

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME KİRİŞLERDE NARİNLİK ORANINA BAĞLI DAYANIM
DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

MUSTAFA ŞİNİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. GÜRAY ARSLAN

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME KİRİŞLERDE NARİNLİK ORANINA BAĞLI DAYANIM
DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa ŞİNİK tarafından hazırlanan tez çalışması 01.11.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cem AYDEMİR
İstanbul Aydın Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana yol gösteren ve her konuda yardımcı olan kıymetli hocam Sn. Prof. Dr. Güray ARSLAN'a, deney çalışmalarım ve sonrasında bana yardımını hiçbir şekilde esirgemeyen Sn. Doç. Dr. Rıza Secer Orkun KESKİN'e, hayatım boyunca her zaman yanımda olup, bu günlere gelmemeye vesile olan ve her türlü konuda desteklerini hissettiğim babam Sn. Ali ŞİNİK, annem Sn. Türkan ŞİNİK'e teşekkür ederim.

Kasım, 2018

Mustafa ŞİNİK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
BETONARME KİRİŞ KESME DAYANIMINI ETKİLEYEN TEMEL PARAMETRELER.....	5
2.1 Kesme Dayanımı Etkileyen Temel Parametreler	5
2.1.1 Eleman Yüksekliği veya Boyut Etkisi	5
2.1.2 Kesme Açıklığının Kiriş Etkili Yüksekliğine Oranı (a/d) ve Mesnet Koşullarının Etkisi.....	6
2.1.3 Boyuna Donatı Etkisi	6
2.1.4 Eksenel Kuvvet Etkisi	7
2.1.5 Yükleme Şeklinin Etkisi	7
2.2 Kesme Dayanımı Tahminleri	7
2.3 Bağıntıların Değerlendirilmesi	9
2.3.1 Beton Basınç Dayanımı	11
2.3.2 Eğilme Donatısı Oranı	12
2.3.3 a/d Etkisi	13

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	15
3.1 Kiriş Özellikleri.....	15
3.2 Deney Düzenegi	16
3.3 Kiriş Deney Sonuçları	17
3.3.1 Etriyersiz Kirişler.....	18
3.3.2 Etriyeli Kirişler	18
3.3.2.1 C2.5S20 Kirişi	18
3.3.2.2 C3.5S20 Kirişi	19
3.3.2.3 C4.5S20 Kirişi	19
3.3.2.4 C4.5S10 Kirişi	20
3.4 Dayanımlar, Yerdeğıştirmeler ve Kırılma Biçimleri	20
3.4.1 Yük-Yerdeğıştirme Eğrileri	21
3.4.2 a/d Değışiminin Yük-Yerdeğıştirme ve Kırılma Biçimine Etkisi	22
3.4.3 Etriye İçeriğinin Yük-Yerdeğıştirme ve Kırılma Biçimine Etkisi	23

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	24
KAYNAKLAR.....	27
ÖZGEÇMİŞ.....	30

SİMGE LİSTESİ

a	Kiriş kesme açıklığı
b_w	Kiriş kesit genişliği
d	Kiriş etkili yüksekliği
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ct}	Betonun çekme dayanımı
f_{Ftu}	Maksimum çatlak genişliğine karşılık gelen eğilme-çekme dayanımı
P_{co}	Maksimum yük
P_{cr}	Eğik çatlama yükü
P_u	Göçme yükü
V_{co}	Betonun karşıladığı kesme dayanımı
δ_{co}	Maksimum yük oluştuğu zaman açıklık ortası yerdeğiştirme
δ_{cr}	Eğik çatlak oluştuğu zaman açıklık ortası yerdeğiştirme
δ_u	Göçmede açıklık ortası yerdeğiştirme
\emptyset	Donatı çeliği çapı
ρ	Çekme donatısı oranı
ρ'	Basınç donatısı oranı
ω_{max}	Yapı için normal çevre koşulları altında çatlak genişliği sınırı
v_{cr}	Kirişin çatlama kesme dayanımı
V_u	Kesitte oluşan kesme kuvveti
M_u	Kesitte oluşan eğilme momenti

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
CEB	Euro-International Committee for Concrete
FIP	The International Federation for Structural Concrete
PDT	Potentiometric Displacement Transducer
RC	Reinforced Concrete
TS	Türk Standartı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Kiriş kesme açıklığında denge bir elemanda iç kuvvetler	2
Şekil 2.1 TS500, ACI318 ve Zsuttu bağıntılarının deneysel veriler ile karşılaştırılması ...	10
Şekil 2.2 TS500, ACI318 ve Zsuttu bağıntılarının beton basınç dayanımı ile değişimi	11
Şekil 2.3 TS500, ACI318 ve Zsuttu bağıntılarının eğilme donatısı oranına ile değişimi...	12
Şekil 2.4 TS500, ACI318 ve Zsuttu bağıntılarının a/d ile değişimi	14
Şekil 3.1 Kiriş kesitleri ve donatı yerleşimleri	15
Şekil 3.2 Yerdeğiştirme ölçerlerin konumları.....	17
Şekil 3.3 Deney düzeneği	17
Şekil 3.4 Deney öncesi ve sonrası C2.5S20R kirişi görünüşleri.....	18
Şekil 3.5 Deney öncesi ve sonrası C3.5S20R kirişi görünüşleri.....	19
Şekil 3.6 Deney öncesi ve sonrası C4.5S20R kirişi görünüşleri.....	20
Şekil 3.7 Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	22

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bağıntıların tahminlerinin istatistiksel sonuçları	9
Çizelge 3.1 Beton malzeme karışım oranları	15
Çizelge 3.2 Deney kirişlerinin özellikleri	16
Çizelge 3.3 Kritik yük ve yerdeğiştirme değerleri	21

BETONARME KİRİŞLERDE NARİNLİK ORANINA BAĞLI DAYANIM DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa ŞİNİK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güray ARSLAN

Bu çalışmada; literatürdeki çalışmalar incelenerek etriyesiz betonarme kirişlerde, kesme dayanımını etkileyen temel parametrelerin beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) olduğu görülmüştür. Etriyesiz betonarme kirişlerde dayanımı etkileyen temel parametrelere göre TS500, ACI318 ve Zsutty bağıntılarının dayanım tahminleri yapılmış ve her bir parametrenin tahmine etkisi gösterilmiştir. Daha sonra, etriyeli betonarme kirişlerde a/d değişiminin dayanıma etkisi deneysel olarak araştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel çalışmada; açıklık ortasından tekil yüklü, a/d değeri 2,5, 3,5 ve 4,5 olan etriyeli betonarme kirişlerde yerdeğiştirme kontrollü yük uygulanmış, kirişlerin açıklıklarında oluşan yerdeğiştirmeler veri kayıt cihazı yardımıyla kaydedilmiş, narinlik oranına bağlı dayanım değişimleri ve kırılma biçimleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Kiriş, Narinlik Oranı, Kesme Açıklığı, Kırılma Biçimleri

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SLENDERNESS RATIO ON THE
STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS**

Mustafa ŞİNİK

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Güray ARSLAN

In this study, it was observed that the main parameters affecting the shear strength of reinforced concrete beams without stirrups are concrete compressive strength, longitudinal reinforcement ratio and effective depth-to-shear span ratio (a/d) by conducting literature survey. The shear strength predictions by the equations of TS500, ACI318 and Zsutty were calculated and the effect of each parameter on the shear strength prediction was shown. Then, the effect of a/d on the strength of reinforced concrete beams with stirrups were investigated experimentally and the results were discussed. In the experimental study, a displacement-controlled loading scheme was applied to reinforced concrete beams with stirrups having a/d of 2.5, 3.5 and 4.5 as a concentrated load at their mid-spans, the mid-span deflections of beams were recorded by means of a computer-aided data acquisition system, the effect of slenderness ratio on the strength and failure type was identified.

Keywords: Reinforced Concrete, Beam, Slenderness Ratio, Shear Span, Failure Modes

1.1 Literatür Özeti

Betonarme kirişlerde; günümüze kadar kiriş kesme dayanımı tahminine yönelik çok sayıda çalışmalar yapılmış ve denklemler önerilmiştir. Bu denklemlerin içerdiği ana parametreler [1]: Beton basınç dayanımı, kiriş boyuna donatı oranı, kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d), etriyeli kirişlerde kesme donatısı oranı ve kesme donatısı akma dayanımıdır.

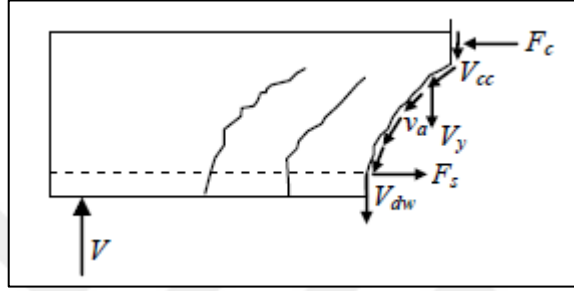
a/d değeri, yük uygulama noktasının mesnete uzaklığı ya da kesme açıklığı olarak ifade edilen uzunluğun (a), kiriş etkili yüksekliğine (d) oranıdır. a/d ; aynı zamanda $M/(Vd)$ terimleri ile de ifade edilebilir ve kesitte eşzamanlı olarak meydana gelen eğilme momenti (M) ve kesme kuvveti (V) arasındaki oranla ilişkilidir.

Bressler ve Macgregor [2] tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişler a/d oranına göre üç sınıfa ayrılmıştır: (i) Derin kirişler $0 < a/d < 1$, (ii) kısa kirişler $1,0 < a/d < 2,5$, (iii) normal (narin) kirişler $a/d > 2,5$ olarak tanımlanmıştır. a/d azaldıkça kirişlerin kesme dayanımının arttığı ifade edilmiştir.

a/d değeri 2~6 olan, betonarme kirişlerde kayma ve normal gerilmelerine bağlı olarak yatayla 30° ~ 60° açı olacak şekilde eğik çatlaklar oluşur. Kirişlerde kesme kırılmasının birçok farklı tipleri olsa da bunlardan en sık karşılaşılanı eğik çatlağın üzerinde basınç kenarının kayması ya da ezilmesi ile oluşan ve çekme donatısı boyunca yarılmalardan meydana gelmesi ile beliren göçme biçimidir [3].

Park ve Paulay [4] tarafından yapılan çalışmada, sabit kesme kuvveti uygulanan etriyesiz basit mesnetli bir betonarme kiriş parçasının eğik çatlak ile sınırlandırılmış tarafında, dengeyi sağlayan iç kuvvetler gösterilmiştir (Şekil 1.1). İncelenen kiriş kesitinde, dış yüklerden gelen V kesme kuvveti, aşağıdaki iç kuvvet bileşenleri ile karşılaşılır:

1. V_{cc} : Çatlamamış basınç bölgesindeki beton ile karşılanan kesme kuvveti
2. V_{dw} : Eğilme donatısı tarafından karşılanan kesme kuvveti
3. V_y : Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvvetinin düşey bileşeni



Şekil 1.1 Kiriş kesme açıklığında denge bir elemanda iç kuvvetler

Kirişte enine donatı bulunduğu durumda yukarıdaki iç kuvvetlere ilave olarak: Eğik çatlakın kestiği enine donatılardaki çekme kuvvetleri (F_{sw}) de toplama eklenir.

