

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ETRİYESİZ ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME MUKAVEMETİ

SEMİH ULUSOY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. GÜRAY ARSLAN**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETRİYESİZ ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME MUKAVEMETİ

Semih ULUSOY tarafından hazırlanan tez çalışması 23.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Beyza TAŞKIN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan ve bana yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Güray ARSLAN'a,

Tez çalışması süresince ve hayatım boyunca her zaman yanımda olan, her türlü konuda manevi desteklerini hissettiğim ailem, babam Cemil ULUSOY ve annem Sema ULUSOY'a teşekkür ederim.

Temmuz, 2015

Semih ULUSOY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
DENEY KİRİŞLERİ.....	5
2.1 Kirişlerin Geometrisi ve Malzeme Özellikleri	5
2.2 Kirişlerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	5
2.3 Deney Kirişlerinin Üretimi	6
BÖLÜM 3	
DENEY SONUÇLARI VE TEMEL DEĞİŞKENLERİN KİRİŞ DAVRANIŞINA ETKİLERİ.....	9
3.1 Kiriş Deney Sonuçları	9
3.1.1 a/d Oranı 2.5 Olan Kirişler	9
3.1.1.1 A2.5R Kirişi Deney Sonuçları	9
3.1.1.2 A2.5F1.0 Kirişi Deney Sonuçları.....	12
3.1.1.3 A2.5F2.0 Kirişi Deney Sonuçları.....	15
3.1.1.4 A2.5F3.0 Kirişi Deney Sonuçları.....	17
3.1.2 a/d Oranı 3.5 Olan Kirişler	19

3.1.2.1	A3.5R Kirişı Deney Sonuçları	19
3.1.2.2	A3.5F1.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	21
3.1.2.3	A3.5F2.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	23
3.1.2.4	A3.5F3.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	25
3.1.3	a/d Oranı 4.5 Olan Kirişler	27
3.1.3.1	A4.5R Kirişı Deney Sonuçları	27
3.1.3.2	A4.5F1.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	29
3.1.3.3	A4.5F2.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	31
3.1.3.4	A4.5F3.0 Kirişı Deney Sonuçları.....	33
3.2	Kirişlerin Deneysel Yük-Yerdeğiştirme Eğrileri.....	35
3.2.1	a/d Etkisi	36
3.2.2	Çelik Lif Oranı Etkisi.....	37
BÖLÜM 4		
ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME MUKAVEMETİ		39
4.1	Literatürde Önerilen Kesme Mukavemeti Bağıntıları	39
4.2	Kesme Mukavemeti Bağıntılarının Değerlendirilmesi	42
4.3	Literatürde Önerilen Çatlama Kesme Mukavemeti Bağıntıları.....	43
4.4	Eğik Çatlama Mukavemeti Bağıntılarının Değerlendirilmesi	44
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		45
KAYNAKLAR.....		48
ÖZGEÇMİŞ.....		51

SİMGE LİSTESİ

a	Kiriş kesme açıklığı
b_w	Kiriş genişliği
c	basınç bölgesinin yüksekliği
d	Kiriş etkili yüksekliği
d_a	Maksimum agrega çapı
d_f	Çelik lif aderans katsayısı
D_f	Çelik lif çapı
ε	Birim deformasyon
F	Çelik lif katsayısı
f_c	Sargılı betonda beton basınç dayanımı
f_{sp}	Çelik lifli betonun silindir yarma dayanımı
f_{ct}	Betonun eksenel çekme dayanımı
f_{cuf}	Çelik lifli betonun küp mukavemeti
f_y	Eğilme donatısının akma mukavemeti
k	Betonun ezilme modülü
L_f	Çelik lif uzunluğu
P_{cr}	Diyagonal çatlama yükü
P_u	Göçme yükü
ν_b	Eğik çatlak boyunca çelik liflerin çekme mukavemeti
V_b	Çelik liflerin çekme mukavemeti
V_f	Hacimsel çelik lif yüzdesi
V_{cr}	Diyagonal çatlama kesme kuvveti
V_u	Göçme kesme kuvveti
δ_u	Göçmede açıklık ortası yerdeğiştirme
δ_{cr}	Diyagonal çatlak oluştuğunda açıklık ortası yerdeğiştirme
ρ	Çekme donatısı oranı
ξ	Agrega boyut etkisi katsayısı
τ	Fiber karışımın aderans gerilmesi

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Canadian Standards Association
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete
TSE	Türk Standardları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Çelik lif şekilleri (TS 10513 1992)	3
Şekil 2.1	Eğilme donatılarına şekil değiştirme ölçer yapıştırılması aşamaları.....	7
Şekil 2.2	Beton dökülmeden önce kalıplar ve donatı yerleşimi	7
Şekil 2.3	Kiriş kesitleri ve donatı yerleşimi	8
Şekil 3.1	Yükleme başlamadan önce A2.5R kirişi	11
Şekil 3.2	Eğik çatlama kapasitesine (65 kN) ulaştığında A2.5R kirişi.....	11
Şekil 3.3	Maksimum yük taşıma kapasitesine (81 kN) ulaştığında A2.5R kirişi.....	11
Şekil 3.4	Yükleme başlamadan önce A2.5F1.0 kirişi	14
Şekil 3.5	Eğik çatlama kapasitesine (85 kN) ulaştığında A2.5F1.0 kirişi	14
Şekil 3.6	Maksimum yük taşıma kapasitesine (130 kN) ulaştığında A2.5F1.0 kirişi	14
Şekil 3.7	Yükleme başlamadan önce A2.5F2.0 kirişi	16
Şekil 3.8	Eğik çatlama kapasitesine (70 kN) ulaştığında A2.5F2.0 kirişi	16
Şekil 3.9	Maksimum yük taşıma kapasitesine (100 kN) ulaştığında A2.5F2.0 kirişi	17
Şekil 3.10	Yükleme başlamadan önce A2.5F3.0 kirişi	18
Şekil 3.11	Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A2.5F3.0 kirişi	18
Şekil 3.12	Maksimum yük taşıma kapasitesine (78 kN) ulaştığında A2.5F3.0 kirişi	19
Şekil 3.13	Yükleme başlamadan önce A3.5R kirişi	20
Şekil 3.14	Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A3.5R kirişi.....	20
Şekil 3.15	Maksimum yük taşıma kapasitesine (62 kN) ulaştığında A3.5R kirişi	21
Şekil 3.16	Yükleme başlamadan önce A3.5F1.0 kirişi	22
Şekil 3.17	Eğik çatlama kapasitesine (55 kN) ulaştığında A3.5F1.0 kirişi.....	22
Şekil 3.18	Maksimum yük taşıma kapasitesine (65 kN) ulaştığında A3.5F1.0 kirişi	22
Şekil 3.19	Yükleme başlamadan önce A3.5F2.0 kirişi	24
Şekil 3.20	Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A3.5F2.0 kirişi	24
Şekil 3.21	Maksimum yük taşıma kapasitesine (85 kN) ulaştığında A3.5F2.0 kirişi	25
Şekil 3.22	Yükleme başlamadan önce A3.5F3.0 kirişi	26
Şekil 3.23	Eğik çatlama kapasitesine (95 kN) ulaştığında A3.5F3.0 kirişi	26
Şekil 3.24	Maksimum yük taşıma kapasitesine (117 kN) ulaştığında A3.5F3.0 kirişi...	27
Şekil 3.25	Yükleme başlamadan önce A4.5R kirişi	28
Şekil 3.26	Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A4.5R kirişi.....	29
Şekil 3.27	Maksimum yük taşıma kapasitesine (76 kN) ulaştığında A4.5R kirişi	29
Şekil 3.28	Yükleme başlamadan önce A4.5F1.0 kirişi	31
Şekil 3.29	Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A4.5F1.0kirişi.....	31
Şekil 3.30	Maksimum yük taşıma kapasitesine (85 kN) ulaştığında A4.5F1.0kirişi.....	31

