



Etriyesiz FRP Boyuna Donatılı Betonarme Kirişlerin ($a/d > 2.5$) Kesme Davranışları

Shear Behaviors of FRP Longitudinally Reinforced Concrete Beams Without Stirrups ($a/d > 2.5$)

Saruhan KARTAL¹

¹ Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/12/2023

Kabul / Accepted: 12/01/2024

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

Öz

Yüksek korozyon dayanımına sahip olan FRP donatıların (enine ve boyuna donatı) kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak çelik donatılara kıyasla düşük elastisite modülü değerine sahip olan FRP donatılar betonarme kirişlerin çatlama dayanımını azaltmaktadır. Bu çalışmada temel amaç $a/d > 2.5$ olan ve kesme donatısı bulunmayan FRP boyuna donatılı kirişlerin kesme davranışlarını ve dayanımlarını incelemektir. Bu kapsamda literatürde bulunan 149 deney verisi kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuştur. Literatürde sıklıkla kullanılan yönetmelikler ve modeller ile kesme dayanımları tahmin edilmiştir. Kesme dayanımını etkileyen değişkenler araştırılmıştır. Ayrıca, kesme donatısı bulunmayan FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme tasarımı için yeni bir model önerilmiştir. Mevcut yönetmelik ve modellere göre önerilen model ile, deneysel sonuçlara daha yakın tahminler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“FRP donatı, betonarme kiriş kesme davranışı, a/d oranı, beton kesme dayanımı”

Abstract

The use of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) reinforcements, both transversely and longitudinally, is becoming increasingly widespread due to their high corrosion resistance. However, FRP reinforcements, with a lower modulus of elasticity compared to steel reinforcements, contribute to a reduction in the cracking strength of reinforced concrete beams. The main aim of the present study is to investigate the shear behavior and strength of FRP longitudinally reinforced beams ($a/d > 2.5$) without shear reinforcements. To achieve this, a database was established using 149 experimental data available in the literature. Shear strengths were predicted with commonly used existing codes and models in the literature. Variables affecting shear strength were investigated. Additionally, a new model for the shear design of FRP-reinforced reinforced concrete beams without shear reinforcements was proposed. The proposed model yielded closer predictions to experimental results compared to existing codes and models.

Key Words

“FRP reinforcement, shear behavior of reinforced concrete beams, a/d ratio, shear strength of concrete”

1. Giriş

Çelik donatının korozyonu, mevcut betonarme yapıların hizmet ömürlerini kısaltmakta ve yüksek bakım-onarım maliyetlerine sebep olmaktadır. Ancak, lif takviyeli polimerler (FRP), yüksek korozyon direncine, hafifliğe ve yüksek çekme dayanımına sahiptir. Buna bağlı olarak, bu malzemeler betonarme yapı elemanlarında enine ve boyuna donatı olarak önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmakta ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Kocaoz vd. (2005), Ali vd. (2015), Ali vd. (2019)). FRP donatılar üretildiği lif tipine göre isimlendirilmektedir. Cam elyaf (GFRP), bazalt (BFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP) en yaygın olarak bilinen tiplerdir.

Son yıllarda, FRP çubuklarla takviye edilmiş betonarme elemanların kesme davranışı birçok çalışmanın odak noktası olmuştur. Bu kapsamda, FRP donatılı betonarme yapıların kesme kuvvetlerine karşı tasarımı için birçok standart mevcuttur. Yönetmelikler, betonarme kirişlerde kayma gerilmesi ne kadar küçük olursa olsun tasarımda etriye kullanılmasını zorunlu kılmakta olup kesme dayanımı için temel iki bileşenin katkısını hesaba dahil etmektedir. Bunlar enine donatıların (etriyelerin) ve betonun katkılarıdır. Literatürde FRP donatılı kesme çalışmaları etriyesiz ve etriyeli olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Öncelikle etriyeli kiriş davranışının anlaşılmasına katkı sağlaması bakımından etriyesi bulunmayan FRP donatılı betonarme kirişlerin davranışının anlaşılması ve betonun kesme katkısının tam olarak belirlenmesi önem arz etmektedir.

Etriyesiz betonarme kirişlerde kesme transferini sağlayan beş temel mekanizma şu şekilde ifade edilebilir: 1) çatlamamış beton içindeki kesme gerilmeleri; 2) agrega kenetlenmesi; 3) boyuna donatının kaldıraç etkisi; 4) kemer etkisi; ve 5) çatlaklar tarafından doğrudan iletilen kalıcı çekme gerilmeleri. Geleneksel betonarme yönetmelikleri genellikle bu beş mekanizmayı betonun kesmeye olan katkısı (V_c) başlığı altında toplar. FRP donatılar (özellikle de GFRP donatılar) çeliğe göre daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Bu da çelik donatılı kirişlere göre eşdeğer yük altında daha geniş ve derin çatlakların meydana gelmesine sebebiyet vermektedir (Barris vd. (2017)). FRP donatılı kirişlerdeki daha geniş ve derin çatlaklar; beton basınç derinliğini azaltır, agregalar arasındaki kenetlenmeyi azaltır ve eğik çatlaklar boyunca iletilen gerilmeleri azaltır. Bu azalmaları hesaba katmak için bazı yönetmelikler, FRP ve çelik elastisite modülü arasındaki oranı yansıtan bir terim içerecek şekilde beton kesme dayanımı önermektedir (JSCE (1997); BISE (1999); ISIS (2007)). Ayrıca FRP çubukların çeliğe göre önemli ölçüde daha düşük enine dayanımına sahip olmaları, FRP donatılı kirişlerde boyuna donatı kaldıraç etkisini azaltmaktadır. Hatta bu katkı bazı yönetmeliklerde ihmal edilmektedir (ACI 440.1R-15 (2015)).

Kesme açıklığının boyuna donatı etkili derinliğine oranı (a/d) yapısal davranış üzerinde önemli etkileri söz konusudur. a/d oranının 7 değerinden büyük olması durumunda, düşük kesme kuvvetlerine karşılık kesme açıklığının büyük olması nedeniyle büyük eğilme momenti değerlerine ulaşmakta olup kiriş eğilme kapasitesine ulaşmaktadır. a/d oranının 2.5 ile 7 arasında olması durumunda, eğik çekme (kesme) kırılması neticesinde taşıma gücüne ulaşmakta olup davranış gevrekleşmektedir. a/d oranının 2.5 değerinden küçük olması durumunda ise gergili kemer davranışı gözlemlenmektedir. Gergili kemer davranışında yük ve mesnet noktası arasında bir basınç çubuğu oluşmakta olup eğik çatlak oluşmasına rağmen beton ezilene kadar kiriş yük almaya devam etmektedir. Bu durum da kirişin kesme kapasitesi artış gösterse de kesme açıklığının düşük olması nedeniyle yüksek donatı oranına sahip kirişlerde eğilme momenti kapasitesine ulaşılmadan gevrek bir kırılma gerçekleşir. Bu kapsamda çalışmada $2.5 < a/d < 7$ olan kirişlerin kesme davranışları irdelenmiştir.

