# " مساهمة في تطوير علاقة تحليلية لحساب مقاومة القص في الجوائز البيتونية المدعمة بالألياف الفولاذية باستخدام شبكة ذكاء اصطناعي $ANN$ "

**طالب الدكتوراه: سعيد هاشم سعيد**
**قسم : الهندسة الإنشائية – كلية : الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية**
**اشراف الأستاذ الدكتور المشرف : أ.د أكرم صقور**
**الدكتور المشرف المشارك : أ.د غاندي جحجاح**

## □ الملخّص □

يهدف هذا البحث إلى تطوير علاقة تحليلية مرجعية لحساب مقاومة القص في الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية ($SFRC$) باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وفيها تم جمع قاعدة بيانات تضم 88 تجربة معملية من المرجعيات السابقة، شملت 11 متغيراً هندسياً وميكانيكياً رئيسياً (أبعاد الجائز، نسبة التسليح الطولي، نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال، مقاومة الخرسانة، خصائص الألياف)، ولتقييم أداء العلاقات التحليلية الشائعة، حُسب عامل الأداء (نسبة المقاومة التجريبية إلى المحسوبة) لكل علاقة، وأظهرت النتائج أن علاقتي Darwish و2Ashour كانتا الأقرب إلى القيم التجريبية ضمن قاعدة البيانات المستخدمة، ثم تم تصميم شبكة عصبية اصطناعية ($ANN$) ببنية ($1 - 18 - 11$)، باستخدام خوارزمية Levenberg–Marquardt، ودُرّبت على 73 حالة واختُبرت على 15 حالة حجزت مسبقاً من قاعدة البيانات نفسها ولم تستخدم في تدريب الشبكة، حيث حققت معامل ارتباط (R) قدره 0.960 في مرحلة الاختبار وبقيت الأخطاء النسبية ضمن حدود 5% للحالات المختبرة، بعد التحقق من أداء الشبكة استُخدمت مخرجاتها لتوليد 5000 نقطة بيانات مولدة عددياً من مخرجات الشبكة ضمن نطاق البيانات المدروسة، ثم طُبق تحليل الانحدار المتعدد غير الخطي لمعايرة أربعة ثوابت ضمن صيغة Darwish، (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23) مما أتاح اشتقاق

علاقة تحليلية، وقد أظهرت هذه العلاقة المطورة تحسناً جيداً مقارنة بالعلاقة الأصلية، حيث أظهرت العلاقة المطوّرة تحسناً في متوسط عامل الأداء بنسبة 17.4%، وانخفاضاً في معامل الاختلاف (COV) بنسبة 17.9%، وارتفاعاً في معامل التحديد ($R^2$) بنسبة 6.9% مقارنة بالعلاقة الأصلية لـDarwish، كما أظهر تحليل الحساسية باستخدام مؤشرات التأثير الكلي ( Total-Order Sobol Indices) أن نسبة القص إلى العمق الفعال كانت العامل الأكثر تأثيراً بنسبة 23.4%، تليها النسبة الحجمية للألياف الفولاذية بنسبة 19.8%، ثم مقاومة ضغط الخرسانة بنسبة 15.2% ونسبة التسليح الطولي بنسبة 12.7%. كما أظهر تحليل التفاعلات وجود تأثير مشترك بارز بين a/d وVf ، مما يؤكد أهمية التأثيرات التفاعلية بين المتغيرات في التنبؤ بمقاومة القص."وتُعد العلاقة المقترحة خطوة بحثية أولية، وتقتصر صلاحيتها على الجوائز المستطيلة غير المزودة بتسليح قص عرضي (كانات)، ضمن النطاقات التجريبية التي تغطيها قاعدة البيانات، ولا يُوصى بتطبيقها خارج هذه الحدود أو على الجوائز المزودة بتسليح عرضي أو الجوائز T دون تحقق تجريبي مستقل.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات عصبية اصطناعية، مقاومة القص، جوائز خرسانية مسلحة، ألياف فولاذية، علاقة تحليلية مطورة.

# *"Contribution to the Development of an Analytical Relationship for Calculating Shear Strength in Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Using an Artificial Neural Network (ANN)"*

**ABSTRACT**

This research aims to develop a reference analytical relationship for calculating the shear strength of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams using artificial intelligence techniques. A database of 88 experimental tests was compiled from previous references, encompassing 11 key geometric and mechanical variables (beam dimensions, longitudinal reinforcement ratio, shear span-to-effective depth ratio, concrete strength, and fiber properties). To evaluate the performance of common analytical relationships, the performance factor (ratio of experimental to calculated resistance) was calculated for each relationship. The results showed that the Darwish and Ashour2 relationships were the closest to the experimental values within the used database. An artificial neural network (ANN) with an (11-18-1) architecture was then designed using the Levenberg-Marquardt algorithm, trained on 73 cases, and tested on 15 cases that were pre-reserved from the same database and not used in network training, achieving a correlation coefficient (R) of 0.960 in the testing phase with relative errors remaining within 5% for the tested cases. After validating the network's performance, its outputs were used to generate 5000 data points numerically generated from the network outputs within the range of the studied data. Nonlinear multiple regression analysis was then applied to calibrate four constants within the Darwish formula, yielding (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23), which enabled the derivation of an analytical relationship. This developed relationship showed notable improvement compared to the original equation, with the average performance factor improving by 17.4%, the coefficient of variation (COV) decreasing by 17.9%, and the coefficient of determination ($R^2$) increasing by 6.9% relative to the original Darwish relationship. Sensitivity analysis using Total-Order Sobol Indices revealed that the shear span-to-effective depth ratio (a/d) was the most influential factor at 23.4%, followed by the steel fiber volume fraction (Vf) at 19.8%, concrete compressive strength (f'c) at 15.2%, and longitudinal reinforcement ratio (ρ) at 12.7%. Interaction analysis also revealed a

significant combined effect between a/d and Vf, confirming the importance of interaction effects between variables in predicting shear strength. The proposed relationship is considered a preliminary research step, and its validity is limited to rectangular beams without transverse shear reinforcement (stirrups), within the experimental ranges covered by the database. It is not recommended to apply it outside these limits or to beams with transverse reinforcement or T-beams without independent experimental verification.

**Keywords:** Artificial Neural Networks, Shear Strength, Reinforced Concrete Beams, Steel Fibers, Enhanced Analytical Relationship.

