

تأثير نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال (a/d) على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية مع إدخال خصائص التصدع

أ.د. بسام حويجة *

د.م. نعمان عيسى **

م. ميرنا صبحي ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٩ . قبل للنشر في ٢٠٢٦/٢/٢٣)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة التأثيرات الإنشائية لنسبة مجاز القص للارتفاع الفعال (a/d) على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية باستخدام النمذجة العددية عبر برنامج Abaqus. تم إعداد نماذج عددية ثلاثية الأبعاد والتحقق من صحتها بمقارنتها مع نتائج تجريبية منشورة، مما عزز من موثوقية النتائج العددية. وقد تم تحليل النتائج في حالتين: بإدخال خصائص التصدع والثانية بدونها، بهدف تقييم أثر هذه الخصائص على دقة التنبؤ بالسلوك الإنشائي.

أظهرت النتائج أن تقليل النسبة (a/d) من ٥ إلى ٢ أدى إلى زيادة ملحوظة في قدرة التحمل النهائية للجوائز، حيث بلغ أقصى تحسن عند إدخال خصائص التصدع حوالي 6.76% مقارنةً بالحالة التي لم تدرج فيها هذه الخصائص. كما تبين أن إدخال خصائص التصدع أسهم في رفع قيمة السهم عند الانهيار بنسبة وصلت إلى نحو 11.4%، رغم أن السهم النهائي انخفض بشكل عام مع تقليل النسبة (a/d)، مما يشير إلى زيادة الصلابة الكلية وانخفاض المطاوعة. وأيضاً أدى تخفيض النسبة (a/d) إلى زيادة الإجهادات القاصة القصوى (عند الانهيار)، حيث وصلت نسبة هذه الزيادة عند إدخال خصائص التصدع إلى 25.8%.

الكلمات المفتاحية: جوائز بيتونية مسلحة بألياف فولاذية، ميكانيك التصدع، اباكوس، النسبة (a/d)

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

** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية.

The Effect of Shear Span-to-Depth Ratio (a/d) on the Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Incorporating Fracture Properties

Prof. Bassam HWAIJA*
Dr. Neman ISSA**
Eng. Mirna SBHI***

(Received 9/12/2025 . Accepted 23/2/2026)

□ ABSTRACT □

This study aims to determine the structural effects of the shear span-to-depth ratio (a/d) on the behavior of SFRC beams using finite element software Abaqus. Three-dimensional models were developed and validated against published experimental results to ensure the reliability of the numerical analysis. The beams were analyzed under two conditions: with and without the incorporating of the fracture properties, in order to evaluate their effect on predicting the realistic structural response. The results showed that the reducing the shear span-to-depth ratio (a/d) from 5 to 2 led to noticeable increase in the ultimate load-carrying capacity, with maximum improvement of about 6.76% when fracture properties were included compared to the case without them. Moreover, the incorporating of fracture properties resulted in an increase of approximately 11.4% in the mid-span deflection at failure. However, the overall deflection tended to decrease with smaller (a/d) ratios, indicating an increase in overall stiffness and a reduction in ductility. Moreover, reducing the ratio (a/d) led to an increase in the maximum shear stresses (At failure), where this increase reached 25.8% when fracture properties were included in the analysis.

Key words: SFRC beams, fracture properties, Abaqus, the ratio (a/d)

*Professor, Department Of Structural Engineering, Latakia University, Latakia, Syria

**Associate Professor, Department Of Structural Engineering, Latakia University, Latakia, Syria

***Doctor Degree Student, Department Of Structural Engineering, Latakia University, Latakia

1 المقدمة (Introduction):

يعتبر البيتون المسلح إحدى أكثر المواد استخداماً في البنية التحتية الحديثة بفضل مقاومته العالية للضغط وتكلفته المعقولة، إلا أن أحد أهم التحديات التي تواجه البيتون هو ضعفه في مقاومة الشد وسلوكه الهش بعد التشقق مما يؤثر سلباً على الأداء الإنشائي للعناصر البيتونية تحت الأحمال المتغيرة [1].

بفضل تطور برمجيات التحليل العددي أصبح من الممكن استخدام نماذج متقدمة مثل نموذج التضرر اللدن للبيتون (Concrete Damage Plasticity) (CDP) في برنامج Abaqus لتمثيل سلوك البيتون المتشقق بشكل واقعي [2]. يمثل السلوك الإنشائي للعناصر البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية محور اهتمام متزايد في الأبحاث الهندسية الحديثة، نظراً لما تقدمه هذه المادة المركبة (بيتون + ألياف) من تحسينات في مقاومة الانعطاف والقص بعد التشقق، وتعد نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال (a/d) (وهي عبارة عن طول المسافة بين نقطة تطبيق القوة والمسند المجاور مقسوماً على الارتفاع الفعال للمقطع العرضي) واحداً من أبرز المتغيرات المؤثرة في هذا السلوك، إذ تتحكم في توزيع الإجهادات الداخلية ونمط الانهيار، سواء أكان انعطافياً أم قصياً، مما يجعلها عاملاً حاسماً في فهم الأداء الحقيقي للعناصر البيتونية المزودة بألياف [3] و [4]. حيث يحدث الانهيار من أجل نسب (a/d) تصل حتى 2.5 نتيجة الفعل القوسي (انعطافي - قصي) بينما من أجل (a/d) أكبر من 2.5 يكون الفعل الجائزي هو المسيطر (انعطافي) [5] و [6].

