

دراسة عددية لتحديد تأثير خصائص التصدع على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية عند تغير عدة بارامترات

أ.د. بسام حويجة *

د.م. نعمان عيسى**

م. ميرنا صبحي***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/٦ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/١١/٩)

□ ملخص □

تعد خصائص التصدع من العوامل الأساسية التي تتحكم في السلوك غير الخطي للعناصر البيتونية حيث تؤثر بشكل مباشر على قدرة التحمل والمطاوعة واستجابة العنصر الإنشائي عند الأحمال المختلفة. إن تمثيل هذه الخصائص بدقة في النماذج العددية يعتبر مفتاحاً للحصول على نتائج واقعية تعكس السلوك الحقيقي للعنصر المدروس.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد تأثير خواص التصدع على السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية من خلال المحاكاة العددية باستخدام برنامج العناصر المنتهية Abaqus، حيث تم التحقق من صحة النموذج العددي من خلال معايرته مع نتائج العديد من الأبحاث والدراسات التجريبية المنشورة مما وفر قاعدة موثوقة للتحليل.

تمت دراسة تأثير خصائص التصدع عند تغير كل من النسبة الحجمية للألياف الفولاذية والمقاومة المميزة للبيتون ونسبة التسليح الطولي. أظهرت النتائج أن إدخال تأثير خصائص التصدع عند تغير النسبة الحجمية للألياف لم يظهر استجابة خطية مباشرة في سلوك الجوائز المدروسة، إذ لم يكن التحسن في الأداء متناسباً بصورة طردية مع زيادة محتواها، مما جعل تأثيرها أقل وضوحاً مقارنةً ببقية العوامل. بالمقابل كان للمقاومة المميزة للبيتون التأثير الأبرز حيث زادت قدرة تحمل الجوائز بنسبة وصلت إلى 8.6% بينما ازداد السهم عند الانهيار بنسبة 18.9% عند ادخال خصائص التصدع. أما خصائص التصدع عند زيادة نسبة التسليح الطولي ساهمت في تحسين الأداء بنسبة 7.7% من حيث قدرة التحمل و11.9% من حيث السهم عند الانهيار. تبرز هذه النتائج الدور الحيوي لتمثيل خصائص التصدع بدقة في النمذجة العددية للوصول إلى سلوك إنشائي واقعي.

الكلمات المفتاحية: جوائز بيتونية مسلحة بألياف فولاذية، ميكانيك التصدع، نماذج عددية في Abaqus

* 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.

A Numerical Study to Determine the Effect of Fracture Properties on the Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Under Varying Parameters

Prof. Bassam HWAJJA*

Dr. Neman ISSA**

Eng. Mirna SBHI***

(Received 6/10/2025 . Accepted 9/11/2025)

□ ABSTRACT □

Fracture properties are considered as one of the main factors that control the nonlinear behavior of concrete elements, as they directly affect the bearing capacity, ductility, and response of the structural element under different loads. Accurate representation of these properties in numerical models is essential for obtaining realistic results that reflect the actual behavior of the studied element. This study aims to determine the effect of fracture properties on the structural behavior of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams through numerical simulation using the finite element program Abaqus. The numerical model was validated by calibrating it with the results of several published experimental research and studies, providing a reliable basis for analysis. The effect of fracture properties was studied with changes in volumetric ratio of steel fibers, the characteristic compressive strength of concrete, and the longitudinal reinforcement ratio. The results showed that introducing the effect of fracture properties with changes in the volumetric ratio of fibers did not show a direct linear response in the behavior of the studied beams, as the improvement in performance was not directly proportional to its increase, making its effect less clear compared to the rest of the factors. In contrast, the characteristic concrete strength had the most prominent effect, as the bearing capacity of the beams increased by up to 8.6%, while the deflection at failure increased by 18.9% when fracture properties were introduced. As for the fracture properties with an increase in the longitudinal reinforcement ratio, it contributed to improving the performance by 7.7% in terms of bearing capacity and 11.9% in terms of deflection at failure. These results highlight the vital role of accurately representing fracture properties in numerical modeling to achieve realistic structural behavior.

Key words: SFRC beams, fracture properties, Numerical model in Abaqus

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

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

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

1- المقدمة (Introduction):

يعتبر البيتون المسلح إحدى أكثر المواد استخداماً في المنشآت الحديثة بفضل مقاومته العالية للضغط وتكلفتها 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].

لتحسين مقاومة البيتون على التشقق يمكن استخدام ألياف فولاذية داخل الخلطة البيتونية، إذ تسهم هذه الألياف في تقليل عرض الشق وزيادة التحمل والطاقة الممتصة. وقد أوضحت عدة أبحاث [3] و [4] أن فعالية هذه الألياف تعتمد بشكل كبير على شكلها الهندسي، نسبتها الحجمية وألية تفاعلها مع الكتلة البيتونية. مع ذلك فإن تجاهل تمثيل تأثير الألياف على خصائص التصدع بشكل دقيق ضمن النماذج العددية يحد من فعالية الألياف في تحسين الأداء [5].

