



## Çelik Tel Donatılı Betonların Kırılma Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

### Modelling of the Fracture Parameters of Steel Fiber Reinforced Concretes Using Artificial Neural Networks

Yunus Gündüz<sup>1</sup>, Eyüp Taşkan<sup>1</sup>, Yuşa Şahin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 66900, Yozgat, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 66900, Yozgat, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 16/08/2019

Kabul / Accepted: 13/05/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

#### Öz

Beton basınç kuvvetlerine karşı yüksek direnç göstermekte bununla birlikte çekme kuvvetlerine karşı ise yeterli direnci gösterememektedir. Betonun çekme direncini arttırmak amacıyla içerisine yüksek çekme dayanımına sahip kısa kesilmiş çelik teller katılmaktadır. Çelik tel katılmasıyla betonların çekme dayanımının yanında süneklik ve tokluğunda da artışlar görülmektedir. Çelik tel donatılı beton (ÇTDB)'lar geleneksel donatılı betonlara göre daha sünek bir davranış gösterdiklerinden dolayı bu betonlar tasarlanırken kırılma parametreleri de bir kriter olarak dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında, farklı çelik tel özelliklerine ve miktarına sahip betonların kırılma parametreleri üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Araştırmada, farklı kanca tipi ve dayanıma sahip çelik teller farklı miktarda betonlara katılmıştır. Elde edilen betonlar üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmış ve betonların kırılma parametreleri belirlenmiştir. Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile deneysel araştırma sonucu elde edilen kırılma parametreleri kullanılarak bir modelleme yapılmıştır. Yapılan modelleme sonucu betonların kırılma parametrelerinin YSA yöntemi ile elde edilebileceği ortaya konmuştur.

#### Anahtar Kelimeler

“Beton, Çelik tel, Kırılma Parametreleri, Tokluk, Yapay sinir ağları”

#### Abstract

Concrete exhibits higher strength under compression loads, however, it does not provide sufficient performance under tension loads. Short cut steel fibers are usually added in concrete in order to defeat this disadvantage against tension loads. Besides tension strength, also ductility and toughness of concretes are increased by addition of steel fibers in concrete. Effects of the properties of the fibers on concretes were investigated and some parameters were suggested to use in the design of Steel Fiber Reinforced Concretes (SFRCs). Fracture parameters are taken as a criterion in the design of SFRCs due to their more ductile behavior. In this study, the effect of type and amount of hooked-ended steel fibers on the fracture parameters of concretes was investigated by an experimental research. In mixtures, different types of hooked-ended steel fibers added in different amounts in concretes having different strength class. The three-point bending test was performed on concretes and fracture parameters were determined according to this test. Fracture parameters of SFRCs were modelled based on the experimental results by an Artificial Neural Network (ANN). It is revealed that fracture parameters were successfully predicted by this model.

#### Key Words

“Concrete, Steel fiber, Fracture parameters, Toughness, Artificial neural networks.”

## 1. Giriş

Beton basınç kuvvetlerine karşı dayanımı yüksek bir malzeme olmasına karşın çekme kuvvetlerine karşı yeterli performans sergilememektedir. Betonun bu dezavantajını gidermek için çeşitli biçimlerde ve özellikle lifler beton içerisine katılmaktadır. Bu lifler çelik, plastik, cam ve doğal malzemeler olabilmektedir. Lifler farklı geometrilere üretiltikleri gibi çelik olanlarının dayanımları karbon miktarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Çelik tellerin ana görevi, çatlak yüzlerini köprüleyerek çatlağın açılmasını ve ilerlemesini kontrol etmektir (Yıldırım vd., 2019, Yoo vd., 2014). Köprüleme etkisinin başarılı olması genellikle telin yüzeyden sıyrılma mekanizmasına bağlıdır. Sıyrılma ise sadece tel ve çimento matrisi arasındaki bağın sağlamlığına bağlı olmayıp aynı zamanda çelik telin kanca boyunun uzunluğu ve tipi gibi tel özelliklerine de bağlıdır. Sıyrılma dayanımını arttırmak amacıyla mekanik olarak deforme edilmiş teller düz tellere kıyasla tercih edilmektedir (Banthia&Trottier, 1994, Cunha vd., 2010, Feng vd., 2014, Robins vd., 2002). Lif kullanımının betonların işlenebilirlik özelliğine lif miktarı arttıkça, lif tipinden bağımsız olarak olumsuz etkisi görülmektedir (Korkut vd., 2017).

