Studying And Evaluating Progressive Collapse For An Earthquake-Resistant RC Dual System According To Columns And Shear Walls Removal

Dr. Bassam HWAIJA[*]
Dr. Khudr ALHAJ[**]
Hasan Abdulhadi[***]

(Received 25 / 7 / 2024. Accepted 16 / 10 / 2024)

□ ABSTRACT □

Various types of buildings may be exposed to exceptional loading situations (earthquakes, explosions, fires, terrorist acts, etc.) that cause progressive collapse, which begins with a localized structural failure in specific structural elements, then a series of failures in the structural system that ends with collapse the entire building or large part of it, accompanied with human and material losses.

The used design standards to mitigate the risks related to progressive collapse aim to use the continuity of structural elements and provide ductility, developing a good design plan that provides alternative load paths for the loads transferred from the damaged elements to the adjacent structural elements, which in turn must be able to bridging through this additional loads in order to prevent the collapse.

The research results indicate that the earthquake-resistant dual systems (frames-shear walls) designed according to the Syrian Arab Code have good resistance against progressive collapse when removing columns and parts of shear walls according to US Department of Defense recommendations with specific local structural modifications to some of the main load-bearing elements.

Keywords: Progressive Collapse ; Dual System ; Shear Walls.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

[*]**Professor, Department Of Structural Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. e:bassamhasanhwaiji@tishreen.edu.sy**
**** Assistant Professor, Department Of Structural Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. e: khoderypusofalhaj@tishreen.edu.sy**
***** PHD Post-graduate Student, Department Of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. e:hasan.abdulhadi@tishreen.edu.sy**

دراسة و تقييم الانهيار المتتابع للجمل الثنائية المقاومة للزلازل من البيتون المسلح عند إزالة أعمدة و جدران قص

د. بسام حويجة [*]

د. خضر الحج [**]

حسن عبد الهادي [***]

(تاريخ الإيداع 25 / 7 / 2024. قُبِل للنشر في 16/ 10 / 2024)

□ملخّص□

تتعرض مختلف أنواع المباني لحالات تحميل استثنائية (زلازل، انفجارات، حرائق، أعمال إرهابية وغيرها) تتسبب بحدوث الانهيار المتتابع والذي يبدأ من فشل إنشائي موضعي (محلي) في عناصر إنشائية محددة ثم سلسلة من الفشل في النظام الإنشائي تنتهي بانهيار كامل المبنى أو جزء كبير مترافقاً مع خسائر بشرية ومادية.

تهدف معايير التصميم المستخدمة للتخفيف من المخاطر المرتبطة بالانهيار المتتابع إلى الاستفادة القصوى من استمرارية العناصر الإنشائية وتوفير المطاوعة مع وضع خطة تصميمية جيدة تؤمن مسارات بديلة للأحمال المنقولة من العناصر المتضررة إلى العناصر الإنشائية المجاورة والتي بدورها يجب أن تتمكن من تكبد هذه الأحمال الإضافية وبالتالي السيطرة على العواقب ومنع الانهيار.

تشير نتائج البحث إلى أن الجمل الثنائية (اطارات–جدران قص) المقاومة للزلازل والمصممة وفق الكود العربي السوري تملك مقاومة جيدة على الانهيار المتتابع عند إزالة أعمدة و أجزاء من جدران القص بحسب توصيات وزارة الدفاع الأمريكية مع تعديلات إنشائية موضعية و محددة لبعض العناصر الرئيسية الحاملة.

الكلمات المفتاحية: الانهيار المتتابع – الجمل الثنائية – جدران القص.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

[*] **أستاذ – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

e:bassamhasanhwaiji@tishreen.edu.sy

[**] **مدرس – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

e:khoderyousofalhaj@tishreen.edu.sy

[***] **طالب دراسات عليا (دكتوراه)– قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية**

e:hasan.abdulhadi@tishreen.edu.sy

مقدمة:

قام الباحث (Jose M et al.,2018) [1] بمراجعة الأحداث المرتبطة بالانهيار المتتابع تاريخياً التي كانت سبباً مهما في تشجيع الباحثين في هذا المجال. بدأ الاهتمام مع مبنى Ronan Point، المبنى مؤلف من 22 طابق، تسبب انفجار غازي إلى دفع جدار خارجي حامل في مستوي الطابق 18 ليجعل المبنى مجرداً من أحد أركانه مما جذب الباحثين للتحري عن أسباب الانهيار والتي تعزى إلى جملة من الأسباب :

1- الوصلات الضعيفة بين الجدران المسبقة الصنع والبلاطات.

2- انقطاع في استمرارية العناصر الإنشائية.

ومن الأحداث الهامة أيضاً، تفجير مبنى ألفريد مورا الفيدرالي عام 1995 في مدينة اوكلاهوما، والذي أدى انفجار شاحنة أمام المبنى إلى انهيار جزء كبير منه مسبباً وفاة 168 شخص وخسائر مادية كبيرة.

عند دراسة انهيار مبنى ألفريد مورا، اقترحوا مجموعة من التوصيات والتي تستند إلى إعادة التحليل والتصميم الزلزالي للمبنى لتجنب الانهيار المتتابع حيث تضمنت هذه المقترحات :

1- استخدام الإطارات الخاصة المقاومة للعزوم.

2- استخدام الانظمة الثنائية (إطارات-جدران قص).

جاءت بعد ذلك أحداث ايلول وما تعرض له برج التجارة العالمي عام 2001 وغيرها من الأحداث التي جعلت من الضروري الاهتمام بالتصميم المقاوم للانهيار المتتابع وخاصة في المباني التي شكل جزء هام من البينة التحتية وتلك التي يشغلها عدد كبير من الناس.

عرف الانهيار المتتابع كل من إدارة الخدمات العامة General Services Administration (GSA, 2003) [2] بالإضافة إلى وزارة الدفاع الاميركية Department of Defense (UFC, 2016) [3] بأنه فشل مكون رئيسي يتسبب بانهيار العناصر الإنشائية المجاورة وبالتالي انهيار كامل المبنى أو جزء كبير منه، وقامت بتحديد حالات الفشل الموضعية (المحلية) الواجب أخذها بعين الاعتبار مع معايير القبول ذات الصلة لمختلف العناصر الإنشائية.

أهمية البحث و أهدافه:

تم إنجاز العديد من الأبحاث بخصوص سلوك الجمل الإطارية المقاومة للزلازل من البيتون المسلح والمصممة وفق شدات زلزالية مختلفة تحت تأثير الانهيار المتتابع أما الدراسات المتعلقة بالجمل الثنائية لاتزال محدودة جداً، وتكمن أهمية البحث في تصميم أبنية ذات جمل ثنائية مقاومة للزلازل والانهيار المتتابع معاً في ظل التزايد المستمر للأعمال الإرهابية والتي من الممكن أن تتعرض لها المباني.

يمكن تلخيص هدف البحث بما يلي:

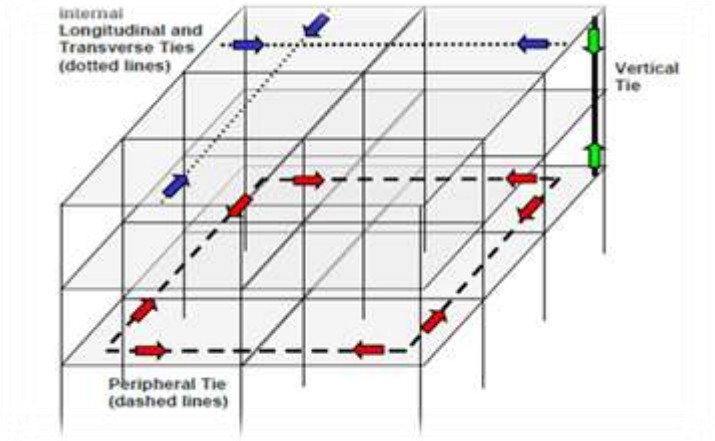
دراسة سلوك الجمل الثنائية من البيتون المسلح المصممة وفق الكود العربي السوري الأساس لعام 2012 وملحقه الثاني [4] تحت تأثير الانهيار المتتابع عند فقدان أعمدة وأجزاء من جدران القص من مواقع موصى بها وفق توصيات (UFC,2016) [3] .