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إدخال خصائص التصدع على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية عند تغير النسبة الحجمية للألياف، المقاومة المميزة للبيتون ونسبة التسليح الطولي، 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 الحاوية على ألياف 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 تقييم تأثير مجموعة من المتغيرات الرئيسية، مثل النسبة الحجمية للألياف، والمقاومة المميزة للبيتون، ونسبة التسليح الطولي 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 وتحديد المتغيرات الأكثر تأثيراً، بما يسهم في تحسين نماذج التصميم وتعزيز موثوقية المنشآت البيتونية المسلحة.

3- طرائق البحث ومواده:

اعتمد هذا البحث على النمذجة العددية باستخدام برنامج Abaqus لمحاكاة السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف 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 عدد من المتغيرات الرئيسية ضمن النمذجة، شملت: النسبة الحجمية للألياف، المقاومة المميزة للبيتون ونسبة التسليح الطولي، 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 الحاوية على ألياف فولاذية باستخدام برنامج العناصر المنتهية Abaqus اعتماداً على نموذج التضرر اللدن (CDP) وهو من النماذج المعتمدة لتمثيل السلوك اللاخطي للبيتون تحت الأحمال المختلفة. يتميز هذا النموذج بقدرته على تمثيل التشقق بالشد والضرر الناتج عن الضغط والقص [6] و [2].

تمت نمذجة البيتون باستخدام عناصر صلبة ثلاثية الأبعاد من نوع C3D8R، بينما تم تمثيل قضبان التسليح كعناصر خطية أحادية البعد من نوع T3D2، مدمجة ضمن البيتون باستخدام طريقة Embedded Region. أما الألياف الفولاذية فقد تمت نمذجتها من خلال أخذ تأثيرها ضمن سلوك الشد للبيتون وذلك لتبسيط النموذج.

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]، [7] و [8] بينما 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) [9] وعلى الشد بإدخال خصائص التصدع وتأثير الألياف من خلال العلاقتين (2) و (3) [8] كما هو موضح بالشكل (1).

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

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad , \quad K = 1.05 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad \text{حيث:}$$

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

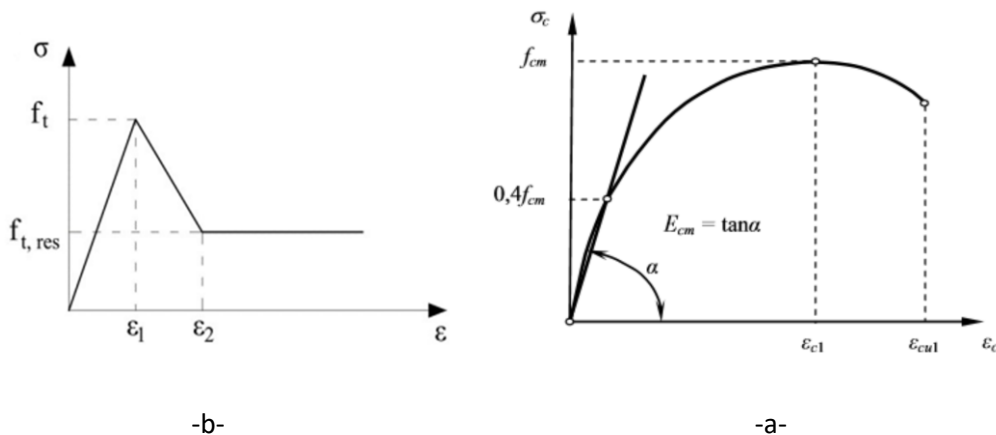
1.5 للألياف غير المنتظمة

2 للألياف معكوفة النهايات

L_f, d_f : قطر وطول الليف

الشكل (1): علاقة إجهاد تشوه للبيتون -a- بالضغط [9]

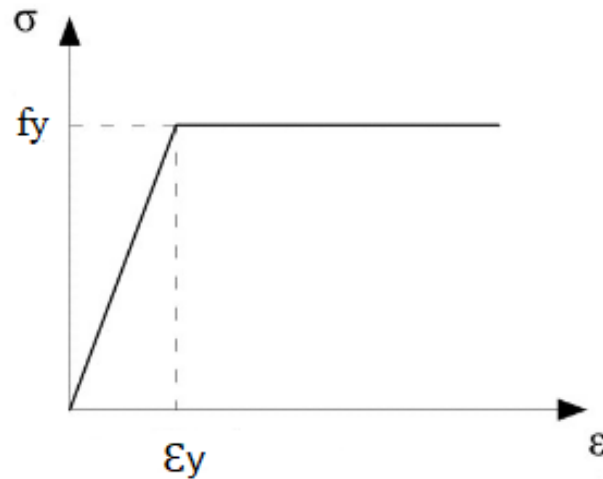
-b- بالشد مع أخذ خصائص التصدع والألياف بعين الاعتبار [8]



الجدول (1): المقاومة والتشوه الموافق للبيتون وفق الكود الأوروبي Euro Code2 [9]

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_{ctm} (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	
$f_{ck, 0,05}$ (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	
$f_{ck, 0,95}$ (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	
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

