

مقارنة التحليل الستاتيكي-اللاخطي لبناء اطاري مختلط متعدد الطوابق ذو أربطة فولاذية وأربطة ذكية SMA

الدكتورة ميادة كوسا*

الدكتور محمد غريب**

ياسين موسى الغرير***

(تاريخ الإيداع 7 / 5 / 2015. قُبِلَ للنشر في 2 / 6 / 2015)

□ ملخص □

تم في هذه الورقة دراسة أثر استخدام الخصائص الاستثنائية في خلائط ذاكرة الشكل **Shape Memory Alloy (SMA)** القدرة على ابداء تشوهات كبيرة واستعادتها لتشوهاتها المتبقية بعد إزالة الاجهادات" على السلوك الإنشائي للأبنية العالية متعددة الطوابق. باستخدام برنامج ANSYS نفذ نموذجي عناصر محدودة ثلاثي الأبعاد لبناء مختلط متعدد الطوابق (20طابق) مقاوم للقوى الجانبية من خلال نظام عناصر تربيط محيطي، في أحد النموذجين كانت عناصر التربيط فولاذية وفي النموذج الآخر استخدمت عناصر تربيط من خلائط ذاكرة الشكل، النموذجين يأخذان بعين الاعتبار عدم الخطية في مواد العناصر وعدم الخطية الهندسية. أظهر نموذج البناء المستخدم فيه خلائط ذاكرة الشكل سلوكاً محسناً بالمقارنة مع بناء عناصر التربيط الفولاذية فيما يخص التشوهات المتبقية والسلوك المطاوع.

الكلمات المفتاحية: عناصر محدودة، خلائط ذاكرة الشكل، سلوك مطاوع، تشوهات متبقية

*أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية-كلية الهندسة المدنية-جامعة دمشق - سورية.

**أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية-كلية الهندسة المدنية-جامعة دمشق - سورية.

***مهندس - قسم الهندسة الإنشائية-كلية الهندسة المدنية-جامعة دمشق - سورية.

Comparison of the Nonlinear-Static analysis of a Frame Composite Multi-Storey Building with Steel Bracing and Smart SMA Bracing

Dr. Mohammed Gareeb*

Dr. Mayada Kossa**

Yassin Alghrir***

(Received 7 / 5 / 2015. Accepted 2 / 6 / 2015)

□ ABSTRACT □

In this paper the effect of the distinctive properties of **Shape Memory Alloy (SMA)** “the ability to undergo large deformation and restore it after stress removal” has been studied to see to what degree it may affect the structural performance of multi-storey tall buildings.

Using ANSYS software, two 3D Finite Element (FE) models are built for a composite multi-storey building (20 story) which is resistant to lateral loads by bracing system. One of them is with steel bracing and the other is with SMA bracing. Both models take into account nonlinear material properties of elements and geometric nonlinearity.

The model with SMA material shows improved performance compared with the model of steel bracing in terms of residual deformations and ductile performance.

Keywords: Finite Elements, Shape Memory Alloy, Ductile performance, Residual Deformation

*Professor- Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering-Damascus University.

**Professor- Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering-Damascus University.

***Engineer- Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering- Damascus University.

مقدمة:**1- استخدام خلائط ذاكرة الشكل في الهندسة المدنية:**

خلائط ذاكرة الشكل (SMA) Shape Memory Alloy هي خلائط استثنائية لها القدرة على اظهار تشوهات كبيرة لكن مع إمكانية العودة إلى شكلها الأصلي من خلال التسخين أو إزالة الاجهادات المطبقة. إن هذه الخاصية المميزة في SMA جعلت منها مادة ذكية يمكن استثمارها في انشاء أبنية ذكية تستجيب وتتكيف مع التغيرات في شروط المحيط [1]. في الواقع، عدد هام من البحوث التجريبية والتحليلية كان قد درس استخدام SMA كعناصر إنشائية أساسية في مجال الهندسة المدنية:

بإستخدام طاولة اهتزاز تمت دراسة السلوك الزلزالي لأعمدة بيتونية مسلحة بخليطة النيكل-تيتانيوم (Ni-Ti SMA) وهي بخاصية المرونة العالية (SE) Superelastic في منطقة المفصل اللدن وتسلح عادي في بقية المناطق [2]، وقد أظهرت أعمدة الـ SMA سلوكاً أفضل فيما يخص التشوهات المتبقية في أعلى العمود مع المقدرة على استيعاب هزات بسعات أكبر بالمقارنة مع الأعمدة البيتونية ذات التسليح العادي. استخدمت الـ SE Ni-Ti كتسليح في الجوائز [3]، فقد طبق حملات مركزة ستاتيكية تجاوزت الاستجابة المرنة على ثلاثة جوائز اثنان مسلحة بـ SMA والثالث بالتسليح العادي، ليحصل على جوائز تعطي تشوهات أكبر بسبعة أضعاف وقادرة على استعادة عشر الانحراف الأعظمي مع لدونة أكبر بـ 25% من نفس الجوائز المسلحة بالتسليح العادي.

بدراسة تجريبية [4] استخدمت SMA وهي في مرحلة الـ Martensite كعناصر أساسية لنقل العزم في عقدة جوائز-عمود فولاذية وذلك باستخدامها ككتيبيات عرضية بين أجنحة العمود وأجنحة الجوائز. أظهرت العقدة المختبرة قيم جيدة بالطاقة المخدمة بسلوك لدن من دون أن يكون هناك انحدار في المقاومة وذلك بعد تطبيق حملات دورية وصلت لانحراف طابقي حتى 4%.

تحت تأثير أحمال دورية اختبر [5] Alam et al. عقدي جوائز-عمود من البيتون المسلح، إحدهما مسلحة بقضبان SE SMA والأخرى بقضبان تسليح عادية، تمت مقارنة السلوك الزلزالي للعقدتين من خلال علاقتي الحمل-الانحراف الطابقي والعزم-دوران والقدرة على تخميد الطاقة، لتظهر النتائج أن الميزة الرئيسية من استخدام SMA كقضبان تسليح في الإطارات البيتونية المسلحة هي في الحصول على انحرافات طابقية متبقية صغيرة مع تشكل المفصل اللدن بعيداً عن وجه العمود. وأتبع هذا محاكاة لسلوك العقدة من خلال نموذج عناصر محدودة أنجز باستخدام برنامج Seismostructures.