Şekil 3.31	Yüklemeye başlamadan önce A4.5F2.0 kirişi	32
Şekil 3.32	Eğik çatlama kapasitesine (45 kN) ulaştığında A4.5F2.0 kirişi	33
Şekil 3.33	Maksimum yük taşıma kapasitesine (70 kN) ulaştığında A4.5F2.0 kirişi	33
Şekil 3.34	Yüklemeye başlamadan önce A4.5F3.0 kirişi	34
Şekil 3.35	Maksimum yük taşıma kapasitesine (97 kN) ulaştığında A4.5F3.0 kirişi	35
Şekil 3.36	Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	35
Şekil 3.37	Kirişlerin boyutsuz kesme mukavemetinin değişimi	38

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Üretilen betonda kullanılan malzemelerin karışım oranları	6
Çizelge 2.2	Kirişlerin özellikleri	6
Çizelge 3.1	A2.5R kirişi deney sonuçları	10
Çizelge 3.2	A2.5F1.0 kirişi deney sonuçları	12
Çizelge 3.3	A2.5F2.0 kiriş deney sonuçları	15
Çizelge 3.4	A2.5F3.0 kiriş deney sonuçları	17
Çizelge 3.5	A3.5R kirişi deney sonuçları	19
Çizelge 3.6	A3.5F1.0 kirişi deney sonuçları	21
Çizelge 3.7	A3.5F2.0 kiriş deney sonuçları	23
Çizelge 3.8	A3.5F3.0 kiriş deney sonuçları	25
Çizelge 3.9	A4.5R kirişi deney sonuçları	27
Çizelge 3.10	A4.5F1.0 kiriş deney sonuçları	29
Çizelge 3.11	A4.5F2.0 kiriş deney sonuçları	31
Çizelge 3.12	A4.5F3.0 kiriş deney sonuçları	33
Çizelge 3.13	Deney sonuçları	36
Çizelge 4.1	Deneyssel/ Önerilen yaklaşımların istatistiksel sonuçları	43
Çizelge 4.2	Deneyssel/ Önerilen yaklaşımların istatistiksel sonuçları	44

ETRİYESİZ ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME MUKAVEMETİ

Semih Ulusoy

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güray ARSLAN

Bu çalışmada; kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5'den büyük etriyesiz betonarme kirişlerde kesme mukavemetine kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı ve hacimsel çelik lif oranının katkısı araştırılmıştır. Kirişlerdeki değişkenler; kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5, 3.5 ve 4.5, hacimsel çelik lif oranı 0, 1.0%, 2.0% ve 3.0% alınmıştır. Deney sonucu; çelik lif oranı artışı ile kesme mukavemetinin ve sünekliğin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca; çelik lifli betonarme kirişler için önerilen kesme mukavemeti bağıntılarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak literatürde önerilen bağıntıların doğruluğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lif, Betonarme, Kiriş, Kesme mukavemeti

**SHEAR STRENGTH OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS
WITHOUT STIRRUPS**

Semih ULUSOY

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Güray ARSLAN

In this study, the effects of shear span-to-effective depth ratio and volume fraction of fibers on the shear strength of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams without stirrups having a shear span-to-effective depth ratio greater than 2.5 are investigated. Shear span-to-effective depth ratios of 2.5, 3.5 and 4.5, and volume fractions of fibers of 0.0%, 1.0%, 2.0% and 3.0% were considered as test variables. It was observed through the experiments that the shear strength increases with the volume fraction of fibers. Furthermore, the equations proposed for predicting the shear strength of SFRC beams were assessed by comparing the experimental results with the predictions obtained from the equations available in the literature.

Keywords: Steel fiber, Reinforced concrete, Beam, Shear strength

1.1 Literatür Özeti

Son zamanlarda çelik lif katkılı betonun mekanik özelliklerine ilişkin deneysel ve analitik pek çok çalışma yapılmıştır. Basınç etkisi altında mekanik davranışları elverişli olan yapı malzemelerinin, kesme ve eğilme etkisi altındaki davranışları çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu malzemelerin elverişli olmayan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yapı mühendisliğinin uğraş alanlarının başında gelmektedir.

Betonun özelliklerinin iyileştirilmesi için karışıma katkı malzemeleri ilave edilmektedir. Çelik lifler de bu katkı malzemelerinden kabul edilmektedir. Çelik lifli betonun üretilmesi ile malzeme tokluğu(sünekliği), darbe yüklerine karşı direnci, eğilme dayanımı vb. mekanik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Betona çelik lif ilave edildiğinde daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip, kırılma anında daha sünek davranış sergileyebilen ve çatlama mukavemeti daha yüksek malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı da çelik lifli betonların kullanım alanı giderek artmaktadır.

Swamy ve Mannat [1] tarafından yapılan çelik liflerin eğilmede çekme dayanımının araştırıldığı çalışmada, çatlak gelişimi ve kompozit malzeme mekanikğine dayanan bir teori sunulmuştur. Bu teoriye göre ilk çatlak lif sıyrılmasından sonra meydana gelmektedir. Nihai göçme ise, liflerin sıyrılması ve yüzeysel kayma gerilmesinin maksimum kenetlenme dayanımına ulaşması ile oluşmaktadır.

Suasis ve Shah [2] tarafından yapılan çalışmada; çelik lif, polipropilen ve cam lif kullanarak hazırlanan 38mmx76mmx457mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde darbe deneyi yapılarak, deney sonucunda lif katkısının darbe etkilerine karşı davranışı incelenmiştir.

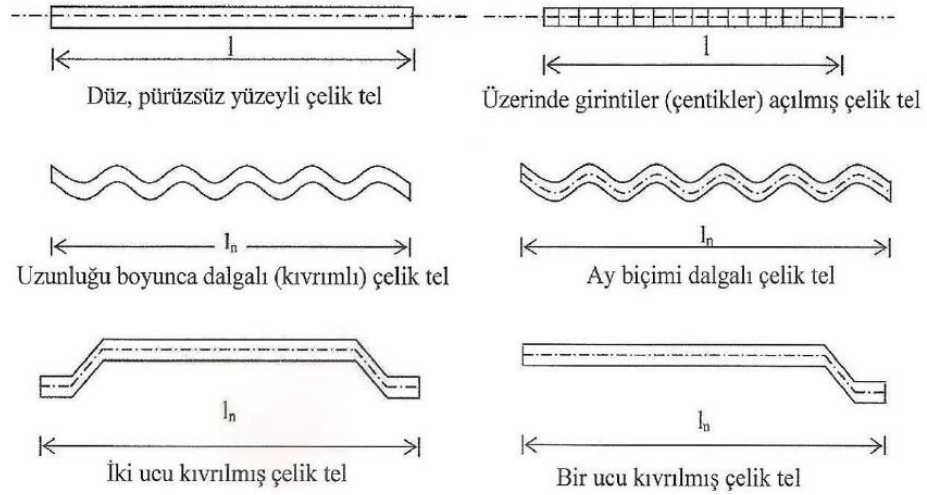
Dupont ve Vandewalle [3] (2002) tarafından yapılan çalışmada, çelik lif katkısının betonarme kirişlerde çatlak oluşumlarına etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonucu, çatlak oluşumuna sağladığı katkı açısından uygun çelik lif dozajının 30 - 40 kg/m³ arasında olması önerilmiştir [3].

Şener vd. [4] tarafından yapılan çelik lif katkılı betonarme kirişler ile ilgili çalışmada, 40mmx80mmx400mm ve 40mmx160mmx800mm boyutlarında çentikli kirişler imal edilerek bu kirişlerde boyut etkisi incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda çelik lif kullanımının göçme gevrekliğini azalttığı ifade edilmiştir [4].

Corley [5] tarafından yapılan çalışmada, Oklahoma kentinde bomba patlaması ile hasar gören bir yapının incelenmesi yapılmıştır. Çalışma sonucu; stratejik öneme sahip yapılarda, patlama yüklerinin de elverişsiz yük olarak hesaplarda dikkate alınması ile hasarların azalacağı ve ekonomik olabileceği rapor edilmiştir.

Topçu [6] tarafından yapılan çalışmada, çelik liflerin düşük karbonlu çelik C 1008'den üretildiği, çekme gerilmelerinin ortalama olarak 1200 MPa'nın üzerinde olup elastik limitleri %0.2'nin altında , en önemli özelliğinin yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özelliklerine sahip olması şeklinde ifade edilmiştir.