سوف يتناول البحث دراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية عند تغير النسبة (a/d) أخذاً في الحسبان خصائص التصدع فيها، وذلك عبر محاكاة عددية باستخدام برنامج Abaqus بعد التحقق من صحة النموذج العددي من خلال مقارنته مع عدد من الدراسات والأبحاث التجريبية المنشورة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في إبراز دور ميكانيك التصدع كأحد المفاهيم الأساسية لفهم السلوك الحقيقي للبيتون المسلح، لا سيما في العناصر البيتونية المزودة بألياف فولاذية. إذ يعد إدخال مفهوم ميكانيك التصدع في النمذجة العددية خطوة محورية للحصول على نتائج أكثر دقة عند دراسة قدرة التحمل والتشوهات وسلوك الجوائز بشكل عام. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال (a/d) وأيضاً تأثير خصائص التصدع على السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية، وذلك من خلال مقارنة سلوك الجوائز في حالتها إدخال ميكانيك التصدع وإهماله. ويسعى هذا العمل إلى توضيح أهمية هذا النهج في التنبؤ الدقيق بالاستجابة الإنشائية.

3- طرائق البحث ومواده:

اعتمد هذا البحث على النمذجة العددية باستخدام برنامج Abaqus لمحاكاة السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية. جرى إعداد النماذج العددية وتمت معايرتها مع العديد من الدراسات التجريبية المنشورة عالمياً للتحقق من دقتها. شملت الدراسة تحليل الجوائز في حالتين: الأولى بإدخال خصائص التصدع ضمن النموذج العددي والثانية من دونها، وذلك بغية تقييم تأثير هذه الخصائص على التنبؤ بالسلوك الحقيقي للجوائز المدروسة. تم تغيير النسبة (a/d) لما لها من تأثير كبير على سلوك الجوائز المدروسة، حيث أجري التحليل العددي باستخدام عناصر ثلاثية الأبعاد، مع تعريف الخواص الميكانيكية للمواد وفق القيم المستخلصة من الأدبيات المنشورة. هذا النهج سمح بمقارنة منهجية دقيقة لآثار إدخال خصائص التصدع على قدرة التحمل والتشوهات النهائية للجوائز المدروسة.

4- الدراسة العددية (Numerical Study):

4-1- إعداد النموذج العددي:

تم إعداد النماذج العددية للجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية باستخدام برنامج العناصر المنتهية Abaqus اعتماداً على نموذج التضرس اللدن (CDP)، وهو من النماذج المعتمدة لتمثيل السلوك اللاخطي للبيتون تحت الأحمال المختلفة. يتميز هذا النموذج بقدرته على تمثيل التشقق بالشد والتضرر الناتج عن الضغط والقص [7] و [2]. تمت نمذجة البيتون باستخدام عناصر صلبة ثلاثية الأبعاد من نوع C3D8R، بينما تم تمثيل فولاذ التسليح بعناصر خطية أحادية البعد من نوع T3D2، مدمجة ضمن البيتون باستخدام طريقة Embedded Region. أما الألياف الفولاذية فقد تم أخذ دورها بالحساب من خلال اعتماد قانون سلوكية البيتون اللينيفي على الشد وذلك لتبسيط النمذجة.

تفترض العديد من الأبحاث العالمية أن البيتون الحاوي على ألياف هو مادة متجانسة وذلك لتبسيط النموذج العددي وتقليل الوقت اللازم لإعداده وتحليله، ويعتبر تقريب مقبول حيث أن للبيتون الحاوي على ألياف سلوك مشابه لسلوك البيتون العادي على الضغط إلى حد كبير وفق [1]، [8] و [9] أما تأثير الألياف فيدخل في سلوك البيتون على الشد في المرحلة التي يبدأ فيها بالتشقق أي بعد الوصول إلى مقاومته على الشد. تم في هذه الدراسة تحديد سلوك البيتون الحاوي على ألياف على الضغط من خلال العلاقة (1) بحسب المرجع [10] ، وعلى الشد بإدخال خصائص التصدع وتأثير الألياف من خلال العلاقتين (2) و (3) بحسب المرجع [9] كما هو موضح بالشكل (1).

$$\sigma_c = f_{cm} \left[\frac{K \eta - \eta^2}{1 + (K-2)\eta} \right] \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad ، \quad K = 1.05 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}}$$

f_{cm} : الإجهاد الأعظمي يحدد وفق الجدول (1).