يمكن أن يتم استخدام مواد من Superelastic SMA بشكل فعال في الوصلات للاستفادة من قدرتها على تخميد الطاقة بتشوهات كبيرة يتم استعادتها فيما بعد، وهذا ما عبر عنه [6] Tamai et al. 2003 من خلال استخدامه لـ Superelastic SMA (Ni-Ti) كبراغي تثبيت للعمود، حيث لحم العمود مع صفيحة فولاذية ربطت بدورها مع الأساس مرة باستخدام براغي تثبيت فولاذية ومرة أخرى باستخدام براغي تثبيت SMA. أظهرت النتائج ان براغي الـ SMA لها القدرة على تحسين أداء قاعدة العمود من خلال حفاظها على مقاومتها بعد أن تستعيد معظم التشوهات اللدنة، وهذا ما يمكن من تصميم قاعدة عمود تستعيد مقاومتها بعد الهزة الأرضية وتشوهات متبقية مقبولة لا تتطلب القيام بالكثير من الترميم بعد الهزة الأرضية القوية.

-أيضاً من الممكن ان نطبق قوى سبق اجهاد في البيتون المسلح باستخدام أوتار من الـ SMA، حيث تؤمن هذه الأوتار قوة سبق اجهاد كافية، فأوتار الـ SMA تتميز بقدرة إضافية على تحمل قوى سبق الاجهاد بالمقارنة مع الفولاذ [7].

-بدراسة تحليلية [8] تم استخدام قضبان SE Ni-Ti ذات قطر كبير 8cm كأوتار قطرية في اطارات عزمية من البيتون المسلح، نتائج جيدة تم تحقيقها تحت تأثير الأحمال الزلزالية في تخفيض دوران العقدة والانزياح الطابقي المتبقين بالمقارنة مع استخدام الأوتار الفولاذية.

2 -إشارة إلى أهمية عناصر التريبط في الأبنية متعددة الطوابق:

على اعتبار أن الجدلية العلمية في هذه الورقة هي من خلال استبدال مادة عناصر التريبط من الفولاذ إلى مادة خلائط ذاكرة الشكل، لابد من الإشارة إلى بعضميزات استخدام نظم التريبط في الأبنية:

1 يتم تصميم الأعمدة والجوائز على الحمولات الشاقولية فقط، فعناصر التريبط تؤمن مقاومة كاملة للقوى الجانبية في الأبنية المصممة إنشائياً باستخدام نظم تريبط. تعطي مقاومة عناصر التريبط للقوى الجانبية وربطها مع الأعمدة والجوائز بشكل وصلات مفصلية ميزة اقتصادية للتصميم باستخدام هذه النظم.

2 تخفف هذه الوصلات المفصلية بشكل كبير أثر الحمولات الجانبية على الأعمدة والجوائز مقارنة مع الأبنية التي لا تستخدم فيها عناصر التريبط. وهذا يعطي أمناً أكبر من خلال انخفاض إمكانية الانهيار بتشكّل المفاصل اللدنة نتيجة الحمولات الجانبية (كميكانيزم الطابق اللين).

3 -تختلف طبيعة سلوك النظم في مقاومة القوى الجانبية تبعاً لقساوة عناصر التريبط، فزيادة قساوة عناصر التريبط تزيد من الحمولات المنقولة للأعمدة وتعطي سلوكاً أقل مطاوعة في حين انخفاض قساوة عناصر التريبط يزيد من تشوهات المنشأ ويخفف من القوى المنقولة للأعمدة.

استخدمت في هذه الورقة أوتار من خليطة النيكل-تيتانيوم وهي في مرحلة المرونة العالية (SE Ni-Ti) كعناصر تريبط في بناء مختلط عالي بغرض دراسة أثر خصائص مادة هذه الخليطة على السلوك الإنشائي للأبنية العالية تحت تأثير حمولات جانبية ستاتيكية. الجزء الأول من هذه الورقة يعرف بخصائص خلائط ذاكرة الشكل، في حين الجزء الثاني يستعرض طريقة النمذجة لنموذجين أحدهما باستخدام عناصر تريبط فولاذية والآخر باستخدام عناصر تريبط من خلائط ذاكرة الشكل، ويتبع هذا في نهاية الورقة دراسة مقارنة لنتائج النموذجين.

خصائص خلائط ذاكرة الشكل:

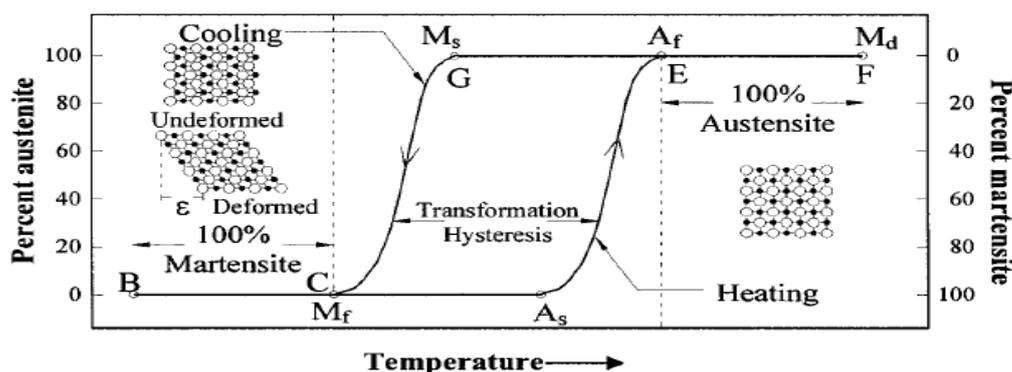
1-عملية التحول الحراري في الـ SMA:

مثل المعادن والخلائط المعدنية الأخرى فإن الـ SMA ممكن أن يكون لها عدة صيغ، أي من الممكن أن يكون لها أكثر من بنية كريستالية مع حفاظها على نفس التركيب الكيميائي. البنية الكريستالية السائدة تعتمد على كل من الحالة الاجهادية ودرجة الحرارة واللذان بدورهما يتعلقان بالتركيب الكيميائي وعملية المعالجة الحرارية Dolce and [9] 2001 Cardone.

في سبيكة الـ SMA الغير مجهدة نميز عمليتي التحول الحراري التاليتين، الشكل (1):

1 -مرحلة الـ Martensite التي تبدأ عند درجة حرارة Ms وتنتهي عند درجة الحرارة .Mf.

2 -مرحلة الـ Austensite التي تبدأ عند درجة حرارة As وتنتهي عند درجة حرارة .Af.