TS 10513 [7] göre beton takviyesinde kullanılan çelik lifler şekillerine göre üç grupta toplanmıştır. Çelik liflerin şekilleri Şekil 1.1' de verilmiştir.



Şekil 1.1 Çelik lif şekilleri (TS 10513 1992)

Topçu [6] ve Bayasi vd. [8] tarafından yapılan çalışmada, çelik liflerin beton içerisine karıştırıldığında hangi ölçüde kullanılabileceği, lifin geometrik şekline ve lif ile beton matris arasındaki kenetlenme dağılımına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle birçok değişik geometrik formda çelik lif üretilmekte ve kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar beton üzerindeki; eğilme dayanımında, basınç gerilmeleri altında ve enerji yutma kapasitelerinde en büyük iyileştirmeyi düz ve ucu hafif kıvrımlı liflerin sağladığını göstermiştir.

Lifli betonlarda, lifler ve agregaların birlikte etkileşim içerisinde olduğu bir toklaşma mekanizması vardır. Çatlak açıldıkça liflerin çatlak köprüleme özelliği daha baskın hale gelir. Böylece, lifler üzerinden gerilmelerin geçtiği bir köprü görevi görürler. Çatlak açıldıkça lifler matristen sıyrılır ve bir miktar enerji sönümlenir.

Uçları kancalı olan liflerde (hook end), lif sıyrılırken kancanın plastik deformasyonu ile bir miktar daha enerji sönümlenir ve kompozitin tokluğu artar. Geleneksel sıkıştırma işlemi görmüş çelik lifli betonlarda basınç gerilmeleri altında dayanımın artmasından çok tokluk (süneklik) artar.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada; kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5'den büyük betonarme kirişlerde çelik lif katkısının betonarme kirişlerin davranışına etkisi araştırılmıştır. Deney

sonucunda kiriş hasar seviyelerine göre, çelik lif katkısının sağladığı etkilerin belirlenmesi ve çelik lifli betonarme kirişler için önerilen kesme mukavemeti bağıntılarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Çelik lifli betonun çekme dayanımı ve tokluğu (sünekliği) normal dayanımlı betona göre daha fazladır. Normal dayanımlı betonlarda, her hangi bir çatlağın yayılması için gerekli enerji düşük olduğundan çelik liflerin betona katılması, betonun bu eksikliklerini azaltır. Böylece, çatlak gelişimi kontrol altına alınmakta ve çelik lifli betonarme kirişlerin kesme mukavemeti artmaktadır. Son yıllarda, betonarme elemanlarda enine donatı yerine çelik lif ile kesme kuvvetinin karşılanıp karşılanmayacağı sorusuna cevap aranmaktadır. Bu çalışmada, kesme mukavemetine çelik lif oranı ve kesme açıklığının kiriş yüksekliğine oranının etkileri deneysel olarak araştırılarak enine donatı yerine kullanılabilecek çelik lif oranı tahmini incelenmiştir.

BÖLÜM 2

DENEY KİRİŞLERİ

2.1 Kirişlerin Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada; tek yönlü artan (monotonik) yük etkilerine maruz referans kirişi ve çelik lifli betonarme kirişte hacimsel çelik lif oranına bağlı olarak kirişlerin çatlama ve göçme kesme mukavemetleri araştırılmıştır. Deneylerde, kirişler açıklık ortasında tekil yüklüdür. Enkesit boyutları 150mm/230mm olan enine donatısız betonarme kirişlerde kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5 , 3.5 ve 4.5 alınmıştır. Tasarımı yapılan kirişlerde; çekme donatısı olarak 2 Φ 16 olup çekme donatısı oranı %1.34'dir. Bu oran, TS500 [9]'de tanımlanan minimum donatı oranı ile dengeli donatı oranı arasındadır.

2.2 Kirişlerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Kirişlerin üretilmesinde kullanılan betondaki malzemelerin karışım oranları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Akışkanlaştırıcı olarak ASTM C 494, Type A kullanılmış (kıvam Sınıfı: S3 (100-150mm)) ve Abrams konisiyle yapılan beton kıvam kontrolünde çökme miktarı 12–13 cm ölçülmüştür.

28 gün yaşta kiriş ile aynı ortamda bekletilen 15cmx15cm küp ve silindir numunelerde her bir karışımı temsil eden numuneler için betonun ortalama tek eksenli basınç mukavemetleri bulunmuştur. Küp numune dayanımından ortalama standart silindir basınç dayanımına geçilmiştir. Kirişlerin özellikleri Çizelge 2.2' de verilmiştir. Çizelgede,

V_f hacimsel çelik lif oranını, l ise kiriş uzunluğunu tanımlamaktadır. Referans kirişler A2.5R, A3.5R ve A4.5R ile anılmaktadır ve söz konusu kirişlerde çelik lif kullanılmamıştır. Deneysel çalışmada kancalı uçlu (hooked-end) çelik lif kullanılmış olup çelik lifin uzunluğu (L_f) 30 mm, çapı (D_f) 0.55mm ve L_f/D_f oranı 54.5' dir. [10,11]

Çizelge 2.1 Üretilen betonda kullanılan malzemelerin karışım oranları

Kirişler	A2.5F1.0, A2.5F1.0R, A2.5F2.0, A3.5F1.0, A3.5F2.0, A4.5F1.0, A4.5F2.0	A2.5R, A2.5F3.0, A3.5R, A3.5F3.0, A4.5R, A4.5F3.0
Malzeme	Karışım oranları	
0–5 mm kırma kum	1150 kg/m ³	1180 kg/m ³
5–12 mm kırma taş	310 kg/m ³	721 kg/m ³
12–22 mm kırma taş	470 kg/m ³	----
Uçucu kül (%40'ı bağlayıcı)	90 kg/m ³	80 kg/m ³
Çimento CEMI 42.5R	220 kg/m ³	240 kg/m ³
Su	145 kg/m ³	155 kg/m ³
Su / Bağlayıcı	0.55	
Akışkanlaştırıcı katkı miktarı	3.10 kg/m ³	3.20 kg/m ³

Çizelge 2.2 Kirişlerin özellikleri

Kirişler	f_c (MPa)	V_f (%)	a/d	l (mm)
A2.5R	39.00	0.0	2.5	1400
A2.5F1.0	33.68	1.0		
A2.5F1.0R	24.53	1.0		
A2.5F2.0	21.43	2.0		
A2.5F3.0	9.77	3.0		
A3.5R	31.52	0.0	3.5	2200
A3.5F1.0	20.21	1.0		
A3.5F2.0	21.43	2.0		
A3.5F3.0	27.91	3.0		
A4.5R	41.82	0.0	4.5	2200
A4.5F1.0	24.53	1.0		
A4.5F2.0	21.43	2.0		
A4.5F3.0	27.91	3.0		

2.3 Deney Kirişlerinin Üretimi

Boyuna donatı çubuklarında şekildeğiştirme ölçerlerin bağlanacağı bölge, su zımparası ile zımparalanıp aseton ile lokal olarak temizlenmiştir. Asetonun kuruması sonrası yapıştırıcı sürülmüş ve şekildeğiştirme ölçerler, donatı ile aralarında hava kabarcığı

kalmayacak biçimde üzerine bastırılarak çubuklara yapıştırılmıştır (Şekil 2.1). Beton dökümü sırasında boyuna donatının sağlaması gereken örtü beton kalınlığı plastik tırnaklar kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 2.1 Eğilme donatılarına şekil değiştirme ölçer yapıştırılması aşamaları