Kim vd. tarafından yapılan çalışmada [5], betonarme kirişte iç kesme kuvveti taşıma gücü, kiriş etkisi ve kemer etkisi dikkate alınarak tanımlanmıştır. Betonarme kirişin davranışında $a/d > 2,5$ olduğunda kiriş etkisi, $a/d < 2,5$ olduğunda ise kemer etkisi daha belirleyicidir.

Kong ve Evans [6] tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin kırılma biçimleri, artan a/d oranına göre; derin kiriş kırılması ($a/d \leq 1$), kesme-basınç kırılması ($1 < a/d \leq 2,5$), kesme-çekme kırılması ($2,5 < a/d < 5-6$), eğilme kırılması ($a/d > 5-6$) olarak belirtilmiştir.

Leonhardt ve Walther [7] tarafından yapılan çalışmada, boyuna donatılı betonarme kirişlerde boyut etkisi araştırılmış ve a/d oranı 3~8 olan numunelerde kesme dayanımına bağlı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Kani vd. [8] tarafından yapılan çalışmada, a/d değeri 1 ile 8 arasında bulunan etriyesiz kirişlerde inceleme yapılmıştır. Deney sonucu a/d oranının, kesme dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. a/d oranının azalması, kiriş kesme dayanımını artırmıştır.

Kiriş yüksekliğinin artmasıyla, çekme donatısı üzerindeki çatlak genişliğinin de arttığı belirtilmiştir.

Bazant ve Sun [9] tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerde eğik kesme kırılmasında a/d ve kesme donatısının etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmadaki temel değişkenler; a/d ve enine donatı oranıdır. Deney sonuçları literatürdeki bazı bağıntılarla karşılaştırılmış ve kiriş kesme dayanımını daha doğru tahmin eden bağıntı önerilmiştir.

Zararis ve Papadakis [10] tarafından yapılan çalışmada, kesme donatısız betonarme kirişlerin a/d değişimine bağlı olarak, kirişlerin kesme dayanımları ve kırılma biçimleri incelenmiştir. Kırılma anındaki kesme dayanımı ile çatlak oluşumlarına a/d oranının etkisi incelenmiştir.

Bousselham ve Chaallal [11] tarafından yapılan çalışmada, karbon fiberler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde kesme donatısı ve kesme açıklığının kesme dayanımına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmadaki değişkenler; karbon fiber oranı, enine donatı oranı ve a/d olarak alınmıştır. Deneyler sonrası kirişlerin kesme dayanımlarındaki değişim karşılıklı değerlendirilmiş ve literatürde bulunan denklemlerle kesme dayanımları karşılaştırılmıştır.

Reddy ve Rao [12] tarafından yapılan çalışmada, çelik lif katkılı ve katkısız, enine donatısız, yüksek dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde a/d değeri 1~4 alınarak, kiriş kesme dayanımının değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışmadaki değişkenler; a/d ve çelik lif içeriği alınmıştır.

Mazhari [13] ve Özgen [14] tarafından yapılan çalışmalarda etriyesiz bazalt lifli ve liffsiz betonarme kirişlerin dayanımları, Arabacı [15] tarafından yapılan çalışmada ise etriyeli kirişlerin çelik plakalarla güçlendirilmesi durumundaki yük-yerdeğiştirme eğrileri çizilerek, dayanım değişimleri irdelenmiştir. Söz konusu çalışmalardaki referans (yalın) kirişler bu çalışmadaki kirişlerin dayanımlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Yapılan çalışmada; kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı deneysel olarak 2,5, 3,5 ve 4,5 olan etriyeli betonarme kirişlerin mekanik davranışları deneysel olarak

araştırılmıştır. Deneyleerde; a/d oranı ve etriye içeriğinin kiriş dayanımına etkisi incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Mevcut deneysel sonuçlar, kesit boyutları ve çekme donatısı oranları aynı olan Mazhari [13], zgen [14], Arabacı [15] tarafından yapılan çalışmadaki deneysel sonuçlar ve literatürdeki kirişlerle karşılaştırılarak betonarme kirişlerde narinlik oranı değeriminin dayanıma etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Kesme açıklığının kiriş etkili ykseklığine oranı artarken kirişin kırılma anında ulaşacağı dayanımın azalması beklenmektedir. İncelenen üç kirişte (a/d değerı 2,5, 3,5 ve 4,5) de ani kesme kırılması ön görülmektedir. Kirişlerde, TS500 [16]'de verilen donatı yerleştirme sınır koşullarına uyulduğu için sünek bir davranış göstererek ani çatlak oluşumu beklenmemektedir.

BETONARME KİRİŞ KESME DAYANIMINI ETKİLEYEN TEMEL PARAMETRELER

Betonarme kirişlerin kesme dayanımı tahmini üzerine araştırmalar 20. yüzyılın başlangıcına kadar gitmektedir. Fakat yapılan deneysel ve teorik çalışmaların tahminleri arasında önemli farklar oluşmaktadır. Bu bölümde, betonarme kirişlerde kesme dayanımını etkileyen temel parametreler belirlenmiş ve kesme dayanımında değişime etkisi özetlenmiştir.

2.1 Kesme Dayanımı Etkileyen Temel Parametreler

1. Eleman Yüksekliği veya Boyut Etkisi
2. Kesme Açıklığının Kiriş Etkili Yüksekliğine Oranı (a/d) ve Mesnet Koşullarının Etkisi
3. Boyuna Donatı Etkisi
4. Aksenal Kuvvet Etkisi
5. Yükleme Şeklinin Etkisi

2.1.1 Eleman Yüksekliği veya Boyut Etkisi

Kesme donatısız elemanların kesme dayanımında boyut etkisi çok önemlidir. Kiriş etkili yüksekliği küçüldükçe, göçmeye sebep olan kayma gerilmesindeki artışın göçme kayma gerilmesinin üç katına kadar ulaşabildiği görülmüştür [17]. Çatlak yüzeyleri arası mesafenin azalması, agrega kenetlenmesinin etkisi artırır; dolayısı ile, eleman yüksekliği azaldıkça çatlama kesme dayanımı değeri artmaktadır. ACI318 [18] ve TS500 [16]' in

aksine CEB-FIP [19]' da kiriş yüksekliğinin çatlama kesme dayanımına etkisi dikkate alınmıştır.

Bazant ve Kim tarafından yapılan [20] çalışmada, genişleyen çatlakların kalıcı çekme gerilmelerini azalttığı görüşü hâkimdir ve bunun sonucu olarak, doğrusal olmayan kırılma mekaniği temel alınarak boyut azaltılmasının kullanılması önerilmektedir:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{d_o}}} \quad (2.1)$$

Bağintıda; d_o , deneysel parametredir. Diğer araştırmacılar da, benzer şekilde, genişleyen çatlakların, çatlak yüzeyi kayma gerilmesi iletme yeteneğini azalttığını ifade etmektedirler.

2.1.2 Kesme Açıklığının Kiriş Etkili Yüksekliğine Oranı (a/d) ve Mesnet Koşullarının Etkisi

Aynı kesit ve malzeme özelliklerine sahip kirişlerde, a/d oranı azaldıkça, göçmede ortalama kayma gerilmesi artar. Bunun sebebi, eleman yüksekliği arttıkça kesmenin basınç çubuğu ile mesnede aktarımından kaynaklanmaktadır. Mesnet koşulları, doğrudan basınç çubuğu oluşup oluşmayacağını önemli derecede belirler [17].

2.1.3 Boyuna Donatı Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda, boyuna donatının düşük miktarda olduğu kesme donatısız kirişlerde, çok düşük kayma gerilmelerinde elemanların göçebildiği gözlenmiştir [17]. ASCE-ACI 426 [3] raporunda; eğik çatlama, boyuna çekme donatı oranını da içeren ortalama kayma gerilmesini tahmini için bağıntı verilmiştir. Raporda, artan çatlak genişliği ile eleman kesme kapasitesinde önemli azalma olduğu, çatlak yüzeyleri arası açılmanın kesme iletimini düşürdüğü ve kaldıraç (perçin) etkisinin azaldığı ifade edilmiştir.

2.1.4 Eksenel Kuvvet Etkisi

Kesme donatısız elemanlarda, eksenel çekme kuvvetinin kesme dayanımını azalttığı ve eksenel basınç kuvvetinin (öngerme veya uygulanan yük nedeni ile) ise, kesme dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlarda, basınç bölgesi artarak çatlama yapmış beton basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti artmaktadır [21]. Buradan; eğik çatlakların genişliğinin azalması, çatlak içi kesme dayanımını ve kaldırma (perçin) etkisi kesme kuvveti taşıma kapasitesini de artırmaktadır. ASCE-ACI 445 [17] raporunda, günümüze kadar yapılan çalışmalardan, eksenel yükün eleman kesme kapasitesini ne kadar etkileyeceği ve eleman sünekliğine etkisinin ne olduğunun tam olarak belirlenemediği ifade edilmektedir.

2.1.5 Yükleme Şeklinin Etkisi

Açıklık ortasında tekil yük etkisine maruz betonarme kirişlerin kesme dayanımında, en önemli parametrelerden birisi kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d)'dir. Söz konusu parametre, düzgün yayılı yük durumunu da kapsayacak şekilde $M/(Vd)$ olarak yeniden ifade edilebilir. Kesme donatısız betonarme kirişlerle yapılan deneylerde; tahmin edilebileceği gibi, düzgün yayılı yüklü betonarme elemanların, tekil yükle yüklenenlerden daha yüksek kesme dayanımına sahip oldukları görülmüştür [21].

2.2 Kesme Dayanımı Tahminleri

Herhangi bir kesitte a/d oranının artışıyla eğilme momenti artacağından, çatlama kesme dayanımı v_{cr} , eğilme momenti artışıyla azalacaktır. Bu bölümde, a/d değeri 2,5'dan büyük (narin) betonarme kirişlerde kesme dayanımı tahminleri, literatürdeki deneysel sonuçlar (Krefeld ve Thurston [22], Mphonde ve Frantz [23], Bresler ve Scordelis [24], Cho [25]) ile karşılaştırılmıştır.

