

Study of the Behavior of Masonry Historical Monuments under the Influence of Seismic Loads

دراسة سلوك الأوابد التاريخية الحجرية تحت تأثير الأحمال الزلزالية

غادة العسراوي: كلية الهندسة المدنية والمعمارية - الجامعة الدولية للعلوم والتكنولوجيا - غباغب-سورية.

عنوان التواصل: ghadaesrawi@gmail.com

تاريخ التسليم: ٢٥ شباط ٢٠٢٤ - تاريخ القبول: ١٠ حزيران ٢٠٢٤

ABSTRACT

The main criterion for the progress and advancement of any civilization is the monuments, and other urban features that are considered the glories of that civilization. The Levant region is considered one of the oldest regions rich in civilizations, which characterized by various architectural arts. This research aims to study the behavior of some monuments in Damascus, and it is an attempt to explain the observed behavior of these monuments under the influence of earthquakes. Then we give some indications of the possible consolidation of the facility, given that our Arab countries in general and Syria in particular abound with such buildings, and we will discuss in this research one of these buildings, which is still standing, the Shamia-Mosque in Damascus. The research includes an experimental study for mortar and an analytical study where computer modeling of those monuments used in order to identify potential weaknesses in the studied structure because of its exposure to seismic loads by the finite element method. Laboratory experiments on selected samples similar to those used in the old structures studied in order to obtain a more realistic assessment of the mechanical and engineering properties of building materials used in archaeological monuments, and what this reflects on the actual structural behavior and the development of scientific analysis for the causes of weakness, ancient collapses and clarification of some methods for addressing vulnerabilities.

Keywords: Historical Properties Of Building Materials, Seismic Loads, The Shamia School, Masonry Monuments

المخلص

إن المعيار الرئيس لتقدم ورقي أي حضارة يكون بالأوابد الأثرية، وغيرها من المعالم العمرانية التي تُعد مفاخر تلك الحضارة، وتُعد منطقة بلاد الشام من أقدم المناطق الغنية بالحضارات، التي تميزت بمختلف الفنون المعمارية. يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك بعض الأوابد في مدينة دمشق تحت تأثير الأحمال الزلزالية، وهو محاولة لشرح السلوك المُشاهد لهذه الأوابد تحت تأثير الزلازل، ومن ثم إعطاء بعض مؤشرات التدعيم الممكنة للمنشأة، ودور تحسين المادة الرابطة على السلوك الإنشائي، وذلك نظراً لأن بلادنا العربية عموماً، وسورية خاصة تزخر بمثل هذه الأبنية. وسنتناول في هذا البحث أحد هذه المباني، الذي مازال قائماً، وهو مسجد المدرسة الشامية في دمشق. يشمل البحث دراسة تجريبية للمواد الرابطة ودراسة تحليلية جرى فيها استعمال النمذجة الحاسوبية لتلك الأوابد بهدف تحديد نقاط الضعف المحتملة في المنشأة المدروسة نتيجة لتعرضها للأحمال الزلزالية بواسطة طريقة العناصر المحدودة (Finite element)، كما جرى اعتماد قيم لخصائص مواد البناء مثل قطع الصخر والأجر، والمواد الرابطة كالكسر مل والكلس من خلال المراجع المختصة، مع إجراء تجارب مخبرية على عينات مختارة مشابهة لتلك المستعملة في المنشآت القديمة المدروسة وذلك للحصول على تقييم أكثر واقعية للخصائص الميكانيكية والهندسية لمواد البناء المستعملة في الأوابد الأثرية، وما يعكس ذلك على السلوك الإنشائي الفعلي، ووضع التحليل العلمي لأسباب الضعف، والانهيئات القديمة وتوضيح بعض أساليب معالجة نقاط الضعف.

الكلمات المفتاحية: خصائص مواد البناء التاريخية، الأحمال الزلزالية، المدرسة الشامية، الأوابد الحجرية.

المقدمة

زلزالياً. [١] ويشير الهدوء النسبي الذي تمر به المنطقة والملاحظ منذ بداية القرن العشرين إلى أن المنطقة تمر في طور جمع الجهد والضغط، وهذا الهدوء خادع وكاذب وخير دليل على ذلك، الزلزال الذي حدث في ٦ شباط ٢٠٢٣. تُعد الجدران الحجرية من العناصر الإنشائية المختلطة، من الحجر والمونة، لذلك لا بد من دراسة المونة

تقع منطقة بلاد الشام في شمالي الصفيحة التكتونية للجزيرة العربية، التي تحدها من الشرق الصفيحة الإيرانية، ومن الشمال صفيحة الأناضول، ومن الغرب صفيحة البحر الأبيض المتوسط، ومن المعلوم أن معظم زلازل المنطقة ذات منشأ تكتوني ناتج عن حركة صفائح القشرة الأرضية فيما بينها، حيث تعد منطقتنا نشطة

اعتمدت الجدران السمكية المؤلفة من طبقات عدة (Multi leaves)، حيث يتكون الجدار من طبقتين خارجيتين من الحجارة، أما الطبقة الداخلية فهي من بقايا الحجارة والمونة الرابطة، وفي أماكن أخرى بُني المبنى بواسطة جدران مؤلفة من طبقة واحدة من الحجارة (single leaf)، تبعاً لأهمية المنشأة، والحقبة الزمنية التي بُنيت فيها.



الشكل (1): اشكال بناء الجدران الحجرية المؤلفة من طبقات عدة (الجامع الأموي + قلعة دمشق)

(Mortar)، ووحدات (Units) الحجر [2]، وإن الانتشار الواسع للمباني الحجرية (الشكل (1)) على مر العصور، وضعفها في مقاومة الأحمال الجانبية في مستوياتها، ولا سيما الأحمال الزلزالية، قد أدى إلى حدوث تشققات مختلفة تصل إلى حد الانهيار الجزئي، أو الكامل. تم البناء في بعض الحالات دون مادة رابطة، وفي بعضها الآخر رُبطت الحجارة ببعضها ببعض بواسطة مونة رابطة (mortar)، وقد



الأساسية إضافة إلى الكلس. إضافة إلى مواد بناء أخرى قديمة غير التي ذُكرت، ولكن تم حصر مواد البناء القديمة السابقة الذكر ضمن الأوابد التي حافظت على نفسها على مر العصور في منطقة بلاد الشام.

أسباب انهيارات الأبنية الحجرية عند تعرضها للضعف والهزات
تتعدد أسباب انهيارات الجدران الحجرية عند تعرضها للهزات الأرضية، منها الانهيارات لأسباب جيوتكنيكية، والانهيارات لأسباب إنشائية، إذ تؤدي هذه الأسباب دوراً في بيان مدى كفاءة المنشأة لمقاومة الهزات، ونوعية الأضرار الحاصلة في المبنى عند عدم مراعاتها.

الانهيارات لأسباب جيوتكنيكية
يقصد بالانهيارات الجيوتكنيكية الانهيارات التي تحدث نتيجة لخلل يصيب بنية تربة التأسيس، ويعزى الخلل إلى تمييع التربة، وانزلاقها، إضافة إلى التصدعات، والتشققات في سطح الأرض. [3]

الانهيارات لأسباب إنشائية في المبنى ذاته
تؤدي مادة البناء دوراً أساسياً في مدى كفاءة المنشأة لمقاومة الزلازل فكلما كانت المادة خفيفة الوزن، وذات قدرة تحمل مرتفعة لإجهادات الضغط، والشد في آن واحد، وتتصف بمطاوعة مرتفعة كانت هذه المادة أكثر مقاومة للأفعال الديناميكية الناتجة عن الزلازل، كما يحدث تدهور للأثر نتيجة لتحلل المواد مع الزمن أو نتيجة لعوامل خارجية، أو يحدث الانهيار نتيجة لخطأ تصميمي، أو تنفيذي؛ إذ حدثت انهيارات كثيرة بسبب مشكلات في الأساسات، فكلما قل عمق التأسيس للمنشأة الترابية ازداد احتمال انقلابها، أو انزلاقها. كما أن قلة الروابط بين القواعد (الشيئجات) تزيد من خطر الهبوطات التفاضلية الناتجة عن هبوط التربة، أو تمييعها، ومن أهم الأسباب التي تؤدي إلى انهيار المنشآت نتيجة للزلازل، مسألة عدم التناظر في المسقط الأفقي، فالجملة الإنشائية المقاومة يجب أن تكون أقرب إلى التناظر، [4] إن حمولة الزلازل والهبوط التفاضلي في وضع المساند عادة، هما السبب الرئيس في حدوث ضرر، وانهيار المنشآت الحجرية لكن ضرر الهبوط التفاضلي لوضع المساند أقل تأثيراً من الزلازل، إذ إن التربة تحقق توازناً مع مرور الزمن، [3] ويبين الشكل (2) انهيار في الجدران الحجرية في المستوي، والانهيار في الجدران خارج المستوي.