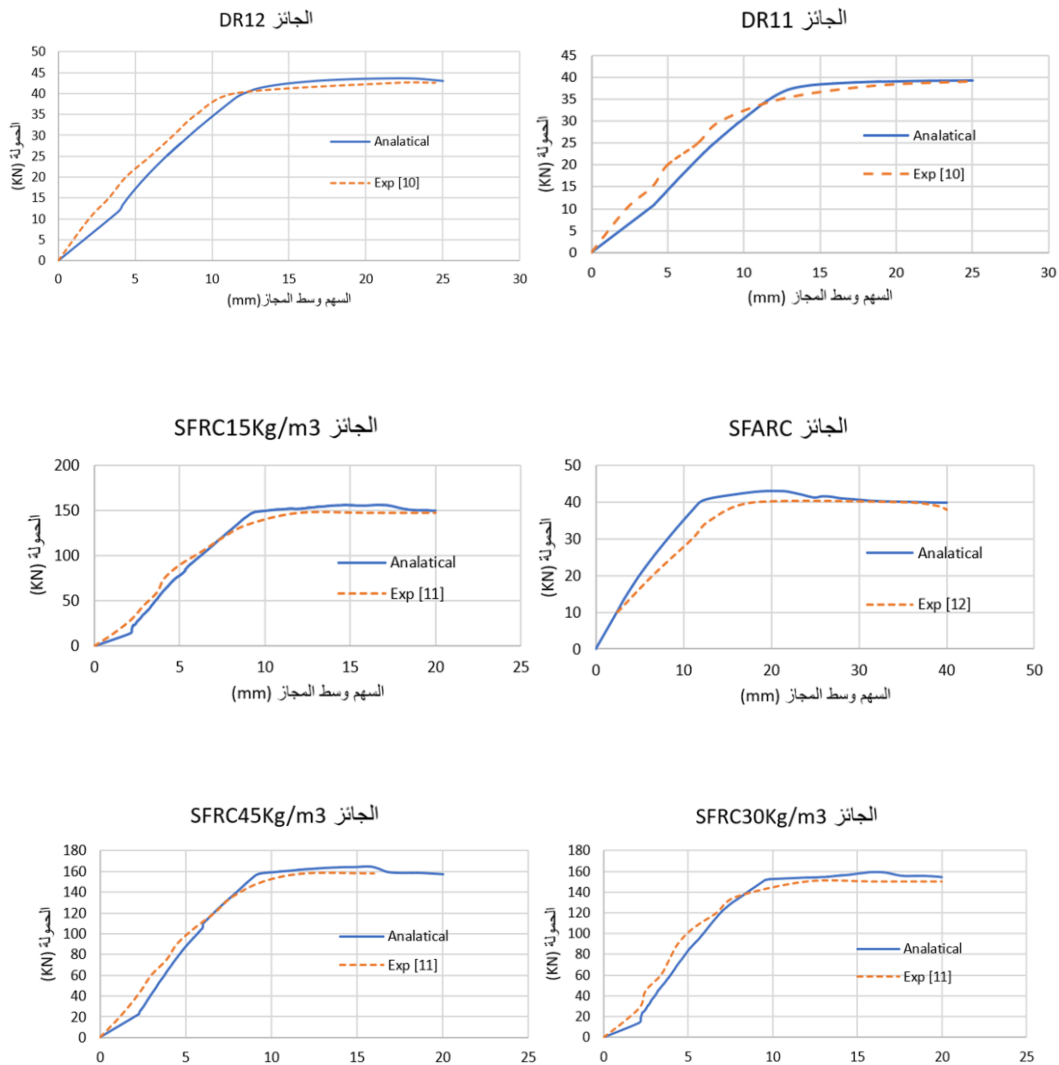
أما فولاذ التسليح فقد تم تمثيله كمادة متجانسة ثنائية الخطية من خلال تحديد حد الخضوع f_y وعامل المرونة E ، كما هو مبين بالشكل (2).



الشكل (2): علاقة إجهاد - تشوه لفولاذ التسليح [8]

2-4- 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 الحاوية على ألياف

الشكل (3): معايرة النموذج العددي لعدد من الأبحاث التجريبية المنشورة

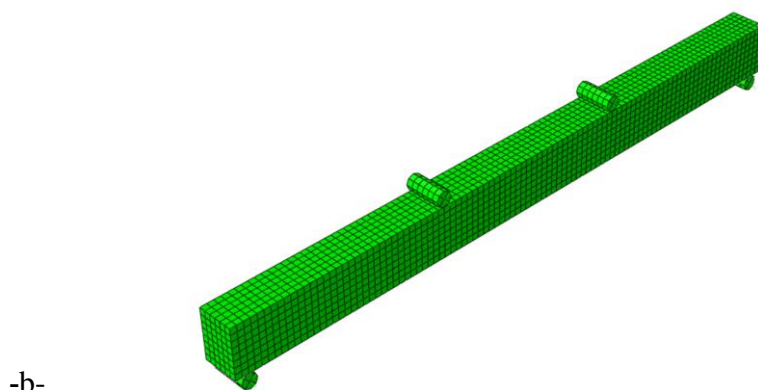
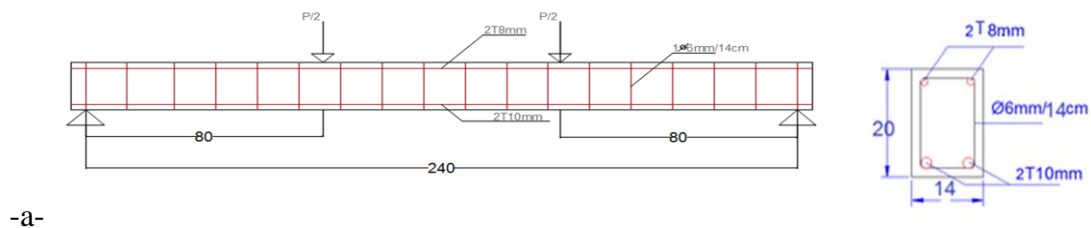