ÇTDB'ler çok çeşitli alanlarda kullanılmakla beraber endüstriyel zeminlerde, tünel ve şev kaplamalarında ve prefabrike elemanların üretiminde geleneksel donatılı betonların yerine tercih edilebilmektedir (Knapton, 2003, Taşdemir vd., 2002, Taşdemir vd., 2006, Demir, 2009). ÇTDB'lerin normal betonlara göre üstünlükleri başta tokluk ve süneklikte sağladıkları artışlardır. Çelik tellerin betonlara katılmasıyla sağlanan diğer yararlar ise; etkin çatlak kontrolü, dayanıklılığın artması, korozyonun oluşmaması ve işçilikte görülen azalma olarak sayılabilir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Betonların işlenebilirlik ve mekanik özelliklerinin tahmininde ve betona çelik tel gibi ilave edilen katkıların etkilerinin belirlenmesinde çeşitli analitik ve sayısal yöntemlerle modelleme yapılmaktadır (Demirbaş ve Çakır, 2019, Gencel vd., 2013, Saatçi ve Batarlar, 2017, Topçu ve Sarıdemir, 2008, Yaprak ve Karacı, 2009). Beton bileşenlerinin çeşitliliği, dayanımı ve çelik tel özellikleri dikkate alındığında tüm bu etkenlerin değerlendirildiği bir deneysel çalışma yapmak mümkün görülmemektedir. Bu nedenle bir modellemeye ihtiyaç bulunmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen deneysel veriler kullanılarak ÇTDB'lerin kırılma parametreleri yapay sinir ağı yöntemi ile modellenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Çimento

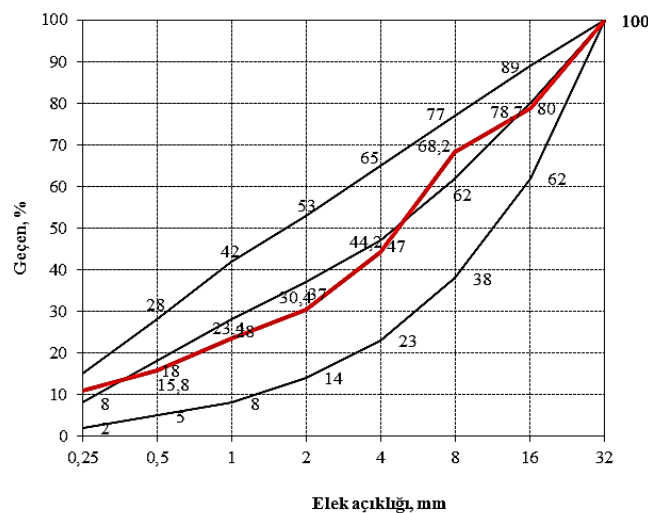
Çalışma kapsamında CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun yoğunluğu  $3,10 \text{ g/cm}^3$ , inceliği (Blaine)  $3320 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. Çimentoya ait kimyasal bileşim Tablo 1'de verilmektedir. Çimento kimyasal bileşimi analizleri, aynı zamanda çimentoyu tedarik eden, Votorantim Yozgat Çimento Fabrikası tarafından yapılmıştır.

**Tablo 1.** Çimentonun kimyasal bileşimi (%)

CaO	Serbest CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	Cl	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Çöz. kalıntı	Kızd. kaybı
62,30	0,69	3,25	2,6	0,01	1,11	0,23	18,7	5,48	3,01	0,84	2,57

#### 2.1.2. Agregalar

Çalışma kapsamında kalker esaslı agregalar kullanılmıştır. Agregaların yoğunlukları kırma kum, kırma taş I ve kırma taş II için sırasıyla  $2,63$ ,  $2,70$  ve  $2,71 \text{ g/cm}^3$  olarak elde edilmiştir. Agregalara ait karışım granülometri eğrisi ve referans eğriler Şekil 1'de verilmektedir.



**Şekil 1.** Agregalar karışımına ait granülometri eğrisi

### 2.1.3. Kimyasal Katkı

Çalışma kapsamında, polikarboksilik eter esaslı (BASF Glenium Sky™ 650 M) yüksek oranda su azaltıcı/yeni ikinci nesil süperakışkanlaştırıcı (SA) özellikte bir beton katkısı kullanılmıştır.

### 2.1.4. Silis dumanı

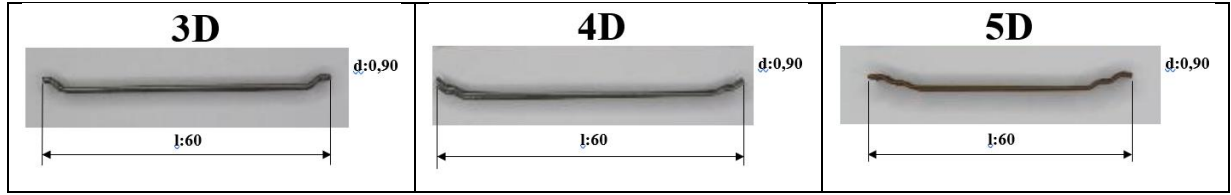
Ukrayna menşeli silis dumanı (SD) kullanılmıştır. SD'nin yoğunluğu 2,23 g/cm<sup>3</sup>'tür ve kimyasal bileşiminde %85 oranında SiO<sub>2</sub> bulunmaktadır.

### 2.1.5. Çelik tel

Çalışmada, 6 cm uzunluğunda ve 0,9 mm çapında çelik teller kullanılmıştır. Çelik tellerin kanca tipleri ve dayanımları farklılık göstermektedir. Çelik teller Bekaert İzmit Çelik Kord San. Tic. A. Ş'den temin edilmiştir. Çelik tellerin özellikleri Tablo 3'te verilmektedir. Çelik tellere ait görseller Şekil 2'de sunulmaktadır.