ϵ_{c1} : التشوه الموافق للإجهاد الأعظمي يحدد وفق الجدول (1).

$$f_t = 0.56 \sqrt{f'_c} \quad [MPa] \quad (2)$$

$$f_{res} = 0.3 V_f \cdot \alpha \cdot \frac{L_f}{d_f} \cdot \sqrt{f'_c} \quad [MPa] \quad (3)$$

f_t : إجهاد الشد في البيتون ، $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.0001$

f'_c : المقاومة المميزة للبيتون.

f_{res} : الإجهادات المتبقية.

V_f : النسبة الحجمية للألياف في الخلطة.

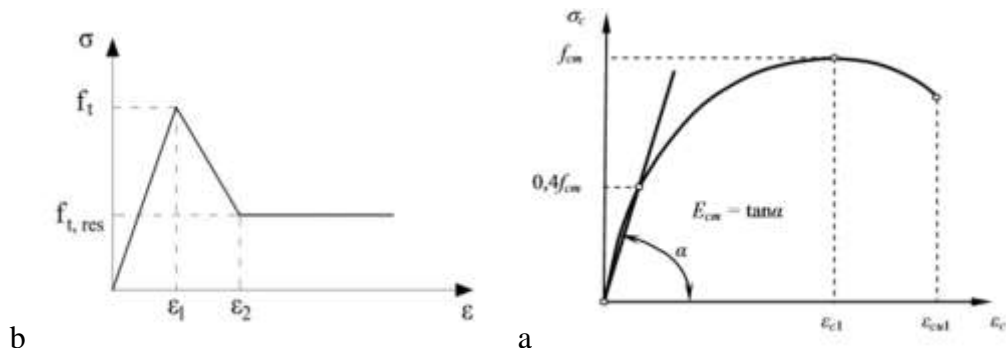
α : عامل يأخذ بعين الاعتبار شكل الألياف ويأخذ القيمة: 1 للألياف المستقيمة.

1.5 للألياف غير المنتظمة.

2 للألياف معكوفة النهايات.

L_f, d_f : قطر وطول الليف

الشكل (1): علاقة إجهاد تشوه للبيتون

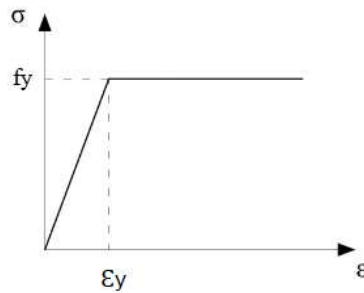


(a) بالضغط [10] (b) بالشد مع أخذ خصائص التصدع والألياف بعين الاعتبار [9]

الجدول (1): المقاومة والتشوه الموافق للبيتون وفق الكود الأوروبي Euro Code2 [10]

| Strength classes for concrete | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|------|-----|-----|
| f_{ck} (MPa) | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| $f_{ck,cube}$ (MPa) | 15 | 20 | 25 | 30 | 37 | 45 | 50 | 55 | 60 | 67 | 75 | 85 | 95 | 105 |
| f_{cm} (MPa) | 20 | 24 | 28 | 33 | 38 | 43 | 48 | 53 | 58 | 63 | 68 | 78 | 88 | 98 |
| f_{clm} (MPa) | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 5,0 |
| $f_{ctk,0.05}$ (MPa) | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,5 |
| $f_{ctk,0.95}$ (MPa) | 2,0 | 2,5 | 2,9 | 3,3 | 3,8 | 4,2 | 4,6 | 4,9 | 5,3 | 5,5 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,6 |
| E_{cm} (GPa) | 27 | 29 | 30 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 41 | 42 | 44 |
| ϵ_{c1} (‰) | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,25 | 2,3 | 2,4 | 2,45 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 |
| ϵ_{cu1} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| ϵ_{c2} (‰) | 2,0 | | | | | | | | | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 |
| ϵ_{cu2} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,1 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,6 |
| n | 2,0 | | | | | | | | | 1,75 | 1,6 | 1,45 | 1,4 | 1,4 |
| ϵ_{c3} (‰) | 1,75 | | | | | | | | | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,2 | 2,3 |
| ϵ_{cu3} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,1 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,6 |

