

ENİNE VE BOYUNA FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMI

İlker Fatih KARA¹, Fatih CULLAZOĞLU², Metin Hakan SEVERCAN^{*2}

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 11.04.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 21.05.2016

Kabul / Accepted: 23.05.2016

ÖZ

Bu çalışmada lif takviyeli polimer donatılar (FRP) içeren kayma donatılı ve kayma donatısız betonarme kirişlerin kesme dayanımı için literatürden elde edilen 206 adet deney sonucu da göz önünde bulundurularak farklı modeller önerilmiş ve bu modellerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca farklı ülke yönetmelikleri tarafından FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için geliştirilen modellerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılarak bu modellerin uygulanabilirliği de belirlenmeye çalışılmıştır. ACI 440.1R-15 tarafından önerilen denklem ile elde edilen sonuçların malzeme dayanımındaki azaltma katsayıları kullanmadan bile gereğinden fazla güvenli yönde sonuçlar verdiği görülmüştür. BISE tarafından gerek kayma donatısız gerekse kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen modellerin yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen modellerin yönetmeliklere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lifli polimer donatı, kesme dayanımı, betonarme kiriş, kayma donatısı

SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH TRANSVERSE AND LONGITUDINAL FRP BARS

ABSTRACT

In the present study, simplified empirical expressions for the shear capacity of FRP reinforced concrete beams with and without stirrups accounting for most influential parameters were proposed using a large database of 206 specimens collected from the literature. The equations of six existing design standards for shear capacity of FRP reinforced concrete beams have also been evaluated using the large database collected. The shear provision of ACI 440.1R-15 method for FRP reinforced concrete beams gave conservative predictions even without applying reduction factors. BISE model gave the most accurate results for the shear strength of FRP-reinforced concrete beams among the shear design standards. The proposed equations also gave more accurate results for shear capacity predictions for a wide range of FRP reinforced concrete beams than the shear design standards.

Keywords: Fibre reinforced polymer bar, shear strength, reinforced concrete beams, stirrups

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 23 09; e-mail/e-posta: msever@nigde.edu.tr

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün en önemli problemlerinden biri donatı çeliğinin korozyona uğramasıdır. Betonun, deniz suyu veya tekrarlayan donma-çözülme olayları gibi çevresel faktörlerin etkisinde olduğu durumlarda donatı çeliğinde korozyon oluşabilmektedir. Bu tür ağır çevresel koşullara maruz kalan betonarme yapılarda bulunan çelik donatıların korozyona uğraması da bu yapılarda ortaya çıkan en büyük problemlerden birini teşkil etmektedir. Bu durum betonarme yapılarda zaman alıcı ve yüksek maliyetli bakım, onarım ve güçlendirme işlemleri uygulanmasını gerektirmekte ve bu tür yapıların kullanılabilirlik sürelerinin kısalmasına neden olmaktadır. Betonarme yapılarda ortaya çıkan bu tür problemlerden dolayı, korozyona karşı dirençli bir malzeme olan polimer lifli donatıların (FRP) yapılarda kullanılması alternatif bir çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde FRP donatılar inşaat sektöründe; hafiflik, yüksek dayanım, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliğinin olmaması gibi avantajlarından dolayı kullanılmaya başlanmıştır. FRP donatıların bir betonarme donatısı olarak kullanılmasını sağlayan en önemli özelliklerinden biri yüksek çekme dayanımlı hafif bir malzeme olmasıdır. FRP donatısı, çelik donatıya göre daha yüksek çekme dayanımlı bir malzeme olmasının yanında daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Bu malzeme aynı zamanda kırılma konumuna kadar lineer bir gerilme şekil değiştirme davranışı göstermektedir.

FRP ve çelik donatıların özellikle elastisite modüllerinin birbirinden farklı olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımları çelik donatılı elemanlara göre farklılık göstermektedir. Birçok uluslararası yönetmelikte FRP donatılı betonarme elemanların kesme tasarımı, çelik ve FRP donatıların mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır. Önerilen yöntemlerde betonarme kirişlerin kesme dayanımı, betonun kesme dayanımına olan katkısı ile kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkılarının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır. Betonun kesme dayanımına olan katkısı genellikle yarı ampirik denklemler kullanılarak hesaplanmakta ve bu katkı çelik donatılı betonarme elemanlar için kabul edilen farklı kesme dayanım mekanizmalarının toplamından oluşmaktadır. ACI 440.1R-15 [1] tarafından tanımlanan kesme dayanım mekanizmaları daha önce de ifade edildiği gibi;

- Basınç bölgesindeki çatlamamış betonun kesme dayanımı,
- Boyuna donatıların kaldırıcı etkisi nedeniyle oluşan kesme dayanımı
- Kesme çatlakları boyunca agregaların birbirine kenetlenmesi sonucu oluşan kesme dayanımı
- Kemer etkisi
- Betonun çekme dayanımının kesme dayanımına olan katkısı şeklinde ifade edilmektedir.