## مقدمة:

تعد مقاومة القص من الآليات المعقدة في العناصر الخرسانية المسلحة، نظراً لتداخل عدد كبير من العوامل الهندسية والميكانيكية في تحديد سلوك العنصر عند بلوغ الحالة الحدية، وتزداد هذه الصعوبة في الجوائز المسلحة بالألياف الفولاذية نتيجة التفاعل بين مساهمة الخرسانة، والتسليح الطولي، والعمل القوسي، ومساهمة الألياف في نقل القوى عبر الشقوق المائلة وقد أسفر ذلك عن تباين في نتائج العلاقات التحليلية، حيث اقترحت الدراسات السابقة عدداً من العلاقات التجريبية وشبه التجريبية لتقدير مقاومة القص في الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية، من أبرزها علاقات Sharma، Narayanan and Darwish، Ashour et al، Khuntia et al، Kwak et al. وقد أظهرت فروقاً بين القيم المتوقعة والنتائج التجريبية، وتتميز هذه العلاقات بأنها تستند إلى نتائج تجريبية، إلا أن اختلاف صيغها وعدد المتغيرات الداخلة فيها يؤدي إلى تفاوت في قدرتها على تمثيل البيانات التجريبية المختلفة ولذلك، من الممكن أن يشكل استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وبخاصة الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، أمراً مساعداً لتمثيل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات الهندسية والميكانيكية ومقاومة القص، حيث يهدف البحث الحالي إلى الاستفادة من قدرة الشبكات العصبية على تمثيل العلاقات غير الخطية، ثم تحويل هذا التمثيل إلى علاقة تحليلية مبسطة وتتكون المنهجية من ثلاث مراحل رئيسية: (1) تجميع قاعدة بيانات تجريبية وتحليل العلاقات السابقة، (2) بناء وتدريب شبكة عصبية اصطناعية للتنبؤ بمقاومة القص، (3) استخدام مخرجات الشبكة العصبية لتطوير علاقة تحليلية ضمن صيغة Darwish.

### 1- قاعدة البيانات التجريبية:

تم تجميع 88 حالة اختبارية من الدراسات المنشورة حول مقاومة القص للجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية وشملت المصادر دراسات Sharma، و Narayanan and Darwish، و Ashour et al، و Khuntia et al، و Sahoo et al، و Shoaib et al، و Arslan et al، وغيرها من الدراسات المبينة في قائمة المراجع. وتجدر الإشارة إلى أن هذه البيانات مأخوذة من دراسات تجريبية متعددة، ولذلك فإن اختلاف ظروف الاختبار والأجهزة والخلطات وخصائص المواد بين المراجع يمثل مصدراً محتملاً للتشتت التجريبي، وقد تم التعامل مع ذلك من خلال توحيد الواحدات والرموز والمعاملات الداخلة في الحسابات، مع الإبقاء على البيانات ضمن المجالات التي يمكن مقارنتها بصورة مباشرة، ويوضح الجدول (1) النطاقات الكاملة للمتغيرات الإحدى عشر التي تشملها قاعدة البيانات، مع قيم المتوسط والانحراف المعياري لكل متغير، ويُظهر هذا الجدول تنوع البيانات المدروسة، مع الإشارة إلى أن بعض المتغيرات تتركز ضمن نطاقات معينة، مما يستدعي الانتباه إلى حدود صلاحية النموذج المطور.

الجدول (1): النطاقات الإحصائية للمتغيرات المدروسة (على أساس 88 حالة)

| المتغير | الرمز | الوحدة | المدى | المتوسط | الانحراف المعياري |
|---|---|---|---|---|---|
| عرض الجائز | bw | mm | 85–300 | 162.4 | 58.7 |
| ارتفاع الجائز | h | mm | 150–700 | 312.8 | 125.4 |
| العمق الفعال | d | mm | 130–622 | 285.3 | 112.5 |
| طول الجائز | L | mm | 720–4500 | 2129.6 | 1050.3 |
| نسبة التسليح الطولي | ρ | % | 0.5–4.0 | 2.3 | 0.72 |
| نسبة a/d | a/d | – | 1.13–4.50 | 3.02 | 0.87 |
| قطر الركام الأعظمي | da | mm | 9.6–22.0 | 12.8 | 4.2 |
| مقاومة الضغط | f'c | MPa | 23.9–60.2* | 38.7 | 18.2 |
| النسبة الحجمية للألياف | Vf | % | 0.25–1.5 | 0.78 | 0.56 |
| عامل شكل الألياف | Lf/df | – | 50–133 | 71.2 | 18.5 |
| مقاومة شد الألياف | Ften | MPa | 834–2300 | 1135.2 | 320.4 |

تشير هذه الحدود إلى أن العلاقة المقترحة ليست علاقة عامة لجميع أنواع الخرسانة والجوائز، وإنما علاقة محددة المجال مشتقة من قاعدة البيانات المستخدمة، ولا يُنصح بتطبيق العلاقة خارج هذه النطاقات قبل إجراء تحقق تجريبي مستقل، وسيتم مناقشة ذلك بالتفصيل في القسم الخاص بحدود الصلاحية

**2- العلاقات التحليلية السابقة:**

تعددت العلاقات المقترحة لحساب مقاومة القص الحدية وتنوعت تبعاً لنوع العناصر والخلطة البيتونية المستخدمة وإضافاتها، وقد تمت مراجعة أهم العلاقات الشائعة التي استخدمت في المرجعيات السابقة، وسوف نستعرض بعض هذه العلاقات:

علاقة الباحث $Sharma$ [1]:

طور الباحث Sharma (1986) علاقة تجريبية لحساب مقاومة القص الحدية للخرسانة العادية (بدون ألياف) بالاعتماد على مقاومة الشد بالفلق للخرسانة $f_{ct}$ على نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال $a/d$

$$v_n = (k * f_{ct}) * \left(\frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

حيث: $f_{ct} = 0.79 * \sqrt{f'_c}$ k= 2,

علاقة $Narayanan\ and\ Darwish$ [2]:

اقترح الباحثان علاقة تجريبية لحساب اجهاد القص الحدي تتضمن ثلاثة محددات هي مقاومة الشد بالفلق والعمل القوسي للجائز ونسبة التسليح الطولي واجهاد الشد للألياف على طول شق القص القطري:

$$v_n = e * \left(0.24 * f_{ct} + 80 * \rho * \frac{d}{a}\right) + v_b \quad (2)$$

يعبر العامل e عن تأثير العمل القوسي للجائز ويعطى بالشكل التالي:

$$e = 1 \quad for \left(\frac{a}{d} > 2.8\right), \qquad e = 2.8 * \frac{d}{a} \quad for \left(\frac{a}{d} \leq 2.8\right) \quad (3)$$

تعطى علاقة مقاومة الشد بالفلق $f_{ct}$ بالاعتماد على تحليل الانحدار الإحصائي للنتائج التجريبية بالشكل:

$$f_{ct} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F} \ldots (Mpa) \qquad F = V_f \frac{L_f}{D_f} \beta \quad (4)$$

حيث: $f_{cuf}$: المقاومة المكعبية على الضغط $(Mpa)$ $F$: عامل الليف، $V_f$: النسبة الحجمية للألياف، $L_f$: طول الليف $(mm)$، $D_f$: قطر الليف $(mm)$، $\beta$: عامل التماسك ويعتمد على شكل الليف الهندسي ويساوي $0.5$ للألياف المستقيمة الدائرية، و$0.75$ للألياف المتعرجة، و$1$ للألياف ذات النهايات المعقوفة، لم يحسب عامل الليف بالاعتماد على النسبة الحجمية للألياف $V_f\%$ وعامل الشكل $\frac{L_f}{D_f}$ فقط بل على عامل التماسك $\beta$، $\rho$: نسبة التسليح الطولي $b$: عرض المقطع $(mm)$ $d$: الارتفاع الفعال $(mm)$.