Kesme açıklığının boyuna donatı etkili derinliğine oranı (a/d oranı) 2.5'tan büyük olan etriyesiz FRP donatılı kirişlerle gerçekleştirilmiş çalışmalarda önemli sonuçlar elde edilmiştir. Ali vd. (2021) çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizi yöntemi ile kesme dayanımları için kapsamlı yeni bir model önermiştir. Yönetmelikler içinde deneysel sonuçlara en yakın tahminlerin CSA S806-12 (2012) ile elde edildiğini, ancak ACI 440.1R-15 (2015) ile oldukça güvenli tarafta kalan tahminler gerçekleştirildiğini ifade edilmiştir. Elghandour vd. (2023) CFRP donatılar kullanarak etriyesiz kirişlerin kesme davranışlarını nümerik olarak incelemiş ve parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kirişlerin kesme dayanımları için yeni bir ifade önermiştir. El Zareef vd. (2021) literatürde yer alan verileri kullanarak mevcut yönetmelikleri değerlendirmiş ve kesme dayanımı için yeni ifade geliştirmiştir. Deneysel sonuçlara en yakın tahminlerin CSA S806-12 (2012) ile elde edildiğini ve ACI 440.1R-15'in (2015) ise oldukça güvenli tarafta kalan tahminler gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Kara ve Ashour (2014) CFRP boyuna donatılı betonarme kirişleri test ederek kesme dayanımı ile boyut etkisi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Ayrıca literatürde yer alan verilerden yararlanarak mevcut kesme tasarım ifadelerini değerlendirmiş ve yeni bir ifade geliştirmiştir. Alguhi ve Tomlinson (2021) literatürde yer alan deney verilerini kullanarak mevcut yönetmelik ve modellerin kesme dayanımlarını değerlendirmiştir. CSA S806-12 (2012) yönetmeliği ile Park and Choi (2017) modeli ile gerçekleştirilen tahminlerin deneysel verilerle en uyumlu olduğunu göstermiştir. Alam ve Gazder (2020) literatürde yer alan deney verilerini kullanarak kesme dayanımları için geliştirilmiş regresyon sinir ağı ile yeni bir model geliştirmiştir. Deneysel verilere en yakın tahminlerin CSA S806-12 (2012) ile ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Mevcut çalışmanın temel amacı, a/d oranı 2.5 değerinden büyük olan etriyesiz FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışlarının belirlenmesi ve tasarımda kullanılmak üzere beton kesme dayanımı için yeni bir ifade önermektir. Bu kapsamda, toplamda 149 adet etriyesiz FRP donatılı betonarme kirişten oluşan kapsamlı bir deneysel veri tabanı oluşturularak öncelikle literatürde sıklıkla kullanılan yönetmelikler ve mevcut modeller, test edilen kirişlerin kesme dayanımını hesaplamak için kullanılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Daha sonra, kesme dayanımı için yeni bir model önerilmiştir.

2. Deneysel Veri Tabanı

Çalışmada testleri gerçekleştirilmiş 149 adet FRP boyuna donatılı etriyesiz betonarme kirişten ($a/d > 2.5$) oluşan deneysel bir veri tabanı oluşturulmuştur. Kirişlerde üç farklı tipte FRP donatılar (Bazalt (BFRP), Karbon (CFRP) ve Cam (GFRP)) kullanılmıştır. Testler üç nokta veya dört noktali eğilme altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm deneysel çalışmadan elde edilen veriler kesme kırılması neticesinde taşıma gücüne ulaşan elemanlara aittir. Kesme dayanımını etkileyecek olan parametreler değerlendirmelerde dikkate alınmıştır. Bu parametreler şunlardır: (1) donatı oranı (ρ_f); (2) donatı etkin derinliği (d); (3) kesme açıklığının donatı etkili derinliğine oranı (a/d); (4) FRP donatıların elastisite modülü (E_f); (5) beton basınç dayanımı (f_c); ve (6) kiriş genişliği (b_w). Oluşturulan veri tabanına göre beton basınç dayanımı 24.10 ile 79.60 MPa arasında, donatı etkili derinliği 146 ile 937 mm arasında, kiriş genişliği 114 ile 1000 mm arasında, a/d oranı 2.5 ile 7 arasında, donatı oranı %0.12 ile %3.89 arasında ve FRP boyuna donatıların elastisite modülü ise 32 ile 141.40 MPa arasında değişmektedir. Tablo 1’de çalışmada kullanılan veri tabanına ait detaylar sunulmuştur.

Tablo 1. Deneysel veri tabanı ile ilgili parametre detayları

Çalışma	n	FRP tipi	f_c (MPa)	d (mm)	b_w (mm)	a/d	ρ_f (%)	E_f (GPa)
Jumaa ve Yousif (2019)	12	BFRP	42.2-73.4	234-635	200	2.60-2.62	0.71-2.69	58
Issa vd. (2016)	6	BFRP	35.9	165-170	300	5.70-7.00	0.8-3.89	48-53
Tomlinson ve Fam (2015)	3	BFRP	56.5-60.0	245-270	150	4.10-4.50	0.39-0.85	70
Ashour ve Kara (2014)	6	CFRP	37.0-35.0	170-370	200	2.70-5.90	0.12-0.52	141.4
El-Sayed vd. (2006)	3	CFRP	43.6-63.0	326	250	3.10	1.71-2.20	134-135
El-Sayed vd. (2006)	3	CFRP	43.6-50.0	326	250	3.10	0.87-1.72	128-134
El-Sayed vd. (2005)	3	CFRP	40.0	161-165	1000	6-6.2	0.39-1.18	114
Kaszubska vd. (2017)	6	CFRP	34.1-43.2	310	130	3.1-3.7	0.72-1.54	120
Kaszubska vd. (2017)	13	GFRP	30.1-37.1	356-379	150	2.9-3.1	0.99-1.91	52
Matta vd. (2013)	10	GFRP	29.5-59.7	146-883	114-457	3.1	0.12-0.24	41-43.2
Bentz vd. (2010)	6	GFRP	35-46	194-937	450	3.3-4.1	0.51-2.54	40.8
Ashour (2006)	6	GFRP	28.9-50.2	163-263	150	2.5-4.1	0.45-1.15	32
El-Sayed vd. (2006)	3	GFRP	43.6-63	326	250	3.1	1.71-2.2	42
El-Sayed vd. (2006)	3	GFRP	43.6-50	326	250	3.1	0.87-1.71	39-42
El-Sayed vd. (2005)	5	GFRP	40	154-162	1000	6.2-6.5	0.86-2.63	40
Gross vd. (2003)	30	GFRP	36.3-79.6	224-226	152-279	4.1	1.11-2.27	40.3
Tariq vd. (2003)	6	GFRP	37.3-43.2	325-346	160	2.8-3.5	0.72-1.54	42
Tureyen vd. (2002)	4	GFRP	39.7-42.5	360	457	3.4	0.36-1.92	37.6-40.5
Alkhrdaji vd. (2001)	3	GFRP	24.1	279-287	178	2.6-2.7	0.77-2.3	40
Yost vd. (2001)	18	GFRP	36.3	225	178-279	4.1	1.11-2.27	40.3

n - deney elemanı sayısı

3. Beton Kesme Dayanımı (V_c) Hesabında Kullanılan Yönetmelik ve Modeller

Oluşturulan veri tabanında yer alan deney elemanlarının tamamının kesme dayanımları bu bölümde yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yönetmelik ve modeller aracılığı ile tahmin edilmiştir. Bu bölümde, bu yönetmelik ve modeller özetlenmiştir.

3.1. Yönetmelikler

3.1.1. ACI 440.1R-15 (2015)

Betonun kesmeye katkısı (V_c) için Tureyen ve Frosh (2003) tarafından geliştirilen ifade (Denklem (1)) ACI 440.1R-15 (2015) tarafından önerilmektedir. Bu denklemde donatı oranı aksel rijitliği, elastik tarafsız eksen derinliği (kd) ile hesaplara dahil edilmiştir.

$$V_c = 0.4 \sqrt{f_c} b_w d (kd) \quad (1)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2)$$

k , çatlama dönüştürülmüş kesit tarafsız eksen derinliğinin donatı etkili derinliğine (d) oranı olup dikdörtgen kesitler için Denklem (2) aracılığı ile hesaplanmaktadır. n_f ($n_f = E_f/E_c$) elastisite modülleri arasındaki modül oranı, b_w kiriş genişliğini ve ρ_f donatı oranını göstermektedir.

3.1.2. CSA S806-12 (2012)

Betonun kesmeye katkısı (V_c) için Razaqpur ve Isgor (2006) tarafından geliştirilmiş olan ifade (Denklem (3)) CSA S806-12 (2012) yönetmeliği tarafından kullanılmaktadır. Denklem (4)’te; moment-kesme etkileşimi katsayısı (k_m), boyuna donatı aksel rijitliği katsayısı (k_r), boyut etkisi katsayısı (k_s), ve kemer davranışı etki katsayısı (k_a) dikkate alınmıştır.

$$V_c = 0.05 \lambda \phi_c k_m k_r k_s k_a (f_c)^{1/3} b_w d_v \quad (3)$$

$$k_m = \left(\frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/2} \leq 1$$

$$k_r = 1 + (\rho_f E_f)^{1/3}$$

$$k_s = \left(\frac{750}{450 + d} \right) \leq 1 \quad (4)$$

$$k_a = \left(\frac{2.5 V_f}{M_f} d \right) \leq 1$$

λ , beton yoğunluğu katsayısını, ϕ_c , beton için dayanım katsayısını, V_f yük katsayıları yardımıyla hesaplanmış kesme kuvvetini, M_f yük katsayıları ile hesaplanmış eğilme momentini ve d , ise kesme donatı etkili derinliğini simgelemektedir.

