Improving The Structural Response Of Reinforced Concrete Shear Walls In Dual Systems Against Progressive Collapse

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

(Received 26 / 1 / 2025. Accepted 28 / 4 / 2025)

□ ABSTRACT □

Various structural elements in buildings subjected to unconventional loads with low probability (floods, earthquakes, explosions, etc.) which aren't considered in structural design stage. This exceptional loads may cause a local failure, which in turn causes a series of failures and damage with an extent disproportionate to the original local damage, eventually resulting in the collapse of an entire structure or a large part of it, especially in important buildings or high occupancy level (Schools, hospitals, trading centers…) resulting of fatalities and high repairing coasts in addition to the cessation of the building's operational function.

Progressive collapse of reinforced concrete dual system (frame – shear wall) building was studied and evaluated, the building located in high seismic zone and designed according to Syrian Arab Code and it's second appendix. Based on alternative load path, in this study partial shear wall removal (half-length of the shear wall, quarter- length of the shear wall from both sides) from the first floor and the fourth floor (the floor where the wall section change) was investigated according to the US Department of Defense recommendations in order to improve the structural response of the building and thus its ability to transfer the additional unbalanced loads. Based on the results, the removal cases from the first floor are the most critical. As the length of the shear wall increase, the resistance against progressive collapse increases. The behavior of the shear wall improves significantly against progressive collapse by increasing the damaged shear-wall concrete compressive strength 25% and by raising the minimum vertical reinforcement ratio to 0.01 for high-strength reinforcement.

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, Latakia University, Latakia, Syria. e:bassamhasanhwaiji@tishreen.edu.sy

** Assistant Professor, Department Of Structural Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. e: khoderypusofalhaj@tishreen.edu.sy

*** PHD student, Department Of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. e:hasan.abdulhadi@tishreen.edu.sy.

تحسين الاستجابة الإنشائية لجدران القص من البيتون المسلح في الجمل الثنائية تحت تأثير الانهيار المتتابع

د. بسام حويجة [*]

د. خضر الحج [**]

حسن عبد الهادي [***]

(تاريخ الإيداع ٢٦ / ١ / ٢٠٢٥. قُبِل للنشر في ٢٨/ ٤ / ٢٠٢٥)

ملخّص

تتعرض العناصر الإنشائية المختلفة في المباني لأحمال غير تقليدية ذات احتمالية منخفضة (فيضانات، زلازل، انفجارات، وغير ذلك) لا تؤخذ بالحسبان في مرحلة التصميم الإنشائي، وهذه الأحمال الاستثنائية قد تسبب فشلاً موضعياً، مما يسبب بدوره سلسلة من الفشل والأضرار بمدى غير متناسب مع الضرر الموضعي الأصلي يؤدي في النهاية إلى انهيار المنشأ بأكمله أو جزء كبير منه، وخاصة في المباني المهمة أو ذات مستوى الإشغال العالي (مدارس، مستشفيات، مراكز تجارية الخ ...) وما ينتج عنها من وفيات و كلف اصلاح عالية بالإضافة إلى توقف الوظيفة التشغيلية لهذه المباني.

تم دراسة وتقييم الانهيار المتتابع لمبنى مكون من جملة ثنائية (اطار – جدار قص) من البيتون المسلح، المبنى يقع في منطقة زلزالية مرتفعة ومصمم وفق الكود العربي السوري وملحقه الثاني. بالاستناد على طريقة المسار البديل، تم في هذه الدراسة إزالة أجزاء من جدار القص (نصف طول جدار القص، ربع طول جدار القص من الجانبين) من الطابق الأول والطابق الرابع (الطابق الذي يتغير فيه مقطع جدار القص) وفقًا لتوصيات وزارة الدفاع الأمريكية بهدف تحسين الاستجابة الإنشائية للمبنى وبالتالي قدرته على توزيع الأحمال الإضافية غير المتوازنة. بناءً على النتائج، فإن حالات الإزالة من الطابق الأول هي الأكثر حرجاً. مع زيادة طول جدار القص، تزداد المقاومة ضد الانهيار المتتابع. يتحسن سلوك جدار القص بشكل كبير ضد الانهيار المتتابع من خلال زيادة المقاومة المميزة لبيتون جدار القص المتضرر بمقدار ٢٥٪ ورفع نسبة التسليح الشاقولي الدنيا إلى ٠,٠١ للتسليح عالي المقاومة.

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 اللاذقية – اللاذقية – سورية**
e:bassamhasanhwaiji@tishreen.edu.sy

[**] **مدرس – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.**
e:khoderyousofalhaj@tishreen.edu.sy

[***] **طالب دراسات عليا (دكتوراه)– قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة اللاذقية– اللاذقية– سورية**
e:hasan.abdulhadi@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يعرف الانهيار المتتابع بأنه انتشار الفشل الإنشائي الموضعي من عنصر إلى عنصر ويستمر هذا السيناريو حتى ينهار المبنى أو جزء كبير منه مما يتسبب بخسائر بشرية ومادية كبيرة [1]، والجدير بالذكر أن هذا الحدث يعتبر نادراً نسبياً ويحتاج إلى ظروف تحميل استثنائية (انفجارات، زلازل، أعمال إرهابية وغيرها الخ...).

استعرض الباحثون Jose A, Fulvio P, Juan S, Xinzheng L [2] الأحداث المرتبطة بالانهيار المتتابع تاريخياً، منها 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.

عرفت إدارة الخدمات العامة [3] بالإضافة إلى معايير المرافق الموحدة الصادر عن وزارة الدفاع الأميركية [4] الانهيار المتتابع بأنه فشل مكون رئيسي يتسبب بانهيار العناصر الإنشائية المجاورة وبالتالي انهيار كامل المبنى أو جزء كبير منه، حيث طورت طرق تصميمية مختلفة لمقاومة الانهيار المتتابع، وهي كالتالي:

١. طريقة قوى الربط Tie force (TF) : تهدف إلى توفير ربط شاقولي في الأعمدة وأفقي في البلاطات مما يحسن من الاستمرارية، ويساهم في توفير مسارات بديلة للأحمال.

٢. طريقة المسار البديل Alternative load path (ALP) : يستند إلى مفهوم إزالة عنصر شاقولي من موقع محدد، وتقييم قدرة المنشأ على تجاوز العنصر المتضرر دون أن يتسبب بفشل إنشائي أكبر وهي الطريقة المعتمدة في هذه الدراسة.

٣. طريقة تحسين المقاومة الموضعية Enhance Local Resistance (ELR) : وذلك عن طريق زيادة المقاومة على الانعطاف والقص للأعمدة والجدران المحيطية في مستوي الطابق الأرضي.

٤. مقاربات معتمدة على الخطر Risk – Based approaches : تعتمد على تصنيف المبنى وبالتالي اختيار طريقة التصميم التي تناسب مستوى التصنيف كما وردت في معايير المرافق الموحدة [4] حيث في المباني ذات الأهمية العالية يتم الدمج بين الطرق السابقة.

أهمية البحث و أهدافه:

تستخدم الجمل الثنائية من البيتون المسلح بشكل واسع في المباني ذات الارتفاعات المتوسطة والعالية، تتعدد وتتنوع الأحداث الاستثنائية والتي من الممكن أن تتعرض لها هذه الجمل (زلازل، انفجارات، تهديدات إرهابية الخ....)، ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث في كيفية زيادة متانة جدران القص عند إزالة أجزاء منها بحيث يساهم التفاعل بين الجزء المتبقي من الجدار والعناصر الإنشائية المجاورة في مقاومة الأحمال الجديدة ليبقى النظام الإنشائي متوازن ومستقر. يمكن تلخيص هدف البحث بما يلي:

دراسة سلوك الجمل الثنائية من البيتون المسلح المصممة وفق الكود العربي السوري الأساس لعام 2012 وملحقه الثاني [5] عند فقدان أجزاء من جدران القص بحسب معايير المرافق الموحدة [4]، والبحث في فلسفة التصميم عن الطرق الأكثر ملائمة لتوفير مقاومة أعلى لجدار القص على الانهيار المتتابع.