القسم الثالث من العلاقة $V_b$ هو مقاومة سحب الليف على طول الشق القطري المائل بزاوية $45^\circ$ ويعطى بالعلاقة التالية:

$$V_b = 0.41 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \beta \quad (5)$$

حيث: $\tau$ اجهاد التماسك ويساوي $4.15$ $Mpa$ (القيمة مقترحة من قبل $swamy\ et\ al - 1974$)

علاقة [3] $Ashour, Hasanain, and\ Wafa$ :

عدل Ashour et all (1992) علاقة Zsutty (1968) للبيتون العادي بإدخال عامل الليف $F$ لتصبح للبيتون المسلح بألياف فولاذية بالشكل التالي:

$$V_n = \left(2.11 \sqrt[3]{f_c'} + 7F\right) \sqrt[3]{\rho \frac{d}{a}} \ldots\ldots\ldots (MPa) \ for \ \frac{a}{d} \geq 2.3 \quad (6)$$

$$V_n = \left[\left(2.11 \sqrt[3]{f_c'} + 7F\right) \sqrt[3]{\rho \frac{d}{a}} \frac{2.5d}{a} + V_b \left(2.5 - \frac{d}{a}\right) \ldots\ldots (MPa) \ for \ \frac{a}{d} < 2.3 \right. \quad (7)$$

إن المعاملات $vb, f$ هي نفسها الموجودة في علاقة $Narayanan\ and\ Darwish$ (1987)، واقترحوا أيضاً تعديل علاقة الكود الأمريكي ACI −318 Eq (11−5) بإضافة عامل الليف $f$ وباستخدام تحليل الانحدار الإحصائي لتصبح بالشكل التالي:

$$V_n = \left(0.7\sqrt{f_c'} + 7F\right)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a} \qquad (8)$$

علاقة $Khuntia, Stojadinovic\ and\ Goel$ [4]:

اقترح الباحثون علاقة تأخذ بالحسبان عامل الليف بالاعتماد على تطوير علاقة الكود الأمريكي ACI 318، تم حساب مساهمة الألياف بالاعتماد على مقاومة الشد بعد التشقق بفرض أن إجهاد التماسك بين الليف والمونة الاسمنتية $\tau = 0.68 * \sqrt{f`c}$ والتقدير العمودي للشق القطري مساوياً 0.9xd وأدخل تأثير العمل القوسي للجوائز بإدخال العامل e إلى العلاقة كما يلي:

$$V_n = (0.167e + 0.25F)\sqrt{f_c'} \qquad (9)$$

$$e = 1 \quad for\ \left(\frac{a}{d} \geq 2.5\right), \qquad e = 2.5 * \frac{d}{a} < 3 \quad for\ \left(\frac{a}{d} \leq 2.5\right) \qquad (10)$$

$f_c'$: المقاومة المميزة للبيتون $(MPa)$، F: عامل الليف وهو ذاته الموضح سابقا في علاقة درويش

علاقة Kwak et al [5]:

عدل الباحث Kwak et al (2002) علاقة Zsutty (1968) لحساب تأثير قوة الشد على العمل القوسي مع حد إضافي خاص بالألياف لحساب المساهمة المباشرة للألياف في مقاومة القص في الجوائز المسلحة بألياف فولاذية بدون أساور.

$$V_n = 3.7 * e * f_{ct}^{2/3}(\rho\frac{d}{a})^{1/3} + 0.8V_b \qquad (11)$$

$$e = 1 \quad for\ \left(\frac{a}{d} > 3.4\right), \qquad e = 3.4 * \frac{d}{a} \quad for\ \left(\frac{a}{d} \leq 3.4\right) \qquad (12)$$

مقاومة الشد بالفلق $f_{ct}$ تحسب من العلاقة المذكورة سابقاً:

$$f_{ct} = \left(\frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F}\right) \qquad (13)$$

جميع المعاملات هي المذكورة في علاقة درويش

**3- تقييم العلاقات السابقة واختيار العلاقة الأساسية للتطوير:**

تم تقييم العلاقات السابقة باستخدام قاعدة البيانات المكونة من 88 حالة، وحُسب لكل علاقة متوسط عامل الأداء (نسبة المقاومة التجريبية إلى المحسوبة)، والانحراف المعياري، ومعامل الاختلاف (COV)، ومعامل الارتباط (R)، ومعامل التحديد ($R^2$). ويوضح الجدول (2) هذه المعاملات.

الجدول (2): قيم المعاملات الإحصائية للعلاقات المقترحة سابقاً

| المعامل الإحصائي | SHARMA[1] | DARWISH[2] | ASHOUR1[3] | ASHOUR2[3] | KHUNTIA[4] | KWAK[5] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AVERAGE | 0.403 | 1.217 | 1.271 | 1.209 | 0.777 | 1.252 |
| MAXIMUM | 0.587 | 2.336 | 2.472 | 2.340 | 1.304 | 2.440 |
| MINIMUM | 0.200 | 0.380 | 0.381 | 0.380 | 0.219 | 0.380 |
| ST-DEV-(N-1) | 0.110 | 0.432 | 0.483 | 0.424 | 0.274 | 0.490 |
| COEFF-OF VAR-(%) | 27.32 | 35.49 | 37.98 | 35.09 | 35.23 | 39.14 |
| R | 0.65 | 0.85 | 0.86 | 0.85 | 0.78 | 0.86 |
| $R^2$ | 0.42 | 0.72 | 0.74 | 0.72 | 0.61 | 0.74 |

أظهرت النتائج أن علاقة Darwish وعلاقة Ashour2 كانتا الأكثر ملاءمة للتطوير، نظراً لقرب متوسط عامل الأداء من الواحد (1.217 و1.209 على التوالي)، وانخفاض معامل الاختلاف مقارنة ببعض العلاقات الأخرى (35.49% و35.09% على التوالي)، مع قدرة تنبؤية جيدة ($R^2 = 0.72$ لكليهما). وقد تم اختيار علاقة Darwish أساساً للتطوير لكونها توفر صيغة تحليلية يمكن فصل مكوناتها الرئيسية، مما يسمح بمعايرة معاملات محددة مع الحفاظ على البنية الفيزيائية العامة للعلاقة.