**Tablo 2.** Çelik tellere ait özellikler

Çelik Tel Tipi	Boy, l (mm)	Çap, d (mm)	Narinlik (l/d) (uzunluk/çap)	Çekme Dayanım, f <sub>su</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
3D	60	0,90	65	1160
4D				1500
5D				2300



\*Ölçüler mm olarak yazılmıştır.

**Şekil 2.** Çelik teller

## 2.2. Karışımlar

Deneysel çalışma için 3 farklı su/çimento (S/Ç) oranında beton karışımları seçilmiş ve çelik teller 4 farklı oranda bu karışımlara katılmıştır. Beton karışımları ve bileşen miktarları Tablo 3'te verilmektedir.

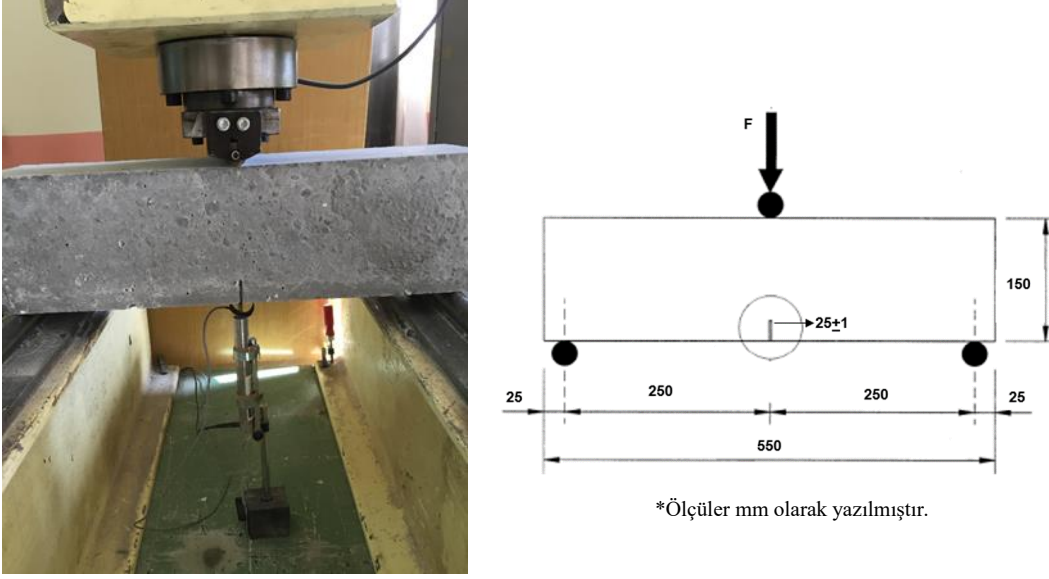
**Tablo 3.** Beton karışımları ve bileşen miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

S/Ç	Tel İçeriği	Çimento	Su	Kum	No I	No II	SA	SD
0,60	0			892	515	479		
	15			890	514	478		
	30	300	180	887	512	476	2,0	-
	45			885	511	475		
	60			883	510	474		
0,45	0			856	494	459		
	15			853	493	458		
	30	400	180	851	491	457	1,6	-
	45			849	490	455		
	60			846	489	454		
0,30	0			847	489	455		
	15			845	488	454		
	30	450	149	843	487	452	5,4	45
	45			840	485	451		
	60			838	484	450		

### 2.3. Deney Programı ve Hesaplamalar

#### 2.3.1. Eğilmede çekme dayanımı tayini

Eğilmede çekme dayanımı tayini deneyleri TS EN 14651 standardına uygun olarak yapılmıştır. Eğilme deneyinde standarda uygun olarak 150 mm genişlik ve yüksekliğe sahip 550 mm uzunlukta kiriş numuneler kullanılmıştır. Numunelerin orta noktasından  $25 \pm 1$  mm derinliğinde çentikler açılmıştır. Yükleme, sehim kontrollü geri beslemeli bir yükleme çerçevesinde 0,2 mm/dk yükleme hızında yapılmıştır. Yükleme düzeneği Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Yükleme düzeneği

#### 2.3.2. Kırılma parametreleri

Kırılma enerjisi: Kırılma enerjisi değerleri RILEM (1985) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Bu yöntemle göre kırılma enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$G_F = \frac{W_0 + m(1-k^2)g\delta}{B(D-a)} \quad (1)$$

Burada  $W_0$  yük-sehim eğrisi altında kalan alan,  $m$  numune ağırlığı (mesnetler arasında kalan kısım),  $g$  yerçekimi ivmesi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\delta$  açıklık ortasındaki sehim,  $B$  numune genişliği,  $D$  numune yüksekliği,  $a$  çentik derinliği,  $k$  ise numune boyutlarına bağlı bir katsayıdır ( $k=(U/S)-1$  ve  $U$  numunenin boyu,  $S$  ise mesnetler arası uzunluktur).

