

معايرة الحلقة الهستيرية لجدار قص من الخرسانة المسلحة باستخدام نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة ونموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات

م. رانيه الأحمر¹ ، أ.د. ميادة الأحمد الكوسا² ، د.م. أمجد الحلواني³

الملخص:

يتطلب تحليل الاستجابة للمنشآت من الخرسانة المسلحة والمعرضة لحركات زلزالية قوية نماذج مواد قادرة على محاكاة التشوه الدوري والضرر بشكل واقعي. يقدم هذا البحث نتائج دراسة للسلوك اللاخطي لجدار قص من الخرسانة المسلحة والمعرض لتحميل دوري. حيث تم معايرة الحلقة الهستيرية الناتجة عن تجربة لجدار قص خرساني مسلح معرض لتحميل دوري مع النتائج التحليلية باستخدام نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة بالاعتماد على برنامج ABAQUS، كما تم إعادة معايرته باستخدام نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات بالاعتماد على برنامج OpenSees. وتم تقديم مناقشة تفصيلية حول إمكانيات النمذجة للبرنامجين في محاكاة السلوك المعقد لجدار القص.

كلمات مفتاحية: الحلقة الهستيرية، تحميل دوري، الضرر، نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة، نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات، جدار قص خرساني مسلح.

¹ طالبة دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية - جامعة دمشق.

² أستاذة في قسم الهندسة الإنشائية ونائب العميد للشؤون العلمية في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

³ مدرس في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية - جامعة دمشق.

Calibration of the hysterical loop of a reinforced concrete shear wall using Continuum Finite Element Components Model and Multi-layer shell element model

Eng. Rania Al-Ahmar¹, Prof. Mayada Al Ahmad Al Kousa², Dr. Amjad
Al-Helwani³

ABSTRACT:

The response analysis of reinforced concrete structures subjected to strong earthquake motions requires material models that are able to simulate cyclic deformation and damage realistically. This paper presents the results of a study of the nonlinear behavior of a reinforced concrete shear wall subjected to cyclic loading. The hysterical loop resulting from an experiment of a reinforced concrete shear wall exposed to a cyclic load was calibrated with the analytical results using the continuum finite element components model based on ABAQUS program, and it was re-calibrated using the multi-layer shell element model based on OpenSees program. A detailed discussion is provided on the modeling capabilities of the two software in simulate the complex behavior of the shear wall.

Keywords: hysterical loop, cyclic load, damage, continuum finite element components model, multi-layer shell element model, RC shear wall.

¹ PhD student in the Structural Earthquake Engineering Department of the Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR)– Damascus University.

² Professor in the Structural Engineering Department and Vice Dean for Scientific Affairs at the Civil Engineering Faculty– Damascus University.

³ Lecturer in the Structural Earthquake Engineering Department of the Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR)– Damascus University.

1. مقدمة:

تُستخدم جدران القص الخرسانية المسلحة على نطاق واسع في الجمل الإنشائية متعددة الطوابق وذلك في البلدان النشطة زلزالياً [1]، حيث تُستخدم كعناصر إنشائية أساسية في التصميم الزلزالي للمباني وذلك نظراً لصلابتها العالية ومقاومتها للأحمال الجانبية [2]. يتأثر الأداء الزلزالي للمبنى بشكل كبير بالسلوك غير المرن لجدار القص الذي يتحمل جزءاً كبيراً من القوى الجانبية. تم إجراء العديد من الأبحاث (تحليلية وتجريبية) لدراسة سلوك جدران القص من الخرسانة المسلحة [3,4,5]. وبالرغم من أن دراسة الاستجابة اللامرنة لجدار القص بطريقة تجريبية يعطي نتائج أكثر موثوقية، إلا أنه ليس بالخيار القابل للتطبيق في الحالات العامة. يمكن أن توفر نماذج FEM المفصلة أيضاً تقديراً موثوقاً للاستجابات اللامرنة لجدران القص. ومع ذلك فإن تطبيق تحليل FEM المفصل يقتصر على مستويات العناصر بسبب الوقت والجهد الكبير المبذول لأداء النمذجة والتحليل [6]. لذلك تعتبر النمذجة المناسبة لجدران القص مهمة جداً لكل من التحليلات الخطية واللاخطية لمنشآت الأبنية [1]. وقد تغيرت نماذج جدران القص خلال العقد الماضي حيث انتقلت تقنيات التحليل الزلزالي من التحليل الستاتيكي الخطي إلى التحليل الديناميكي اللاخطي مما يتطلب منهجيات للنمذجة لتكون أكثر محاكاة للواقع. فامتدت الطرق المختلفة لنمذجة جدران القص من النماذج الكبيرة macro models مثل عناصر (عمود-جائز) المعدلة إلى النماذج الدقيقة micro models مثل نماذج العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد. ولكي تكون تقنية النمذجة مناسبة يجب أن تحقق الأمور التالية: (أن تكون قادرة على التنبؤ بالاستجابة غير المرنة، دمج خصائص المواد الهامة، محاكاة الميزة السلوكية: تراكب الوصلة وانزلاق القضبان، تمثيل انتقال المحور المحايد، تصلب الشد، التفاعل بين أفعال القص والعزم) [7].

وبما أن المحاكاة العددية أصبحت على نحو متزايد طريقة فعالة وأداة قوية لأبحاث الهندسة الزلزالية المعتمدة على الأداء، كما أن توقع الاستجابة اللامرنة لأحد أهم العناصر الإنشائية المقاومة للقوى الزلزالية وهي جدران القص الخرسانية المسلحة والجمل الجدارية يتطلب نماذجاً تحليلية دقيقة وفعالة بحيث تتضمن الخصائص الهامة للمواد وميزات الاستجابة

السلوكية، فقد عمل العديد من الباحثين على دراسة ومعايرة وتطوير لطرق النمذجة لجدران القص الخرسانية المسلحة.

إن العمل الذي قام به كل من (Lu et al., 2015) [8] يطور نموذجاً جديداً لعنصر جدار القص ونماذج المواد التأسيسية المرتبطة به وهو نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات وذلك بالاعتماد على كود OpenSees، حيث تم في هذا العمل محاكاة العديد من جدران القص بأنواع مختلفة من المقاطع، بالإضافة إلى مبنى يبلغ ارتفاعه 141.8 م بجملته أنبوبية مع إطارات محيطية، ومبنى شاهق الارتفاع (برج شنغهاي بارتفاع يصل إلى 632 م)، تم التحقق من دقة وموثوقية نموذج العنصر المقترح وطرق التحليل المستخدمة من خلال المقارنة مع البيانات التجريبية المتاحة ومع النتائج التحليلية التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج MSC.MARC.

كما قام كل من (Jeong and Jang, 2016) [2] بتطوير طريقة للنمذجة باستخدام عناصر الألياف والنوابض لالتقاط الاستجابات اللامرنة لجدار قص خرساني مسلح، بحيث تعكس كل من عناصر الألياف والنوابض لسلوكيات الانحناء والقص لجدار القص على التوالي، تم إنشاء عناصر الألياف عن طريق إدخال بيانات المقطع وخصائص المواد، وتم تحديد بارامترات نابض القص التي تمثل تدهور الصلابة والمقاومة بالإضافة إلى التضيق والانزلاق بالاعتماد على نتائج التحليل من نموذج طريقة العناصر المحدودة التفصيلي (FEM)، وتم التحقق من قابلية تطبيق طريقة النمذجة المقترحة بإجراء تحليلات ديناميكية لامرنة لمباني مرجعية مع نسب أبعاد مختلفة لجدران القص.

