

## Modeling and Analyzing of NSM Strengthened RC Beams with FRP Strips Using ANSYS

Dr Issam Nasser\*  
Dr Bassam Hwaija\*\*  
Tharaa Mubarak\*\*\*

(Received 8 / 7 / 2023. Accepted 20 / 8 / 2023)

### □ ABSTRACT □

The Near Surface Mounted (NSM) technique is a promising strengthening approach, though unpopular due to unreliable prediction behavior of these beams at failure. Therefore, model will be developed in this study, using the finite element method (FEM) to simulate the behavior of NSM strengthened RC beams by modeling the debonding mechanism and taking the combined effect of tangential stresses and normal stresses that are applied to the strips when debonding failure occurs.

The accuracy of this model was experimentally validated, and the model showed high agreement with the experimental results in load capacity, effective strain of FRP strips, Additionally, and the shapes of curves (deflection-load). Where the convergence ratio reached values more than 97% for the failure load, and ranged between (97.5%-100%) for the effective strain of FRP strips, and the similarity between the experimental cracks and the ANSYS cracks was acceptable in places of formation, propagation, direction and length.

**Keywords:** strengthening – carbon Fiber – NSM – FEM- ANSYS.

**Copyright**



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

---

\* Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Tishreen University, Lattakia.

\*\*Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University Tishreen University, Lattakia.

\*\*\*Postgraduate Student (Ph.D.), Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University Tishreen University, Lattakia. [tharaamub@yahoo.com](mailto:tharaamub@yahoo.com)

## نمذجة وتحليل الجوائز البيتونية المقواة بشرائح FRP بتقنية اللصق ضمن أخاديد وفق برنامج ANSYS

د. عصام ناصر\*

د. بسام حويجة\*\*

ثراء مبارك\*\*\*

(تاريخ الإيداع 8 / 7 / 2023. قُبِلَ للنشر في 20 / 8 / 2023)

### □ ملخص □

تعتبر تقنية تقوية الجوائز البيتونية المسلحة العاملة على الانعطاف بطريقة لصق مادة التقوية CFRP ضمن أخاديد من التقنيات الواعدة في مجال التقوية للجوائز البيتونية المسلحة، ولكنها لم تلق انتشاراً واسعاً بسبب عدم تشكل الثقة الكافية بإمكانية توقع سلوك هذه الجوائز عند الانهيار، لذلك سيتم في هذه الدراسة تطوير نموذج بطريقة العناصر المنتهية (FEM) لمحاكاة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بطريقة اللصق ضمن أخاديد NSM وذلك بنمذجة آلية الانفصال وإدخال التأثير المشترك للإجهادات المماسية والإجهادات الناظرية التي تخضع لها شرائح التقوية عند حدوث الانهيار بانفصال التقوية والتي تعتبر أحد أهم أشكال الانهيار لهذا النوع من الجوائز، وتم توثيق دقة هذا النموذج تجريبياً، وتوصلنا إلى نموذج يتوافق مع القيم التجريبية بدقة عالية من حيث حمولة الانهيار والتشوه الفعال لشرائح التقوية، وأشكال منحنيات (سهم -حمولة) وكان التقارب جيداً ليحاكي سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المقواة بشرائح NSM.FRP، حيث وصلت نسبة التقارب إلى قيم تزيد عن 97% بالنسبة لحمولة الانهيار وتراوحت نسب التقارب بين (97.5%-100%) للتشوه الفعال لشريحة التقوية، كما كان التشابه مقبولاً بين التشققات التجريبية وتشققات ANSYS من ناحية أماكن التشكل والانتشار والاتجاه والطول.

الكلمات المفتاحية: التقوية - الألياف الكربونية - اللصق ضمن أخاديد - طريقة العناصر المنتهية - ANSYS

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.  
\*\* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\*\* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

[tharaamub@yahoo.com](mailto:tharaamub@yahoo.com)

**مقدمة:**

تعتبر تقنية اللصق ضمن أخاديد من التقنيات الواعدة في إطالة العمر الاستثماري للعناصر الإنشائية المقواة بهذه الطريقة، وقد أثبتت هذه التقنية أداء أفضل في زيادة قدرة تحمل العناصر على الانعطاف والقص [1][2] بالإضافة إلى تأخير ظاهرة الانفصال المبكر (premature debonding) التي تخضع لها الجوائز البيتونية المسلحة المقواة بتقنية لصق مادة FRP على السطح الخارجي للعنصر المقوى [3][4]،

اعتبرت معظم الدراسات أن التماسك تام بين البيتون وشرائح التقوية لسهولة النمذجة والتحليل، وبعد أن بدأت تتوضح مفاهيم وأنماط الانهيار في الجوائز المقواة بتقنية NSM توجهت الدراسات لإدخال تأثير نموذج الانفصال بين البيتون والتقوية وذلك بالاعتماد على الاجهادات البينية المماسية وعلاقتها مع الانزلاق فقط أي (إجهاد قص-انزلاق) (shear stress-slip) أو ما يعرف في الدراسات منحنى (تماسك - انزلاق) (bond-slip) للسطح البيني [5][6]، وذلك بطريقة مشابهة لنمذجة الانفصال في حالة اللصق الخارجي لصفائح التقوية [7] حيث يحصل الانفصال في الاتجاه الأفقي بسبب الزيادة الكبيرة في إجهادات القص. بينما الانفصال في طريقة اللصق ضمن أخاديد يحدث بالاتجاهين بسبب الزيادة الكبيرة في الإجهادات المماسية والإجهادات النازمية [8][9] ومع ذلك تم إهمال تأثير إجهادات الشد النازمية أثناء النمذجة في معظم الدراسات.

في هذا البحث سنقوم ببناء نموذج عناصر منتهية بتحليل لاخطي موثق تجريبياً يحاكي سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المقواة باللصق ضمن أخاديد باعتماد برنامج ANSYS 2021 وذلك بإدخال التأثير المشترك للإجهادات المماسية والإجهادات النازمية التي تخضع لها شرائح التقوية عند حدوث الانفصال.

**طرائق البحث ومواده:**

يعتمد هذا البحث على استخدام برنامج ANSYS لتطوير نموذج ثلاثي الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية (FEM) لمحاكاة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المقواة بشرائح بطريقة اللصق ضمن أخاديد NSM من حيث (الحمولة، السهم، التشققات والتشوه الفعال لشرائح التقوية) وتم مقارنة نتائج هذا النموذج مع أحد الدراسات التجريبية العالمية لتوثيق دقة هذه النماذج التحليلية .

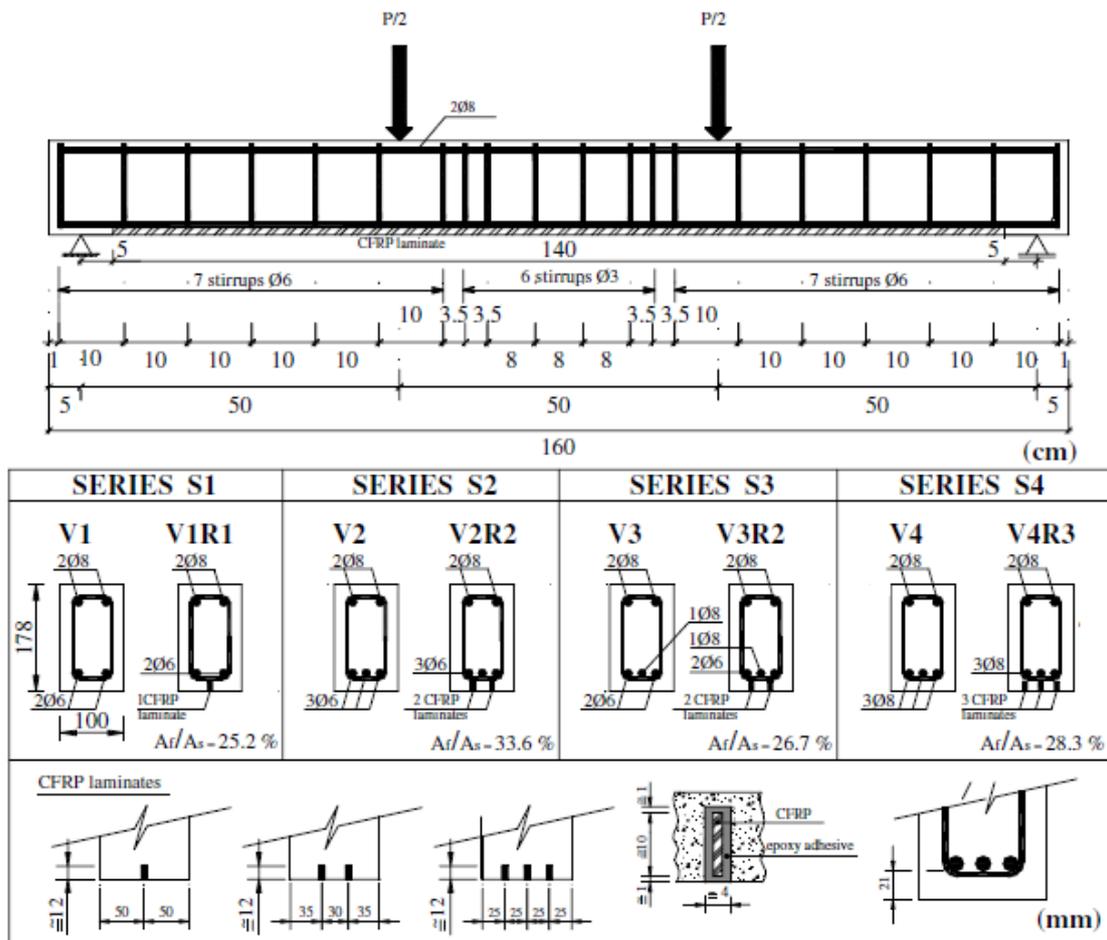
**إعداد النموذج العددي:**

تمت نمذجة الجوائز التجريبية المقدمة من قبل [10] Barros & Fortes حيث تم تشكيل أربعة نماذج بالاعتماد على طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS 2021 :