Beton için önerilen kırılma mekanizması modellerinden Hillerborg (1976)' un önerdiği modelde betonun sünekliğinin bir ölçüsü olarak karakteristik boy ( $l_{ch}$ ) tanımlanmaktadır. Eğilme deneyi ile elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılarak hesaplanan kırılma enerjilerine bağlı olarak  $l_{ch}$  aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_t^2} \quad (2)$$

Burada  $G_F$  kırılma enerjisi,  $E$  elastisite modülü ve  $f_t$  ise tek eksenli çekme dayanımıdır (çalışmada  $f_t$  yerine yarmada çekme dayanımı kullanılmıştır.).

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze betonlar üzerinde çökme (TS EN 12350-2), VeBe (TS EN 12350-3) ve birim ağırlık (TS EN 12350-6) deneyleri yapılmıştır. Taze betonlara ait sıcaklık değerlerinin  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  aralığında sabit kalması sağlanmıştır. Çelik tel kullanılmayan karışımların çökme değerleri S4 (16-21 cm) kıvam sınıfında belirlenmiştir. Çelik tel eklenmesiyle karışımların çökme değerlerinde düşmeler görülmüştür. Çalışmada sertleşmiş beton özellikleri ve kırılma parametrelerinin modellenmesine odaklanılmıştır, ilgi duyulduğu takdirde taze beton deney sonuçlarının tamamına Gündüz (2015)'den ulaşılabilir.

### 3.2. Sertleşmiş Beton Deneysel Sonuçları

#### 3.2.1. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı

Karışımlara ait mekanik özellik deney sonuçları aşağıdaki Tablo 4'te verilmektedir. Tablo 'da basınç dayanımları sonuçlarının değerlendirilmesinden sonra TS EN 206 standardına göre karışımların sahip oldukları beton dayanımı sınıfları ve bu sınıflardaki betonların ortalama elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı değerleri sunulmaktadır. S/Ç oranının azalmasıyla mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür. Çelik tel kullanılmasının basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerine belirgin bir etkisi görülmezken, karışımlarda çelik tel miktarının artmasıyla yarmada çekme dayanımlarında belirgin olarak artışlar elde edilmiştir. Çalışmada sertleşmiş beton özellikleri ve kırılma parametrelerinin modellenmesine odaklanılmıştır, ilgi duyulduğu takdirde sertleşmiş beton deney sonuçlarının tamamına Gündüz (2015)'den ulaşılabilir.

**Tablo 4.** Mekanik özellik deney sonuçları

S/Ç	Beton Dayanım Sınıfı	Elastisite Modülü (GPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
0,60	C40/50	30	3,0
0,45	C50/60	35	3,5
0,30	C80/95	40	4,0

#### 3.2.2. Kırılma parametreleri

Kırılma parametrelerinin hesaplanmasında Madde 2.3.1'de anlatılan yöntemle göre 5 mm sehim değerine kadar ölçülen yük-sehim grafikleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen eğri altında kalan alan ve kırılma parametreleri değerleri yazarlara ait daha önceki çalışmalarda (Gündüz vd., (2016a), Gündüz vd., (2016b) ve Gündüz vd., (2018)) yayımlanmıştır. Bu çalışmada ise bu değerler kullanılarak kırılma parametrelerinin modellenmesi yapıldığından ilgili sonuçlar referans verilerek Tablo 5'te sunulmaktadır. Karışım kodlamalarında kanca tipi (3D, 4D ve 5D) ve tel miktarları değerleri kullanılmıştır. Örneğin, 4DV30 kanca tipi 4D olan ve 30 kg/m<sup>3</sup> tel miktarına sahip karışımı göstermektedir. Lif miktarının artmasının yük-sehim eğrisi altında kalan alanı artırdığı görülmüştür. Kırılma parametreleri üzerinde ise lif miktarının yanında lif kanca tipinin etkisinin olduğu söylenebilir.

**Tablo 5.** Yük-sehim eğrisi altında kalan alan ve kırılma parametreleri değerleri

Karışım kodu	S/Ç:0,60			S/Ç:0,45			S/Ç:0,30		
	$W_0$ kN.mm	$G_F$ N/m	$I_{ch}$ mm	$W_0$ kN.mm	$G_F$ N/m	$I_{ch}$ mm	$W_0$ kN.mm	$G_F$ N/m	$I_{ch}$ mm
Kontrol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3DV15	9,20	564	1,42	13,75	809	2,35	8,7 <sup>1</sup>	496 <sup>1</sup>	0,83 <sup>1</sup>
3DV30	12,45	736	1,62	15,50	900	2,50	23,20	1311	1,87
3DV45	21,40	1209	2,58	27,70	1529	3,46	27,80	1553	1,99
3DV60	46,00	2523	5,74	19,30	1094	2,77	40,20	2215	2,89
4DV15	15,00	870	2,26	17,60	1012	3,06	9,1 <sup>2</sup>	550 <sup>2</sup>	0,9 <sup>2</sup>
4DV30	18,10	1035	2,42	20,10	1141	3,15	22,65	1283	1,84
4DV45	26,78	1499	3,14	29,10	1615	3,91	28,30	1582	2,15
4DV60	42,30	2330	4,57	37,40	2059	5,21	43,80	2386	3,30
5DV15	16,00	926	2,24	39,15	2159	5,50	27,10	1521	2,51
5DV30	20,35	1155	2,60	49,50	2702	5,88	38,10	2108	2,98
5DV45	22,50	1257	2,61	49,95	2727	5,68	38,65	2137	2,88
5DV60	68,75	3724	7,20	50,65	2766	5,90	60,30	3292	4,07