١ – الدراسة المرجعية:

تستند طريقة المسار البديل إلى مفهوم إزالة عنصر، تصنف كنهج تصميم مباشر حيث يتم تحليل المنشأ لتقييم قدرته على إعادة توزيع الأحمال الإضافية في المنطقة الخاضعة لفشل موضعي. بالنسبة لجدران القص الخارجية تتم الإزالة

من منتصف الاتجاه الطويل ومنتصف الاتجاه القصير ومن زوايا المبنى، طول الجزء المزال مكافئ لضعفي الارتفاع الطابقي 2H إذا كان طول الجدار أكبر من 2H أو إزالة الجزء الضعيف حسب الخبرة الهندسية، بالنسبة للجدران المتقاطعة تتم الإزالة بمقدار الارتفاع الطابقي H في كل اتجاه (الشكل ١)، أما بالنسبة للمقاطع (T, I ,C) يتم إزالة إما الجسد أو الجناح [4].

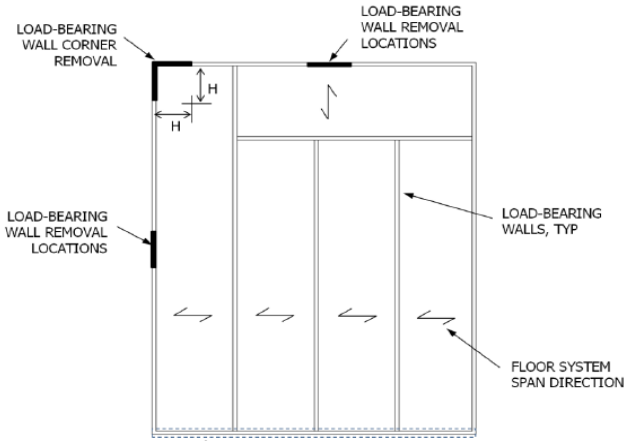
يتم استخدام تراكب للأحمال الميتة والحية معاً G_N (Increased Gravity Loads) مضروبة بعامل تصعيد ومطبقة على البلاطات المتصلة مع العنصر المزال أعلى مستوي الإزالة (معادلة ١).

$$G_N = \Omega_N [1.2\ D + (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S)] \quad (1)$$

Ω_N (Dynamic Increase Factor) : معامل التضخيم الديناميكي.

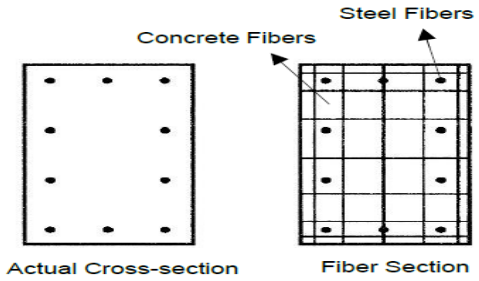
أما بالنسبة لباقي البلاطات يتم تطبيق التراكب بدون عوامل تصعيد (معادلة ٢) وفق التالي:

$$G = 1.2\ D + (0.5\ L \text{ or } 0.2\ S) \quad (2)$$

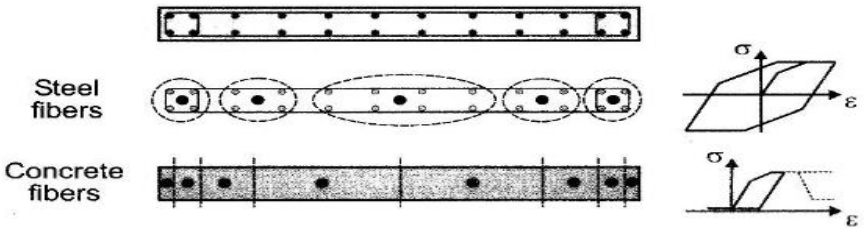


الشكل(١) : مواقع الجدران المزالة بحسب توصيات معايير المرافق الموحدة [4]

في هذه الدراسة، تم تقسيم المقاطع العرضية للعناصر الإنشائية إلى مجموعة من العناصر الطولية (عناصر تمثل البيتون و اخرى تمثل فولاذ التسليح)، وإسناد سلوك إجهاد – انفعال لكل منها وفق توصيات Powell [6]. تظهر الأشكال (٢,٣) طريقة تقسيم الأعمدة وجدران القص بحسب طريقة Fiber Section Method.



الشكل(٢) : تقسيم المقطع العرضي للعمود بطريقة Fiber Section Method [6]



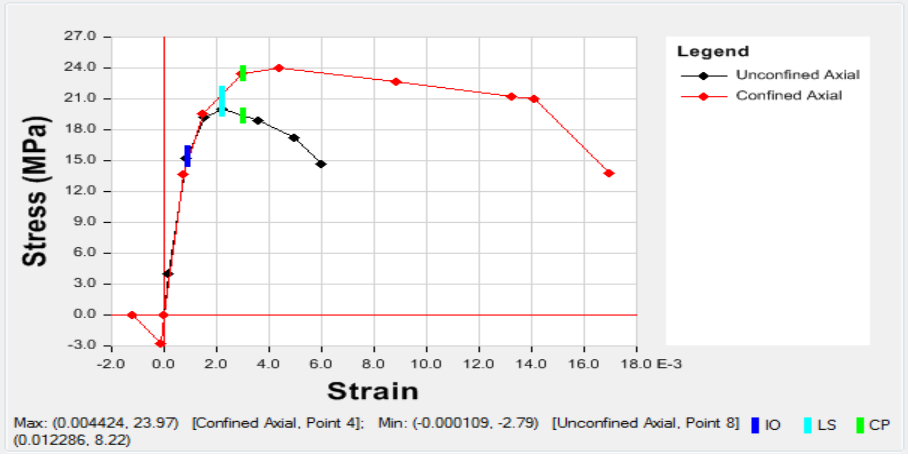
الشكل(٣) : تقسيم المقطع العرضي لجدار القص بطريقة Fiber Section Method [6]

طرائق البحث ومواده:

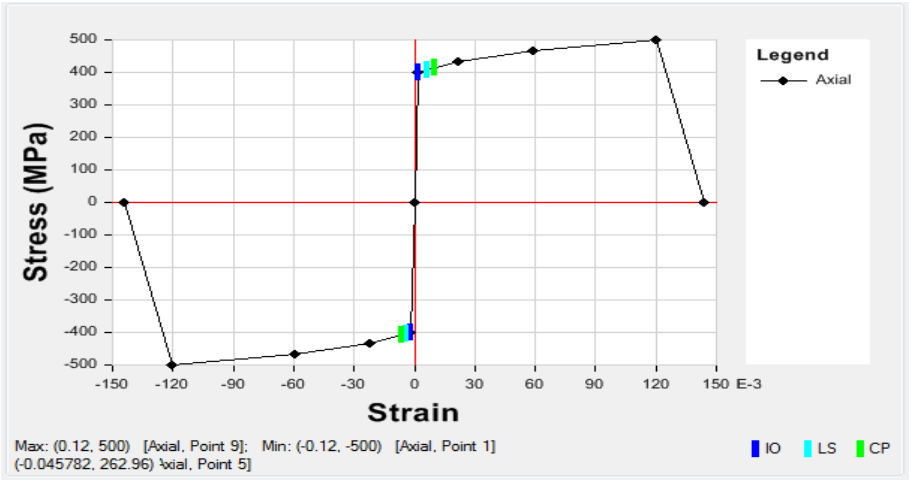
المبنى المدروس مكون من قبو يعلوه خمسة عشر طابقاً متكرراً، يقع في منطقة ذات زلزالية مرتفعة (PGA=0.3g)، النظام الإنشائي عبارة عن جملة ثنائية من البيتون المسلح مقاومة للزلازل، صنف التربة S_B . تم التصميم وفق الكود العربي السوري وملحقه الثاني [٥] وذلك بعد القيام بتشكيل نموذج ثلاثي الابعاد على برنامج ال ETABS 2016 [7] يتضمن تأثيرات P-Δ. المقاومة المميزة للبيتون $f_C^{`} = 20\ MPa$ ، إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي و العرضي $f_y = 400\ MPa$ ، والمبنى من المهم استمرار دوره الوظيفي وبالتالي عامل الأهمية 1.25.