1- الدراسة المرجعية:

تتنوع وتتعدد طرق التصميم لمقاومة الانهيار المتتابع والواردة في مختلف الكودات العالمية كالتالي :

1. طريقة قوى الربط Tie force (TF):

تعتمد في حالة الأبنية ذات الاحتمالية المنخفضة للانهيار المتتابع و تهدف إلى توفير ربط شاقولي وأفقي (الشكل 1) مما يحسن من الاستمرارية، وبالتالي يوفر مسارات بديلة للأحمال.



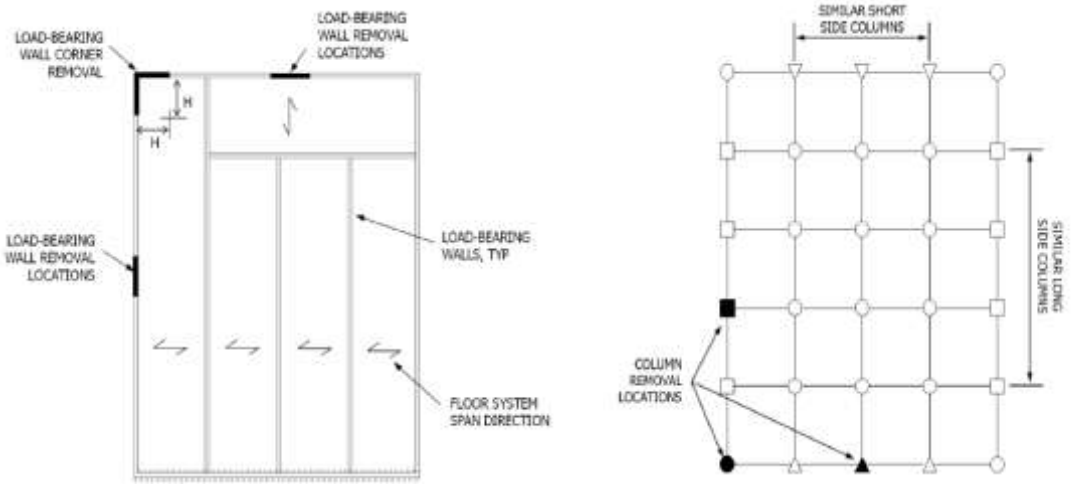
الشكل (1) : عناصر الربط في المنشآت الإطارية [3]

2. طريقة المسار البديل Alternative load path (ALP):

يستند إلى مفهوم إزالة عنصر، تصنف كنهج تصميم مباشر حيث يتم تحليل المنشأ لتقييم قدرة المنشأ على إعادة توزيع الأحمال الإضافية في المنطقة الخاضعة لفشل موضعي .

يتم إزالة الأعمدة الخارجية القريبة من المنتصف في الاتجاه الطويل والقصير والأعمدة في زوايا البناء شكل (2)، وأيضا في المناطق التي يتغير فيها التصميم الهندسي بشكل كبير مثل: الزوايا الداخلية، في المواقع التي تكون فيها الأعمدة المتجاورة ذات أحمال خفيفة أو المجازات ذات مقاسات مختلفة...

بالنسبة لجدران القص تتم الإزالة بنفس التراتبية في الأعمدة، طول الجزء المزال مكافئ لضعفي الارتفاع الطابقي 2H إذا كان طول الجدار أكبر من 2H أما إذا كان طول الجدار أقل من 2H يتم إزالة الجزء الضعيف حسب الخبرة الهندسية ، بالنسبة للجدران المتقاطعة تتم الإزالة بمقدار الارتفاع الطابقي H في كل اتجاه، أما بالنسبة للمقاطع (T, I C), يتم إزالة إما الجسد أو الجناح.



الشكل (2) : مواقع الأعمدة والجدران المزالة [3]

يسمح بإجراء تحليل ستاتيكي خطي ولا خطي بالإضافة إلى التحليل الديناميكي غير الخطي، بالنسبة للتحليل الستاتيكي غير الخطي ولتحليل وتقييم البناء يجب توظيف نموذج ثلاثي الأبعاد، مع اعتبار تأثير $P-\Delta$.

يتم تراكب الأحمال الميتة والحية معاً G_N (Increased Gravity Loads) مضروبة بعامل تصعيد ديناميكي ومطبقة بشكل مباشر على البلاطات المجاورة للعنصر المزال وعند كل الطوابق أعلى العنصر المزال.

$$G_N = \Omega_N\,[1.2\ D + (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S)]$$

Ω_N (Dynamic Increase Factor) : معامل التضخيم الديناميكي (الجدول 1).

أما بالنسبة لباقي البلاطات البعيدة عن موقع العمود المزال يتم تطبيق التراكب التالي:

$$G = 1.2\ D + (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S)$$

الجدول (1) : معامل التضخيم الديناميكي الوارد والمعتمد في UFC [3]

Material	Structure Type	Ω_N
Steel	Framed	$1.08 + 0.76/(\theta_{pra}/\theta_y + 0.83)$
Reinforced Concrete	Framed	$1.04 + 0.45/(\theta_{pra}/\theta_y + 0.48)$
	Load-Bearing Wall	2
Masonry	Load-bearing Wall	2
Wood	Load-bearing Wall	2
Cold-formed Steel	Load-bearing Wall	2

θ_{pra} : زاوية الدوران اللدن معطاة في جدول معايير القبول UFC بحسب مستوى الاستجابة الانشائية المناسب.

θ_y : زاوية الدوران عند الخضوع.

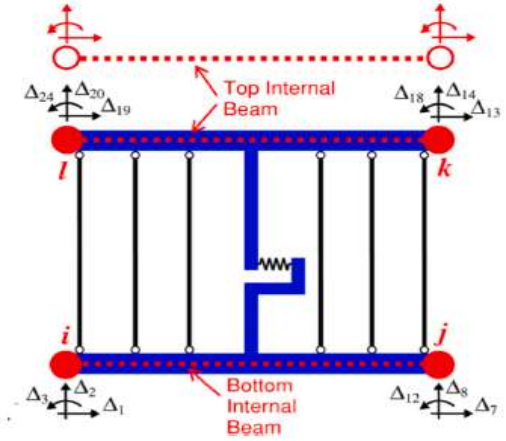
3. طريقة تحسين المقاومة الموضعية Enhance Local Resistance (ELR) :

معتمدة في (UFC, 2016)، عندما تكون ALP لا تحقق الهدف يتم تصميم عناصر رئيسية مفتاحية لمقاومة الأحمال الاستثنائية وتجنب الانهيار.

4. مقاربات معتمدة على الخطر Risk – Based approaches :

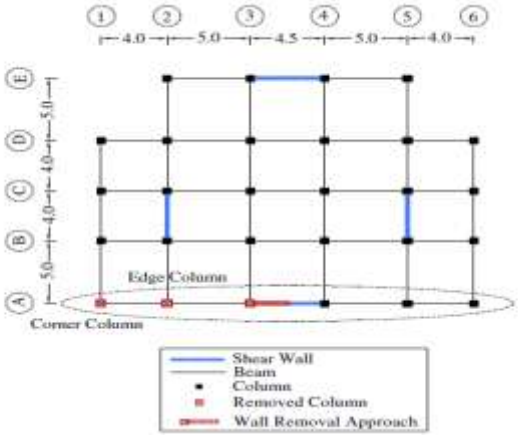
تعتمد على تصنيف المبنى وبالتالي اختيار طريقة التصميم التي تناسب مستويات التصنيف كما وردت في UFC.

تتنوع الطرق المستخدمة في نمذجة جدران القص من البيتون المسلح عند دراسة استجابة الجدار غير المرنة، ومنها طريقة MVLEM (Multi Vertical Line Element) [5] حيث يتم تقسيم الجدار بما يتوافق مع عدد الطوابق إلى مجموعة من العناصر الطولية تمثل البيتون المسلح وفولاذ التسليح ولكل عنصر منها مساحة مكافئة و سلوك إجهاد – انفعال الخاص به (الشكل 3).