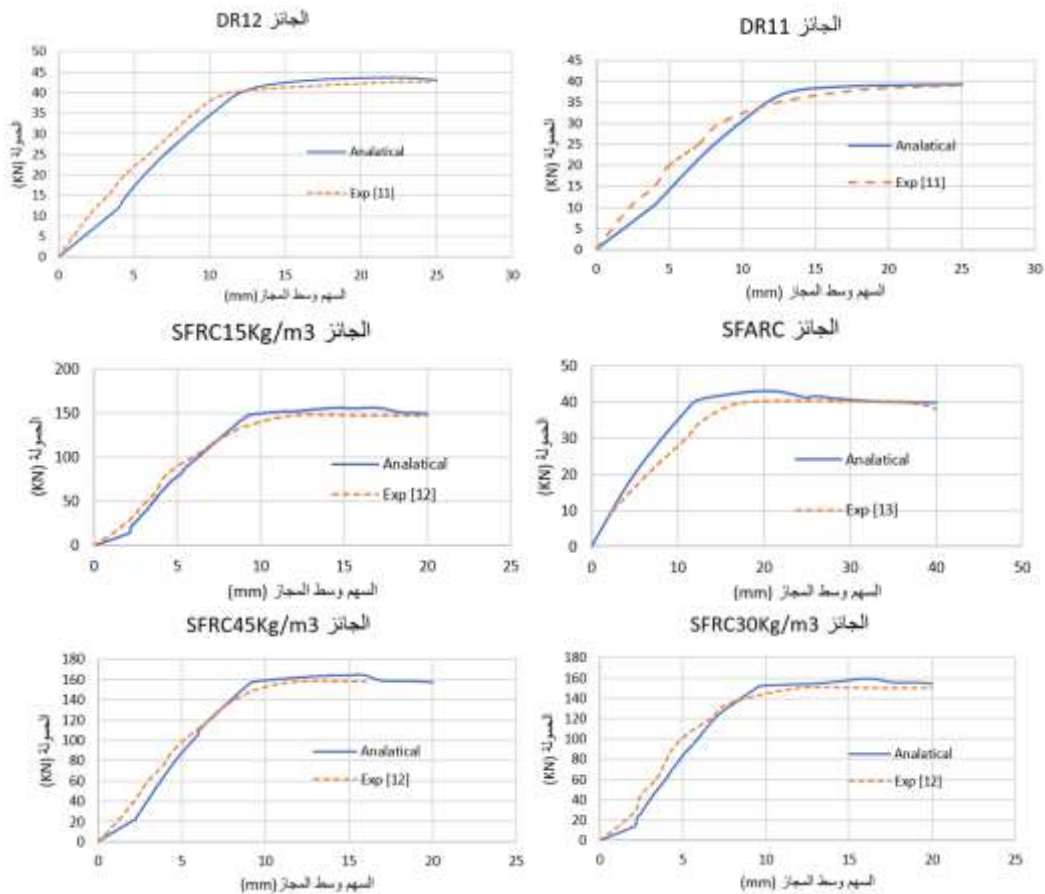
أما فولاذ التسليح فقد تم تمثيله كمادة متجانسة ثنائية الخطية، كما هو مبين بالشكل (2).



الشكل (2): علاقة إجهاد - تشوه لفلود التسليح [9]

4-2- معايرة النموذج العددي:

لضمان صحة النمذجة تم التحقق من صحة النموذج العددي عبر مقارنته مع نتائج عدد من الدراسات التجريبية المنشورة التي تناولت سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية وهي الجائزين DR11 وDR12 في المرجع [11] والجوائز الثلاثة SFRC15 و SFRC30 و SFRC45 في المرجع [12] والجائز SFRC في المرجع [13]، الموضحة في الجدول (2). حيث أظهرت هذه المقارنة تطابقاً مقبولاً مما يعزز من موثوقية النموذج العددي، كما هو مبين بالشكل (3) الذي يمثل مقارنة منحنى حمولة - سهم وسط المجاز للنموذج العددي المحضر في هذه الدراسة والنتائج التجريبية.



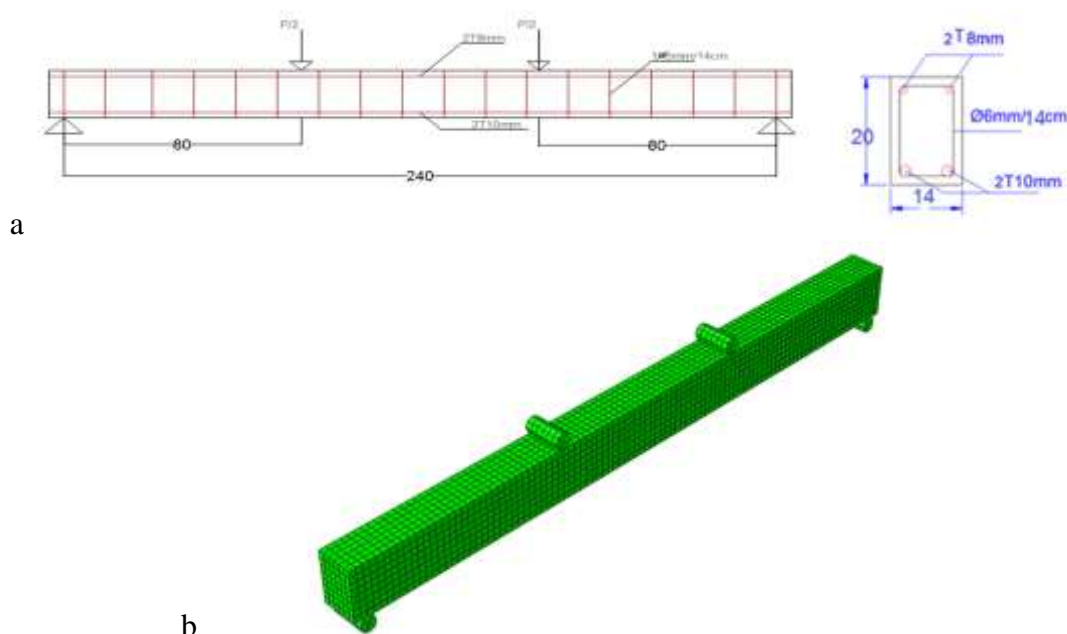
الشكل (3): معايرة النموذج العددي من خلال مقارنة السلوك التحليلي في Abaqus مع السلوك التجريبي لعدد من الجوائز المدروسة في الأبحاث العالمية المنشورة

