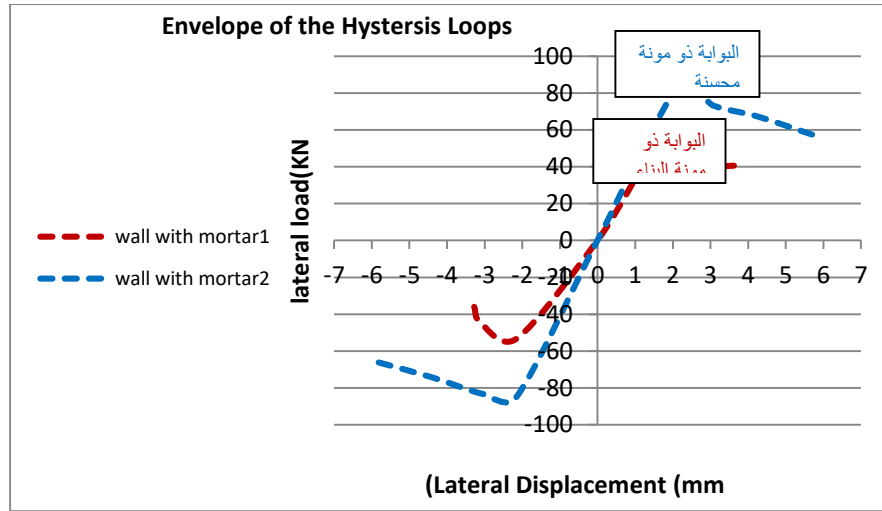
الإجهاد	مخطط ساحات الإجهادات الكبيرة في المنشأ	قيم الإجهادات MPa	التحقق
---------	--	-------------------	--------

إجهاد الشد المحوري الشاؤولي S22	تتراوح الإجهادات في معظم نقاط المنشأة بين $-0.15 \rightarrow +0.05$ الإجهادات ذات القيم الكبيرة تتراوح بين $+0.8 \rightarrow +0.45$ وتتركز في محيط وأسفل فتحة الباب	محقة غير محقة (انهيار كبير)
الإجهاد الأفقي S11 (القصر)	تتراوح الإجهادات في معظم نقاط المنشأة بين $-0.08 \rightarrow +0.2$ الإجهادات ذات القيم الكبيرة تتراوح بين $+0.2 \rightarrow +0.4$ وتتركز في أسفل وأعلى فتحة الباب	محقة غير محقة (انهيار موضعي)

الفرع الثاني:

التحقق من المطاوعة المكتسبة للجدار بالمونة المحسنة :

تم رسم مغلف الحلقات الهستيرية (Hysteretic Loops) للنماذج المدروسة ذات مونة البناء mortar1، والمونة المحسنة mortar2 الشكل (24) حيث بلغت قوة الانهيار للجدار ذو المونة المحسنة 80KN، وبلغت قوة الانهيار للجدار ذو مونة البناء 42KN، أي أن إضافة الألياف الزجاجية إلى المونة الكلسية المحسنة زاد من المقاومة الجانبية للجملة الإنشائية بنسبة 90%، كما لوحظ زيادة بتبديد الطاقة بزيادة عدد دورات التحميل واتساع الحلقات الهستيرية، وهو مؤشر على زيادة مطاوعة الجدار حيث أن إضافة الألياف الزجاجية إلى المونة الكلسية المحسنة (mortar2) زاد من مطاوعة الجدار حيث وصل عامل المطاوعة $\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$ إلى 2.2 في حين أنه لم يتجاوز 1.77 للجدار ذو مونة البناء (morta1)، وهو مؤشر على زيادة مطاوعة الجدار، وتحسين نمط الانهيار من نمط هش إلى نمط مطاوع.



الشكل (24) مغلفات الحلقات الهستيرية للنماذج المدروسة لبوابة فروخشاويه

خاتمة:

النتائج والتوصيات: يمكن تلخيص أهم النتائج المستخرجة وفق البحث الحالي، وباستخدام المواد المحلية

المتوفرة والمونة المحسنة بما يلي:

1- زيادة مقاومة المونة للضغط بإضافة الألياف الزجاجية بنسبة حوالي 80% وزيادة مقاومتها على الشد بالانعطاف بنسبة 73% عن مقاومة العينات بدون إضافة الألياف، وذلك بإضافة الألياف الزجاجية بكمية صغيرة لا تتجاوز 2% .

2- زيادة مطاوعة الجدار ذو المونة الكلسية المحسنة بالألياف الزجاجية وتحسين نمط الانهيار من نمط هش إلى نمط مطاوع بزيادة تبديد الطاقة الذي لوحظ من زيادة عدد دورات التحميل واتساع الحلقات الهستيرية، حيث وصل عامل المطاوعة إلى 3.25 في حين أنه لم يتجاوز 1.8 للجدار ذو المونة بدون إضافة الألياف.