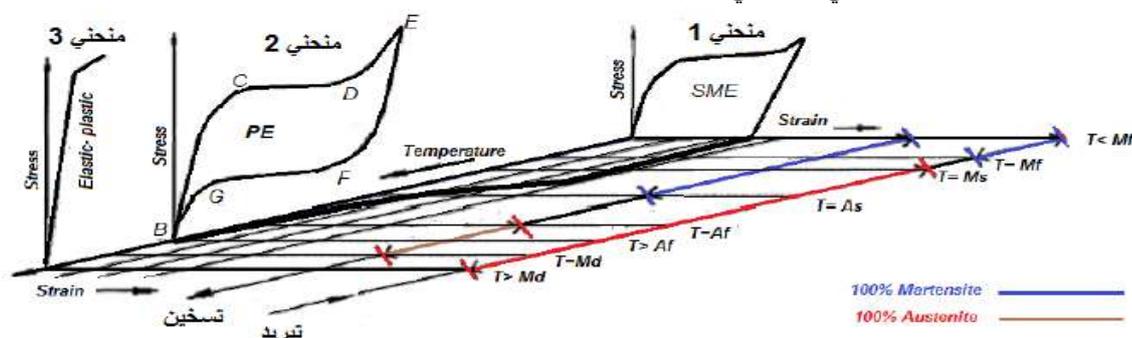
الشكل (1): مرحلة التحول والتغير بالبنية الكريستالية ل SMA من الـ Martensite إلى الـ Austenite وبالعكس تبعاً للتغير بدرجة الحرارة [5].

فعند درجة الحرارة المنخفضة نسبياً تكون الـ SMA في حالة الـ Martensite، ويتوافق دخولها إلى هذه الحالة بشكل كامل عندما تكون درجة الحرارة أقل من الـ M_f . عند التسخين تنتقل إلى حالة الـ Austenite (تغير كريستالي) لتكون بحالة الـ Austenite بشكل كامل عندما تصبح درجة الحرارة أكبر من A_f .

في مرحلة التحول بين المرحلتين تكون خواص كلا المرحلتين موجودة وقد بينت حالة الانتقال بين التبريد والتسخين بالشكل (1). فعندما ترتفع درجة الحرارة لمادة الـ SMA حتى A_s تبدأ المادة بالتغير تدريجياً من الـ Martensite إلى الـ Austenite ويكتمل هذا التغير بشكل كامل عندما تصل درجة الحرارة حتى A_f . وبشكل عكسي فالتبريد سيؤدي لتغير الحالة من 100% Austenite عند درجة حرارة أكبر من M_s إلى 100% Martensite عندما تصبح درجة الحرارة هي M_f .

2- الخصائص المتميزة لـ SMA:

إن علاقة الاجهاد-تشوه في الـ SMA تعتمد على درجة الحرارة التي تلعب دوراً أساسياً في سلوك الـ SMA، هذا السلوك يتميز بخاصيتين أساسيتين هما (أثر ذاكرة الشكل) **Shape Memory Effect (SME)** والمرونة العالية (**Superelasticity (SE)**)، لكن على اعتبار أن الخلائط المستخدمة في هذه الورقة تتمتع بخاصية المرونة العالية سنكتفي بالإشارة بشكل موجز إلى أن خاصية SME تعبر عن استعادة المادة لتشوهات اللدنة عن طريق التسخين، أما بالنسبة لخاصية SE فهي مبينة في الفقرة التالية.



الشكل (2): مخطط ثلاثي الأبعاد (اجهاد-تشوه-درجة حرارة) يظهر ميزتي المرونة العالية **Superelasticity** وأثر ذاكرة الشكل **Shape Memory Effect** في الـ SMA، بالإضافة للسلوك المرن/اللدن عند درجات الحرارة العليا [5].

➤ المرونة العالية SE:

- في حالة الـ Austenite حيث درجة الحرارة ($T \gg A_f$) وعندما تكون الـ SMA تتعرض لحالتي تطبيق الاجهاد وإزالة الاجهاد تميز المراحل الست التالية في منحنى الاجهاد-تشوه الواضح في الشكل (2):
- (1) عند التشوهات الصغيرة (< 1%) تظهر المادة في مرحلة الـ Austenite استجابة مرنة وفق BC.
 - (2) زيادة الاجهاد تؤدي إلى مرحلة تحول من Austenite إلى Martensite ، تتوافق مرحلة التحول هذه مع تشوهات متوسطة (6 - 1)% وعتبة اجهاد طويلة وثابتة أشير إليها بـ CD.
 - (3) الاجهادات الموافقة للوصول لتشوهات كبيرة (> 8%) تؤدي إلى إتمام التحول إلى Martensite وتكون الاستجابة في هذه الحالة مرنة أشير إليها بـ DE.
 - (4) استعادة مرنة للتشوهات بعد إزالة الاجهاد توافق EF.
 - (5) نتيجة عدم استقرار مرحلة الـ Martensite عند درجة حرارة ($T > A_f$) يكون هناك تحول ذاتي (عفوي) إلى الـ Austenite يتوافق باستعادة للتشوهات مع ثبات الاجهاد وقد أشير لها بـ EF.
 - (6) أخيراً بإزالة الاجهاد بشكل كامل تكون هناك استعادة مرنة للتشوهات أشير لها بـ GB (Wilson and [10] Wesolowsky 2005).

هذه الخاصية المميزة في الـ SMA باستعادتها تشوهات اللدنة الكبيرة بعد إزالة الحملات ويسلوها على شكل حلقة هيسثيرية تعرف بـ المرونة العالية أو الزائفة (SE/PE) Superelasticity/Pseudoelasticity.

في حال زادت درجة الحرارة في مرحلة الـ Austenite عن درجة الحرارة الأعظمية (M_d)، عندها تفقد الـ SMA خاصية الـ PE بشكل كامل وتتصرف كما لو كانت مادة مرنة-لدنة كما يظهر في المنحنى 3 من الشكل (2).

3- وصف البناء المستخدم في النمذجة:

البناء المستخدم في النمذجة كمثل عن الأبينة العالية الاطارية المختلطة هو عبارة عن منشأ مكون من عشرين طابق، يتكون من 64 (8*8) عمود (ثمانية أعمدة بكل اتجاه) بمسافة بينية 7.5m وارتفاع طابقي 3m. مقاطع الأعمدة والجوائز تبعاً للطابق موضحة في الجدول (1).

الجدول (1): مقاطع الأعمدة والجوائز

الجوائز	الأعمدة	الطابق
UB533*210*92	UC356*406*634	الطابق الأرضي حتى الطابق 6
UB533*210*92	UC356*406*467	الطابق 7 حتى الطابق 13
UB533*210*92	UC356*406*287	الطابق 14 حتى الطابق 19

تعمل الجوائز بشكل مختلط مع بلاطة بيتونية بسماكة 130mm مسلحة بشبكة تسليح A252 على عمق 30mm عن سطح البلاطة بالإضافة إلى صفيحة فولاذية بسماكة 0.9mm في أسفل البلاطة. أما عناصر التثبيت فهي عناصر دائرية مفرغة بمقطع CHCF 2735*12.5 وقد وضعت في مراكز الأوجه الأربع للمنشأ. أبعاد وخصائص المقاطع المستخدمة موضحة في الجدول (2)، هذا وقد تم تحديد أبعاد المقاطع وتصميم المنشأ وفق الكود البريطاني [11 - 12].

الجدول(2): خصائص المقاطع المستخدمة [11]

Section properies from BS5950.