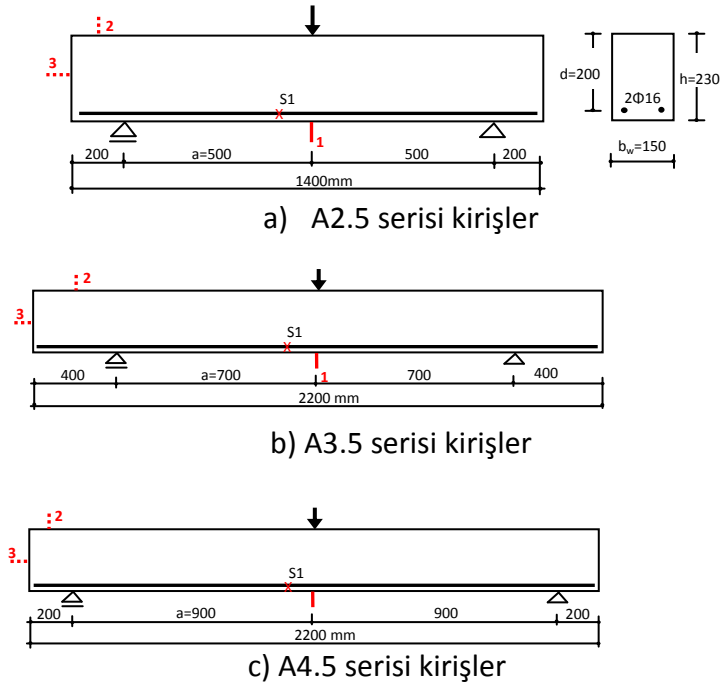
Beton yerleşimi sırasında şekil değiştirme ölçerlerin zarar görmemesi için Şekil 2.1’de görülen koruyucu koruyucu bant sarılmıştır. Sonra donatılar Şekil 2.2’de görülen kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 2.2 Beton dökülmeden önce kalıplar ve donatı yerleşimi

Deneyisel çalışmada kullanılan kirişlerin kesiti, sınır şartları, yükleme durumu ile şekil değiştirme ölçer ve yer değiştirme ölçerlerin kirişler üzerinde yerleşimi Şekil 2.3’de verilmiştir. Açıklık ortasında düşey yer değiştirmelerin (sehimlerin) LVDT yardımıyla ölçüldüğü nokta “1” ve kiriş kayıcı mesnetinde yer değiştirmenin ölçüldüğü nokta “2” ile tanımlanmıştır. “2” noktası kiriş mesnetinden $a/d=2.5$ olan kirişlerde 10 cm, $a/d=3.5$ olan kirişlerde 20 cm ve $a/d=4.5$ olan kirişlerde 10 cm dışarıdadır. “3” ile gösterilen

noktada ise kiriş eksenindeki yerdeğiştirme ölçülmüştür. S1 açıklık ortasından yaklaşık 20 cm mesafeye konulan boyuna donatıdaki şekildeğiştirme ölçerlerdir.



Şekil 2.3 Kiriş kesitleri ve donatı yerleşimi

DENEY SONUÇLARI VE TEMEL DEĞİŞKENLERİN KİRİŞ DAVRANIŞINA ETKİLERİ

3.1 Kirişlerin Deney Sonuçları

Kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5, 3.5 ve 4.5 olan enine donatısız betonarme kirişlerin her yük artımında gözlenen çatlak oluşumları ve kirişin mekanizma durumuna ne şekilde geldiği bu Bölüm’de açıklanmaya çalışılmıştır.

a/d oranına ve hacimsel çelik lif oranına göre kirişlerin davranışları açısından karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.1.1 a/d Oranı 2.5 Olan Kirişler

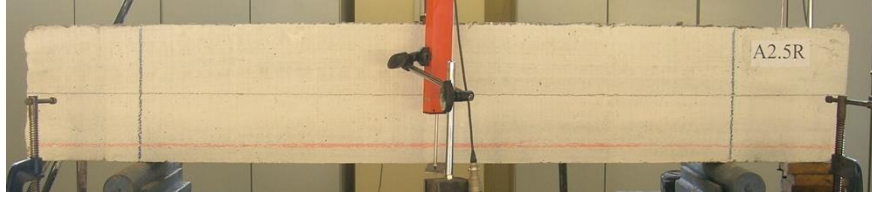
3.1.1.1 A2.5R Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.1’de A2.5R kiriş deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Şekil 3.1–3 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarına dönüştüğü ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüştür.

Çizelge 3.1 A2.5R kirişi deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı, kiriş arka yüzü 2 numaralı eğilme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
40	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Kiriş ön yüzünde 3 ve 4 numaralı eğilme çatlakları işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 5 numaralı eğilme çatlakları ve 2 numaralı eğilme çatlaklarında 6 numaralı ilerleme kaydedildi.
50	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı eğilme çatlaklarında 7 numaralı ilerleme ve kiriş arka yüzü 8 numaralı eğilme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
55	Kiriş ön yüzünde 5 numaralı çatlakta 9, 6 numaralı çatlakta 10 numaralı ilerlemeler kaydedildi.
60	Kiriş ön yüzünde 3 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 11 çatlak oluşumu işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 12 numaralı eğilme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
65	Kiriş ön yüzeyinde 13 numaralı eğilme çatlakları oluşumu kaydedildi. Kiriş arka yüzeyinde 9 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısını geçen yüke doğru ilerleyen 14 numaralı kesme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
70	Kiriş ön yüzünde 4 numaralı eğilme çatlaklarında 15 numaralı eğilme çatlakları oluşumu işaretlendi. Kiriş arka yüzü açıklık ortasına yakın bölümde 16 numaralı çatlak oluşumu gözlemlendi.
75	Kiriş ön yüzünde 11 numaralı çatlakta yüke doğru ilerleyen 17 numaralı kesme çatlakları oluşumu gözlemlendi. 18 ve 19 numaralı yeni eğilme çatlakları kaydedildi. Kiriş arka yüzünde, 20 ve 21 numaralı yeni eğilme çatlakları işaretlendi. Ayrıca; 8 numaralı çatlakta 22 eğilme çatlakları, 14 numaralı çatlakta 23 numaralı kesme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
80	Kiriş ön yüzünde 18 numaralı çatlakta yüke doğru ilerleyen 24 numaralı, 19 numaralı eğilme çatlaklarından yüke doğru ilerleyen 26 numaralı kesme çatlakları işaretlendi. Kiriş arka yüzünde, 16 numaralı eğilme çatlaklarında yüke doğru ilerleyen 25 numaralı kesme çatlakları işaretlendi.
81	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 24 ve 26 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi sonucu kesme kırılması ile güç tükenmesi oluştu.