يمكن حصر أنواع المواد المستخدمة في البناء لمختلف العصور التاريخية لمنطقة بلاد الشام بما يلي [3]:

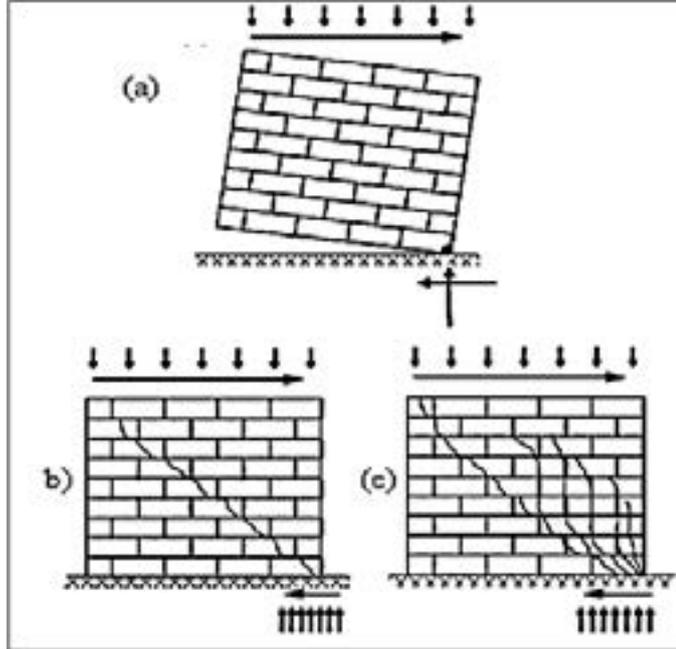
1. العمارة الهيلينستية: اعتمد الهيلينستيون في عمارتهم على الحجر، ولا سيما الحجر الكلسي ولم يعرفوا الملاط.
2. العمارة الرومانية: أقيمت العمارة الرومانية بالحجر المنحوت بدقة في الجدران، والأعمدة والأسقف المستوية، والقباب ولم يستعمل الملاط في بداية الأمر لتثبيت الحجارة ببعضها ببعض، بل استعملت الفواصل المعدنية، والغضار المحروقة، ولقد اهدى الرومان إلى نوع من الملاط يشبه الإسمنت ويتكون من تراب بركاني مخلوط بكسر الحجارة، أو الرخام المعجون بالكلس وقد استعملوا قوالب طينية صلدة في بناء الجدران، ولم يستخدموا الأجر إلا نادراً بعكس ما كان شائعاً في روما والولايات الأوروبية التابعة لها.
3. العمارة البيزنطية: إضافة إلى استخدام مواد العصر الروماني فإننا نجد سقوفاً على شكل جمولانات من الخشب والقرميد والعمد الحجرية البيضاء المقطوعة من الصخر الكلسي، فضلاً عن استعمال الجوائز الحجرية (الربد) في السقوف والمحمولة على عقد ترتكز على أعمدة مربعة غالباً، ويكون حجر البناء هو البازلتي.
4. العمارة الإسلامية: جرى في العهد الأموي الاعتماد بوجه رئيس على الحجر الكلسي المنحوت والحجر الغشيم إضافة إلى الأجر مع الطلاء بالجص، فضلاً عن إدخال الخشب في جميع عناصر البناء.
5. أما في العهد العباسي: فقد غلب على المباني استعمال اللبن في الأسوار والجدران، وأما الأجر فقد استخدم في العقود والقباب وكسوة الجدران الخارجية. وقد شيّدت الجدران من الحجر والخشب حيث يوضع الخشب فيها على شكل دعائم أفقية تفصل بين مداميك عدة، وكذلك شيّدت جدران الحجر المزدوجة من طبقتين من الحجر النحيت، وتم حشو الفراغ بينهما بأحجار الدبش ممزوجة بالمونة الكلسية.
6. كما استخدمت أسافين من الرصاص والمعدن، ولا سيما في العمارة العثمانية وذلك في جسم المآذن والقباب وغيرها، كما انتشرت مادة ملاط سُميت بالقصر مل وهي المادة الرابطة



الشكل (٢): انهيار الجدران الحجرية في المستوي وخارج المستوي [٣]

النمط الثالث: انهيار في الشد القطري: [٦]

تسبب إجهادات الشد في هذا النمط من الانهيار في القطر المشدود في الجدار الحجري ظهور شقوق قطرية على طول الحقل المضغوط المتعامد معه (الشكل ٤-ب)، أو انهيار في الشد القطري مع تحطم الزوايا على الضغط، وهو نمط انهيار مشابه لنمط الانهيار في الشد القطري، لكن مع حصول تحطم لزوايا الجدار نتيجة لتركز إجهادات الضغط في طرفي الحقل المضغوط، إضافة إلى وجود تشققات قطرية ناتجة عن الشد القطري (الشكل ٤-ج).



الشكل (٤): ميكانيكيات الانهيار الأساسية للجدار الحجري عند تطبيق أحمال جانبية في مستوي [٦]

الإعداد للدراسة العددية باستعمال طريقة العناصر المحدودة: وصف المدرسة الشامية:

تقع المدرسة الشامية في سوق ساروجا، وسميت بالبرانية بسبب وجودها خارج سور دمشق، وتصنف المدرسة الشامية على أنها أقدم مساجد الأيوبيين الشكل (٥)، أنشأتها فاطمة بنت نجم الدين أيوب، وهي كغالبية المشيدات الأيوبية ليس فيها عناصر تزيينية زخرفية، ويتألف صحنها من فسحة سماوية كبيرة مستطيلة الشكل فيها أقواس أبلقية من الحجر الأسود والأبيض والمزج تغطي الرواق الشمالي للصحن، ويتوسط الصحن بركة حجرية مستطيلة الشكل، يتقدم حرمها رواقاً يرتكز على دعائم حجرية ضخمة للوصول إلى حرم قاعة الدرس وبيت الصلاة عبر بوابة كبيرة الحجم في أعلى بابها ساكف حجري، كما يوجد فيها قاعة الضريح التي تحتوي على ثلاثة قبور. يجري دخول المدرسة الشامية من الشمال، وهي تتألف من فسحة سماوية مستطيلة تطل عليها مجموعة من الأقواس من الأبلق على شكل رواق يفصل بينها وبين الغرف التالية، ويوجد

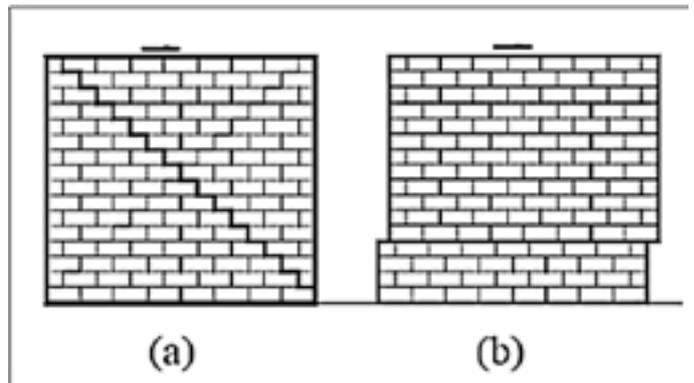
أنماط انهيار الجدران الحجرية تحت تأثير الأحمال الزلزالية في مستوي

إن أشكال الانهيار المحتملة يمكن تلخيصها بثلاثة أنماط، وتتأثر تأثيراً كبيراً بمقدار الأحمال الشاقولية المترامنة مع الأحمال في مستوي الجدار، ومقاومة مادة الجدار، إضافة إلى تأثيرها بنسبة ارتفاع الجدار إلى عرضه أو ما يسمى بنسبة الواجهة (Aspect Ratio). النمط الأول: انهيار القص (Shear Failure) وفق Elway et al [٥] وله شكلان:

١. انهيار القص بشكل متدرج، ويظهر هذا الشكل من الانهيار عندما تتجاوز إجهادات الشد الرئيسية الناتجة عن تراكم عمل الأحمال الشاقولية والأحمال الأفقية مقاومة الجدار الحجري في الشد. إذ تظهر على الجدار الحجري شقوق قطرية على شكل درج، فإذا كانت مقاومة المونة (Mortar) أكبر من مقاومة وحدات الحجر (Units) تمر الشقوق عبر وحدات الحجر، وإذا كان العكس تمر الشقوق عبر فواصل المونة (الشكل ٣-أ).
٢. انهيار القص الانزلاقي، ويظهر هذا النمط من الانهيار عندما تكون الأحمال الشاقولية صغيرة بالمقارنة مع الأحمال الجانبية، أو عندما يكون معامل الاحتكاك صغيراً بسبب نوع المونة المستعملة، إذ يظهر على الجدار الحجري شقوق أفقية في فواصل المونة لتشكل هذه الشقوق مستوى انزلاق على كامل طول جدار البلوك، كما هو مبين في الشكل (٣-ب).

النمط الثاني: انهيار على الانقلاب Roca and Araiza [٦]:

يظهر هذا النمط من الانهيار عندما تكون الأحمال الشاقولية صغيرة جداً مقارنة مع الأحمال الجانبية، ويكون معامل الاحتكاك كبيراً بفضل جودة المونة المستعملة، وبالتالي تبقى فواصل المونة متماسكة مع وحدات الحجر والالتصاق بينهما كافٍ لتحمل الأحمال المطبقة ما يؤدي إلى انقلاب الجدار حول إحدى زواياه، التي بدورها يمكن أن تتحطم نتيجة لحصول إجهادات ضغط مرتفعة في هذه النقطة، كما هو واضح في الشكل (٤-أ)، الذي يبين ميكانيكيات الانهيار للجدار الحجري عند تطبيق أحمال جانبية في مستوي.