## 4. Kırılma Parametrelerinin Modellenmesi

### 4.1. Yapay Sinir Ağları Modellerinin Yapısı

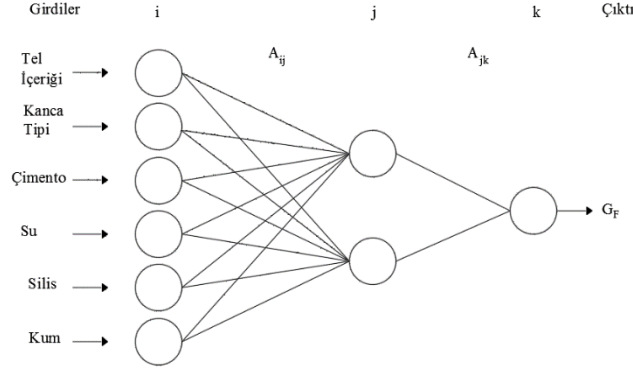
Bu çalışmada giriş tabakası, ara tabaka ve çıkış tabakasından oluşan 3 katmanlı yapay sinir ağları (YSA) modeli oluşturulmuştur. Deneysel araştırma sonucu elde edilen toplam 36 adet verinin 27 tanesi modeli oluşturma (eğitime) aşamasında, 9 tanesi de modelin test aşamasında kullanılmıştır. Test aşamasında kullanılan veriler, deney veri sayısının %25'i kadar ve rasgele seçilmiştir.

<sup>1</sup> Numuneler ortalama 1,7 mm sehim değerinde göçmüştür.

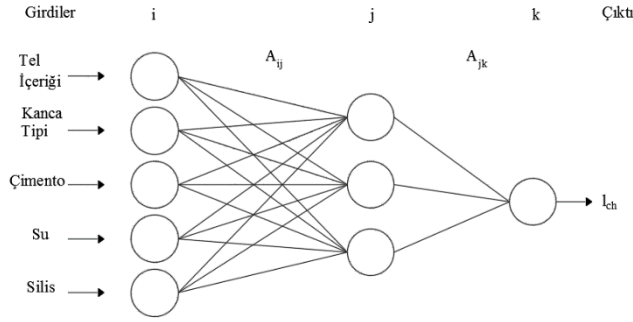
<sup>2</sup> Numuneler ortalama 3,5 mm sehim değerinde göçmüştür.

Kırılma enerjisi ( $G_F$ )'nin tahmin edildiği modelde, girdi olarak tel içeriği, tel kanca tipi (tel dayanımı), çimento, su, silis ve kum miktarları kullanılmıştır. Yapılan denemelerde ara tabaka hücre sayısı 2 olarak belirlenmiştir.

Karakteristik boy ( $l_{ch}$ )'un tahmin edildiği modelde, girdi olarak tel içeriği, tel kanca tipi (tel dayanımı), çimento, su ve silis miktarları kullanılmıştır. Yapılan denemelerde ara tabaka hücre sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Kırılma enerjisi ve karakteristik boy için oluşturulan YSA modellerine ait yapılar sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Kırılma Enerjisi YSA Modeli Yapısı



Şekil 5. Karakteristik Boy YSA Modeli Yapısı

$p$  örneğinde eğitime aşamasın için toplam hata ( $H_p$ ) gerçek çıktılar ve tahmin edilen değerler arasındaki kareler farkına bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$H_p = \sum_{k=1}^N (G_{pk} - \zeta_{pk})^2 \quad (3)$$

Burada  $N$  iterasyon sayısı,  $G_{pk}$  ve  $\zeta_{pk}$  ise sırası ile  $p$  örneği için gerçek ve tahmin edilen çıktı değerleridir. Bağlantı aralıkları,  $A_{ij}$ , aşağıdaki eşitlik ile yenilenmektedir.

$$A_{ij}^{yeni} = A_{ij}^{eski} - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T H_p \quad (4)$$

Burada hataların ağırlıklara göre türevlerini içeren Jacobian matrisi  $J$  ile, birim matris  $I$  ile ve yakınsama hızını etkileyen bir parametre ise  $\mu$  ile ifade edilmektedir.

#### 4.2. YSA Modeli Sonuçları

Yapılan modellerde girdi verileri olarak tel içeriği (Tİ), kanca tipi (tel dayanımı) (TD), çimento (Çİ), su, silis (Si), kum ve kırma taş (KTAş) miktarları kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak girdi kombinasyonları oluşturulmuştur. Kombinasyonlar oluşturulurken her bir girdinin kırılma enerjisi ve karakteristik boy ile yaptıkları korelasyon değerleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Girdilerin kırılma enerjisi ve karakteristik boy ile korelasyonları Tablo 6'da verilmektedir.