- جوائز مرجعية من البيتون المسلح لم يتم تقويتها.
- جوائز مقواة بشريحة واحدة من CFRP.
- جوائز مقواة بشريحتين من CFRP.
- جوائز مقواة بثلاث شرائح CFRP.

وهي جوائز بيتونية مسلحة متماثلة في الشكل الهندسي والأبعاد بطول 1.6m بمقطع عرضي 100x178mm، ومختلفة من حيث التسليح الفولاذي وعدد وتوضع شرائح التقوية، بالنسبة للجوائز المقواة بشرائح NSM.FRP: تم اقتطاع الأخدود بأبعاد 4mmx12mm وأبعاد شريحة التقوية 1.4mmx10mm.

أبعاد الجائز وترتيب التسليح وتوضع شرائح التقوية موضحة بالشكل (1):



الشكل (1): جوائز اختبار Barros& Fortes [10]

### 1-1- نمذجة مكونات الجوائز البيتونية المقواة بطريقة NSM.FRP باستخدام ANSYS:

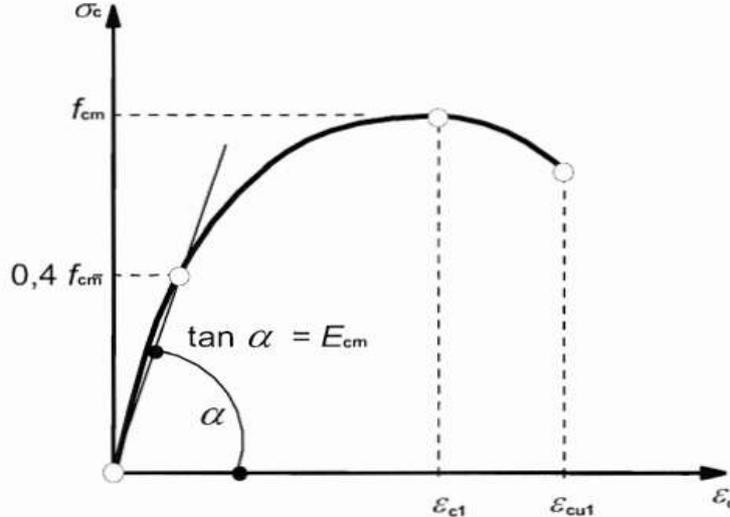
#### 1-1-1- نمذجة البيتون والايوكسي:

قمنا بنمذجة البيتون والايوكسي في برنامج ANSYS باستخدام العنصر اللاخطي الحجمي (Solid 65) المكون من ثمان عقد تملك كل منها ثلاث درجات حرية، وهي الانتقالات باتجاه المحاور الثلاثة، ويمتلك هذا العنصر قابلية التشقق والتحطم، و يستخدم مع أو بدون تسليح.

ويحتاج برنامج ANSYS لنمذجة سلوك البيتون للخصائص التالية [11]:

- معامل مرونة البيتون ويحدد بالعلاقة (3-5) وفق الكود الأوربي [12].
- المقاومة المميزة للبيتون على الضغط وهي محددة تجريبياً ( $f'_c = 46.4 \text{MPa}$ ).
- مقاومة البيتون على الشد ( $f_t$ ): يحدد وفق الكود ACI ( $f_t = 0.62 \times \sqrt{f'_c}$ ) [13].
- معامل بواسون للبيتون ( $\nu = 0.18$ ).
- معامل نقل القص عبر الشقوق المفتوحة ( $\beta_t = 0.2$ ).

- معامل نقل القص عبر الشقوق المغلقة ( $\beta_c=0.7$ ).
- علاقة (إجهاد- التشوه) للبيتون على الضغط وبين الشكل (2) منحنى (إجهاد-تشوه) للبيتون المضغوط وفق الكود الأوروبي [12] والذي تم استخدامه في هذا البحث:



الشكل (2): منحنى علاقة (الإجهاد - التشوه) للبيتون على الضغط وفق تقريب الكود الأوروبي [12]

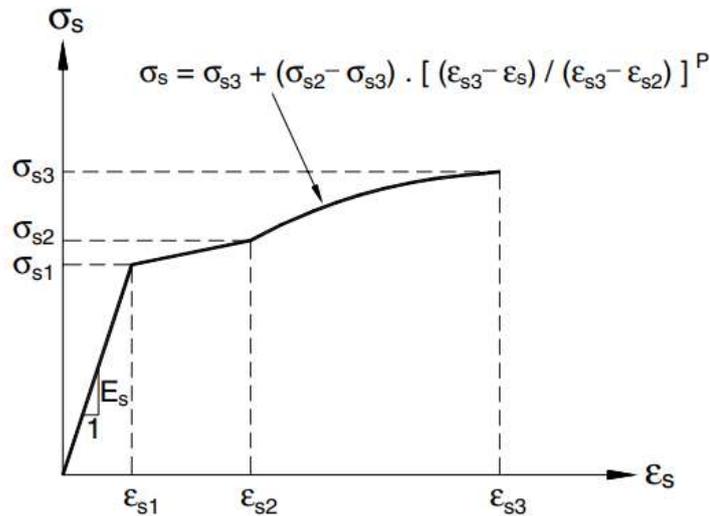
- لنمذجة سلوك الايبوكسي نحتاج إلى الخصائص التالية:
- معامل مرونة الايبوكسي وهو محدد تجريبياً ( $E_a=5 \text{ GPa}$ )
- مقاومة الايبوكسي على الضغط ويتم اختيارها (-1) أي تعطيل إمكانية التحطم في الايبوكسي للوصول إلى تقارب جيد في الحل [14].
- مقاومة الايبوكسي على الشد ( $f_t$ ) وهو محدد تجريبياً ( $f_{ta}=22\text{MPa}$ )
- معامل بواسون للايبوكسي ( $\nu=0.18$ ).
- معامل نقل القص عبر الشقوق المفتوحة ( $\beta_f=0.2$ ) [14].
- معامل نقل القص عبر الشقوق المغلقة ( $\beta_c=0.2$ ) [14].

### 1-1-2- نمذجة قضبان التسليح الفولاذي:

- تم استعمال العنصر (Link180) لنمذجة قضبان التسليح الفولاذية وكذلك الأساور الفولاذية [11] ويشترك العنصر (Link180) مع البيتون بنفس العقد وبالتالي فإن ارتباطه معه تام.
- يظهر الشكل (3) مخطط التشوه - إجهاد المستخدم في نمذجة سلوك فولاذ التسليح في حالتي الشد والضغط والبيانات المعرفة لهذه العلاقة تم توضيحها في الجدول (1) وهو ما تم توصيفه في التجارب المعتمدة في هذا البحث [12].