الشكل (٣): ميكانيكيات انهيار الجدار الحجري في القص عند التحميل في مستوي [٥]



الصحن والفسحة السماوية للمدرسة الشامية

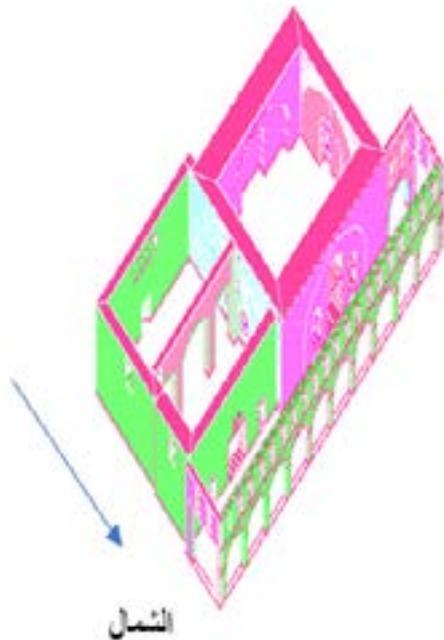


المحراب

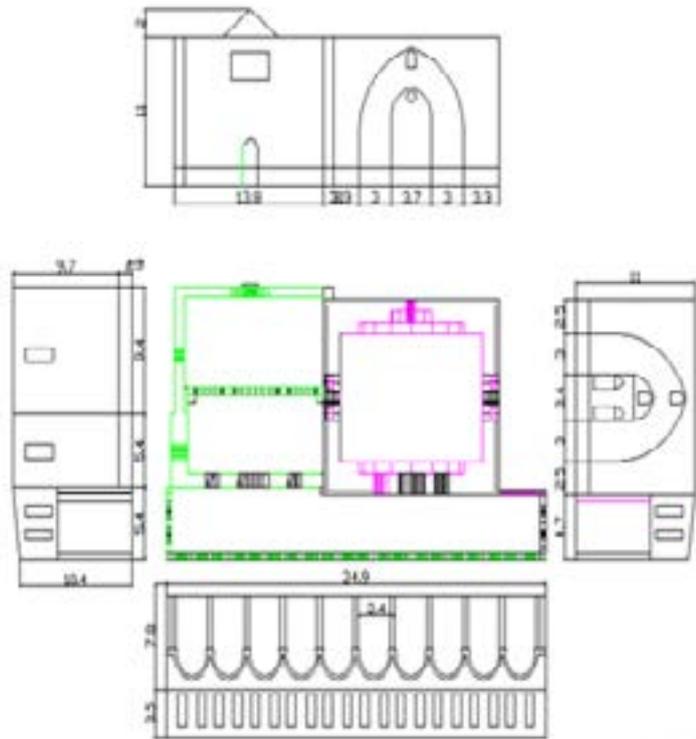


قاعة الضريح

حوض مائي في الشمال الغربي، وقاعة للدفن في الجنوب الغربي، ومصلى يطل على غرفة الدفن في الجنوب الشرقي، ومئذنة ذات مقطع مربع إلى الشمال الشرقي. وقد كانت المدرسة بالأساس أكبر من ذلك بكثير، وتضمنت غرفاً للطلاب، وسكناً للمدرسين، ولكن لم يتبق منها أي شيء. يعد المصلى الجزء الأكثر تميزاً في المدرسة، يتألف مدخله من بوابة مركزية كبيرة، تحيط بها بوابتان أصغر، يعلو كلاً منها نوافذ مفتوحة محمولة على أقواس. وعلى عكس الأضرحة الموجودة في باقي المدارس، لم تتم تغطية هذه القاعة بقبة بل بقبوة متصالية مدببة قليلاً، وقد جرى تزويدها بمحراب على الجدار الجنوبي. ومن المثير للدهشة بقاء الزخارف الجصية المخزومة والملونة التي تغطي ثلاثة من الجدران الداخلية والقبوة من الداخل، وقد تم تنفيذ هذه الزخارف على شكل حقول متناظرة مملوءة بالأرابيسك الهندسي وبأشرطة الكتابات بالخطين النسخي والكوفي. احترقت المدرسة تماماً سنة ٧٩٣ هجرية قبل أن يعاد بناؤها من جديد. يمثل الحجر الطبيعي مادة البناء الأساسية، وقد اعتمد البنائون على المواد المحلية في البناء والإكساء، إذ استعملت الأحجار الكلسية والبازلتية المنحوتة بوجه جيد كمادة أساسية في تشكيل الجدران الحاملة، وذلك لإعطائها شكلاً جمالياً من خلال استعمالها في مداميك متناوبة، وإن التغطية الداخلية هي التغطية الكلسية، أما الخارجية فكانت من التغطية الكلسية المصفحة بالرصاص، وإن المادة الرابطة مقاومة للرطوبة (مادة القصر مل)، وهي مونة مكونة من التراب الأحمر والكلس والرماد، كما استعمل في القباب الخشب والقرميد والحجارة وطبقات الرصاص، بسبب هطول الثلوج والأمطار بغزارة، وفي الأسقف المائلة استخدم الخشب، وفي الأساسات استخدمت الصخور الكبيرة والطين المجبول بالكلس والتراب، واستعمل الحجر والرخام في رصف الأرضيات [٧]، تم القيام بعملية الرفع المعماري والتوثيق الإنشائي للمنشأة ورسم الواجهات من الخارج.



الشمال



صورة فراغية لمبنى المسجد مع تحديد اتجاه الشمال

مسقط وواجهات للمدرسة الشامية

الشكل (٥): وصف المدرسة الشامية بالصور والمخططات

تمر عملية بناء النموذج العددي بخطوات عدة، تبدأ باختيار أبعاد ومقاطع النموذج، ومن ثم اختيار العناصر المحدودة المناسبة لكل عنصر من عناصر الجملة الإنشائية، والخطوة التالية تتضمن اختيار الطرائق المناسبة لنمذجة تصرف المواد المشكلة للنموذج، ومن ثم ربط العناصر المختلفة لتأمين الترابط، والعمل المشترك فيما بينها، وتُختار بعد ذلك الشروط المحيطة المناسبة لمحاكاة النموذج التجريبي، وإجراء عملية التحليل، واستخراج النتائج، بواسطة طريقة العناصر المحدودة

(Finite element) باستعمال برنامج Sap 2000 v.15 [12].

مواصفات المواد:

جرى الرجوع إلى مديرية الآثار والمتاحف، ومديرية آثار دمشق، ووزارة السياحة، للحصول على المخططات والمعلومات المتوفرة واللازمة للدراسة التحليلية للأبدة، [13] وتم بناء النماذج التحليلية وفق الأبعاد الحقيقية، وباعتماد مواصفات المواد التي تم الحصول عليها، التي تمثل مواصفات المواد التي بنيت منها المدرسة، ويبين الجدول (1)، والشكلان (٨ و٧) مواصفات المواد للمدرسة التي تم اعتمادها في النمذجة من المراجع المذكورة، ومواصفات المواد التي أخذت من التجارب التي تمت في مخبر كلية الهندسة المدنية في جامعة دمشق، و في مخبر كلية الهندسة المدنية بالجامعة الدولية للعلوم والتكنولوجيا واختبرت وفقاً للكود الأوروبي، [14] وللكود العربي السوري للجدران الحاملة غير المسلحة في المباني [15] ووفق المواصفات القياسية الأمريكية للاختبارات والمواد ASTM, C170-90 [16] ومن خلال المراجع [17] [18] لتحديد الخصائص الهندسية، والميكانيكية للحجر الطبيعي والمونة الرابطة.

الجدول (١) مواصفات مواد البناء للمدرسة الشامية

| المراجع | قيم مرجعية | [18] [17] التجارب | خواص المادة | المادة |
|--------------|------------|-------------------|----------------------------------|----------------------|
| المراجع (١٣) | 300 | 460 | إجهاد الضغط kg/cm ² | قطع حجر |
| | 21 | 34 | إجهاد الشد kg/cm ² | رصين |
| | 41000 | 42000 | عامل المرونة kg/cm ² | كلسي |
| | 2.4 | 2.4 | الوزن الحجمي (t/m ³) | منتظمة مع مادة رابطة |