Section designation	Mass per meter kg/m	Depth of section D mm	Width of section B mm	Web thickness mm	Flange thickness mm	Root radius mm
UC356X406X634	633.9	474.6	424.0	47.6	77	15.2
UC356X406X467	467.0	436.6	412.2	35.8	58	15.2
UC356X406X287	287.1	393.6	399	22.6	36.5	15.2
UB533X210X92	92.1	533.1	209.3	10.1	15.6	12.7

Section designation	Mass per meter kg/m	Depth of section D mm	Thickness mm	Root radius mm
CHCF273X12.5	80.3	273	12.5	9.22

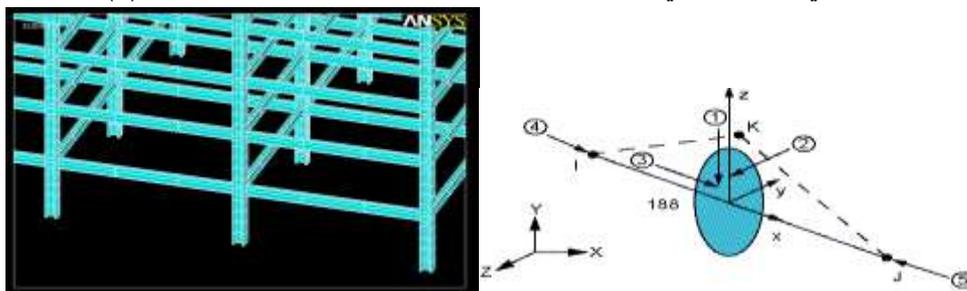
نموذج العناصر المحدودة:

استخدم برنامج العناصر المحدودة [13] ANSYS في نمذجة البناء الموصوف سابقاً، تم انجاز نموذجين الأول باستخدام عناصر تربيط فولاذية وأشير إليه بـ BUIL.STEEL، والآخر باستخدام عناصر تربيط من مادة خلائط ذاكرة الشكل وأشير إليه بـ BUIL.SMA، أي أن النموذجين متشابهين تمام والاختلاف الوحيد هو في مادة الروابط.

1-نوع العناصر:

-العنصر BEAM188:

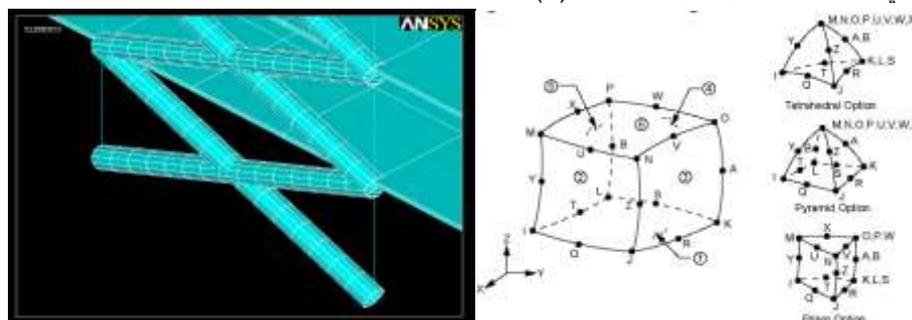
استخدم هذا العنصر في نمذجة الأعمدة والجوائز الفولاذية، وهو عنصر ثلاثي البعد يتكون من عقدتين في كل عقدة 6 درجات حرية وهي الانتقالات في الاتجاهات X,Y,Z والدورانات حول X,Y,Z، الشكل(3).



الشكل(3): العنصر BEAM188، نمذجة الاعمدة والجوائز

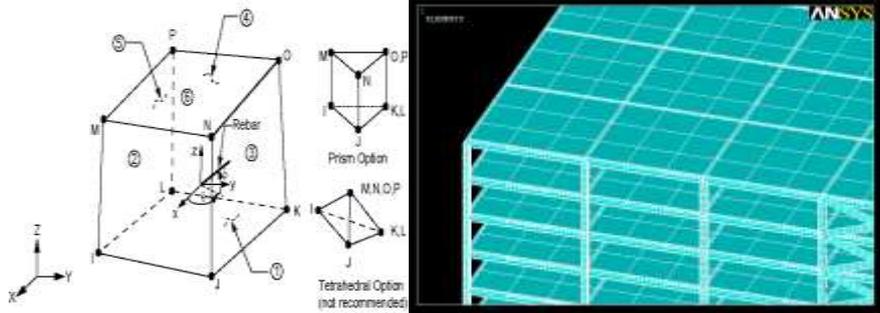
-العنصر SOLID186: وهو عنصر عالي الرتبة ثلاثي الأبعاد مكون عشرين عقدة بثلاث درجات للحرية في

كل عقدة، يدعم العنصر خصائص اللدونة والتشوهات الكبيرة ومناسب لنمذجة الأشكال الهندسية المعقدة، استخدم هذا العنصر في نمذجة عناصر التربيط. الشكل(4).



الشكل(4):العنصر SOLID186، نمذجة عناصر التربيط

العنصر SOLID65: ملائم للنمذجة ثلاثية الأبعاد للبيتون (مع وبدون حديد التسليح) فحديد التسليح ممكن أن يوضع كتسليح مخفي في العنصر "Smeared"، من خيارات العنصر يمكن تضمين التشققات في البيتون على قوى الشد والتحطم على قوى الضغط. العنصر معرف بثمانية عقد بثلاث درجات للحرية في كل عقدة (انتقال باتجاه كل من المحاور الاحداثية X، Y، Z). استخدم في محاكاة بيتون البلاطة البيتونية، الشكل (5)، هذا وقد مثل التسليح الطولي والعرضي كتسليح ضمني في العنصر SOLID65. أيضاً الصفيحة الفولاذية أسفل البلاطة مثلت ضمن العنصر من خلال تسليح بمساحة مقطع مكافئ للصفيحة.



الشكل(5): العنصر SOLID65، نمذجة البلاطة البيتونية

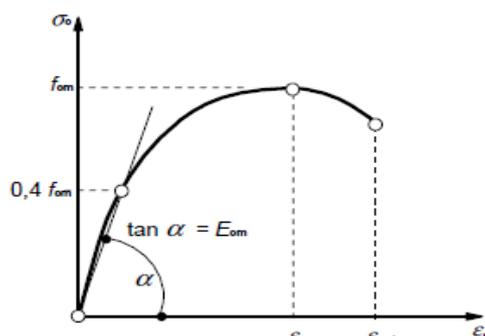
2- خصائص المواد:

في جميع المواد استخدم معيار فون ميس Von-Mises الذي يستخدم تقسية متجانسة Isotropic work hardening، استخدمت منحنيات اجهاد-تشوه ثنائية لتعريف خصائص المواد للجائز والعمود وعناصر التبريط الفولاذية وحديد التسليح، القيم المستخدمة في هذه المنحنيات مأخوذة من نتائج الاختبارات [14] على اطاراستخدمت فيه نفس المقاطع من صنف S355 وهي مبينة في الجدول (3)، ومعامل يونغ للفولاذ $E_s = 205 \text{ KN/mm}^2$.