3.1.3. ISIS-M03-07 (2007)

ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliği tarafından betonun kesme dayanımı (Denklem (5)) boyut etkisine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Çelik donatı elastisite modülü ($E_s = 200$ GPa) olarak alınması önerilmektedir.

$$V_c = \begin{cases} 0.2 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f / E_s} & d \leq 300 \text{ mm} \\ \left(\frac{260}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d \sqrt{E_f / E_s} & d > 300 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

3.1.4. CNR DT203-06 (2006)

CNR DT203-06 (2006) yönetmeliği $1.3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \leq 1$ olmak koşulu ile betonun kesme katkısı için Denklem (6)'yı önermektedir. k_d

boyut etkisi katsayısıdır ve d değeri mm cinsinden ifade edilmektedir (Denklem (7)). τ_r tasarım kesme gerilmesini (Denklem (8)) ve f_t betonun karakteristik çekme dayanımını simgelemektedir.

$$V_c = 1.3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \tau_r k_d (1.2 + 40 \rho_f) b_w d \quad (6)$$

$$k_d = 1.6 - \frac{d}{1000} \geq 1 \quad (7)$$

$$\tau_r = 0.25 f_t \quad (8)$$

3.2. Modeller

Bu bölümde, etriyesiz FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları için sıklıkla kullanılan modellere yer verilmiştir. Tüm modellerde, beton katkısı için boyuna donatının aksel rijitliği ve a/d oranı hesaplamalarda dikkate alınmaktadır.

3.2.1. Nehdi vd. (2007)

Nehdi vd. (2007) etriyesiz FRP donatılı kirişler ile gerçekleştirilen verileri kullanarak kesme dayanımlarını için yeni bir ifade önermiştir (Denklem (9)). Denklem (9) a/d oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

$$V_c = \begin{cases} 2.1 \left[f_c \rho_f \frac{E_f d}{E_s a} \right]^{0.3} b_w d & \frac{a}{d} \geq 2.5 \\ 2.1 \left[f_c \rho_f \frac{E_f d}{E_s a} \right]^{0.3} b_w d \times \frac{2.5d}{a} & \frac{a}{d} < 2.5 \end{cases} \quad (9)$$

3.2.2. Kara (2011)

Kara (2011) etriyesiz FRP donatılı kirişler ile gerçekleştirilen deney verilerini kullanarak kesme dayanımlarını için kullanılacak yeni bir ifade geliştirmiştir (Denklem (10)).

$$V_c = \left[6.8 \sqrt[3]{\frac{d}{a} f_c \rho_f \frac{E_f}{E_s}} \right]^{1/3} b_w d \quad (10)$$

3.2.3. Ali vd. (2021)

Ali vd. (2021) çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizi ile deney verilerini kullanarak etriyesiz FRP donatılı kirişlerde beton kesme dayanımı için yeni bir ifade önermiştir (Denklem (11)).

$$V_c = 0.35 \lambda_{sh} \left(E_f \rho_f \right)^{1/4} \left(f_c \right)^{1/4} \left(\frac{1}{1 + 0.005d} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{a} \right)^{\lambda_a} b_w d \quad (11)$$

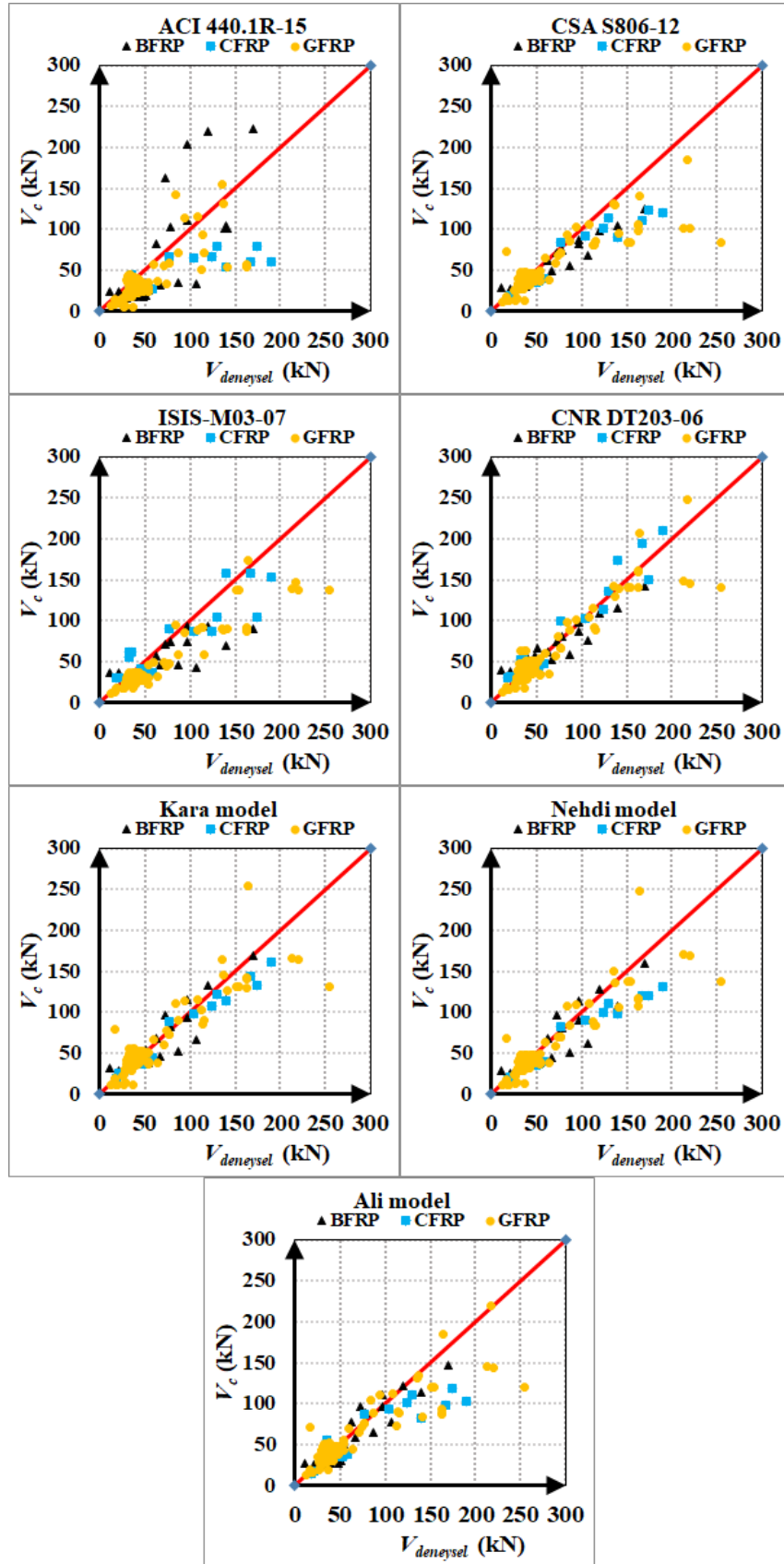
λ_{sh} , en kesit şekil faktörü olarak tanımlanmıştır. Dikdörtgen kesitler için 1 değerini alması önerilmiştir. λ_a ifadesi ise kesme mekanizması faktörü olarak ifade edilmiştir. a/d oranının 2.5 tan büyük olması durumunda $\lambda_a = 1$ olarak alınması önerilmektedir.