Kesme çatlakları boyunca agregaların birbirlerine kenetlenmesi nedeniyle oluşan dayanım daha çok sürtünme etkisi nedeniyle oluşan dayanım gibi iki çatlak yüzeyinin birbirlerine göre rölatif olarak hareket etmesinden oluşmaktadır. Çatlak genişliği çok fazla olmadığı sürece bu dayanım oldukça önemli olmaktadır. Kaldırıcı etkisi nedeniyle oluşan dayanımda, boyuna donatıların çatlak boyunca kesmeden dolayı oluşan deplasmanlara karşı direnç göstermesidir. Kemer etkisi ise, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı olan a/d değerinin genellikle 2,5'dan küçük olduğu elemanlarda oluşmaktadır. Uygulanan düşey yükler bu elemanlarda kemer etkisiyle mesnede iletilmektedir. Betonarme elemanda ilk çatlama olduğu anda çatlak genişliği çok fazla olmadığından dolayı küçük beton parçaları çatlak boyunca bir köprü oluşturmakta ve çekme kuvvetlerinin bu çatlak boyunca iletilmesini sağlamaktadır. Çatlak genişliğinin daha çok 0,05 ile 0,15 mm arasında olduğu durumlarda çekme bölgesindeki betonun dayanımına olan katkısı olmaktadır.

FRP donatısının çelik donatıya göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı FRP donatılı elemanlarda, uygulanan yükler etkisi altında çelik donatılı elemanlara göre daha geniş ve derin çatlaklar oluşmaktadır. Bu elemanlarda daha derin çatlakların oluşması basınç bölgesindeki çatlamamış betonun kesme dayanımına olan katkısını azaltmaktadır. Ayrıca bu elemanlarda daha geniş çatlakların oluşması, çatlak yüzeyindeki agregaların birbirlerine kenetlenmesi ve çekme bölgesindeki betonun çekme dayanımı nedeniyle oluşan kesme dayanımı katkıları azaltmaktadır. FRP donatısının eksenine dik yöndeki dayanımının çelik donatıya göre daha az olması ve FRP donatılı elemanlarda daha geniş çatlakların oluşması bu elemanlarda kaldırıcı etkisi nedeniyle oluşan kesme dayanımı katkısının çelik donatılı elemanlara göre daha az olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak FRP donatılı elemanlarda betonun kesme dayanımına olan katkısı çelik donatılı elemanlara göre daha az olmaktadır.

Kesme donatısı olarak adlandırılan etriyelerin kesme dayanımına olan katkısı kafes kiriş analogisine dayandırılarak hesaplanmaktadır. Sheta [2] yapmış olduğu çalışmada FRP donatısının etriye olarak kullanılması halinde dayanımında önemli derecede azalma olduğunu belirlemiş ve bu donatıların kırılmasının daha çok eğilme bölgelerinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu nedenle FRP donatısının kesme donatısı olarak kullanılması durumunda daha büyük bir azaltma katsayısı kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. FRP donatılı betonarme kirişlerin tasarımı için ACI 440.1 R-15 [1], CSA-S806-02 [3], JSCE-97 [4], ISIS-M03-07 [5], BISE-

ENİNE VE BOYUNA FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMI

99 [6] birçok uluslararası yönetmelik yayınlanmış olup, bu yönetmeliklerde FRP donatılı betonarme elemanların kesme tasarımı, çelik ve FRP donatılarının mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır. Önerilen yöntemlerde betonarme kirişlerin kesme dayanımı, betonun kesme dayanımına olan katkısı ile kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkılarının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır.

Bugüne kadar özellikle FRP boyuna donatılı kayma donatısı içermeyen betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve davranışı üzerine birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar yine de çelik donatılı betonarme kirişler gibi istenilen düzeye ulaşmamış olup hala FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesiyle ilgili birtakım belirsizlikler bulunmaktadır. Nagasaka ve ark. [7], 35 adet dikdörtgen kesitli farklı FRP donatısına sahip betonarme kirişleri kesme etkisi altında yüklemeye tabi tutmuşlardır. Yüklemeye tabi tutulan kirişlerin yarısı FRP etriyelerin eğildiği bölgelerdeki kırılmadan dolayı taşıma gücüne ulaşmıştır. Diğer numuneler ise beton basınç çubuklarının ezilmesi veya betonun ezilme birim kısalmasına erişmesi neticesinde kırılma konumuna ulaşmışlardır. Hegger ve ark. [8] betonun kesme dayanımına olan katkısı için FRP boyuna donatının etkisini de içerecek şekilde bir denklem geliştirmişlerdir. FRP kayma donatısının kesme dayanımına olan katkısını da deneysel çalışma sonuçlarını göz önünde bulunduracak şekilde sınırlandırmışlardır. Hegger ve ark. [8] çalışmalarında önerdikleri formülasyonu 88 adet deneysel çalışma sonucuyla karşılaştırılmasından uygun sonuçlar elde etmişlerdir. Spadea [9], 40 adet CFRP ve GFRP boyuna ve enine donatılı betonarme kirişi iki noktasal yük etkisi altında yüklemeye tabi tutmuşlardır. Teste tabi tutulan kirişlerin büyük bir çoğunluğu kesmeden dolayı kırılma konumuna ulaşmışlardır. Kirişlerin bir kısmında diyagonal kesme çatlakları 70°'lik bir açı yapacak şekilde yükün uygulandığı noktaya kadar ulaşmışlardır. Yüklemeye tabi tutulan kirişlerin hiçbirinde kayma donatısının kırılması olmamıştır. Razaqpur ve Spadea [10], çalışmalarında CSA S806-12 [3] tarafından önerilen FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için geliştirilen modelin teorik altyapısını ayrıntılı bir şekilde açıklamışlar ve bu modelden elde edilen sonuçları JSCE-97 [4], ACI 440.1R-06 [1] ve CNR-DT203/2006 [11] gibi birtakım uluslararası standartlarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada sunulan değişken açılı kafes modele göre beton basınç çubuklarının açısı ve basınç dayanımlarının FRP kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımını etkileyen en önemli parametreler olduğu ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için farklı modeller önerilmiş ve bu modellerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca ACI 440.1 R-15, S806-02, JSCE-97, ISIS-M03-07 ve BISE-99 gibi farklı ülke yönetmelikleri tarafından FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için geliştirilen modellerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılarak bu modellerin uygulanabilirliği de araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı için Önerilen Modeller

FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı betonun kesme dayanımına olan katkısı ile FRP donatısının kesme dayanımına olan katkısının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır. Kesme dayanımları için literatürde farklı yönetmelikler tarafından birçok model önerilmiştir. Yönetmeliklerde, FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme tasarımı, çelik ve FRP donatılarının mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin kesme tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır. Bu bölümde ilk etapta bu yönetmelikler tarafından önerilen modellere yer verilecek, daha sonra da bu çalışma kapsamında önerilen modeller açıklanacaktır.

2.2. ACI 440.1R-15

ACI 440.1R-15, eğilme donatısı olarak FRP donatısı içeren elemanlarda betonun kesme dayanımına olan katkısı için aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c b_w c} \quad (1)$$

Bu denklemdeki f'_c , betonun basınç dayanımını, b_w kesit genişliğini, c çatlamış kesitin tarafsız eksen derinliğini ifade etmekte olup bu değer $c = kd$ şeklinde hesaplanmakta ve k değeri,

İ.F. KARA, F. CULLAZOĞLU, M.H. SEVERCAN

$$k = \sqrt{2 \rho_{fl} n + (\rho_{fl} n)^2} - \rho_{fl} n \quad (2)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu denklemde ρ_{fl} kesitteki FRP donatısı oranını, n ise FRP donatısı elastisite modülünün betonun elastisite modülüne olan oranını ifade etmektedir. ACI 440.1R-15 (2015) da FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_s = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (3)$$

Bu denklemdeki d; etkili kesit yüksekliğini, A_{fv} , etriyelerin kesit alanını, s, etriye aralığını, f_{fv} ise etriyelerin kırılma anındaki gerilme değerini ifade etmekte olup bu değerler

$$f_{fv} = 0,004 \cdot E_{fv} \leq f_{fb} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki f_{fb} eğilme kapasitesi değeri aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,11\right) f_{fuw} \quad ve \quad 0,25 \leq \frac{f_{fb}}{f_{fuw}} \leq 1,0 \quad (5)$$

4 numaralı denklemdeki d_b ve r_b , etriye çapını ve büküm noktalarına ait yarıçap değerini ifade etmektedir.

2.3. CAN/CSA S806-02

Bu yönetmelikte betonun kesme dayanımına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0,035 \lambda \phi_c \left(f'_c \rho_{fl} E_{fl} \frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/3} b_w d \quad (6a)$$

$$0,1 \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \leq V_c \leq 0,2 \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (6b)$$

$$\frac{V_f}{M_f} d \leq 1,0 \quad (6c)$$

Bu denklemlerdeki λ ve Φ_c , beton yoğunluğunu ve dayanımını hesaba katan katsayılar, V_f ve M_f ise ilgili kesitteki kesme kuvveti ve eğilme momentini ifade eden değerlerdir. Yukarıdaki denklemler kesit yüksekliğinin 300 mm'den az olduğu durumlar için geçerli olup, kesit yüksekliğinin 300 mm'den fazla olması durumunda ise betonun kesme dayanımına olan katkısı,

$$V_c = \left(\frac{130}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0,08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. FRP donatıların kesme dayanımına olan katkısı ise aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaba katılmaktadır.

$$V_s = \frac{0,4 \Phi_c A_{fv} f_{fv} d}{s} \leq 0,6 \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (8)$$

Bu denklemdeki 0,4 değeri FRP etriyelerinin bükülmesi neticesinde dayanımında olan azalmayı hesaba katan bir azaltma katsayısını ifade etmektedir. Aynı denklemdeki Φ_c , FRP etriye donatısının dayanımı ile ilgili bir katsayıdır.

2.4. ISIS-M03-07

Bu şartnamede kesit yüksekliğinin 300 mm'nin altında olması halinde betonun kesme dayanımına olan katkısı

$$V_c = 0,2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \quad (9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Kesit yüksekliğinin 300 mm'den fazla olması hali için ise V_c aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = \left(\frac{260}{1000+d}\right)\lambda\phi_c\sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \geq 0,1\lambda\phi_c\sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \quad (10)$$

FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise

$$V_s = \frac{\phi_f A_{fv} f_{fv} d_v \cot \theta}{s} \quad (11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemdaki d_v kesit etkili kayma yüksekliği olarak ifade edilmekte ve $0,9d$ olarak hesaplarda göz önünde bulundurulmaktadır. Bu denklemdaki f_{fv} gerilme değeri ise aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$f_{fv} = \frac{\left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fu}}{1,5} \quad (12a)$$

veya

$$f_{fv} = E_{fv} \epsilon_{fv} \quad (12b)$$

$$\epsilon_{fv} = 0,0001 \sqrt{f'_c \frac{\rho_{fl} E_{fl}}{\rho_{fv} E_{fv}}} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f'_c}\right)\right] \leq 0,0025 \quad (12c)$$

Bu denklemlerdeki ρ_{fv} kesitteki etriye oranını, E_{fv} etriyelerin elastisite modülünü, σ_N ise eksenel kuvvetten dolayı betonda oluşan gerilme değerini ifade etmektedir.