الجدول (3): الخصائص الميكانيكية للعناصر [14]

العنصر	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)
الجائز والعمود وعناصر التبريط الفولاذية	361.9	526.2	0.17233	23.32
قضبان التسليح	537	608	0.2557	9.11

في البلاطة البيتونية استخدمت علاقة الاجهاد-تشوه المفترضة للبيتون في التحليل اللاخطي في الكود الأوربي [15] Eurocode2 (انظر الشكل 6) وذلك من أجل بيتون C30/37 ClassA بمقاومة اسطوانية حديّة على الضغط 38 Mpa وتشوه أعظمي 0.022، أما معامل المرونة ومعامل بواسون فهما على التوالي $E_c = 32 \text{ Gpa}$ ، وفي جدول بيانات العنصر Soild65 وضع معاملي نقل قوى القص في حالة التشقق وعدم التشقق $\nu = 0.2$ و Transfer Coefficients for open and closed crack على التوالي 0.2 و 0.6، وأخيراً من أجل تحسين ظروف التقارب في التحليل تم إلغاء إمكانية التحطم في البيتون.



الشكل(6): منحنى الاجهاد-تشوه المستخدم في التحليل اللاخطي للبيتون [15]

3- نمذجة مادة خلاط ذاكرة الشكل SMA عند استخدامها كعناصر تربيط:

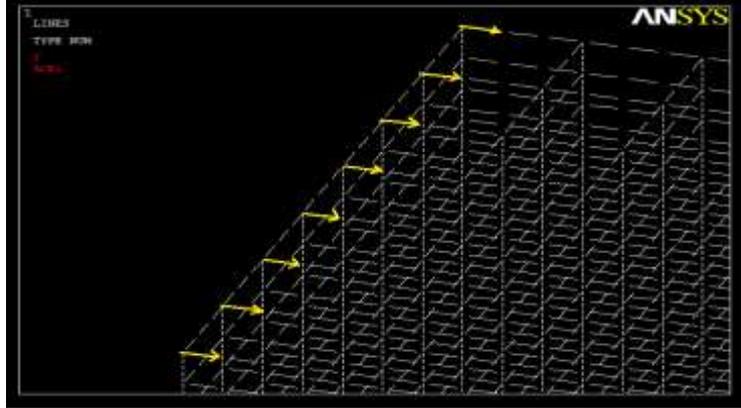
يوفر ANSYS من خلال خيارات المواد الموجودة فيه تمثيل الخصائص الاستثنائية لـ SMA والمتمثلة بـ SME و SE. يرتكز ANSYS في نمذجة خاصية الـ SE على النموذج المقدم من Auricchio et al. [16] حيث تظهر المادة تشوهات كبيرة من دون أن تكون هناك تشوهات دائمة تحت ظروف الحرارة المتجانسة. تم استخدام خليطة النيكل-تيتانيوم Ni-Ti وهي في مرحلة المرونة العالية في أحد النموذجين كعناصر تربيط وبنفس أبعاد عناصر التربيط الفولاذية، وقد تم التعبير عن خاصية الـ SE من خلال جدول بيانات للمادة يتكون من ست ثوابت كما يظهر في الجدول (4)، هذه الثوابت تعرف منحنى الاجهاد-تشوه الهيسثيري للمادة في حالة التحميل ورفع التحميل المشار إليه سابقاً (المنحنى 2 من الشكل (2)). وهنا تجدر الإشارة أن التركيب الكيميائي في الخليطة هو (55% نيكل، 45% تيتانيوم) كنسب مئوية من الوزن وعليه فإن المادة لن تفقد خاصية المرونة العالية الا عندما تصبح درجة الحرارة بين المجال (20 حتى -45) درجة سيليسوس، وبالتالي وفقاً للظروف المناخية في منطقتنا ستبقى المادة دوماً في مرحلة SE و لا يوجد أثر للتغير في درجة الحرارة على المرحلة المسيطرة في الخليطة (التي ستبقى دوماً مرحلة المرونة العالية SE)، لذلك لا يأخذ التحليل بعين الاعتبار إمكانية دخول المادة في مرحلة SME نتيجة التغير في درجة الحرارة.

الجدول (4): الثوابت المستخدمة في نمذجة خاصية المرونة العالية (SE)

الثابت	الرمز	الشرح	القيمة [5]
C1	σ_S^{AS}	قيمة الاجهادات الموافقة لبداية مرحلة التحول	401 Mpa
C2	σ_F^{AS}	قيمة الاجهادات الموافقة لنهاية مرحلة التحول	510 Mpa
C3	σ_S^{SA}	قيمة الاجهادات الموافقة لبداية انعكاس مرحلة التحول	180 Mpa
C4	σ_F^{SA}	قيمة الاجهادات الموافقة لنهاية انعكاس مرحلة التحول	100 Mpa
C5	e_1	التشوهات المتبقية الأعظمية في مرحلة التحول	6%
C6	a	بارامتر يقيس الاختلاف في استجابة المادة بين الشد والضغط	0
E		معامل المرونة	62.5 Gpa
v		معامل بواسون	0.3

4- الحمولات والشروط المحيطة:

تم تطبيق حمولات ستاتيكية بشكل تدريجي على شكل عدة خطوات تحميل في أعلى الأعمدة الموجودة في الطرف الأيسر من النموذج، الشكل (7).



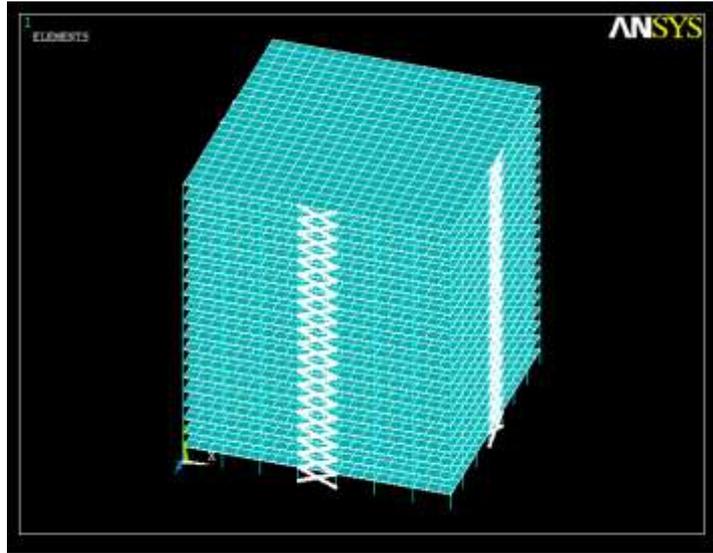
الشكل(7): الحمولات الجانبية وفق خطوة التحميل الأولى