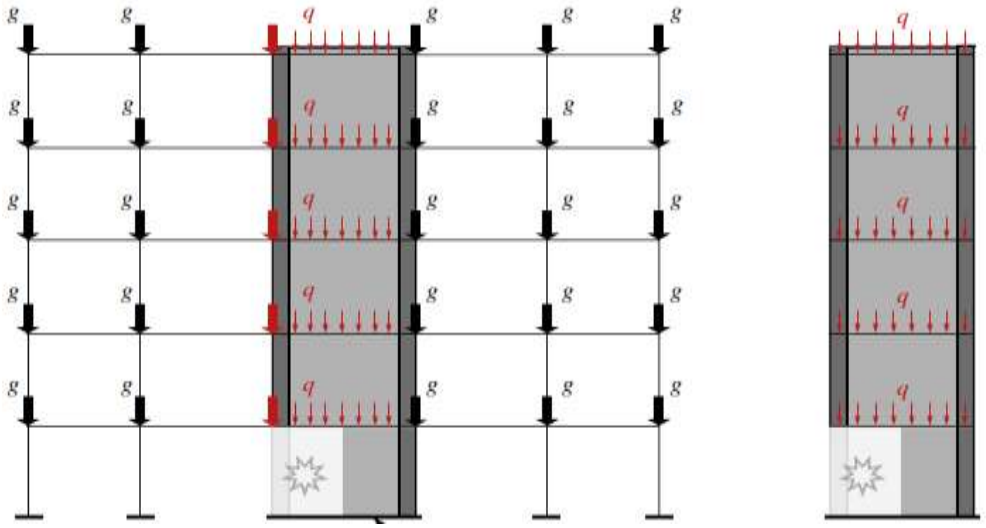
الشكل (3) : طريقة MVLEM لنمذجة جدران القص من البيتون المسلح [5]

قام الباحثان (Mohsen & Mohammad, 2017) [6] بدراسة مبنى من خمسة طوابق من البيتون المسلح، النظام الإنشائي إطارات – جدران قص (الشكل 4) مصمم وفق الكود التصميمي الإيراني (MRUD 2013) [7] و الكود التصميمي الزلزالي (BHRC 2015) [8]، الارتفاع الطابقي 3.2m، يقع في منطقة زلزالية 0.16g.



الشكل (4) : a– مسقط أفقي للمبنى المدروس b– نموذج 3-D للمبنى المدروس [6]

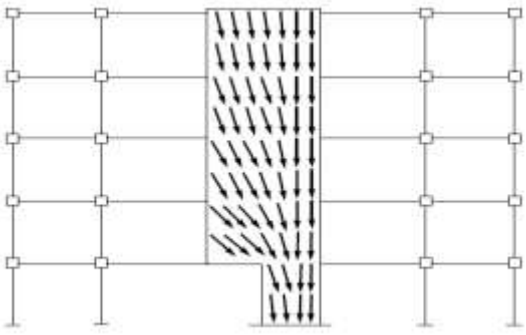
تم إزالة نصف طول الجدار الواقع على المحور A من مستوي الطابق الأول وحتى مستوي الطابق الرابع، يتعرض الجزء المتبقي من الجدار لحمولة متزايدة q بينما تتعرض باقي العناصر لحمل شاقولي تصميمي (1.25DL+0.5LL) كما يظهر في الشكل (5). تم دراسة النموذج كاملاً مع دراسة الجدار بشكل منفصل تحت تأثير الانهيار المتتابع.



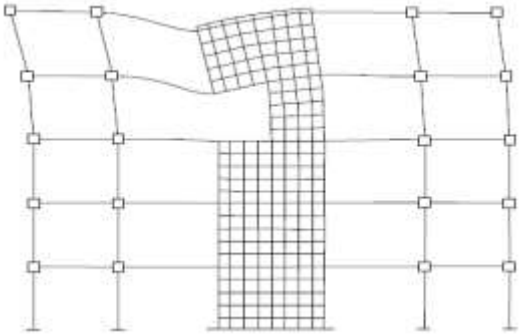
الشكل (5) : الأحمال التي يتعرض لها المبنى بعد إزالة نصف طول الجدار [6]

أظهرت نتائج التحليل بعد إزالة نصف طول جدار القص من مستوي الطابقين الأول والرابع ما يلي:

- عند إزالة الجدار من الطابق الأول شكل (6)، يميل جدار القص للانقلاب بسبب تزايد العزوم الناتج عن الأحمال غير المتوازنة فوق الجزء المتضرر من الجدار، وهذا العزم تتم مقاومته بشكل أساسي بوساطة الجزء المتبقي من الجدار، ويخضع جزء الجدار المتبقي لحمل محوري انعطافي حيث ينقل الأحمال الجديدة كقوى محورية إلى الأساسات. يساهم الإطار في منع الجدار من الانقلاب بتخفيف العزم المؤثر على الجزء المتبقي من الجدار.
- ثانياً وعند إزالة جزء الجدار من مستوي الطابق الرابع شكل (7)، لم يستطيع الجدار نقل الأحمال كقوى محورية، وإنما كان سلوك الجدار أقرب إلى الجائز فوق الجزء المتضرر.



الشكل (6):مسار الأحمال في الجزء المتبقي من الجدار عند الإزالة من الطابق الأول [6]



الشكل (7) : الشكل المتشوه للمبنى عند إزالة جزء الجدار من مستوي الطابق الرابع [6]

توصل الباحثان إل أن الجزء المتبقي من الجدار يشكل المسار الرئيسي للأحمال وبالتالي فإن قدرة التحمل الناظمية – الانعطافية للجزء المتبقي هي التي تحدد احتمالية الانهيار المتتابع، لذلك إزالة جزء الجدار من الطوابق العليا يتسبب بحمولة ناظمية – انعطافية أقل وبالتالي مقاومة أكبر للانهيار المتتابع.

طرائق البحث ومواده:

المبنى المدروس يقع في منطقة زلزالية حيث (Z=0.25) مكون من قبو يعلوه أحد عشر طابق متكرر، النظام الإنشائي جملة ثنائية من البيتون المسلح المقاومة للزلازل، صنف التربة S_B . تم التصميم وفق الكود العربي السوري وملحقه الثاني [4] وذلك بعد القيام بتشكيل نموذج ثلاثي الابعاد على برنامج ال ETABS 2016 يتضمن تأثيرات P−Δ.

تم إزالة الأعمدة القريبة من المنتصف بالاتجاهين (الطول والقصير) و بعدها إزالة نصف طول جدران القص الخارجية وستتم الإزالة من الطوابق وفق التالي : أول طابق فوق الأرض، منتصف الارتفاع، عند كل طابق يتغير فيه مقطع العمود أو الجدار، وبعد ذلك تم اجراء تحليل ستاتيكي لا خطي (دفعي متزايد نحو الأسفل) مع ادخال تأثيرات P−Δ، وتطبيق التراكب G_N بشكل مباشر على البلاطات المجاور للعنصر المزال وعند كل الطوابق فوق العنصر المزال .

$$G_N = \Omega_N\,[1.2\ D\ +\ (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S)]$$

أما بالنسبة لباقي البلاطات البعيدة عن موقع العمود المزال يتم تطبيق التراكب التالي:

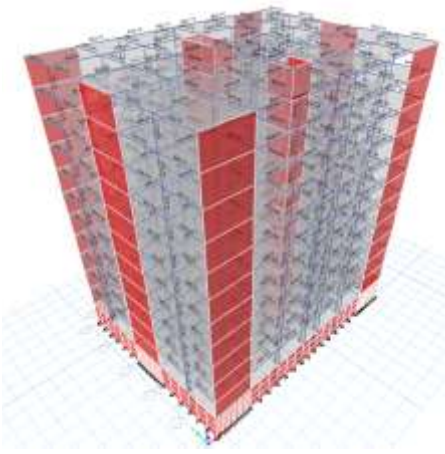
$$G\ =\ 1.2\ D\ +\ (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S)$$

مواصفات المواد المستخدمة (المقاومة المميزة للبيتون – إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي و العرضي):