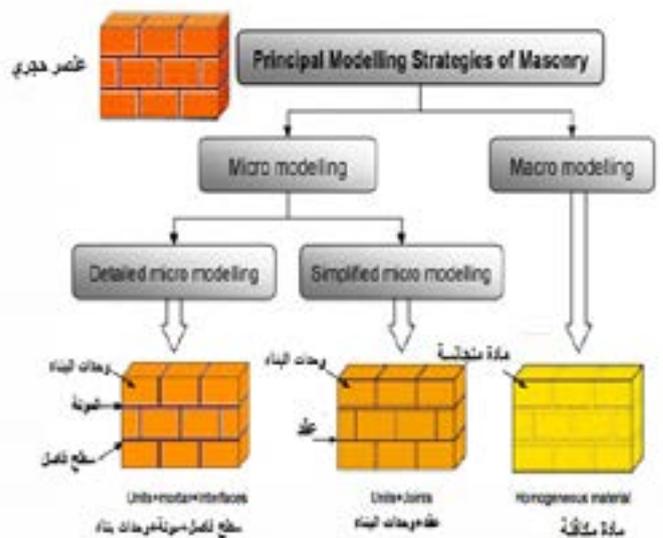
وجدت أساليب مختلفة في بناء الجدران منها بأحجار منتظمة كبيرة مشذبة بصف واحد، أو صفيين مزدوجين. جرى البناء بالحجر أو بالبلين أو بالبلين المكسو بالحجر أو بجدران مزدوجة عريضة مع حشو الفراغ بينها بالطين وكسر الفخار وهي عازلة حرارياً، وقد قام البنائون بالتأسيس للجدران على أرضية صخرية، ويكون حجر الأساس من الحجر الضخم والطين المجلول بالكلس والتراب، ويجعل بعرض كبير، حيث يتم صف المداميك على نحو متواز ويملاً ما بينها بالجص والحصى "الركة"، ويخلط معاً باستعمال ماء "الزوبار" وهو ماء عكر يؤخذ من زيت المعاصر. [8] اكتُشف من خلال الدراسة المرجعية أن الأوابد المشيدة في أواخر القرن الثاني عشر في العهد الأيوبي تتميز بالمنشآت الضخمة الأبعاد، والسماكات الكبيرة، وغير المعهودة في العصور السابقة واللاحقة، وقد علل معظم الدارسين في فن العمارة الإسلامية سبب السماكات الكبيرة لمنشآت ذلك العصر بالظروف العسكرية الناتجة عن الحروب الصليبية، [11] ولكن هذا البحث يقدم تفسيراً أكثر وضوحاً ومنطقياً لهدف السماكات الكبيرة لهذه المنشآت وضخامتها، لأن المساجد والمدارس والمقامات، لم تكن يوماً من الأيام حصوناً لقتال الأعداء، وقد شهدت معظم عصور هذه المنطقة حروباً كثيرة غير الحروب الصليبية، والأرجح أن بنائنا القدماء قد وجدوا من خلال المشاهدات الواقعية أن المنشآت ذات السماكات الكبيرة قد حافظت على ذاتها، وصمدت بعد تلك الفترة من النشاط الزلزالي العنيف التي مرت بها المنطقة، [1] فقاموا بتقليدها واعتماد أسلوبها، ونجد أنه في العصور اللاحقة، التي شهدت فترات طويلة من الهدوء للنشاط الزلزالي، بدأت تظهر المنشآت الرشيقة والأقواس المتنوعة، والعناصر الفنية الأخرى والزخارف.

نمذجة الجدران في الدراسة التحليلية

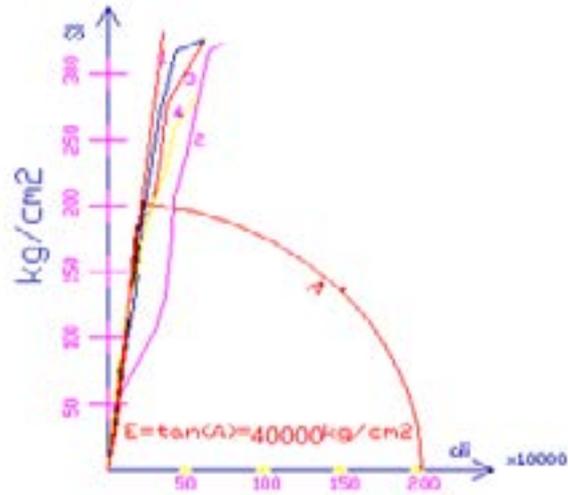
تُعد العناصر الحجرية من المواد المركبة، كونها تتألف من أكثر من مادة، ولكل منها خصائصه وسلوكه، بوجه مستقل عن الآخر، إضافة إلى الفعل المشترك بينها [9]، ويتطلب التحليل الإنشائي القيام بخطوات عدة للحل؛ تعتمد بداية على عملية النمذجة للعنصر المدروس، وقد تعددت الدراسات في هذا المجال، وإن اختيار الطريقة الأسهل في النمذجة، التي تعطي الحل الأقرب إلى الواقع، هو هدف مهم بالنسبة للمهندسين في دراساتهم الإنشائية، لأنه يختصر عليهم الوقت والجهد. تجري نمذجة الجدران الحجرية وفق الطريقتين التاليتين: (الشكل (٦)): [10]



الشكل (٧): صور العينات التجريبية



الشكل (٦) طرائق نمذجة الجدران الحجرية



الشكل (٨): حساب معامل المرونة لعينات الحجر والمونة [١٩]

خمس عينات عُرِضَتْ لحمولة الضغط حتى الكسر، وذلك وفق الكود العربي السوري للجدران الحجرية غير المسلحة. ويبين الجدول (٢) نتائج أعلى قيم لمقاومة المونة تم الحصول عليها.

كما أُضيفت الألياف الزجاجية الى المونة الكلسية بنسبة ٢٪ من وزن الكلس وكانت نسبة الخلط ١:٣ وهي نسبة الكلس للحصويات الموجودة في الخلطة، ونسبة اللاتكس المضاف ١,٥٪ من وزن الكلس، وقد حُسِبَت المقاومة لكل خلطة كمتوسط لمقاومة

| الجدول (2): مواصفات ونتائج اختبار الخلطات المحضرة في المختبر | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|
| رقم الخلطة | الخلطة | مكونات ونسب الخلطة | kg/المقاومة في الضغط cm ² |
| ٤ |  | كلس-رمل - آجر-بوزولان 0.25:0.25:2.5:1 | ٢٣ |
| ٥ |  | كلس - رمل- رماد-بوزولان- ألياف زجاجية - لاتكس 1::2.50.25::٠,٢٥ ١,٥:٢٪ 1:2.5:0.5 | 39 mortar2 |
| ١ |  | كلس - رمل 1:3 | 12 mortar1 |

من المونة الأفقية، ووحدات البناء، أما فواصل المونة الشاقولية فهي لا تؤثر بعامل المرونة الخاص بالجدار (حيث يُؤخذ في الحسبان التشوهات المتعامدة مع فواصل المونة الأفقية)، وتعطى قيمة عامل المرونة الطولي للجدار بدلالة عوامل المرونة الطولية لكل من الحجر، والمونة بالعلاقات الآتية: [٢٠]

جرى استعمال macro modeling للنمذجة، كما جرى تحليل النموذج العددي باستعمال طريقة التكامل المباشر اللاخطي nonlinear direct integration لإجراء تحليل لا خطي، يأخذ في الحسبان لا خطية المادة (Materially Non-linear Analysis MNA). يتأثر عامل المرونة الطولي للجدار الحجري بعوامل المرونة الطولية لكل

$$\frac{E_M}{E_b} = \frac{1 + \gamma}{1 + \frac{\gamma}{B}} \cdot \gamma = \frac{T_m}{T_b} \cdot B = \frac{E_m}{E_b} \dots \dots \dots 1 - 8$$

E_M : عامل المرونة الطولي للجدار. E_b : عامل المرونة الطولي للحجر. E_m : عامل المرونة الطولي للمونة.
 T_m : سماكة فاصل المونة. T_b : ارتفاع وحدة الحجر.

| الجدول (3) أبعاد العينات والنتائج التي تم الحصول عليها | | | | |
|--|------------------------|-------|-------|--|
| العينة | حمولة الانهيار F(t) | L(mm) | T(mm) | مقاومة القص للرباط F_f kg/cm ² |
| sh1 | 238,00 | 250 | 80 | 11.9 |
| sh2 | 249,00 | 250 | 80 | 12.45 |
| sh3 | 248,00 | 250 | 80 | 12.4 |
| sh4 | 258,00 | 250 | 80 | 12.9 |
| sh5 | 254,40 | 250 | 80 | 12.72 |

مقاومة الرباط للقص

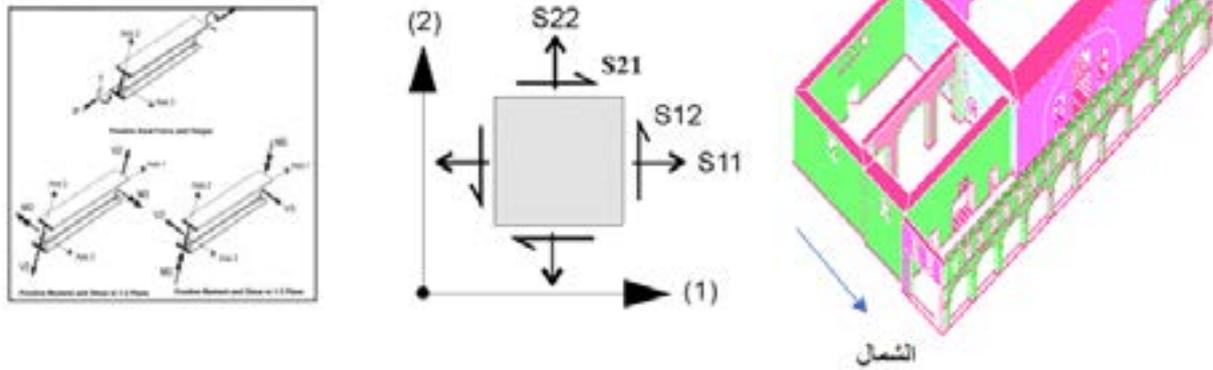
خُصِّرت خمس عينات لتعيين مقاومة القص للرباط ((Masonry shear bond strength اعتماداً على الاختبارات القياسية الأوروبية European Testing Standard EN 1052-3 [21]، وبين الجدول (3) أبعاد العينات التي اختُبرت، والنتائج التي حُصل عليها، كما يبين الشكل (9) العينة أثناء الاختبار، وقد بلغ متوسط مقاومة القص 12,0 kg/cm².