استمرت زيادة الحمولات حتى حصول الفشل من خلال تشكل مفصل لدن في عمود الطابق السفلي في حالة نموذج BUIL.STEEL، يوضح الجدول (5) خطوات التحميل المطبقة في كلا النموذجين:

الجدول(5): الحمولات وفق خطوات التحميل

خطوة التحميل	الحمولات
1	(8*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطابق الأخير
2	(8*2*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطابق الأخير والطابق 19
3	(8*3*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطوابق 20،19،18
4	(8*4*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطوابق 20،19،18،17
5	(8*5*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطوابق 20،19،18،17،16
6	(8*6*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطوابق 20،19،18،17،16،15
7	(8*7*1000kN) حيث طبقت 1000kN في أعلى كل عمود من أعمدة الطوابق 20،19،18،17،16،15،14
8	تم إزالة كل الحمولات الجانبية والنموذج يخضع فقط للوزن الذاتي

وفيما يخص الشروط المحيطة فقد فرض الاستناد موثوق لجميع الأعمدة ويظهر الشكل(8)نموذج المنشأ كاملاً.



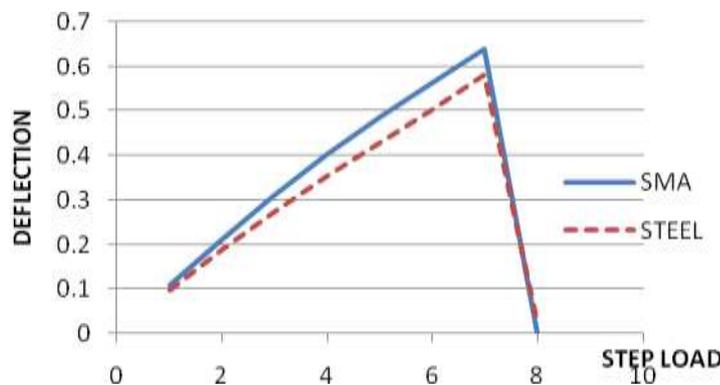
الشكل(8): نموذج المنشأ

5- خيارات التحليل:

- 1 لقد تم التعبير عن العمل المختلط بين الجائز الفولاذي والبلاطة البيتونية من خلال مزوجة (Coupling) درجات الحرية في العقد المتقابلة الممثلة لهما، وبذلك تصبح كل من البلاطة البيتونية والجائز الفولاذي تعملان بنفس الطريقة، وهي مشابهة للطريقة المتبعة في دراسات سابقة في نمذجة الجائز المختلط [19,18,17].
- 2 تمت نمذجة عناصر BEAM188 في المركز الهندسي لكل من الجائز والعمود.
- 3 فرضت وصلات عناصر التثبيت على أنها وصلات مفصلية.
- 4 لتعريف اتجاهات المقاطع المستخدمة في الأعمدة والجوائز استخدم للعنصر BEAM188 ثلاث عقد، عقدتين هما عقدتي البداية والنهاية المعرفتين للعنصر في حين العقدة الثالثة استخدمت لتعريف الاتجاه وليس لها أي أثر إنشائي.

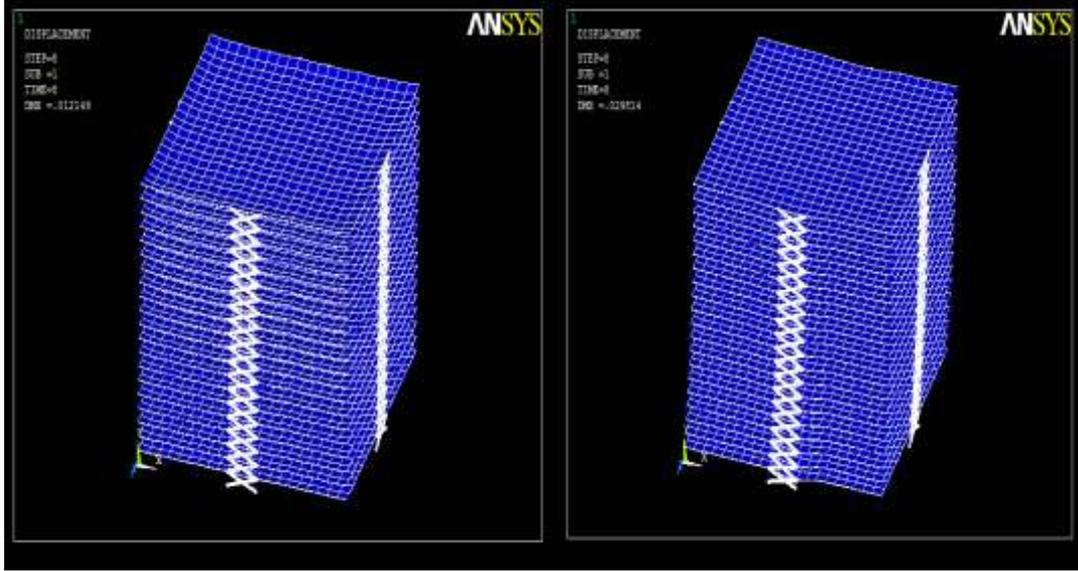
5 دراسة مقارنة لنتائج النموذجين:

- كان هناك زيادة واضحة في الانزياحات الجانبية مع تشوهات متبقية صغيرة جداً في حالة نموذج البناء المستخدم فيه عناصر تريبط SE Ni-Ti SMA بالمقارنة مع حالة عناصر التريبط الفولاذية.
- فقدزادت تشوهات نموذج BUIL.SMA بمقدار 13%، يظهر الشكل(9) منحنى العلاقة بين خطوة التحميل- الانزياح الطابقي للطابق الأخير.



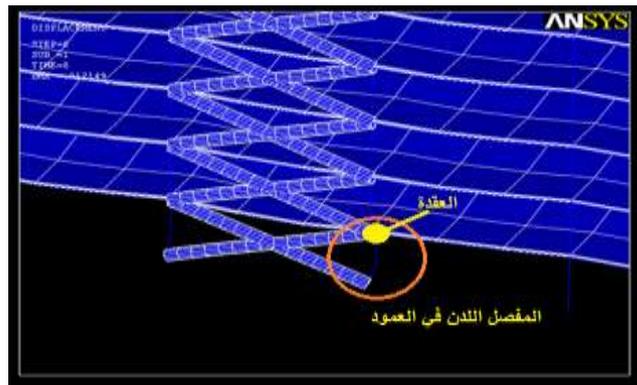
الشكل(9):خطوة التحميل-الانزياح الطابقي

وفي خطوة التحميل الأخيرة بعد إزالة الحمولات الخارجية وتطبيق فقط الأوزان الذاتية للعناصر كانت التشوهات المتبقية في BUIL.SMA أقل بـ 59.3% بالمقارنة مع نموذج BUIL.STEEL، الشكل (10) يظهر التشوهات المتبقية في كلا النموذجين بعد إزالة الحمولات.