الأحمال : الوزن الذاتي يضاف إليه 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 ٥ kN/m، حمولة موزعة بانتظام على الجوائز الداخلية للبلاطات $10\ kN/m$ عدا بلاطة السطح. حمولة حية على كل البلاطات $3\ kN/m^2$.

يظهر الشكل(٤) سلوك الإجهاد – انفعال الخاص بالبيتون، حيث يمثل الضغط بالاتجاه الموجب أما الشد على الجانب السالب مع معايير القبول ذات الصلة، المنحني باللون الاحمر يمثل سلوك البيتون المطوق، أما المنحني باللون الأسود يمثل البيتون غير المطوق. يبين الشكل(٥) سلوك إجهاد–انفعال الخاص بفولاذ التسليح مع معايير القبول.

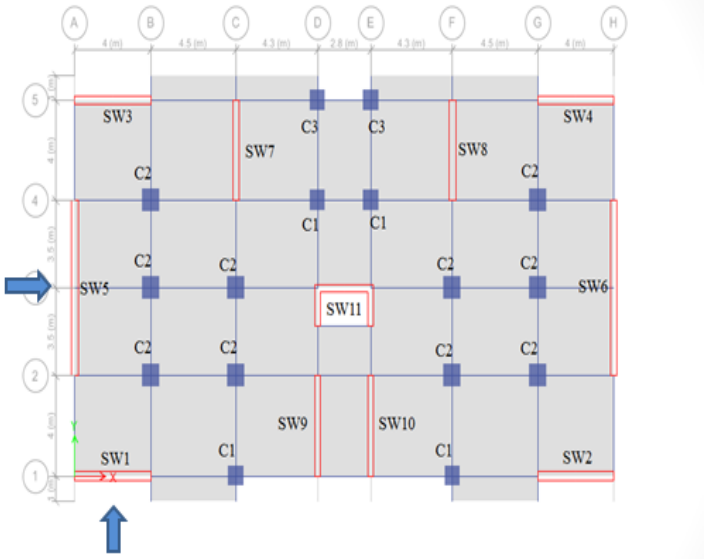


الشكل(٤) : سلوك إجهاد ـ انفعال الخاص بمادة البيتون

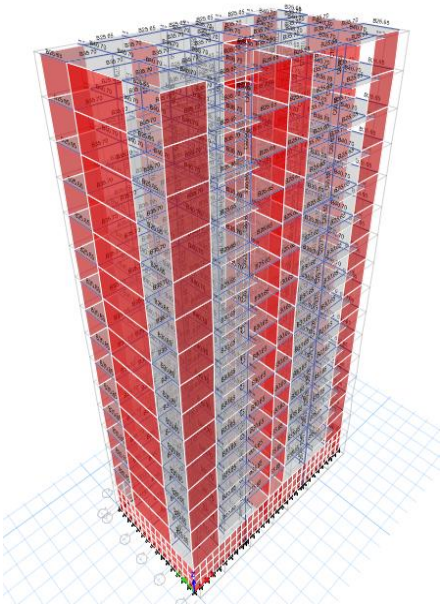


الشكل(٥) : سلوك إجهاد ـ انفعال الخاص بفولاذ التسليح

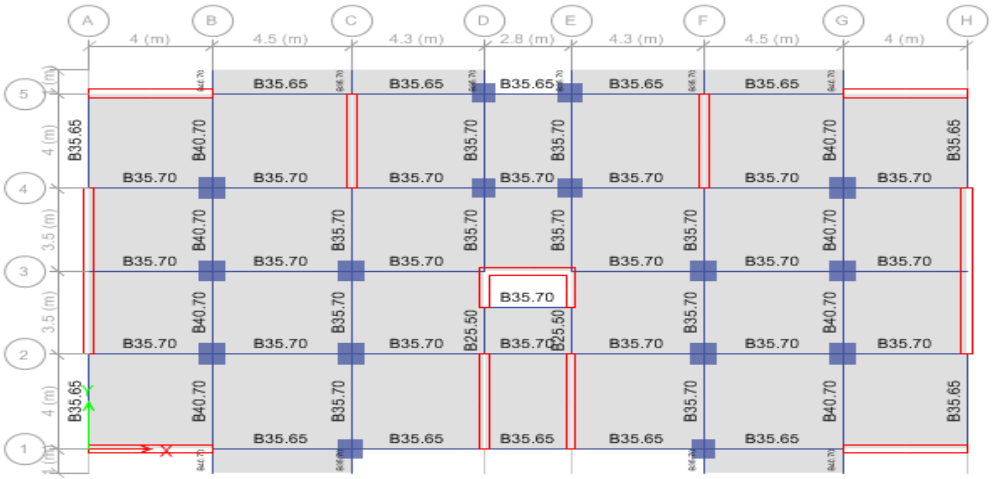
يظهر الشكل (٦) نموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى مع مسقط أفقي (الشكل ٧) تظهر عليه مقاطع الأعمدة وجدران القص حيث تشير الأسهم إلى مواقع جدران القص المراد إزالة أجزاء منها، ويظهر الشكل (٨) مسقط أفقي مع مقاطع الجوائز البيتونية المسلحة.



الشكل (٧): مسقط أفقي للمبنى المدروس



الشكل(٦) : نموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى



الشكل(٨) : مسقط أفقي للمبنى مع الجوائز البيتونية المسلحة

يبين الجدول (١) أبعاد وتسليح الجوائز البيتونية المسلحة، بينما يظهر الجدول (٢) التفاصيل الخاصة بالأعمدة من أبعاد وتسليح طولي وعرضي، يحتوي الجدول (٣) على التفاصيل الإنشائية الخاصة بجدران القص.

الجدول (١) : أبعاد الجوائز مع التسليح الطولي والعرضي

Beam	Height	Width	Bottom Rein.	Top Rein.		Ties
				Middle	Additional-End	
B1	70	40	6T16	4T16	2T16	2T10@10cm
B2	70	35	4T16	4T16	2T16	2T10@10cm
B3	65	35	4T16	4T14	2T14	2T10@10cm
B4	50	25	4T14	4T12	-	2T8@15cm