Deneylerde, eğik çatlak, boyuna donatı düzeyinden yükün uygulama noktasına doğru uzanan eğimli çatlak olarak tanımlanır ve ilk ana çatlak oluşumuna neden olan yük, eğik çekme çatlama yükü olarak tanımlanmaktadır. Kesme kuvveti ve eğilme momentine maruz kesme donatısız a/d değeri 2,5'dan büyük betonarme kirişlerin eğik çatlama kesme dayanımı için TS500 tarafından önerilen bağıntı (2.2)'de verilmiştir.

$$v_{cr} = 0,2275(\sqrt{f_{ck}}) \quad (\text{MPa}) \quad (2.2)$$

Bağıntıda, v_{cr} çatlama kesme dayanımı (MPa), f_{ck} betonun karakteristik beton basınç dayanımı (MPa) alınmıştır.

ACI318 [18] tarafından önerilen kesme dayanımı bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$v_{cr} = \frac{1}{7} \left(\sqrt{f_c} + 120\rho \frac{V_{ud}}{M_u} \right) \leq 0,3\sqrt{f_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.3)$$

(2.3) bağıntısındaki kesme dayanımı, betonun ve boyuna donatının katkısı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Eğik çatlama dayanımına hangi mekanizmanın ne kadar katkısı olduğu sorusunu cevaplamak oldukça zordur [17]. Genellikle, kesme donatısız elemanda kaldıraç kesme dayanımı bileşeni ihmal edilmektedir. Kaldıraç kesme dayanımı donatıyı çevreleyen beton örtü tabakasının çekme mukavemeti ile sınırlıdır [21].

ACI318 yönetmeliğinde (2.3) bağıntısı tasarım uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir yaklaşım iken, basitleştirilmiş (2.4) bağıntısı kesme dayanımı için temel ifadedir.

$$v_{cr} = \frac{1}{6} (\sqrt{f_c}) \quad (\text{MPa}) \quad (2.4)$$

Bağıntıda v_{cr} , MPa; f_c , MPa boyutundadır.

Zsutty [26] tarafından a/d değeri 2,5'dan büyük betonarme kirişlerin kesme dayanımı için (2.5) bağıntısı önerilmiştir.

$$v_c = 2,2(f_c \rho d/a)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2.5)$$

Bağıntıda v_c kesme dayanımına betonun katkısı (MPa), ρ çekme donatısı oranı, a/d narinlik oranını ifade etmektedir.

a/d değeri 2,5'dan büyük (narin) betonarme kirişlerde kesme dayanımı tahminleri normal dayanımlı betonarme kirişler (Bazant ve Kazemi [27], Moody vd. [28], Taylor [29], Cossio ve Siess [30], Van den Berg [31], Taylor ve Brewer [32], Bresler ve Scordelis [24], Mathey ve Watstein [33], Mattock [34], Krefeld ve Thurston [22], Mphonde ve Frantz [23], Cho [25], Cladera and Mari [35]) ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler (Mphonde

ve Frantz [23], Cho [25], Cladera ve Mari [35], Ahmad vd. [36], Elzanaty vd. [37], Kwak vd. [38]) deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.3 Bağıntıların Değerlendirilmesi

Bağıntılarının doğruluğunu ve sonuçlara yakınlığını karşılaştırılabilmek için, literatürde ulaşılabilen normal dayanımlı betondan üretilen kirişler (Bazant ve Kazemi [27], Moody vd. [28], Taylor [29], Cossio ve Siess [30], Van den Berg [31], Taylor ve Brewer [32], Bresler ve Scordelis [24], Mathey ve Watstein [33], Mattock [34], Krefeld ve Thurston [22], Mphonde ve Frantz [23], Cho [25], Cladera ve Mari [35]) ve yüksek dayanımlı betondan üretilen kirişlerin (Mphonde ve Frantz [23], Cho [25], Cladera ve Mari [35], Ahmad vd. [36], Elzanaty vd. [37], Kwak vd. [38]) deney sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Karşılaştırmada beton basınç dayanımının 50MPa değerinin altı normal dayanımlı beton, üstü ise yüksek dayanımlı beton olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1 Bağıntılarının tahminlerinin istatistiksel sonuçları

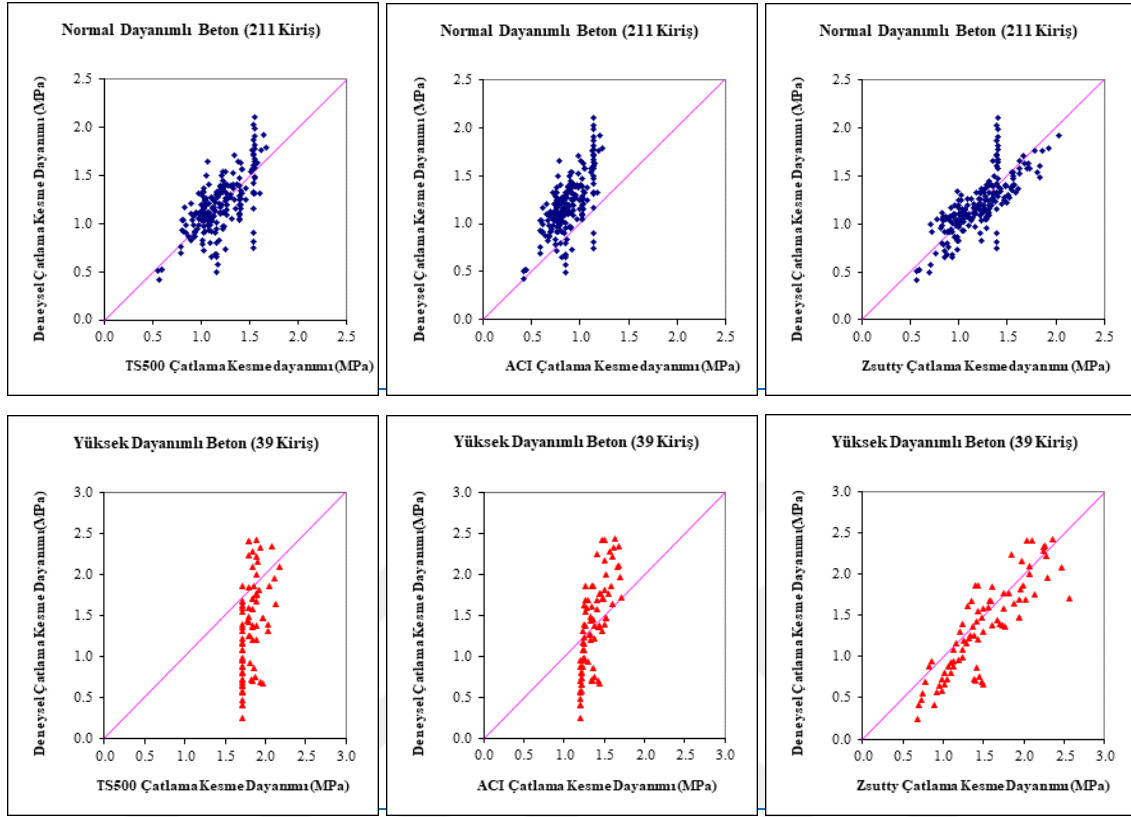
	Normal Dayanımlı Beton			Yüksek Dayanımlı Beton		
	Ort.	SD	Var.	Ort.	SD	Var.
TS500	1,014	0,222	0,219	0,788	0,431	0,547
ACI318	1,382	0,290	0,210	1,028	0,512	0,498
Zsutty	1,009	0,194	0,193	0,922	0,328	0,356

Ort: Ortalama Değer; SD: Standart Sapma; Var: Varyasyon Katsayısı

Bu sonuçlara göre, normal dayanımlı beton kirişlerde varyasyon katsayılarının oldukça küçük bir aralıkta değiştiği (0,19~0,22), deneysel kesme dayanımının önerilen bağıntılar ile bulunan kesme mukavemeti tahminine oranın ortalama değerlerinin ise 1,01 ile 1,38 arasında değiştiği görülmüştür. Ancak ACI318 ve TS500'e göre bağıntı tahmininde karakteristik dayanımların alındığı ifade edilmelidir. Bu sonuçlara göre varyasyon katsayılarının en küçük değer verdiği bağıntının en doğru tahmini verdiği düşünüldüğünde, Zsutty tarafından önerilen bağıntının en iyi sonucu verdiği ifade edilebilir.

Yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerde ise, varyasyon katsayılarının oldukça büyük olduğu ve geniş bir aralıkta değiştiği (0,36~0,55), deneysel kesme dayanımının, önerilen bağıntılar ile bulunan kesme mukavemeti tahminine oranın

ortalama değerlerinin ise 0,79 ile 1,03 arasında değiştiği görülmüştür. Sınırlı saydaki kiriş için yapılan karşılaştırmada en doğru tahminin Zsutty tarafından yapıldığı görülmüştür.



Şekil 2.1 TS500, ACI318 ve Zsutty bağıntılarının deneysel veriler ile karşılaştırılması

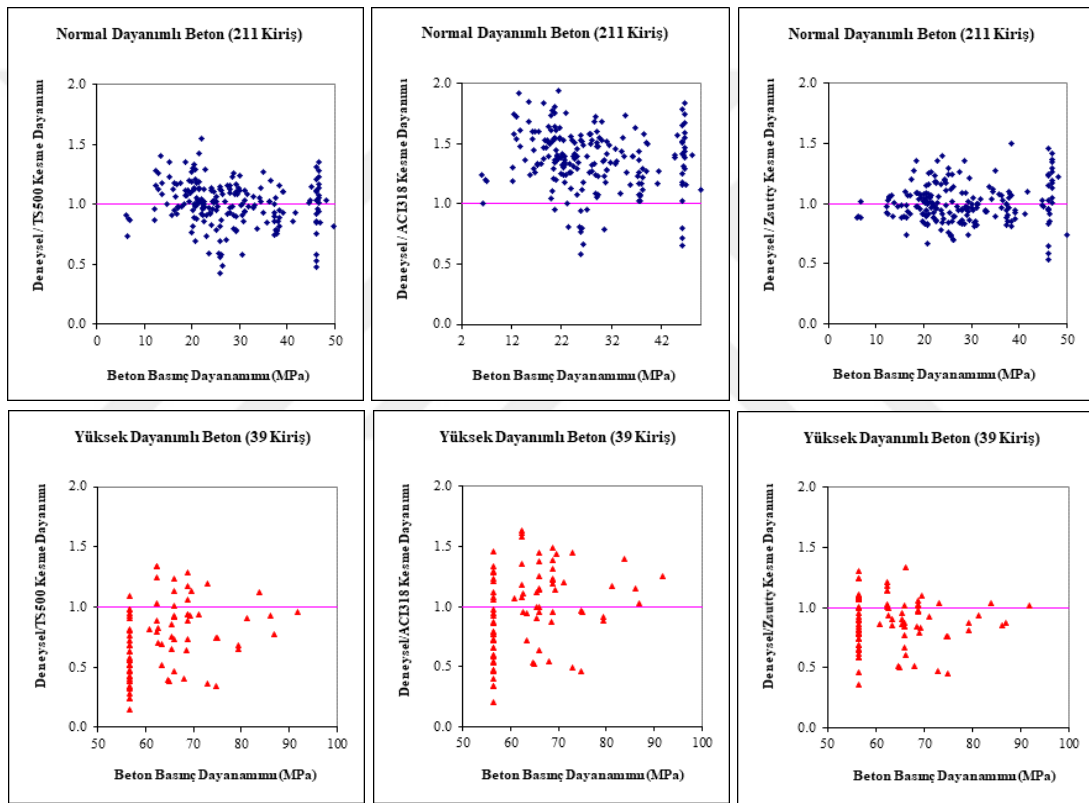
Şekil 2.1’de kesme dayanımı bağıntılarının deneysel normal dayanımlı betondan üretilen kirişler (Bazant ve Kazemi [27], Moody vd. [28], Taylor [29], Cossio ve Siess [30], Van den Berg [31], Taylor ve Brewer [32], Bresler ve Scordelis [24], Mathey ve Watstein [33], Mattock [34], Krefeld ve Thurston [22], Mphonde ve Frantz [23], Cho [25], Cladera ve Mari [35]) ve yüksek dayanımlı betondan üretilen kirişler (Mphonde ve Frantz [23], Cho [25], Cladera ve Mari [35], Ahmad vd. [36], Elzanaty vd. [37], Kwak vd. [38]) ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

Normal dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerde, çatlama kesme dayanımı bağıntılarının deneysel verilerle uyumlu olduğu, ancak yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerde ise yeteri kadar uyumlu olduğunun söylenmesi mümkün değildir. Bunun nedeninin yüksek dayanımlı beton kirişlerde ilgili tahminleri değerlendirmek için, gerekli deneysel verilerin yeterli olmadığı söylenebilir.