الشكل (9): العينة أثناء الاختبار

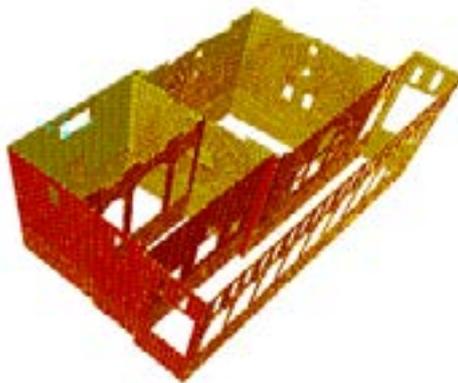
تحديد النموذج الرياضي للمنشأة

جرى اعتماد النموذج الرياضي الحاسوبي بعد التأكد من أبعاد عناصر المنشأة الفعلية وخصائص موادها ومركبات الطيف وجميع ما يلزم للنمذجة. يبين الشكل (10-a) النموذج الرياضي المعتمد للمنشأة، إضافة إلى أشكال توضح القوى والإجهادات الداخلية في العناصر المنتهية finite elements المستعملة في الحل الحاسوبي.

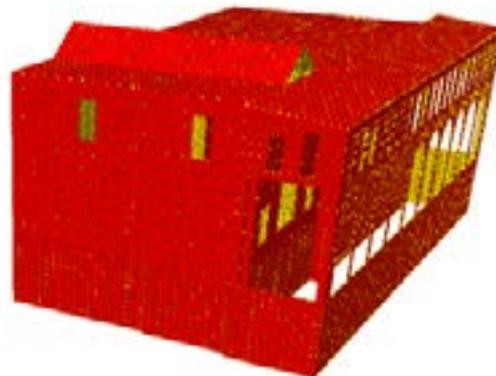


الشكل (10-a): شكل توضيحي للقوى والإجهادات الداخلية في العناصر المستعملة في التحليل الحاسوبي

الشكل الفراغي للمسجد (الجران الحماله فقط)



الشكل الفراغي للمسجد



الشكل (10-b): شكل يبين النموذج الحاسوبي المعروف للمسجد

الطريقة الديناميكية الحاسوبية:

- زلزال باتجاه شمال جنوب: قوة قص قاعدية تساوي:
FX=1592.8t
 - زلزال باتجاه شرق غرب: قوة قص قاعدية تساوي:
FY=215.4t
 - زلزال باتجاه عام يعطي قوة قص قاعدية تساوي: FX=1689.3t
- F Y = 1 3 5 7 . 3 t

بمقارنة قوة القص الديناميكية من أجل الزلازل الثلاثة بحسب مركبات الطيف، نجد أن الزلزال ذو مركبتي الطيف باتجاه Z، Y، مقارب تأثيره للزلزال بثلاث مركبات طيفية، وبالتالي فإن التأثير الزلزالي الكبير سيكون نتيجة المركبة الزلزالية باتجاه Y وهو اتجاه الشمال.

التحليل التراكمي

جرى تحديد العناصر المنهارة (التي فيها الإجهادات أكبر من قدرة تحمل المادة) في النموذج الرياضي نتيجة للتحليل الأولي، ومن ثم جرى حذف هذه العناصر من أجل التحليل الثاني، والشكل (١٥) يبين عملية الحذف والنموذج الرياضي المعتمد في التحليل الثاني. نجد من خلال مقارنة النموذج قبل الحذف والنموذج بعد الحذف أن إجهادات الانهيار في مسجد المدرسة الشامية في عناصر الرواق مثل العناصر ذات الأرقام ٢٦٠ و ٢٥٩ و ١٧٨ و ٢٢٧ و ٢٣١... والتي جرى حذفها في الجدول المقابل. تكون طبيعة إجهادات الانهيار المسيطرة في مسجد المدرسة الشامية من أجل التحليل الأولي إجهادات محورية شادة في عناصر الرواق والسقف في حين تكون إجهادات القص ذات تأثير أقل في العناصر نتيجة الزلزال .Sxy

تحليل النموذج الرياضي

جرى تحليل الإجهادات المتولدة نتيجة للزلازل الثلاثة المعتمدة في الدراسة من خلال تحديد القيم وساحات إجهادات الانهيار المتولدة في المنشأة [٢٢]. كما جرت مناقشة الساحات الإجهادية المتولدة في المنشأة، وبعدها تم تحقيقها بالنسبة لإجهادات قدرات تحمل المواد نتيجة للتحليل الزلزالي الأولي للمسجد.

تحليل الإجهادات المتولدة نتيجة للزلازل الثلاثة المعتمدة في الدراسة

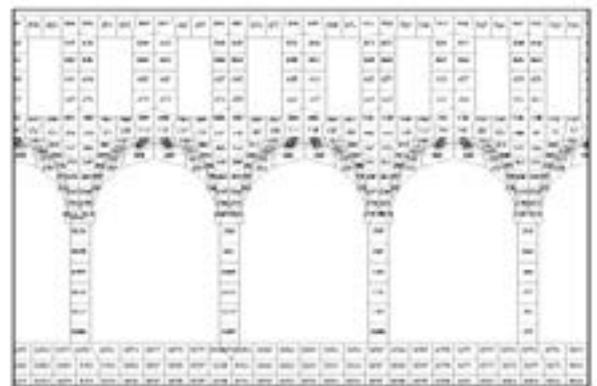
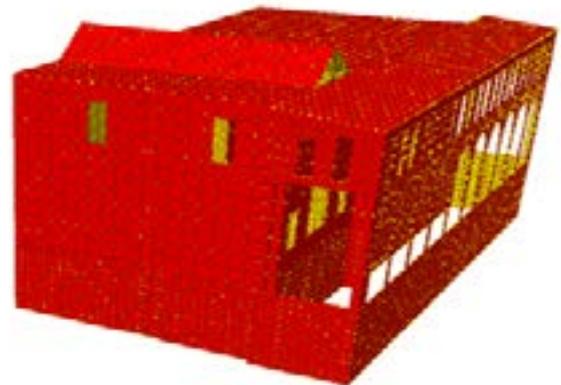
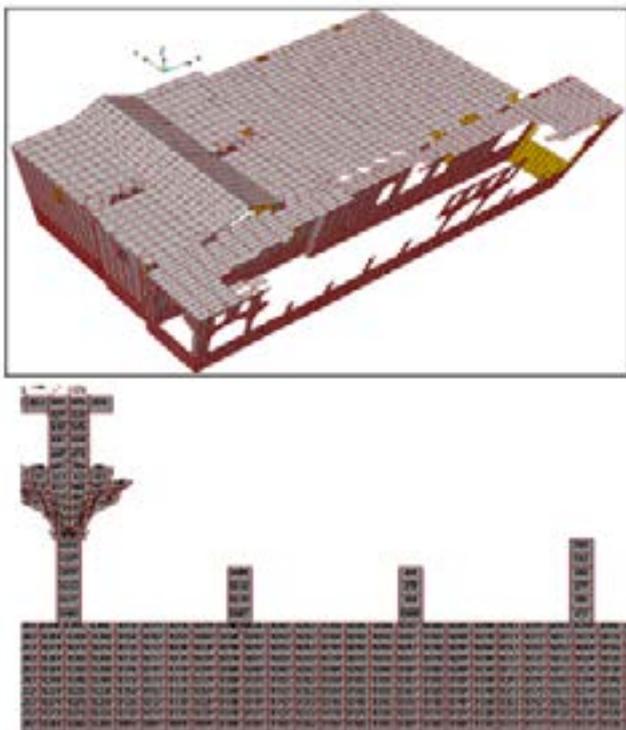
لقد جرى تحليل الإجهادات المتولدة نتيجة للزلازل الثلاثة المعتمدة في الدراسة، وهي اتجاه شمال جنوب، واتجاه شرق غرب ثم التحليل الفراغي. كما جرى تحليل المنشأة وحساب الإجهادات لحالة الأحمال الستاتيكية فقط (الميتة والحية). وتبين الأشكال (١١) و (١٢) و (١٣) و (١٤) الإجهادات الناتجة عن هذه التحاليل. (الأشكال موجودة ضمن الملحق).

قوة القص القاعدية الديناميكية وقوة القص القاعدية الستاتيكية المحسوبة وفق الكود العربي السوري: الطريقة الستاتيكية اليدوية (الكود):

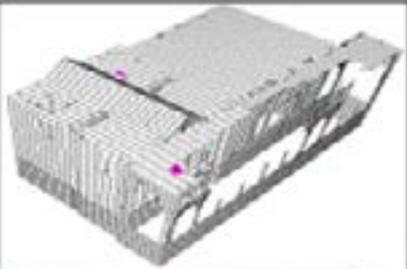
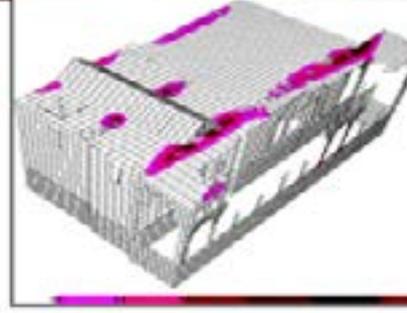
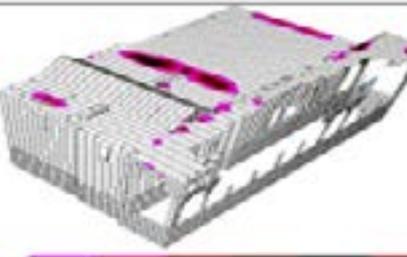
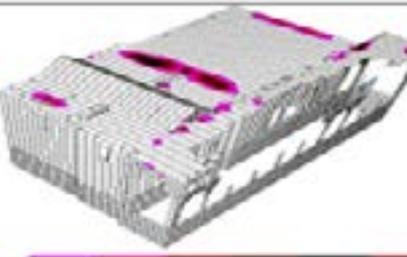
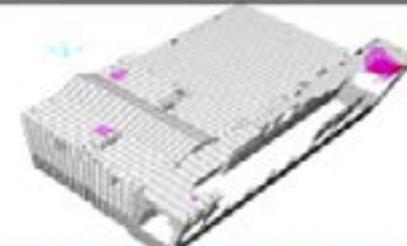
Z=0.4 منطقة دمشق I=1.25 عامل الأهمية K=2.0
(من أجل المنشآت الخاصة)
S=1.4 التربة متوسطة المقاومة. T=0.2966 C=0.12
K.C=0.24 (0.24>0.24>0.06)
C.S=0.168>0.14 → C. S=0.14
W=8641 ton = الوزن الكلي
F=0.4x2.0x0.14x1.25x8641=1209.7t