**4- بناء الشبكة العصبية الاصطناعية:**

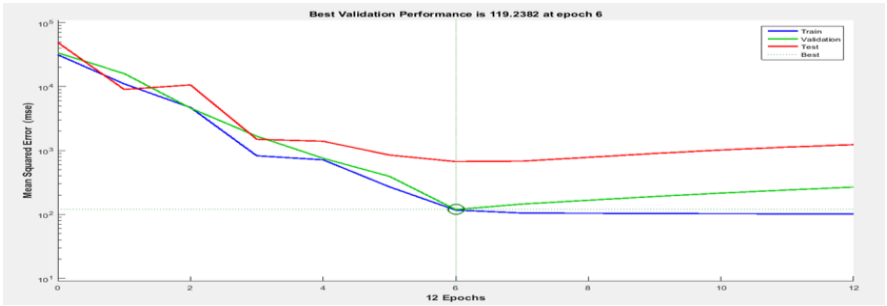
تم تصميم شبكة عصبية اصطناعية متعددة الطبقات من نوع التغذية الأمامية (Feedforward) مع خوارزمية الانتشار العكسي (Backpropagation)، باستخدام بيئة MATLAB تحتوي على (11 وحدة في طبقة الإدخال (تمثل المتغيرات المستقلة) – طبقة خفية واحدة – 18 عصبوناً في الطبقة الخفية – وحدة إخراج واحدة (تمثل مقاومة القص) – بنية الشبكة: (11–18–1))، استُخدمت فيها خوارزمية Levenberg–Marquardt في عملية التدريب، مع دالة تنشيط من نوع Tansig للطبقة المخفية ودالة خطية (Purelin) في طبقة الإخراج، وقد تم اختيار هذه المعلمات بعد سلسلة من التجارب على أعداد مختلفة من العصبونات في الطبقة الخفية، حيث يوضح الجدول (3) عمليات بناء وتدريب الشبكة باستخدام الماتلاب كما يظهر قيم معامل الارتباط R لكل من مرحلة التدريب والتحقق والاختبار، ومن الجدير بالذكر أننا استخدمنا تقنية Early Stopping أثناء التدريب للتغلب على صغر حجم العينة من البيانات، مع تقسيم البيانات إلى (تدريب، تحقّق، اختبار) بنسبة (15–15–70) على التوالي، هذا ويمكن أن نعتبر أن نتائج الشبكة مقبولة إذا كانت قيم معامل الارتباط كبيرة في جميع المراحل (التدريب – التأكد – الاختبار)، ومتقاربة في مرحلتي الاختبار والتأكد من عدم ظهور قيم غير مقبولة في فترة تكرار العمل في مرحلة التأكد، وعند تحقيق هذه الخصائص يمكننا القيام بعملية اختبار الشبكة لإيجاد قيم جديدة، وفي حال عدم الرضا عن أداء الشبكة لتوليد قيم جديدة، يمكننا تدريب الشبكة مرة أخرى Retrain، أو زيادة عدد العصبونات، أو زيادة نسبة بيانات التدريب من العدد الكلي للبيانات.

جدول (3): نتائج تدريب الشبكة لأعداد مختلفة من العصبونات

| عدد العصبونات | R التدريب | R التحقق | R الاختبار | Overall R | التوقف بسبب |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.93745 | 0.89373 | 0.92648 | 0.93242 | تحقق |
| **5** | 0.97598 | 0.96637 | 0.95415 | 0.96522 | تحقق |
| **7** | 0.99028 | 0.9639 | 0.9442 | 0.97298 | تحقق |
| **9** | 0.99264 | 0.96514 | 0.9691 | 0.98222 | تحقق |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| تحقق | 0.98168 | 0.96791 | 0.95133 | 0.99141 | **10** |
| تحقق | 0.95493 | 0.96435 | 0.92692 | 0.99182 | **12** |
| تحقق | 0.98635 | 0.98592 | 0.93695 | 0.99265 | **15** |
| **تحقق** | **0.98306** | **0.96006** | **0.98914** | **0.99002** | **18** |
| تحقق | 0.96977 | 0.95809 | 0.94531 | 0.98273 | **22** |
| تحقق | 0.95882 | 0.94164 | 0.96533 | 0.99394 | **25** |
| تحقق | 0.97068 | 0.9256 | 0.97459 | 0.99126 | **30** |

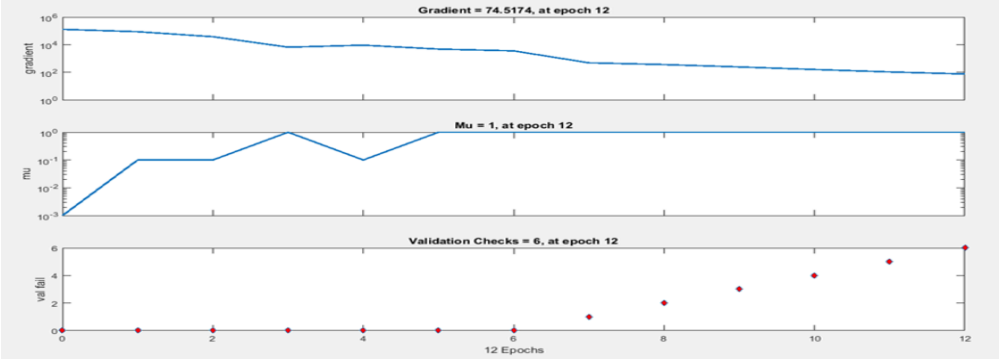
أظهرت النتائج أن 18 عصبوناً حقق أفضل توازن بين دقة التدريب وقابلية التعميم ضمن البيانات المتاحة، إلا أن هذا العدد ليس ثابتاً من الناحية النظرية، بل هو نتيجة معايرة عددية ضمن قاعدة البيانات الحالية، ولتجنب الإفراط في الملاءمة (Overfitting)، تم استخدام تقنية الإيقاف المبكر (Early Stopping) مع مجموعة تحقق منفصلة (Validation Set) تم حجزها عشوائياً بشكل مسبق من بيانات التدريب، وتُظهر النتائج تقارباً في قيم معامل الارتباط بين مراحل التدريب والتحقق والاختبار، مما يشير إلى غياب الإفراط الواضح في الملاءمة ضمن البيانات المتاحة. ومع ذلك، وبسبب الحجم المحدود نسبياً لقاعدة البيانات، فإن هذا لا يلغي الحاجة إلى تحقق خارجي مستقل باستخدام بيانات لم تدخل في بناء النموذج، أما عن أداء الشبكة فيوضح شكل(1) أقل قيمة لمتوسط مربع الخطأ MSE=119.2382 عند (6) دورات تكرارية.




شكل (1): أداء الشبكة العصبية خلال مراحل التدريب

ويظهر الشكل (2) أن المعامل ($M_u = 0.1$) حيث أن $M_u$ هو القيمة الأولية للمعامل μ الذي يدخل في علاقة تحديث الأوزان تبعاً لتغير قيمة الخطأ، ميل تابع الخطأ $Gradient = 74.5174$ عند

عدد تكرارات $Epoch = 12$ والقيمة الأولية للمعامل μ الذي يدخل في تحديث الأوزان تبعاً لتغير قيمة الخطأ المعامل $(M_u = 1)$، وفي الأسفل عدد البارمترات الفعالة (عدد الأوزان والانحيازات) التي ساهمت في تدريب الشبكة $Validation\ Checks = 6$




شكل (2): عدد البارامترات الفعالة للشبكة

ويوضح الجدول (4) نتائج اختبار الشبكة على 15 حالة محجوزة مسبقاً بشكل عشوائي من قاعدة البيانات، حيث لم يتجاوز الخطأ النسبي 5% في جميع الحالات