4. Kesme Dayanımı Tahminleri

Çalışmada veri tabanında yer alan tüm deney elemanlarının kesme dayanımları mevcut yönetmelikler ve modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Beton yoğunluğu ve diğer malzeme katsayıları 1 olarak alınmıştır. Şekil 1'de deneysel ve tahmin edilen (V_c) kesme dayanımları gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 2'de gerçekleştirilen tahminlere ait deneysel kesme dayanımının tahmin edilen dayanıma oranı ($V_{deneysel}/V_c$) ve tahminlere ait istatistiksel verilere yer verilmiştir. Değerlendirmeler gerçekleştirilirken varyasyon katsayısı (COV) ve ortalama mutlak hata (AAE) verileri kullanılmıştır. COV standart sapmanın ortalamaya oranı olarak tanımlanırken AAE ise Denklem (12) ile hesaplanmıştır.

$$AAE = \frac{1}{n} \sum \frac{|V_{deneysel} - V_c|}{V_{deneysel}} \times 100 \quad (12)$$

Tüm tahminler güvenli tarafta kalacak şekilde kesme dayanımlarını tahmin etmiştir. Deneysel verilere en yakın tahminler CNR DT203-06 (2006) yönetmeliği (ortalama=1.02, COV=8, AAE=32.57) ve Kara (2011) modeli (ortalama=1.04, COV=11, AAE=21.72) ile gerçekleştirilmiştir. ACI 440.1R-15 (2015) yönetmeliği ise oldukça güvenli tarafta kalan tahminler (ortalama=1.59, COV=71, AAE=44.56) gerçekleştirmiştir.



Şekil 1. Deneysel ve tahmin edilen kesme dayanımları

5. Parametreler ve Önerilen Model

5.1. Beton Basınç Dayanımı

Kesme donatısız kirişlerde kırılma, eğik çatlakların oluşur oluşmaz veya eğik çatlak oluşuktan hemen sonra meydana gelmektedir. Eğik çatlaklar, betonun çekme gerilmesinin betonun çekme dayanımını aştığı durumlarda yani asal çekme gerilmelerine dik yönde meydana gelir. Betonun çekme dayanımı, betonun basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak kabul edilir (f_c). CSA S806-12 (2012), Kara (2011) betonun çekme dayanımı $f_c^{1/3}$ olarak kabul edilirken ACI 440.1R-15 (2015), ISIS-M03-07 (2007), CNR DT203-06 (2006) yönetmeliklerinde ise f_c 'nin karekökünün alınması gerekmektedir. Nehdi vd. (2007) ve Ali vd. (2021) modellerinde ise sırasıyla $f_c^{0.3}$ ve $f_c^{1/4}$ alınması önerilmiştir. Deneysel verilere en yakın sonuçlar yönetmelikler içerisinde $f_c^{1/2}$ ifadesini kullanan CNR DT203-06 (2006) ile ve $f_c^{1/3}$ ifadesinin yer aldığı Kara (2011) modeli ile elde edilmiştir.

5.2. FRP Donatı Eksenel Rijitliği

Betonun kesme dayanımı, FRP boyuna donatı oranı arttıkça artış, azaldıkça azalış eğilimi göstermektedir. Bu durum düşük donatı oranına sahip olan kirişlerde, yüksek donatı oranına sahip olanlara kıyasla daha geniş ve derin çatlakların oluşması ile açıklanabilir. Daha geniş çatlaklar, çatlamış beton yüzeyindeki kalıcı çekme gerilmelerini ve agrega kenetlenmesini azaltarak beton kesme dayanımının azalmasına neden olurken daha derin çatlaklar ise beton basınç derinliğini azaltarak çatlamamış betonun kesme dayanımına olan katkısını azaltmaktadır. Ayrıca, donatı oranındaki artış boyuna donatı kaldıraç etkisinin artmasına ve buna bağlı olarak çatlak oluşumunun sınırlanması nedeniyle kesme dayanımının artmasını sağlamaktadır.

Eksenel rijitlik, donatı oranına ve FRP donatı elastisite modülü parametrelerine bağlıdır. Donatı oranı ve elastisite modülü parametreleri, ACI 440.1R-15 (2015)'te kd ifadesi içerisinde, CSA S806-12 (2012) ve Kara modelinde (2011) ise $(E_f \rho_f)^{1/3}$ şeklinde yer almaktadır. Nehdi vd. (2007) ile Ali vd. modelleri (2021) ise sırasıyla $(E_f \rho_f)^{0.3}$ ve $(E_f \rho_f)^{1/4}$ ifadelerini kullanmaktadır. Diğer yönetmelik ve modellerde ise her parametre için farklı üs ifadeleri yer almaktadır. ISIS-M03-07 (2007) elastisite modülü için kareköklü bir ifadeye yer verirken donatı oranı parametresini kesme dayanımı hesabına dahil etmemektedir. Kesme hesaplarında CNR DT203-06 (2006) ise $(E_f^{1/2} \rho_f)$ ifadeleri yer almaktadır. CNR DT203-06 (2006) ile önerilen modelde elastisite modülü ve donatı oranı için farklı üs değerlerinin kullanımının neticesinde en yakın tahminlere ulaşılabildiği gösterilmektedir.

5.3. a/d Oranı

Kesme açıklığının boyuna donatı etkili derinliğine oranı (a/d), FRP donatılı beton kirişlerinin kesme dayanımını önemli ölçüde etkiler. a/d oranına bağlı olarak, FRP boyuna donatılı kirişler farklı kesme davranışına sahiptir. a/d oranının 2.5'tan büyük veya eşit olduğu durumlarda, kemer etkisinin bu kirişlerin kesme dayanımına ve davranışına olan katkısı ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak a/d 'nin 2.5'ten küçük olduğu durumlarda, kemer etkisi kesme dayanımına önemli katkı sağlamaktadır. CSA S806-12 (2012) yönetmeliğinde a/d oranının 2.5 değerinden küçük olduğu durumlarda hesaba dahil edilir. ACI 440.1R-15 (2015), CNR DT203-06 (2006) ve ISIS-M03-07 (2007) yönetmeliklerinde a/d oranı kesme dayanımında dikkate alınmamaktadır. Nehdi vd. (2007) ve Ali vd. (2021) modelleri, a/d oranının 2.5 sınır değerinden küçük ya da büyük olma durumuna bağlı olarak kesme dayanımları için farklı ifadeler önermektedir. Her iki modelde de a/d oranının 2.5 değerinden büyük olması durumunda a/d oranının üssü için sırasıyla -0.3 ve -1 değerlerini almaktadır. Kara (2011) ise herhangi bir koşula bağlı olmaksızın a/d oranının üssü -1/9 olarak kabul etmiştir. Bu durum, Kara (2011) modeli ile CSA S806-12 (2012) yönetmeliğine göre daha yakın tahminlere ulaşılmalarının nedenlerinden biri olarak gösterilebilir.