الجدول (1): خصائص قضبان التسليح [10]

قطر القضيب (mm)	Es (GPa)	$\epsilon_{s1}$	$\sigma_{s1}$	$\epsilon_{s2}$	$\sigma_{s2}$	$\epsilon_{s3}$	$\sigma_{s3}$	P
6	200	0.00365	730	0.004	730	0.045	800	3.7
8	200	0.00262	524.2	0.3	554.2	0.15	613.5	2.63



الشكل (3): منحنى (إجهاد-تشوه) لقضبان التسليح الفولاذي [10]

### 3-1-1 نمذجة صفائح الاستناد و صفائح تطبيق الأحمال:

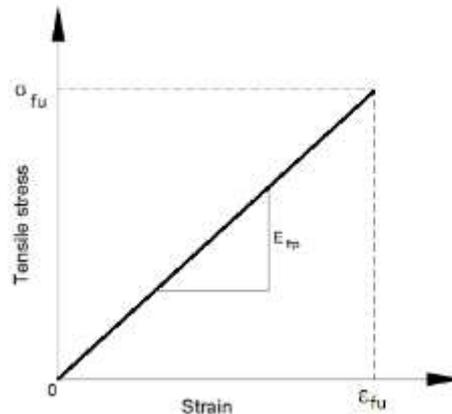
استخدمنا العنصر Solid 185 و هو عنصر يمكننا من تمثيل المادة على أنها Solid أو أنها Layer وهو عنصر ثلاثي الأبعاد له ثماني عقد، وتمتلك كل عقدة ثلاث درجات حرية وهي الانتقالات في اتجاهات المحاور الرئيسية x,y,z [11]. تمت نمذجة صفائح التحميل والاستناد لتأمين توزيع أفضل للإجهادات على منطقة التحميل حيث

اعتمدنا: عامل مرونة فولاذ الصفائح:  $E_s = 200 \text{ GPa}$  وعامل بواسون  $\nu = 0.3$

### 4-1-1 نمذجة شرائح التقوية CFRP Strips:

لنمذجة شرائح الـ CFRP وباعتبار أنها تعمل باتجاه واحد استخدمنا العنصر BEAM188 [14]، يتألف هذا العنصر من عقدتين (i,j) وتمتلك كل عقدة ست درجات حرية وهي الانتقالات في اتجاهات المحاور الثلاثة والدوران حول هذه المحاور وعلى اعتبار أن سلوك شرائح الـ CFRP [4] هو سلوكاً مرناً خطياً حتى الوصول إلى الانقطاع دون أن تدخل ضمن مرحلة اللدونة كما يظهر الشكل (4) أدخلنا الخصائص التالية لشرائح التقوية:

المقاومة القصوى للشد  $\sigma_{fu} = 2740 \text{ MPa}$  ومعامل المرونة  $E_{FRP} = 160 \text{ GPa}$

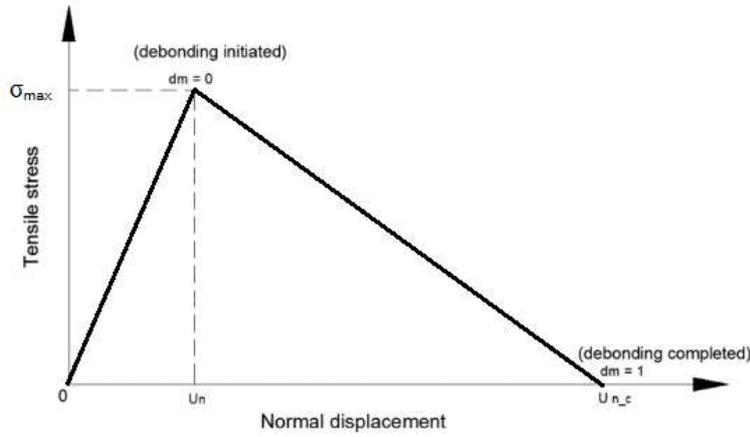


الشكل (4): علاقة (تشوه-إجهاد) لشرائح FRP

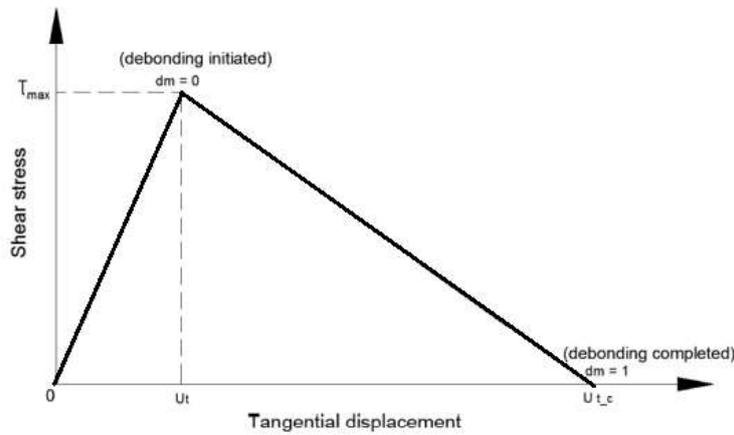
## 1-1-5 نمذجة الانفصال بين البيتون وشرائح التقوية:

لتطبيق آلية الانفصال في نموذج الـ ANSYS قمنا بنمذجة السطح البيئي بين البيتون والايوكسي والذي يعتبر الطبقة الأضعف باستخدام العنصر البيئي الخطي INTER205 وهو عنصر له ثمان عقد بسماكة صفرية ويملك في كل عقدة ثلاث درجات حرية وهي الانتقالات في اتجاهات المحاور الرئيسية X,Y,Z حيث يمكن لهذا العنصر محاكاة تطور الاجهادات وذلك بالاعتماد على نمذجة CZM (cohesive zone modeling).

بالرغم من أن هناك دراسات عديدة تقترح أشكالاً لإجهاد (القص- انزلاق) لانهايار التماسك لقضبان FRP بطريقة NSM إلا أن الدراسات المتعلقة بشرائح NSM.FRP قليلة [5] ويعتبر الشكل المقترح من قبل [9] Omran and EI-Hacha هو الأكثر دقة حيث أدخل فيه التأثير المشترك للإجهادات المماسية والإجهادات الناعظية للعينات المقواة بشرائح FRP بتقنية NSM ، وتم التعبير عن سلوك الانفصال بمنحني مؤلف من جزأين خطيين كما يظهر في الشكل (5) للانفصال الناعظي، والشكل (6) للانفصال المماسي، والمساحة تحت المنحني تمثل طاقة التصدع المتحررة من عملية الانفصال و تعبر عن بداية الانفصال كما يعبر  $dm=0$  عن حدوث الانفصال النهائي.



الشكل (5): نموذج انفصال الشد الناعظي باستخدام CZM [9]



الشكل (6): نموذج انفصال القص المماسي باستخدام CZM [9]

والمعادلات من (1) إلى (7) هي المعادلات المقترحة من قبل Omran and El-Hacha المقترحة لتحديد قيم برامترات الانفصال والذي افترض نموذج تماسك- انزلاق يجمع كل من الاجهادات المماسية والاجهادات النازمية:

$$\varphi = \frac{\text{Groove depth} + 1 \text{ mm}}{\text{Groove width} + 2 \text{ mm}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$G_{ct} = \frac{0.976\varphi^{0.526}(f'_c)^{0.6}}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{max} = (0.802 + 0.078\varphi)(f'_c)^{0.6} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$u_{t_c} = \frac{0.976\varphi^{0.526}}{0.802 + 0.078\varphi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_{max} = 0.6\sqrt{f'_c} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$G_{cn} = G_{fo} \left( \frac{f'_c}{10} \right)^{0.7} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$u_{n_c} = G_{fo} \left( \frac{\sqrt{10}f'_c}{24.3} \right)^{0.2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

حيث:  $\varphi$  تتعلق بأبعاد الأخدود.

$G_{ct}$ : طاقة التصدع الحرجة للانزلاق المماسي لسطح الالتصاق البيتون - شريحة FRP.

$\tau_{max}$ : الإجهاد المماسي الأعظمي لسطح الالتصاق بيتون - شريحة FRP.

$u_{t_c}$ : الانتقال الأفقي (المماسي) للسطح البيتي عند نهاية الانفصال.

$\sigma_{max}$ : الاجهاد النازمي الأعظمي لسطح الالتصاق بيتون - شريحة FRP.

$G_{cn}$ : طاقة التصدع الحرجة للانزلاق النازمي لسطح الالتصاق البيتون - شريحة FRP.

$u_{n_c}$ : الانتقال الشاقولي (النازمي) للسطح البيتي عند نهاية الانفصال.

نحتاج لتطبيق المعادلات السابقة أبعاد الأخدود والمقاومة المميزة للبيتون  $f_c$  و  $G_{fo}$  والتي تمثل طاقة التصدع للسطح البيتي تحت تأثير إجهاد الشد وتساوي طاقة تصدع البيتون، وهذه القيمة تعتمد على حجم الحصويات. اعتمدنا في بحثنا القيمة  $G_{fo} = 0.03475 \text{ N/mm}$  [14].

وبالتالي ينتج من المعادلات السابقة أن:

$$\text{القيم المخصصة لنموذج الإجهادات النازمية } \sigma_{max} = 4.087 \text{ MPa} \text{ و } u_{n-c} = 0.04979 \text{ mm}$$

$$\text{والقيم المخصصة لنموذج قص - انزلاق } \tau_{max} = 9.708 \text{ MPa} \text{ و } u_{t-c} = 1.50959 \text{ mm}$$

**تشكيل السطح البيتي في ANSYS (Creating the Interface)**

يتم تعريف مادة العنصر INTER205 برمجياً كمايلي:

TB,CZM,1,,BILI

TBDATA,1,A,B,C,D,E,F

يدل الرقم (1) على رقم المادة في قائمة المواد في ANSYS

BIL1 تجعل الـ ANSYS يختار منحني الانفصال كما في الأشكال (5) و(6).