النموذج بعد حذف العناصر (التحليل الثاني)

النموذج قبل حذف العناصر



الشكل (١٥): النموذج الرياضي المعتمد في التحليل الثاني

| الإجهاد | مخطط الإجهادات | قيم الإجهادات (kg/cm^2) | التحقيق |
|-------------------------------|--|--|---------|
| إجهاد الضغط المحوري S22 |  | تتراوح الإجهادات في عامة نقاط المنشأة بين $-9.9 \rightarrow 0$ | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري S22 |  | تركز الإجهادات الخاصة الكبيرة بين $-16 \rightarrow -12$ في أعمدة الرواق ويوجه بسيط في أسفل باقي أعمدة القوس ويبلغ الرواق | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري S11 الأفقي |  | تتراوح الإجهادات في عامة نقاط المنشأة بين $+0.5 \rightarrow 0$ | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري S12 |  | تركز إجهادات شادة كبيرة تتراوح من $+6.7 \rightarrow +0.7$ في أعمدة وعناصر الرواق وبين $+10 \rightarrow +3$ تركيز في السقف عند أعلى الحدار المقابل وأعلى أعمدة القوس الداخلي وأطراف السقف | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري الأفقي S11 |  | تتراوح الإجهادات في عامة نقاط المنشأة بين $+3 \rightarrow 0$ | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري الأفقي S12 |  | تركز إجهادات شادة كبيرة تتراوح من $+6 \rightarrow +3$ في أعمدة وعناصر الرواق وأعلى الحدار المقابل وعند زوايا الحدران وأطراف السقف | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري S12 |  | تتراوح الإجهادات في عامة نقاط المنشأة بين $+3 \rightarrow 0$ | محلقة |
| إجهاد الشد المحوري S12 |  | تركز إجهادات قاسية كبيرة تتراوح من $+5.7 \rightarrow 3.5$ في أعمدة وعناصر الرواق وأعلى وفي زوايا السقف | محلقة |

الشكل (١٦): نتائج التحليل الزلزالي التراكمي في السقف والمنشأة ككل

الشكل المتوقع للانهييار النهائي

بعد تحديد نقاط تركز الإجهادات الكبيرة نتيجة للتحليل التراكمي جرى حذف العناصر المنهارة كما هو مبين في الشكل (١٧)، تكون طبيعة ساحات إجهادات الانهييار المسيطرة في مسجد المدرسة الشامية من أجل التحليل الثاني هي إجهادات شادة شاقوليه وأفقية في كلا الاتجاهين من عناصر سقف الرواق، وعند مناطق استناد السقف على الجدران، في حين تكون إجهادات القص الداخلية ذات تأثير أقل في العناصر نتيجة للزلزال Sxy.

أهم النقاط الناتجة عن التحليل الزلزالي للمسجد

أ. لا يملك مسجد المدرسة الشامية مقاومة جيدة لمقاومة القوى الزلزالية، إذ تتشكل نقاط ضعف كبيرة في الرواق ومحيط السقف وحول الفتحات، فمن خلال التحليل الأولي، تبين أن الحركة الزلزالية المسيطرة هي الانتقال باتجاه Y، وتبين من التحليل التراكمي أن الحركة الزلزالية

ب. الأساسات شريطية تحت جدران المسجد، ويقع عمق التأسيس على منسوب خمسة أمتار من سطح الأرض في التربة الأخرى، حيث يتأثر مسجد المدرسة الشامية تأثيراً كبيراً بالقوى الزلزالية وتتشكل إجهادات شادة ويكون التأثير الأكبر في الرواق. ت. تعد الأساسات أكثر عناصر المنشأة خطراً من الناحية الإنشائية، فبضعف الأساسات لا يكون ثمة معنى لقوة ومثانة العناصر الأخرى من المنشأة. ولسوء الحظ فإن هذه العناصر هي أكثر عناصر المنشأة اتصالاً وتأثراً بالعوامل المحيطة. فكانت ولا زالت السبب في كثير من تصدعات المنشآت وانهييارها. استدعى هذا

القديمة، مع محدودية أنواعها، كانت في كثير من الأحيان فاعلة في جعل الإجهادات المتشكلة في التربة ضمن نطاق الإجهادات الضاغطة التي تتحملها التربة نتيجة للحمل الشاقولي.

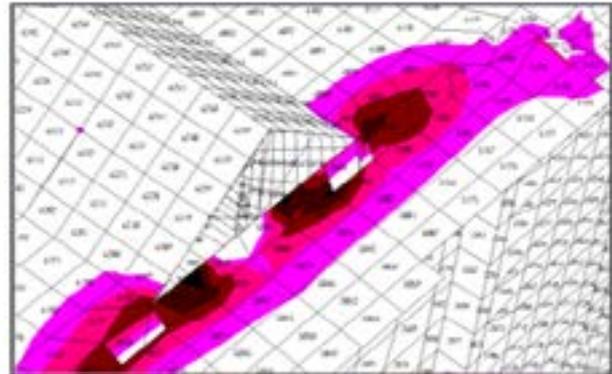
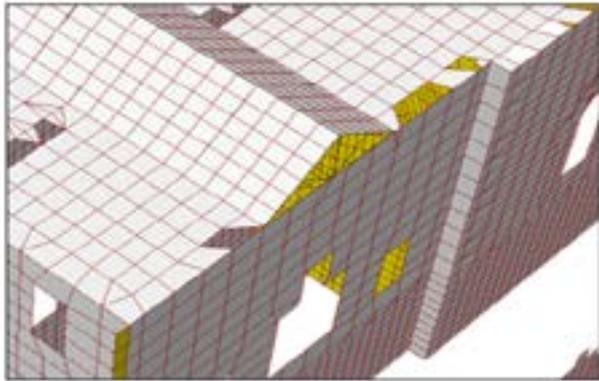
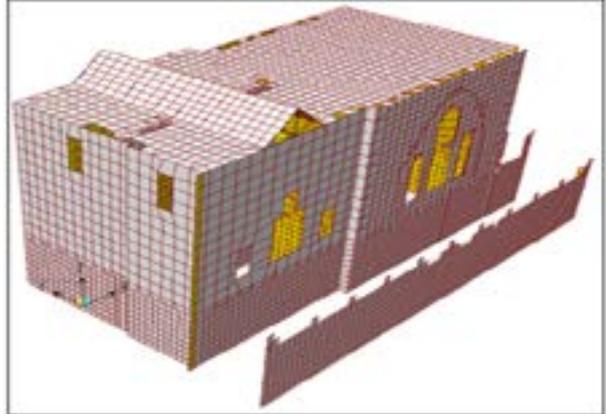
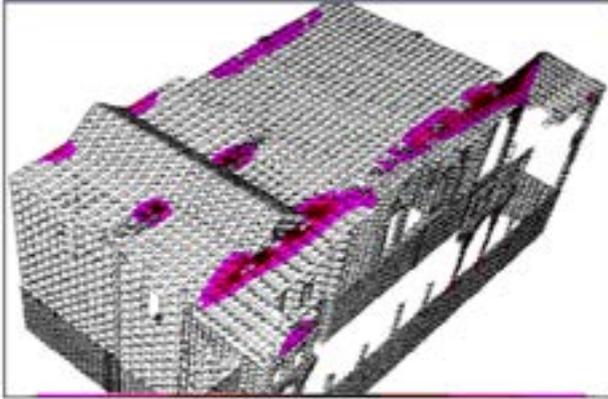
جرى تحديد الإجهادات الأكبر في تربة الموقع من خلال مراحل التحليل، حيث يعطي التحليل الأولي أكبر قيم لإجهادات التربة، التي تكون إجهادات ضاغطة أصغر من قدرة تحمل التربة، والشكل (١٩) يوضح مخطط إجهادات التربة.

الأمر من مهندسي العمار على مختلف عصورهم البحث عن النوع الأفضل من الأساسات لنقل الأحمال من المنشأة إلى التربة بأقل المخاطر.