وأكد البحث الذي تم من قبل (Esmaeiltabar et al., 2019) [9] على تأثير سلوك المادة وتقنية النمذجة التحليلية على دقة وكفاءة النماذج، حيث تم فحص الإجراءات الأكثر شيوعاً لنمذجة جدران القص الإنشائية لتحديد مقدرة هذه التقنيات. فتم التحقق أولاً من صحة نموذج الألياف التحليلي وذلك من خلال منحنيات الدفع الدوري التي تم الحصول عليها من نتائج الاختبار الدوري، هذا النموذج عبارة عن عنصر عمود-جائز لاخطي وحيد يتم إنشاده لمقطع الجدار بالكامل، فتطابقت منحنيات الدفع التحليلية بشكل مقبول مع نتائج الاختبار عندما تم أخذ نموذج المواد التفصيلي مثل تأثير Bauschinger وتصلب الشد

والإغلاق التدريجي للفجوة بالاعتبار. تم بعد ذلك تقييم النماذج التحليلية المختلفة من خلال بعض التحليلات الديناميكية اللاخطية، حيث تم استخدام ثلاثة نماذج من العناصر الخطية الشاقولية المتعددة (MVLEM) والتي هي نماذج مبسطة تعتمد على عدد من عناصر النوابض المحورية المتوازية أو عناصر شبكية بمقاطع ألياف مع نابض واحد للقص، فأعطى نموذج (MVLEM-AS) بنوابض محورية) بالرغم من بساطته التقريب الأفضل لنموذج الألياف، كما أنه تطلب جهد حسابي أقل وذلك مقارنة مع نموذجي (MVLEM) الآخرين.

2. هدف البحث:

يهدف البحث إلى مقارنة السلوك اللاخطي لجدار قص من الخرسانة المسلحة من خلال الحلقة الهستيرية باستخدام منهجيتين من المنهجيات المتبعة لنمذجة جدران القص من البيتون المسلح وهما: نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة ونموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات وذلك بالاعتماد على برنامجي ABAQUS و OpenSees على التوالي، وذلك لمعرفة كفاءة كل من المنهجيتين وقدرتهما على محاكاة السلوك المعقد لجدران القص والحصول على سلوك التضييق والتلين في المنحني الهستيري للقوة الجانبية (القص القاعدي) مقابل الانتقال الجانبي لأعلى جدار القص المعرض لاختبار حمل دوري.

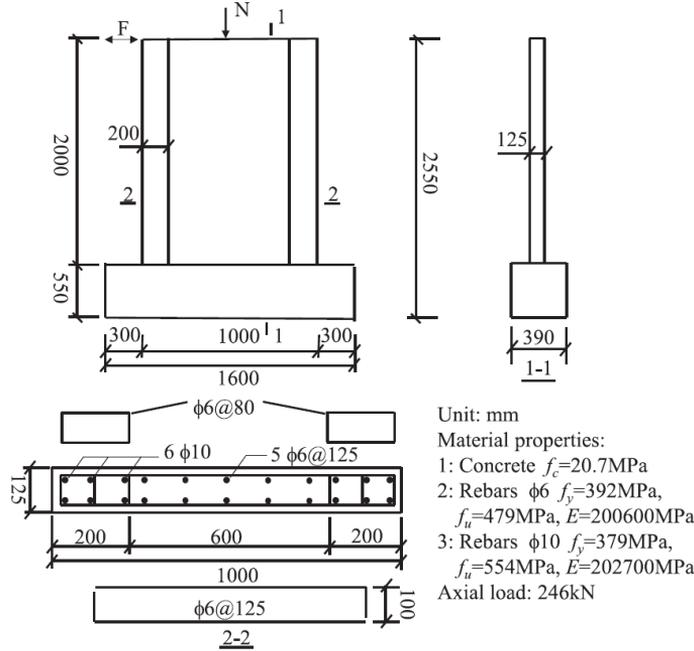
3. مواد وطرق البحث:

تم الاعتماد على المنهج التحليلي في البحث من خلال النمذجة باستخدام البرامج الحاسوبية ABAQUS و OpenSees، ومقارنة النتائج التي تم الوصول إليها مع نتائج اختبار تجريبي (Lu et al., 2010) [10]. حيث تم اختيار منهجيتين من المنهجيات المتبعة في نمذجة جدران القص الخرسانية المسلحة وذلك من أجل الحصول على السلوك اللاخطي للجدار ممثلاً بالحلقة الهستيرية.

1.3 توصيف جدار القص المُختبر تجريبياً:

تم الاعتماد على جدار القص الخرساني المسلح الذي تم اختباره تجريبياً كما هو معطى في قاعدة بيانات NEEShub شبكة لمحاكاة الهندسة الزلزالية (Lu et al., 2010) [10]، وذلك من أجل معايرة النماذج التحليلية المستخدمة معه. يبين الشكل رقم (1) توصيفاً

لنموذج جدار القص المختبر تجريبياً من حيث الأبعاد وتفاصيل التسليح ومقاومات المواد المستخدمة.



الشكل (1): أبعاد النموذج المختبر SW1-1 وتفاصيل تسليحه. [10]

2.3 المنهجيات المعتمدة في النمذجة اللاخطية لجدار القص:

1.2.3 نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة:

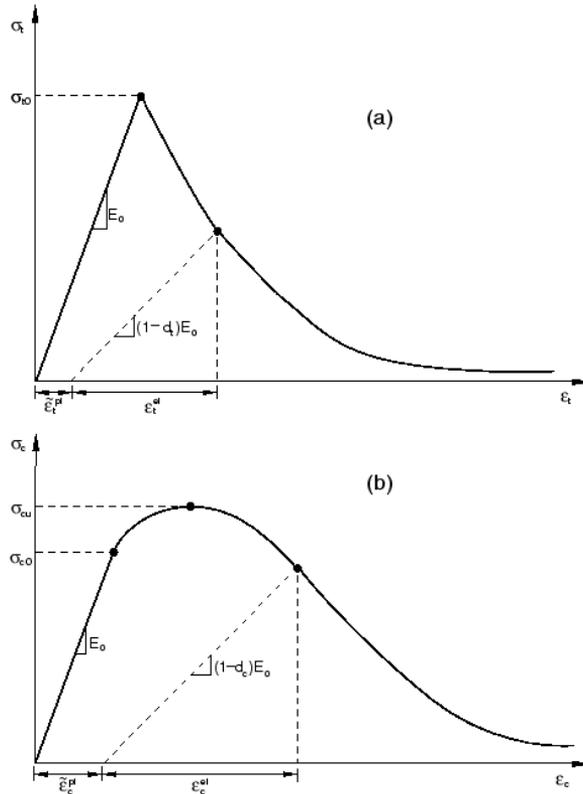
Continuum Finite Element Components Model

يتم نمذجة جدار القص في نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة باستخدام عناصر مستمرة مكونة من عناصر صلبة solid elements لاخطية موجودة في العديد من برمجيات تحليل العناصر المحدودة المتقدمة مثل: ANSYS, ABAQUS وغيرهم. تقدم العناصر المستمرة تقوفاً في النمذجة الدقيقة لتفاصيل التسليح والخرسانة [11]. يمكن تعريف التسليح في ثلاثة اتجاهات مختلفة. يعتمد نموذج اللدونة للخرسانة على نظرية تدفق اللدونة ومعيار Von Mises للتلدن والتصلب تماثل الخواص وقانون التدفق المرتبط به. يمكن للعناصر المستمرة أن تلتقط استجابات السلوك الهامة مثل: التفاعل بين الانعطاف والقوى المحورية، وتشوه القص اللامر، تأثير تطويق التسليح على سلوك الخرسانة، وتليين الضغط

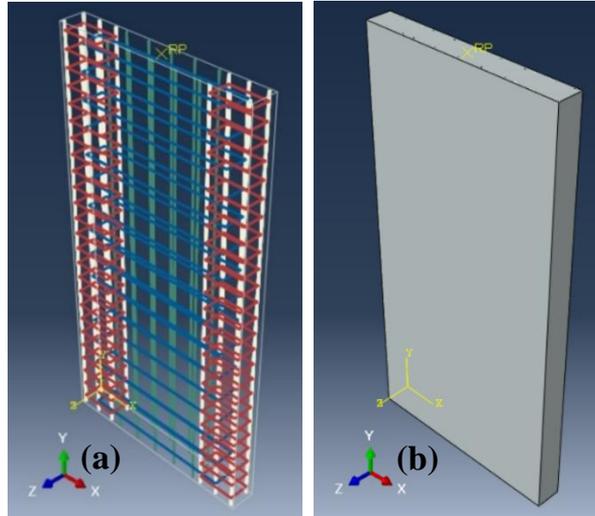
وتقسية الشد للخرسانة [12]. على الرغم من أن نماذج العناصر المستمرة تتطلب كميات أكبر من بارامترات الإدخال إلا أنها فعالة جداً في تحليل عنصر واحد أو أكثر من العناصر الخرسانية المسلحة. من ناحية أخرى، لا يزال نموذج العناصر المستمرة غير قابل للتطبيق عملياً من أجل تحليل وتصميم منشأ المبنى بالحجم الكامل [1].