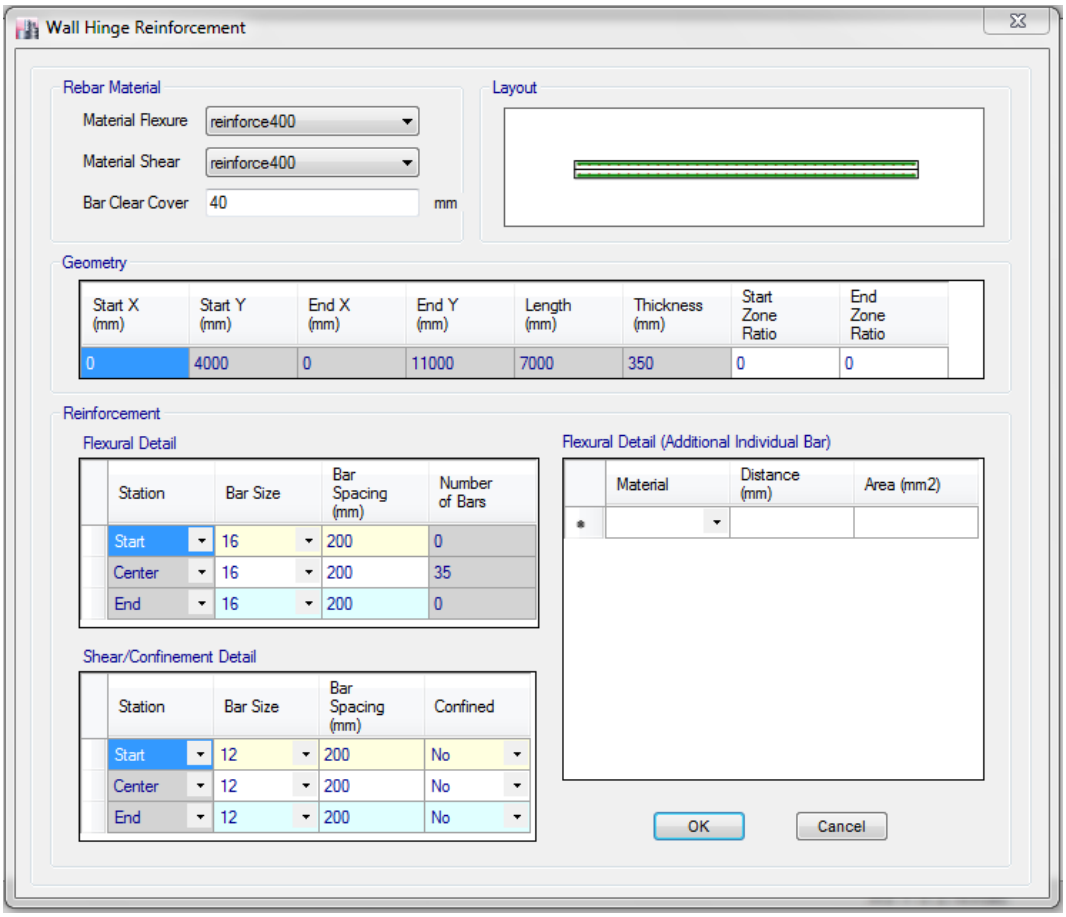
الجدول (٢) : أبعاد الأعمدة مع التسليح الطولي والعرضي

Story	Length(cm)	Width(cm)	Longitudinal Rein.	Ties
C1				
Base+1+2+3+4+5	80	80	4T20+24T16	5T10/15
6+7+8+9+10	70	70	4T20+20T16	3T8/15
11+12+13+14+15	60	60	20T16	3T8/15
C2				
Base+1+2+3+4+5	90	90	4T20+36T16	6T10/15
6+7+8+9+10	80	80	4T20+24T16	3T8/15
11+12+13+14+15	70	70	4T20+20T16	3T8/15
C3				
Base+1+2+3+4+5	70	70	4T20+20T16	3T8/15
6+7+8+9+10	60	60	20T16	3T8/15
11+12+13+14+15	50	50	4T16+12T14	3T8/15

الجدول (٣) : التفاصيل الإنشائية الخاصة بجدران القص

Story	Thick (cm)	Reinforcement		Boundary Element Rein.		
		Long.	Trans.	Dim.	Long.	Ties
SW1&SW2&SW3&SW4						
Base+1+2+3	35	T16/20cm	T14/20cm	80 cm	T18@10cm	2T10@20cm
4+5+6+7	30	T14/20cm	T12/20cm	80 cm	T16@10cm	2T10@20cm
8+9+...+16	25	T12/20cm	T10/20cm	-	-	-
SW5&SW6&SW7&SW8						
Base+1+2+3	35	T16/20cm	T12/20cm	-	-	-
4+5+6+7	30	T14/20cm	T10/20cm	-	-	-
8+9+...+16	25	T12/20cm	T10/20cm	-	-	-
SW9+SW10+SW11						
Base+1+2+3	30	T14/20cm	T12/20cm	-	-	-
4+5+6+7+..+16	25	T12/20cm	T10/20cm	-	-	-

يظهر الشكل (٩) طريقة إدخال تفاصيل التسليح بشكل دقيق لجدار القص SW5 ضمن برنامج ETABS.



الشكل (٩): التفاصيل الإنشائية للجدار SW5 الخاصة بتعريف المفصل اللدن

سيتم إزالة نصف طول الجدار 0.5L، وبعد ذلك إزالة ربع طول الجدار من الجانبين 2*0.25L.

سيتم إجراء الإزالة لجدار القص SW5 الواقع في منتصف الاتجاه القصير وللجدار SW1 الواقع في زاوية المبنى من الطابق الأول فوق سطح الأرض، وعند أول طابق يتغير فيه مقطع الجدار(الطابق الرابع).

النتائج والمناقشة:

إن تحديد مستوي الأداء هو خطوة أساسية لتوضيح حالة المنشأ عند التعرض لتهديد معين حيث يبنى عليه تقييم الحالة الإنشائية للمبنى، يقسم وفق التالي:

١. مستوي الإشغال الفوري Immediate Occupancy (IO) : يسمح بأضرار إنشائية بسيطة بحيث تحافظ الجملة الإنشائية على قدرتها باستمرار الوظيفة التشغيلية للمبنى.

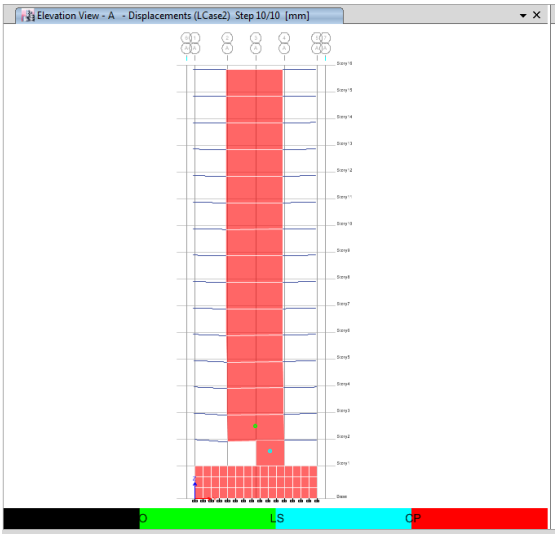
٢. مستوي سلامة الأرواح Life Safety (LS) : تظهر في الجملة الإنشائية أضرار واضحة دون حصول انهيار كلي أو جزئي.

٣. مستوي ما قبل الانهيار Collapse Prevention (CP) : تظهر أضرار إنشائية كبيرة تؤدي إلى انهيار كلي أو جزئي، وعند هذا المستوى لابد من إجراء التعديل الإنشائي المناسب.