Bağıntıların deneysel verilerle uygunluğu beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve a/d değişimleri aşağıda tartışılmıştır.

2.3.1 Beton Basınç Dayanımı

Yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerde, varyasyon katsayılarının oldukça büyük olduğu ve geniş bir aralıkta değiştiği (0,36-0,55), deneysel kesme dayanımının önerilen bağıntılar ile bulunan kesme dayanımı tahminine oranının ortalama değerlerinin ise 0,79 ile 1,03 arasında değiştiği görülmüştür. Sınırlı sayıdaki kiriş için yapılan karşılaştırmada en doğru tahminin Zsutty [26] tarafından yapıldığı görülmüştür.



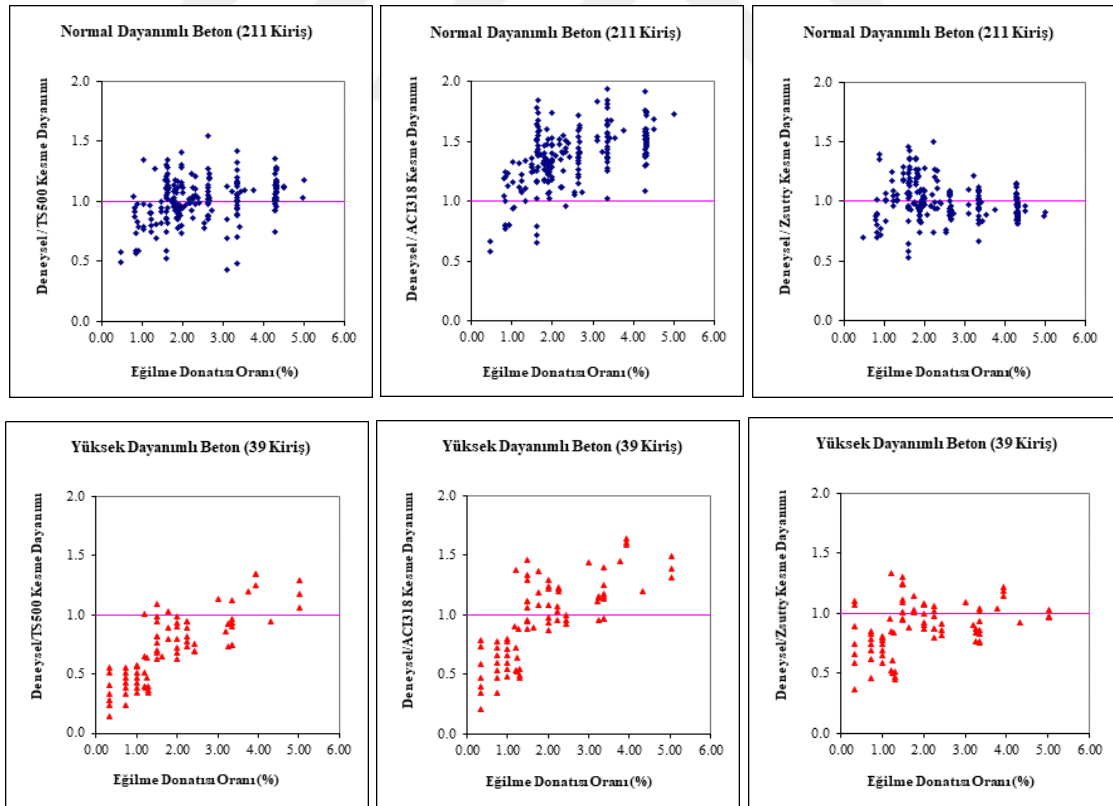
Şekil 2.2 TS500, ACI318 ve Zsutty bağıntılarının beton basınç dayanımı ile değişimi

Şekil 2.2'de TS500, ACI318 ve Zsutty tarafından önerilen bağıntılar ile bulunan değerlerin deney sonuçlarına oranının, beton basınç dayanımlarına göre karşılaştırılması gösterilmiştir. Normal dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, en iyi dağılımın Zsutty bağıntısı ile tahminin olduğu, ACI318'e göre dağılımın çok serpildiği, TS500 tahmininin ise ACI318'e göre daha iyi bir dağılım sergilediği ifade edilebilir.

Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, TS500, ACI318 ve Zsutty'e göre tahminlerden bulunan dağılımların çok serpildiği görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde deney sayısının sınırlı olduğu, daha fazla sayıda deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılması ve gerekiyorsa ilgili bağıntıların geliştirilmesi gerektiği düşünülebilir.

2.3.2 Eğilme Donatısı Oranı

Eğilme donatısı oranı %1,0'den ($\rho < 1,0$) az olan kesme donatısız betonarme kirişlerin kesme dayanımı ile ilgili araştırmaların geçmişte az sayıda yapıldığından bu elemanların dayanımı mevcut yönetmeliklerde aşırı tahmin edilmektedir [17]. Şekil 2.3'te TS500, ACI318 ve Zsutty tarafından önerilen bağıntılarının deneysel sonuçları tahminin eğilme donatısı oranlarına göre karşılaştırılması gösterilmiştir. Normal dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, en iyi dağılımın Zsutty bağıntısı ile tahminin olduğu, ACI318'e göre dağılımın çok serpildiği, TS500 tahminin ise ACI318'e göre daha iyi bir dağılım sergilediği ifade edilebilir.



Şekil 2.3 TS500, ACI318 ve Zsutty bağıntılarının eğilme donatısı oranı ile değişimi

Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş eğilme donatısı oranı %1,5'den ($\rho < \%1,5$) az olan betonarme kirişlerde, TS500, ACI318 ve Zsutty'e göre dayanım değerlerinin yeteri kadar doğru tahmin edilmediği, genel olarak ise dağılımların çok serpildiği görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde deney sayısının sınırlı olduğu, daha fazla sayıda deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılması ve gerekiyorsa ilgili bağıntıların geliştirilmesi gerektiği düşünülebilir.

2.3.3 a/d Etkisi

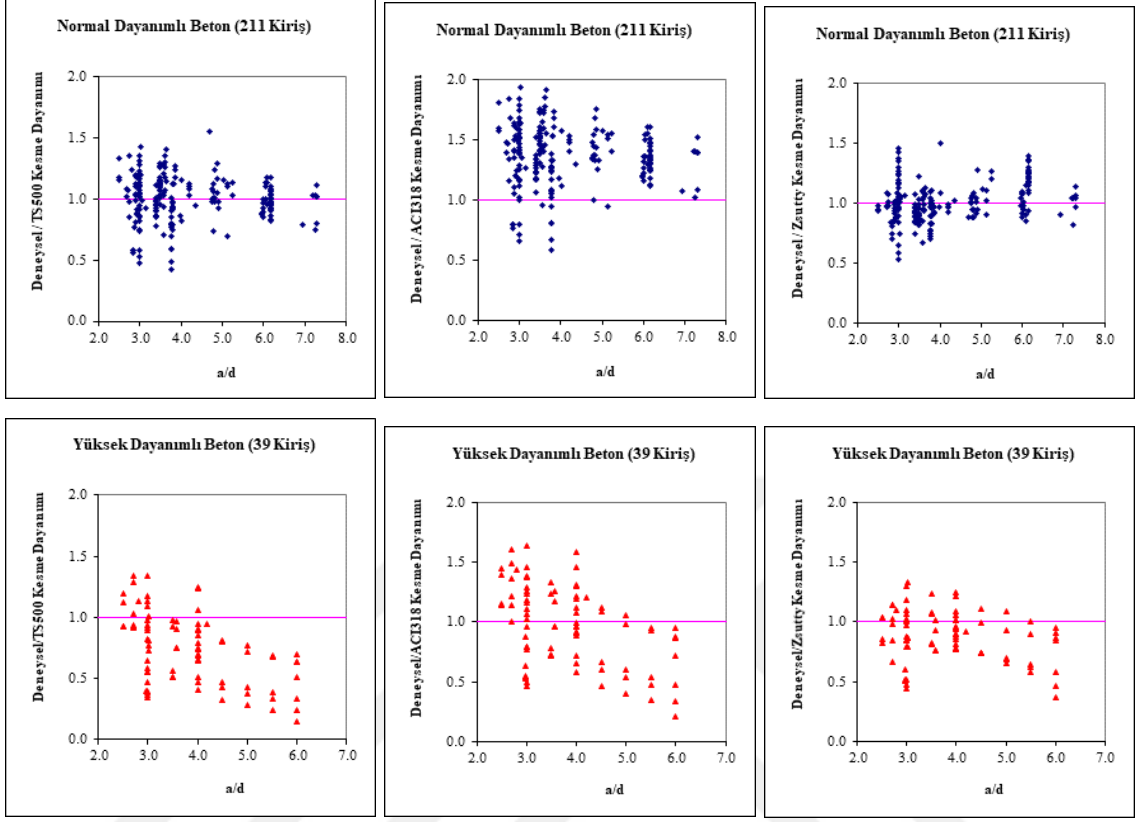
a/d değeri 2,5'tan küçük kirişlerde uygulanan yük kemerlenme etkisi ile doğrudan mesnetlere aktarılır. Kemerlenme etkisini belirleyen parametreler; a/d, betonun basınç dayanımı ve çekme donatısı oranıdır. Bernoulli-Navier hipotezine göre, kesitte boyuna şekil değiştirme dağılımı doğrusaldır ve a/d oranı 2,5'tan küçük kirişlerin kesitinde şekil değiştirme dağılımı doğrusal olmadığı için Bernoulli-Navier hipotezi geçerli değildir.