تم الاعتماد ضمن هذا البحث على برنامج 1-6.14 Abaqus/CAE من أجل النمذجة وفق هذه الطريقة. حيث تم تعريف ونمذجة الأجزاء Parts من خلال رسم جدار القص الخرساني كعنصر صلب ثلاثي الأبعاد Solid، ورسم قضبان التسليح الطولية والعرضية كأسلاك Wire. تم تعريف المواد Materials باستخدام النموذج مرن- لدن من أجل تعريف مواد التسليح الطولي والعرضي للجدار، وباستخدام النموذج اللدن- المتضرر للخرسانة Concrete Damaged Plasticity "CDP" من أجل تعريف مادة الخرسانة، حيث يوجد أليتان للضرر وهما: تشقق البيتون تحت تأثير الشد tensile cracking وتهشم البيتون تحت تأثير الضغط compressive crushing، ويتم تخفيض صلابة المادة باستخدام معاملين منفصلين للضرر أحدهما للشد والآخر للضغط. يبين الشكل (2) استجابة البيتون للأحمال المحورية على الشد (a) والضغط (b) [13].

كانت المقاطع المستخدمة من نوع الجوائز الشبكية Truss لقضبان التسليح والأساور، ومن النوع الصلب Solid للجزء الخرساني من الجدار. تم تجميع أجزاء النموذج Assembly التي تم تعريفها سابقاً وهي الجزء الخرساني وقضبان التسليح الطولية والعرضية ضمن نموذج مُجمَع واحد، وتقسيمها باستخدام الأمر Mesh. يوضح الشكل (3) تجميع جدار القص الخرساني وما يحتوي بداخله من تسليح طولي وعرضي في برنامج Abaqus. تم اعتماد نوعين من القيود Constraints على نموذج جدار القص المدروس وهما: قيد جسم صلب Rigid Body من أجل ربط السطح العلوي للجدار بالنقطة المرجعية RP التي يتم إسناد الأحمال المركزة إليها، وقيد منطقة مطمورة Embedded region من أجل الربط بين منطقة الخرسانة الحاوية على التسليح Host region وبين التسليح المطمور ضمنها Embedded region ويشمل كامل التسليح الطولي والعرضي والأساور.

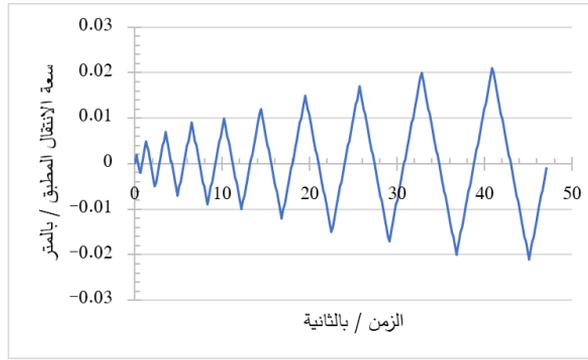


الشكل (2): استجابة البيتون للأحمال المحورية على: (a) الشد، (b) الضغط. [13]



الشكل (3): تجميع أجزاء جدار القص ضمن نموذج واحد في برنامج Abaqus: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن النموذج، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.

تم تطبيق الشروط المحيطية من وثاقات أسفل الجدار في الخطوة الافتراضية initial واستمر تطبيقه ضمن باقي الخطوات Step-1 (من النوع الستاتيكي العام Static, General) وتعطى مدة الزمن فيها 1 ثانية) و Step-2 (من النوع الستاتيكي العام Static, General) وتعطى مدة الزمن فيها 48.1 ثانية)، بينما تم تطبيق الحمل الشاقولي أعلى الجدار في الخطوة Step-1 واستمر تطبيقه ضمن الخطوة Step-2، أما الانتقال الأفقي الدوري المطبق أعلى الجدار فقد تم تطبيقه في الخطوة Step-2. ويبين الشكل (4) شكل الحمل الدوري المطبق أعلى الجدار المدروس وهو عبارة عن انتقال دوري تتغير سعته مع الزمن.



الشكل (4): شكل الانتقال الدوري المطبق أعلى الجدار المدروس.

2.2.3 نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات:

Multi-Layer Shell Element Model

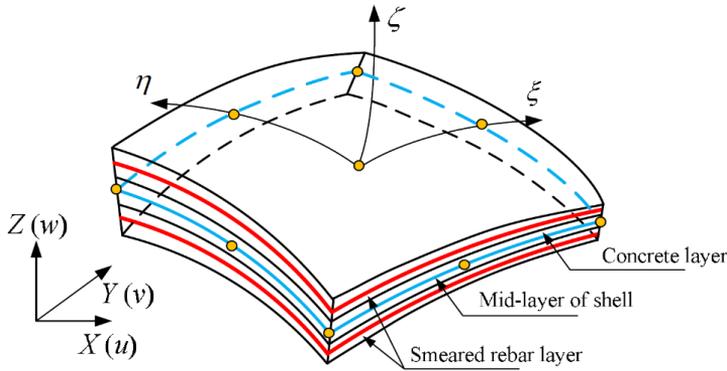
تم الاعتماد في هذا البحث على برنامج OpenSees من أجل النمذجة وفق هذه الطريقة. إن برنامج OpenSees (Open System for Earthquake Engineering) النظام المفتوح لمحاكاة الهندسة الزلزالية) هو برنامج مفتوح المصدر للعناصر المحدودة (FE) من أجل المحاكاة العددية.

1) صياغة عنصر القشرة متعددة الطبقات:

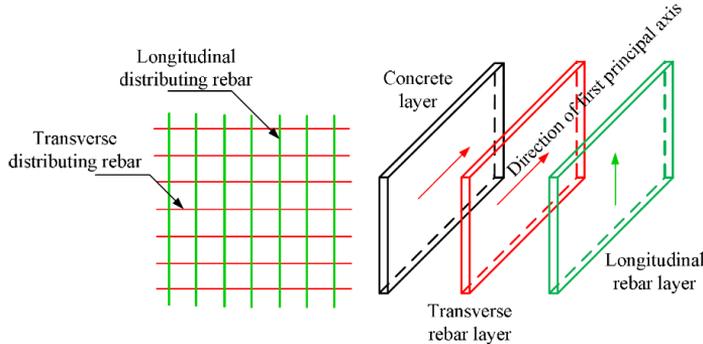
(a) الخلفية النظرية لنموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات:

يتم تنفيذ مقطع متكامل مركب/ متعدد الطبقات لكل نقطة من نقاط التكامل داخل المستوي لحساب السلوك اللاخطي للخرسانة المسلحة، أي أن هذا العنصر يُبسط السلوك اللاخطي ثلاثي الأبعاد لجدران القص إلى حالة قشرة عن طريق تقسيمها إلى عدة طبقات مرتبطة

كلياً في اتجاه السماكة. يمكن إسناد سماكات وخصائص مواد مختلفة لكل طبقة وفقاً لحجم الجدار وتوزيع قضبان التسليح كما هو موضح في الشكل (5-a). يتم تمييز القضبان في طبقة أو عدة طبقات متباينة الخواص وفقاً لاتجاهها وموقعها الفيزيائي كما هو موضح في الشكل (5-b). يتم في البداية حساب الانحناء والتشوهات المحورية للطبقة الوسطى، ومن ثم يتم الحصول على تشوهات كل طبقة بناءً على فرضية المقطع المستوي. يتم حساب الإجهادات لكل نقطة من نقاط التكامل على كل طبقة وفقاً للنموذج التكويني للطبقة الموافقة. أخيراً يتم حساب القوى الداخلية باستخدام طريقة التكامل العددي [14].