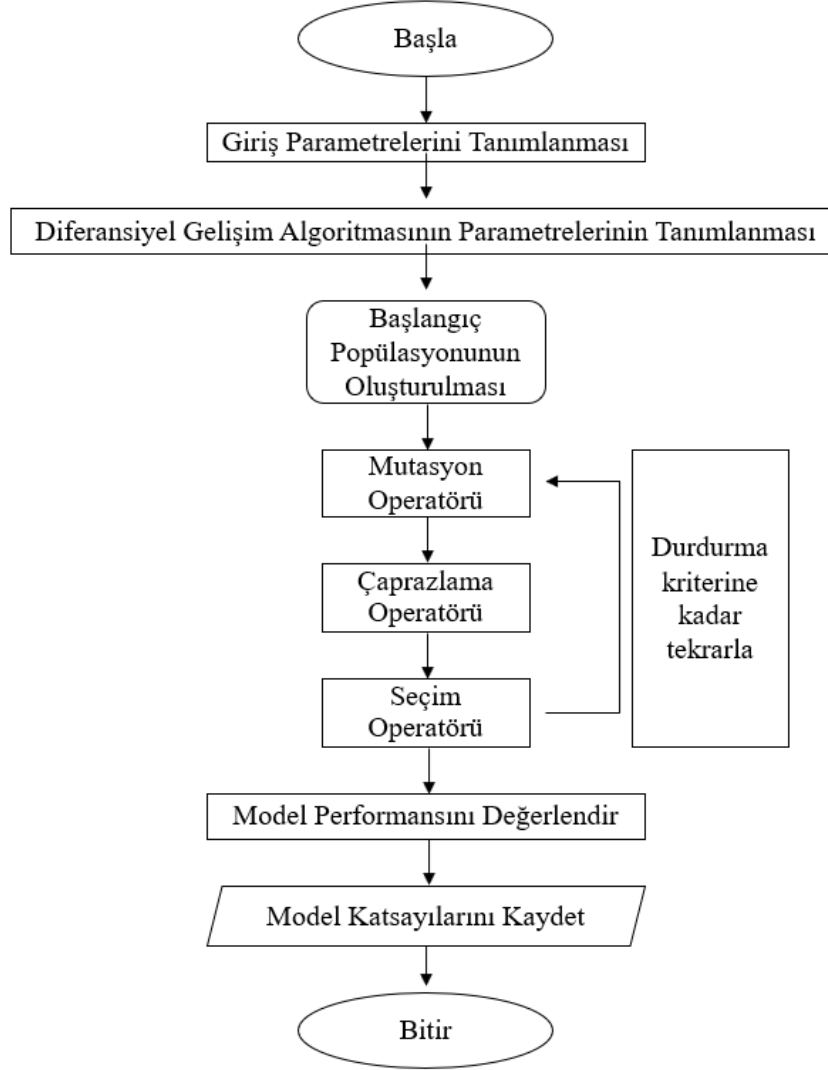
5.4. En Kesit Ölçüleri

Tüm yönetmelik ve modellerde ($b_w d$) ifadesi yer almakta ve genel olarak b_w ve d değerlerinin artması kesme dayanımını artırmaktadır. Ancak boyutların büyümesi ile elemanlardaki kusur miktarı da artacağından bazı yönetmelik ve modellerde boyutun büyümesiyle dayanımın azalması arasında ilişki kuran ifadeler yer verilmiştir. CSA S806-12 (2012) ve ISIS-M03-07 (2007) yönetmelikleri, $d > 300$ mm durumu için, CNR DT203-06 (2006) yönetmeliği ise $d < 600$ mm durumu için d 'ye bağlı boyut etkisi faktörü önermektedir. ACI 440.1R-15 (2015) yönetmeliği ile Kara vd. (2011) ve Nehdi vd. (2007) modelleri boyut etkisini dikkate almazken Ali vd. (2021) modeli herhangi bir koşula bağlı olmaksızın boyut etkisini d 'ye bağlı olarak ifade etmektedir. Boyut etkisinin dikkate alınması deneysel verilere daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

5.5. Önerilen Model

Mevcut çalışmada, veri tabanında yer alan deneysel kesme dayanımlarının tahminleri için bir yapay zekâ algoritması aracılığı ile a/d oranı 2.5'tan büyük olan etriyesiz FRP boyuna donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları tahmin edilmiştir. Diferansiyel Gelişim Algoritması aracılığı ile farklı tahmin modelleri kullanılmıştır. Kullanılan algoritmaya ait akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Deneysel kesme dayanımlarına en yakın tahminleri gerçekleştirecek En iyi istatistiksel verilere (ortalama, COV ve AAE) ulaşmayı amaç fonksiyonu olarak kullanılan bu algoritma ile Denklem (13)'te verilen model kullanılarak deneysel verilere en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu modelde; beton basınç dayanımı için $f_c^{1/2}$ (ACI 440.1R-15 (2015), ISIS-M03-07 (2007), CNR DT203-06 (2006)) veya $f_c^{1/3}$ (CSA S806-12 (2012), ve Kara (2011)) olması tercih edilmiştir. Eksenel rijitliği sağlayan parametreler için (E_f ve ρ_f) ise CNR

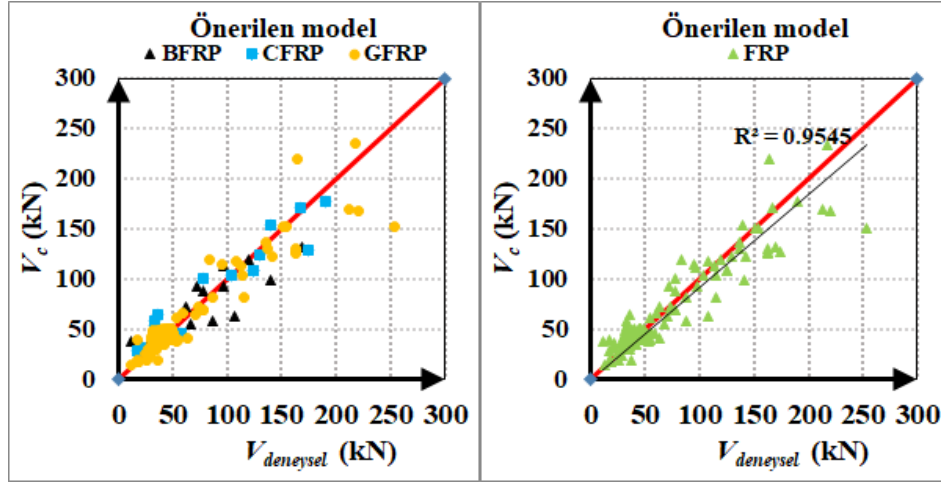
DT203-06'e (2006) benzer olarak ayrı katsayılar öneren yaklaşım kullanılmıştır. Modelde, Kara (2011) modeline benzer olarak a/d oranı ve Ali vd. (2021) modeline benzer olarak boyut etkisi parametreleri herhangi bir koşula bağlı olmaksızın yer almıştır. En iyi sonuçlar Denklem (14)'e göre elde edilmiştir. Şekil 3'te, Denklem (14) ile tahmin edilen kesme dayanımları ile buna karşılık gelen deneysel verilere yer verilmiştir. Tüm modeller ve yönetmeliklere göre deneysel verilere en yakın sonuçlar bu model aracılığı ile elde edilmiştir (Tablo 2). $V_{deneysel}/V_c$ değerlerinin ortalaması 0.99, COV değeri %6 ve AAE değeri %20.01 olarak elde edilmiştir. En iyi sonuçların elde edilmesi, modeller ve yönetmeliklerde yer alan parametrelerin iyi bir biçimde incelenmiş olması ve önerilen modelin buna bağlı olarak oluşturulmuş olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. Kullanılan algoritmaya ait akış şeması

$$V_c = x_1 \cdot f_c^{x_2} \cdot E_f^{x_3} \cdot \rho_f^{x_4} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{x_5} \cdot \left(\frac{1}{x_6 + d}\right) \cdot b_w \cdot d \quad (13)$$

$$V_c = 0.115 \cdot f_c^{1/3} \cdot E_f^{0.386} \cdot \rho_f^{0.15} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{-0.214} \cdot \left(\frac{1}{1379 + d}\right) \cdot b_w \cdot d \quad (14)$$



Şekil 3. Önerilen model kullanılarak tahmin edilen ve deneysel kesme dayanımları

Tablo 2. Tahminlere ait istatistiksel veriler

Yönetmelikler /Modeller	Tüm veri tabanı (n=149)			BFRP donatılı kirişler veri tabanı (n=21)		CFRP donatılı kirişler veri tabanı (n=21)		GFRP donatılı kirişler veri tabanı (n=147)	
	Ortalama*	COV, %	AAE, %	Ortalama*	AAE, %	Ortalama*	AAE, %	Ortalama*	AAE, %
ACI 440.1R-15 (2015)	1.59	71	44.56	1.55	56.05	1.81	41.75	1.56	42.86
CSA S806-12 (2012)	1.17	13	21.32	1.18	24.87	1.23	20.61	1.15	20.76
ISIS-M03-07 (2007)	1.33	12	28.8	1.34	38.57	1.09	36.02	1.38	25.47
CNR DT203-06 (2006)	1.02	8	32.57	0.97	32.22	0.91	24.53	1.03	32.83
Kara (2011)	1.04	11	21.72	1.02	23.84	1.1	23.68	1.03	25.77
Nehdi vd. (2007)	1.11	10	20.68	1.11	15.76	1.2	19.83	1.09	25.65
Ali vd. (2021)	1.10	9	22	1.13	22.47	1.25	20.25	1.06	20.54
Önerilen Model	0.99	6	20.01	1.02	30.62	0.95	27.11	0.99	16.54

* $V_{deneyisel}/V_c$ verilerinin ortalaması gösterilmektedir.