الجدول (4): نتائج الحساب باستخدام $ANN$ اعتماداً على مدخلات تجارب من المنشورات العلمية[15]...[6]

| م | عرض الجائز Bw mm | ارتفاع الجائز h | العمق الفعال d | مجاز الجائز L span | نسبة التسليح p % | نسبة مجال القص إلى الارتفاع الفعال a/d | القطر الأعظمي da mm | المقاومة المميزة للبيتون | النسبة الحجمية لألياف Vf | عامل الشكل Lf/df | قوة الشد للألياف Ften Mpa | القيمة الحقيقية KN | القيمة المحسوبة KN | الخطأ النسبي % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 85 | 150 | 130 | 1160 | 0.0205 | 3.02 | 9.6 | 30.6 | 0.5 | 133 | 2000 | 22 | 23.13 | 5% |
| 2 | 152 | 455 | 381 | 2136 | 0.0196 | 3.44 | 10 | 38.1 | 1 | 55 | 1100 | 174 | 171.33 | 2% |
| 3 | 152 | 455 | 381 | 2136 | 0.0263 | 3.44 | 10 | 49.2 | 1 | 80 | 1100 | 220 | 225.29 | 2% |
| 4 | 205 | 685 | 610 | 3558 | 0.0152 | 3.5 | 10 | 29.6 | 0.75 | 80 | 1100 | 228 | 220.81 | 3% |
| 5 | 152 | 254 | 221 | 2100 | 0.0239 | 2.5 | 10 | 34 | 0.5 | 60 | 1130 | 65 | 65.66 | 1% |
| 6 | 152 | 254 | 221 | 2100 | 0.0239 | 3.5 | 10 | 34 | 0.5 | 60 | 1130 | 50 | 50.94 | 2% |
| 7 | 150 | 225 | 197 | 1603 | 0.0136 | 2.8 | 20 | 29.1 | 0.5 | 60 | 1260 | 53 | 51.5 | 3% |
| 8 | 300 | 700 | 570 | 5000 | 0.0287 | 2.98 | 18 | 60.2 | 0.75 | 86 | 2200 | 522 | 510.23 | 2% |
| 9 | 140 | 375 | 340 | 1910 | 0.0167 | 2.5 | 19 | 36 | 1 | 60 | 1100 | 155 | 149.09 | 4% |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 120 | 200 | 167 | 720 | 0.0132 | 1.43 | 13 | 23.9 | 1.5 | 60 | 1100 | 85 | 81.58 | 4% |
| 11 | 200 | 300 | 260 | 1800 | 0.0355 | 3.46 | 14 | 46.4 | 0.25 | 65 | 1100 | 111 | 113.91 | 3% |
| 12 | 200 | 300 | 260 | 1800 | 0.0355 | 3.46 | 14 | 43.2 | 0.5 | 65 | 1100 | 121 | 124.19 | 3% |
| 13 | 152 | 304 | 282 | 1524 | 0.0199 | 2.5 | 9.6 | 33.2 | 1 | 100 | 1100 | 146 | 147.58 | 1% |
| 14 | 125 | 250 | 222 | 1200 | 0.0145 | 1.8 | 10 | 30 | 0.5 | 80 | 1225 | 79 | 80.01 | 1% |
| 15 | 120 | 300 | 266 | 1100 | 0.0126 | 1.13 | 20 | 31.9 | 0.6 | 50 | 834 | 146 | 147.08 | 1% |

## 5- تحليل حساسية المتغيرات:

أُجري تحليل الحساسية لتقييم الأهمية النسبية لكل متغير من المتغيرات الإحدى عشر في التأثير على مقاومة القص، ومن أجل ذلك تم توظيف طريقة سوبول العالمية( Sobol' Global Sensitivity Analysis) القائمة على تحليل التباين، حيث تنتج طريقة سوبول بطبيعتها مؤشرين أساسيين لكل متغير $Xi$:

- مؤشر التأثير الرئيسي($Si$): ويقيس بدقة الجزء من التباين الكلي لمقاومة القص الذي يمكن أن يُعزى إلى تذبذب المتغير $Xi$ بمفرده، بمعزل عن أي تأثيرات تفاعلية مع المتغيرات الأخرى.
- مؤشر التأثير الكلي ($STi$): ويُعبِّر عن إجمالي مساهمة المتغير $Xi$ في التباين الكلي، شاملاً تأثيره المنفرد بالإضافة إلى جميع تأثيرات تفاعلاته المشتركة مع أي مجموعة من المتغيرات الأخرى.

كما جرى عملياً تقدير قيم $STi$ من خلال محاكاة مونت كارلو وفق خوارزمية $Saltelli$ (2010)بالاستعانة بنحو $N = 5000$ عينة عشوائية مولَّدة ضمن النطاقات الفعلية للمتغيرات، ومن ثم تمريرها إلى دالة محاكاة الشبكة العصبية لحساب مخرجات القص، وتحليل مصفوفات العينات المتقاطعة لإيجاد التباينات الجزئية المطلوبة.

إن اعتماد $STi$بالتحديد لتمثيل "الوزن النسبي" يُعد اختياراً جيداً لأنه المؤشر الوحيد القادر على إدراك أهمية متغير قد يتوارى تأثيره المباشر خلف تفاعلات قوية والأهم من ذلك، أن مقارنة $STi$ مع $Si$ تُتيح استخلاصاً مباشراً لمدى هيمنة التفاعلات على سلوك النموذج، فكلما كبُر الفرق بينهما دلَّ ذلك على أن المتغير يُمارس تأثيره الأكبر عبر التفاعلات لا بشكل منعزل، وقد تجلّى ذلك عملياً بالتفاعل

التآزري القوي بين $a/d$ و $Vf$ الذي تم رصده، مما يُثبت قدرة هذه المنهجية على تحديد التفاعلات المميزة كمياً وربطها بتفسيرات فيزيائية، ويمثل الجدول (5) قيم $STi$ مضروبةً في 100% لكل متغير مرتبةً تنازلياً، ومصنَّفةً ضمن فئاتها الوظيفية (هندسية – ألياف – مواد – تسليح)، وهي تفسَّر مباشرة على أنها الوزن النسبي للمتغير في حساسية النموذج النهائي، ومن السمات المهمة لهذه المؤشرات أن مجموعها يتجاوز 100% (ليبلغ قرابة 115%) ويعزى ذلك إلى احتساب مساهمات التأثيرات التفاعلية ضمن المؤشرات الكلية للمتغيرات، حيث تُحتسب هذه التفاعلات أكثر من مرة ضمن التأثيرات الكلية، وتؤكِّد هذه النتائج (المُتحقق منها أيضاً بتحليل أوزان الشبكة العصبية (خوارزمية جارسون)) أن العوامل الهندسية (نسبة $a/d$ وأبعاد المقطع) تظل الأكثر هيمنة، يليها تأثير الألياف حجمياً وهندسياً، وهو ما ينسجم مع المبادئ الأساسية لميكانيك التصدع، ويوفر أساساً كمياً متيناً للفهم الفيزيائي للنموذج ولعملية تطوير العلاقة التحليلية التي ستُناقش لاحقاً.