(a) عنصر القشرة متعددة الطبقات



(b) توزيع طبقات القضبان

الشكل (5): مبدأ عنصر القشرة متعددة الطبقات [15]

(b) النموذج التكويني للمواد متعددة الأبعاد:

يعتمد النموذج التحليلي المقترح للخرسانة على ميكانيكا الضرر damage mechanism ونموذج التشقق المميز Smeared crack model، والذي هو نموذج يتمتع باستقرار

حسابي كبير وصياغة بسيطة [15]. يتم التعبير عن المعادلات التكوينية (المعادلة 1)

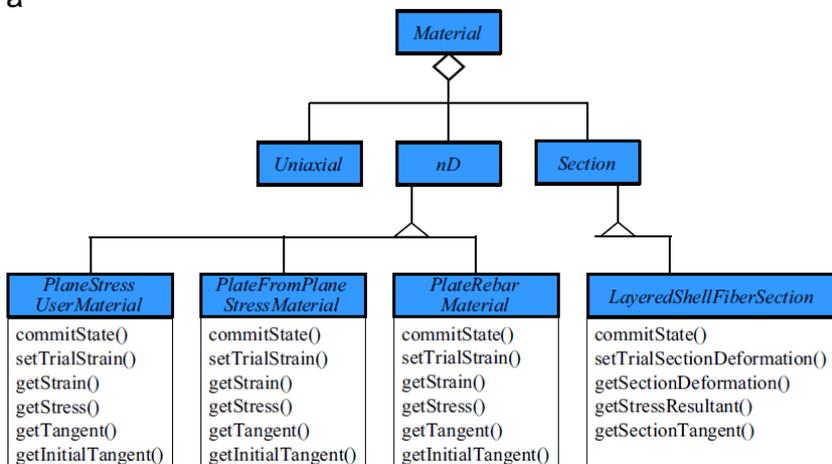
$$\sigma'_c = \begin{bmatrix} 1 - D_1 & \\ & 1 - D_2 \end{bmatrix} D_e \varepsilon'_c \quad \dots\dots(1)$$

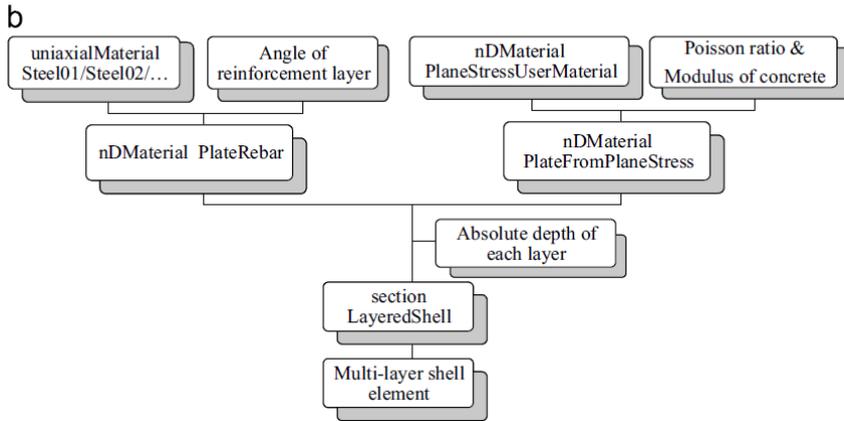
للخرسانة على النحو التالي: حيث $\varepsilon'_c, \sigma'_c$ هي الإجهادات والتشوهات على التوالي في جملة إحداثيات الإجهادات الرئيسية، و D_1, D_2 هي بارامترات الضرر للشد والضغط على التوالي. تم تنفيذ منحنى تطور الضرر تحت تأثير الشد والضغط والموصى به من قبل (Løland, 1980) [16] و (Mazars, 1986) [17] على التوالي وذلك من أجل حساب معاملات الضرر.

2) تطبيق نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات في برنامج OpenSees:

يتم تطبيق عنصر القشرة متعددة الطبقات الذي يشتمل على نماذج تكوينية لمواد ثنائية الأبعاد في إصدارات برنامج OpenSees كما هو موضح في الشكل (6-a). ويوضح الشكل (6-b) الإجراء العام لتعريف عنصر القشرة متعددة الطبقات، وترد نصوص أسطر الأوامر المقابلة في الفقرات اللاحقة. تم في هذا البحث إجراء معايرة ومقارنة للحلقة الهستيرية الناتجة عن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات مع النتائج التحليلية للمرجع (Lu et al., 2015) [8] و (Lu, 2015) [18]، ومع نتائج الاختبار التجريبي (Lu et al., 2010) [10] وذلك باستخدام برنامج OpenSees بإصداره 3.1.0.

a





الشكل (6): الإطار العام لعنصر القشرة متعددة الطبقات في OpenSees:

(أ) فئات المواد و (ب) الإجراء العام لتعريف عنصر القشرة متعددة الطبقات. [8]

(a) أسطر الأوامر لتنفيذ عنصر القشرة متعددة الطبقات في OpenSees:

(1) إنشاء نموذج الخرسانة متعددة الأبعاد: بإدخال مادة الخرسانة ثنائية

الأبعاد إلى النموذج من خلال أسطر الأوامر التالية: [8] , [19]

```
nDmaterial PlaneStressUserMaterial $matTag 40 7 $fc $ft $fcu $epsc0 $epscu
$epstu $stc
```

| علامة عدد صحيح لتحديد المادة | \$matTag |
|---|----------|
| مقاومة ضغط الخرسانة عند 28 يوم (موجبة) | \$fc |
| مقاومة الشد للخرسانة (موجبة) | \$ft |
| مقاومة كسر الخرسانة (سالبة) | \$fcu |
| تشوه الخرسانة عند المقاومة العظمى (سالبة) | \$epsc0 |
| تشوه الخرسانة عند مقاومة الكسر (سالبة) | \$epscu |
| تشوه الشد الحدي (موجب) | \$epstu |
| عامل احتفاظ القص | \$stc |

```
nDmaterial PlateFromPlaneStress $newmatTag $matTag
$OutofPlaneModulus
```

| علامة عدد صحيح جديدة لتحديد المادة المستنبطة من مادة المستخدم ذات الإجهاد المستوي PlaneStressUserMaterial المحددة مسبقاً | \$newmatTag |
|--|---------------------|
| علامة عدد صحيح لتحديد مادة PlaneStressUserMaterial | \$matTag |
| معامل القص لخارج المستوي | \$OutofPlaneModulus |

2) تعريف مادة التسليح متعددة الأبعاد: وذلك بإدخال مادة فولاذ التسليح

لعنصر القشرة متعددة الطبقات إلى النموذج من خلال سطر الأوامر

التالي: [8] , [19]

nDmaterial PlateRebar \$newmatTag \$matTag \$sita

| | |
|---|--------------------|
| علامة عدد صحيح جديدة لتحديد المادة المستنبطة من مادة تسليح أحادية المحور محددة مسبقاً | \$newmatTag |
| علامة عدد صحيح لتحديد مادة التسليح أحادية المحور | \$matTag |
| تحديد زاوية طبقة التسليح: 90° (تسليح طولي)، 0° (تسليح عرضي) | \$sita |

3) تعريف مقطع عنصر القشرة متعددة الطبقات: متضمناً الخرسانة

متعددة الأبعاد ومواد التسليح والسماكات المقابلة من خلال سطر

الأوامر التالي: [8] , [19]

section LayeredShell \$sectionTag \$nLayers \$matTag1 \$thickness1...\$matTagn \$thicknessn

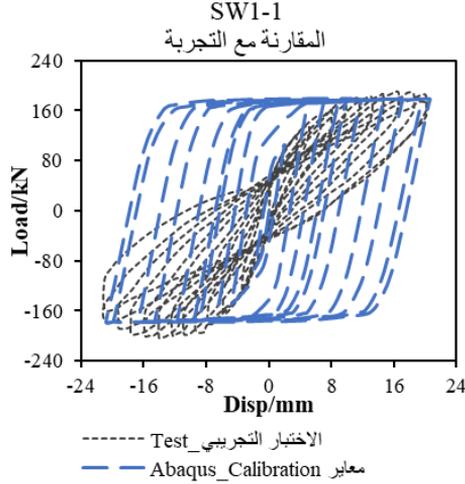
| | |
|-----------------------------|---------------------|
| علامة فريدة بين المقاطع | \$sectionTag |
| العدد الكلي للطبقات | \$nLayers |
| علامة المادة للطبقة الأولى | \$matTag1 |
| سماكة الطبقة الأولى | \$thickness1 |
| | |
| علامة المادة للطبقة الأخيرة | \$matTagn |
| سماكة الطبقة الأخيرة | \$thicknessn |

تم إسناد مقاطع من نوع ShellINLDKGG إلى كل من العناصر المحيطة وعناصر جسد الجدار. يأخذ عنصر "ShellINLDKGG" بعين الاعتبار اللاخطية الهندسية للتشوهات الكبيرة باستخدام صياغة لاغرانج المحدثة [20].