6. Parametrelerin Kesme Dayanımı Üzerindeki Etkileri

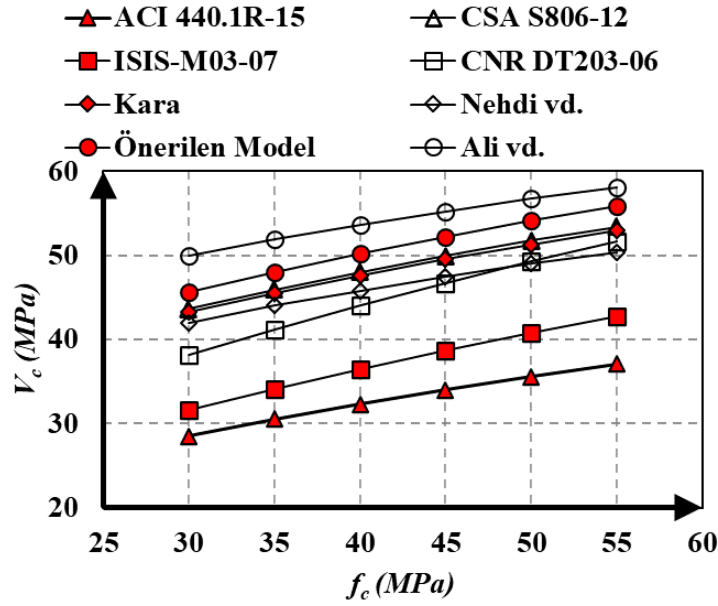
Bu bölümde kesme dayanımını etkileyen parametreler üzerinde durulmuştur. Literatürde yer alan deney verisi kullanılarak her parametreyi doğrudan karşılaştırmak oldukça zordur, çünkü her yöntem farklı parametreler ve farklı yaklaşımlar kullanarak kesme dayanımlarını hesaplamaktadır. Bu kapsamda; deneysel veri seti kullanılarak, ilgili parametrelerin ortalamaları ile yoğunlukla tekrar ettiği değerler dikkate alınarak basit mesnetli bir kirişin kesme dayanımı hesabı üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Örnek kiriş için $f_c=40$ MPa, $d=275$ mm, $b_w=200$ mm, $a/d=3.0$, $\rho_f=0.0125$ ve $E_f=55$ GPa olarak belirlenmiştir. İncelenen her parametre veri tabanı içinde yer alan sınırlar içerisinde farklı değerleri alırken diğer değişkenler sabit tutularak kesme dayanımları ilgili yönetmelik ve modeller ile ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Parametrelerin değerlendirilebilmesi için oluşturulan yeni veri seti

No	İlgili Parametre	f_c (MPa)	d (mm)	b_w (mm)	a/d	ρ_f (%)	E_f (GPa)
1	f_c	30	275	200	3	1.25	55
2		35	275	200	3	1.25	55
3		40	275	200	3	1.25	55
4		45	275	200	3	1.25	55
5		50	275	200	3	1.25	55
6		55	275	200	3	1.25	55
7	d	40	225	200	3	1.25	55
8		40	275	200	3	1.25	55
9		40	325	200	3	1.25	55
10		40	375	200	3	1.25	55
11		40	425	200	3	1.25	55
12		40	475	200	3	1.25	55
13	b_w	40	275	150	3	1.25	55
14		40	275	200	3	1.25	55
15		40	275	250	3	1.25	55
16		40	275	300	3	1.25	55
17		40	275	350	3	1.25	55
18		40	275	400	3	1.25	55
19	a/d	40	275	200	2.5	1.25	55
20		40	275	200	3	1.25	55
21		40	275	200	3.5	1.25	55
22		40	275	200	4	1.25	55
23		40	275	200	4.5	1.25	55
24		40	275	200	5	1.25	55
25	ρ_f	40	275	200	3	0.5	55
26		40	275	200	3	0.75	55
27		40	275	200	3	1	55
28		40	275	200	3	1.25	55
29		40	275	200	3	1.5	55
30		40	275	200	3	1.75	55
31	E_f	40	275	200	3	1.25	40
32		40	275	200	3	1.25	60
33		40	275	200	3	1.25	80
34		40	275	200	3	1.25	100
35		40	275	200	3	1.25	120
36		40	275	200	3	1.25	140

6.1. Beton Basınç Dayanımı

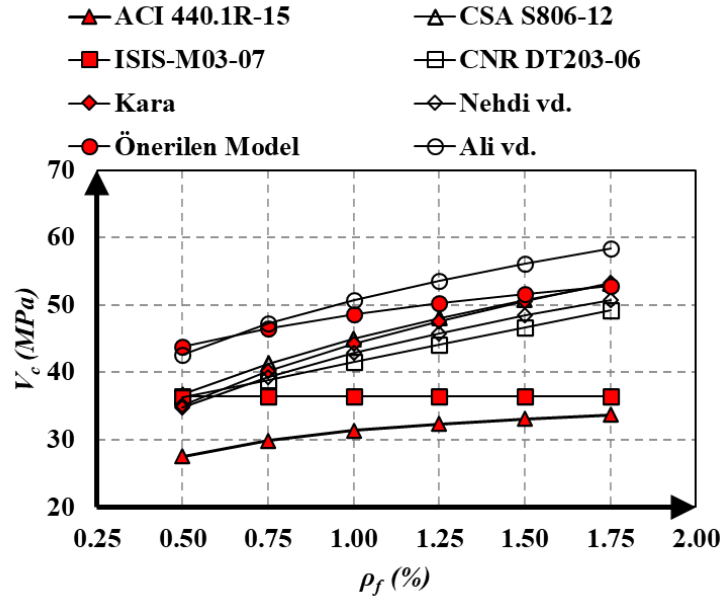
Çalışmada veri tabanında yer alan deney elemanlarının beton basınç dayanımları 24 ile 80 MPa arasında değişim göstermektedir. Oluşturulan veri setinde dayanımlar 30 MPa ile 55 MPa arasında değişim göstermektedir. Şekil 4'te, beton basınç dayanımının kesme dayanımı üzerindeki etkisi her yönetmelik ve model için ayrı ayrı gösterilmektedir. Üs değeri küçüldükçe beton basınç dayanımının kesme dayanımı üzerindeki etkisi azalmaktadır. Deneysel verilere en yakın sonuçlar yönetmelikler içerisinde $f_c^{1/2}$ ifadesini kullanan CNR DT203-06 (2006) ile ve $f_c^{1/3}$ ifadesinin yer aldığı Kara (2011) ve önerilen model ile elde edilmiştir.



Şekil 4. Beton basınç dayanımının kesme dayanımı üzerindeki etkisi

6.2. Donatı Oranı

Çalışmada veri tabanında yer alan deney elemanlarının donatı oranları %0.12 ile %3.89 arasında değişim göstermektedir. Oluşturulan veri setinde ise donatı oranları %0.50 ile %1.75 arasındadır. Şekil 5'te, FRP boyuna donatı oranının kesme dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. ISIS-M03-07 (2007) donatı oranı ifadesi yer almadığından tahminler sabit değer almaktadır. Diğer tüm model ve yönetmeliklerde ise donatı oranının artışıyla lineer olmayan artışlar tespit edilmiştir.