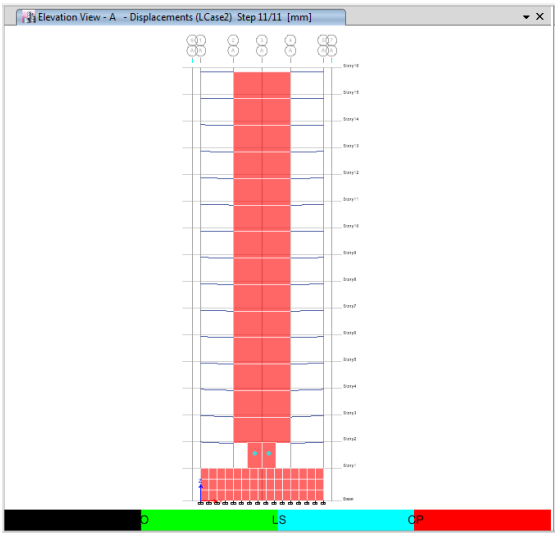
في ما يلي سيتم استعراض نتائج التحليل الستاتيكي غير الخطي للمبنى المدروس وفق حالات الإزالة المعتبرة وفي مختلف الطوابق:

١. إزالة أجزاء من جدار القص SW5 من مستوي الطابق الأول :

بالنسبة لحالة إزالة نصف طول الجدار (0.5*L) من الطابق الأول لم يحدث فشل إنشائي ووصلت الإجهادات في الجزء المتبقي إلى LS في الشكل(١٠). عند إزالة ربع طول الجدار من الجانبين (2*0.25L) في الشكل (١١) وصلت الحالة الإجهادية في الجزء المتبقي من الجدار إلى سلامة الأرواح (Life safety) وكانت محصورة في مستوي طابق الإزالة على عكس الإزالة من جانب واحد حيث وصلت الإجهادات إلى مستوي الإشغال الفوري (Immediat occupancy) في الطابق الذي يعلو مستوي الإزالة بسبب تأثير الانعطاف.



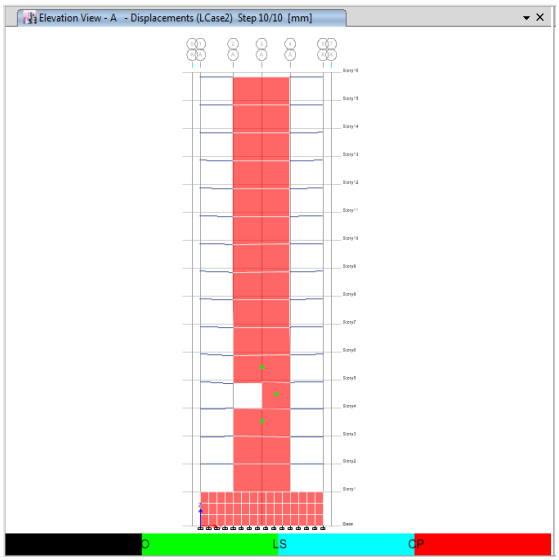
الشكل (١٠) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW5 من مستوي الطابق الأول



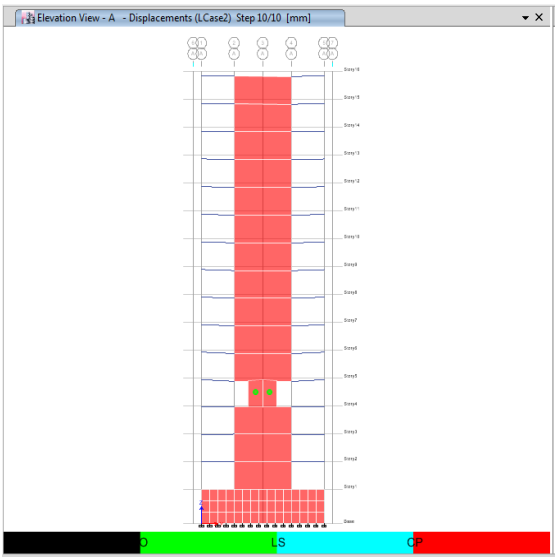
الشكل (١١) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين في مستوي الطابق الأول

٢. إزالة أجزاء من جدار القص SW5 من مستوي الطابق الرابع (أول طابق يتغير فيه مقطع الجدار):

تظهر الأشكال التالية (١٢,١٣) حالات الإزالة المختلفة لجدار القص SW5 من مستوي الطابق الرابع، حيث كانت النتائج ترضي معايير القبول ولم تتجاوز الإجهادات IO، أيضاً حالة الإزالة من جانب واحد تسببت بإجهادات أكبر أعلى وأسفل مستوي طابق الإزالة بسبب التأثير الواضح للانعطاف.

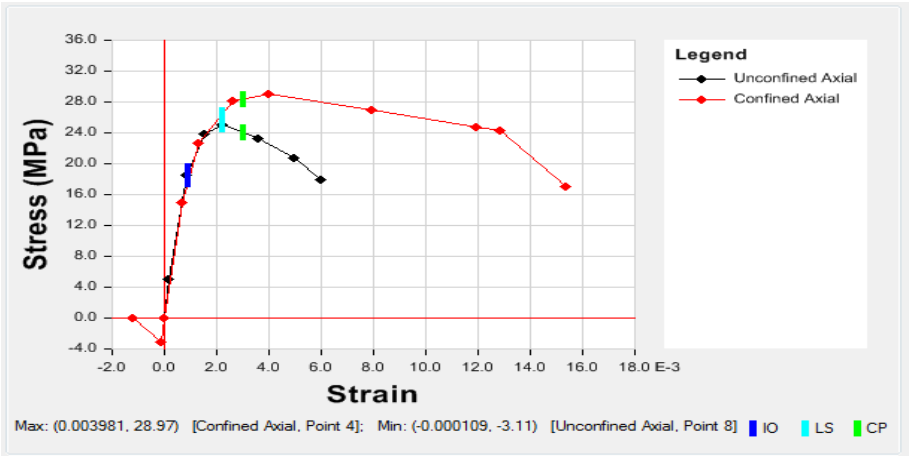


الشكل (١٢) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الرابع

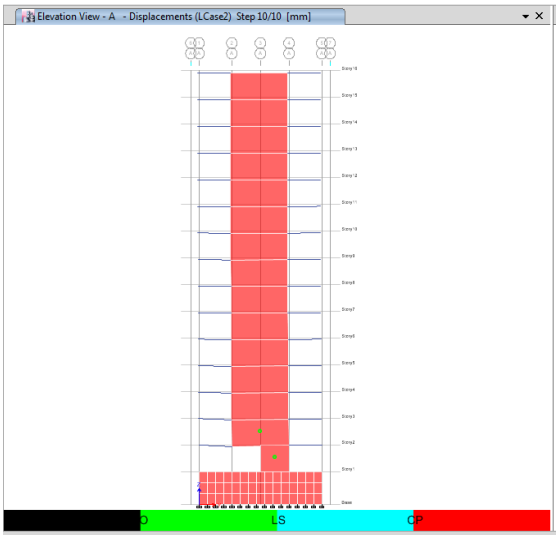


الشكل (١٣) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين في مستوي الطابق الرابع

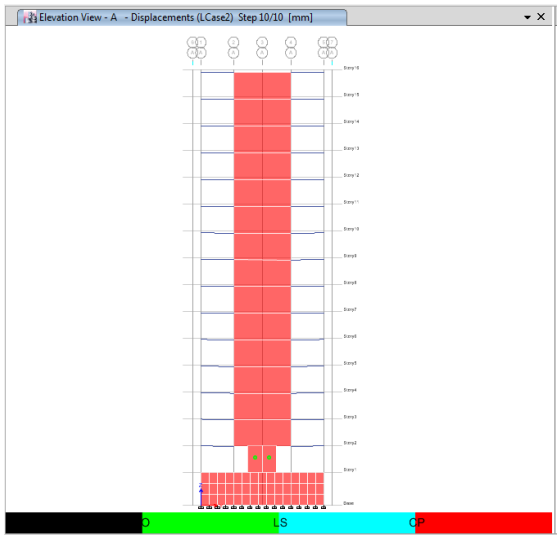
- بالنسبة للجدار SW5 ولتحسين الاستجابة وزيادة المقاومة ضد الانهيار المتتابع (حالة إزالة نصف طول الجدار من الطابق الأول و حالة إزالة ربع طول الجدار من الجانبين من الطابق الأول)، تم دراسة تأثير زيادة المقاومة المميزة لبيتون الجدار SW5 (الشكل ١٤) بمقدار 25% ($f_c^{`} = 25\ MPa$) على سلوك الجدار. أظهرت النتائج أن هذا التعديل يساهم في تخفيف الإجهادات المتشكلة وتصبح جميعها IO كما تظهر الأشكال (15,16).