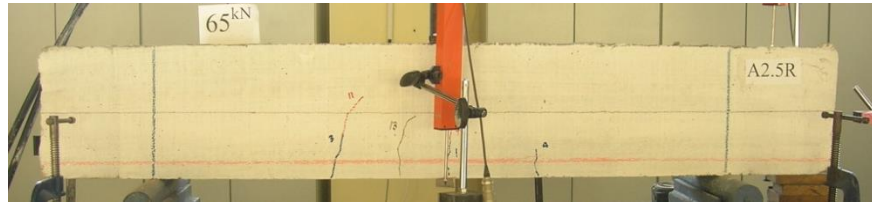


A2.5R kirişı ön yüzü

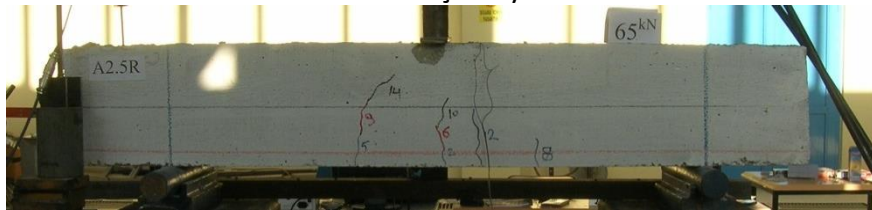


A2.5R kirişı arka yüzü

Şekil 3.1 Yükleme başlamadan önce A2.5R kirişi

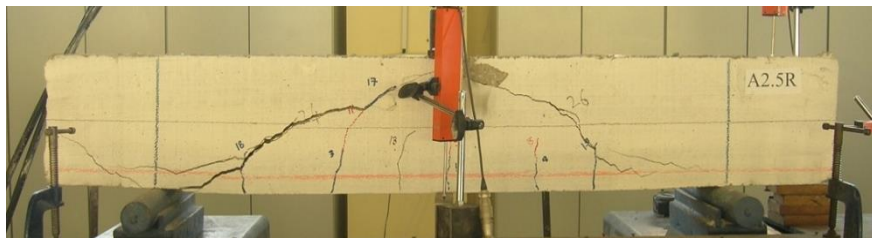


A2.5R kirişı ön yüzü

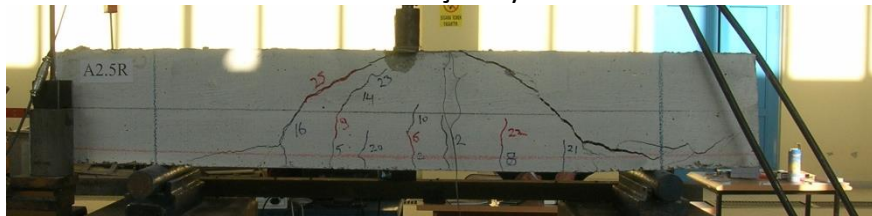


A2.5R kirişı arka yüzü

Şekil 3.2 Eğik çatlama kapasitesine (65 kN) ulaştığında A2.5R kirişi



A2.5R kirişı ön yüzü



A2.5R kirişı arka yüzü

Şekil 3.3 Maksimum yük taşıma kapasitesine (81 kN) ulaştığında A2.5R kirişi

3.1.1.2 A2.5F1.0 Kirişı Deney Sonuçları

Çizelge 3.2’de A2.5F1.0 kirişı deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.2 A2.5F1.0 kirişı deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
55	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
60	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
65	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
70	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
75	Kiriş ön yüzü açıklık ortasına yakın bölümde 1, 2 ve 3 numaralı eğilme çatlakları, kiriş arka yüzü açıklık ortasına yakın bölümde 4, 5 ve 6 numaralı eğilme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
80	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
85	Kiriş ön yüzeyinde 1 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 6 numaralı, 2 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 7 numaralı gelişme kaydedildi. Kiriş arka yüzeyinde 3 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 8 numaralı gelişme, 4 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 10 numaralı ve 5 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 9 numaralı gelişme kaydedildi.
90	Kiriş ön yüzeyinde 6 numaralı çatlakta yüke doğru uzayan 11 numaralı kesme çatlakları, kiriş arka yüzünde 12 numaralı eğilme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
95	Kiriş ön yüzeyinde 13 ve 14 numaralı çatlak oluşumları, 11 numaralı kesme çatlaklarında ilerleme 16 numara ile kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 8 numaralı çatlakta 15 numaralı kesme çatlakları oluşumu gözlemlendi.
100	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı eğilme çatlakları ile birleşen 17 numaralı kesme çatlakları oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde, 15 numaralı çatlakta yüke doğru ilerleyerek 18 numaralı kesme çatlakları oluşumu gözlemlendi.

Çizelge 3.2 A2.5F1.0 kirişi deney sonuçları (devamı)

105	Kiriş ön yüzünde 17 ve 19 numaralı yeni kesme çatlağı oluşumları gözlemlendi, mevcut çatlak kalınlıkları artış görüldü. Kiriş arka yüzünde, 8 numaralı çatlakla birleşen 21 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi.
110	Kiriş ön yüzünde 16 numaralı kesme çatlağı ilerledi 22 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde, 18 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi 23 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. 20 numaralı eğilme çatlağında 25 numaralı gelişme gözlemlendi. Kiriş alt yüzünden başlayan 24 numaralı yeni çatlak oluşumu gözlemlendi.
115	Kiriş ön yüzünde 19 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 26 numaralı kesme çatlağı, 14 numaralı eğilme çatlağında yüke doğru uzanan kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 27 numaralı kesme çatlağı, 13 numaralı eğilme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 28 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde, kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yeni eğilme çatlağı 29 numara ile kaydedildi.
120	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi ancak mevcut çatlakların genişliklerinde artış gözlemlendi.
125	Kiriş ön yüzünde 27 numaralı kesme çatlağında yüke doğru ilerleyen 34 numaralı kesme çatlağı, 19 numaralı kesme çatlağını 27 numaralı kesme çatlağına bağlayan kesme çatlağı 36 numara ile kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 23 numaralı kesme çatlağındaki ilerleme 30, 25 numaralı kesme çatlağındaki ilerleme 31, 29 numaralı kesme çatlağındaki ilerleme 32 numara ile kaydedilen kesme çatlağı oluşumları gözlemlendi. Kiriş alt yüzünden başlayıp 20 numaralı çatlağa bileşen kesme çatlağı oluşumu 33 numaralı ile kaydedildi.
130	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı. Kiriş ön yüzünde 22 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerleyerek 38, 34 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerleyerek 39 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 25 numaralı kesme çatlağı ile 29 numaralı kesme çatlağını birleştiren 37 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. 34 numaralı kesme çatlağı ile birleşen kiriş alt yüzünden başlayan yeni kesme çatlağı 39 numara ile işaretlendi. 1, 6, 11, 16 ve 22 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi sonucu kesme kırılması ile güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.4–6 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarına dönüştüğü ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.

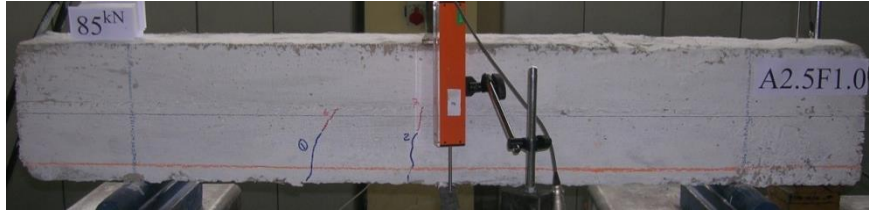


A2.5F1.0 kirişı ön yüzü

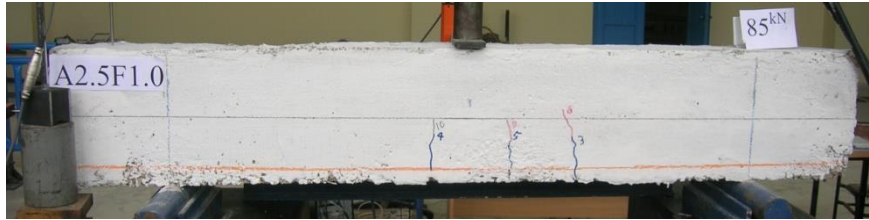


A2.5F1.0 kirişı arka yüzü

Şekil 3.4 Yükleme başlamadan önce A2.5F1.0 kirişi

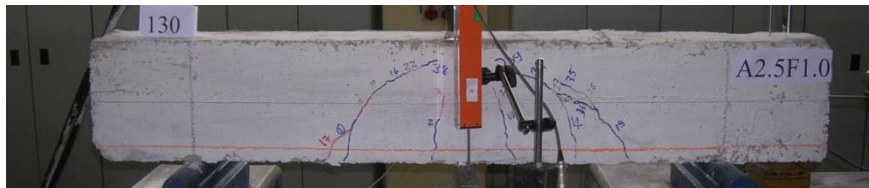


A2.5F1.0 kirişı ön yüzü

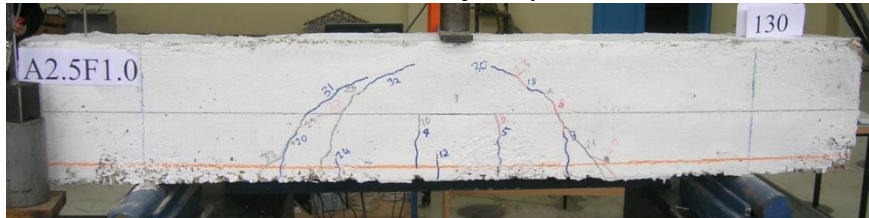


A2.5F1.0 kirişı arka yüzü

Şekil 3.5 Eğik çatlama kapasitesine (85 kN) ulaştığında A2.5F1.0 kirişi



A2.5F1.0 kirişı ön yüzü



A2.5F1.0 kirişı arka yüzü

Şekil 3.6 Maksimum yük taşıma kapasitesine (130 kN) ulaştığında A2.5F1.0 kirişi

3.1.1.3 A2.5F2.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.3'de A2.5F2.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.3 A2.5F2.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
55	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
60	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı eğilme çatlak, kiriş arka yüzü 2 numaralı kesme çatlak gözlemlendi.
65	Kiriş ön yüzeyinde 1 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerleyen 3 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzeyinde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan kesme çatlak 4 numara ile kaydedildi.
70	Kiriş ön yüzü açıklık ortasında 5 numaralı eğilme çatlak, 3 numaralı kesme çatlaklarında ilerleme 6 numara ile kaydedildi. Kiriş arka yüzü 4 numaralı kesme çatlak ilerledi kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 7 numaralı kesme çatlak kaydedildi.
75	Kiriş ön ve arka yüzündeki mevcut çatlak genişliklerinde artış gözlemlendi.
80	Kiriş arka yüzeyinde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan kesme çatlak 8, 7 numaralı kesme çatlak ilerledi oluşan kesme çatlak 9 numara ile kaydedildi.
85	Kiriş arka yüzünde 74 numaralı kesme çatlak ilerledi 9 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi.
90	Kiriş ön yüzünde 6 numaralı kesme çatlaklarında yüke doğru ilerleme 10 numara ile kaydedildi.
95	Kiriş ön yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 11 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi, 3 numaralı kesme çatlaklarında 13 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 12 numaralı eğilme çatlak kaydedildi.
98	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; 1, 3 ve 13 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi sonucu kesme kırılması ile güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.7–9 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumları şeklinde geliştiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.