فولاذية وهي الجائزان DR11 وDR12 للباحث [10] والجائز الثلاثة SFRC15 و SFRC30 و SFRC45 للباحث [11] والجائز SFRC للباحث [12]، الموضحة في الجدول (2). حيث أظهرت هذه المقارنة تطابقاً مقبولاً مما يعزز من موثوقية النموذج العددي، كما هو مبين بالشكل (3) الذي يمثل مقارنة منحنى حمولة - سهم وسط المجاز للنموذج العددي المحضر في هذه الدراسة والنتائج التجريبية.

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

المرجع	أبعاد الجائز (mm)	اسم الجائز	A_s (mm^2)	f_y (MPa)	f'_c (MPa)	V_f %
[12]	120 x 170 x 2100	SFARC	226	460	30.56	1
[11]	125 x 250 x 1800	SFRC15Kg/m ³	402	500	43	0.19
[11]	125 x 250 x 1800	SFRC30Kg/m ³	402	500	43	0.38
[11]	125 x 250 x 1800	SFRC45Kg/m ³	402	500	43	0.58
[10]	130 x 203 x 2250	DR11	226	460	31.55	0.5
[10]	130 x 203 x 2250	DR12	226	460	32	1

3-4- دراسة بارامترية لخصائص التصدع في الجائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية: إعداد النموذج العددي في برنامج Abaqus لجائز بيتوني مسلح حاوي على ألياف فولاذية ذو استناد بسيط محمل بنمط تحميل بأربع نقاط (Four point bending)، أبعاد مقطعه العرضي 14 x 20 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): -a- أبعاد الجائز المدروس وتسليحه ونمط تحميله -b- النموذج العددي في Abaqus

في هذه الدراسة كانت المقاومة المميزة للبيتون $f'_c = 20 - 25 - 30$ MPa، أما الألياف الفولاذية المستخدمة كانت بطول 60mm ويقطر 1mm وبالتالي يكون لها عامل الشكل $\frac{L_f}{d_f} = 60$. تم تسمية الجائز كالتالي BF-X-Y-Z (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 دون إدخال خصائص التصدع وذلك عند تغير كل من النسبة الحجمية للألياف، والمقاومة المميزة للبيتون ونسبة التسليح الطولي المستخدم، حيث تم تحليل 24 عينة 12 مع إدخال خصائص التصدع و12 دونها، كما هو موضح بالجدول (3).

الجدول (3): تسميات الجوائز عند تغير حالات الدراسة

البارامترات الثابتة	اسم الجائز	الحالات	المتغير
$f'_c = 25$ MPa نسبة التسليح الطولي 0.68%	BF-0-25-0.68	0	النسبة الحجمية للألياف V_f %
	BF-0.25-25-0.68	0.25	
	BF-0.5-25-0.68	0.5	
	BF-0.75-25-0.68	0.75	
	BF-1-25-0.68	1	
$V_f = 0.5$ % نسبة التسليح الطولي 0.68%	BF-0.5-20-0.68	20	المقاومة المميزة للبيتون f'_c (MPa)
	BF-0.5-25-0.68	25	
	BF-0.5-30-0.68	30	
$V_f = 0.5$ % $f'_c = 25$ MPa	BF-0.5-25-0.225	0.225	نسبة التسليح الطولي %
	BF-0.5-25-0.68	0.68	
	BF-0.5-25-0.99	0.99	
	BF-0.5-25-1.35	1.35	