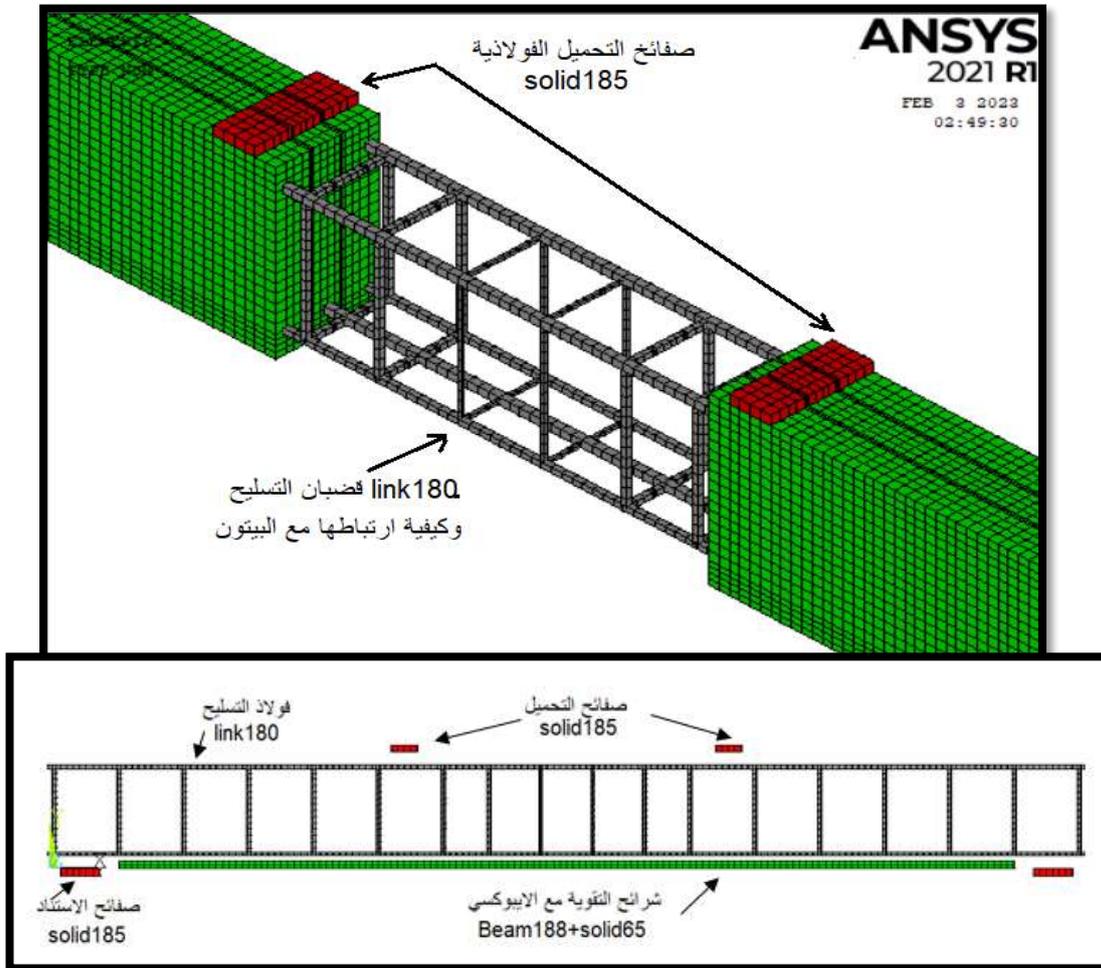
$$\begin{aligned}
 A &= \sigma_{max} = 4.087MPa \\
 B &= u_{n-c} = 0.04979mm \\
 C &= \tau_{max} = 9.708MPa \\
 D &= u_{t-c} = 1.50959mm \\
 E &= 0.765mm \\
 F &= 1
 \end{aligned}$$

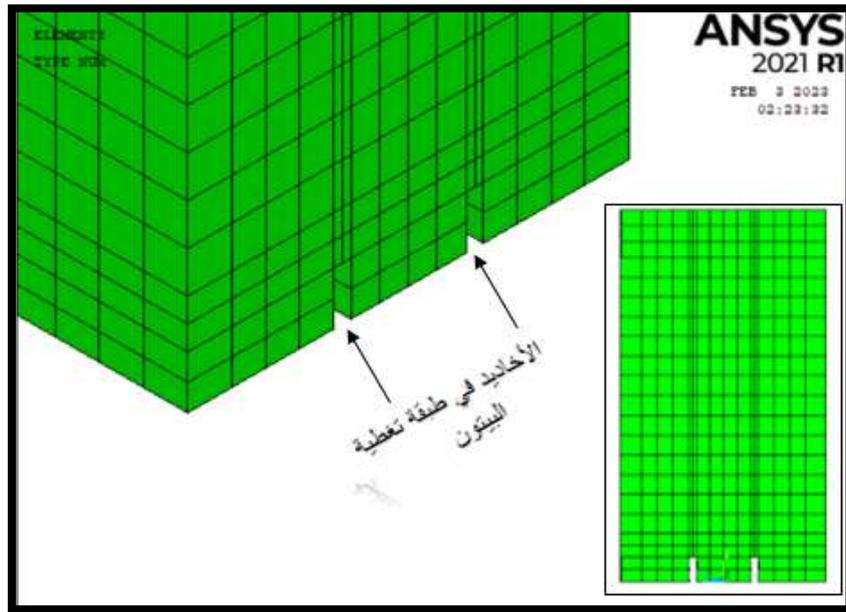
E: النسبة بين الانتقال عند بداية ونهاية الانفصال [14].

F=1 : السماح بنمط الانفصال المختلط.

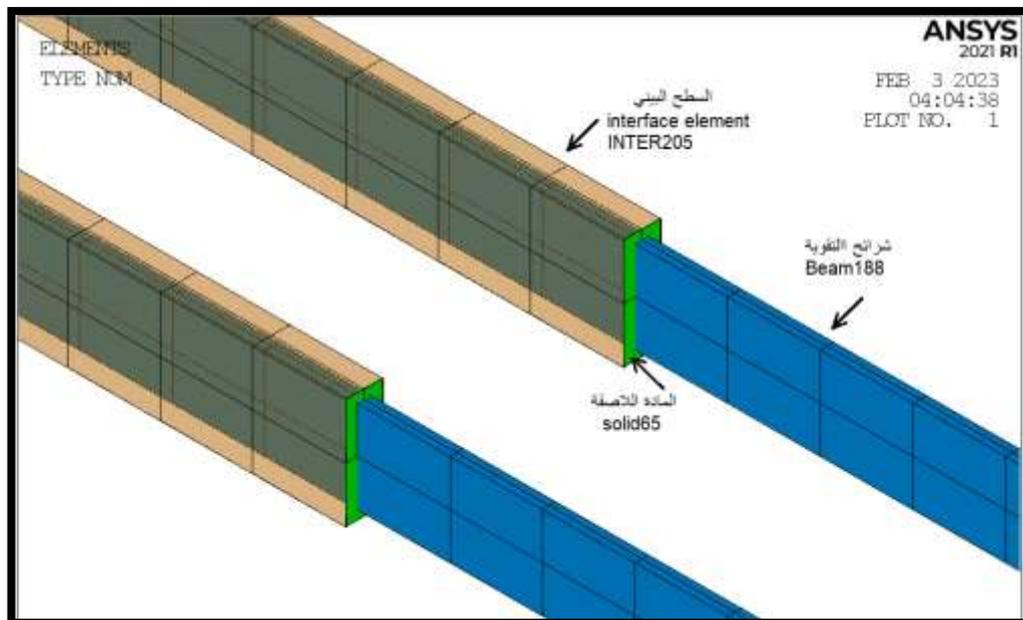
ويبين الشكل (7) كيفية نمذجة البيتون وقضبان التسليح والارتباط بينهما في بيئة برنامج ANSYS وكذلك صفائح الاستناد والتحميل وشرائح التقوية.

كما يظهر الشكلان (8) و(9) نمذجة الأخدود والمادة اللاصقة وشرائح التقوية وكذلك السطح البيتي في بيئة ANSYS.