الجدول (2): أبعاد وخواص المواد للجوائز المستخدمة في هذه الدراسة

| المرجع | أبعاد الجائز (mm) | اسم الجائز | A_s (mm^2) | f_y (MPa) | f'_c (MPa) | V_f % |
|--------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|--------------|---------|
| [13] | 120 x 170 x 2100 | SFARC | 226 | 460 | 30.56 | 1 |
| [12] | 125 x 250 x 1800 | SFRC15Kg/ m^3 | 402 | 500 | 43 | 0.19 |
| [12] | 125 x 250 x 1800 | SFRC30Kg/ m^3 | 402 | 500 | 43 | 0.38 |
| [12] | 125 x 250 x 1800 | SFRC45Kg/ m^3 | 402 | 500 | 43 | 0.58 |
| [11] | 130 x 203 x 2250 | DR11 | 226 | 460 | 31.55 | 0.5 |
| [11] | 130 x 203 x 2250 | DR12 | 226 | 460 | 32 | 1 |

4-3- دراسة تأثير النسبة (a/d):

تم إعداد النموذج العددي في برنامج Abaqus لجائز بيتوني مسلح مزود بألياف فولاذية ذو استناد بسيط محمل بحمولتين مركبتين، أبعاد مقطعه العرضي 14 x 20 cm مجازه 240cm مسلح بتسليح طولي 2T10 وتسليح تعليق 2T8 حد الخضوع لفولاذ التسليح 400MPa ومسلح بتسليح عرضي Ø6/14cm حد خضوعه 240MPa بسماكة تغطية 2.5cm، كما هو مبين بالشكل (4).