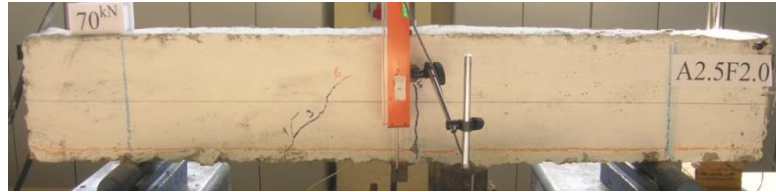


A2.5F2.0 kirişi ön yüzü



A2.5F2.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.7 Yükleme başlamadan önce A2.5F2.0 kirişi

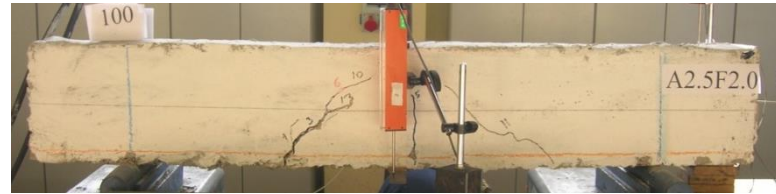


A2.5F2.0 kirişi ön yüzü



A2.5F2.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.8 Eğik çatlama kapasitesine (70 kN) ulaştığında A2.5F2.0 kirişi



A2.5F2.0 kirişi ön yüzü



A2.5F2.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.9 Maksimum yük taşıma kapasitesine (100 kN) ulaştığında A2.5F2.0 kirişi

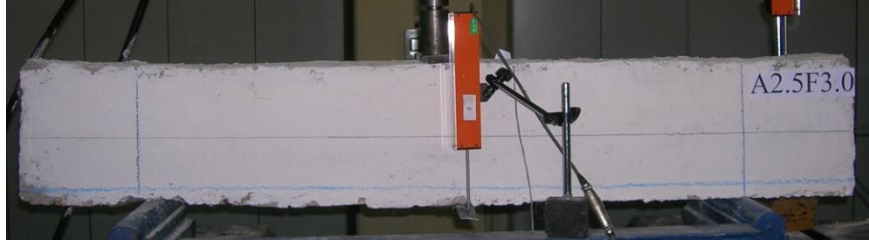
3.1.1.4 A2.5F3.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.4’de A2.5F3.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.4 A2.5F3.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
55	Kiriş ön yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 1 numaralı kesme çatlağı, kiriş arka yüzünde 2 numaralı kesme çatlağı ve mesnetlerde ezilme oluşumu gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde 2 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 3 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. 5 numaralı çatlak oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 2 numaralı kesme çatlağında 4 numaralı ve açıklık ortasına yakın bölümde 6 numaralı gelişme kaydedildi.
65	Kiriş ön yüzünde 3 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi 7 numaralı kesme çatlağı, kiriş arka yüzünde 4 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi oluşan çatlak 10 numara ile kaydedildi.
70	Kiriş ön ve arka yüzündeki mevcut çatlak genişliklerinde artış gözlemlendi.
75	Kiriş ön yüzünde 7 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi oluşan çatlak 9, kiriş arka yüzünde 8 numaralı kesme çatlağı oluşumları gözlemlendi.
78	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 1, 3, 7 ve 9 numaralı kesme çatlaklarının, kiriş arka yüzünde 2, 4, 8 ve 10 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi ve ilerlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.10–12 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarının şeklinde geliştiği ve yük artışı ile çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.

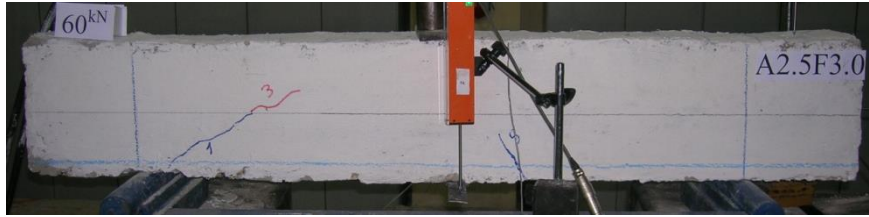


A2.5F3.0 kirişi ön yüzü

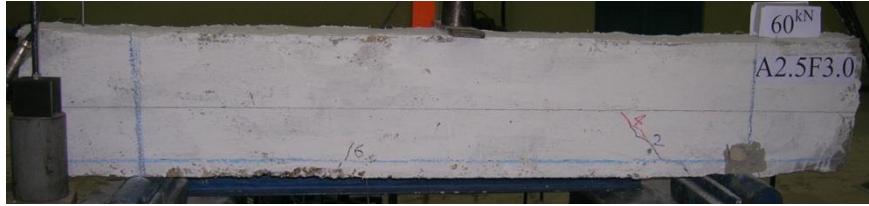


A2.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.10 Yükleme başlamadan önce A2.5F3.0 kirişi

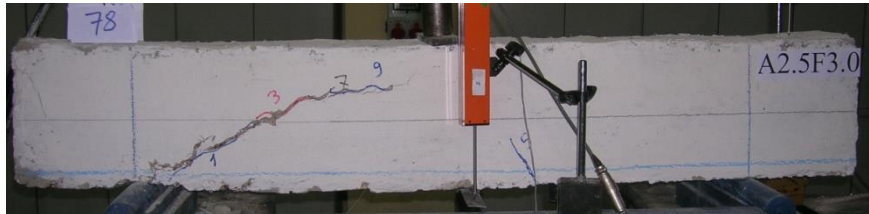


A2.5F3.0 kirişi ön yüzü



A2.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.11 Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A2.5F3.0 kirişi



A2.5F3.0 kirişi ön yüzü



A2.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.12 Maksimum yük taşıma kapasitesine (78 kN) ulaştığında A2.5F3.0 kirişi

3.1.2 a/d Oranı 3.5 Olan Kirişler

3.1.2.1 A3.5R Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.5’de A3.5R kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.5 A3.5R kirişi deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Kiriş ön yüzünde 1, kiriş arka yüzünde 2 numaralı eğilme çatlakları oluşumu işaretlendi.
45	Kiriş ön yüzünde 1, 2, 3 numaralı eğilme çatlakları, kiriş arka yüzünde 6 ve 7 numaralı eğilme çatlakları oluşumları işaretlendi.
50	Kiriş arka yüzünde 2 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 9 numaralı çatlak oluşumu, kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 8 ve 10 numaralı eğilme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
55	Kiriş arka yüzünde 3 numaralı eğilme çatlaklarında 11, 4 numaralı eğilme çatlaklarında 12 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 14 numaralı eğilme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde 13 numaralı eğilme çatlaklarında 16, 5 numaralı eğilme çatlaklarında 17 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi. 15 numaralı yeni eğilme çatlakları oluşumu kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 7 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 18 numaralı kesme çatlakları , 8 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen ve yüke doğru ilerleyen 19 numaralı kesme çatlakları, 6 numaralı eğilme çatlaklarında 20 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi.