جدول (5): الأهمية النسبية للمتغيرات الإحدى عشر

| الترتيب | المتغير | الوزن النسبي(%) | الفئة | المبرر الرئيسي |
|---|---|---|---|---|
| **1** | $a/d$ | 23.4 | هندسي | يحدد آلية الانهيار |
| **2** | $Vf$ | 19.8 | ألياف | يحدد فعالية التدعيم |
| **3** | $f'c$ | 15.2 | مواد | يمثل متانة الخرسانة |
| **4** | $\rho$ | 12.7 | تسليح | يؤثر على توزيع الإجهادات |
| **5** | $bw$ | 9.3 | هندسي | يحدد مساحة المقطع |
| **6** | $Lf/df$ | 8.5 | ألياف | يؤثر على التماسك |
| **7** | $d$ | 7.1 | هندسي | يحدد ذراع العزم |
| **8** | مقاومة الشد | 6.3 | ألياف | يحدد قدرة الحمل |
| **9** | قطر الحصويات | 4.8 | مواد | يؤثر على تداخل الحصويات |
| **10** | $h$ | 4.2 | هندسي | يؤثر على تأثير الحجم |
| **11** | طول الفتحة | 3.7 | هندسي | يحدد توزيع القص |

**6- تأثيرات التفاعل بين المتغيرات:**

تمت دراسة تأثير قيمة كل من نسبة حديد التسليح الطولي($\rho i$)، وقيمة امتداد القص/عمق العتبة ($a/d$) والمقاومة المميزة للبيتون($f'c$) والنسبة الحجمية للألياف ($Vf$ %) وعرض الجائز ($bw$)على قيمة مقاومة القص في الجوائز الخرسانية غير المسلحة بتسليح قص عرضي (كانات)، ولوحظ أنه بزيادة قيمة ($\rho i$) فإن قيمة مقاومة القص سوف تزداد تدريجياً، وأن نسبة التسليح لها تأثير أوضح بين ($\rho i = 2.3 - 3.4$) حيث تبدأ قيمة مقاومة القص بالتزايد تدريجياً أي أن تأثير ($\rho i$) يكون واضحاً وذلك ناتج من تداخل تأثير العزم مع القص، ولوحظ أيضاً أن زيادة المقاومة المميزة للبيتون($f'c$) تزيد من تحمل الجائز لقوى القص، وهذه النتيجة متوافقة لما ورد في حميع المدونات حيث إن مقاومة القص تتناسب طرديا مع المقاومة المميزة للبيتون($fc'$)، كما أن زيادة كل من النسبة الحجمية للألياف ($Vf$ %) وعرض الجائز($bw$) تزيد من مقاومة القص للجائز، وفي إطار دراسة التفاعل بين العوامل المؤثرة على مقاومة القص، يبرز التفاعل التآزري بين النسبة الحجمية للألياف الفولاذية ($Vf$) ونسبة القص إلى العمق الفعال ($a/d$) باعتباره التفاعل الأكثر هيمنةً وتأثيراً على السلوك الإنشائي للجائز، حيث يتجلى التأثير المشترك في تغيير آليات مقاومة القص وتحسين كفاءة نقل الأحمال، فعندما تكون نسبة $a/d$ منخفضة (أقل من 2.5)، تسيطر آليات القص المباشر، وتكون مساهمة الألياف في ذروتها من خلال تفعيل آليات التجسير المباشر للشقوق والتحكم في انتشارها في هذا النطاق، يؤدي زيادة $Vf$إلى تحسن ملحوظ في مقاومة القص، حيث تعمل الألياف على تعزيز صلابة المنطقة المضغوطة وتحسين انتقال القوى عبر القوس الداخلي بالمقابل، عندما تكون نسبة $a/d$عالية (أكبر من 3.5)، تتحول الهيمنة إلى آليات الانحناء، وتتغير طبيعة مساهمة الألياف نحو التحكم في تشققات الشد وإعادة توزيع الإجهادات في منطقة الشد، هنا يؤدي التفاعل بين $Vf$ و $a/d$ إلى تحسين متانة الجائز وزيادة طاقة الامتصاص قبل الانهيار، مما يحول السلوك من هش إلى لدن، كما يظهر التحليل أن التفاعل بين $Vf$ و $a/d$ ليس خطياً، بل يتميز بمناطق حرجة حيث تكون الاستجابة الإنشائية أكثر حساسية للتغير في أحدهما بوجود الآخر، هذه الديناميكية المعقدة تؤكد ضرورة مراعاة التفاعل التآزري بين هذين المتغيرين في النمذجة التنبؤية والتصميم الإنشائي.

**7- تطوير العلاقة التحليلية**

بعد تدريب نموذج الشبكة العصبية بنجاح، تم استثماره لتطوير علاقة تحليلية مبسطة تأخذ شكل العلاقة التي اقترحها Darwish كقالب أساسي، مع إدخال أربعة ثوابت محسنة (A,B,C,D) تمثل معاملات ضبط تُظهر مدى تأثير العوامل المختلفة في سلوك الخرسانة المسلحة بالألياف الفولاذية.

تعطى الصيغة الرياضية لها بالشكل التالي:

$$\boldsymbol{Vn = \left[A \cdot e \cdot f_{ct} + B \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}\right] \cdot b_w \cdot d + C \cdot v_b} \qquad \textbf{(14)}$$

$$e = \begin{cases} 1 & if\ \frac{a}{d} > 2.8 \quad (15) \\ 2.8\frac{d}{a} & if\ \frac{a}{d} \le 2.8 \quad (16) \end{cases}$$

$$f_{ct} = \frac{f'c}{20 - \sqrt{F}} + D + \sqrt{F} \quad (17)$$

$$F = V_f \frac{L_f}{D_f}\beta \quad (18)$$

$$\mathbf{v_b = 0.41\ \tau V_f \frac{L_f}{D_f}\beta} \quad \textbf{(19)}$$

لتقدير الثوابت المحسنة (A,B,C,D) تم الاعتماد على الشبكة العصبية المدربة لتوليد قاعدة بيانات عددية من مخرجات الشبكة ضمن نطاق البيانات المدروسة (5000 نقطة عبر محاكاة مونت كارلو) غطت كامل نطاقات المتغيرات المدروسة، لم تستخدم النقاط الاصطناعية باعتبارها بديلاً عن النتائج التجريبية، وإنما استخدمت كمرحلة عددية وسيطة لتكثيف تمثيل العلاقة التي تعلمتها الشبكة العصبية داخل المجال التجريبي، ثم تم تمرير هذه النقاط عبر النموذج العصبي للحصول على مقاومة القص المقابلة. بعد ذلك، استخدم الانحدار المتعدد غير الخطي لمعايرة الثوابت الأربعة A,B,C,D لتحقيق أفضل توافق (أقل مجموع لمربعات الأخطاء) بين قيم مقاومة القص المحسوبة من العلاقة المبسطة وتلك المولدة من الشبكة العصبية.

$$\min_{A,B,C,D} \sum_{i=1}^{N} \left(V_{n,i}^{ANN} - V_{n,i}^{model}(A,B,C,D)\right)^2 \qquad (20)$$

أظهرت عملية التحسين أن القيم المثلى هي:

$$\boldsymbol{A = 0.52, B = 10, C = 0.7, D = 1.23}$$

وبذلك يصبح الشكل النهائي للعلاقة المطورة:

$$\boldsymbol{V_n = \left[0.52\,.e\,.f_{ct} + 10\,.\rho\,.\frac{d}{a}\right].b_w\,.d + 0.7\,v_b} \qquad (21)$$

$$\boldsymbol{f_{ct} = \frac{f'c}{20 - \sqrt{F}} + 1.23 + \sqrt{F}} \qquad (22), \qquad \boldsymbol{F = V_f \frac{L_f}{D_f}\beta} \qquad (23)$$