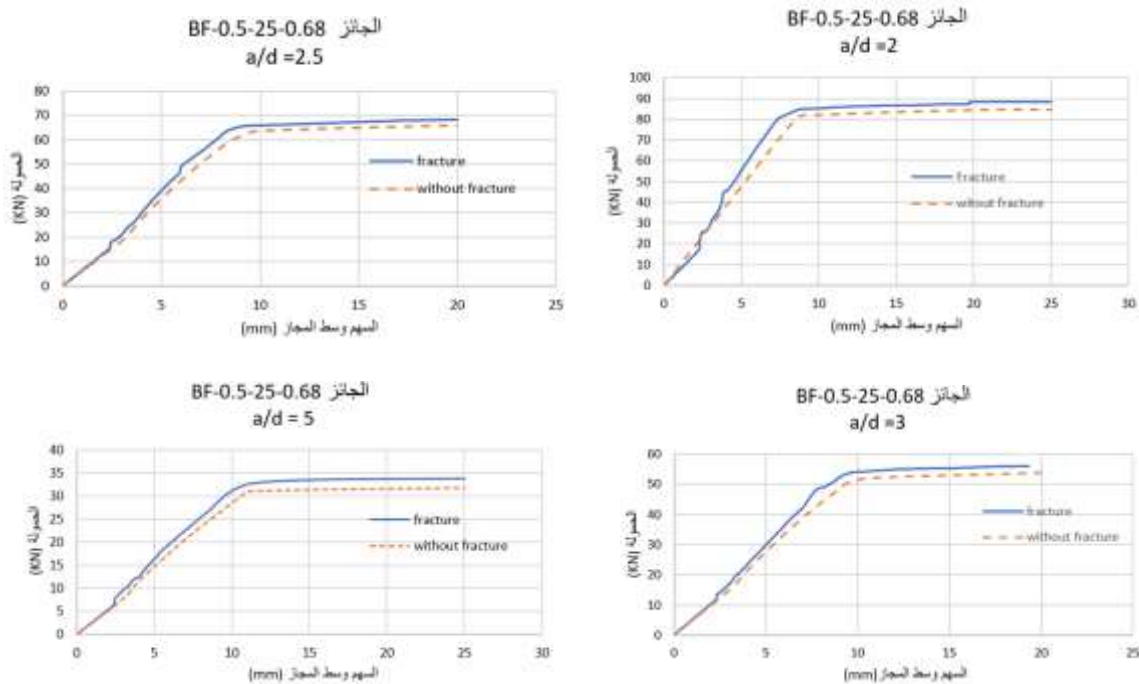


الشكل (4): الجائز البيتوني المدروس

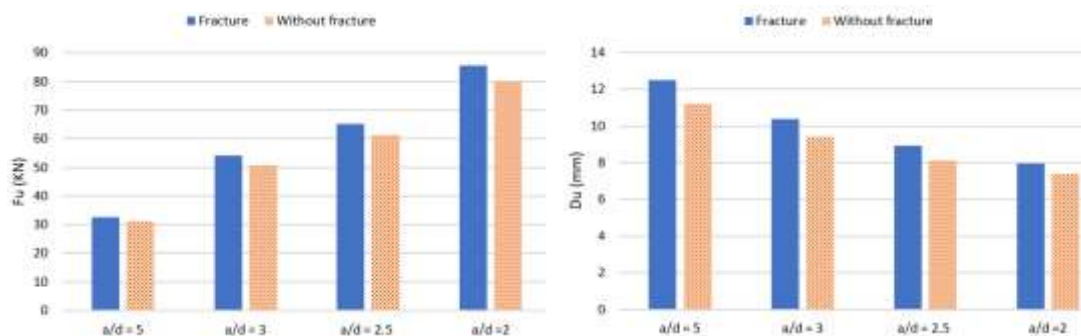
(a) أبعاد الجائز المدروس وتسلحه ونمط تحميله (b) النموذج العددي في Abaqus في هذه الدراسة اعتمدت المقاومة المميزة للبيتون $f'_c = 25\text{MPa}$ ومقاومته على الشد $f_t = 2.6\text{MPa}$ وفق الكود الأوروبي الجدول (1) المذكور سابقاً، أما الألياف الفولاذية المعتمدة كانت بطول 60mm وبقطر 1mm وبالتالي يكون لها عامل الشكل $\frac{L_f}{d_f} = 60$ كانت النسبة الحجمية لهذه الألياف $V_f = 0.5\%$. تم تسمية الجائز كالتالي BF-X-Y- (حيث X النسبة الحجمية للألياف %، Y المقاومة المميزة للبيتون (MPa)، Z نسبة التسليح الطولي المستخدم %). في كل مرحلة ضمن هذه الدراسة تم تحليل الجائز مرتين مرة بإدخال خصائص التصدع ومرة بدون إدخال خصائص التصدع وذلك عند تغيير النسبة (a/d) التي تؤثر بشكل كبير على سلوك هذه الجوائز .

5- النتائج والمناقشة (Results and discussion):

تم إعداد النموذج العددي للجائز المدروس في برنامج Abaqus مع تغيير النسبة (a/d) وفق النسب (2, 2.5, 3, 5). حيث أجري التحليل بإدخال خصائص التصدع بعد ذلك تم إعادة التحليل دون أخذ خصائص التصدع بعين الاعتبار، وتمت مقارنة النتائج من خلال منحنى حمولة - السهم وسط المجاز، كما هو مبين بالشكلين (5) و (6).