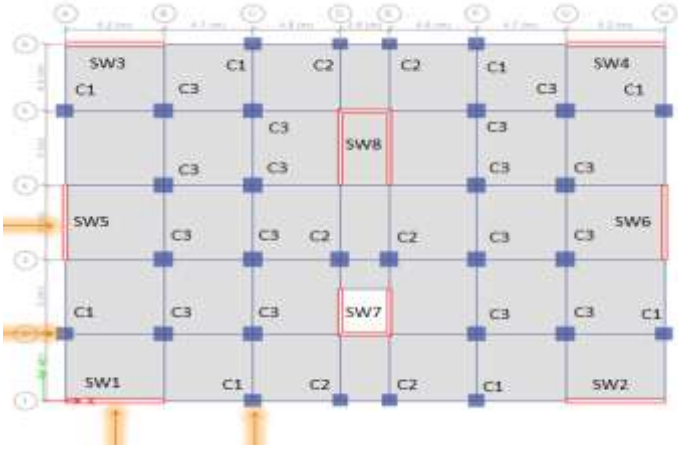
$$f_c^{`} = 20\ MPa \qquad f_y = 400\ MPa$$

الأحمال : حمولة تغطية على كل البلاطات $3kN/m^2$، حمولة موزعة بانتظام على الجوائز الخارجية لكل البلاطات عدا السطح وقدرها $12\ kN/m$، حمولة على الجوائز الخارجية لبلاطة السطح وقدرها $5\ kN/m$، حمولة موزعة بانتظام على الجوائز الداخلية للبلاطات $10\ kN/m$ عدا بلاطة السطح بسبب عدم وجود قواطع فوقها. حمولة حية على كل البلاطات $3\ kN/m^2$. تم دراسة وتصميم البناء المعتبر وفق الكود العربي السوري وملحقه الثاني باعتباره في المنطقة الزلزالية 2C ومن المهم استمرار دوره الوظيفي وبالتالي عامل الأهمية 1.25.

بعد المعايرة تبين أن حصة الإطارات الخاصة بحدود 40% من القص الطابقي بينما حصة الجدران بحدود 60% في الطوابق السفلى لتصبح تلك النسب متقاربة في الطوابق العليا. يظهر الشكل (8) نموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى مع مسقط أفقي (الشكل 9) تظهر عليه مقاطع الأعمدة وجدران القص حيث تشير الأسهم إلى مواقع الأعمدة وجدران القص المراد إزالة أجزاء منها، ويظهر الشكل (10) مسقط أفقي مع مقاطع الجوائز البيتونية المسلحة.



الشكل (8) : نموذج ثلاثي الأبعاد



الشكل (9) : مسقط أفقي للمبنى المدروس

الشكل (10) : مسقط أفقي للمبنى مع الجوائز البيتونية المسلحة

يظهر الجدول (2) التفاصيل الخاصة بالأعمدة من أبعاد وتسليح طولي وعرضي، بينما يبين الجدول (3) أبعاد وتسليح الجوائز البيتونية المسلحة، يحتوي الجدول (4) على التفاصيل الإنشائية الخاصة بجدران القص.

الجدول (2) : أبعاد الأعمدة مع التسليح الطولي والعرضي

C1	الطول (cm)	العرض (cm)	التسليح الشاقولي	التسليح العرضي
قبو+1+2+3	90	90	4T20+36T16	5T10/15
4+5+6+7	80	80	4T20+24T16	3T10/15
8+9+10+11	70	70	4T20+20T16	3T8/15

C2	الطول (cm)	العرض (cm)	التسليح الشاقولي	التسليح العرضي
قبو+1+2+3	85	85	4T20+28T16	5T10/15
4+5+6+7	80	80	4T20+24T16	3T10/15
8+9+10+11	70	70	4T20+20T16	3T8/15

C3	الطول (cm)	العرض (cm)	التسليح الشاقولي	التسليح العرضي
قبو + 1	100	100	4T20+36T18	5T10/15
2+3	90	90	4T20+36T16	5T10/15
4+5+6+7	80	80	4T20+24T16	3T10/15
8+9+10+11	70	70	4T20+20T16	3T8/15

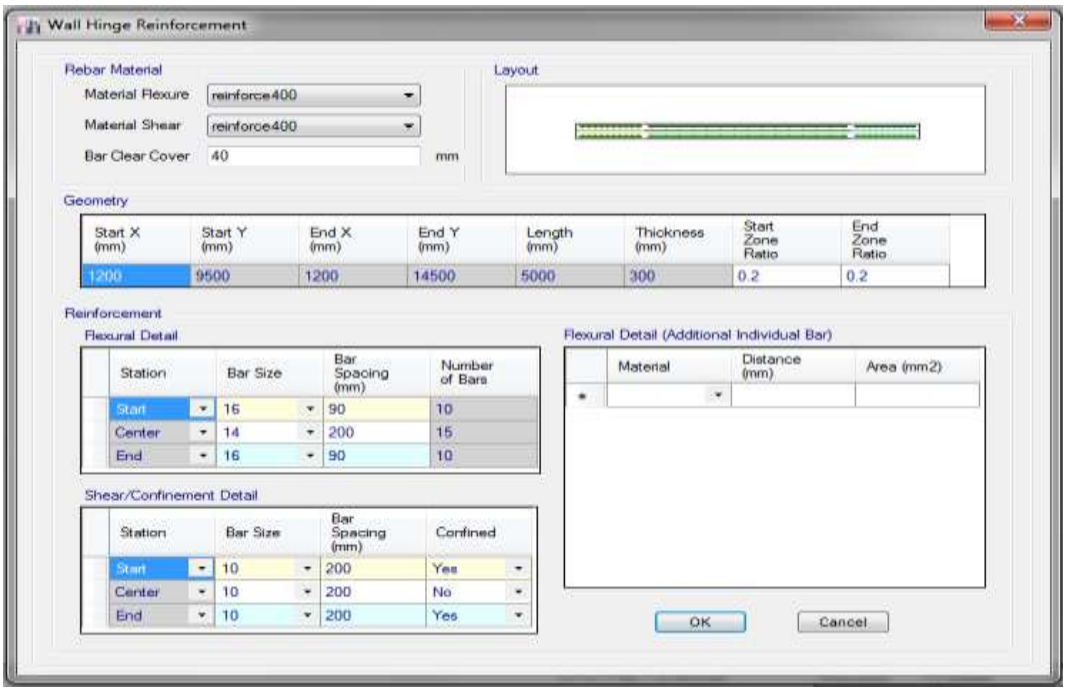
الجدول (3) : أبعاد الجوائز مع التسليح الطولي والعرضي

الجائز	الارتفاع	العرض	تسليح سفلي	تسليح علوي		اساور الشد الوسطي	اساور الشد الطرفيين
				وسط المجاز	مضاف عند المسند		
B1	70	40	8 T 16	4 T 16	4T16	2T10/15	2T10/10
B2	65	35	6 T 16	4 T 16	4T16	2T10/15	2T10/10
B3	50	25	4 T 16	4 T 14	2T14	2T8/15	2T8/15

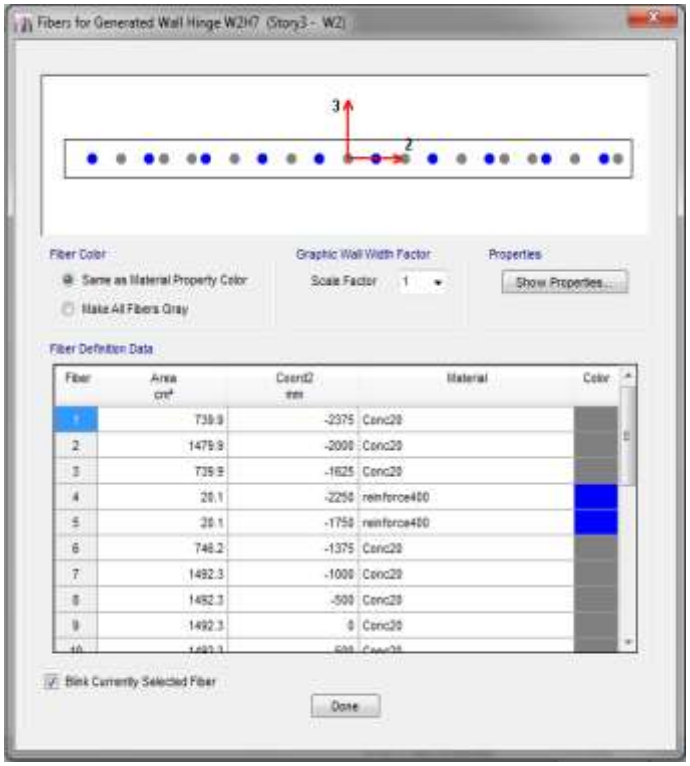
الجدول (4) : التفاصيل الإنشائية الخاصة بجدران القص