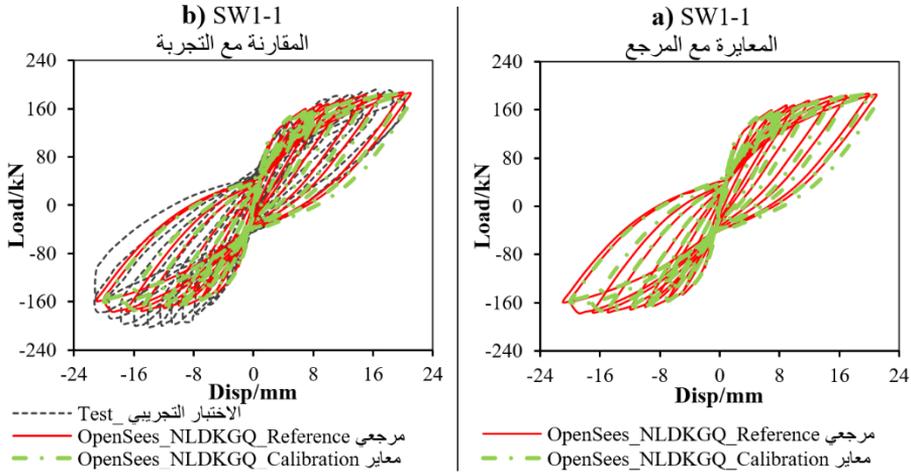
4. النتائج ومناقشتها:

تبين الأشكال (7) و (8) معايرة الحلقة الهستيرية الناتجة عن كل نموذج تحليلي مستخدم لوحده مع نتائج الاختبار التجريبي لجدار القص الخرسانى المسلح المعرض لحمل دوري والمبين سابقاً في الشكل رقم (1). حيث يبين الشكل (7) معايرة ومقارنة الحلقة الهستيرية الناتجة عن نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة باستخدام برنامج Abaqus مع التجربة، نلاحظ من الشكل (7) عدم قدرة النموذج التحليلي على محاكاة التضييق الحاصل

في الحلقة الهستيرية. بينما يبين الشكل (8) معايرة ومقارنة الحلقة الهستيرية الناتجة عن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees، حيث يظهر الشكل (8-a) نتائج المعايرة مع النموذج التحليلي للمرجع [8] و[18]، بينما يظهر الشكل (8-b) نتائج المقارنة مع التجربة [10] حيث نلاحظ من الشكل قدرة النموذج التحليلي (لكل من المعايرة والمراجع) على محاكاة التضيق الحاصل في الحلقة الهستيرية.



الشكل (7): معايرة ومقارنة الحلقة الهستيرية باستخدام برنامج Abaqus مع التجربة.



الشكل (8): معايرة ومقارنة الحلقة الهستيرية باستخدام برنامج OpenSees:

(a) المعايرة مع المرجع، (b) المقارنة مع التجربة.

كما يبين الجدول (1) قيم الفروق للقيم الأعظمية بإشارة موجبة (max) وبإشارة سالبة (min) للقوى والانتقالات الجانبية الناتجة عن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees (حسب نتائج المقالة المرجع وبعد إجراء المعايرة). حيث نلاحظ من الشكل (8-a) والجدول (1) وجود تطابق كبير بين نتائج المعايرة مع النتائج المعروضة في المقالة المرجع، فقد كانت أكبر نسبة لنقصان الانتقال الأعظمي بإشارة سالبة (min) في النموذج المعايير عن المرجع بحدود %4.71 فقط في حين لم تتعدّ الزيادة عن النموذج المرجع للقيم العظمى بإشارة موجبة (max) عن %0.08، بينما لم يتعدّ النقصان في قيم القوى الجانبية العظمى بإشارة سالبة (min) النسبة %1.32 في حين كانت نسبة النقصان عن النموذج المرجع للقيم العظمى الموجبة (max) بحدود %0.51 فقط.

الجدول (1): الفروق للقيم الأعظمية الموجبة والسالبة للقوى والانتقالات الجانبية الناتجة عن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees (حسب نتائج المرجع وبعد المعايرة).

| | | U1 (mm) | RF1 (kN) | $\Delta U1$ (%) (الفارق عن المرجع) | $\Delta RF1$ (%) (الفارق عن المرجع) |
|----------------------|-----|------------|-------------|--|---|
| OpenSees (مرجع) | min | -20.99 | -176.42 | 0.00 | 0.00 |
| | max | 20.98 | 186.17 | 0.00 | 0.00 |
| OpenSees (معايير) | min | -20.00 | -174.10 | -4.71 | -1.32 |
| | max | 21.00 | 185.23 | 0.08 | -0.51 |

ويبين الجدول (2) قيم الفروق للقيم الأعظمية بإشارة موجبة (max) وبإشارة سالبة (min) للقوى والانتقالات الجانبية الناتجة عن جميع النماذج التحليلية المستخدمة في هذا البحث مع نتائج الاختبار التجريبي. حيث كانت أكبر نسبة لنقصان الانتقال الأعظمي السالب عن التجربة هي لنموذج OpenSees المعايير بحدود %5.88 فقط، بينما كانت أصغر نسبة لنقصان الانتقال الأعظمي السالب (min) عن التجربة هي لنموذج OpenSees المرجع بحدود %1.23، في حين كانت نسبة هذا النقصان %1.80 من أجل نموذج Abaqus. أما من أجل الفرق في القوى الجانبية فكانت أكبر نسبة لنقصان القوة الجانبية العظمى السالبة (min) عن التجربة هي لنموذج OpenSees المعايير حيث كانت النسبة %13.80، بينما كانت أصغر نسبة لنقصان هذه القوة عن التجربة %1.80 من أجل

نموذج Abaqus، في حين كانت هذه النسبة مساوية إلى 12.65% من أجل نموذج OpenSees المرجع. كما نلاحظ أن نسبة نقصان القوى الجانبية الأعظمية بإشارة موجبة (max) عن قيم الاختبار التجريبي كانت بحدود (1.83%, 2.33%, 5.48%) لكل من نموذج Abaqus ونموذج OpenSees المعايير والمرجع على التوالي، في حين كانت نسبة زيادة الانتقالات الجانبية العظمى الموجبة (max) لكل من نموذج Abaqus ونموذج OpenSees المرجع والمعايير بحدود (4.07%, 3.99%, 1.97%) على التوالي.