Rebeiz [39] tarafından yapılan çalışmada, a/d oranının göçme ve çatlama kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. $1 < a/d < 2,5$ olması durumunda; kemer etkisi nedeni ile ilk eğik çatlama oluşumunda sonra toptan göçmeye kadarki safhada, önemli ölçüde ilave eğik kuvvet taşınabildiği görülmüştür. $a/d \geq 2,5$ olan kirişlerde ise, ilk eğik çatlak oluşumunu toptan göçme izlemektedir; bu durumlarda çatlama kesme mukavemeti (v_{cr}) ve göçme kesme mukavemeti (v_u) yaklaşık eşit kabul edilmektedir.

Şekil 2.4'te TS500, ACI318 ve Zsutty tarafından önerilen bağıntıların deneysel sonuçları tahminin a/d değişimine göre karşılaştırılması gösterilmiştir. Normal dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, en iyi dağılımın Zsutty bağıntısı ile tahminin olduğu, ACI318'e göre dağılımın çok serpildiği, TS500 tahminin ise ACI318'e göre daha iyi bir dağılım sergilediği ifade edilebilir.

Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, TS500, ACI318 ve Zsutty'e göre tahminlerden bulunan dağılımların çok serpildiği, a/d artışı ile dayanım tahminlerinin deneysel sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür. Özellikle, a/d değerinin 4'den büyük olduğu yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerde kesme dayanım tahminindeki saçılmanın arttığı, bu saçılmanın azalması için daha fazla sayıda

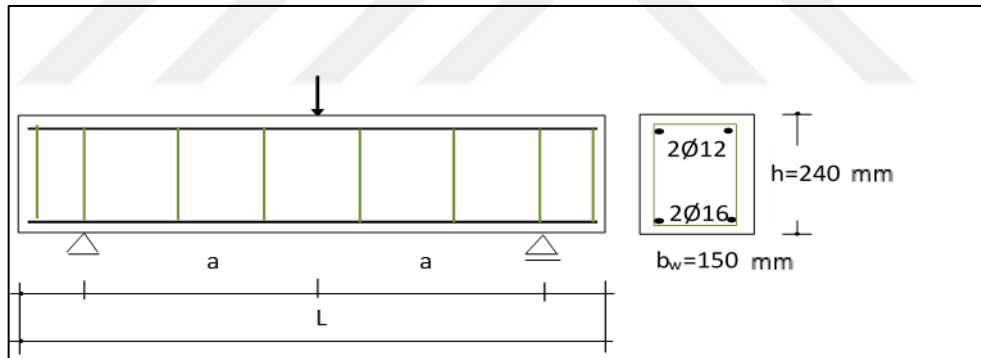
deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılması ve gerekiyorsa ilgili bağıntıların geliştirilmesi önerilebilir.



Şekil 2.4 TS500, ACI318 ve Zsutry bağıntılarının a/d ile değişimi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI**3.1 Kiriş Özellikleri**

Çekme donatısı olarak 2 Φ 16 uygulanan etriyeli betonarme kirişlerin basınç donatısı 2 Φ 12, etriye çapı Φ 8, etriye aralığı 20cm, kiriş genişliği (b_w) 150mm ve yüksekliği (h) 240mm olarak uygulanmıştır.



Şekil 3.1 Kiriş kesitleri ve donatı yerleşimleri

Çizelge 3.1'de üretilen kirişlerde kullanılan betonun karışım oranı verilmiştir.

Çizelge 3.1 Beton malzeme karışım oranları

Malzeme	Karışım oranları (kg/m ³)
0–1 mm doğal kum	350
1–3 mm kırma kum	550
5–12 mm kırma taş	1000
Çimento	300
Su	165
Süper akışkanlaştırıcı	3

Betonun tek eksenli basınç dayanımları kirişler ile beraber dökülen 150mm x 150mm x 150mm küp numunelerin deney gününde kırılması ile bulunmuştur. Silindir basınç dayanımlarının ortalaması, küp numunelerin dayanımlarından bulunan değerler ile hesaplanmıştır. Çizelge 3.2’de deneysel kirişlerin özellikleri verilmiştir. f_c betonun silindir basınç dayanımını, a/d kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranını, ρ çekme donatısı oranını, ρ' basınç donatısı oranını, Φ/s etriye çapı ve aralığını, L kirişin toplam uzunluğunu, l kirişin mesnetleri arası uzunluğunu göstermektedir.

Çizelge 3.2 Deney kirişlerinin özellikleri

Kirişler	a/d	L (mm)	l (mm)	a (mm)	f_c (MPa)	ρ (%)	ρ' (%)	Φ/s
C2.5R ^{&}	2,5	1400	1050	525	24,85	1,28	---	---
C3.5R [#]	3,5	2200	1470	735	24,85	1,28	---	---
C4.5R [#]	4,5	2200	1890	945	21,37	1,28	---	---
C6.0R [#]	6,0	3000	2520	1260	23,83	1,28	---	---
C2.5S20R	2,5	1400	1050	525	24,85	1,28	0,72	$\Phi 8/20$
C3.5S20R	3,5	2200	1470	735	23,83	1,28	0,72	$\Phi 8/20$
C4.5S20R	4,5	2200	1890	945	23,83	1,28	0,72	$\Phi 8/20$
C4.5S10R [^]	4,5	2200	1890	945	26,03	1,28	0,72	$\Phi 8/10$

[&]Mazhari [13], [#]Özgen [14], [^]Arabacı [15]

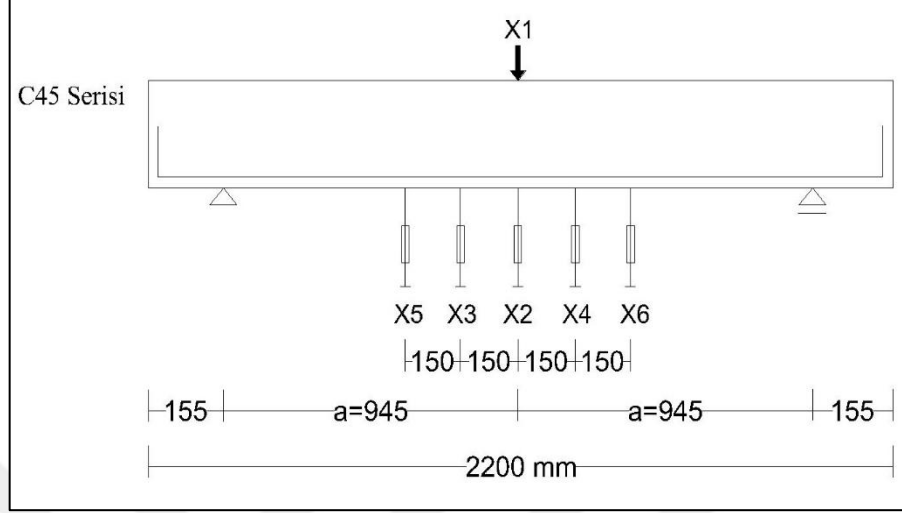
Deneysel çalışmada çekme donatısı olarak kullanılan $\Phi 16$, basınç donatısı olarak kullanılan $\Phi 12$ ve etriye olarak kullanılan $\Phi 8$ donatıların akma dayanımının belirlenmesi için her birinden üç numune alınarak çekme deneyi uygulanmıştır. Ortalama akma dayanımı $\Phi 16$, $\Phi 12$ ve $\Phi 8$ için, sırasıyla 679 MPa, 566 MPa ve 814 MPa bulunmuştur.

3.2 Deney Düzenegi

a/d değeri 2,5, 3,5 ve 4,5 olan etriyeli betonarme kirişlerde yerdeğiştirme kontrollü yükleme test cihazı ile tekil yük uygulanmıştır. Yükleme hızı 30 $\mu\text{m/s}$ alınmıştır. Açıklık ortasında tekil yüklü kirişlerde mesnetlerden biri sabit, diğeri hareketli tasarlanmıştır. Bütün numunelerde mesnet şartları aynıdır.

Şekil 3.2’de deneylerde veri aktarımı için kullanılan yerdeğiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki konumları, yükleme durumu, uygulama yerleri verilmiştir. Yük hücresi üzerindeki düşey yerdeğiştirmelerin, PDT (potentiometric displacement transducer) yardımıyla ölçüldüğü nokta “1”, açıklık ortasında kiriş yerdeğiştirmelerinin ölçüldüğü

nokta "2" ile tanımlanmıştır. Tüm kirişlerde; "3" ve "4" noktaları kiriş açıklık ortasından sağ ve sol tarafından 15 cm, "5" ve "6" noktaları kiriş açıklık ortasından sağ ve sol tarafından 30 cm alınmıştır.



Şekil 3.2 Yerdeğiştirme ölçerlerinin konumları



Şekil 3.3 Deney düzeneği

3.3 Kiriş Deney Sonuçları

Kirişlerin; yük-yerdeğiştirme eğrileri, çatlak oluşumları ve kırılma biçimleri bu bölümde verilmiştir.

TS500'de verilen yapı içi normal çevre koşulları altında çatlak genişliği sınırı $\omega_{max}=0,4$ mm olarak belirtilmiştir. ATC-38'de [40] verilen belirsiz çatlak hasar oluşumu "Hasarsız durum", kabuk betonunda sınırlı çatlak oluşumu ve ezilme "Sınırlı hasar durumu" olarak belirtilmiştir. Kirişlerdeki çatlak genişlikleri göz önüne alınarak hasar durumları belirlenmeye çalışılmıştır.