**Tablo 6.** Girdilerin Kırılma Enerjisi ve Karakteristik Boy ile Korelasyonları

Girdi	Kırılma Enerjisi Korelasyonu	Karakteristik Boy Korelasyonu
Tel içeriği (Tİ)	0,663	0,531
Tel Dayanımı (TD)	0,543	0,458
Çimento (Çİ)	0,153	-0,145
Su	-0,109	0,400
Silis (Sİ)	0,107	-0,403
Kum	-0,245	-0,002
Kırma Taş (KTAş)	-0,244	-0,003

Ağırlıkları ayarlamak için başka tekniklerden daha başarılı ve hızlı olan Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmıştır. Gizli katmandaki birimlere ait aktivasyon fonksiyonu logaritma sigmoid (logsig) olarak seçilmiş ve performansının diğer fonksiyonlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Çıkış fonksiyonu olarak doğrusal fonksiyon (purelin) kullanılmıştır.

Karşılaştırma kriteri olarak, ortalama karesel hata (OKH), ortalama mutlak hata (OMH) ve belirginlik katsayısı ( $R^2$ ) kullanılmıştır. OKH ve OMH aşağıdaki eşitlikler ile bulunur;

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{i_{Deneyse}} - Y_{i_{Model}})^2 \quad (5)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{i_{Deneyse}} - Y_{i_{Model}}| \quad (6)$$

Burada N, toplam veri sayısını  $Y_i$  ise kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada kırılma enerjisi tahmininde en düşük ortalama karesel hata (OKH) ve en düşük ortalama mutlak hata (OMH) değerleri 2 ara tabaka hücre sayısı ve 300 iterasyon kullanılarak oluşturulan model ile elde edildi. Karakteristik boy tahmininde ise en düşük OKH ve en düşük OMH değerleri 3 ara tabaka hücre sayısı ve 250 iterasyon kullanılarak oluşturulan model ile elde edilmiştir. Çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA) modelinin kombinasyonları Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir. Bu kombinasyonların yapılan denemeler sonucunda en düşük hata ve en yüksek belirginlik katsayıları veren ara tabaka hücre sayısı ve değerler Tablolarda gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Kırılma Enerjisi Tahmini İçin ÇKYSA Modeli, Kombinasyonlar, Hatalar ve Belirginlik Katsayıları

Girdiler	Ara Tabaka Hücre Sayısı	İterasyon Sayısı	OKH	OMH	$R^2$
Tİ ve TD	2	30	62916	216	0,901
Tİ, TD ve Çİ	6	100	44897	173	0,944
Tİ, TD, Çİ ve Su	3	20	26737	136	0,949
Tİ, TD, Çİ, Su ve Si	1	200	31806	149	0,947
<b>Tİ, TD, Çİ, Su, Si ve Kum</b>	<b>2</b>	<b>300</b>	<b>13551</b>	<b>94</b>	<b>0,966</b>
Tİ, TD, Çİ, Su, Si, Kum ve KTAş	3	10	38394	158	0,924

**Tablo 8.** Karakteristik Boy Tahmini İçin ÇKYSA Modeli, Kombinasyonlar, Hatalar ve Belirginlik Katsayısı

Girdiler	Ara Tabaka Hücre Sayısı	İterasyon Sayısı	OKH	OMH	$R^2$
Tİ ve TD	2	100	0,53	0,68	0,701
Tİ, TD ve Çİ	4	200	0,31	0,46	0,806
Tİ, TD, Çİ ve Su	4	200	0,15	0,31	0,922
<b>Tİ, TD, Çİ, Su ve Si</b>	<b>3</b>	<b>250</b>	<b>0,09</b>	<b>0,25</b>	<b>0,967</b>
Tİ, TD, Çİ, Su, Si ve Kum	4	200	0,28	0,40	0,886
Tİ, TD, Çİ, Su, Si, Kum ve KTAş	4	150	0,27	0,40	0,837

Yapılan denemeler sonucu kırılma enerjisi tahmini için, 2 ara tabaka hücre sayısı ve bu hücre sayısı için 300 iterasyonun en düşük hataları ve en yüksek belirginlik katsayısını verdiği görülmüştür. Karakteristik boy tahmini için, 3 ara tabaka hücre sayısı ve bu hücre sayısı için 250 iterasyonun en düşük hataları ve en yüksek belirginlik katsayısını verdiği görülmüştür. Denemeler sonucu kırılma enerjisi tahmininde 5, karakteristik boy tahmininde ise 6 ara tabaka hücre sayısından fazla ara tabaka hücre sayısı ve iterasyon sayısının bu modeller için etkili olmadığı belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ve modelde bulunan değerlerin karşılaştırılması Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