2.5. BISE-99

İngiliz Yönetmeliğinde beton ve etriyelerin kesme dayanımlarına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0,79 \left(100\rho_{fl} \frac{E_{fl}}{E_s}\right)^{1/3} \left(\frac{400}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} b_w d \quad (13)$$

$$V_s = \frac{0,0025 E_{fv} A_{fv} d}{s} \quad (14)$$

Bu denklemlerdeki f_{cu} küp numune beton basınç dayanımını ifade etmektedir.

2.6. JSCE-97

Japonya yönetmeliğinde betonun kesme dayanımına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

İ.F. KARA, F. CULLAZOĞLU, M.H. SEVERCAN

$$V_c = \frac{\beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d}{\gamma_b} \quad (15a)$$

$$f_{vcd} = 0,2(f'_c)^{1/3} \leq 0,72 \quad (15b)$$

$$\beta_d = \left(\frac{1000}{d}\right)^{1/4} \leq 1,5 \quad (15c)$$

$$\beta_p = \left(\frac{100 \rho_{fl} E_{fl}}{E_s}\right)^{1/3} \leq 1,5 \quad (15d)$$

$$\beta_n = 1 + \frac{M_0}{M_d} \leq 2 \quad N_d \geq 0 \text{ için} \quad (15e)$$

$$\beta_n = 1 + \frac{2 M_0}{M_d} \geq 0 \quad N_d \leq 0 \text{ için} \quad (15f)$$

Bu denklemdeki γ_b dayanım azaltma katsayısı, N_d ve M_d tasarım eksenel yükü ve eğilme momentini ifade etmektedirler. FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise

$$V_s = \frac{A_{fv} E_{fv} \varepsilon_{fv} z}{s \gamma_b} \quad (16a)$$

$$\varepsilon_{fv} = 0,0001 \sqrt{f'_{mcd} \frac{\rho_{fl} E_{fl}}{\rho_{fv} E_{fv}}} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f'_{mcd}} \right) \right] \leq \frac{f_{fb}}{E_{fv}} \quad (16b)$$

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fuv} / \gamma_b \quad (16c)$$

$$f'_{mcd} = \left(\frac{h}{300} \right)^{-1/10} f'_c \quad (16d)$$

$$\sigma_N = (N'_d + P_{ed}) / A_g \leq 0,4 f'_{mcd} \quad (16e)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemlerdeki ε_{fv} kırılma anında etriyelerde oluşan şekil değiştirme değerini, $z = d/1,15$ kesitteki basınç ve çekme kuvvetleri arasındaki mesafeyi, f_{mcd} tasarım beton basınç dayanımını; P_{ed} etkili öngerme kuvvetini, A_g ise toplam kesit alanını ifade etmektedir.

2.7. Çalışma Kapsamında Önerilen Denklemler

Literatürden elde edilen deneysel çalışma sonuçları da göz önünde bulundurularak, bu çalışma kapsamında FRP donatılı betonarme kirişlerde betonun kesme dayanımına olan katkısı için kesit etkisini de hesaba katacak şekilde 17 (a-b) denklemleri, kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkısı için ise 18 denklemi önerilmiştir.

$$V_c = 2,6 \left(\rho_{fl} \frac{E_{fl} d}{E_s a} f'_c \right)^{1/3} b_w d \quad d \leq 300 \text{ mm} \quad (17a)$$

$$V_c = 2,6 \left(\rho_{fl} \frac{E_{fl} d}{E_s a} f'_c \right)^{1/3} \left(\frac{300}{d} \right)^{0,25} b_w d \quad d > 300 \text{ mm} \quad (17b)$$

$$V_f = 0,58 (\rho_{fv} f_{uv})^{0,5} (b_w d) \quad (18)$$

Bu denklemlerdeki ρ_{fl} kesitteki FRP boyuna donatı oranını, E_{fl} ve E_s , FRP ve çelik boyuna donatıları için elastisite modülü değerlerini ifade etmektedirler. Bununla birlikte aynı denklemlerdeki ρ_{fv} kesitteki FRP kayma donatısı oranını, f_{uv} ise kayma donatısı için kırılma anındaki gerilme değerlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada

ENİNE VE BOYUNA FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMI

önerilen kayma donatısız kirişler için önerilen kesme dayanımı değerleri Ashour ve Kara [12] tarafından önerilen denklem data sayısı da artırılarak yeniden düzenlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Veriler

Bu çalışma kapsamında toplam 206 adet FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımı literatürden elde edilmiş [2, 12-16] ve ACI 440.1R-06, CSA 806-02, ISIS M03-07, JSCE 97 ve BISE-99 yönetmeliklerinde önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen kesme dayanımı değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak bu yönetmeliklerde önerilen modellerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Literatürden elde edilen betonarme elemanlara ait kesit ve malzeme özelliklerinin dağılımı Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Kayma donatısız betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı

Kiriş genişliği b_w		Kiriş etkili derinliği d		Beton basınç dayanımı f'_c		a/d		Elastisite Modülü E_f		Donatı oranı ρ_f (%)	
Aralık (mm)	Adet	Aralık (mm)	Adet	Aralık (mm)	Adet	Aralık	Adet	Aralık (GPa)	Adet	Aralık	Adet
80-100	3	100-200	34	20-30	17	2,5-3,0	41	20-50	94	0,1-0,75	58
100-200	69	200-300	61	30-40	66	3,0-3,5	47	50-80	5	0,75-1,25	42
200-300	65	300-400	43	40-50	36	3,5-4,0	15	80-110	3	1,25-1,75	32
300-400	5	400-500	8	50-60	5	4,0-4,5	31	110-140	30	1,75-2,25	17
400-500	10	500-600	8	60-70	12	4,5-5,0	1	140-170	24	2,25-2,75	10
500-1000	8	600-1000	6	70-90	24	5,0-6,5	26	170-200	4	2,75-3,25	1

Tablo 2. Kayma donatılı betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı

Kiriş etkili derinliği d		Beton basınç dayanımı f'_c		a/d		Elastisite Modülü E_f E_{fv}		Donatı oranı ρ_f (%) ρ_{fv} (%)	
Aralık (mm)	Adet	Aralık (N/mm ²)	Adet	Aralık	Adet	Aralık (GPa)	Adet	Aralık	Adet
100-200	0	20-30	2	2,4-3,0	12	20-50 (E_f) 20-50 (E_{fv})	41 14	0,1-0,75 (ρ_f) 0,03-0,1 (ρ_{fv})	12 8
200-300	24	30-40	28	3,0-3,5	31	50-80 (E_f) 50-80 (E_{fv})	5 13	0,75-1,25 (ρ_f) 0,1-0,3 (ρ_{fv})	12 21
300-400	19	40-50	9	3,5-4,0	1	80-110 (E_f) 80-110 (E_{fv})	0 8	1,25-1,75 (ρ_f) 0,3-0,5 (ρ_{fv})	12 12
400-500	2	50-60	3	4,0-4,5	2	110-140 (E_f) 110-140 (E_{fv})	0 11	1,75-2,25 (ρ_f) 0,5-0,7 (ρ_{fv})	6 1
500-600	1	60-70	0	4,5-5,0	0	140-170 (E_f) 140-170 (E_{fv})	0 0	2,25-2,75 (ρ_f) 0,7-0,9 (ρ_{fv})	1 0
600-1000	0	70-90	4	5,0-6,5	0	170-200 (E_f) 170-200 (E_{fv})	0 0	2,75-3,25 (ρ_f) 0,9-1,5 (ρ_{fv})	3 5

Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş FRP donatılı betonarme elemanlar dikdörtgen kesitli, a/d oranı 2,5’den büyük, basit mesnetli, simetrik olarak iki noktasal yük etkisi altındaki kiriş ve döşemelerden oluşan elemanlardır. Betonarme elemanların 160 adeti kayma donatısız olup diğer 46 eleman ise FRP donatılı kayma donatısına sahip elemanlardan oluşmaktadır. Kayma donatısız betonarme kirişlerin 90 adedi GFRP boyuna donatısına, 64 adedi CFRP boyuna donatısına ve 6 adedi de AFRP boyuna donatısına sahip elemanlardır. Kayma donatılı betonarme kirişlerin ise 11 adedi GFRP boyuna donatısına, 24 adedi CFRP boyuna donatısına ve 11 adedi de AFRP boyuna donatısına sahip elemanlardır. FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımların

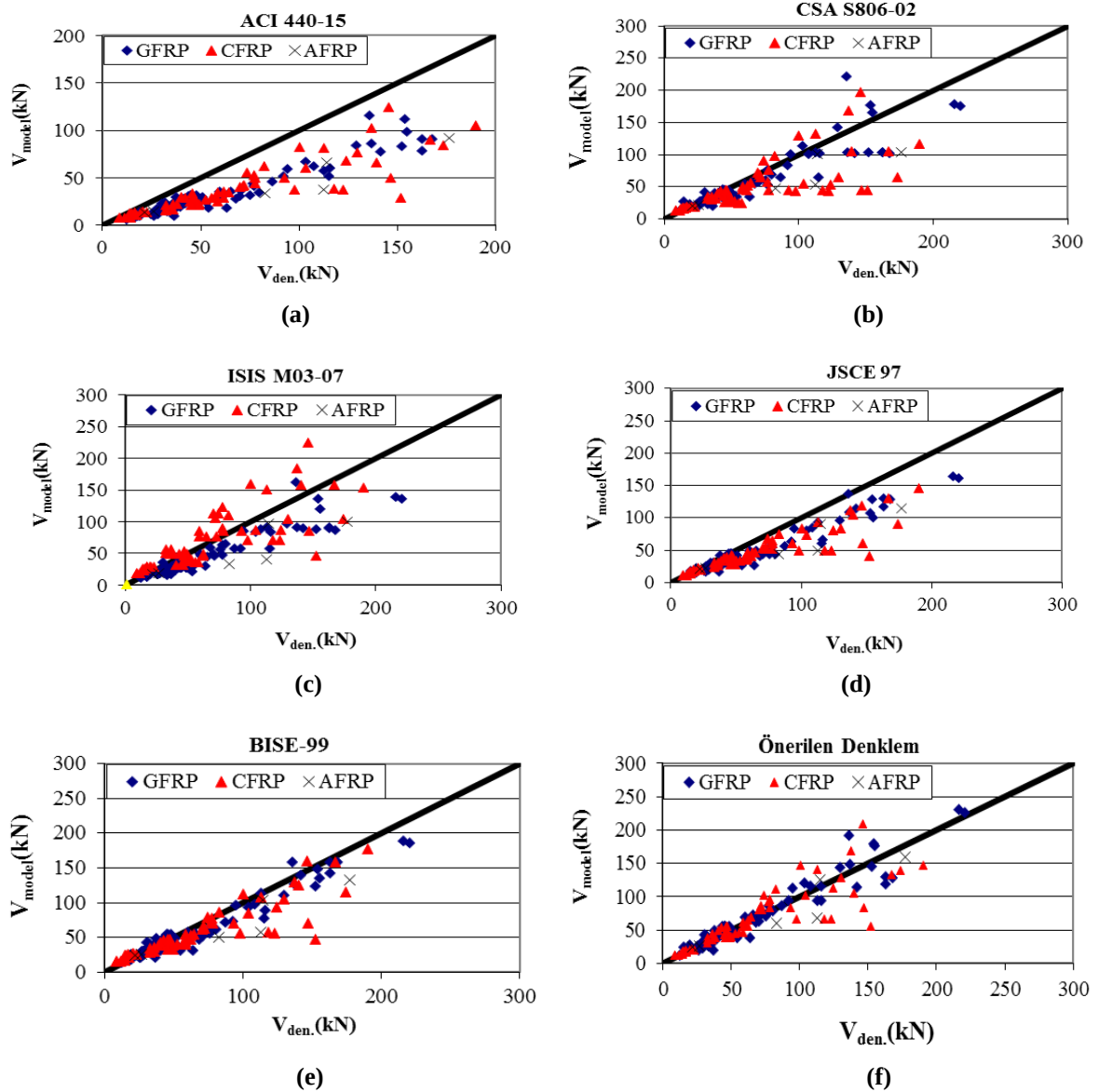
elde edilmesinde yönetmeliklerdeki denklemlerde önerilen malzeme dayanımı azaltma katsayıları, gerekli karşılaştırmaların yapılabilmesi amacı ile 1 olarak alınmıştır.

3.2. Teorik Model Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Literatürden elde edilen 160 adet kayma donatısız ve 46 adet FRP kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı değerleri farklı yönetmelikler ve bu çalışma kapsamında önerilen denklemlerle karşılaştırılarak bu denklemlerin ayrıntılı bir şekilde irdelemesi yapılmıştır.

3.2.1. Kayma Donatısız Kirişler

Farklı ülke yönetmelikleri tarafından önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen FRP boyuna donatılı kayma donatısız kirişlere ait kesme dayanımı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 1’de gösterilmiştir. Deneysel sonuçların yönetmelikler tarafından elde edilen değerlere olan oranının ortalaması, standart sapması (SD), değişkenlik katsayısı (COV) ve Denklem 19’a göre hesaplanan standart hata (AAE) değerleri Tablo 3’de sunulmuştur.



Şekil 1. Kayma donatısız FRP donatılı elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması

ENİNE VE BOYUNA FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMI

$$AAE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{V_{den} - V_{model}}{V_{exp}} \right| \times 100 \quad (19)$$

Bu denklemdeki V_{den} . ve V_{model} deneysel ve model kesme dayanım sonuçlarının ise deney sayısını ifade etmektedir.

Tablo 3. Kayma donatısız betonarme kirişler için önerilen modellerden elde edilen sonuçlara ait istatistiksel değerler

Model	V_{den}/V_{model}			AAE (%)
	Ortalama	SD	COV (%)	
ACI 440.1R-06	1,86	0,52	27,70	43,26
CAN/CSA-S806-02	1,38	0,35	36,06	24,82
ISIS M03-07	1,25	0,45	35,93	32,83
JSCE-97	1,39	0,37	26,47	24,82
BISE-99	1,15	0,33	28,91	18,04
Önerilen Denklem	1,04	0,26	24,80	15,25

Tablo 3 ve Şekil 1’den görüldüğü üzere ACI 440.1R-15 tarafından önerilen denklemden elde edilen değerlerin malzeme dayanımındaki azaltma katsayıları kullanmadan bile gereğinden fazla güvenli yönde sonuçlar verdiği ve V_{den}/V_{ACI} ’nin ortalamasının 1,86 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonucun ortaya çıkmasındaki en büyük nedenlerden biri; ACI 440.1R-15 modelinin betonun kesme dayanımına olan katkısını sadece tarafsız eksenin üzerindeki beton alanını göz önünde bulunduracak şekilde denklemlere yansıtmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan bu çalışma kapsamında önerilen denklemin deneysel sonuçlara en yakın sonuçları verdiği görülmüştür. ISIS-M03-07 tarafından önerilen denklemin kesme dayanımını etkileyen tüm parametreleri denklemde göz önünde bulundurmamasına karşın yine de uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. BISE tarafından önerilen denklemin de yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