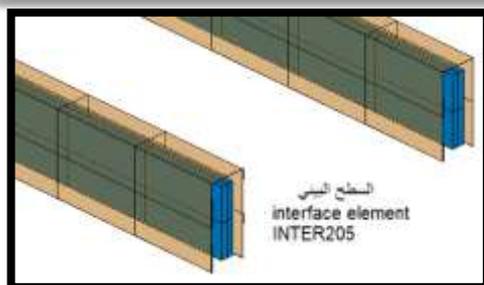




الشكل (8): الأخاديد ضمن طبقة التغطية برنامج ANSYS



(a)



(b)

(a): نمذجة السطح البيني والمادة اللاصقة وشرايح التقوية (b): نمذجة السطح البيني وشرايح التقوية

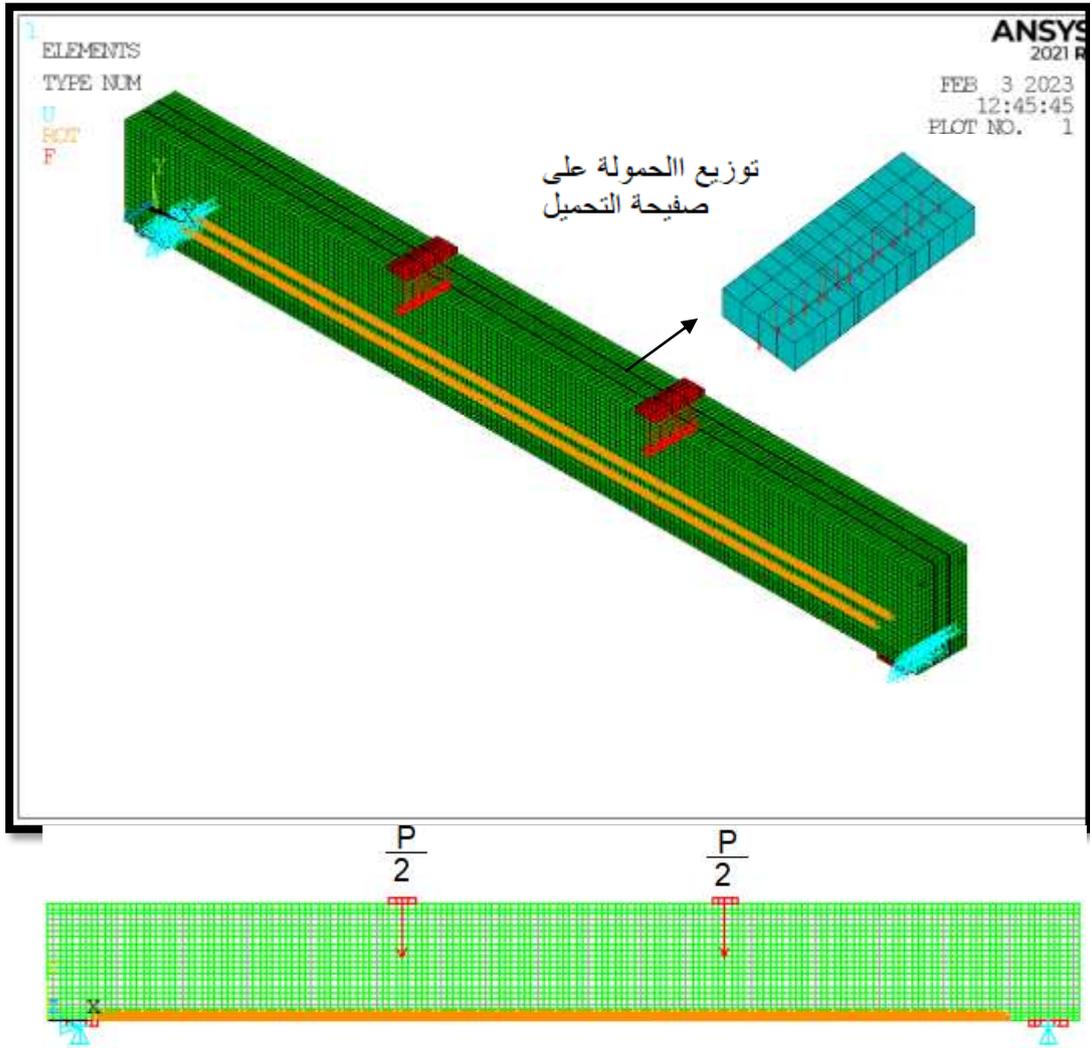
الشكل (9): نمذجة التقوية NSM

### 1-2- الشروط الطرفية للنموذج (Boundary Conditions):

- تخصيص المساند الطرفية: يتم تخصيص كل من المسند الثابت والمتدحرج على صف العقد الوسطي الذي يقع أسفل ومنتصف صفيحة الاستناد الشكل (10)، في المسند الثابت يقيد الانتقال في الاتجاهات الثلاث  $UX, UY, UZ$ ، وفي المسند المتدحرج نمنع الانتقال بالاتجاهين  $UY, UZ$ .
- كما تجدر الإشارة أنه باختيارنا العنصر BEAM188 لنمذجة شرائح CFRP لابد من تقييد دوران هذا العنصر حول محوره الطولي ROTX.

### 1-3- تطبيق الحملات على النموذج (Applying Loads):

- القوة المطبقة على صفيحة التحميل تساوي نصف القوة التي التجريبية ( $P/2$ ) وتم تقسيم هذه الحمولة ( $P/2$ ) على عقد الخط الوسطي لصفيحة التحميل كما يوضح الشكل (10).
- وتم تطبيق هذه الحمولة بشكل تدريجي حتى الوصول إلى القيمة التي يتوقف فيها تقارب الحل (حمولة الانهيار).



الشكل (10): الشروط الطرفية والحملات المطبقة على نموذج ANSYS

## 2 مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج التحليل ببرنامج ANSYS:

### 1-2 مقارنة قدرة التحمل على الانعطاف:

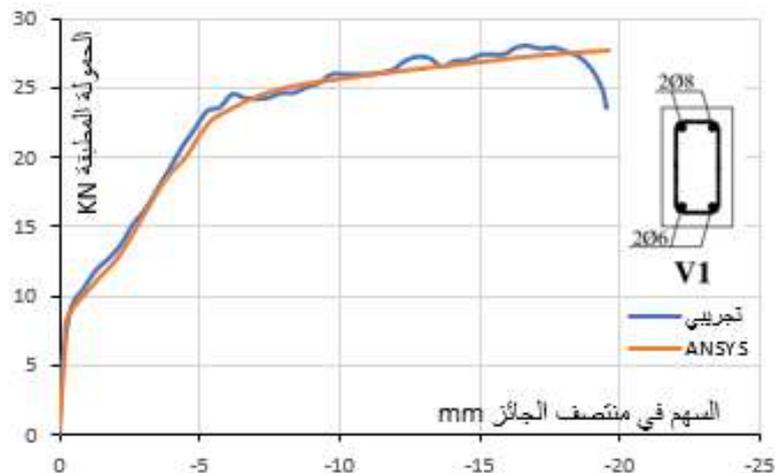
يبين الجدول (2) مقارنة بين القيم التجريبية وقيم ANSYS في الحالات: الحمولة عند حدوث أول تشقق Pcr والحمولة عند سيلان فولاذ التسليح Psy والحمولة القصوى Pu، لكل من الجوائز التجريبية والجوائز المقواة، ويتضح من الجدول أن النسبة  $\frac{P_{u \text{ تجريبي}}}{P_{u \text{ ansys}}}$  تساوي (1.016, 1.016, 0.977, 0.997, 0.983, 1.004) في الجوائز (V1, V1R1, V3, V3R2, V4, V4R3) على الترتيب.

الجدول (2-3): مقارنة القيم التجريبية مع القيم من نموذج ANSYS لقدرة التحمل على الانعطاف

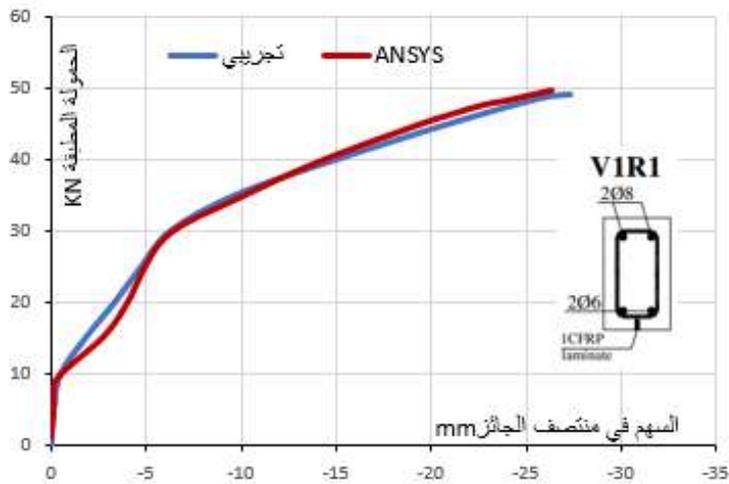
اسم الجائز	Pcr تجريبي	Psy تجريبي	Pu تجريبي	Pcr ansys	Psy ansys	Pu ansys	تجريبي Pcr	تجريبي Psy	تجريبي Pu
V1	8.500	24.500	28.200	8.562	23.179	27.766	0.993	1.057	1.016
V1R1	10.700	32.310	50.300	9.725	28.844	49.502	1.100	1.120	1.016
V3	7.900	40.000	41.300	7.538	38.953	42.253	1.048	1.027	0.977
V3R2	11.900	54.520	81.900	10.575	54.900	82.100	1.125	0.993	0.998
V4	9.100	46.900	48.500	9.125	46.844	49.344	0.997	1.001	0.983
V4R3	12.571	69.110	94.900	11.825	68.800	94.528	1.063	1.005	1.004