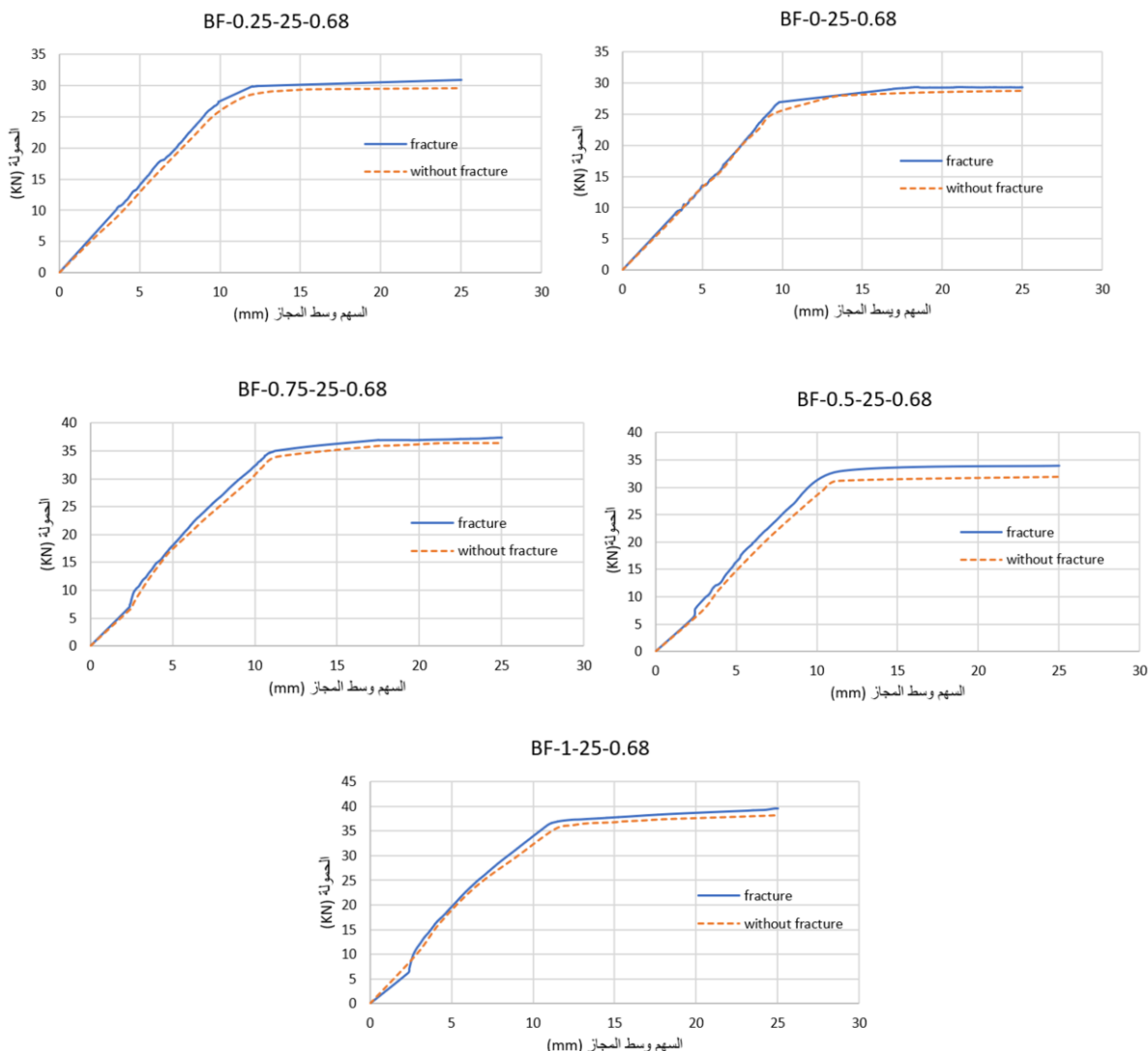
5- النتائج والمناقشة (Results and discussion):

تم بناء النموذج العددي لجوائز هذا البحث في برنامج Abaqus وأجري تحليل ستاتيكي لا خطي مرتين لكل جائز مرة بإدخال خصائص التصدع ومرة دونها لتحديد تأثير هذه الخصائص عند تغير البارامترات التالية:

5-1- تأثير تغير النسبة الحجمية للألياف:

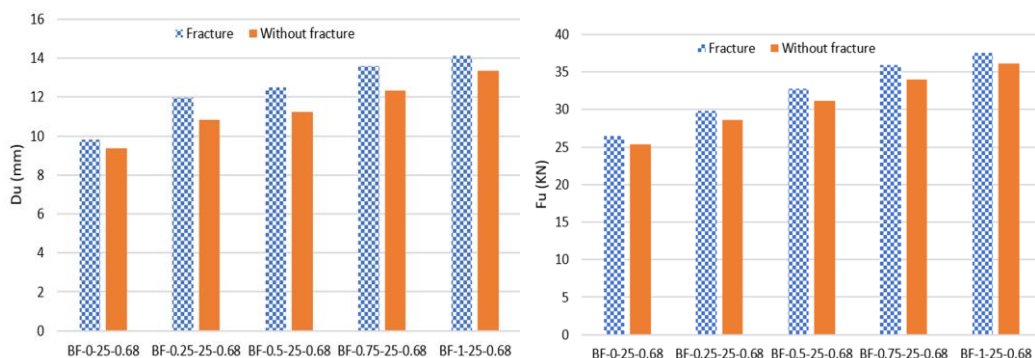
تم إعداد النموذج العددي للجائز المدروس في برنامج Abaqus مع تغيير النسبة الحجمية للألياف المستخدمة في الجائز وفق النسب % (1 - 0.75 - 0.5 - 0.25 - 0) حيث أُجري التحليل بإدخال خصائص

التصدع ومن ثم تم إعادة التحليل دون أخذ خصائص التصدع بعين الاعتبار، وتمت مقارنة النتائج من خلال منحنى حمولة - السهم وسط المجاز، كما هو مبين بالشكل (5).