3.3.1 Etriyersiz Kirişler

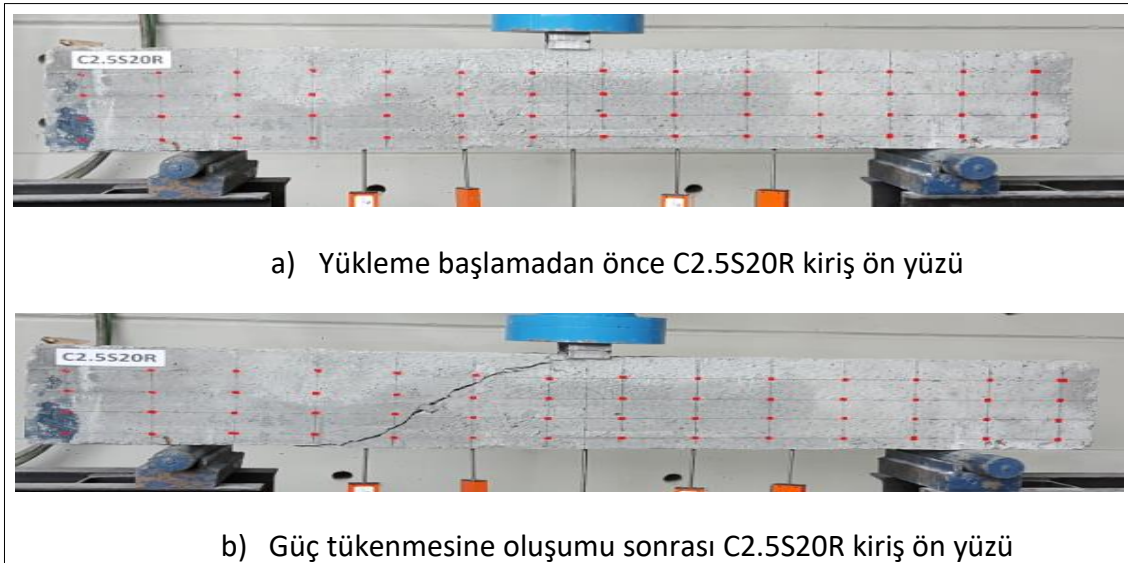
Mazhari [13] tarafından raporlanan C2.5R kirişi, Özgen [14] tarafından raporlanan C3.5R ve C4.5R kirişlerinde eğilme çatlaklarının ω_{max} (0,4 mm) değerinin altında olduğu, yük artışı ile eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına doğru ilerlediği gözlenmiştir. Söz konusu kirişlerde, ani kesme kırılma oluşumu öncesi oluşan çatlak genişliği çok küçük olduğundan ve kırılma öncesi kirişte herhangi bir hasar görülmediğinden, ani kesme kırılması öncesi kiriş hasarsız durumda kabul edilebilir.

Özgen [14] tarafından raporlanan C6.0R kirişinde, eğilme çatlaklarının yaklaşık 1 mm olduğu, yük artışı ile eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına doğru ilerlediği ve kirişte eğilme kırılması ile güç tükenmesi oluşumu görülmüştür.

3.3.2 Etriyeli Kirişler

3.3.2.1 C2.5S20R Kirişi

Etriyeli C2.5S20R kirişinde, yükleme başlamadan öncesindeki hâli Şekil 3.4a'da, güç tükenmesi sonrası hâli Şekil 3.4b'de gösterilmiştir. C2.5S20R kirişinde eğilme çatlaklarının ω_{max} (0,4mm) değerinin altında olduğu, yük artışı ile eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına doğru ilerlediği gözlenmiştir. C2.5S20 kirişinde ani kesme kırılması ile güç tükenmesi oluşumu görülmüştür.



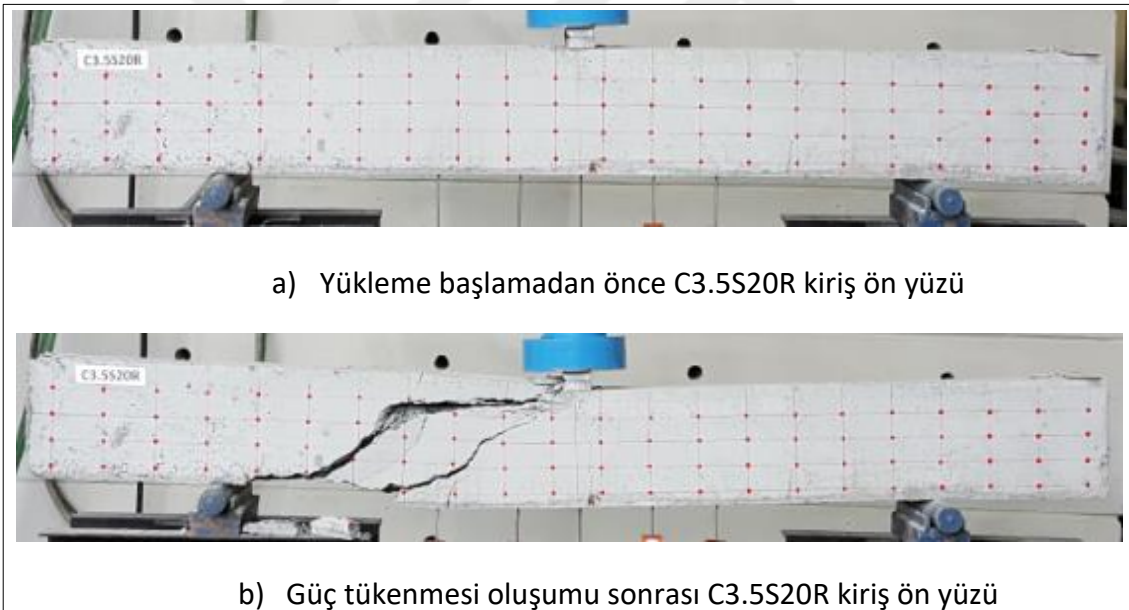
Şekil 3.4 Deney öncesi ve sonrası C2.5S20R kirişi görünümleri

C2.5S20R kirişinde, ani kesme kırılma oluşumu öncesi oluşan çatlak genişliği çok küçük olduğundan ve kırılma öncesi kirişte herhangi bir hasar görülmediğinden ani kesme kırılması öncesi kiriş hasarsız durumda kabul edilebilir.

3.3.2.2 C3.5S20R Kirişi

C3.5S20R kirişi yükleme başlamadan öncesindeki hâli Şekil 3.5a'da, güç tükenmesi sonrası hâli Şekil 3.5b'de gösterilmiştir. C3.5S20R kirişinde eğilme çatlaklarının ω_{max} (0,4mm) değerinin altında olduğu, yük artışı ile eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına doğru ilerlediği gözlenmiştir. C3.5S20R kirişinde ani kesme kırılması ile güç tükenmesi oluşumu görülmüştür.

C3.5S20R kirişinde, ani kesme kırılma oluşumu öncesi oluşan çatlak genişliği çok küçük olduğundan ve kırılma öncesi kirişte herhangi bir hasar görülmediğinden ani kesme kırılması öncesi kiriş hasarsız durumda kabul edilebilir.



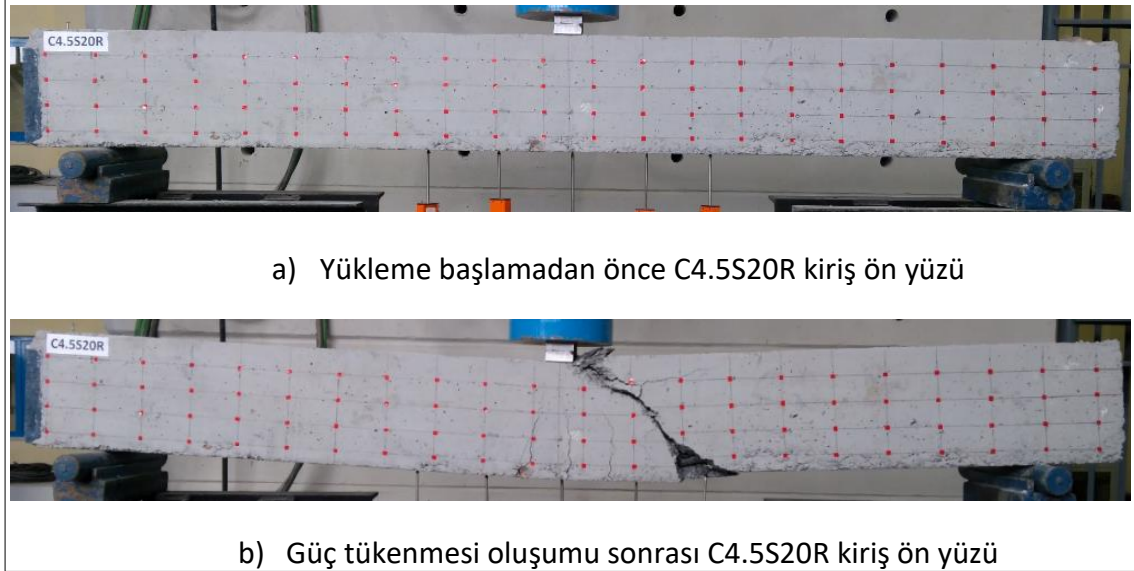
Şekil 3.5 Deney öncesi ve sonrası C3.5S20R kirişi görünüşleri

3.3.2.3 C4.5S20R Kirişi

C4.5S20R kirişi yükleme başlamadan öncesindeki durumu Şekil 3.6a'da, güç tükenmesi oluşumu sonrası Şekil 3.6b'de gösterilmiştir. C4.5S20R kirişinde eğilme çatlaklarının ω_{max} (0,4 mm) değerinin altında olduğu, yük artışı ile eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına

doğru ilerlediği gözlenmiştir. C4.5S20R kirişinde eğilmeli kesme kırılması ile güç tükenmesi oluşumu görülmüştür.

C4.5S20R kirişinde, eğilmeli kesme kırılma oluşumu öncesi oluşan çatlak genişliği küçük olduğundan ve kırılma öncesi kirişte herhangi bir hasar görülmediğinden eğilmeli kesme kırılması öncesi kiriş hasarsız durumda kabul edilebilir.



Şekil 3.6 Deney öncesi ve sonrası C4.5S20R kirişi görünümüleri

3.3.2.4 C4.5S10 Kirişi

Arabacı [15] tarafından raporlanan C4.5S10 kirişinde, yerdeğiştirmelerin artışıyla beraber eğilme çatlaklarının kiriş açıklık ortasına doğru ilerlediği ve kirişte eğilme kırılması ile güç tükenmesi oluşumu gözlenmiştir.