### 2-2 مقارنة قيم السهوم التجريبية والتحليلية وسط مجاز الجائز:

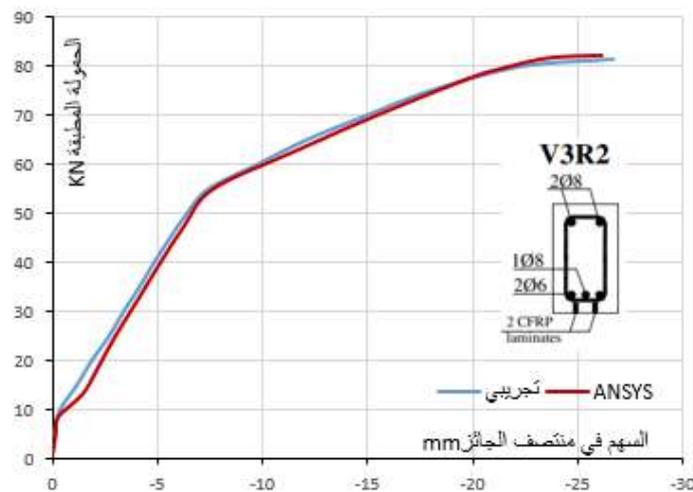
تبين الأشكال (11) (12) (13) (14) مقارنة بين المنحنيات التجريبية للسهم والمنحنيات المحددة باستخدام برنامج ANSYS، بما يخص السهم وسط مجاز للجائز المرجعي (V1) وللجوائز المقواة بشريحة واحدة (V1R1) والجوائز المقواة بشريحتين (V3R2) والجوائز المقواة بثلاث شرائح (V4R3)، وكانت المنحنيات متوافقة بشكل جيد ليحاكي سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المرجعية والمقواة بشرائح NSM.FRP.



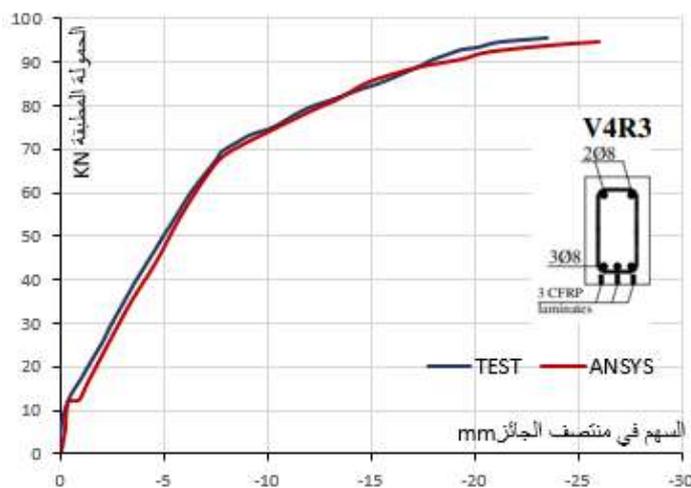
الشكل (11): مقارنة القيم التجريبية والقيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجائز المرجعي V1



الشكل (12): مقارنة القيم التجريبية والقيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجائز المقوى بشريحة واحدة VIR1



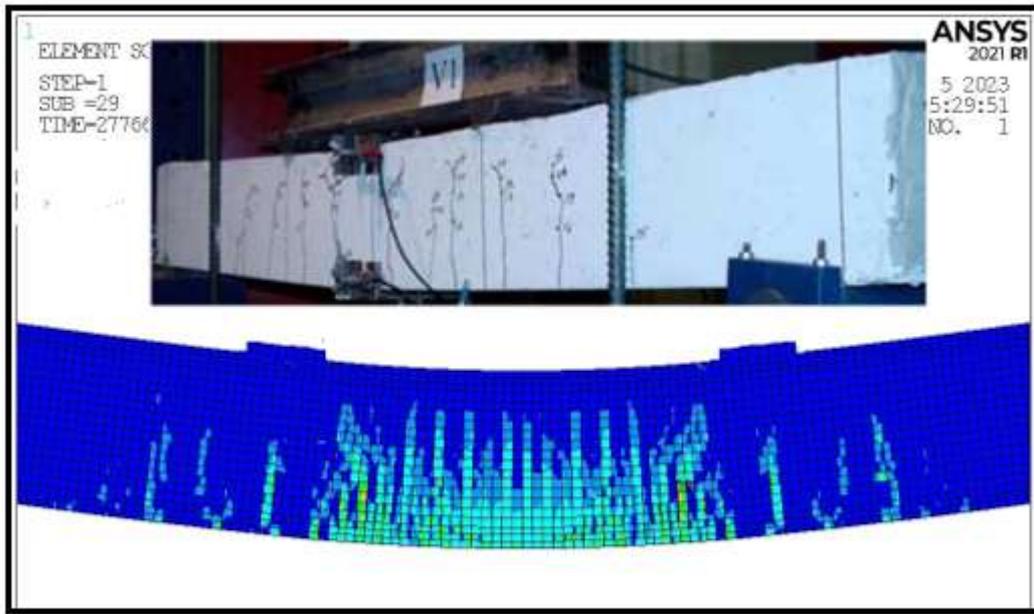
الشكل (13): مقارنة القيم التجريبية والقيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجائز المقوى بشريحتين V3R2



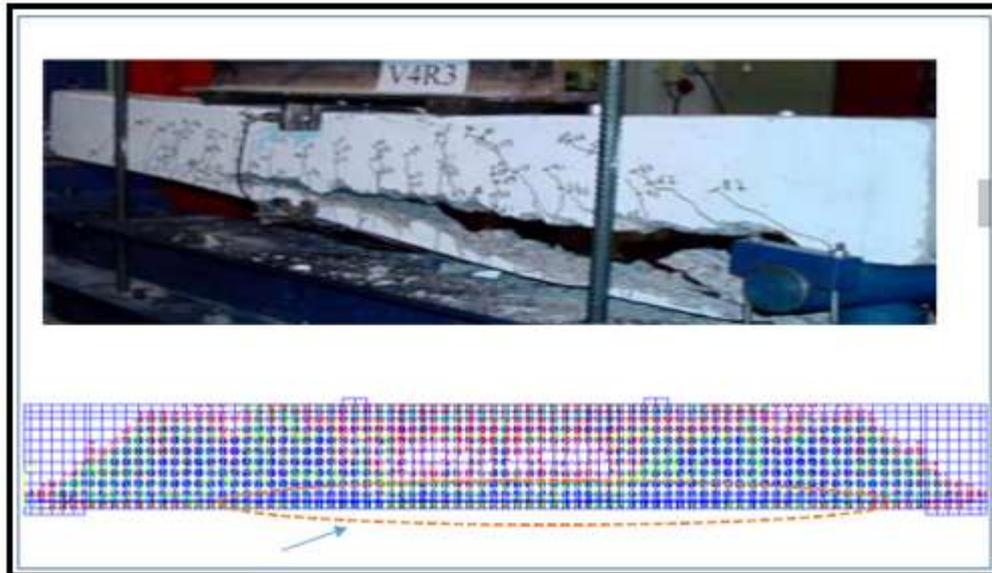
الشكل (14): مقارنة القيم التجريبية والقيم المحددة ببرنامج ANSYS للسهم وسط مجاز الجائز المقوى بثلاث شرائح V4R3

### 3-2 مقارنة أشكال التشققات:

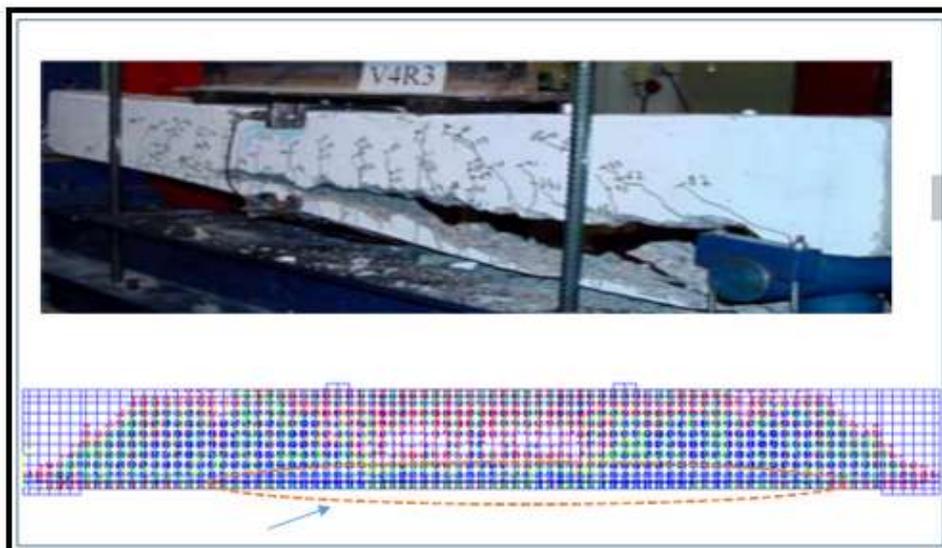
تبيين الأشكال (15)(16)(17)(18) مقارنة بين التشققات الحاصلة في الجوائز التجريبية ( V1, V1R1, V3R2, V4R3 ) على التوالي والتشققات المقابلة لها في برنامج ANSYS أو كونتورات التشوه نوع Von Mises المسببة لها. ونلاحظ من هذه الأشكال تشابهاً مقبولاً بين التشققات التجريبية وتشققات ANSYS من ناحية أماكن التشكل والانتشار والاتجاه والطول.