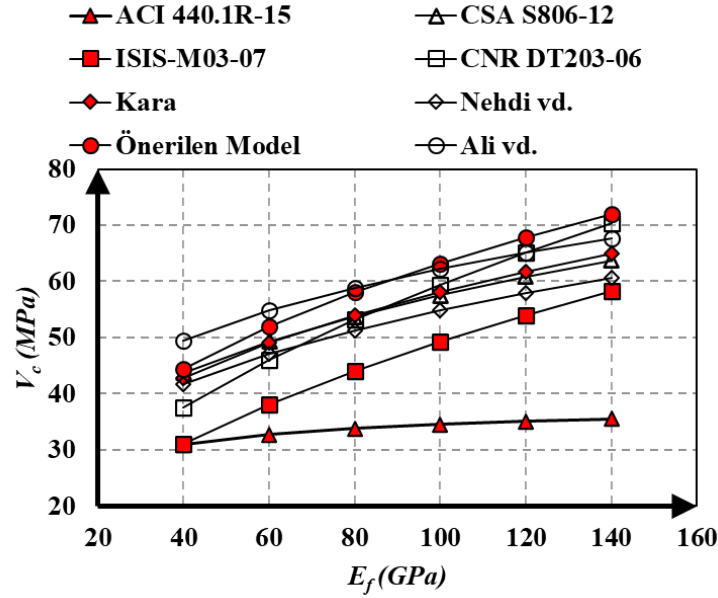


Şekil 5. Boyuna donatı oranının kesme dayanımı üzerindeki etkisi

6.3. Elastisite Modülü

Çalışmada veri tabanında yer alan deney elemanlarının elastisite modülü değerleri 32 ile 141 GPa arasında değişim göstermektedir. Oluşturulan veri setinde bu değerler 40 MPa ile 140 GPa arasında değişim göstermektedir. Şekil 6'da, elastisite modülü parametresinin kesme dayanımı üzerindeki etkisine yer verilmektedir. Elastisite modülü değerinin artışıyla eksenel rijitlik ve kesme dayanımı değerleri artış göstermektedir. Bazı yönetmelik ve modeller FRP donatı elastisite modülünü; çelik donatı elastisite modülü değerine oranı, bir kısmı da modüler oran (n_f) yani betonun elastisite modülü değerine oranı cinsinden ifade etmektedir. Sırasıyla en büyük üç değerlerinin

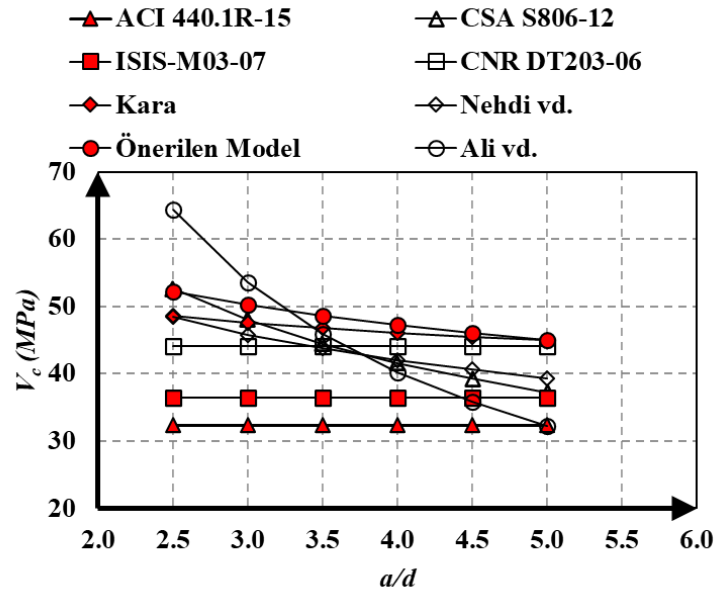
kullanıldığı $E_f^{0.386}$ ve $E_f^{1/2}$ ifadelerinin yer aldığı önerilen model ve CNR DT203-06 (2006)'te en yakın tahminler elde edilirken ACI 440.1R-15 (2015) ile deneysel verilerden en farklı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6. FRP donatı elastisite modülünün kesme dayanımı üzerindeki etkisi

6.4. a/d Oranı

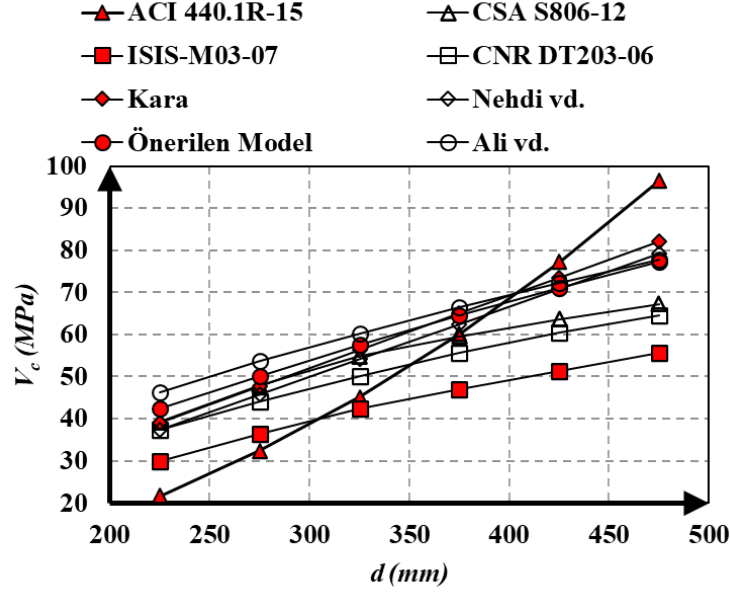
Çalışmada veri tabanında yer alan deney elemanlarının a/d oranları 2.5 ile 7 değerleri arasında değişim göstermektedir. Oluşturulan veri setinde bu değerler 2.5 ile 5 değerleri arasında yer almaktadır. ACI 440.1R-15 (2015), CNR DT203-06 (2006) ve ISIS-M03-07 (2007) yönetmelikleri a/d oranı yani kemer etkisi kesme dayanımında dikkate alınmadığından a/d oranının artışıyla birlikte kesme dayanımları sabit kalmaktadır (Şekil 7). Diğer yönetmelik ve modellerde ise a/d oranının artışıyla kesme dayanımları azalış göstermektedir. Bu durum yük ile mesnet noktaları arasın mesafenin artmasına kemer etkisinin azalmasıyla ilişkilidir. Çalışmada kullanılan deneysel veri tabanında a/d oranı, 2.5'tan büyük olan deney elemanlarından oluşmaktadır. Önerilen modelde ve Kara (2011) modelinde ise sırasıyla $(a/d)^{0.214}$ ve $(a/d)^{-1/9}$ ifadeleri herhangi bir koşula bağlı olmaksızın yer almaktadır. Bu durum CSA S806-12 (2012) yönetmeliğine göre daha iyi tahminlere ulaşılmasının nedenlerinden biri olarak gösterilebilir.



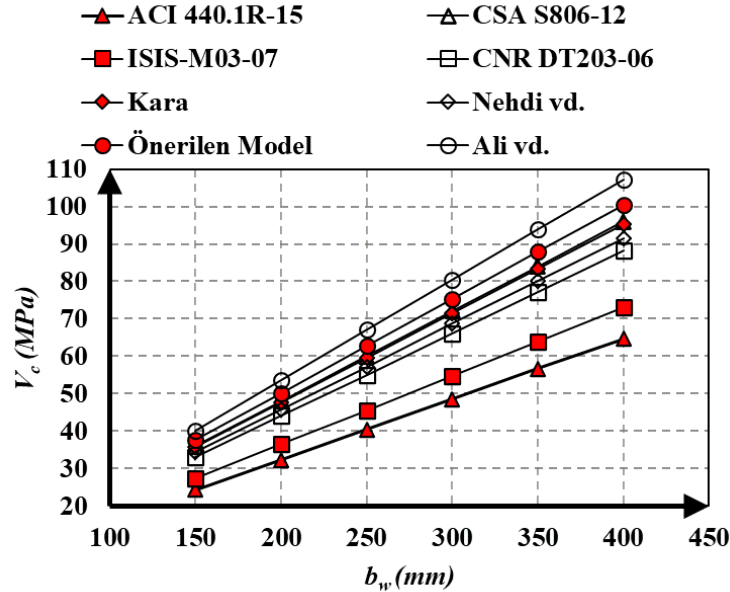
Şekil 7. a/d oranının kesme dayanımı üzerindeki etkisi

6.5. Enkesit Boyutları

Çalışmada kullanılan veri tabanında d ve b_w sırasıyla 146 ile 937 mm ve 114 ile 1000 mm değerleri arasında değişim göstermektedir. Oluşturulan veri setinde ise d ve b_w değerleri sırasıyla 225 ile 475 mm ve 150 ile 400 mm aralığında yer almaktadır. Şekil 8-9'de d ve b_w parametrelerinin kesme dayanımı üzerindeki etkisine yer verilmektedir. b_w 'nin artmasıyla tüm modeller ve yönetmeliklerde doğrusal artışlar gözlemlenmektedir. Ancak d 'nin artmasıyla doğrusal/doğrusal olmayan artışlar söz konusudur. ACI 440.1R-15'a (2015) ifadesinde göre (Denklemler (1)) hem d hem de kd terimi bulunması nedeniyle d^2 karesi oranında artış gerçekleşmektedir. CSA S806-12 (2012) ve ISIS-M03-07 (2007) yönetmelikleri $d < 300$ mm olması durumunda artışlar doğrusal ancak $d > 300$ mm olması durumunda boyut etkisi nedeniyle artışlar doğrusal olmayacak şekildedir. CNR DT203-06 (2006) yönetmeliğinde $d < 600$ mm olması durumunda boyut etkisiyle d arttıkça doğrusal olmayan artışlar belirlenirken, $d > 600$ mm olması durumunda ise artışlar doğrusaldır. Kara (2011) ve Nehdi vd. (2007) modelleri boyut etkisi katsayısı bulunmadığından artışlar doğrusal iken, Ali vd. (2021) ve önerilen modellerde herhangi bir koşula bağlı olmaksızın boyut etkisi katsayısının mevcudiyeti nedeniyle artışlar doğrusal değildir.