ث. كانت مواد البناء المستعملة في العصور القديمة مواد لا تتحمل قوى شادة كبيرة (الحجر والمواد الرابطة - الحجر العشيم أو الركة) فكان لا بد أن تكون بنية وشكل الأساس مرتبطين بمواصفات هذه المواد، ويجد المشاهد للصروح والمباني القديمة أن الأساسات

النموذج بعد حذف العناصر (التحليل الثاني)

النموذج قبل حذف العناصر



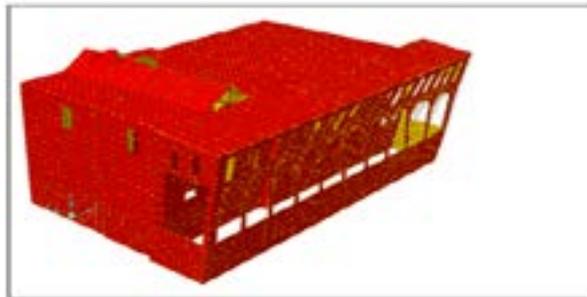
الشكل (١٧): النموذج بعد حذف العناصر

قيمة الانتقال الأكبر في المنشأة

مخطط العنق الأساسي للمنشأة

نوع الحمولة

$D_x (e-w) = 2.99mm$
في عناصر السقف الجملوني
 $D_y (n-s) = 11mm$
في عناصر الرواق
الدور الرئيس $T=0.2966sec$



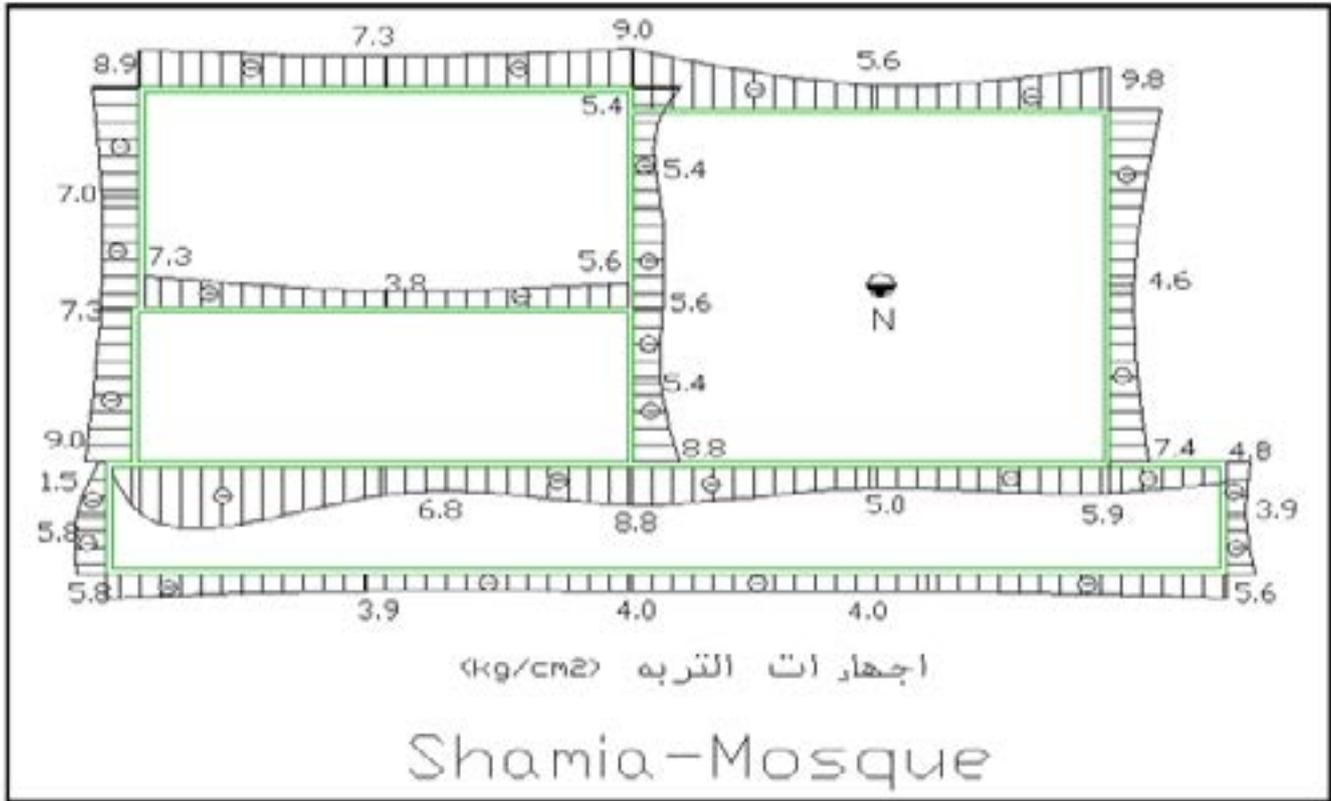
مخطط التشوه نتيجة
لزلاال ذي مركبتين طفيف
باتجاه (X,Y) (التحليل
الأولي)

الدور الرئيس $T=2.702sec$



مخطط التشوه نتيجة
لزلاال ذي مركبتين طفيف
باتجاه (X,Y) (التحليل
الثاني)

الشكل (١٨): مخططات التشوه من الأحمال الزلزالية



الشكل (١٩): إجهادات التربة تحت مسجد المدرسة الشامية. الوحدات بـ kg/cm²

والرصاص أو قضبان الحديد، ولا سيما في قواعد الأعمدة والأقواس الحاملة، كما في التكية السليمانية (الشكل (٢٠)). كذلك مثل استعمال الروابط المعدنية أيضاً لربط الأحجار، ونجدها في كثير من مآذن جوامع حلب مثل مئذنة الرضائية. أما بالنسبة للخشب فقد استعمل بأشكال عدة، منها بشكل عوارض أفقية بين المداميك الحجرية أو كوسادة تحت الجدار. ويُعد الخشب عنصراً فاعلاً في امتصاص القوى الأفقية الناتجة عن الزلازل أو قوى الرفع في البوائك عند تيجان الأعمدة. [٣]

جميع الإجهادات تحت الأساسات ضاغطة، ومعظم قيمها تحقق العلاقة [٢٣]:

$$S_{ij} \geq 2,3 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

مقارنة ساحات الإجهادات المتولدة في المسجد نتيجة للأحمال الزلزالية من أجل الحالة القديمة له ومن أجل الحالة الراهنة ومن أجل الحل المقترح في التدعيم

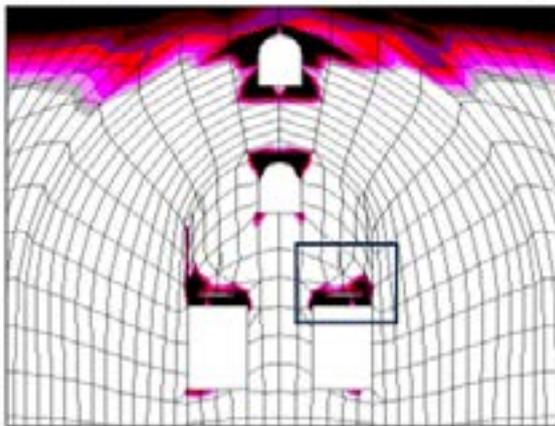
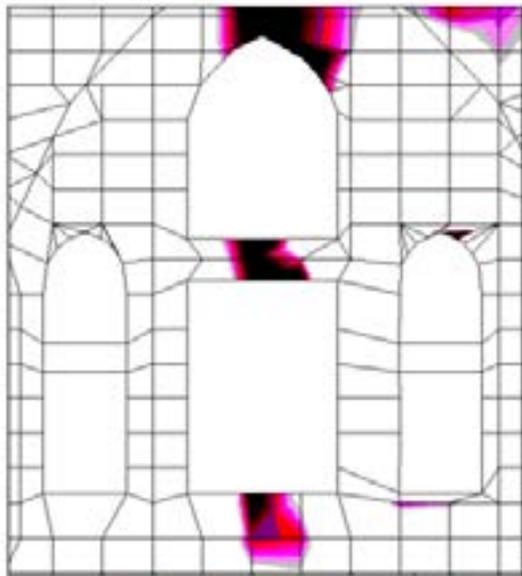
جرت المقارنة باستعمال المونة الكلسية المحسنة إضافة إلى ترتيبات إنشائية لزيادة التماسك باستعمال روابط معدنية مثل كلاليب الحديد



الشكل (٢٠): الأعمدة والأقواس الحاملة للقباب في التكية السليمانية

كما يوضح الشكل (٢١) بعض المؤشرات الواقعية للمنشأة ومقارنتها بالحل الحاسوبي.

هذا ويبين الشكل (٢٢) المقارنة بين ساحات الإجهادات المتولدة في المسجد لمختلف الجمل الإنشائية (الشكل موجود في الملحقات)



الشكل (٢١): بعض المؤشرات الواقعية للمنشأة ومقارنتها بالحل الحاسوبي

النتائج

قواعد الأعمدة، والأقواس الحاملة. ٤. لوحظ أن تقوية المونة الرابطة ينعكس على تحسين سلوك الجدار، وهذا ما تبين من خلال الدراسة التحليلية للحل المقترح للتدعيم، الذي أدى إلى تقليل الإجهادات الشادة المتشكلة من $7k \text{ g/cm}^2$ إلى 25 kg/cm^2 ، كما تتشكل إجهادات ضاغطة في التربة تحت أساسات الأوابد المدروسة (أساسات هذه المنشأة شريطية عميقة)، قد تقل عن تحمل التربة، إذ وصلت قيمة هذه الإجهادات الضاغطة في التربة تحت أساسات الأوابد المدروسة إلى $23,6 \text{ kg/cm}^2$ ، وهذا أقل من تحمل التربة البالغ 25 kg/cm^2 [٢٣]، وبالتالي لا يؤثر في استقرار المنشأة نتيجة لتعرضها للزلازل.