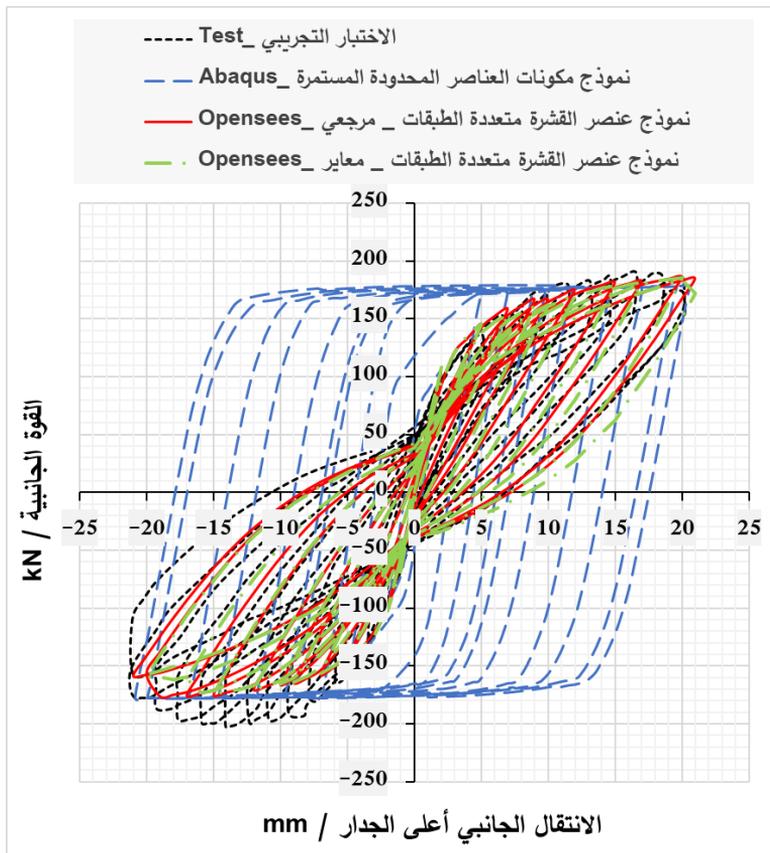
الجدول (2): الفروق للقيم الأعظمية الموجبة والسالبة للقوى والانتقالات الجانبية الناتجة عن جميع

النماذج التحليلية المستخدمة مع نتائج التجربة.

| | | U1 (mm) | RF1 (kN) | $\Delta U1$ (%) (الفرق عن التجربة) | $\Delta RF1$ (%) (الفرق عن التجربة) |
|----------------------|-----|------------|-------------|--|---|
| Test | min | -21.25 | -201.98 | 0.00 | 0.00 |
| | max | 20.18 | 189.65 | 0.00 | 0.00 |
| Abaqus | min | -20.87 | -178.17 | -1.80 | -11.79 |
| | max | 20.58 | 179.25 | 1.97 | -5.48 |
| OpenSees (مرجع) | min | -20.99 | -176.42 | -1.23 | -12.65 |
| | max | 20.98 | 186.17 | 3.99 | -1.83 |
| OpenSees (معايير) | min | -20.00 | -174.10 | -5.88 | -13.80 |
| | max | 21.00 | 185.23 | 4.07 | -2.33 |

يبين الشكل (9) الجمع بين معايرة الحلقة الهستيرية الناتجة عن جميع النماذج التحليلية المستخدمة في البحث وهي كل من نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة باستخدام برنامج ABAQUS ونموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees (حسب نتائج المرجع وبعد المعايرة) وذلك مع الحلقة الهستيرية الناتجة عن الاختبار التجريبي لجدار القص الخرساني المسلح المعرض لحمل دوري والمبين في الشكل رقم (1) وذلك من أجل المقارنة بين كفاءة وقدرة النماذج المستخدمة في البحث على محاكاة الحلقة الهستيرية الناتجة عن التجربة. حيث نلاحظ من الشكل (9) ومن الجدول (2) قدرة كل من نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة باستخدام برنامج ABAQUS ونموذج عنصر القشرة

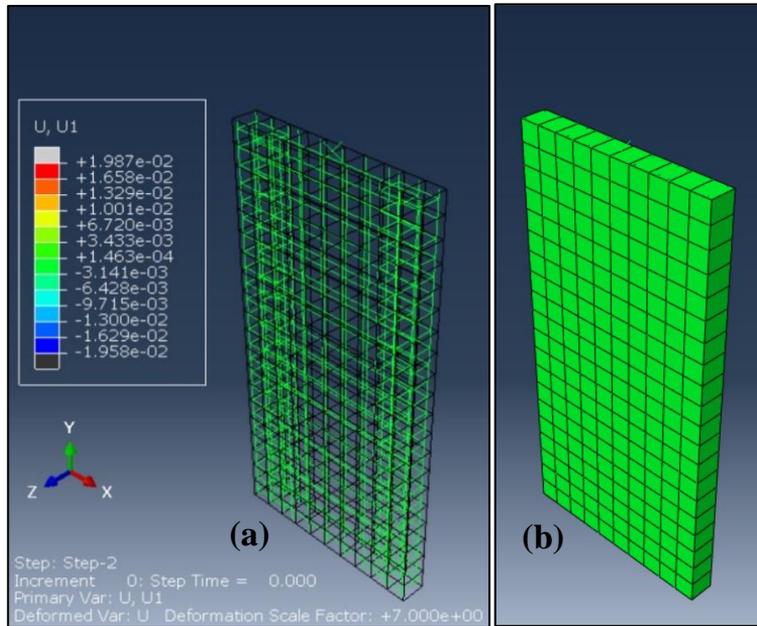
متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees على محاكاة القيم الأعظمية للقوة الجانبية والانتقال الجانبي لأعلى الجدار. كما نلاحظ من الشكل (9) أن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات باستخدام برنامج OpenSees كان أكثر قدرة وكفاءة على محاكاة الحلقة الهستيرية لجدار القص المدروس من نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة باستخدام برنامج ABAQUS مقارنة مع التجربة، حيث بقيت قيم الصلابة شبه ثابتة ضمن نموذج ABAQUS الذي لم يتمكن من محاكاة التضيق الحاصل في الحلقة الهستيرية لجدار القص الخرساني المسلح مما يؤدي إلى قيم مبالغ فيها من أجل تبديد الطاقة.



الشكل (9): معايرة الحلقة الهستيرية الناتجة عن جميع النماذج التحليلية المستخدمة مع التجربة.

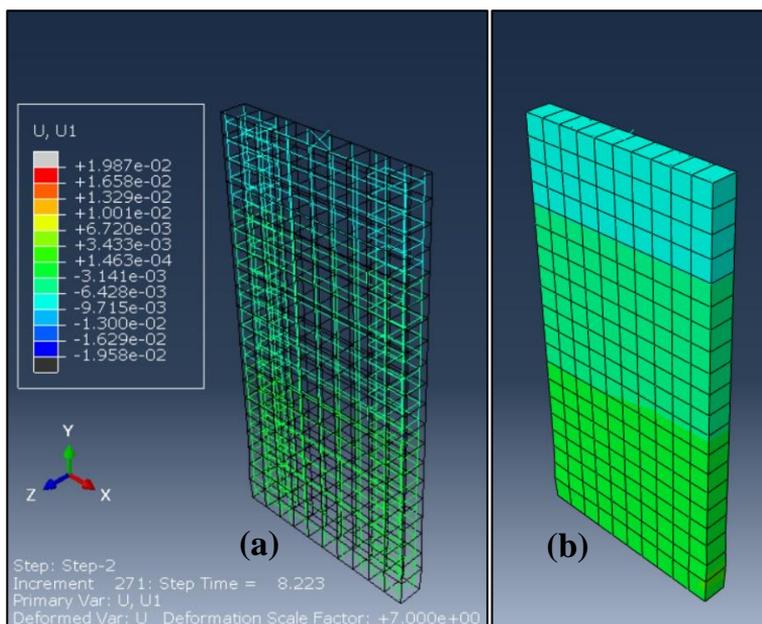
توضح الأشكال (من 10 إلى 17) قيم الانتقالات الجانبية وشكل التشوه الذي يحصل لجدار القص الخرساني المسلح باستخدام برنامج ABAQUS وذلك لكل من البيتون والتسليح

الموجود ضمنه، وذلك لمرحلة الخطوة الثانية Step-2 من التحليل عند تعرض الجدار للحمل الدوري بدءاً من الزمن 0.00 ثانية وحتى نهاية التحميل عند 48.10 ثانية. تم تكبير مقياس التشوه 7 مرات لإظهار التشوه بشكل أفضل. تبين الأشكال (من 10 إلى 17) ازدياد التضخم أو التقلطح في أسفل جدار القص وهي منطقة تشكل المفصل اللدن وذلك مع الاقتراب من الزمن 8 ثانية وحتى نهاية التحميل حيث يأخذ جدار القص عندها شكل التشوه النهائي، كما تظهر هذه الأشكال استطالة جدار القص مع ازدياد التحميل وذلك نتيجة استطالة وتلدن القضبان الطولية.