الشكل(١٤) : سلوك إجهاد ـ انفعال الخاص بمادة البيتون بعد تعديل المقاومة

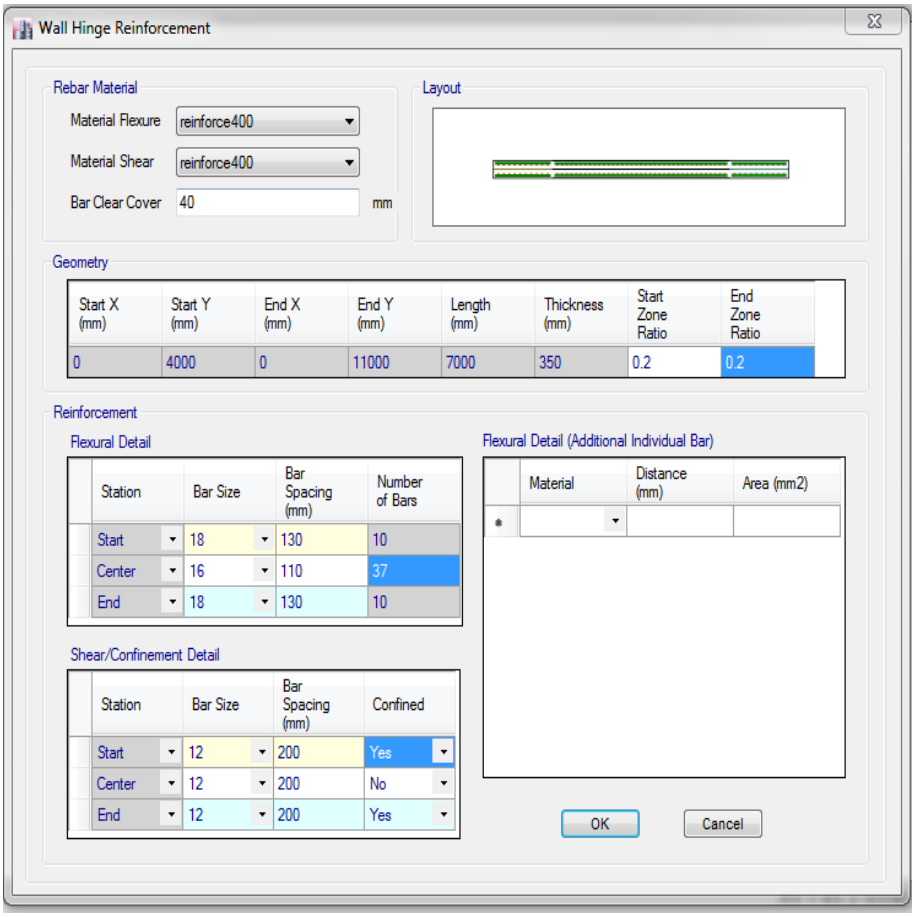


الشكل (١٥) : إزالة نصف طول الجدار SW5 من مستوي الطابق الأول بعد زيادة المقاومة المميزة لبيتون الجدار



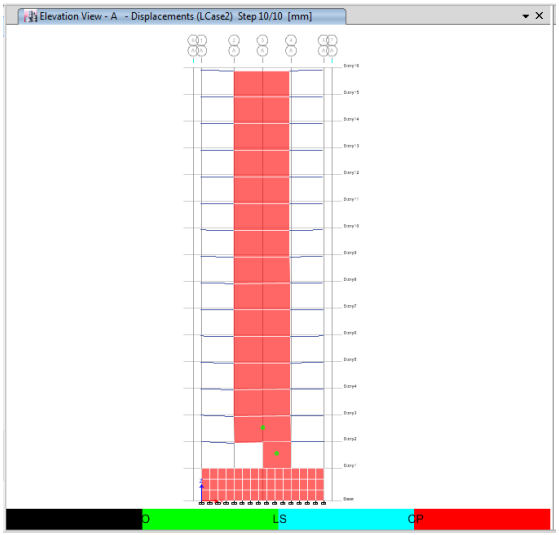
الشكل (١٦) : إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الأول بعد زيادة المقاومة المميزة لبيتون الجدار

- كبديل عن الحل السابق (زيادة المقاومة المميزة للبيتون) وفي الاطار ذاته (تحسين استجابة الجدار)، يظهر الشكل(١٧) تفاصيل تسليح الجدار SW5 بعد إضافة أعمدة مخفية في أطراف الجدار أبعادها t *L 0.2 بنسبة تسليح دنيا ٠,٠١ للطوابق الثلاث الأولى (لمعالجة حالة إزالة نصف طول الجدار من الطابق الأول)، ورفع نسبة التسليح في المنطقة الوسطى من الجدار من 0.006 إلى 0.01 للطوابق الثلاث الأولى أيضاً (لمعالجة حالة إزالة ربع طول الجدار من الجانبين من الطابق الأول).

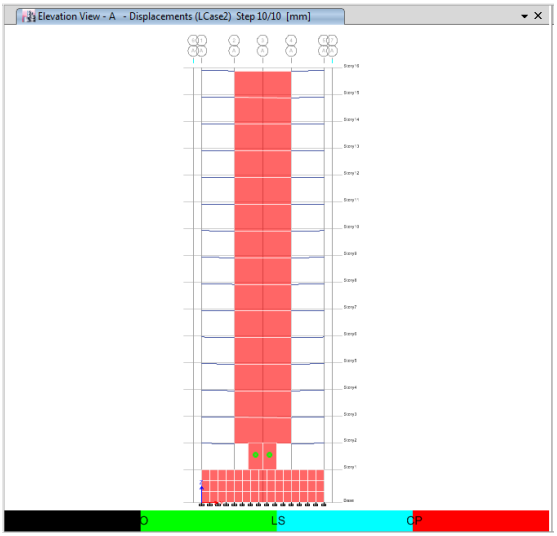


الشكل(١٧): التفاصيل الإنشائية للجدار SW5 الخاصة بتعريف المفصل اللدن بعد تعديل التسليح

كانت النتائج بعد التحليل مرضية وساهمت كما المقترح الأول (زيادة المقاومة بمقدار 25%) في زيادة المقاومة و تحسين الاستجابة الإنشائية للجدار(الأشكال 18,19).



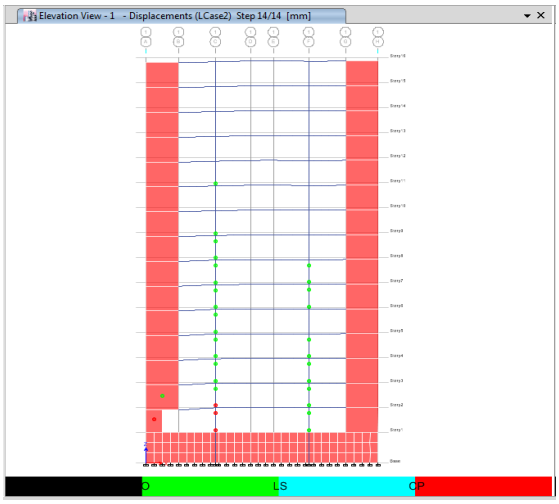
الشكل (١٨) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الأول بعد تعديل تسليح الجدار