المنافشة

أدت عملية الربط (ضمن عمليات الترميم والتدعيم) بين المنشآت الأثرية ذات البنى الإنشائية المختلفة باختلاف العصور [٧] (كما هو في مسجد المدرسة الشامية) إلى إضعاف المنشأة ككل أكثر من تقويتها، ويبدو أن هذه النتيجة قد تنبه إليها بناؤونا القدماء حيث أبقوا الجزئين (المسجد والحجرة) من جهة وجدار الرواق ذو الأقواس من جهة أخرى، مفصولين بعضهما عن بعض، وقد وجد أن أساسات هذه المنشآت القديمة أساسات شريطية وعميقة وبالتالي كان أسلوب الدراسة الذي تضمن نمذجة أساسات المنشآت وتحديد علاقتها مع التربة المحيطة بها من خلال عوامل قساوات النواض

يمكن تلخيص أهم النتائج المستخرجة من البحث الحالي بالآتي:

١. تم من خلال الاختبارات زيادة مقاومة المونة الكلسية للضغط، بإضافة البوزولان والألياف الزجاجية، إذ وصلت المقاومة إلى 39 kg/cm^2 في حين كانت مقاومة المونة الكلسية من دون أي إضافات 12 kg/cm^2 ، ما يدل على دور البوزولان والألياف في تحسين مقاومة المونة.
٢. ساهم تحسين المونة في زيادة قدرة الجدران الحجرية على تحمل القوى الأفقية، إذ إن تحسين المونة ساعد على تحسين مقاومتها في القص من خلال تحسين إجهادات التماسك بين الأحجار والمونة.
٣. كما تبين من خلال الدراسة التحليلية، أنه يقل خطر انهيار الجدار بالكامل باستعمال مونة محسنة عند الوصول لحمل الانهيار النظري، وذلك بسبب دور الألياف، لأن إضافة الألياف الزجاجية تقلل من الانكماش، وتحد من انفتاح الشقوق، وتوزع الإجهادات، وبالتالي تمنع الشقوق الصغيرة من التطور إلى شقوق كبيرة، فالمونة تُقدم كمقترح لإصلاح التشققات في الأبنية الحجرية الكلسية التراثية، وبالتالي الحصول على مادة ذات فاعلية في ترميم المنشآت الحجرية القديمة، دون التأثير في الوظيفة الفعلية، والجمالية لها، وبكلفة اقتصادية منخفضة، وبالتالي تحسين مقاومة الأوابد القديمة للقوى الأفقية، إضافة إلى ترتيبات إنشائية لزيادة التماسك باستعمال روابط معدنية (مثل كلابيد الحديد والرصاص)، أو قضبان الحديد، ولا سيما في

FRP laminates for in-plane reinforcement: Journal of Construction and Building Materials, 2010, 24(8), pp 1372-1384.

7. الشهابي، قتيبة. مشيدات دمشق ذات الأضحة وعناصره الجمالية: منشورات وزارة الثقافة، دمشق: سوريا. 1993.
 8. عميري، ابراهيم. مواد وتقنيات العمارة القديمة: مطابع الهيئة العامة السورية للكتاب. 2010.
 9. Hateinikolals, M., korany, Y. Masonry Design 3th ed. Canadian ,2005 :for Engineers and Architects .Masonry Publication, Canada
 10. Lourenço P.B., Rots J.G., Blaauwendraad J. Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modeling, HERON 1995 :and No ,40 Vol ,4. pp .313-340.
 11. الريحاوي، عبد القادر. العمارة العربية الإسلامية خصائصه وآثارها في سوريا: دار البشائر. 1999.
 12. Computers and Structures Incorporated. Sap2000 software. Berkeley, CA ,15 version. 2012.
 13. وثائق ومخططات عن المساجد القديمة في دمشق: مكتبة مديرية الآثار والمتاحف بدمشق. 2001.
 14. Design of masonry structures :6 Eurocode 3-1996 DD ENV .2001.
 15. نقابة المهندسين. الكود العربي السوري للجدران الحجرية غير المسلحة في المباني: دمشق. 1994:ص:124.
 16. Standard Test Method for-90-ASTM, C170 Compressive Strength of Dimension Stone: American society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania. pp:26-28.
 17. Salmanpour, A. Mojsilović, N. Schwartz, J. Experimental Study OF The Deformation Capacity OF 12th ed Canadian Masonry Symposium Structural Masonry .2013 .Vancouver. British Columbia
 18. Silva B, Benetta M.D, Porto F, Modena C. Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls, Construction and Building Materials (53.Vol) ,161-149.pp .2014.
 19. Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, Chord Modulus: American society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania. pp:220-225 ن.
 20. Determination of Initial Shear Strength: The European Committee for Standardization, Brussels 2002
 21. Design of structures :8 Eurocode 3-1998 CEN-EN Strengthening :3 2005Part :for earthquake resistance and repair of buildings
 22. كنعان، وليد. ميكانيك التربة والصخور: مطبوعات جامعة دمشق. 1991.
- مساهمات المؤلفين:
الإطار المفاهيم: غادة العسراوي - المنهجية: غادة العسراوي - إدارة المشروع: غادة العسراوي - لإشراف والكتابة: غادة العسراوي
تضارب المصالح: لا يوجد مصالح متضاربة".

أسلوباً أكثر ملائمة للأوابد القديمة، كما لوحظ أن نقاط الضعف في المنشآت الأثرية المدروسة، تشكلت حول فتحات الأبواب والنوافذ، وهي العناصر ذات المقاومة الضعيفة للزلازل، بحيث يمكن أن تصل إلى مرحلة الانهيار (بسبب تشكل ساحات إجهاديه شادة كبيرة بقيم أكبر من $2,5 \text{ kg/cm}^2$ ، وتتجاوز في بعض الأماكن $4 + \text{ kg/cm}^2$). بين معظم الدارسين في فن العمارة الإسلامية، وهم من مهندسي العمارة، سبب السماكات الكبيرة لمنشآت ذلك العصر بأنها الظروف العسكرية الناتجة عن الحروب الصليبية، ولكن هذا البحث، ومن خلال نتائج الدراسة التحليلية ودراسة أشكال الانهيار، يقدم تفسيراً أكثر وضوحاً ومنطقياً لهذه السماكات الكبيرة، وهو أن بنائنا القدماء قد وجدوا من خلال المشاهدات الواقعية، أن المنشآت ذات السماكات الكبيرة قد حافظت على ذاتها وصمدت بعد تلك الفترة من النشاط الزلزالي العنيف، فقاموا بتقليدها واعتماد أسلوبها، ومن خلال الدراسة، يمكن تصنيف المنشآت المدروسة إلى مجموعتين بحسب مقاومتها لقوى الزلازل كما يلي:

1. **المجموعة الأولى:** وهي المنشآت ذات المقاومة الضعيفة للزلازل؛ تتصف هذه المنشآت من ناحية الشكل الإنشائي والمواد المكونة لعناصرها بأن لها خصائص غير تناظرية، وبالتالي فإنها تتأثر تأثيراً كبيراً بالقوى الزلزالية [4]، كما في مبنى مسجد المدرسة الشامية، إذ تشكل نقاط الضعف في المنشآت المدروسة حول فتحات الأبواب والنوافذ، وقد وصلت الإجهادات الشادة إلى $2,6 \text{ kg/cm}^2$ ، وبقيم أقل عند الأطراف السفلية للقبب، كما تتركز إجهادات شادة كبيرة عند الأقواس العاتقة والسواكف تصل إلى 4 kg/cm^2 ، لتتوزع الإجهادات في عناصر الجدران، ومن ثم تؤدي إلى انهيار كامل المنشأة، وهذه المنشآت يجب الاهتمام بترميمها وتدعيمها.

2. **المجموعة الثانية:** وهي المنشآت ذات المقاومة الجيدة للزلازل؛ تتميز من ناحية الشكل الإنشائي والمواد المكونة للمنشأة بأن لها خصائص تناظرية.

التوصيات

لما كان الحجر الطبيعي لا يزال يُعدُّ من مواد البناء واسعة الانتشار في سورية، فلا بد من إجراء كثير من الدراسات والأبحاث حول تحسين مقاومة الجدران الحجرية، واعتماد دراسات إنشائية لعمليات الترميم والتدعيم للمنشآت القديمة مع الأخذ في الحسبان تحسين مقاومة المونة قبل البدء بالتدعيم.

المراجع

1. عوض، محمد مؤنس أحمد. الزلازل في بلاد الشام عصر الحروب الصليبية: منشورات عين للدراسات والبحوث الإنسانية والاجتماعية 1996. الطبعة الأولى
2. لحسن، أحمد سليمان، وعبد السلام، محمد أيمن. المنشآت المختلطة: منشورات جامعة دمشق. 1995.
3. العرش، فرج نادر. تكنولوجيا ترميم وصيانة الأبنية ومواد البناء والمقتنيات الأثرية: دمشق: سوريا. منشورات دار المجد 1989.
4. Daniel, P., Magenes, G. Seismic design and Masonry Structures: Course University of-4 assessment of Illinois at Urbana-Champaign. 2004.
5. Elgwydy M. A, Lestuzzi P. and Badoux M. Dynamic in -Plane Behavior of URM wall Upgraded with composites: 3ird international Conference on Composites Proc. of the 12-10 ,San Francisco, CA: USA 2002 .in infrastructure June
6. Roca P. and Araiza G. Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded

توافر البيانات والمواد: "جميع البيانات متوفرة في النص الرئيس
والمواد الملحقة".