$\boldsymbol{Vn}$: مقاومة القص $(\boldsymbol{kN})$ — $\boldsymbol{A,B,C,D}$: معاملات تجريبية محددة بواسطة $\boldsymbol{ANN}$

$e$: عامل العمل القوسي — $\rho$: نسبة التسليح الطولي

$d/a$: نسبة العمق الفعال إلى بحر القص — $bw$: عرض الويب $(\boldsymbol{mm})$

$d$: العمق الفعال$(mm)$ — $f'c$: مقاومة الضغط للخرسانة$(\boldsymbol{MPa})$

$fct$: مقاومة الشد للخرسانة$(MPa)$ — $F$: عامل الألياف

$Vf$: النسبة الحجمية للألياف$(\%)$ — $Lf/Df$: نسبة الطول إلى القطر للألياف

$\beta$: عامل التماسك (يعتمد على شكل الألياف) — $vb$: مساهمة الألياف في مقاومة القص$(\boldsymbol{kN})$

حيثβ: 0.5 للألياف المستقيمة، 0.75 للألياف المتعرجة، 1.0 للألياف ذات النهايات المعقوفة.

هذه المعادلة تمثل نسخة مطورة من نموذج درويش الأصلي، فقد تم تعديل المعاملات لتعكس تأثير العوامل المختلفة بدقة أعلى، حيث يجمع عامل الألياف $F$ بين النسبة الحجمية للألياف، نسبة الطول إلى القطر، وعامل التماسك، مما يعطي تمثيلاً شاملاً لتأثير الألياف، ويمكن استخدام هذه العلاقة في تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية، خاصة عندما تكون نسبة $a/d$ ضمن النطاق المدروس، وتتميز العلاقة المطورة عن Ashour2 في أنها لا تقتصر على تعديل معامل واحد أو إضافة حد مباشر، وإنما تستخدم نموذج ANN أولاً لتمثيل العلاقة غير الخطية ثم تقوم باشتقاق صيغة تحليلية مبسطة منه.

## 8- تقييم أداء العلاقة المطورة عبر فئات مختلفة من نسبة $a/d$

لضمان فهم أعمق لأداء العلاقة المطورة، ولمعرفة ما إذا كانت دقتها تتأثر باختلاف نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال (a/d) وهو المتغير الأكثر تأثيراً في النموذج كما أظهر الجدول (5) تم تقسيم قاعدة البيانات المكونة من 88 حالة إلى فئتين رئيسيتين بناءً على قيمة النسبة a/d، وذلك وفقاً للحدود الفاصلة التي تستخدمها معظم العلاقات التحليلية والكودات العالمية للتمييز بين آليات الانهيار المختلفة:

- الجوائز ذات نسبة a/d منخفضة :($a/d < 2.5$) وتتميز بسيطرة آليات القص المباشر والعمل القوسي، حيث تلعب الألياف دوراً بارزاً في تجسير الشقوق المائلة.
- الجوائز ذات نسبة a/d مرتفعة :($a/d \geq 2.5$) حيث تسود آليات الانحناء والقص المركب، وتكون مساهمة الألياف أكثر ارتباطاً بالتحكم في تشققات الشد وإعادة توزيع الإجهادات.

وقد حُسبت المعاملات الإحصائية لعامل الأداء لكل فئة على حدة، لكل من العلاقة الأصلية (Darwish)والعلاقة المطورة، كما هو موضح في الجدولين (6) و (7) وذلك لتقييم مدى تحسن الأداء عبر مختلف المجالات، ولمعرفة ما إذا كان التحسن الذي أظهرته العلاقة المطورة متسقاً عبر جميع نطاقات a/d أم أنه يتركز في نطاق معين.

الجدول (6): قيم المعاملات الإحصائية لفئتي a/d للعلاقة الأصليةDarwish

| المعامل الإحصائي | عدد الحالات: ( $a/d < 2.5$ 31) | عدد الحالات: ( $a/d \geq 2.5$ 57) |
|---|---|---|
| المتوسط (Average) | 1.285 | 1.181 |
| الانحراف المعياري (St.Dev) | 0.512 | 0.382 |
| معامل الاختلاف (COV%) | 39.84% | 32.35% |
| معامل الارتباط (R) | 0.81 | 0.87 |
| معامل التحديد ($R^2$) | 0.66 | 0.76 |

يوضح الجدول (6) أن علاقة Darwish الأصلية كانت أكثر دقة واتساقاً في الفئة ذات $a/d \geq 2.5$ ، بينما أظهرت أداءً أقل دقة واتساقاً في الفئة ذات$a/d < 2.5$ ، وهذا يشير إلى أن العلاقة الأصلية تميل إلى المبالغة في تقدير مقاومة القص في الجوائز القصيرة المجاز (حيث تسود آليات القص المباشر والعمل القوسي)، مما يعكس قصوراً في تمثيل مساهمة الألياف في هذه الفئة من الجوائز.

الجدول (7): قيم المعاملات الإحصائية لفئتي a/d للعلاقة المطورة(ANN)

| المعامل الإحصائي | عدد الحالات: ( $a/d < 2.5$ 31) | عدد الحالات: ( $a/d \geq 2.5$ 57) |
|---|---|---|
| المتوسط (Average) | 1.018 | 0.998 |
| الانحراف المعياري (St.Dev) | 0.321 | 0.277 |
| معامل الاختلاف (COV%) | 31.53% | 27.76% |
| معامل الارتباط (R) | 0.86 | 0.89 |
| معامل التحديد ($R^2$) | 0.74 | 0.79 |

يظهر الجدول (7) أن العلاقة المطورة حققت تحسناً ملحوظاً في كلتا الفئتين مقارنة بالعلاقة الأصلية، حيث تم حساب نسبة التحسن الطارئة في كل منهما في الجدول (8)

الجدول (8): نسبة التحسن في المعاملات الإحصائية بين العلاقة المطورة والعلاقة الأصلية لكل فئة

| المعامل الإحصائي | التحسن في فئة $a/d < 2.5$ | التحسن في فئة $a/d \geq 2.5$ |
|---|---|---|
| المتوسط (Average) | 20.8% | 15.5% |
| الانحراف المعياري (St.Dev) | 37.3% | 27.5% |
| معامل الاختلاف (COV%) | 20.9% | 14.2% |
| معامل الارتباط (R) | 6.2% | 2.3% |
| معامل التحديد ($R^2$) | 12.1% | 3.9% |

يكشف الجدول (8) أن التحسن الأكبر الذي أحدثته العلاقة المطورة كان في فئة الجوائز ذات نسبة a/dالمنخفضة ($a/d < 2.5$) حيث تحسن متوسط عامل الأداء بنسبة 20.8%، وتحسن معامل الاختلاف بنسبة 20.9%، وتحسن الانحراف المعياري بنسبة 37.3%. وهذا يؤكد أن المعاملات الجديدة (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23) التي اشتُقت باستخدام ANN كانت أكثر قدرة على تمثيل التفاعل المعقد بين الألياف وآليات القص المباشر والعمل القوسي في الجوائز القصيرة المجاز، وهو المجال الذي كانت العلاقات التقليدية تعاني من قصور في تمثيله بدقة، أما في فئة الجوائز ذات نسبة a/d المرتفعة ($a/d \geq 2.5$)، فقد كان التحسن أقل وضوحاً ولكنه ما زال ملحوظاً، حيث تحسن متوسط عامل الأداء بنسبة 15.5%، وتحسن معامل الاختلاف بنسبة 14.2%. وهذا يعكس أن العلاقة الأصلية كانت بالفعل أكثر دقة في هذه الفئة (كما أظهر الجدول 6)، ولكن العلاقة المطورة تمكنت من تحسين الأداء أيضاً.