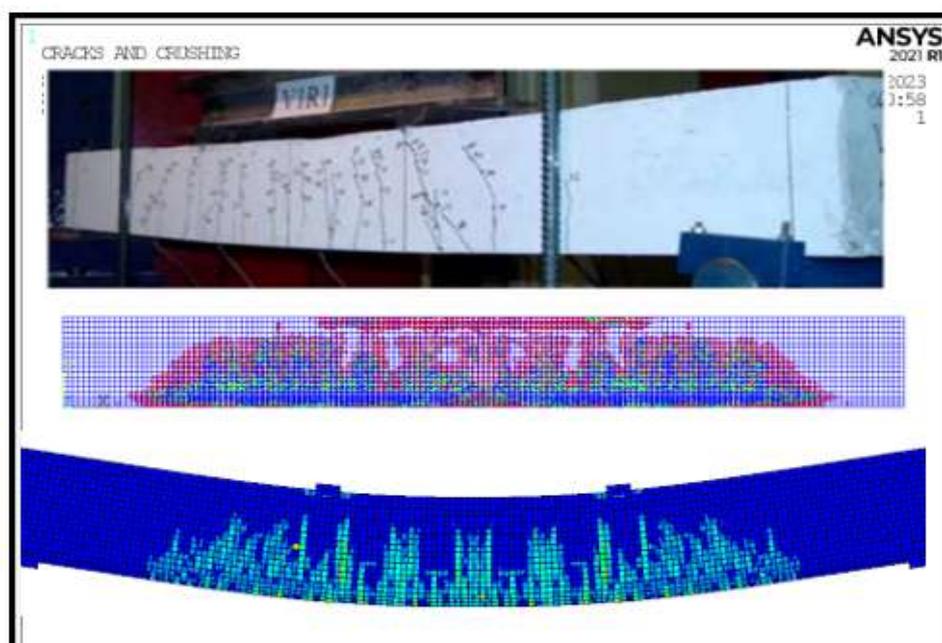
الشكل (15): مقارنة بين التشققات التجريبية للجائز V1 وكونتورات التشوه المقابلة للتشققات في برنامج ansys



الشكل(16): مقارنة بين التشققات التجريبية للجائز V3R2 والتشققات المقابلة لها في برنامج ansys



الشكل (17): مقارنة بين التشققات التجريبية للجائز V4R3 والتشققات المقابلة لها في برنامج ansys



الشكل (18): مقارنة بين التشققات التجريبية للجائز VIR1 والتشققات المقابلة لها في برنامج ansys وكذلك كونتورات التشوه

تجدر الإشارة إلى أنه بالرغم من محاولتنا لتمثيل سلوك الببتون بالإضافة إلى تمثيل سلوك حديد التسليح وسلوك الانفصال بين سطح الببتون والتقوية بدقة جيدة ولكن قد تختلف النتائج التحليلية وخاصة من ناحية التشققات باستخدام برنامج ANSYS عن النتائج التجريبية وذلك بسبب:

○ اختلاف آلية تشكل التشققات في برنامج ANSYS الذي يفترض أن الببتون مادة متجانسة التركيب عن الآلية الحقيقية لتشكل التشققات نتيجة اعتراض بعض الحصى لمسار الشقوق، وكذلك وجود احتكاك بين سطوح التشققات الحقيقية، أو توسع رأس الشق نتيجة اعتراضه لفجوة في الببتون، وكذلك تفرع الشق الأساسي إلى شقوق ثانوية.

افتراض تماسك تام بين قضبان التسليح والبيتون المحيط بها في برنامج ANSYS من خلال اتصال العقد مع بعضها في النموذج التحليلي، وهذا مخالف للواقع العملي حيث التماسك غير تام.

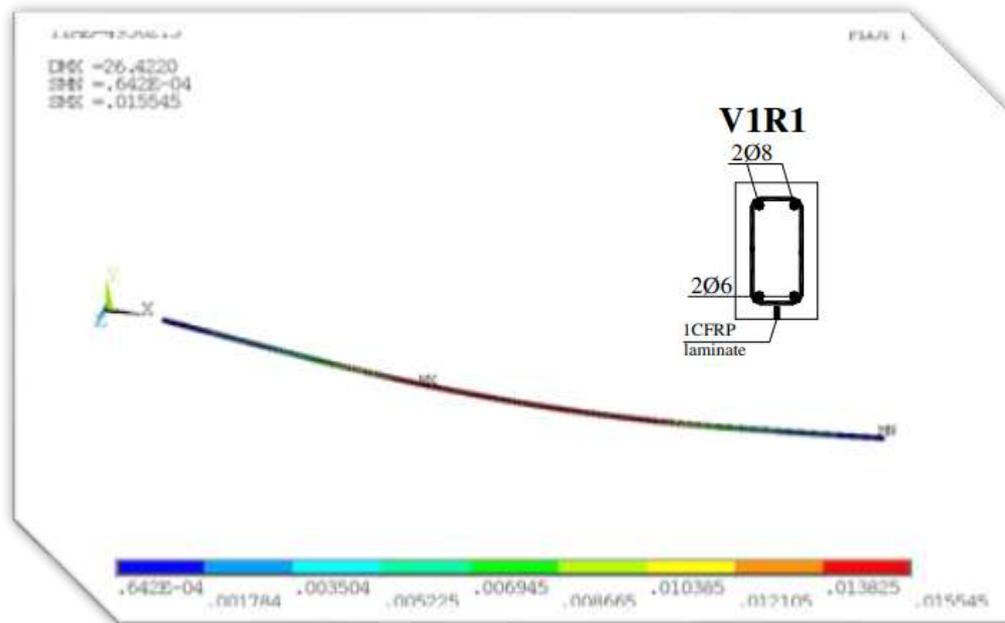
#### 2-4 مقارنة التشوه الأعظمي في شرائح التقوية CFRP:

يبين الجدول (3) مقارنة بين القيم التجريبية والقيم التحليلية من نموذج ANSYS بما يخص التشوه عند انهيار الجائز (التشوه الفعال) في شرائح التقوية للجوائز المقواة (V1R1,V3R2,V4R3) ونلاحظ التقارب الكبير في نتائج النموذج التحليلي مع النتائج التجريبية، وهذا يؤكد وثوقية البرنامج في محاكاة سلوك الجوائز التجريبية من ناحية قدرة التحمل والسهوم وأشكال التشققات وتوقع تشوه شرائح التقوية بدقة جيدة.

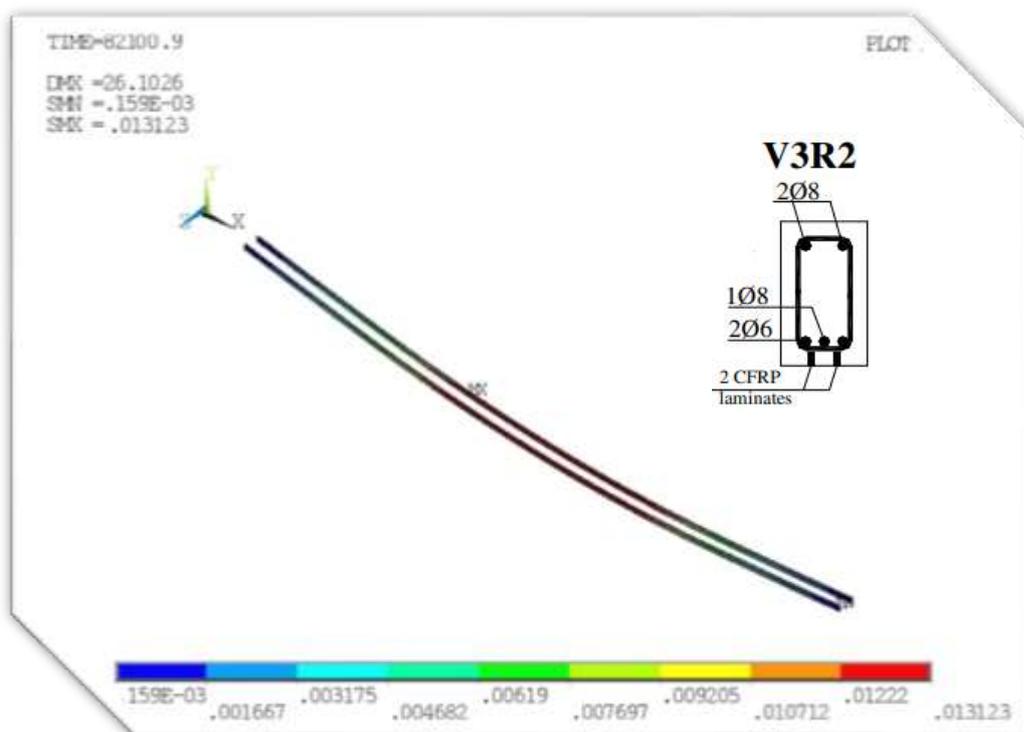
الجدول (3): مقارنة بين القيم التجريبية التشوه الفعال لشرائح التقوية والقيم التحليلية من نموذج ANSYS