3.2.2. Kayma Donatılı Betonarme Kirişler

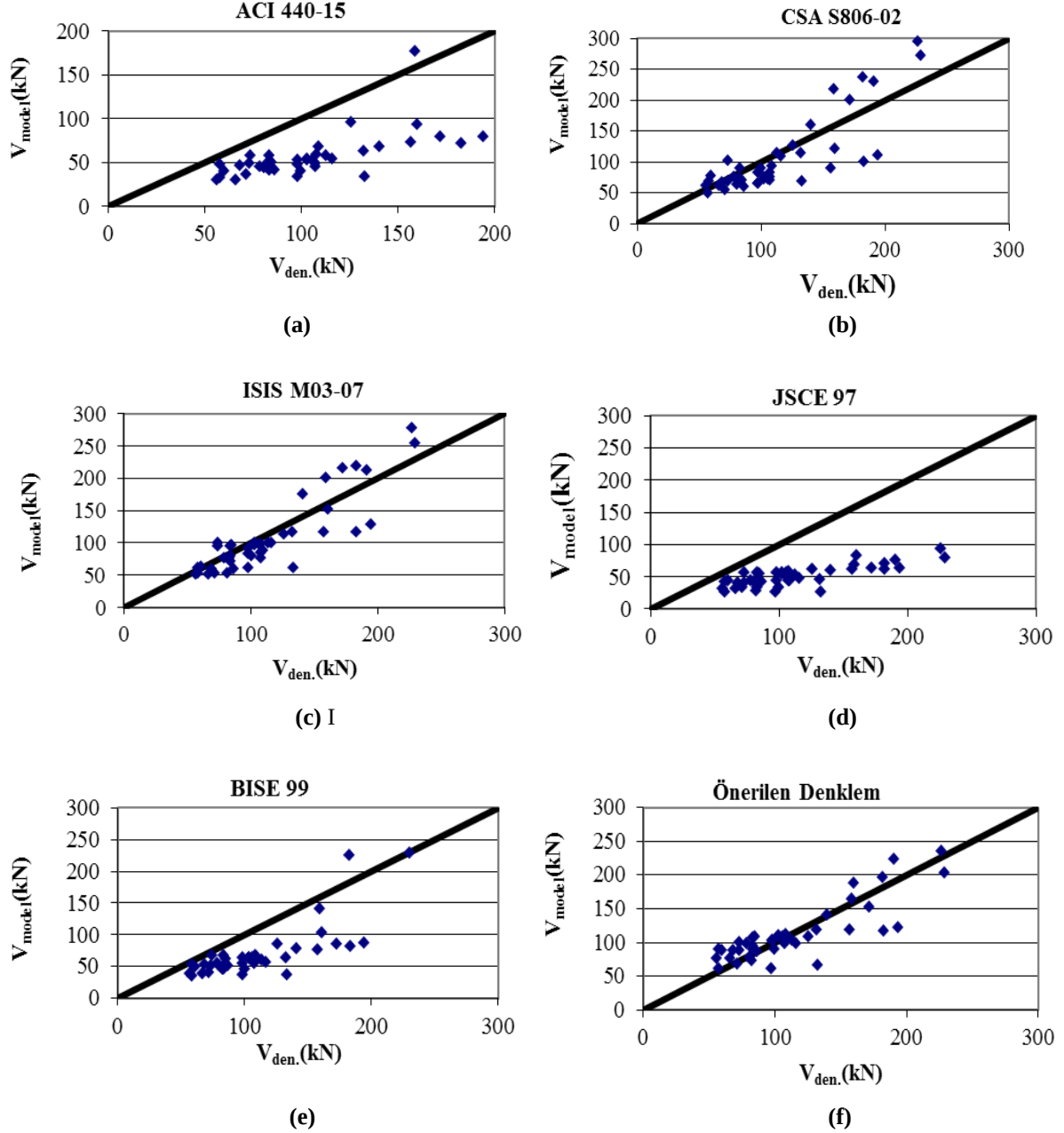
Bu bölümde FRP boyuna ve kayma donatısına sahip betonarme kirişlerin kesme dayanımı için, farklı ülke yönetmelikleri ve bu çalışma kapsamında önerilen denklem aracılığı ile elde edilen değerlerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılarak, Şekil 2’de sunulmuştur. Deneysel olarak elde edilen kesme dayanımı değerlerinin teorik değerlere olan oranının ortalaması, standart sapması (SD) ve standart hata (AAE) değerlerinin karşılaştırılması da Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. Kayma donatılı elemanlar için model ve önerilen denklemlere ait istatistiksel değerler

Model	V_{den}/V_{model}			AAE (%)
	Ortalama	SD	COV (%)	
ACI 440.1R-06	1,80	0,61	33,62	49,017
CAN/CSA-S806-02	1,20	0,31	25,90	22,300
ISIS M03-07	2,10	0,83	39,35	46,490
JSCE-97	2,29	0,70	30,63	52,790
BISE-99	1,65	0,52	31,27	38,310
Önerilen Denklem	1,07	0,30	28,10	17,020