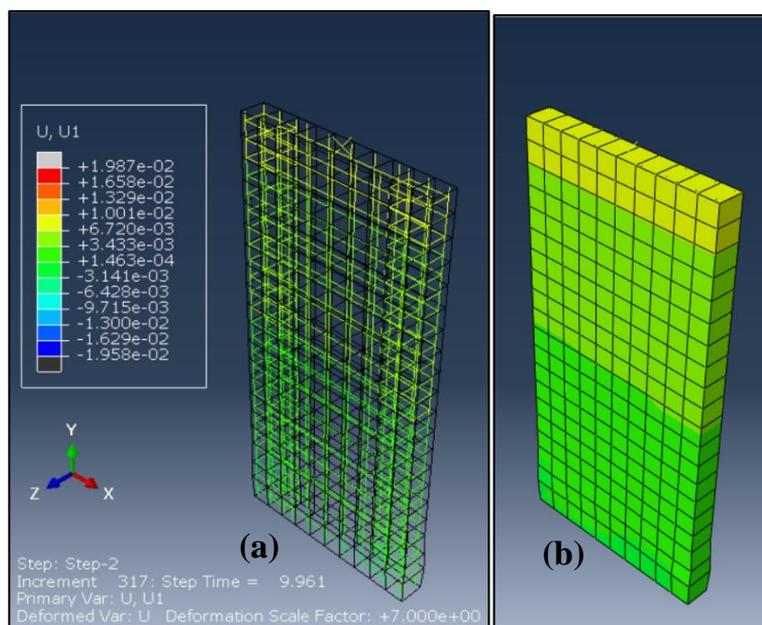


الشكل (10): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 0.00 ثانية:
(a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.

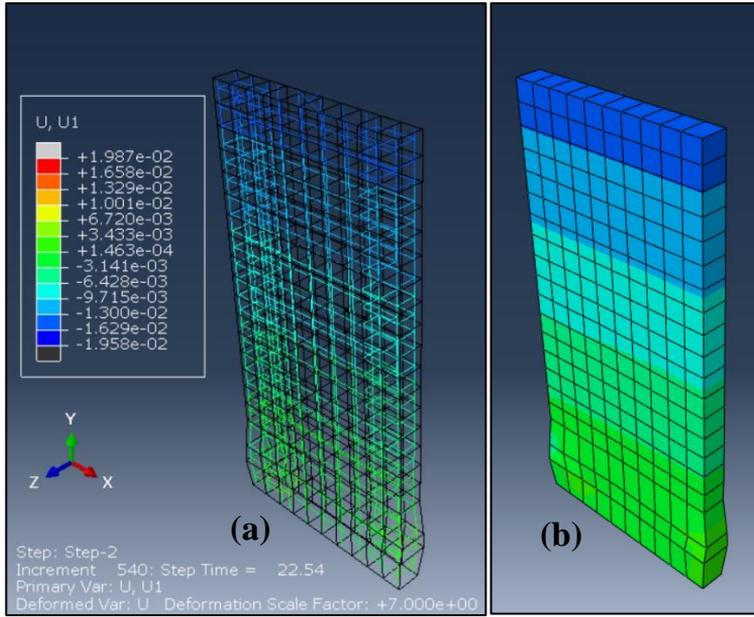
معايرة الحلقة الهستيرية لجدار قص من الخرسانة المسلحة باستخدام نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة ونموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات



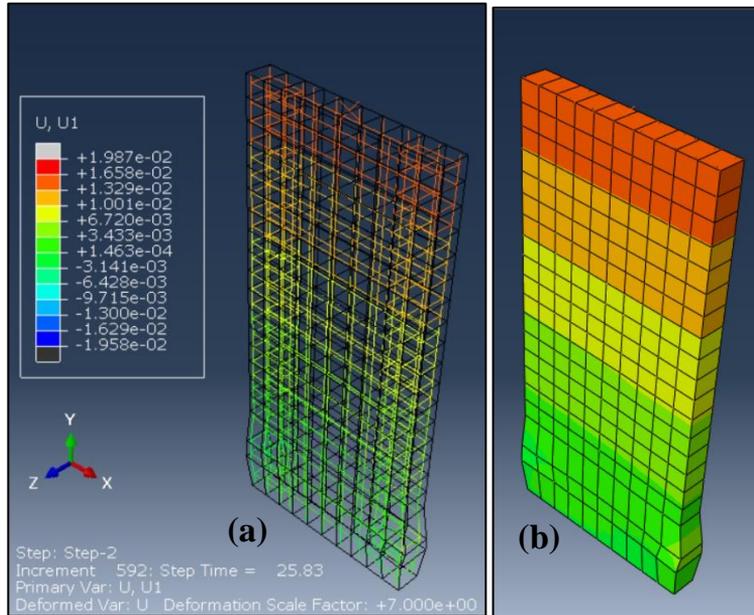
الشكل (11): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 8.223 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



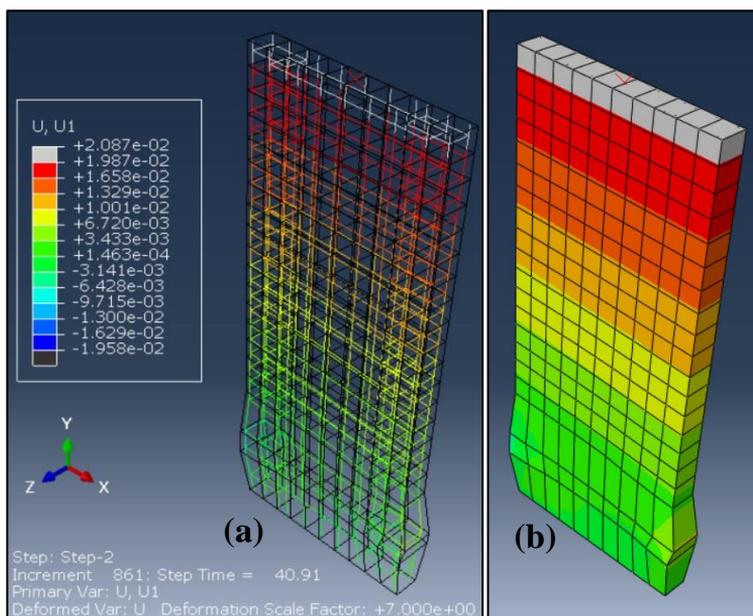
الشكل (12): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 9.961 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



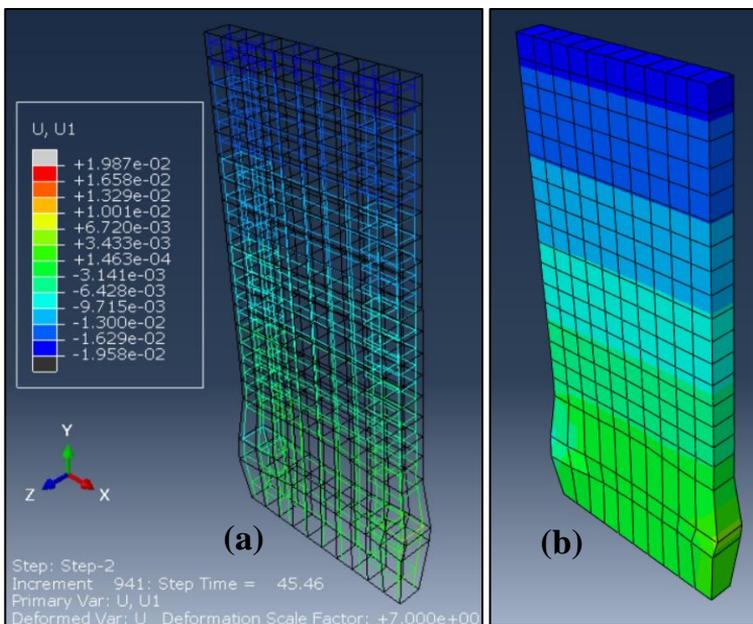
الشكل (13): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 22.54 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