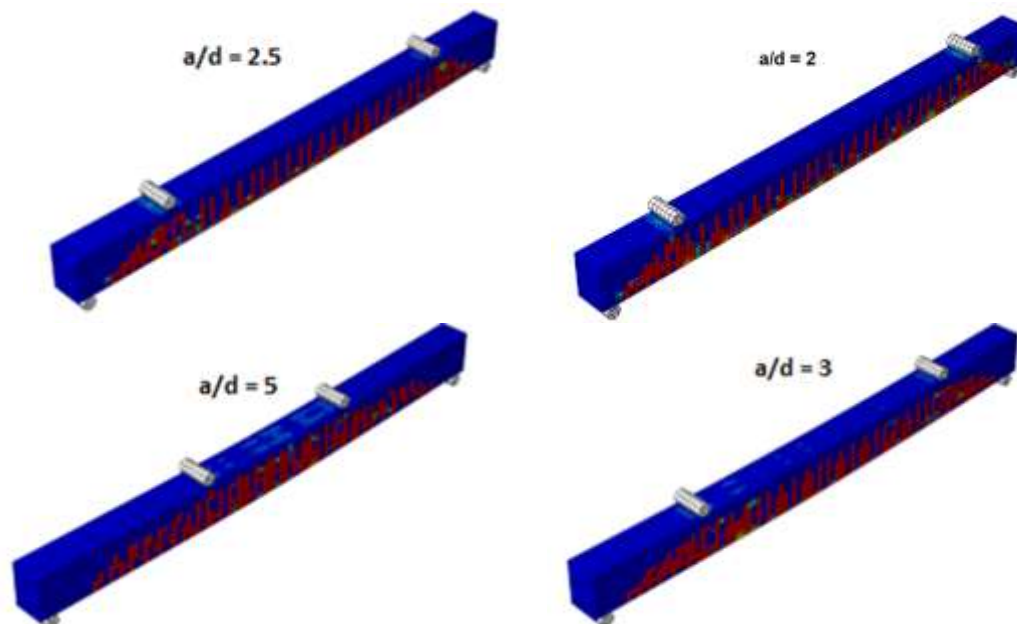


الشكل (5): مقارنة منحنى حمولة - السهم وسط المجاز عند تغيير النسبة a/d

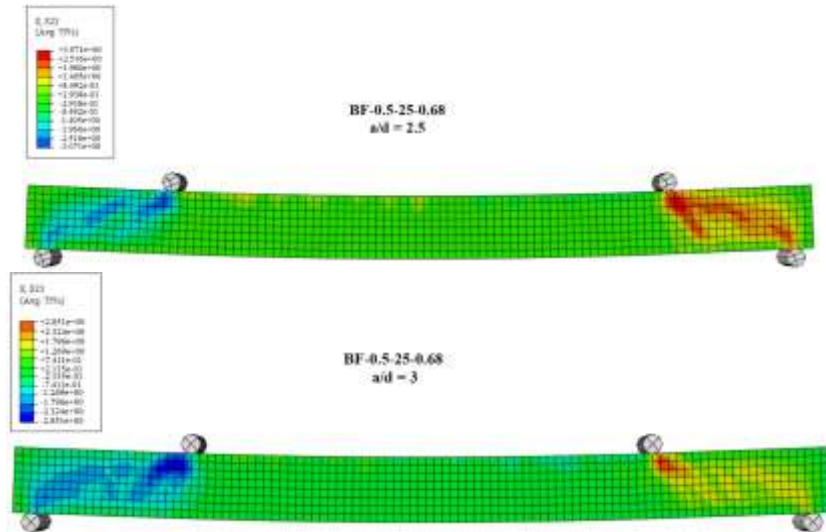


الشكل (6): مقارنة حمولة الانهيار والسهم الموافق مع وبدون إدخال خصائص التصدع عند تغير النسبة (a/d). أظهرت النتائج أن إدخال خصائص التصدع في النمذجة أدى إلى زيادة ملحوظة في الحمولة النهائية لجميع النماذج وصلت هذه الزيادة إلى 6.76%، حيث كانت هذه الزيادة أكثر وضوحاً مع انخفاض النسبة (a/d)، مما يشير إلى أن تمثيل سلوك التصدع يعزز القدرة التحميلية خصوصاً عندما يكون الفعل القوسي (القصي) هو المسيطر. كما لوحظ أن إدخال خصائص التصدع أسهم أيضاً في زيادة قيمة السهم النهائي بنسبة وصلت إلى 11.4% مقارنةً بالنماذج التي لم تؤخذ فيها هذه الخصائص، إلا أن السهم النهائي بقي في اتجاه تناقصي مع انخفاض النسبة (a/d)، وهو ما يعكس تزايد السلوك الهش ونقص المطاوعة للجوائز عند تقليل هذه النسبة. هذا السلوك يعكس التفاعل المعقد بين انتقال القوى الناتجة عن القص وتأثير خصائص التصدع على كل من المقاومة والتشوهات في الجوائز المدروسة. يظهر ذلك من خلال الشكل (7) الذي يبين تحول نمط التشوه من التشوه التدريجي المرتبط بالانعطاف إلى تشوهات أكثر حدة وسرعة مرتبطة بالقص من خلال مقارنة نمط التشققات للجوائز المدروس عند تغير النسبة (a/d).

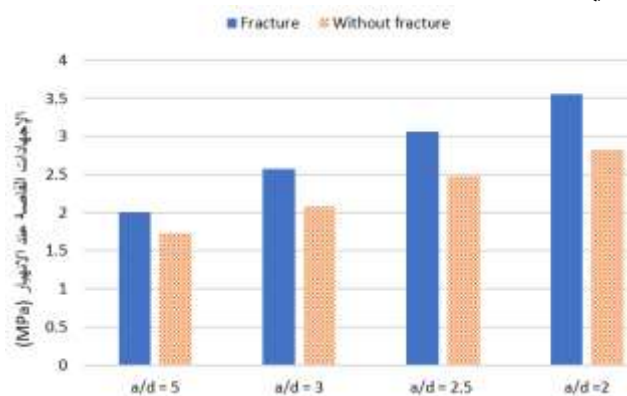
الشكل (7): مقارنة نمط التشققات عند تغير النسبة (a/d) للجوائز المدروس



أيضاً تمت مقارنة الإجهادات القاصة المتشكلة في هذه الجوائز عند الانهيار وذلك عند تغير النسبة (a/d) في حالتها إدخال خصائص التصدع وبدونها، حيث تظهر هذه الإجهادات بشكل واضح في الشكل (8).



الشكل (8): الإجهادات القاصة المتشكلة في الجوائز المدروسة عند الانهيار في حالتها $a/d=2.5$ و $a/d=3$ في Abaqus أظهرت نتائج التحليل العددي باستخدام برنامج Abaqus أن نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال تمتلك تأثيراً جوهرياً على السلوك الإنشائي وإجهادات القص في الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية. إذ تبين أن انخفاض النسبة (a/d) يؤدي إلى زيادة واضحة في إجهادات القص القسوى نتيجة تقارب منطقة تأثير الحمولة من المساند وازدياد مساهمة مقاومة القص في تحمل الجوائز. كما لوحظ أن إدخال خصائص التصدع ضمن النموذج العددي أدى إلى ارتفاع ملحوظ في قيم إجهاد القص وصلت هذه الزيادة إلى نسبة 25.8% مقارنةً بالنماذج التي لم تتضمن هذه الخصائص، مما يعكس الدور الفعال لنموذج خصائص التصدع في إظهار آليات نقل القص الحقيقية عبر الشقوق والألياف الفولاذية، كما يظهر في الشكل (9).