الشكل (10): التشوهات المتبقية (m)، (أ) نموذج BUIL.SMA، (ب) نموذج BUIL.STEEL

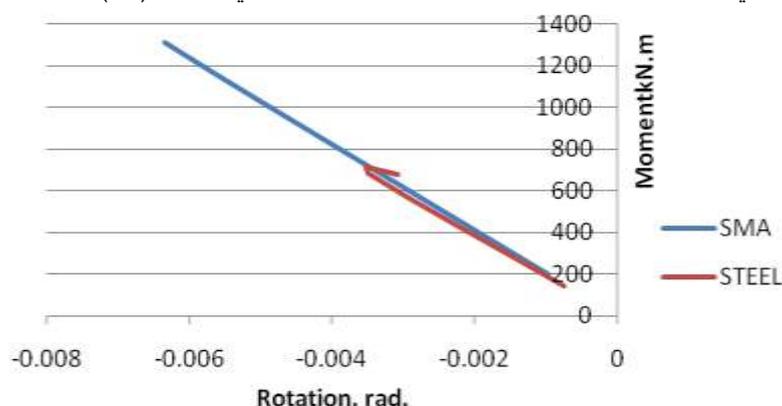
وهذا يدل على فعالية أثر خاصية خلائط ذاكرة الشكل وهي في مرحلة المرونة العالية والمتمثلة بـ "إبدائها تشوهات كبيرة واستعادتها لتشوهراتها المتبقية" على السلوك الانشائي للبناء العالي. في حالة نموذج BUIL.STEEL عند خطوة التحميل السابعة حصل فشل بتشكيل مفصل لدن في العمود السفلي المضغوط المتأخم لعناصر التريبط، الشكل (11)، في حين في حالة نموذج BUIL.SMA استمر التحليل دون حدوث الفشل.



الشكل (11): المفصل في العمود السفلي في نموذج BUIL.STEEL

والسبب في هذا أن التشوهرات الإضافية التي تؤمنها أوتار الـ SMA أدت إلى عملية إعادة توزيع للعزم في عقدة جائز-عمود للعمود السفلي الذي حصل عنده الفشل، فعلى الرغم من الزيادة الاجمالية للعزم في العقدة بمقدار 55% (نتيجة التشوهرات الإضافية التي أدت إلى مساهمة أكبر من الجوائز والأعمدة في استجابة العقدة) في نموذج

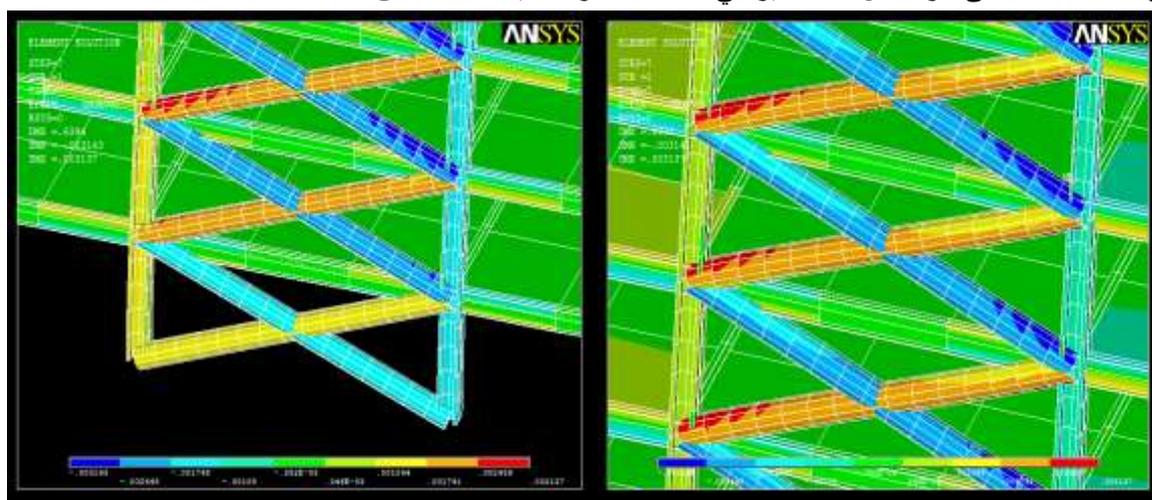
BUIL.SMA إلا أن قيم العزم في هذا العمود كانت تقريباً نصف قيمها في نموذج BUIL.STEEL. الشكل (12) يظهر علاقة العزم-دوران في كلا النموذجين لعقدة جائز-عمود المشار إليها في الشكل (11).



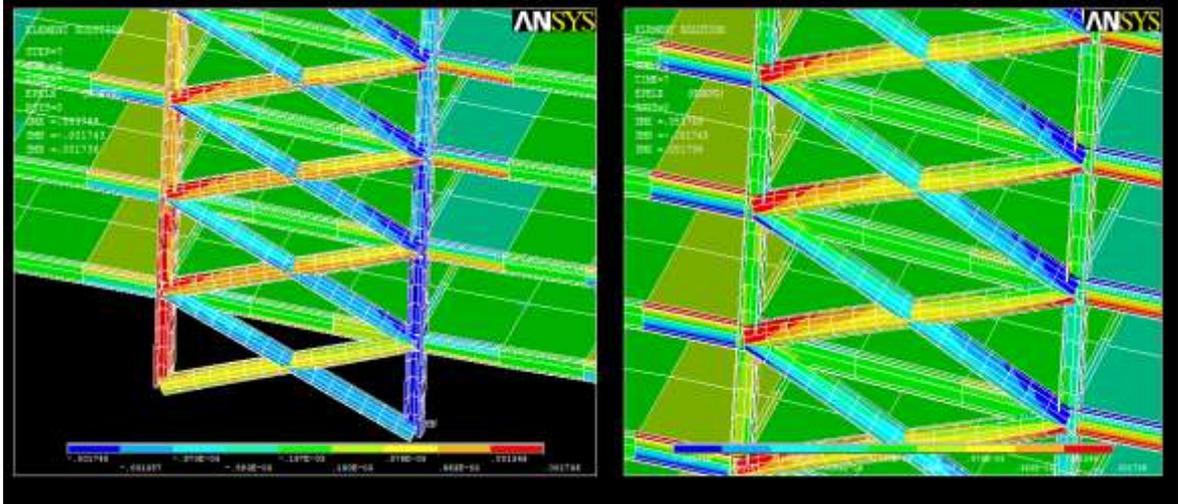
الشكل(12): منحنى العزم-دوران في عقدة جائز-عمود

قيم التشوهات المرنة في نموذج BUIL.SMA كانت أكبر، فالتشوهات المرنة زادت بمقدار 81% بالمقارنة مع نموذج BUIL.STEEL، الشكلين (13-14)، وهذا يدل على أن الزيادة المشار إليها سابقاً 13% في الانزياحات الجانبية الاجمالية في نموذج BUIL.SMA كانت بشكل كبير على شكل تشوهات مرنة وهذا ما سيؤدي إلى سلوك مطاوع وأداء زلزالي أفضل في حالة نموذج BUIL.SMA.