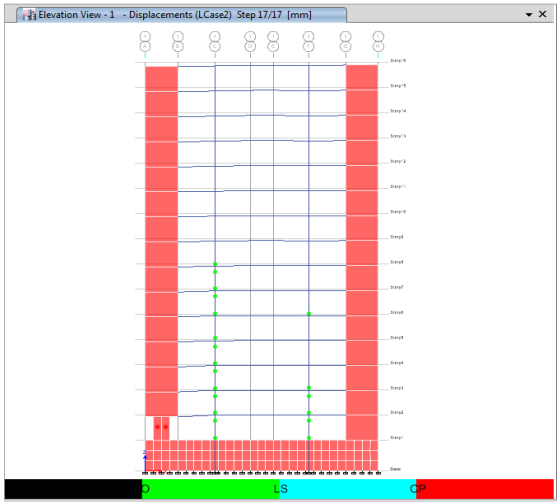
الشكل (١٩) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الأول بعد تعديل تسليح الجدار

٣. إزالة أجزاء من جدار القص SW1 من مستوي الطابق الأول:

إن إزالة نصف طول الجدار (0.5*L) من الطابق الأول أدت إلى انهيار العمود 1-C في الطابقين الأول والثاني بسبب زيادة الأحمال الشاقولية بالإضافة إلى انهيار الجزء المتبقي من الجدار في الطابق الأول (الشكل ٢٠). عند إزالة ربع طول الجدار من الجانبين (2*0.25L) كان الجزء المتبقي هو المسار الرئيسي للأحمال ويحتاج إلى تعديل إنشائي (الشكل ٢١).



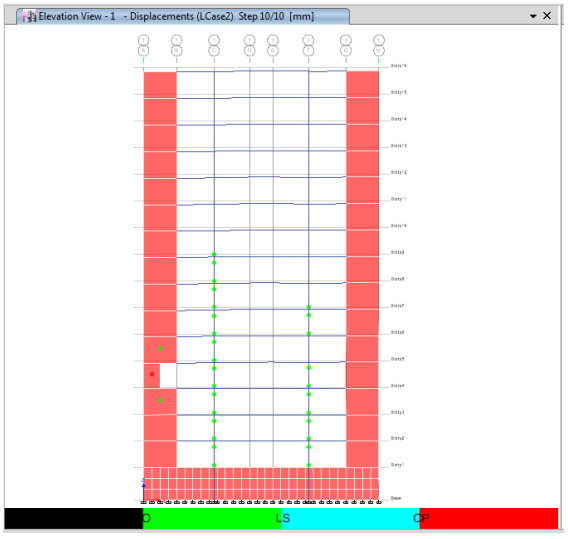
الشكل (٢٠) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 في مستوي الطابق الأول



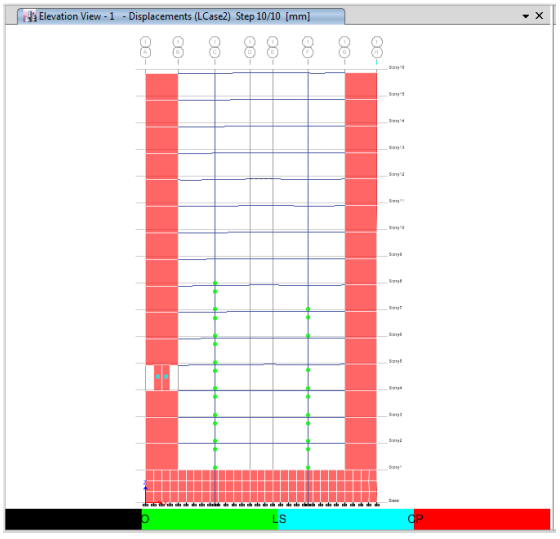
الشكل (٢١) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين في مستوي الطابق الأول

٤. إزالة أجزاء من جدار القص SW1 من مستوي الطابق الرابع (أول طابق يتغير فيه مقطع الجدار):

يظهر الشكل (٢٢) حالة إزالة نصف طول الجدار (0.5*L) من الطابق الرابع والتي أدت إلى انهيار الجزء المتبقي من الجدار وتسببت بإجهادات أكبر بالمقارنة مع إزالة ربع طول الجدار من الجانبين (2*0.25L) والتي وصلت فيها الإجهادات إلى LS في الشكل (٢٣).

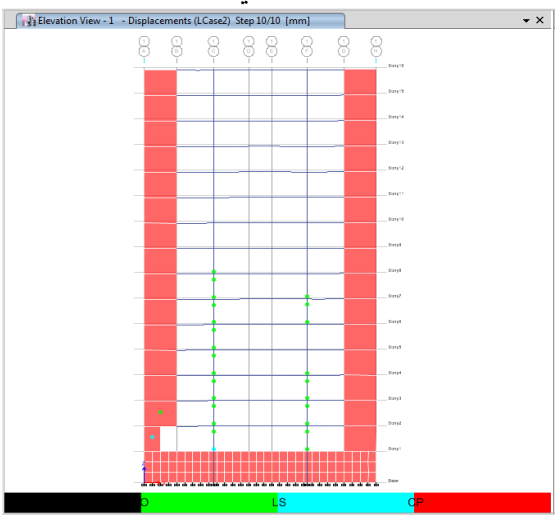


الشكل (٢٢) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 من مستوي الطابق الرابع

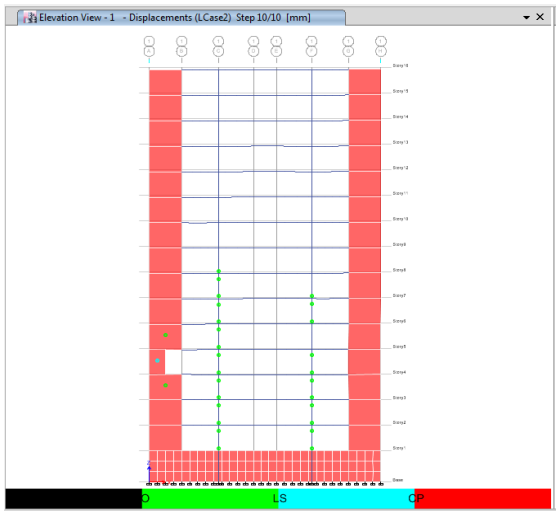


الشكل (٢٣) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين في مستوي الطابق الرابع

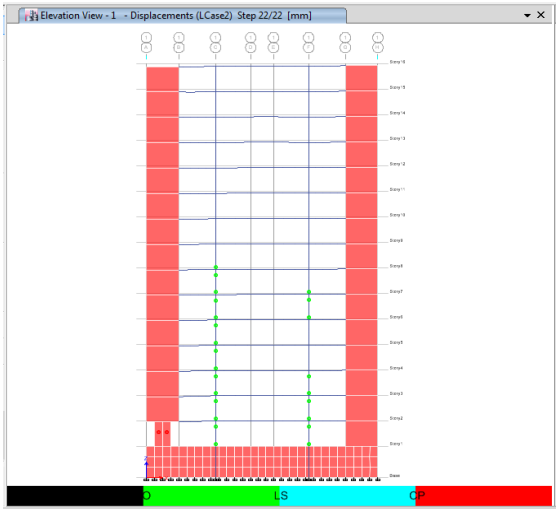
- في إطار تحسين الاستجابة الإنشائية لجدار القص SW1 لمقاومة الانهيار المتتابع، تم دراسة تأثير زيادة المقاومة المميزة لبيتون الجدار SW1 بمقدار 25% ($f_c^{`} = 25\ MPa$) على سلوك الجدار. أظهرت النتائج أن هذا التعديل يحقق الهدف وفق معايير القبول (إزالة نصف طول الجدار من الطابقين الأول والرابع) كما تظهر الأشكال (24,25)، باستثناء حالة إزالة ربع طول الجدار من الجانبين(2*0.25L) من الطابق الأول حيث بقي الجزء المتبقي من الجدار منهار (الشكل ٢٦)، ولذلك وكخطوة ثانية تم زيادة نسبة التسليح الشاقولي في المنطقة الوسطى من الجدار SW1 من 0.006 إلى ٠,٠١ في الطوابق الثلاث الأولى لتحقيق الاستجابة المطلوبة (الشكل 27).