**Tablo 9.** Kırılma Enerjilerinin Deneysel Sonuçları ile Modelde Bulunan Değerlerin Karşılaştırılması

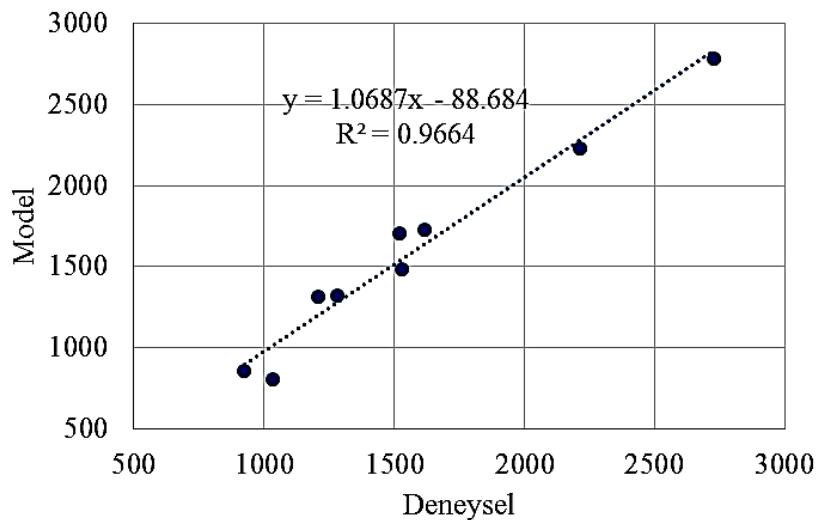
Kırılma Enerjisi, $G_F$ , N/m		
Deneysel	Model Sonucu	Deneysel/Model
1209	1317	0,91
1615	1727	0,935
1521	1704	0,89
1529	1483	1,03
1035	804	1,29
2215	2225	0,995
926	862	1,07
2727	2781	0,98
1283	1321	0,97

**Tablo 10.** Karakteristik Boyun Deneysel Sonuçları ile Modelde Bulunan Değerlerin Karşılaştırılması

Karakteristik Boy, $l_{ch}$ , mm		
Deneysel	Model Sonucu	Deneysel/Model
2,58	2,30	1,11
3,91	3,89	1,00
2,51	2,61	0,96
3,46	2,91	1,18
2,42	2,06	1,17
2,89	2,67	1,07
2,24	2,32	0,96
5,68	6,03	0,94
1,84	1,56	1,17

Kırılma enerjisi değerleri için deneysel ve model sonuçları arasındaki belirginlik katsayısı 0,9664 olarak elde edilmiştir. Modele ait doğru grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Modelin denklemleri aşağıda verilmektedir.

$$y = 1.0687x - 88.684 \quad (7)$$

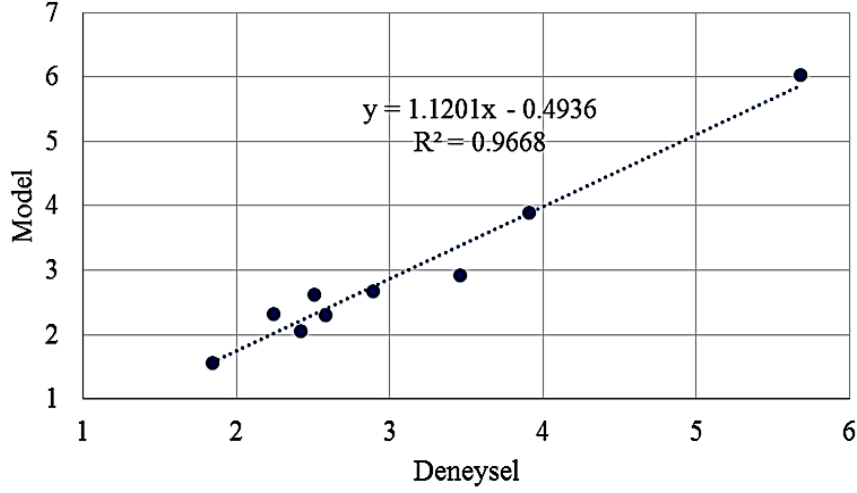


**Şekil 6.** Kırılma Enerjisi Modelinin Doğru Grafiği



Karakteristik boy değerleri için deneysel ve model sonuçları arasındaki belirginlik katsayısı 0.9668 olarak elde edilmiştir. Modele ait doğru grafiği Şekil 7’de verilmiştir. Modelin doğru denklemi ise aşağıda verilmiştir.

$$y = 1.1201x - 0.4936 \quad (8)$$



Şekil 7. Karakteristik Boy Modelinin Doğru Grafiği

## 5. Sonuç

Deneysel çalışma sonucunda farklı S/Ç oranlarında betonlar üretilmesiyle normal (C40/50) ve yüksek (C80/95) dayanıma sahip betonlar elde edilmiştir. Beton dayanımının artmasıyla diğer mekanik özellikler olan elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarının da arttığı görülmüştür. Elastisite modülü değerlerinin artmasında lif tipi ve içeriğinin etkisi görülmezken, yarmada çekme dayanımı değerleri üzerinde lif tipi ve içeriğinin belirgin etkisi görülmüştür.