اسم الجائز	$\epsilon_{f_e}(\%)$ تجريبي	$\epsilon_{f_e}(\%)$ ansys	تجريبي $\epsilon_{f_e}$
V1R1	15.50	15.545	0.9971
V3R2	12.80	13.123	0.9754
V4R3	10.60	10.598	1.0002

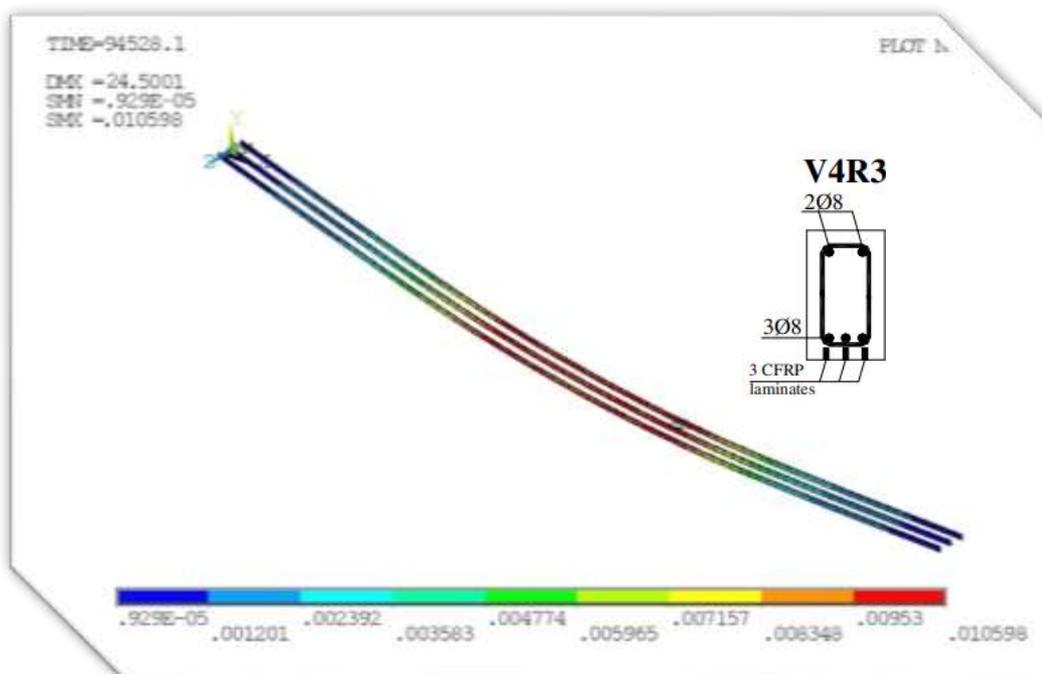
تظهر الأشكال (19)(20)(21) التشوهات الحاصلة في شريحة FRP عند انهيار الجوائز (V1R1,V3R2,V4R3) ضمن برنامج ANSYS.



الشكل (19): توزيع التشوه على طول شرائح التقوية للجائز V1R1 عند الانهيار



الشكل (20): توزيع التشوه على طول شرائح التقوية للجائز V3R2 عند الانتهاء



الشكل (21): توزيع التشوه على طول شرائح التقوية للجائز V4R3 عند الانتهاء

**الاستنتاجات والتوصيات:**

تم في هذا البحث تطوير نموذج ثلاثي الأبعاد لجوائز بيتونية مسلحة مقواة بشرائح من CFRP بطريقة اللصق ضمن أحادييد باستخدام برنامج ANSYS يحاكي آلية الانفصال التي تحدث في الطبقة الأضعف بين البيتون والايوكسي حيث قمنا بنمذجة السطح البيني بين البيتون والايوكسي باستخدام العنصر البيني الخطي INTER205 وهذا العنصر يمكننا من محاكاة تطور الاجهادات وذلك بالاعتماد على نمذجة CZM (cohesive zone modeling) المتوفرة في برنامج ANSYS، وتوصلنا بمقارنة نتائج النموذج التحليلي مع النتائج التجريبية إلى مايلي:

1- أعطت طريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج ANSYS نتائج مقارنة للنتائج التجريبية بما يخص قيمة التشوه الفعال لشرائح التقوية حيث وصلت نسبة التقارب إلى 99.7% للجوائز المقواة بشريحة واحدة، 97.5% للجوائز المقواة بشريحتين و 100% للجوائز المقواة بثلاث شرائح ، كما كان التقارب كبيراً من ناحية حمولة الانهيار وحمولة التشقق وحمولة السيلان حيث وصلت نسبة التقارب إلى إلى قيم تزيد عن 97% للجوائز المرجعية والجوائز المقواة.

2- كذلك كانت منحنيات الحمولة - انتقال متوافقة بشكل جيد مع المنحنيات التجريبية كما تم ملاحظة تشابهاً مقبولاً بين التشققات التجريبية والتشققات الحاصلة في نموذج ANSYS. وهذا يؤكد وثوقية برنامج التحليل في محاكاة سلوك الجوائز التجريبية من حيث قدرة التحمل والسهوم وأشكال التشققات وتحديد قيمة التشوه الفعال لشرائح التقوية.

3- يمكن اعتبار نموذج العناصر المحدودة بديلاً اقتصادياً وفعالاً للتجارب المخبرية ويمكن استخدامه بشكل موثوق في أي دراسة برامترية لاحقة لإيجاد نتائج عددية دقيقة بهدف تطوير معادلات تساهم في وضع الأسس التصميمية للجوائز البيتونية المسلحة المقواة بشرائح FRP بتقنية NSM كمعادلة التشوه الفعال لشرائح التقوية.

4- تركزت هذه الدراسة على شرائح CFRP بطريقة اللصق ضمن أحادييد NSM ولكننا نوصى باستخدام نفس الطريقة في النمذجة للجوائز البيتونية المسلحة المقواة بأشكال وأنواع مختلفة من مادة FRP كالقضبان الدائرية وغيرها.

**References:**

- [1] N. AL-Saadi, A. Mohammed, R. AL-Mahaidi, J. Sanjayan, *A state-of-the art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures*, Construction and Building Materials, 209 (2019), 748-769.
- [2] M. Askar, A. Hassan, Y. Al-Kamaki, *Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art*, Case Studies in Construction Materials 17 (2022)
- [3] L. De Lorenzis, J.G. Teng, *Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures*, Compos.PartBEng.38(2) (2007)119–143.
- [4] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* (ACI 440. 2R-17); American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, (2017).
- [5] M. Z. Naser , R Hawileh, J Abdalla, *Modeling Strategies of Finite Element Simulation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP: A Review*, Journal of Composites Science.(2021) <https://doi.org/10.3390/jcs5010019>
- [6] R. Kotynia, H. Baky, K.Neale, *Bond Behaviour of Near-Surface Mounted Strips in RC Beams—Experimental Investigation and Numerical Simulations*. Materials 14 (2021), <https://doi.org/10.3390/ma14164362>
- [7] X. Z. Lu, J. Teng, L. P Ye, J. Jiang, *Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete*. *Engineering structures*, 27(6) (2005), 920-937.

- [8] S.S. Zhang, J.G. Teng, *Interaction forces in RC beams strengthened with near-surface mounted rectangular bars and strips*, *Composites: Part B* 45 (2013) 697–709
- [9] H. Y. Omran, R. El-Hacha, *Nonlinear 3D finite element modeling of RC beams strengthened with prestressed NSM-CFRP strips*. *Construction and Building Materials*, 31(2012), 74-85.
- [10] Barros, Fortes. *Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits*. *Cement & Concrete Composite*, 27(4) (2005), 471–480.
- [11] ANSYS – release version 21. *A finite element computer software theory and user manual for nonlinear structural analysis*, Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS ,Inc.(2021)
- [12] BS-EN 1-1-1992. *Eurocode2 -Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* ·Brussels: CEN. (2004)
- [13] American Concrete Institute, ACI. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19)*. USA: Farmington Hills, Mich. ACI Committee 318.
- [14] Y. Pandey, *Nonlinear Finite Element Modeling of RC beams strengthened with Prestressed NSM FRP laminates*. Msc thesis, Civil Engineering University of Toledo, (2017)