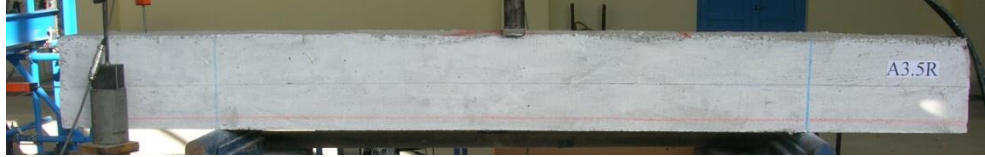
Çizelge 3.5 A3.5R kirişi deney sonuçları (devamı)

62	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş arka yüzünde 8 ve 19 numaralı çatlakların genişlemesi sonucu kesme kırılması ile güç tükenmesi oluştu.
----	---

Şekil 3.13–15 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumları şeklinde geliştiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.

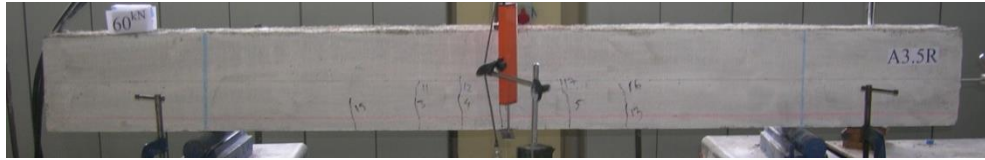


A3.5R kirişi ön yüzü

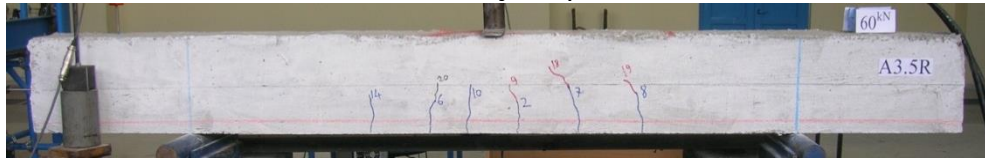


A3.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.13 Yükleme başlamadan önce A3.5R kirişi

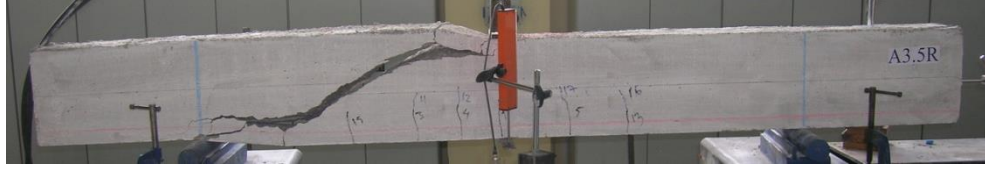


A3.5R kirişi ön yüzü

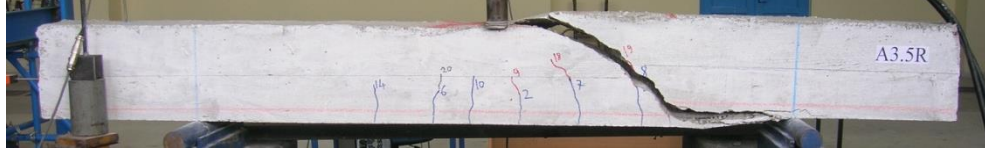


A3.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.14 Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A3.5R kirişi



A3.5R kirişi ön yüzü



A3.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.15 Maksimum yük taşıma kapasitesine (62 kN) ulaştığında A3.5R kirişi

3.1.2.2 A3.5F1.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.6'de A3.5F1.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.6 A3.5F1.0 kirişi deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Kiriş ön yüzünde 3 numaralı kesme çatlağı, 4 ve 5 numaralı eğilme çatlağı, kiriş arka yüzünde 1, 2, 6 ve 7 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi.
55	Kiriş ön yüzünde 3 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerleyen 8 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 1 numaralı eğilme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 9 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde 8 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerledi oluşan kesme çatlağı 10 numara ile kaydedildi.
65	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 3, 8 ve 10 numaralı kesme çatlaklarının, kiriş arka yüzünde 11 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi ve ilerlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.16–18 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumları şeklinde geliştiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.



A3.5F1.0 kirişi ön yüzü

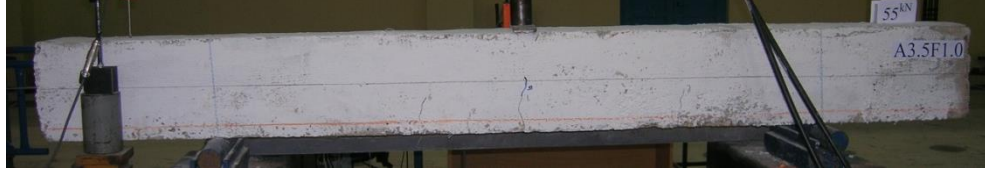


A3.5F1.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.16 Yükleme başlamadan önce A3.5F1.0 kirişi



A3.5F1.0 kirişi ön yüzü

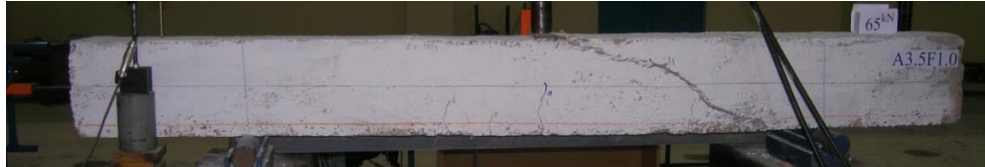


A3.5F1.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.17 Eğik çatlama kapasitesine (55 kN) ulaştığında A3.5F1.0 kirişi



A3.5F1.0 kirişi ön yüzü



A3.5F1.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.18 Maksimum yük taşıma kapasitesine (65 kN) ulaştığında A3.5F1.0 kirişi

3.1.2.3 A3.5F2.0 Kirişı Deney Sonuçları

Çizelge 3.7’de A3.5F2.0 kirişı deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.7 A3.5F2.0 kiriş deney sonuçları

Uygulan an yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Kiriş ön yüzünde 1, arka yüzünde 2 ve 3 numaralı eğilme çatlakları işaretlendi.
55	Kiriş arka yüzünde 4 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan kesme çatlağı 5 numara ile kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 4 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 6 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. 3 numaralı eğilme çatlağındaki ilerleme 7 numara ile kaydedildi.
65	Kiriş ön yüzünde 5 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerleyen 9 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Ayrıca 5 numaralı kesme çatlağının aşağı doğru uzayan kısmı 8 numara ile işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 6 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerleyen 10 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş açıklığında eğilme çatlağı oluşumu 11 numara ile kaydedildi.
70	Kiriş ön yüzünde 5 numaralı eğilme çatlağında yüke doğru ilerleyen 10 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kesme açıklığındaki yeni çatlak oluşumu 13 numara ile kaydedildi. Kiriş arka yüzü 10 numaralı kesme çatlağı yüke doğru ilerledi oluşan kesme çatlağı 14 numara ile işaretlendi. Ayrıca 6 numaralı kesme çatlağının aşağı doğru uzayan kısmı 15, 2 numaralı eğilme çatlağında ilerleme 16 numara ile işaretlendi.
75	Kiriş ön yüzünde 12 numaralı kesme çatlağında yüke doğru ilerleyen 20 numaralı kesme çatlağı ve 18 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 17 numaralı eğilme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısı geçen yüke doğru ilerleyen 19 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi.

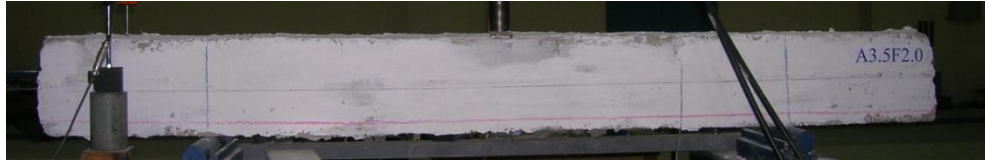
Çizelge 3.7 A3.5F2.0 kiriş deney sonuçları (devamı)

80	Kiriş ön yüzünde 13 numaralı kesme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 21, 20 numaralı kesme çatlağında yüke doğru ilerleyen 22 numaralı kesme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Ayrıca 13 numaralı kesme çatlağının aşağı doğru uzayan kısmı 24 ile kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 19 numaralı kesme çatlağı ilerledi oluşan kesme çatlağı 25, 14 numaralı kesme çatlağı ilerledi oluşan kesme çatlağı 23 numara ile kaydedildi.
85	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 8, 5, 9, 12, 20 ve 22 numaralı kesme çatlaklarının, kiriş arka yüzünde 16, 6, 10, 14 ve 23 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi ve ilerlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.19–21 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumları şeklinde geliştiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.