Şekil 2 (a-f) ve Tablo 4’den görüldüğü üzere, gerek ISIS-M03-07 gerekse JSCE-97 tarafından önerilen modeller, kesme dayanımı değerlerini gereksiz şekilde oldukça güvenli yönde vermektedir. Bu modellerin bu şekilde güvenli yönde sonuçlar vermesi V_f değeri elde edilirken bu modellerin uygulanabilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu iki yöntemin bu şekilde sonuçlar vermesinin temel nedeni ise bu modeller hesaplanırken ε_{fv} değerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemden kaynaklanmaktadır. 12b ve 16b denklemleri kullanılarak deneysel data'lara ait, etriyelerdeki taşıma gücü anındaki şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin 0,00038 ile 0,0035 arasında değişen oldukça düşük değerler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, gerek

ISIS S806-02 gerekse JSCE-97 tarafından etriyelerin kesme dayanımı için önerilen denklemlerden elde edilen değerlerin kesme dayanımına olan katkısı oldukça düşük düzeyde olmaktadır. Gerek ACI 440.1R-06 gerekse BISE-99 tarafından etriyelerin kesme dayanımına olan katkısı için önerilen denklemlerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte CSA S806-02 tarafından verilen ve bu çalışmada önerilen denklemden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara en yakın değerler verdiği görülmüştür.



Şekil 2. FRP Kayma donatılı betonarme elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımı farklı yönetmelikler ve standartlar tarafından önerilen modeller aracılığı ile elde edilerek bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları için gerek beton gerekse kayma donatılarının katkısını da

ENİNE VE BOYUNA FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMI

ıerecek şekilde denklemler önerilmiş ve bu denklemlerin diğ r yönetmelikler tarafından önerilen modellerle karşılaştırması da yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

ACI 440.1R-15 tarafından FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımına ait beton katkısı için önerilen denklemden elde edilen değerlerin tüm modeller içinde oldu ca güvenli yönde sonuçlar verdiği g r lm ştir. Bununla birlikte ISIS-M03-07 tarafından önerilen denklemin kesme dayanımını etkileyen tüm parametreleri göz önünde bulundurmamasına karşın yine de uygun sonuçlar verdiği g r lm ştir. BISE-99 tarafından önerilen denklemin de yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği gözlemlenmiştir. FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımının hesabında gerek beton gerekse kayma donatısı katkısı için bu çalışma kapsamında önerilen denklemlerin en uygun sonuçları verdiği g r lm ştir.

ISIS-M03-07 ve JSCE 97 tarafından kayma donatısı katkısı için önerilen modellerden elde edilen değerlerin, kirişlerin toplam kesme dayanımına olan katkısı içerisinde oldu ca düşük düzeyde olduğu ve bu nedenle bu modellerin toplam kesme dayanımı değerlerini deneysel sonuçlara göre oldu ca düşük verdiği g r lm ştir.

KAYNAKLAR

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, Technical Committee Document No. 440.1R-15, Farmington Hills, Michigan, USA, 2015.
- [2] SHEHATA, E., Fibre-Reinforced Polymer (FRP) for Shear Reinforcement in Concrete Structures, PhD Dissertation, Manitoba University, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1999.
- [3] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATIONS (CSA). Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymer, Canadian Standards S806-02, Rexdale, Ontario, Canada, 2002.
- [4] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE), Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fibre Reinforced Materials, A. MACHIDA (Ed.), Concrete Engineering Series 23, Tokyo, Japan, 1997.
- [5] ISIS CANADA, Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, ISISM03-07, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Univ. of Winnipeg, Winnipeg, Man, Canada, 2007.
- [6] BRITISH INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (BISE), Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement, IstructE, SETO Ltd., London, UK, 1999.
- [7] NAGSAKA, T., FUKUYAMA, H., TANIGAKI, M., Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Stirrups, Detroit, Michigan, USA, 1993.
- [8] HEGGER, J., NIEWELS, J., KURTH, M., "Shear Analysis of Concrete Members with Fibre Reinforced Polymers (FRP) as Internal Reinforcement", 9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-9, 1-8, Sydney, Australia, 2009.
- [9] SPADEA, S., Comportamento di Elementi di Calcestruzzo Armato Con Barre di Materiale Composito Fibroinforzato, University of Salerno, Fisciano, Italy, 2010.
- [10] RAZAQPUR, A.G., SPADEA, S., "Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups", Journal of Composite for Construction, 19, 1-15, 2015.
- [11] CNR-DT 203/2006, Guide for Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars, Rome, Italy, 2006.
- [12] ASHOUR, A.F., KARA, I.F., "Size Effect on Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Beams", Composite Part B: Engineering, 60, 612-620, 2014.
- [13] EL-SAYED, A.K., EL-SALAKAWY, E.F., BENMOKRANE, B., "Shear Strength of one Way Concrete Slabs Reinforced With FRP Composites Bar", Journal of Composite for Construction, 9, 147-157, 2005.
- [14] EL-SAYED, A.K., EL-SALAKAWY, E.F., BENMOKRANE, B., "Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Beams without Transverse Reinforcement", ACI Structural Journal, 103, 235-243, 2006.
- [15] ALKHRDAJ , T., WIDEMAN, M., BELARBI, A., NANNI, A., "Shear Strength of GFRP RC Beams and Slabs", Proceedings of the Int. Conference Composites in Construction-CCC, 409-414, Porto, Portugal, 2001.
- [16] ALSAYED, S., AL-SALLOUM, Y., ALMUSALLAM, T., AMJAD, M., "Evaluation of Shear Stresses in Concrete Beams Reinforced by FRP Bars", Proceeding of the Second International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures (ACMBS-II), 173-179, Montreal Quebec, Canada, 1996.