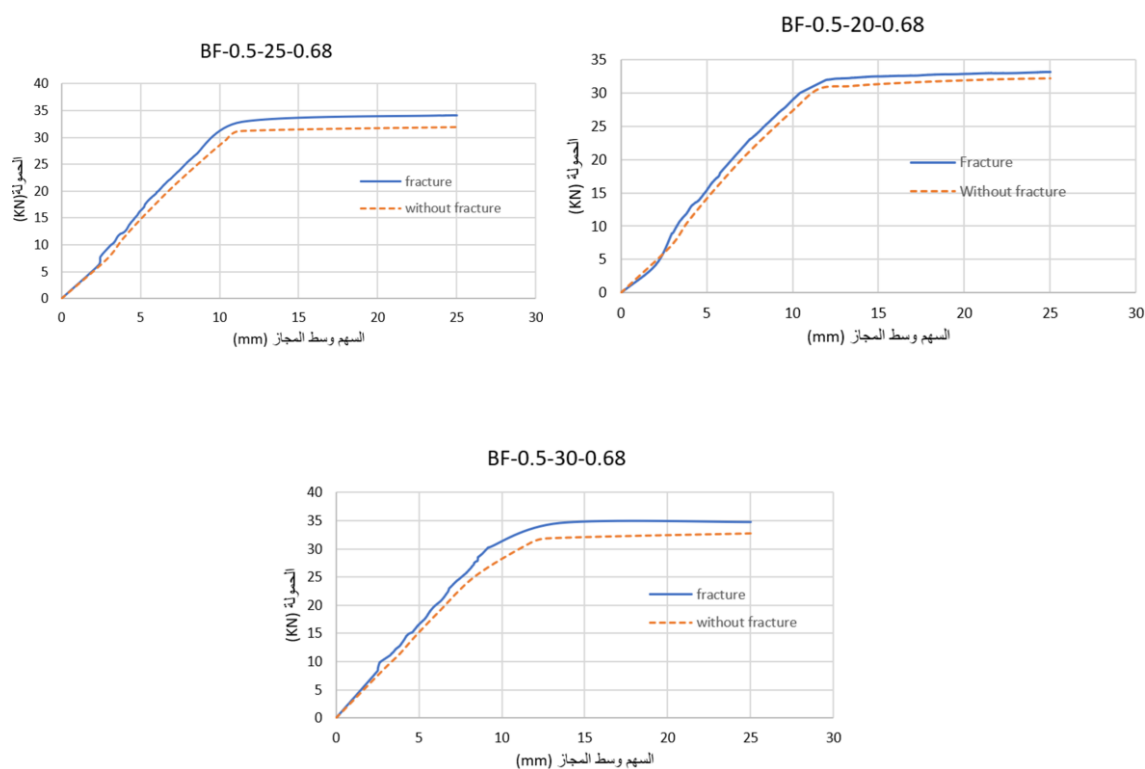
الشكل (5): مقارنة منحنى حمولة - السهم وسط المجاز عند تغير النسبة الحجمية للألياف

أظهرت النتائج أن إدخال خصائص التصدع يؤدي إلى تحسن واضح في قدرة الجوائز على التحمل وكذلك في قابلية التشوه إلا أن هذا التحسن لم يكن طردياً مع زيادة النسبة الحجمية للألياف، حيث تم إدخال تأثير الألياف في كلا الحالتين (بإدخال خصائص التصدع ودونها). فعند النسب المنخفضة والمتوسطة من الألياف 0.25% و 0.5% و 0.75% كانت الزيادة النسبية في قدرة التحمل والسهم عند الانهيار هي الأعلى، حيث بلغت الزيادة في السهم عند $V_f = 0.5\%$ حوالي 11.4% مقارنة بالتحليل بدون خصائص التصدع، بينما انخفضت هذه الزيادة إلى 5.7% فقط عند $V_f = 1\%$ وبالمثل فإن التحسن في قدرة التحمل القصوى بلغ ذروته عند $V_f = 0.75\%$ بنسبة زيادة تقارب 5.7% قبل أن ينخفض إلى 3.95% عند $V_f = 1\%$ ، كما هو موضح بالشكل (6).



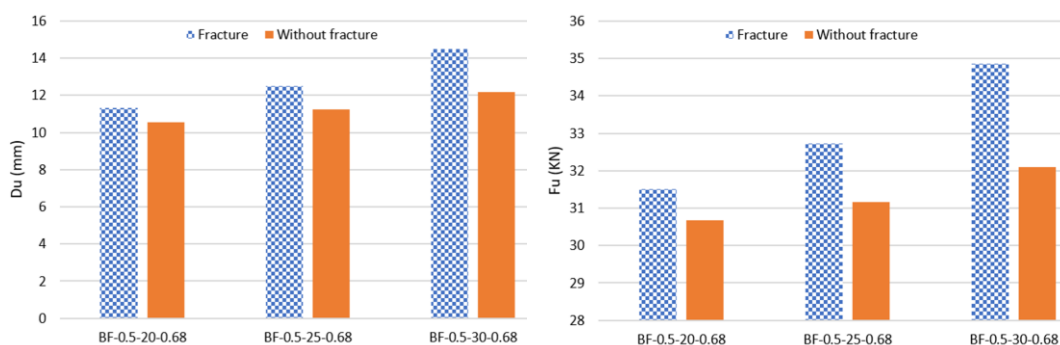
الشكل (6): مقارنة حمولة الانهيار والسهم الموافق مع وبدون إدخال خصائص التصدع عند تغير النسبة الحجمية للألياف
2-5- تأثير تغير المقاومة المميزة للبيتون:

تم إعداد النموذج العددي للجائز المدروس في برنامج Abaqus مع تغيير المقاومة المميزة للبيتون من 20MPa إلى 25MPa و 30MPa 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 بالشكل (7).