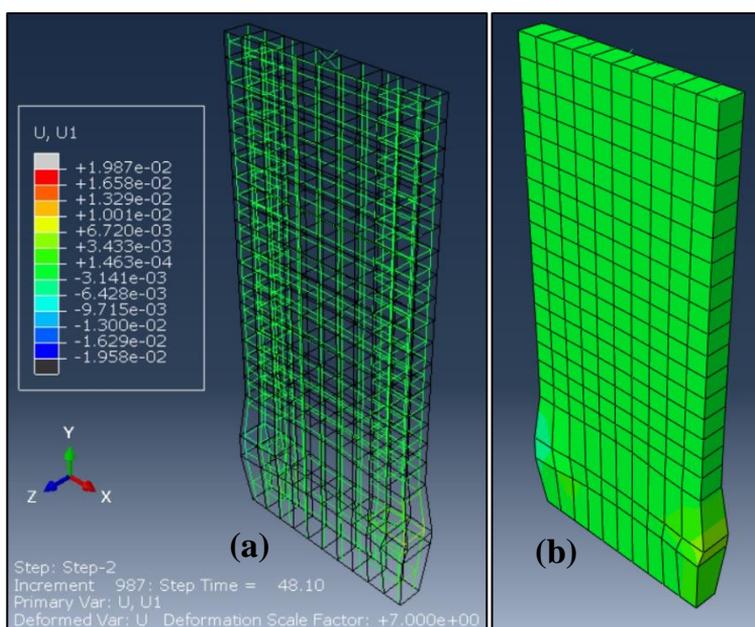
الشكل (14): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 25.83 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



الشكل (15): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 40.91 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



الشكل (16): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 45.46 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.



الشكل (17): الانتقال الجانبي وشكل التشوه لجدار القص المدروس عند الزمن 48.10 ثانية: (a) قضبان التسليح الشاقولي والأفقي ضمن الخرسانة، (b) الخرسانة الحاوية على قضبان التسليح.

5. الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- إن نموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات Multi-Layer Shell Element Model باستخدام برنامج OpenSees أعطى فعالية عالية من حيث تمثيل ومحاكاة السلوك اللاخطي المعقد لجدران القص الخرسانية المسلحة والممثل بالحلقة الهيستيرية للتحميل الدوري، وذلك لأن هذا النموذج يمكنه محاكاة والتقاط الانعطاف المزدوج في/ وخارج المستوي بالإضافة إلى القص المباشر في المستوي والسلوك المترابط بين القص والانعطاف لجدران القص من الخرسانة المسلحة.
- إن نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة Continuum Finite Element Model باستخدام برنامج ABAQUS لم يستطع محاكاة التضييق الذي يحصل في الحلقة الهيستيرية لجدار القص الخرساني المسلح حيث لم يتمكن النموذج اللدن - المتضرر للخرسانة "CDP" المستخدم من محاكاة

الضرر الحاصل في البيتون بشكل دقيق مما أدى إلى قيم مبالغ فيها لتبديد الطاقة
والمتمثلة بمساحة الحلقة الهستيرية مقارنة مع التجربة (الواقع).

- قدرة كل من نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة Continuum Finite Element Components Model باستخدام برنامج ABAQUS ونموذج عنصر القشرة متعددة الطبقات Multi-Layer Shell Element Model باستخدام برنامج OpenSees على محاكاة القيم الأعظمية الموجبة والسالبة للقوة الجانبية (القص القاعدي) والانتقال الجانبي لأعلى الجدار.

التوصيات:

- العمل على تحسين قصور نموذج مكونات العناصر المحدودة المستمرة Continuum Finite Element Components Model باستخدام برنامج Abaqus في محاكاة التضيق بالحلقة الهستيرية من خلال تحسين النموذج اللدن-المتضرر للخرسانة "CDP" المستخدم أو من خلال إدخال ميكانيزم الكسر Fracture Mechanics للنموذج.

6. المراجع:

- [1] Fahjan, Y. M., Kubin J. and Tan M. T. (2010). "Nonlinear Analysis Methods for Reinforced Concrete Buildings with Shear walls", **The 14th European Conference on Earthquake Engineering**, Vol 5, pp. 3380-3387, 30 August - 3 September, 2010, Ohrid, Republic of Macedonia.
- [2] Jeong, S. H. and Jang, W.S. (2016). "1951. Modeling of RC shear walls using shear spring and fiber elements for seismic performance assessment", © **JVE International LTD. Journal of Vibroengineering**, Vol. 18, Issue 2. ISSN 1392-8716, pp. 1052-1059.
- [3] Kabeyasawa, T., Shiohara, H., Otani, S. and Aoyama, H. (1983). "Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure", **Journal of the Faculty of Engineering**, The University of Tokyo, Vol. 37, Issue 2, pp. 431-478.
- [4] Linde, P. and Bachmann, H. (1994). "Dynamic modelling and design of earthquake-resistant walls", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 23, Issue 12, p. 1331-1350.
- [5] Vulcano, A. and Bertero, V. (1987). "Analytical Modeling for Predicting the Lateral Response of RC Shear Wall: Evaluation of Their Reliability", **Earthquake Engineering Research Center EERC**, Report No. UBC/EERC-87/19.
- [6] Ji, J., Elnashai, A. S. and Kuchma D. A. (2007). "Seismic Fragility Assessment for Reinforced Concrete High-Rise Buildings", Report 07-14, **Mid-America Earthquake Center**, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [7] FPrimeC. (2016, July 29). Major Techniques for Modeling Shear Walls. Retrieved from **FPrimeC Solutions Inc.**: <https://www.fprimec.com/modeling-shear-walls/>
- [8] Lu, X.Z., Xie L.L., Guan, H., Huang, Y.L., and Lu, X. (2015). "A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees", **Finite Elements in Analysis & Design**, Vol 98, pp. 14-25.
- [9] Esmaeiltabar, P., Vaseghi, J. and Khosravi, H. (2019). "Nonlinear macro modeling of slender reinforced concrete shear walls", **Structural Concrete**, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1002/suco.201800206>

- [10] Lu, X.L., Zhou, Y., Yang, J., Qian, J., Song, C. and Wang, Y. (2010). "Shear wall database", **Network for Earthquake Engineering Simulation (Database) NEEShub Database**.
- [11] Nicolae, I. and Reynouard, J.M., (2000). "Nonlinear analysis of reinforced concrete shear wall under earthquake loading", **Journal of Earthquake Engineering**, Vol. 4, No. 2, pp. 183- 213.
- [12] Spacone E and El-Tawil S (2004). "Nonlinear analysis of steel-concrete composite structures: state of-the-art", **ASCE Journal of Structural Engineering**, Vol. 130, No. 2, pp. 159-168.
- [13] ABAQUS (2014)- Analysis User's Manual, Version 6.14, **Dassault Systemes Simulia, Inc.**
- [14] Guan, H. and Loo, Y.C. (1997). "Layered Finite Element Method in Cracking and Failure Analysis of Beams and Beam-Column-Slab Connections", **Structural Engineering and Mechanics - An International Journal**, 5 (5), pp.645-662.
- [15] Xie. L.L., Lu, X., Lu X.Z., Huang, Y. and Ye, L., (2014). "Multi-Layer Shell Element for Shear Walls in OpenSees", Conference Paper, **Computing in Civil and Building Engineering** ©ASCE 2014.
- [16] Løland, K. E. (1980). "Continuous damage model for load-response estimation of concrete." **Cement and Concrete Research**, 10(3), 395-402.
- [17] Mazars, J. (1986). "A description of micro-and macro-scale damage of concrete structures." **Engineering Fracture Mechanics**, 25(5), 729-737.
- [18] Lu, X.Z. (2015). Examples of NLDKGQ element in OpenSees. Retrieved from **Xin-Zheng LU's Personal Homepage**:
http://www.luxinzheng.net/download/OpenSEES/Examples_of_NLDKGQ_element.htm
- [19] Lu, X.Z. (2015). A multi-layer shell element for shear walls based on OpenSEES--THUShell. Retrieved from **Xin-Zheng LU's Personal Homepage**:
http://www.luxinzheng.net/download/OpenSEES/En_THUShell_OpenSEES.htm
- [20] Opensees. (2015, May 28). ShellNLDKGQ. Retrieved from **Command Manual**:
<https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/ShellNLDKGQ>