الاسم	الطابق	السماكة (cm)	التسليح		العمود المخفي		
			الشاقولي	الافقي	الابعاد	التسليح	الاساور
W1,2,3,4	القبو+1+2	30	T14@20cm	T10@20cm	80x30	T16@10cm	2T10@20cm
W1,2,3,4	3+4+5+6	25	T14@20cm	T10@20cm	80x25	T14@10cm	2T8@20cm
W1,2,3,4	7+8+9	25	T12@20cm	T8@20cm			
W1,2,3,4	10+11	20	T12@20cm	T8@20cm			
W5,6	القبو+1+2	30	T14@20cm	T10@20cm	100x30	T16@9cm	3T10@20cm
W5,6	3+4+5+6	25	T14@20cm	T10@20cm	100x25	T14@11cm	3T8@20cm
W5,6	7+8+9	25	T12@20cm	T8@20cm			
W5,6	10+11	20	T12@20cm	T8@20cm			
W7	قبو+1+2+3+4	25	T14@15cm	T10@20cm	60x25	T16@10cm	T8@20cm
W7	بقية الطوابق	20	T12@15cm	T8@20cm	60x20	T14@10cm	T8@20cm
W8	قبو+1+2+3+4	25	T14@15cm	T10@20cm	80x25	T16@10cm	T10@20cm
W8	بقية الطوابق	20	T12@15cm	T8@20cm	80x20	T14@10cm	T8@20cm

يظهر الشكل (11) تعريف تسليح جدار القص في برنامج ETABS بشكل دقيق (التسليح الشاقولي، التسليح الأفقي، التطويق، الأعمدة المخفية)، حيث تم تقسيم المقطع العرضي لجدار القص إلى مجموعة من العناصر الطولية (فولاذ تسليح + بيتون) لكل منها المساحة المكافئة وسلوك الإجهاد – انفعال كما يظهر الشكل (12).



الشكل (11): التفاصيل الإنشائية للجدار SW5 الخاصة بتعريف المفصل اللدن



الشكل (12): العناصر الطولية التي تمثل البيتون وفولاذ التسليح في جدار القص SW5

تم تعريف مفصل لدن من نوع $P - M_3$ لجدران القص يتناسب مع تفاصيل التسليح و يأخذ بالاعتبار سلوك الجدار غير الخطي تحت تأثير الفعل الناظمي والانعطافي ضمن مستويه.

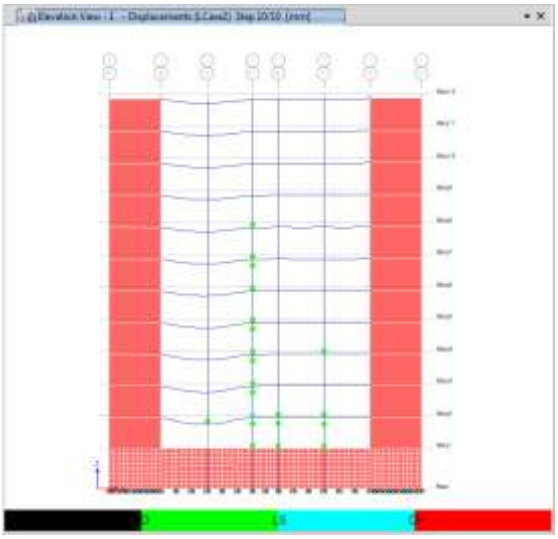
بالنسبة للأعمدة تم تعريف المقاطع العرضية مع تفاصيل التسليح بشكل دقيق وإسناد مفاصل $P - M_2 - M_3$ لدراسة السلوك غير الخطي للأعمدة تحت تأثير الفعل الناظمي والانعطافي و تقسيم المقطع العرضي إلى مجموعة من العناصر الطولية (فولاذ تسليح + بيتون) وإسناد سلوك اجهاد – انفعال لكل عنصر.

النتائج والمناقشة:

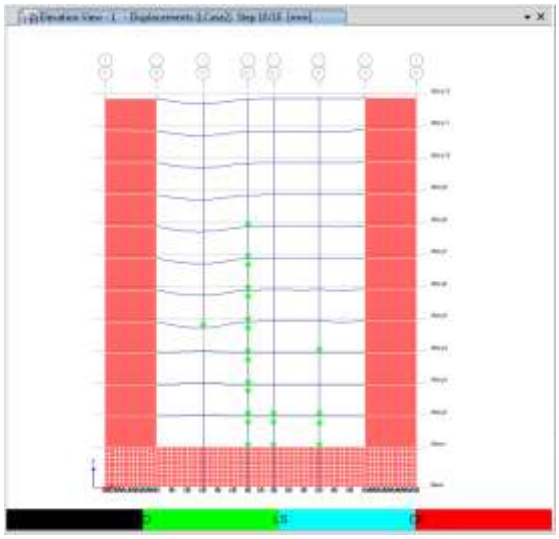
في ما يلي سيتم استعراض نتائج التحليل الستاتيكي غير الخطي للمبنى المدروس وفق حالات الإزالة المعتبرة وفي مختلف الطوابق.

إزالة العمود C-1 من منتصف المجاز الطويل من الطوابق (الأول–الرابع–السادس–الثامن): إن إزالة العمود C-1 من مستوي الطابق الأول أدت إلى انهيار العمود C-2 في الطابق الثاني بسبب زيادة الأحمال الشاقولية التي يتلقاها من العنصر المتضرر. يظهر الشكل (13) مقطع شاقولي للمبنى بعد إزالة العمود C-1.

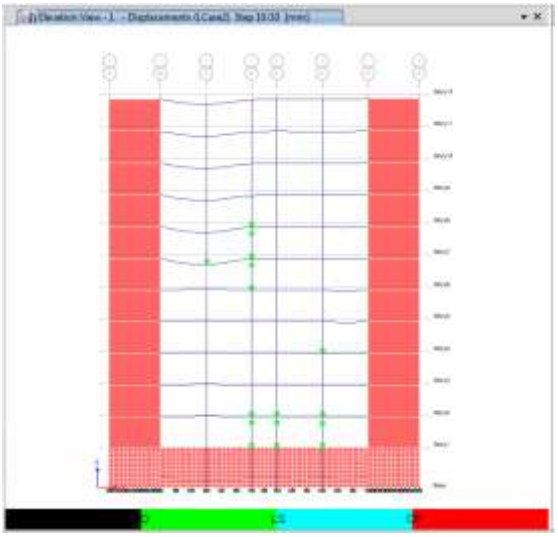
تظهر الأشكال (14– 15– 16) حالات الإزالة الخاصة بالعمود C–1 في بقية الطوابق (الرابع، السادس، الثامن) على الترتيب، حيث لم تتسبب إزالة العمود C-1 في الطوابق المذكورة بأي انهيار في العناصر الشاقولية الحاملة، وكانت معظم المفاصل المتشكلة ضمن مستوي الإشغال الفوري.