### 9- مجال صلاحية العلاقة وحدود التطبيق

العلاقة المطورة مشتقة من قاعدة بيانات محددة، ولذلك يجب استخدامها ضمن المجال التجريبي الذي بني عليه النموذج، ولا يُوصى باستخدام العلاقة في الحالات التي تتجاوز المجالات المدروسة، ومنها:

- مقاومة ضغط الخرسانة خارج نطاق (23.9–60.2) MPa.
- نسبة الألياف خارج نطاق (0.25–1.5)%.
- نسبة a/d خارج النطاق (1.13–4.50).
- الجوائز المزودة بتسليح عرضي (كانات).
- الجوائز T أو الأشكال غير المستطيلة.
- الجوائز المسلحة بألياف FRP أو أنواع أخرى من الألياف غير المدروسة.

كما يجب التنبيه إلى أن العلاقة الحالية لا تمثل نموذجاً للجوائز المزودة بالكانات، إذ لم يدخل تأثير الكانات ضمن متغيرات النموذج، وبالتالي لا ينبغي إضافة مساهمة الكانات إلى القيمة المحسوبة من العلاقة مباشرة، بل يجب استخدام نموذج منفصل يأخذ التسليح العرضي بالحسبان.

## الاستنتاجات(Conclusions)

1. حققت الشبكة العصبية الاصطناعية ($ANN$) بنية (11–18–1) أداءً جيداً (معامل ارتباط R = 0.960 في الاختبار)، وأخطاء أقل من 5%.
2. كشف تحليل الحساسية الكمي أن العوامل الهندسية خاصة نسبة القص إلى العمق الفعال a/dبنسبة (23.4%)، تليها خصائص الألياف النسبة الحجمية $Vf$ بنسبة (19.8%) ومقاومة الخرسانة (15.2%)، هي الأكثر تأثيراً في مقاومة القص، مما يُلزم المصمم بالتركيز على الضوابط الهندسية وخصائص المواد.
3. تم اشتقاق علاقة تحليلية مطورة من صيغة Darwish بثوابت جديدة A=0.52, B=10, C=0.7,D=1.23 مما أدى إلى تحسين في الدقة حيث انخفض معامل الاختلاف (COV) من 35.49% إلى 29.15%، وارتفع معامل التحديد ($R^2$) من 0.72 إلى 0.77.

4. أثبت تحليل التفاعلات وجود تأثير تآزري قوي بين الألياف ونسبة القص $(a/d \times Vf)$، خاصةً في الجوائز قصيرة المجاز $(a/d < 2.5)$ حيث تحسنت دقة العلاقة المطورة بأكثر من 20%.
5. تتحدد صلاحية العلاقة المطورة بدقة ضمن نطاق البيانات المدروسة (جوائز مستطيلة بدون كانات، مقاومة خرسانة $60.2–23.9MPa$، نسبة ألياف 0.25–1.5%، ونسبة $a/d$ من 1.13 إلى 4.50)، ولا يصح تطبيقها خارج هذه الحدود دون تحقق تجريبي مستقل.

## التوصيات(Recommendations)

1. يُوصى بتوسيع قاعدة البيانات لتشمل جوائزT، والعناصر المزودة بتسليح عرضي (كانات)، وأنواعاً أخرى من الألياف (بوليمرية، زجاجية)، وإجراء تحقق خارجي مستقل لتعزيز قدرة النموذج على التعميم.
2. يُوصى بتطوير واجهة برمجية (تطبيق حاسوبي) سهلة الاستخدام تعتمد على العلاقة المطورة، لتسريع تقدير مقاومة القص في المكاتب الهندسية ومراحل التصميم الأولية.
3. يُوصى بإعادة النظر في معادلات الكودات العالمية خاصة ACI 318–19 لتشمل تأثير الألياف بشكل أكثر دقة، خاصة في حالات نسب الألياف العالية أو نسب $a/d$ المنخفضة.
4. يُوصى بإجراء دراسات إضافية تشمل الأحمال الديناميكية والمتكررة، ودراسة التفاعلات ذات الرتب الأعلى بين المتغيرات، مع الأخذ بالاعتبار أن العلاقة المطورة تمثل خطوة بحثية أولية ولا يُوصى باعتمادها مباشرةً في الكود قبل استيفاء شروط التحقق الميداني المستقل.

## المراجع References:

1. Sharma, A.K. Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*, 1986, *83*.
2. Narayanan, R.; Darwish, I.Y.S. Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 1987, *84*, 216–227.

3. Ashour, S.A.; Hasanain, G.S.; Wafa, F.F. Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 1992, *89*.
4. Naik, U.; Kute, S. Span-to-depth ratio effect on shear strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete deep beams using ANN model. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2013, *5*, 29.
5. Khuntia, M.; Stojadinovic, B.; Goel, S.C. Shear strength of normal and high-strength fiber reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 1999, *96*.
6. Singh, B.; Jain, K. An appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams (with Appendix). *ACI Structural Journal*, 2014, *111*.
7. Sahoo, D.R.; Sharma, A. Effect of steel fiber content on behavior of concrete beams with and without stirrups. *ACI Structural Journal*, 2014, *111*, 1157–1166.
8. Shoaib, A.; Lubell, A.S.; Bindiganavile, V.S. Shear response of lightweight steel fiber reinforced concrete members without stirrups. *Materials and Structures*, 2015, *48*, 3141–3157.
9. Anand, R.M.; Sathya, S.; Sylviya, B. Shear strength of high-strength steel fibre reinforced concrete rectangular beams. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, *8*, 1716–1729.
10. Arslan, G.; Keskin, R.S.O.; Ulusoy, S. An experimental study on the shear strength of SFRC beams without stirrups. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, *55*, 1205–1217.
11. Parra-Montesinos, G.J.; Wight, J.K.; Dinh, H.H.; Libbrecht, A.; Padilla, C. *Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups*. University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 2006; p. 39.
12. Rosenbusch, J.; Teutsch, M. Trial beams in shear. *Brite/Euram Project 97-4163 Final Report Sub Task 4.2*. Technical University of Braunschweig: Braunschweig, Germany, 2003; pp. 105–117.
13. Sahoo, D.R.; Bhagat, S.; Reddy, T.C.V. Experimental study on shear-span to effective-depth ratio of steel fiber reinforced concrete T-beams. *Materials and Structures*, 2016, *49*, 3815–3830.
14. Amin, A.; Foster, S.J. Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Engineering Structures*, 2016, *111*, 323–332.

15. Tahenni, T.; Chemrouk, M.; Lecompte, T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2016, *105*, 14–28.