3.4 Dayanımlar, Yerdeğiştirmeler ve Kırılma Biçimleri

Betonarme elemanlarda, asal çekme gerilmesi betonun çekme dayanımına ulaştığında eğik çatlak oluşumu öngörülür. Kiriş deneylerinden bulunan eğik çatlama yükü (P_{cr}), eğik çatlak oluştuğunda açıklık ortasındaki yerdeğiştirme (δ_{cr}), kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesindeki yükü ($P_{co,Deney}$) ve yerdeğiştirmesi ($\delta_{co,Deney}$), maksimum yük taşıma kapasitesinin %80'ine ulaştığındaki yük ise göçme yükü ($P_{u,Deney} \approx 0.80P_{co,Deney}$) olarak alınmıştır ve her bir kiriş için söz konusu değerler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

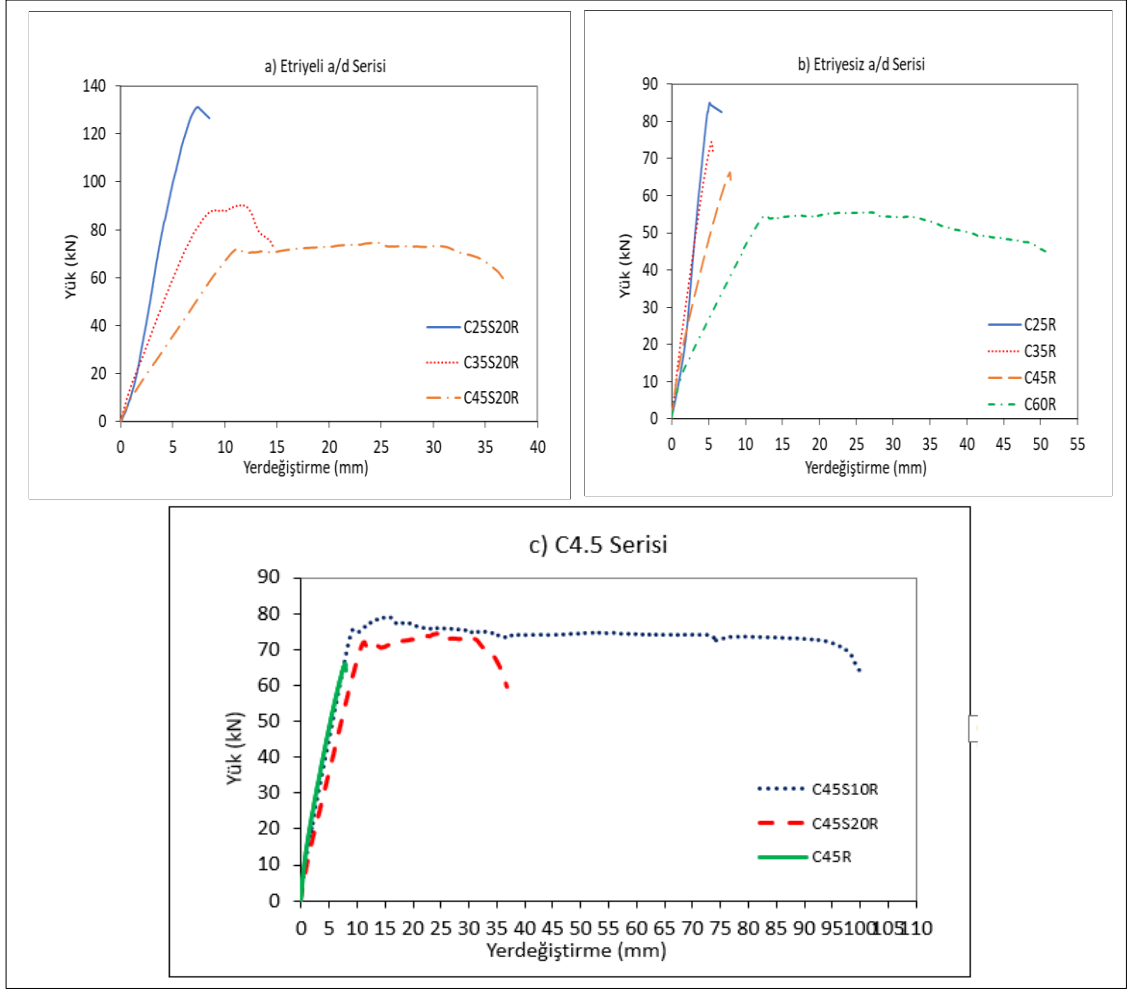
Çizelge 3.3 Kritik yük ve yerdeğiştirme değerleri

Kirişler	f_c (MPa)	Kırılma biçimi	Eğik çatlama*		Max. Yük**		Göçme***	
			P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	$P_{co,Deney}$ (kN)	$\delta_{co,Deney}$ (mm)	$P_{u,Deney}$ (kN)	$\delta_{u,Deney}$ (mm)
C2.5R&	24,85	Kesme	84,93	5,12	84,93	5,12	67,95	6,76
C3.5R#	24,85	Kesme	73,15	5,20	74,49	5,42	59,59	5,62
C4.5R#	21,37	Kesme	65,70	7,78	66,19	7,92	52,95	8,02
C6.0R#	23,83	Eğilme	54,07	13,12	55,58	26,94	44,46	51,08
C2.5S20R	24,85	Kesme	82,74	4,14	131,06	7,38	104,85	8,52
C3.5S20R	23,83	Kesme	73,48	6,42	90,19	11,60	72,15	14,72
C4.5S20R	23,83	Eğilme-Kesme	71,64	11,46	74,58	24,70	59,66	36,70
C4.5S10R^	26,03	Eğilme	74,56	9,04	79,02	15,44	63,22	100,28

*Eğik çatlama oluştuğunda; **Kiriş maksimum yük taşıma kapasitesi ve karşılık gelen yerdeğiştirmeler; *** $P_{u,Deney} \approx 0.80P_{co,Deney}$; &Mazhari [13], #Özgen [14], ^Arabacı [15]

3.4.1 Yük-Yerdeğiştirme Eğrileri

C6.0R ve C4.5S10R kirişlerinde eğilme kırılması ile güç tükenmesi oluştuğu, C2.5R, C3.5R, C4.5R, C2.5S20R ve C3.5S20R kirişlerinde eğik çatlakların oluşumu sonrası kesme kırılması şeklinde güç tükenmesi oluştuğu, C4.5S20R kirişinde ise eğik çatlakların ilerlemesi ile eğilme-kesme kırılması gözlenmiştir. Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri, Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri

3.4.2 a/d Değişiminin Yük-Yerdeğiştirme ve Kırılma Biçimine Etkisi

Şekil 3.7b'de görüldüğü gibi, etriyesiz C2.5R, C3.5R, C4.5R ve C6.0R kirişlerinde a/d artışıyla beraber kirişlerin göçme durumundaki yerdeğiştirme değerlerinde artış, yük taşıma kapasitelerinde azalma gözlenmiştir. a/d=2,5, 3,5, 4,5 ve 6,0 alındığında, kiriş maksimum yük taşıma kapasiteleri bir öncekine göre, sırasıyla, 12%, 11%, ve 16% azalmıştır. Ayrıca, a/d değeri arttıkça kirişin sünekliğinin arttığı ve kırılma biçiminin kesme kırılmasından, eğilme kırılmasına geçtiği gözlenmiştir.

Şekil 3.7a'da görüldüğü gibi, etriyeli C2.5S20R, C3.5S20R ve C4.5S20R kirişlerinde a/d artışıyla beraber kirişlerin göçme durumundaki yerdeğiştirme değerlerinde beklendiği gibi artış görülmüştür. Aynı enine donatı oranına sahip kirişler karşılaştırıldığında; a/d arttıkça kirişin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. a/d=2,5, 3,5 ve 4,5

alındığında, kiriş maksimum yük taşıma kapasiteleri bir öncekine göre, sırasıyla, 31% ve 17% azalmıştır. Ayrıca, a/d değeri arttıkça kirişin sünekliğinin arttığı ve kırılma biçiminin kesme kırılmasından, eğilme-kesme kırılmasına geçtiği gözlenmiştir.

Etriyesiz C2.5R, C3.5R, C4.5R ve C6.0R kirişlerinde a/d artışıyla beraber kirişlerin eğik çatlama yükü sırasıyla değerlerinde azalma, eğik çatlak oluştuğunda açıklık ortasındaki yerdeğiştirme değerlerinde artış gözlenmiştir. Aynı durum etriyeli C2.5S20R, C3.5S20R ve C4.5S20R kirişlerinde de gözlenmiştir.

3.4.3 Etriye İçeriğinin Yük-Yerdeğiştirme ve Kırılma Biçimine Etkisi

a/d değerinin 4,5 olduğu etriyeli (C4.5S10R ve C4.5S20R) ve etriyesiz (C4.5R) kirişler karşılaştırıldığında (Şekil 3.7c); enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda kiriş maksimum yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %6 artış gözlenmiştir. Enine donatısız kiriş (C4.5R) ile 20cm aralıklı etriyeli kiriş (C4.5S20R) karşılaştırıldığında ise, kiriş maksimum yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %13 artış gözlenmiştir.

Maksimum yükün yaklaşık %80'i olarak tanımlanan göçme anındaki yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında ise, enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda C4.5S10 kiriş yerdeğiştirme kapasitesinin, C4.5S20R kirişinin yerdeğiştirme kapasitesinin yaklaşık 2,73 katında olduğu gözlenmiştir. Enine donatısız kiriş ile 20cm aralıklı etriyeli kirişlerin göçme anındaki yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında, C4.5S20 kiriş yerdeğiştirme kapasitesinin, C4.5R kirişinin yerdeğiştirme kapasitesinin yaklaşık 4,58 katında olduğu gözlenmiştir (Çizelge 3.3).

a/d=4,5 olan etriyesiz, 20cm (enine donatı oranı %0,33) ve 10cm (enine donatı oranı %0,67) aralıklı etriyeli kirişlerin kırılma biçimleri karşılaştırıldığında ise, etriyesiz kirişte kesme kırılması, 20cm ve 10cm aralıklı etriyeli kirişlerde sırasıyla eğilme-kesme ve eğilme kırılması oluşumları gözlenmiştir. Enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda eğilme-kesme kırılmasından eğilme kırılmasına geçtiği görülmüştür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin kesme dayanımı tahmini üzerine araştırmalar 20. yüzyılın başlangıcına kadar gitmektedir. Fakat yapılan deneysel ve teorik çalışmaların tahminleri arasında önemli farklar oluşmaktadır. Kesme dayanımını etkileyen değişkenler eleman yüksekliği (boyut), kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d), boyuna donatı oranı, eksenel kuvvet ve yükleme şeklinin etkisi sayılabilir. Bu parametrelerden kesme dayanımını en fazla etkileyen temel değişkenler beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve a/d olarak belirlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalardan etriyesiz betonarme kirişlerde

- Beton basınç dayanımının 50MPa değerinin altı normal dayanımlı beton, üstü ise yüksek dayanımlı beton olarak sınıflandırılmıştır. Normal dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde en iyi tahminin Zsutty bağıntısı ile elde edildiği, beton basınç dayanımı, eğilme donatısı oranı ve a/d değişimine göre ACI318'e göre dağılımın çok serptildiği, TS500 tahminin ise ACI318'e göre daha iyi bir dağılım sergilediği ifade edilebilir.

- Yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişler için bağıntıların tahminlerindeki varyasyon katsayılarının oldukça büyük olduğu ve geniş bir aralıkta değiştiği (0,36~0,55) görülmüştür. Sınırlı sayıdaki kiriş için yapılan karşılaştırmada en doğru tahminin Zsutty tarafından yapıldığı görülmüştür. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, TS500, ACI318 ve Zsutty'e göre tahminlerden bulunan dağılımların çok serptildiği görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde deney sayısının sınırlı

olduğu, daha fazla sayıda deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılması ve gerekiyorsa ilgili bağıntuların geliştirilmesi önerilebilir.