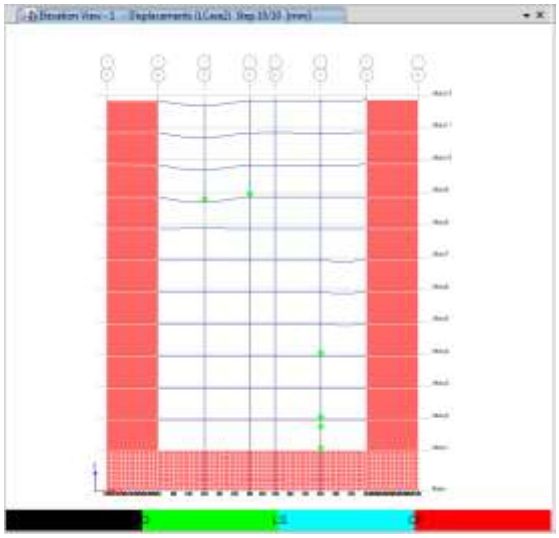
الشكل (13) :حالة إزالة العمود C-1 من الطابق الأول



الشكل (14) :حالة إزالة العمود C-1 من الطابق الرابع



الشكل(15):حالة إزالة العمود C-1 من الطابق السادس

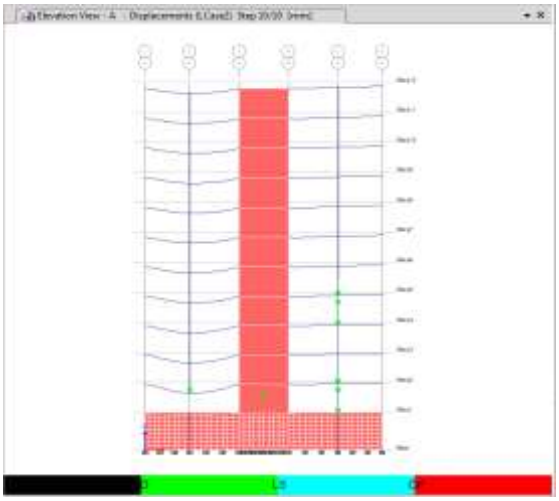


الشكل (16) :حالة إزالة العمود C-1 من الطابق الثامن

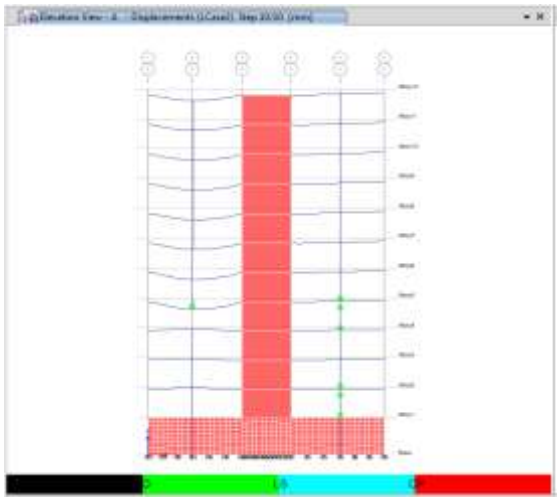
إزالة العمود A-2 من منتصف المجاز القصير من الطوابق (الأول–الرابع–السادس–الثامن):

يظهر الشكل (17) حالة إزالة العمود A-2 من مستوي الطابق الأول والتي تسببت في انهيار العمود B-2 في مستوي الطابق الثاني، وأدت إزالة العمود A-2 من مستوي الطابق الرابع (الشكل 18) إلى انهيار العمود المجاور B-2 في الطابق الرابع. إن إزالة العمود A-2 من الطابقين الأول والرابع أدت إلى زيادة الأحمال الشاقولية على جداري القص SW1 & SW5 حيث تشكل عدد من المفاصل ضمن مستوي الإشغال الفوري.

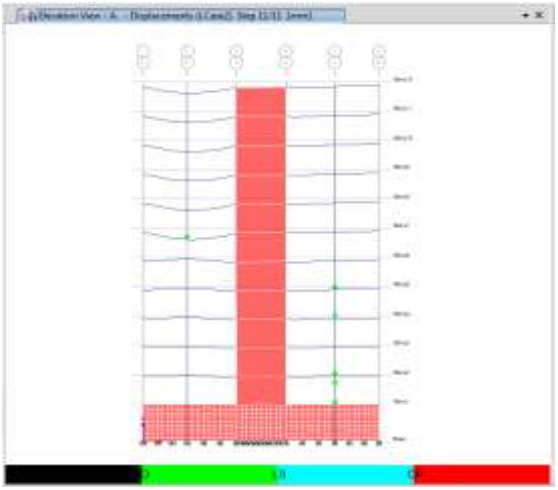
لم تتسبب إزالة العمود A-2 في الطابق السادس (الشكل 19) والطابق الثامن (الشكل 20) بأي انهيار في العناصر الشاقولية الحاملة، وكانت جميع المفاصل المتشكلة ضمن مستوي الإشغال الفوري.



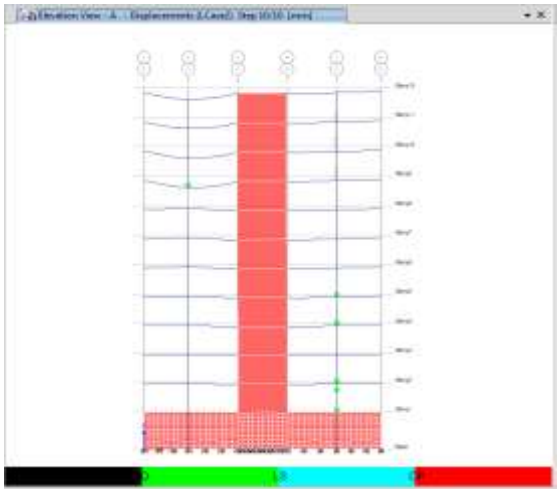
الشكل (17) :حالة إزالة العمود A-2 من الطابق الأول



الشكل (18) :حالة إزالة العمود A-2 من الطابق الرابع



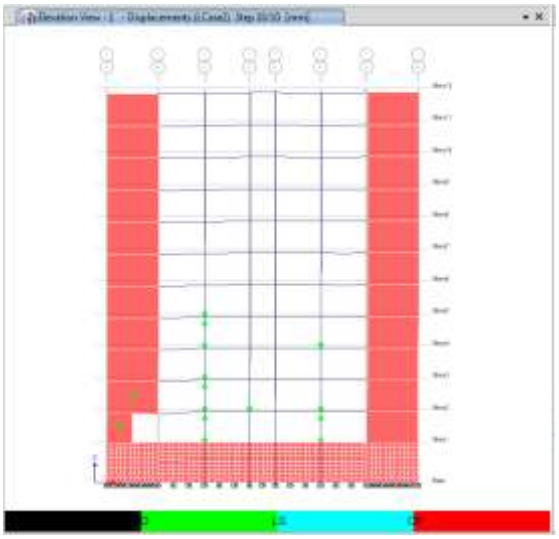
الشكل(19):حالة إزالة العمود A-2 من الطابق السادس



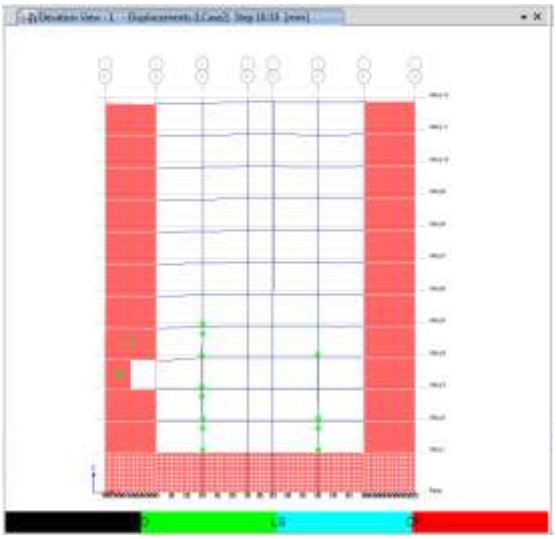
الشكل (20): حالة إزالة العمود A-2 من الطابق الثامن

إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطوابق (الأول– الثالث– السادس– العاشر):