الشكل (9): مقارنة الإجهادات القاصة عند الانهيار مع وبدون إدخال خصائص التصدع عند تغير النسبة (a/d)

6- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت الدراسة العددية التي أجريت باستخدام برنامج Abaqus على مجموعة من الجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية عند تغير نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال:

- أن لنسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال (a/d) تأثيراً واضحاً ومباشراً على السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة المزودة بألياف فولاذية. فقد تبين أن تقليل نسبة مجاز القص إلى الارتفاع الفعال يؤدي إلى زيادة ملموسة في قدرة التحمل النهائية للجوائز، حيث ازدادت الحمولة القصوى مع انخفاض النسبة (a/d)، وهو ما يعزى إلى ارتفاع كفاءة نقل الإجهادات بين البيتون والألياف في مناطق إجهادات القص، مما يعزز الترابط الداخلي ويؤخر تطور التشقق.
 - انخفاض السهم عند الانهيار مع تناقص النسبة (a/d)، مما يشير إلى سلوك أكثر صلابة وأقل مطاوعة للجوائز ذات النسب (a/d) الصغيرة، حيث تصبح ذات مقاومة أعلى ولكن أقل قدرة على التشوه قبل الانهيار.
 - إن إدخال خصائص التصدع في النمذجة العددية له تأثير إيجابي على دقة الاستجابة الإنشائية، إذ أدى إلى زيادة في قدرة التحمل بنسبة تقارب 6.76% وزيادة في السهم عند الانهيار بنسبة تصل إلى 11.4%، وأيضاً زيادة بالإجهادات القاصة القصوى بنسبة وصلت إلى 25.8% مقارنةً بالتحليل التقليدي الذي لا يأخذ هذه الخصائص في الحسبان.
 - وتؤكد هذه النتائج أهمية تمثيل خصائص التصدع ضمن النمذجة العددية للحصول على استجابة أقرب إلى الواقع.
- ينصح بنهاية هذه الدراسة باعتماد نمذجة عددية تتضمن خصائص التصدع بشكل صريح عند دراسة العناصر الإنشائية، لضمان دقة تنبؤ سلوكها تحت الأحمال. ويقترح في الأبحاث المستقبلية توسيع نطاق الدراسة ليشمل أنواع مختلفة من الألياف.

References:

- [1] NEVILLE A. *Properties of concrete 5th ed.* Harlow: Pearson Education Limited. 2011. RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ϵ design method. Mater Struct. 2000.
- [2] Dassault Systemes. *ABAQUS Analysis User's Manual.* Providence (RI): Dassault Systemes Simulia Crop. 2022.
- [3] SANAL I. Effect of shear span-to-depth ratio on mechanical performance and cracking behavior of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams without conventional reinforcement. Mech Adv Mater Struct. 2018.
- [4] AROWOJOLU O, IBRAHIM A, ALMAKRAB A, et al. Influence of shear span-to-effective depth ratio on behavior of high-strength reinforced concrete beams. Int J Concr Struct Mater. 2021.
- [5] AL-FADEL A, MANSOUR N, ABOUD A. Influence of shear span to depth ratio on shear strength of high strength concrete beams without shear reinforcement. Journal of Lattakia University (in Arabic). 2017.

- [6] DIRAR S, SOGUT K, CARO M, RAHMAN R, THEOFANOUS M, FARAMARZI A. Effect of shear span-to-effective depth ratio and FRP material type on the behavior of RC T-beams strengthened in shear with embedded FRP bars. *Engineering Structures*. 2025.
- [7] FENVES GL, LEE J. *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. *J Eng Mech*. 1998.
- [8] ABBAS Y, AL-KAMAKI Y, AL-MAHAIDI R. *Numerical investigation of the flexural behavior of fiber reinforced concrete beams*. *Comput Concr* 2016.
- [9] BLAGOJEVIC A, MARKOVIC I, WALRAVEN JC. Modelling fiber reinforced concrete with the concrete damaged plasticity model. *Struct Concr*. 2021.
- [10] CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for building. EN 1992-1-1. *Brussels: European Committee for Standardization*. 2005.
- [11] SWAMY RN, AL-TA'AN SA. *Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams with steel fibres*. *Struct Eng*. 1981.
- [12] TRINDADE AC. *Behavior of steel fibre reinforced concrete beams: experimental and numerical study [PhD thesis]*. *Porto: University of Porto*. 2018.
- [13] BEHBAHANI HP, FARASATPOUR A, KESHAVARZ A. *Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams*. *Int J Civ Eng*. 2012.