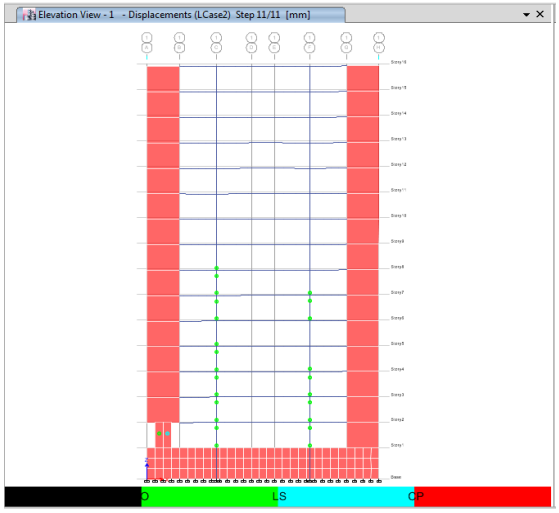
الشكل (24) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الأول بعد زيادة المقاومة المميزة للجدار



الشكل (25) : حالة إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الرابع بعد زيادة المقاومة المميزة للجدار



الشكل (26) : حالة إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين من الطابق الأول بعد زيادة المقاومة المميزة



الشكل (27): حالة إزالة ربع طول الجدار من الجانبين الطابق الأول بعد زيادة المقاومة وتعديل التسليح

يبين الجدول (٤) جميع الحالات المدروسة مع أسماء النماذج والأشكال ذات الصلة بالإضافة إلى نتائج التحليل الستاتيكي غير الخطي (الحالة الإجهادية في الجزء المتبقي من الجدار).

الجدول (٤) : الحالات المدروسة والحالة الإجهادية الموافقة

الرقم	اسم النموذج المحلل	توصيف الحالة المدروسة	الشكل	نتائج التحليل (الحالة الإجهادية)
١	B1	مبنى معياري بدون إزالة من جدرانه ، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (٦)	-
٢	B2	إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (١٠)	سلامة الأرواح (Life safety)
٣	B3	إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (١١)	سلامة الأرواح (Life safety)
٤	B4	إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الرابع، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (١٢)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
٥	B5	إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الرابع، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (١٣)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
٦	B6	إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الأول، مقاومة البيتون 25MPa	الشكل (١٥)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
٧	B7	إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 25MPa	الشكل (١٦)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
٨	B8	إزالة نصف طول الجدار SW5 من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20Mpa مع تعديل تسليح الجدار	الشكل (١٨)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
٩	B9	إزالة ربع طول الجدار SW5 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20Mpa مع تعديل تسليح الجدار	الشكل (١٩)	الإشغال الفوري (Immediat occupancy)
١٠	B10	إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (٢٠)	منع الانهيار (Collapse Prevention)
١١	B11	إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (٢١)	منع الانهيار (Collapse Prevention)
١٢	B12	إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الرابع، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (٢٢)	منع الانهيار (Collapse Prevention)
١٣	B13	إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين من الطابق الرابع، مقاومة البيتون 20MPa	الشكل (٢٣)	سلامة الأرواح (Life safety)
١٤	B14	إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الأول، مقاومة البيتون 25MPa	الشكل (٢٤)	سلامة الأرواح (Life safety)
١٥	B15	إزالة نصف طول الجدار SW1 من الطابق الرابع،	الشكل	سلامة الأرواح

		مقاومة البيتون 25MPa	(٢٥)	(Life safety)
١٦	B16	إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 25MPa	الشكل (٢٦)	منع الانهيار Collapse) (Prevention
١٧	B17	إزالة ربع طول الجدار SW1 من الجانبين من الطابق الأول، مقاومة البيتون 25Mpa مع تعديل تسليح الجدار	الشكل (٢٧)	سلامة الأرواح (Life safety)

الاستنتاجات والتوصيات:

- في هذه الدراسة تم التحقق من استجابة الجمل الثنائية لمبنى من البيتون المسلح واقع في منطقة زلزالية مرتفعة الشدة تحت تأثير الانهيار المتتابع باستخدام تحليل دفعي متزايد نحو الأسفل عند إزالة أجزاء من جدار القص من طوابق مختلفة. أظهرت النتائج أن حالات الإزالة من مستوي الطابق الأول هي الأكثر حرجاً بسبب تأثيرات القوى الناظمية وعزوم الانعطاف المتشكلة في الجزء المتبقي من الجدار، كما أظهرت النتائج أنه من الضروري رفع نسبة التسليح الشاقولية الدنيا لجدران القص إلى 0.01 للتسليح عالي المقاومة لتحسين الاستجابة ضد الانهيار المتتابع.
- الجزء المتبقي من الجدار المتضرر هو المسار الرئيسي للأحمال الجديدة غير المتوازنة المتشكلة بعد الإزالة وبالتالي فإن زيادة طول جدار القص تساهم في زيادة مقاومة الجدار على الانهيار المتتابع، كما أظهرت النتائج أن الإزالة من جانب واحد تتسبب بحالة اجهادية أكبر في الطابق الذي يعلو مستوي الإزالة بسبب تأثير العزوم القالبة الجديدة.
- بالنسبة لجدار القص في زاوية البناء فإن زيادة المقاومة المميزة للبيتون المسلح بحدود 25% تساهم إلى حد كبير في تحسين الاستجابة الإنشائية ومنع الانهيار في مجمل الحالات المدروسة، باستثناء حالة إزالة ربع طول الجدار من الجانبين من مستوي الطابق الأول ما استدعى زيادة نسبة التسليح الشاقولي الدنيا إلى 0.01 لتحقيق الاستجابة المرغوبة.
- إن زيادة المقاومة المميزة للبيتون المسلح بمقدار 25% بالنسبة لجدار القص الطويل تساهم في تحسين الاستجابة والمحافظة على الوظيفة التشغيلية للمبنى، بالمقابل فإن وضع أعمدة مخفية بنسبة تسليح ٠،٠١ في أطراف الجدار للحصول على بيتون مطوق ورفع نسبة التسليح الشاقولي في المنطقة الوسطى من الجدار إلى ٠،٠١ يجعل الإجهادات أقل أيضاً ويعطي نفس نتيجة الحل السابق (زيادة المقاومة المميزة بمقدار 25%) ضد الانهيار المتتابع.
- نوصي بما يلي :

١. دراسة سلوك جدران القص الحاوية على فتحات تحت تأثير الانهيار المتتابع.
٢. دراسة جدران القص ذات المقاطع غير المستطيلة عند فقدان أجزاء منها تحت تأثير الانهيار المتتابع.

References:

[1] American Society of Civil Engineers (ASCE), *Minimum design loads for buildings and other structures*, Structural Engineering Institute of the ASCE, Reston, Virginia, 2005.

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

[3] General Services Administration (GSA), *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, DC: Office of Chief Architects, Washington, 2013.
[4] Department of Defense (DoD), *Design of buildings to resist progressive collapse* (UFC 4-023-03), DC: Unified Facilities Criteria, Washington, 2016.
[5] Syrian Arab Code for design and implementation of the facilities in the reinforcement concrete , Fourth Edition, Damascus, 2012.
[6] Powell, G., *Modeling for Structural Analysis*, Computers and Structures, Berkeley , California, 2010, ISBN-10: 0923907882
[7] CSI Analysis Reference Manual (SAP 2000, ETABS, SAFE, and CSI Bridge), Computers and Structures Inc., Berkeley , California, 2016