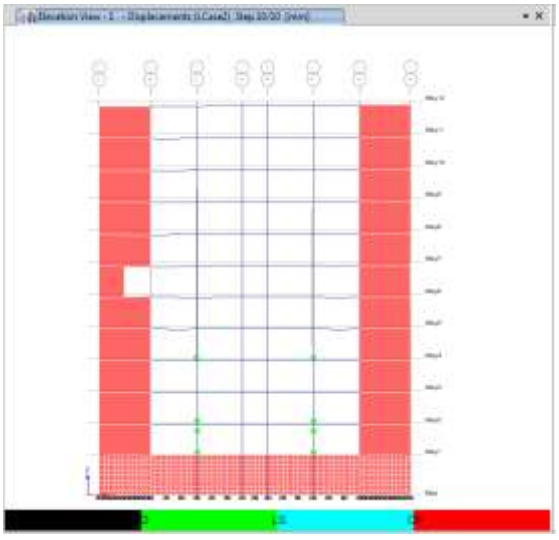
تظهر الأشكال (24,23,22,21) حالات إزالة نصف طول الجدار المذكور من الطوابق الأول، الثالث، السادس، والعاشر على الترتيب، حيث أنها لم تتسبب بأي انهيار في العناصر الشاقولية الحاملة (أعمدة وجدران قص) وحتى في الجزء المتبقي من جدار القص المتضرر، حيث كانت جميع المفاصل المتشكلة ضمن مستوي الإشغال الفوري.



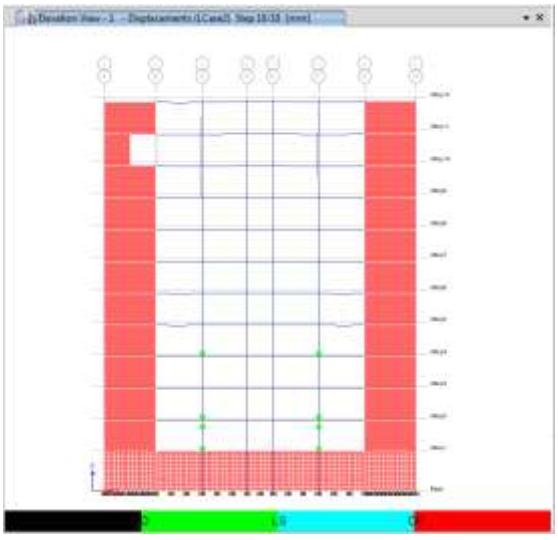
الشكل (21) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الأول



الشكل (22) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الثالث



الشكل (23) : إزالة نصف الجدار SW1 من الطابق السادس

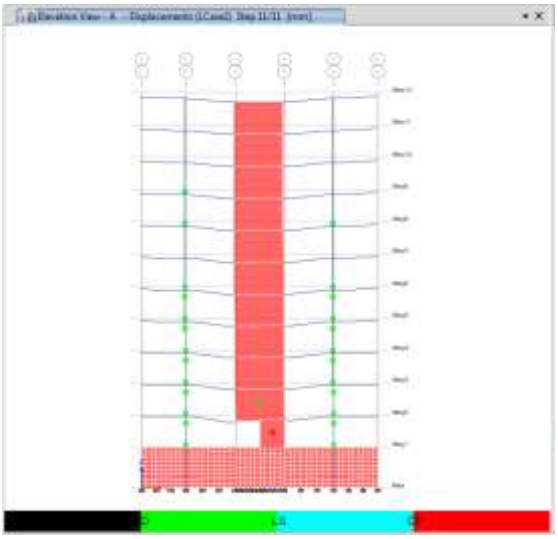


الشكل (24) : إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق العاشر

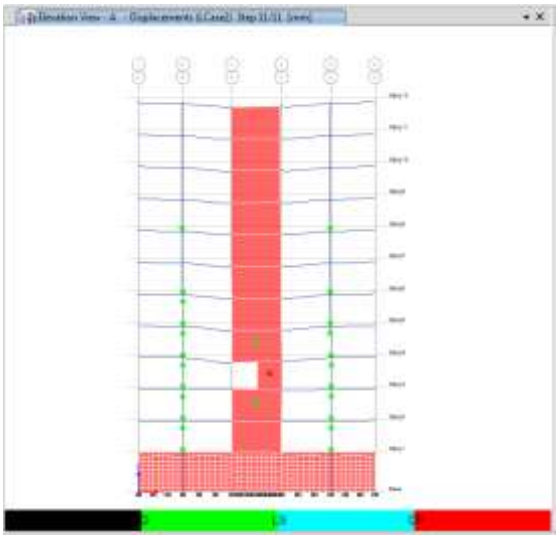
إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطوابق (الأول– الثالث– السادس– العاشر):

إن إزالة نصف طول الجدار المذكور من مستوي الطابق الأول (الشكل 25) والطابق الثالث (الشكل 26) كانت الحالات الأكثر حرجاً حيث تضرر الجزء المتبقي من الجدار بشكل كبير نتيجة الإجهادات التي يتعرض لها.

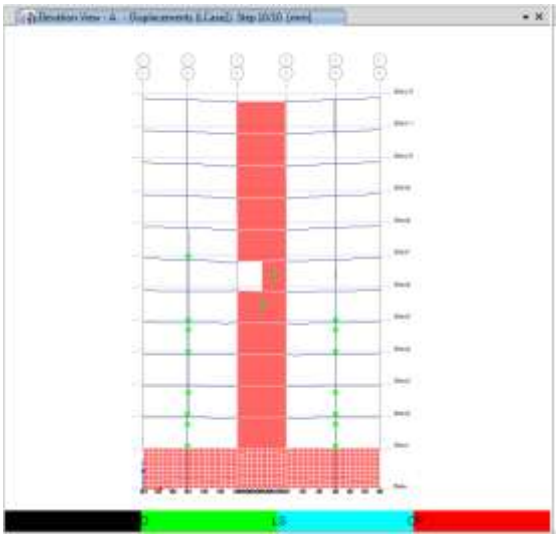
بينما لم تسبب الإزالة من مستوي الطابق السادس (الشكل 27) والطابق العاشر(الشكل 28) أي انهيار في العناصر الشاقولية الحاملة (أعمدة + جدران قص).



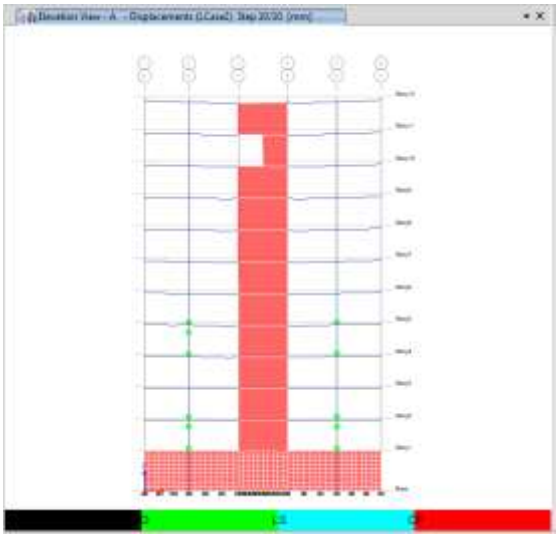
الشكل (25) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الأول