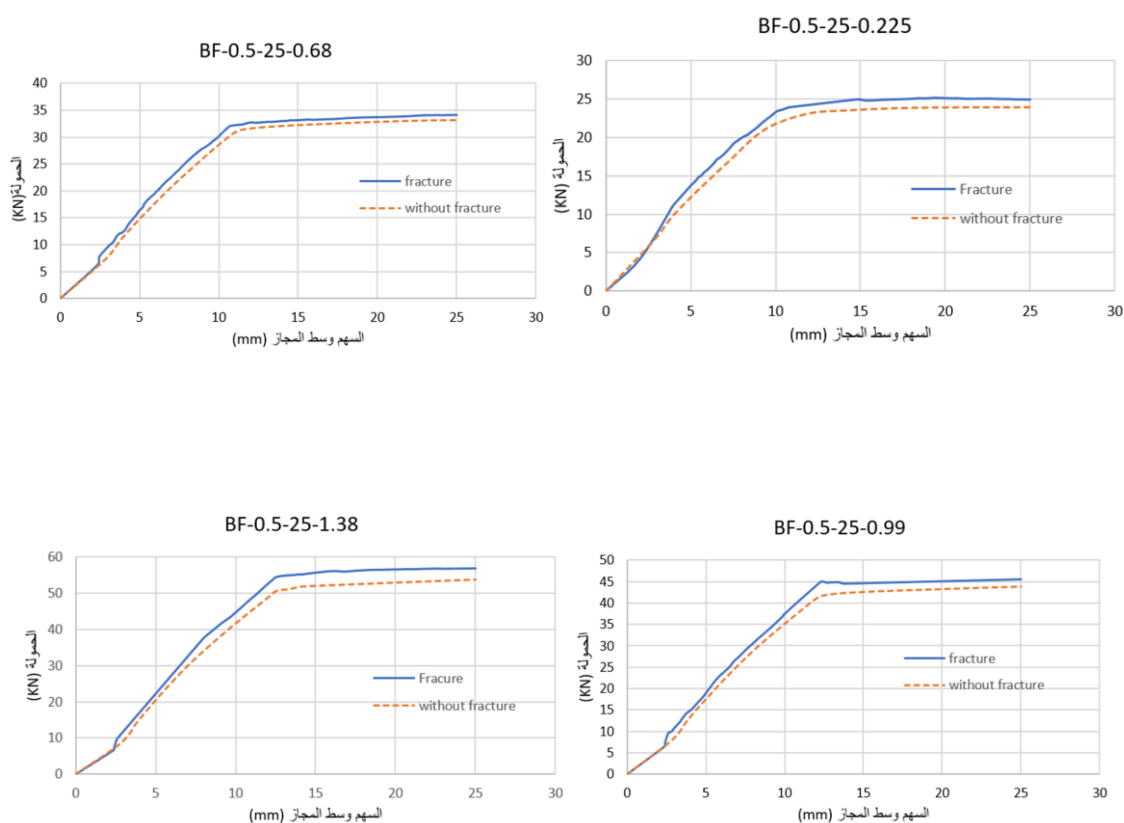
الشكل (7): مقارنة منحنى حمولة - السهم وسط المجاز عند تغير المقاومة المميزة للبيتون

أظهرت نتائج التحليل العددي أن إدخال خصائص التصدع في النمذجة كان له تأثير واضح على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية عند تغير المقاومة المميزة للبيتون من 20MPa إلى 25MPa و 30MPa، فقد تحسنت قدرة التحمل القصوى والسهم النهائي عند إدخال خصائص التصدع بنسبة وصلت إلى 8.6% بما يخص قدرة التحمل بينما ارتفع السهم عند الانهيار بنسبة وصلت إلى 18.9%، هذه الفروقات تؤكد أن تجاهل سلوك التصدع يؤدي إلى تقليل في تقدير قابلية الجوائز للتشوه، وبالتالي إلى تمثيل غير دقيق لسلوكها الحقيقي خصوصاً في الحالات التي يستخدم فيها بيتون عالي المقاومة، لذا فإن نمذجة خصائص التصدع تعد ضرورية للوصول إلى تمثيل واقعي لسلوك الجوائز تحت تأثير الانعطاف، كما يظهر الشكل (8).
الشكل (8): مقارنة حمولة الانهيار والسهم الموافق مع وبدون إدخال خصائص التصدع عند تغير المقاومة المميزة للبيتون



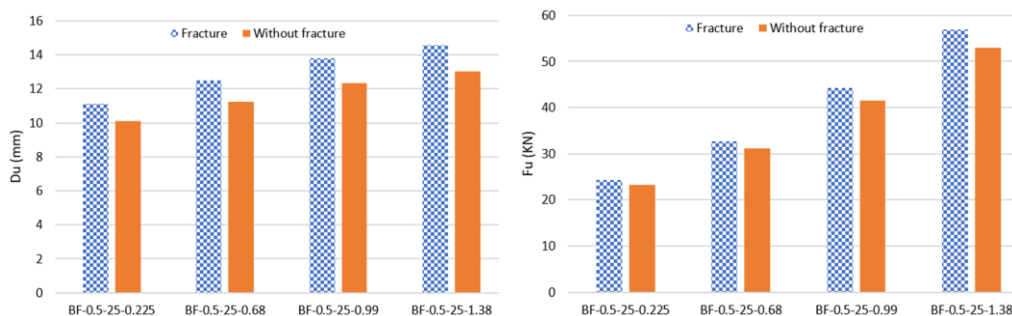
3-5- تأثير تغير نسبة التسليح الطولي:

تم إعداد النموذج العددي للجوائز المدروس في برنامج Abaqus مع تغيير نسبة التسليح الطولي المستخدم % (0.225, 0.68, 0.99, 1.38) 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 بالشكل (9).