Şekil 8. Donatı etkili derinliğinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 9. Kiriş genişliğinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi

7. Sonuçlar

$a/d > 2.5$ olan etriyesiz FRP boyuna donatılı kirişlerin kesme dayanımlarının hesaplanmasında kullanılan mevcut yönetmelikler ve modeller kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca 149 kiriş deney verisi kullanılarak yeni bir model önerilmiştir. Aşağıda yer alan sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mevcut yönetmelikler içerisinde deneysel verilere en yakın tahminler CNR DT203-06 (2006) ile gerçekleştirilmiştir (ortalama=1.02, COV=8, AAE=32.57). Bu netice; ifadede boyut etkisinin ve aksel rijitliğin yer alması ile ilgilidir. CSA S806-12 (2012) ise kesme dayanımını ortalama %17 daha fazla hesaplamaktadır. Ancak ISIS-M03-07 (2007) ifadesinde donatı oranının yer almamasıyla ilişkili olarak tahminlerde ortalama %34'lük bir farklılık gözlemlenmektedir.
- Mevcut modeller içerisinde deneysel verilere en yakın tahminler Kara (2011) modeli ile gerçekleştirilmiştir (ortalama=1.04, COV=11, AAE=21.72). Bu durum, aksel rijitliğin ve a/d oranının ifadede yer alması ile ilişkilendirilmiştir. Benzer parametreler Nehdi (2007) ve Ali vd. (2021) modellerinde de mevcuttur. Tahminler, deneysel verilere göre sırasıyla ortalama %11 ve %10'luk artış göstermektedir.
- ACI 440.1R-15 (2015) yönetmeliği ile oldukça güvenli tarafta kalan tahminler (ortalama=1.59, COV=71, AAE=44.56) elde edilmiştir.
- Yapay zekâ yardımıyla yeni bir model önerilmiştir. Bu model ile, mevcut yönetmelik ve modellerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (ortalama=0.99, COV=6, AAE=20.01).

KAYNAKLAR

- ACI (American Concrete Institute). (2015). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars. ACI 440.1 R-15. Farmington Hills, MI: ACI.
- Alam, M. S., & Gazder, U. (2020). Shear strength prediction of FRP reinforced concrete members using generalized regression neural network. *Neural Computing and Applications*, 32, 6151-6158.
- Alguhi, H., & Tomlinson, D. (2021). One-way shear strength of FRP-reinforced concrete members without stirrups: Design provision review. *Journal of Composites for Construction*, 25(3), 04021016.
- Ali, A. H., Mohamed, H. M., Benmokrane, B., & ElSafty, A. (2019). Theory-based approaches and microstructural analysis to evaluate the service life-retention of stressed carbon fiber composite strands for concrete bridge applications. *Composites Part B: Engineering*, 165, 279-292.
- Ali, A. H., Mohamed, H. M., Chalioris, C. E., & Deifalla, A. (2021). Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 235, 112017.
- Ali, A. H., Mohamed, H. M., ElSafty, A., & Benmokrane, B. (2015, July). Long-term durability testing of Tokyo rope carbon cables. In 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen (pp. 19-24).
- Alkhrdaji, T., Wideman, M., Belarbi, A., & Nanni, A. (2001, October). Shear strength of GFRP RC beams and slabs. In Proceedings of the international conference, composites in construction-CCC (pp. 409-414).
- Ashour, A. F. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1005-1015.
- Ashour, A. F., & Kara, I. F. (2014). Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 60, 612-620.
- Barris, C., Torres, L., Vilanova, I., Mias, C., & Llorens, M. (2017). Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. *Engineering structures*, 131, 231-242.
- Bentz, E. C., Massam, L., & Collins, M. P. (2010). Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 14(6), 637-646.
- BISE (British Institution of Structural Engineers). (1999). "Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fiber composite reinforcement." In *IStructE*, 98-100. London: SETO.
- CNR-DT.203, (2007). Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars, in (Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction).

- CSA (Canadian Standards Association). (2012). Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CSA S806-12. Mississauga, ON, Canada: CSA.
- El Zareef, M. A., Elbisy, M. S., & Badawi, M. (2021). Evaluation of code provisions predicting the concrete shear strength of FRP-reinforced members without shear reinforcement. *Composite Structures*, 275, 114430.
- Elghandour, B., Eltahawy, R., Shedid, M., & Abdelrahman, A. (2023). Prediction of shear strength for CFRP reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, 284, 115946.
- El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., & Benmokrane, B. (2006). Shear capacity of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *ACI Materials Journal*, 103(3), 383.
- El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., & Benmokrane, B. (2006). Shear strength of FRP-reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *ACI Materials Journal*, 103(2), 235.
- El-Sayed, A., El-Salakawy, E., & Benmokrane, B. (2005). Shear strength of one-way concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer composite bars. *Journal of Composites for Construction*, 9(2), 147-157.
- Gross, S. P., Yost, J. R., Dinehart, D. W., Svensen, E., & Liu, N. (2003). Shear strength of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars. In *High performance materials in bridges* (pp. 426-437).
- ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures). (2007). Reinforced concrete structures with fibre-reinforced polymers. Design Manual No. 3. Winnipeg, MB, Canada: Canadian Network of Centres of Excellence.
- Issa, M. A., Ovitigala, T., & Ibrahim, M. (2016). Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. *Journal of Composites for Construction*, 20(4), 04015083.
- JSCE (Japanese Society of Civil Engineering). (1997). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. Tokyo: JSCE.
- Jumaa, G. B., & Yousif, A. R. (2019). Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*, 209, 77-94.
- Kara, I. F. (2011). Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming. *Advances in Engineering Software*, 42(6), 295-304.
- Kaszubska, M., Kotynia, R., & Barros, J. A. (2017). Influence of longitudinal GFRP reinforcement ratio on shear capacity of concrete beams without stirrups. *Procedia engineering*, 193, 361-368.
- Kocaoz, S., Samaranayake, V. A., & Nanni, A. (2005). Tensile characterization of glass FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 127-134.
- Matta, F., El-Sayed, A. K., Nanni, A., & Benmokrane, B. (2013). Size Effect on Concrete Shear Strength in Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 110(4).
- Nehdi, M., El Chabib, H., & Saïd, A. A. (2007). Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach. *Journal of materials in civil engineering*, 19(12), 1033-1042.
- Park, H. G., & Choi, K. K. (2017). Unified shear design method of concrete beams based on compression zone failure mechanism. *Concrete International*, 39(9), 59-63.
- Razaqpur, A. G., & Isgor, O. B. (2006). Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups. *ACI Structural Journal*, 103(1), 93.
- Tariq, M., & Newhook, J. P. (2003, June). Shear testing of FRP reinforced concrete without transverse reinforcement. In *Proceedings, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering* (pp. 1330-1339).
- Tomlinson, D., & Fam, A. (2015). Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexure and shear. *Journal of composites for construction*, 19(2), 04014036.

Tureyen, A. K., & Frosch, R. J. (2002). Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups. *Structural Journal*, 99(4), 427-434.

Tureyen, A. K., & Frosch, R. J. (2003). Concrete shear strength: Another perspective. *Structural Journal*, 100(5), 609-615.

Yost, J. R., Gross, S. P., & Dinehart, D. W. (2001). Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Journal of composites for construction*, 5(4), 268-275.