الشكل (26) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الثالث

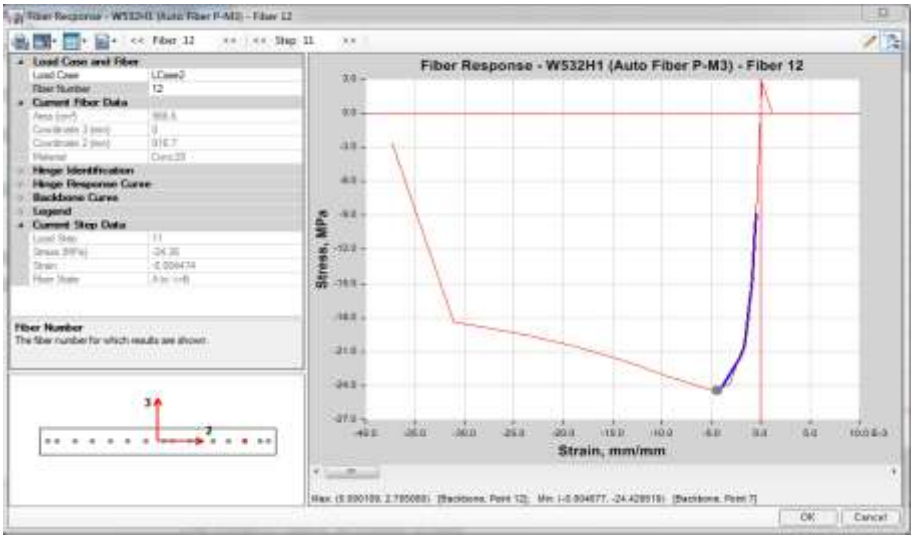


الشكل (27) : إزالة نصف الجدار SW5 من الطابق السادس



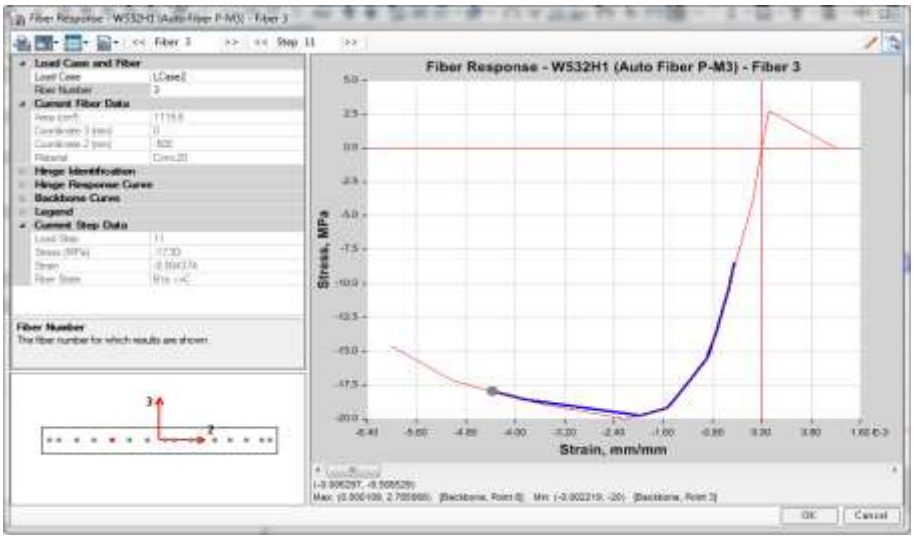
الشكل (28) : إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق العاشر

عند إزالة نصف طول الجدار SW5 من مستوي الطابق الأول، تعرض الجزء المتبقي منه إلى الانهيار بفعل الأحمال الشاقولية (17737 kN) وعزم الانعطاف ضمن مستويه (2171 kN.m)، يظهر الشكل (29) علاقة الإجهاد – انفعال في عنصر يمثل جزء من البيتون المطوق (العمود المخفي في طرف الجدار).

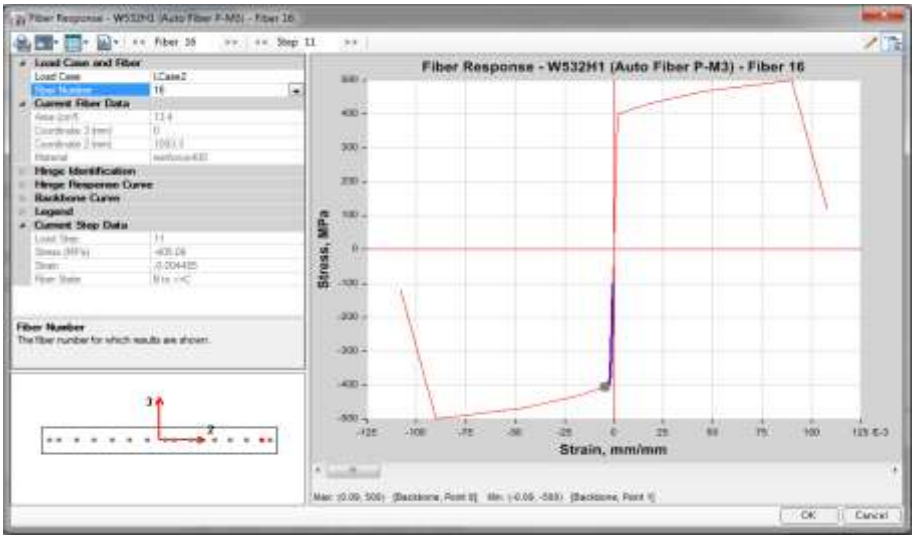


الشكل (29): الإجهادات والانفعالات في جزء من العمود المخفي للجدارSW5 من الطابق الأول

يظهر الشكل (30) عنصر يمثل جزء من وسط الجدار من البيتون غير المطوق، أما الشكل (31) فهو يمثل جزء من فولاذ التسليح الشاقولي للجدار.



الشكل (30) : الإجهادات والانفعالات في عنصر من وسط الجدار SW5 من الطابق الأول



الشكل (31) : الإجهادات والانفعالات في عنصر يمثل جزء من فولاذ التسليح الشاقولي للجدار SW5 من الطابق الأول

الاستنتاجات والتوصيات:

❖ يساهم التصميم المقاوم للزلازل في الجمل الثنائية في رفع المتانة والصلابة الإنشائية لمختلف العناصر وبالتالي يحسن استجابتها تحت تأثير الانهيار المتتابع.

❖ تزداد حصة الإطارات الخاصة من القص القاعدي في الجمل الثنائية في أعلى البناء وبالتالي زيادة الطلب الزلزالي يقابلها زيادة في المتانة الإنشائية مما يجعلها تقاوم الانهيار المتتابع عند إزالة أعمدة أو أجزاء من جدران القص في مختلف الطوابق.

❖ عند المقارنة بين سلوك الإجهاد – انفعال لعناصر من البيتون المطوق (الأعمدة المخفية) وغير المطوق (وسط الجدار) لجدار قص متضرر كما تظهر الأشكال (30,31)، نجد أن التطويق يساهم في تحسين السلوك الإنشائي للبيتون و رفع قدرة العناصر على تلقي الأحمال الجديدة المنقولة من العنصر المتضرر وبالتالي تحسين سلوك المبنى تحت تأثير الانهيار المتتابع.

❖ إن وجود جداري قص على ذات المحور وفي نفس الاتجاه (SW1&SW2) يساهم في تحسين الاستجابة الإنشائية عند إزالة نصف طول أحدهما من مستوي طابق معين (حالة إزالة الجدار SW1) بسبب الصلابة الكبيرة لجدران القص وقدرتها على مقاومة العزوم المتشكلة و الدوارانات.

نوصي بما يلي :

1. دراسة الانعطاف خارج المستوي لجدران القص في الجمل الثنائية تحت تأثير الانهيار المتتابع.
2. دراسة جدران القص ذات المقاطع غير المستطيلة عند فقدان أجزاء منها تحت تأثير الانهيار المتتابع.

References:

[1] Jose M, A., Fulvio, P., Juan, S. and Xinzheng, L.(2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*,173(2018) 122–149.

[2] General Services Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington, DC: Office of Chief Architects; 2003.

[3] Department of Defense (DoD). Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03). Washington, DC: Unified Facilities Criteria; 2016.

[4] Syrian Arab Code for design and implementation of the facilities in the reinforcement concrete .Fourth Edition ,Damascus,2012

[5] Kolozvari K, Kalbasi K, Orakcal K, Wallace JW. Three-dimensional model for nonlinear analysis of slender flanged reinforced concrete walls. Eng Struct J (2021);112105.

[6] Mohsen , A and Mohammad M , Javidan .(2017). Progressive Collapse-Resisting Mechanisms and Robustness of RC Frame–Shear Wall Structures. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001012.

[7] MRUD (Ministry of Roads and Urban Development of the Islamic Republic of Iran). (2013). Iranian national building code. Part 9: Design and construction of reinforced concrete buildings, ASCE, Reston, VA.

[8] BHRC (Building and Housing Research Center of the Islamic Republic of Iran). (2015). "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings." Standard No. 2800, ASCE, Reston, VA.