Eğilme dayanımı deneyi sonucunda çelik tel kullanılmasıyla her bir dayanım sınıfındaki betonlar için yük sehim eğrisi altında kalan alan değerlerinin arttığı bununla beraber kırılma parametresi değerleri olan kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerlerinde de belirgin artışlar elde edilmiştir. Kırılma parametresi değerleri üzerinde özellikle tel içeriği ve tel tipinin etkisi olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında üretilen farklı beton sınıflarına sahip karışımlar üzerinde yapılan deneylerde, kırılma parametreleri üzerinde çimento ve su miktarlarının ve bunlara bağlı olarak S/Ç oranının korelasyonlarının daha düşük olduğu görülmemiştir. Bununla birlikte, kırılma parametreleri üzerinde tel miktarı ve tel dayanımı (tel kanca tipi) değerlerinin etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Kırılma enerjisi modelinde Tİ, TD, Çİ, Su, kum miktarı ve SD'nin de yer aldığı kombinasyon en iyi sonucu verirken, karakteristik boy modellemesinde ise kum miktarı sonucu olumsuz etkilemiştir.

Çelik tel donatılı betonların kırılma parametreleri yapay sinir ağları kullanılarak düşük hata ve daha yüksek belirginlik katsayısına sahip model ile elde edilmiştir. Modelleme sonucunda kırılma parametreleri üzerinde sırasıyla Tel İçeriği (Tİ), Tel Dayanımı (TD), Çimento (Çi) ve Su değerlerinin daha etkili olduğu görülmüştür.

## Teşekkür

Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Proje Koordinasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2015FBE/T212).

## Referanslar

Banthia, N., & Trotter, J. (1994). Concrete reinforced with deformed steel fibers, part 1: bond-slip mechanisms. *ACI Materials Journal*, 91, 435–446. doi: 10.14359/9765

Cunha, V. M. C. F., Barros, J.A.O., & Sena-Cruz, J. M. (2010). Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (1), 1–9. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000001

Demir, İ. (2009). Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1, 2.

- Demirbaş, D.M., & Çakır, D. (2019). Yapay sinir ağı eğitim algoritmaları ile iki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda termal gerilme analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 442-450. doi: 10.29137/umagd.485604
- Feng, J., Sun, W. W., Wang, X. M., & Shi, X. Y. (2014). Mechanical analyses of hooked fiber pullout performance in ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 403–410. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.049
- Gencil, O., Ozel, C., Köksal, F., Barrere, G.M., Brostow, W., & Polat, H. (2013). Fuzzy logic model for prediction of properties of fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials Science*, 19 (2), 203-215. doi: 10.5755/j01.ms.19.2.4439
- Gündüz, Y. (2015). Çelik tel donatılı betonlarda kırılma parametrelerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi. Yüksek lisans tezi. Yozgat Bozok Üniversitesi.
- Gündüz, Y., Taşkan E., & Şahin, Y. (2016a). Using hooked-end fibres on high performance steel fibre reinforced concrete. The 2016 International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials, Siena, Italy. doi: 10.2495/HPSM160241
- Gündüz Y., Taşkan E., & Şahin, Y. (2016b). The effect of type of hooked-end on the mechanical properties of steel fiber reinforced concretes. 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey.
- Gündüz, Y., Taşkan, E., Köksal, F., & Şahin, Y. (2018). Farklı kanca tipine sahip çelik tel donatılı betonların özellikleri ve optimum tasarımı. *Hazır Beton*, 147, 79-86.
- Hillerborg, A., Modeer, M., & Peterson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growths in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6, 773–782. doi: 10.1016/0008-8846(76)90007-7
- Knapton, J. (2003). *Ground bearing concrete slabs*. Thomas Telford, London.
- Korkut, F., Türkmenoğlu, Z.F., Taymuş, R.B., & Güler, S. (2017). Çelik ve sentetik liflerin kendiliğinden yerleşen betonların taze ve mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, 560-570.
- Rilem 50-FMC committee fracture mechanics of concrete. (1985). Draft recommendation. *Materials and structures*, 18 (106), 285–290.
- Robins, P., Austin, S., & Jones, P. (2002). Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures*, 35 (251), 434–442.
- Saatçi, S., & Batarlar, B. (2017). Çelik fiber katkılı etriyesiz betonarme kirişlerin davranışı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32:4, 1143-1154. doi: 10.17341/gazimmfd.369512
- Taşdemir, M.A., & Bayramov F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İtü dergisi/d*, Cilt 1, Sayı 2, 125-144.
- Taşdemir, M.A., İlki, A., & Yerlikaya, M. (2002). Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures. *Proceedings of HYDRO, International Conference of Hydropower and Dams*, Antalya, Turkey.
- Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E., & Yerlikaya, M. (2006). Endüstriyel zemin betonları. *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul.
- Topçu, İ.B., & Sarıdemir, M. (2008). Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science*, 41, 305–311. doi: 10.1016/j.commatsci.2007.04.009
- Yaprak, H., & Karacı, A. (2009). Polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarının yapay sinir ağları ile tahmini. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1, 2.
- Yıldırım, T., Felekoğlu, T.K., Gödek, E., Keskinateş, M., Felekoğlu, B., & Önal, O. (2019). Çimento esaslı lifli kompozitlerin dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile çoklu çatlak davranışının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34:1, 479-493. doi: 10.17341/gazimmfd.416508
- Yoo, D. Y., Shin, H. O., Yang, J. M., & Yoon, Y. S. (2014). Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*, 58, 122–133. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.081