الشكل (9): مقارنة منحنى حمولة - السهم وسط المجاز عند تغير نسبة التسليح الطولي

تشير نتائج التحليل العددي إلى أن زيادة نسبة التسليح الطولي تؤثر بشكل غير مباشر على خصائص التصدع في الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية، حيث ازدادت قدرة تحمل هذه الجوائز بنسبة وصلت إلى 7.7% وازداد السهم عند الانهيار بنسبة وصلت إلى 11.9%، يمكن تفسير ذلك بأنه مع نسبة التسليح الطولي يرتفع مستوى مقاومة الانعطاف مما يؤدي إلى تأخير التشققات الأولية وتقليل معدل تطورها في المراحل المبكرة من التحميل. كما أن زيادة نسبة التسليح الطولي تعزز من قدرة العنصر على توزيع الإجهادات بشكل أكثر توازناً، مما يساهم في تقليل عرض الشقوق وتحسين التحكم في تطورها. هذا التأثير يصبح أكثر وضوحاً عند إدخال خصائص التصدع في النموذج العددي. ومن ناحية أخرى فإن العمل المشترك بين التسليح الطولي والألياف الفولاذية يؤدي إلى آلية مقاومة مزدوجة للشقوق: الأولى ناتجة عن مقاومة الشد للتسليح الطولي، والثانية نتيجة لربط الألياف عبر التشققات، مما يرفع فعالية السيطرة على سلوك التصدع ويزيد مطاوعة العنصر، كما هو مبين بالشكل (10).



الشكل (10): مقارنة حمولة الانهيار والسهم الموافق مع وبدون إدخال خصائص التصدع عند تغير نسبة التسليح الطولي

6- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت الدراسة العددية على برنامج العناصر المنتهية Abaqus أن إدخال خصائص التصدع في نمذجة الجوائز البيتونية المسلحة الحاوية على ألياف فولاذية يعد عاملاً حاسماً للحصول على نتائج أكثر دقة واقتراباً من السلوك الحقيقي للمنشآت. فقد تبين أن النماذج التي شملت خصائص التصدع قدمت تقديرات أعلى لكل من الحملات القصوى والسهم النهائي، مما يعكس قدرة أكبر على تمثيل آلية التشققات وانتشارها التدريجي. تبين أن المقاومة المميزة للبيتون تمثل العامل الأكثر تأثيراً على خصائص التصدع، حيث أدت إلى تحسين واضح في كل من قدرة التحمل والسهم عند الانهيار. تلاها تأثير تغير نسبة التسليح الطولي الذي ساهم أيضاً في تعزيز السلوك الإنشائي من خلال تحسين توزيع الإجهادات وتقليل تطور التشققات. أما النسبة الحجمية للألياف أظهرت تأثيراً محدوداً نسبياً على خصائص التصدع. تشير هذه النتائج إلى أن خصائص التصدع لا تتأثر بالمتغيرات الثلاثة بنفس الدرجة، بل تختلف بحسب طبيعة مساهمة كل متغير في آلية تشكل الشقوق وتطورها.

ينصح في نهاية هذه الدراسة باعتماد نمذجة عددية تتضمن خصائص التصدع بشكل صريح عند دراسة العناصر الإنشائية، لضمان دقة تنبؤ سلوكها تحت الأحمال. كما نوصي بدراسة تأثير استخدام بيتون بمقاومات أكبر على خصائص التصدع.

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] Singh SB, Munnappalli D. *Flexural performance of steel fiber reinforced concrete.* Constr Build Mater. 2021.
- [4] Bantia N, Gupta R. *Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete.* Cem Concr Res. 2006.
- [5] Di Prisco M, Plizzari GA, Vandewalle L. *Fibre reinforced concrete: new design perspectives.* Mater Struct. 2009.

- [6] Fenves GL, Lee J. *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. J Eng Mech. 1998.
- [7] Abbas Y, Al-Kamaki Y, Al-Mahaidi R. *Numerical investigation of the flexural behavior of fiber reinforced concrete beams*. Comput Concr 2016.
- [8] Blagojevic A, Markovic I, Walraven JC. *Modelling fiber reinforced concrete with the concrete damaged plasticity model*. Struct Concr. 2021.
- [9] 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.
- [10] Swamy RN, Al-Ta'an SA. *Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams with steel fibres*. Struct Eng. 1981.
- [11] Trindade AC. *Behavior of steel fibre reinforced concrete beams: experimental and numerical study [PhD thesis]*. Porto: University of Porto. 2018.
- [12] Behbahani HP, Farasatpour A, Keshavarz A. *Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams*. Int J Civ Eng. 2012.