3- زيادة قدرة الجدران الحجرية ذات المونة المحسنة على تحمل القوى الأفقية بنسبة 60% من العينات ذات المونة غير المحسنة، أي أن تحسين المونة ساعد على تحسين مقاومتها على القص من خلال تحسين اجهادات التلاحم بين الأحجار، والمونة.

كخلاصة إن إضافة الألياف الزجاجية تقلل من الإنكماش، وتحد من انفتاح الشقوق، وتوزع الإجهادات، وبالتالي تمنع تطور الشقوق الصغيرة شقوق كبيرة، وتحسن من مطاوعة الجدران الحجرية، وبالتالي تمكن من الحصول على مونة كلسية مقاومة للزلازل بكلفة اقتصادية منخفضة، وتعتبر النتائج الآنف الذكر ذات فعالية في عمليات ترميم المنشآت الحجرية القديمة، نظراً للتحسينات التي أظهرها البحث الحالي.

تقرير فني لعينة مونة من بيت القوتلي - دمشق القديمة

تتمتع هذه العينة بالتماسك والصلابة ويعود ذلك إلى التفاعل بين مكونات الغضار والكلس الحي الذي يعطي نواتجاً جديدة ترتبط مع بعضها البعض.

المكونات عند تحضير الخلطة	رمل كلسي+كلس حي Cao+CaCo3 %63-56	غضار %36-30	قش شعير أو قمح وزناً 1%	شوائب أخرى وزناً 1%
المكونات الموجودة حالياً	كربونات الكالسيوم Ca(OH)2+CaCo3 %71	غضار غير منحل في الحمض %25	قش وزناً 1%	شوائب أخرى وزناً 1%

الغالبية العظمى من المزيج Cao+CaCo3 يعتقد أنها من Cao التي تقوم بالدور الرابط الكلسي



الهوامش:

المراجع العلمية المستخدمة :

- [1]ABDO S , **Structural Behavior of Natural Stone Masonry Walls under Vertical and Lateral Loads** .PhD Thesis .Structural Engineering Department, Faculty of Engineering .Cairo.2003
- [2]-عمران هزار، ودبورة جورج، المباني الاثرية : ترميمها والحفاظ عليها. دمشق، منشورات وزارة الثقافة، 1997 .
- [3]-عميري ابراهيم، 2010، مواد وتقنيات العمارة القديمة. مطابع الهيئة العامة السورية للكتاب، 2010.
- [4]-العسراوي غادة، حسن هالة، اليغش إيلوش نزيه، 2016-دراسة تجريبية حول تحسين الخواص الميكانيكية للمادة الرابطة للأبنية الحجرية القديمة. العدد 57. مجلة جامعة البعث.
- [5]EUROCOD 6., 2001- **Design of masonry structures**. DD ENV 1996-3.
- [6]-نقابة المهندسين، - الكود العربي السوري للجدران الحجرية غير المسلحة في المباني. دمشق، 1994، ص:124.
- [7] SIST EN1015-11, **Methods of test for mortar for masonry part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**. Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 2001.
- [8]Valluzzi .M.R , - **Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls**. In: Pro067 of international RILEM workshop on repairs mortars for historic masonry. 2009, Delft. Netherlands.pp. 382-397
- [9]ASTM C170-90-**Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone**, American society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania.pp:26-28.
- [10]ASTM C568-89-**Standard Specification for limestone of Dimension Stone** .American society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania.pp:53-54

- [11] ASTM C99-87-**Standard Test Method for Modulus of Rupture of Dimension Stone**. American society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania.pp:15-17.
- [12]ASTM E111-82-**Standard Test Method for Young's Modulus Tangent Modulus, Chord Modulus** .American society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania.pp:220-225.
- [13] Lourenço P.B., Rots J.G., Blaauwendraad J, **Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modeling**, 1995, heron,(Vol 40,No.4). pp: 313-340
- [14]ABAQUS, version 6.14-1.Dassault Systems Simulia Corp, USA. 2014
- [15]Jankowiak T.and OdygowskiT, **Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model**. Foundation of civil and environmental engineering house of Ponznan university of technology(6) ,2005,.pp:53-69.
- [16] CEN-EN 1998-3, **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance**, 2005 Part 3:Strengthening and repair of buildings.
- [17]-وثائق ومخططات عن المساجد القديمة في دمشق، مكتبة مديرية الآثار والمتاحف بدمشق، 2001.
- [18] Sap2000, **Computers and Structures Incorporated** .version 15, software. Berkeley, CA. 2012.
- [19]-الحسن أحمد سليمان، وعبد السلام محمد أيمن، المنشآت المختلطة. منشورات جامعة دمشق، 1995.
- [20]-الريحاي عبد القادر، العمارة العربية الإسلامية خصائصها وآثارها في سوريا. دار البشائر، 1999.
- [21] -سطاس محمد راتب، وسعود اندراوس، مواد البناء و اختبارها. 1995 ديوان المطبوعات الجامعية. ط:6،