وهنا تجدر الإشارة أن القيم العظمى لهذه التشوهات كان منتشرة في عناصر التثبيت في حالة نموذج BUIL.SMA، الشكل(15)، في حين انتشرت في عناصر التثبيت وبشكل كبير في العمود السفلي المضغوط الذي حصل عنده الفشل في حالة نموذج BUIL.STEEL، الشكل(14). وهذا يدل على السلوك الأمثل لعناصر تثبيت SMA من خلال نشوء قيم اجهادات كبيرة فيها تعبر عن مشاركة فاعلة في مقاومة القوى الجانبية، وقيم اجهادات أقل في الأعمدة تدل على أثر التشوهات الكبيرة في هذه العناصر بتخفيف العبء عن الأعمدة.



الشكل(13): التشوهات المرنة في نموذج BUIL.SMA (mm)؛ أ-العمود السفلي، ب-عناصر التثبيت



(ب) (أ)

الشكل (14): التشوهات المرنة في نموذج (mm).STEEL.BUIL، أ-العمود السفلي، ب-عناصر التثبيت

الاستنتاجات والتوصيات:

باستخدام برنامج ANSYS تم تنفيذ نمذجي عناصر محدودة على بناء اطاري مختلط متعدد الطوابق، ويغرض دراسة أثر الخاصية الاستثنائية في مادة SMA على السلوك الانشائي للمنشأ كان الاختلاف الوحيد بين النموذجين هو في مادة النظام المقاوم للقوى الجانبية في المنشأ والمتمثل بعناصر التثبيت، ففي النموذج الأول (BUIL.STEEL) استخدمت عناصر تربيط من الفولاذ، في حين في النموذج الثاني (BUIL.SMA) استخدمت عناصر تربيط من SE .Ni-TISMA

أظهرت الدراسة النتائج التالية:

- 1- إن استخدام هذه الخلائط كعناصر تربيط يؤدي لزيادة في قيم الانزياحات الجانبية بمقدار 13% والتشوهات المرنة بمقدار 81% الأمر الذي يعطي سلوك أكثر مطاوعة وكفاءة في مقاومة الأحمال الزلزالية بالمقارنة مع استخدام الروابط الفولاذية.
- 2- كان هناك انخفاض في قيم التشوهات المتبقية بمقدار 59.3% في نموذج BUIL.SMA بالمقارنة مع نموذج BUIL.STEEL وهو ما يخفف الحاجة وبشكل كبير للأعمال الترميمية بعد التعرض للأحمال الجانبية الكبيرة كالرياح عالية الشدة والزلازل.
- 3- ارتفاع قيم الاجهادات في عناصر التثبيت وانخفاضها في الأعمدة في نموذج BUIL.SMA يبين تحقيق سلوك أمثل لعناصر التثبيت من خلال مشاركة أكبر في مقاومة القوى الجانبية مع تخفيف لأثر الأحمال الجانبية على الأعمدة بالمقارنة مع نموذج BUIL.STEEL.

المراجع:

1. Hardwicke, C.U. Recent developments in applying smart structural materials. JOM, ABI/INFORM Trade & Industry. 2003; 55: 15-16.
2. Wang, H., A study of RC columns with shape memory alloy and engineered cementitious composites. M.Sc. Thesis, University of Nevada, Reno, USA. 2004.

3. Sakai, Y., Kitagawa, Y., Fukuta, T., and Iiba, M. Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2003; Vol. 5057, pp. 178-186.
4. Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R. T., Hess, W. G., Krumme, R. Hayes, J. R., Sweeney, S. Steel beam-column connections using shape memory alloys. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 2004; **130**: 732-740.
5. Alam, M.S., Youssef, M.A., Nehdi, M. UTILIZING SHAPE MEMORY ALLOYS TO ENHANCE THE SEISMIC PERFORMANCE OF RC BEAM-COLUMN JOINTS. PhD. Thesis, University of Western Ontario London, Ontario, Canada. 2007a.
6. Tamai, H., Miura, K., Kitagawa, Y., and Fukuta, T. 2003. Application of SMA rod to exposed-type column base in smart structural system. *Proceedings of SPIE - Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation*, Vol.5057, pp. 169-177.
7. Maji, A.K., and Negret, I. 1998. Smart prestressing with shape memory alloy. *Journal of Engineering Mechanics*, 124: 1121-1128.
8. McCormick, J, DesRoches, R. Seismic Response Using Smart Bracing Elements. *Proceedings of the Extreme Loading Conference*, Toronto, Canada. 2003.
9. Dolce, M. and Cardone, D. 2001a. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite Ni-Ti bars subjected to torsion. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43: 2631-2656.
10. Wilson, J.C. and Wesolowsky, M.J. 2005. Shape memory alloys for seismic response modification: A state-of-the-art review. *Earthquake Spectra*, 21: 569-601.
11. British Standards Institution. BS 5950: Structural use of steelwork in buildings, Part 1: Code of practice for design—rolled and welded sections, London (UK); 2000.
12. British Standards Institution. BS 8110, Structural use of concrete, Part 1: code of practice for design and Construction, London (UK), 1997.
13. ANSYS, Inc. Version 14.5. Southpointe, Canonsburg, PA, USA. 2012.
14. Fu Feng, Lam Dennis. Experimental study on semi-rigid composite joints with steel beams and precast hollowcore slabs. *Journal of Constructional Steel Research* 2006; 62(8): 771_82.
15. CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, prEN 1992-1-1, November 2002. CEN; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2002.
16. Auricchio, F. A Robust Integration-Algorithm for a Finite-Strain Shape-Memory-Alloy. *International Journal of Plasticity*. 2001; 17: 971-990.
17. G.E. Thermou, A.S. Elnashai, A. Plumier, C. Doneux. Seismic design and performance of composite frames. *Journal of Constructional Steel Research* 60 (2004) 31–57.
18. F.D. Queiroz, G. Queiroz, D.A. Nethercot. Two-dimensional FE model for evaluation of composite beams, I: Formulation and validation. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 1055_1062.
19. Mohamed A. Dabaon, Mahmoud H. El-Boghdadi, Omnia F. Kharoob. Experimental and numerical model for space steel and composite semi-rigid joints. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 1864_1875.