- ASCE-ACI 445 [17] raporunda, boyuna donatı oranı %1,0'den ($\rho < \%1,0$) az kesme donatısız betonarme kirişlerin kesme dayanımı ile ilgili araştırmaların geçmişte az sayıda yapılmasından dolayı bu elemanların dayanımının mevcut yönetmeliklerde aşırı tahmin edildiği ifade edilmektedir. Karşılaştırılan deneysel veriler farklı olmasına rağmen bu çalışmada da benzer sonuç çıkmıştır. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş boyuna donatı oranı %1,5'den ($\rho < \%1,5$) az betonarme kirişlerde, TS500, ACI318 ve Zsutty'e göre tahminlerin yeteri kadar doğru tahmin edilmediği, genel olarak ise dağılımların çok serpildiği görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde deney sayısının sınırlı olduğu, daha fazla sayıda deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılarak değerlendirmesi gerektiği ifade edilebilir.

- Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş betonarme kirişlerde, a/d artışı ile dayanım tahminlerinin deneysel sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür. Özellikle, yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerin özellikle a/d değerinin 4'den büyük olduğu kirişlerde dayanım tahminindeki saçılmanın arttığı, bu saçılmanın azalması için daha fazla sayıda deney numunesinin sonucu ile karşılaştırma yapılarak bağıntuların geliştirilmesi önerilebilir.

Etriyersiz ve etriyeli betonarme kiriş deneyleri karşılaştırıldığında

- C6.0R ve C4.5S10 kirişlerinde eğilme kırılması ile güç tükenmesi olduğu, C2.5R, C3.5R, C4.5R, C2.5S20R ve C3.5S20R kirişlerinde eğik çatlakların oluşumu sonrası kesme kırılması şeklinde güç tükenmesi olduğu, C4.5S20R kirişinde ise eğik çatlakların ilerlemesi ile eğilme-kesme kırılması gözlenmiştir.

- C2.5R, C3.5R, C4.5R ve C6.0R kirişlerinde a/d artışıyla beraber kirişlerin göçme durumundaki yerdeğiştirme değerlerinde artış, yük taşıma kapasitelerinde ise azalma gözlenmiştir. a/d=2,5, 3,5, 4,5 ve 6,0 alındığında, kiriş maksimum yük taşıma kapasiteleri bir öncekine göre, sırasıyla, 12%, 11%, ve 16% azalmıştır. Ayrıca, a/d değeri arttıça kirişin sünekliğinin arttığı ve kırılma biçiminin kesme kırılmasından, eğilme kırılmasına geçtiği gözlenmiştir.

- Aynı enine donatı oranına sahip kirişler karşılaştırıldığında; a/d arttıkça kirişin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. a/d=2,5, 3,5 ve 4,5 alındığında, kiriş maksimum yük taşıma kapasiteleri bir öncekine göre, sırasıyla, 31% ve 17% azalmıştır. Ayrıca, a/d değeri arttıkça kirişin sünekliğinin arttığı ve kırılma biçiminin kesme kırılmasından, eğilme-kesme kırılmasına geçtiği gözlenmiştir.

- a/d değerinin 4,5 olduğu etriyeli (C4.5S10R ve C4.5S20R) ve etriyesiz (C4.5R) kirişler karşılaştırıldığında; enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda kiriş maksimum yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %6 artış gözlenmiştir. Enine donatısız kiriş (C4.5S20R) ile 20cm aralıklı etriyeli kiriş (C4.5S20R) karşılaştırıldığında ise, kiriş maksimum yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %13 artış gözlenmiştir.

- Maksimum yükün yaklaşık %80'i olarak tanımlanan göçme anındaki yerdeğştirmeler karşılaştırıldığında ise, enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda C4.5S10 kiriş yerdeğştirme kapasitesinin, C4.5S20R kirişinin yerdeğştirme kapasitesinin yaklaşık 2,73 katında olduğu gözlenmiştir. Enine donatısız kiriş ile 20cm aralıklı etriyeli kirişlerin göçme anındaki yerdeğştirmeler karşılaştırıldığında, C4.5S20 kiriş yerdeğştirme kapasitesinin, C4.5R kirişinin yerdeğştirme kapasitesinin yaklaşık 4,58 katında olduğu gözlenmiştir.

- a/d=4,5 olan etriyesiz, 20cm (enine donatı oranı %0,33) ve 10cm (enine donatı oranı %0,67) aralıklı etriyeli kirişlerin kırılma biçimleri karşılaştırıldığında ise, etriyesiz kirişte kesme kırılması, 20cm ve 10cm aralıklı etriyeli kirişlerde sırasıyla eğilme-kesme ve eğilme kırılması oluşumları gözlenmiştir. Enine donatı oranının %0,33'den %0,67'ye artırılması durumunda kırılma biçiminin eğilme-kesme kırılmasından eğilme kırılmasına geçtiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Arslan G., (2008). "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with Stirrups", *Materials and Structures*, 41:113-122.
- [2] Bresler B. ve MacGregor J. G., (1967). "Review of Concrete Beams Failing in Shear", *Journal of the Structural Division*, 93(1):343-372.
- [3] ASCE-ACI 426, (1973). *The Shear Strength of Reinforced Concrete Members*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 99(6):1091-1187.
- [4] Park R. ve Paulay T., (1975). *Reinforced Concrete Structures*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [5] Kim D., Kim W. ve White N. R., (1999). "Arch Action in Reinforced Concrete Beams-A Rational Prediction of Shear Strength", *ACI Structural Journal*, 96(65): 586-593.
- [6] Kong F. K. ve Evans R. H., (1987). *Reinforced and Prestressed Concrete*, 3rd Ed., Chapman & Hall, London.
- [7] Leonhardt F. ve Walther R., (1962). Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der oberen Schubspannungsgrenze.
- [8] Kani G.N.J., (1967). "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?", *ACI Journal*, 64(3):128-141.
- [9] Bazant Z. P. ve Sun H. H., (1987). "Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups", *ACI Materials Journal*, 84(4):259-272.
- [10] Zararis P. D. ve Papadakis G. C., (2001). "Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams Without Web Reinforcement", *Journal of Structural Engineering*, 127(7):733-742.
- [11] Bousselham A. ve Chaallal O., (2006). "Effect of Transverse Steel and Shear Span on the Performance of RC Beams Strengthened in Shear with CFRP", *Composites Part B: Engineering*, 37(1):37-46.

- [12] Reddy S. ve Rao R., (2011). "Shear Response of Fibrous High Strength Concrete Beams Without Web Reinforcement", *Civil Engineering Dimension*, 13(1):50-58.
- [13] Mazhari Z. ve Arslan G., (2018). "Investigation of the Effects of Basalt Fibers on the Shear Strength of RC Beams without Stirrups", 18th IIE International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology, 21-23 March 2018, Istanbul.
- [14] Özgen U. ve Arslan G., (2018). "Investigation of the Effects of Basalt Fibers on the Flexural Strength of RC Beams without Stirrups", 18th IIE International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology, 21-23 March 2018, Istanbul.
- [15] Arabacı M. ve Arslan G., (2018). *Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalarla Güçlendirilmesinin Dayanım Değişimine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] TS500, (2000). *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [17] ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion, (1998). Recent approaches to shear design of structural concrete. *Journal of structural engineering*, 124(12):1375-1417.
- [18] ACI318, (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [19] CEB-FIP, (1990). *Design code, Comite Euro International du Beton*:51-59.
- [20] Bazant Z. P. ve Kim J. K., (1984). "Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams", *Journal of the American Concrete Institute*, 81(5):456-468.
- [21] Arslan G., (2005). *Tersinir Yükler Altında Betonarme Çubukların Kesme Mukavemeti*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] Krefeld W. J. ve Thurston C. W., (1966). "Studies of the shear and diagonal tension strength of simply supported reinforced concrete beams", *ACI J*, 63(4):451-476.
- [23] Mphonde A. G. ve Frantz G. C., (1984). "Shear tests of high- and low-strength concrete beams without stirrups", *ACI J*, 81(4):350-357.
- [24] Bresler B. ve Scordelis A. C., (1963). "Shear strength of reinforced concrete beam", *Proc ACI J*, 60(1):51-74.
- [25] Cho S. H., (2003). "Shear strength prediction by modified plasticity theory for short beams", *ACI Struct J*, 100(1):105-112.
- [26] Zsutty T. C., (1968). "Beam shear strength prediction by analysis of existing data", *In Journal Proceedings*, 65(11):943-951.
- [27] Bazant Z. P. ve Kazemi M. T., (1991). "Size effect on diagonal shear failure of beams without stirrups", *ACI Struct J*, 88(3):268-276.

- [28] Moody K. G., Viest I. M., Elstner R. C. ve Hognestad E., (1954). "Shear strength of reinforced concrete beams", Part I-Tests of simple beams, ACI J. Proceedings, 51(3):317-332.
- [29] Taylor R., (1960). "Some shear tests on reinforced concrete beams without shear reinforcement", Mag Concr Res, 12(36):145-154.
- [30] Diaz de Cossio R. ve Siess C. P., (1960). "Behavior and strength in shear of beams and frames without web reinforcement", Proc ACI J., 56(8):695-735.
- [31] Van den Berg F. J., (1962). "Shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement", Part 2-Factors affecting load at diagonal cracking, Proc ACI J., 59(11):1587-1600.
- [32] Taylor R. ve Brewer R. S., (1963). "The effect of the type of aggregate on the diagonal cracking of reinforced concrete beams", Mag Concr Res., 15(44):87-92.
- [33] Mathey R. G. ve Watstein D., (1963). "Shear strength of beams without web reinforcement", Proc ACI J., 60(2):183-208.
- [34] Mattock A. H., (1969). "Diagonal tension cracking in concrete beams with axial forces", Proc. ASCE, 95(9):1887-1900.
- [35] Cladera A. ve Mari A. R., (2005). "Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear", Eng. Struct., 27(10):1519-1527.
- [36] Ahmad S. H., Khaloo A. R. ve Poveda A., (1986). "Shear capacity of reinforced high-strength concrete beams", ACI J., 83(2):297-305.
- [37] Elzanaty A. H., Nilson A. H. ve Slate F. O., (1986). "Shear capacity of reinforced concrete beams using high strength concrete", ACI J., 83(2):290-296.
- [38] Kwak Y. K., Eberhard M. O., Kim W. S. ve Kim J., (2002). "Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups", ACI Struct J, 99(4):530-538.
- [39] Rebeiz K. S., (1999). "Shear strength prediction for concrete members", Journal of structural engineering, 125(3):301-308.
- [40] ATC-38, (2000). Database on the Performance of Structures Near Strong-Motion Recordings: 1994 Northridge, California, Earthquake.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa ŞİNİK
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.07.1992, Bakırköy
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mustafa-sinik@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniv.	2015
Lise	Fen Bilimleri	Yeşilköy Anadolu Lisesi	2010

YAYINLARI

Bildiri

1. Sinik M. ve Arslan G., (2018). "Effect of Shear Span-To-Effective Depth Ratio on The Shear Strength of RC Beams", IASTEM-142nd International Conference on Recent Advances in Science, Technology & Engineering, 21 September 2018, Antalya.