A3.5F2.0 kiriş ön yüzü

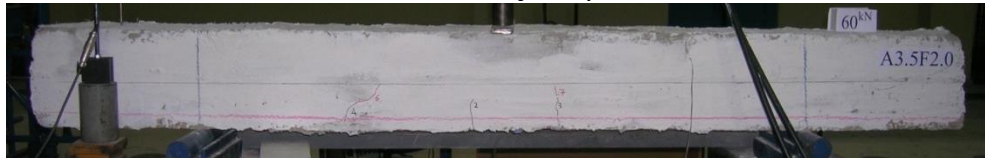


A3.5F2.0 kiriş arka yüzü

Şekil 3.19 Yükleme başlamadan önce A3.5F2.0 kiriş

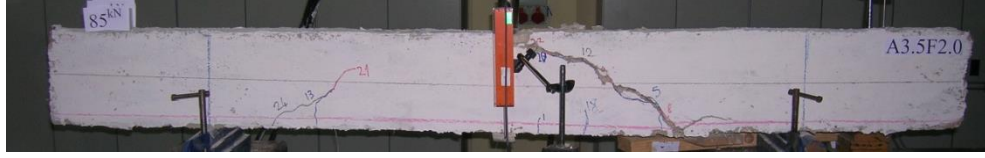


A3.5F2.0 kiriş ön yüzü

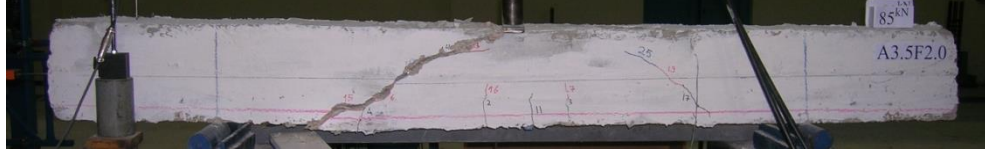


A3.5F2.0 kiriş arka yüzü

Şekil 3.20 Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A3.5F2.0 kiriş



A3.5F2.0 kirişi ön yüzü



A3.5F2.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.21 Maksimum yük taşıma kapasitesine (85 kN) ulaştığında A3.5F2.0 kirişi

3.1.2.4 A3.5F3.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.8’de A3.5F3.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.8 A3.5F3.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
55	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
60	Kiriş ön yüzünde 1 ve 2, arka yüzünde 3 numaralı eğilme çatlakları işaretlendi.
65	Kiriş ön yüzünde 4 numaralı eğilme çatlağı oluşumu işaretlendi.
70	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
75	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.
80	Kiriş ön yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 1 numaralı eğilme çatlağındaki gelişme 6 numara ile kaydedildi. 5 numaralı yeni eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 3 numaralı eğilme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 7 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi
85	Kiriş ön yüzünde 8 numaralı çatlak oluşumu gözlemlendi.
90	Yeni çatlak oluşumu gözlenmedi.

Çizelge 3.8 8 A3.5F3.0 kiriş deney sonuçları (devamı)

95	Kiriş arka yüzünde 7 numaralı çatlakta 9 numaralı ilerleme gözlemlendi. 10 numaralı yeni çatlak oluşumu gözlemlendi.
100	Kiriş arka yüzünde 7 numaralı çatlakta genişleme ve ilerleme gözlemlendi. 12 numaralı yeni çatlak oluşumu gözlemlendi.
105	Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmedi.
110	Kiriş ön yüzünde 13 ve 14 numaralı çatlak oluşumları, kiriş arka yüzünde 15 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi.
115	Kiriş ön yüzünde 11 numaralı eğilme çatlak oluşumunda 16 numaralı eğilme çatlak oluştu, 13 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısı aşan 17 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi.
117	Kiriş kesme –eğilme taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 1, 6 numaralı eğilme çatlaklarının ve 13, 17, 18 kesme çatlaklarının yüke doğru ilerlemesi, kiriş arka yüzünde 3, 7 ve 9 numaralı çatlakların genişlemesi ve ilerlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.22–24 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumları şeklinde geliştiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine kesme –eğilme ile ulaştığı söylenebilir.



A3.5F3.0 kirişi ön yüzü

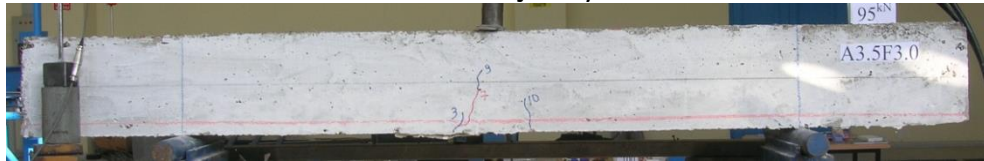


A3.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.22 Yükleme başlamadan önce A3.5F3.0 kirişi



A3.5F3.0 kirişi ön yüzü

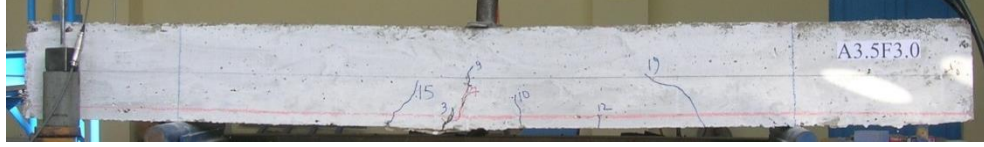


A3.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.23 Eğik çatlama kapasitesine (95 kN) ulaştığında A3.5F3.0 kirişi



A3.5F3.0 kirişi ön yüzü



A3.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.24 Maksimum yük taşıma kapasitesine (117 kN) ulaştığında A3.5F3.0 kirişi

3.1.3 a/d Oranı 4.5 Olan Kirişler

3.1.3.1 A4.5R Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.9’de A4.5R kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.9 A4.5R kirişi deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Kiriş ön yüzünde 1, kiriş arka yüzü açıklık ortasına yakın bölümde 2, 3, 4 ve 5 numaralı eğilme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
40	Kiriş ön yüzünde 6 ve 7, kiriş arka yüzünde 8 numaralı eğilme çatlakları oluşumları işaretlendi.
45	Kiriş ön yüzünde 9 ve 10 numaralı eğilme çatlakları, kiriş arka yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 11 ve 12 numaralı eğilme çatlakları oluşumları gözlemlendi.
50	Kiriş ön yüzünde 6 numaralı eğilme çatlaklarında 14, 1 numaralı eğilme çatlaklarında 15 numaralı ilerlemeler gözlemlenmiştir. 13 numaralı yeni eğilme çatlakları oluşumu işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 3 numaralı eğilme çatlaklarında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 17 çatlak oluşumu gözlemlendi.
55	Kiriş ön yüzeyinde 19, 21 ve 22 numaralı çatlak oluşumları, kiriş arka yüzünde 18 ve 20 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi.

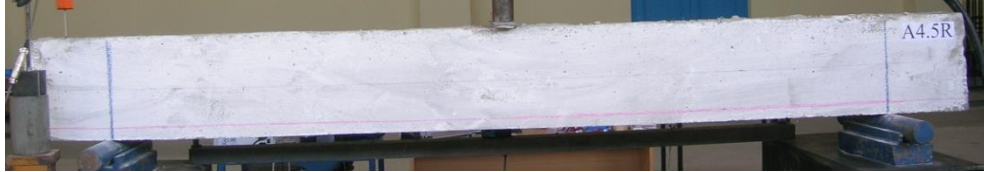
Çizelge 3.9 A4.5R kirişi deney sonuçları (devamı)

60	Kiriş ön yüzünde 9 numaralı eğilme çatlağında 23 numaralı ilerleme, kiriş arka yüzünde 8 numaralı eğilme çatlağında 24 numaralı eğilme çatlağı, 11 numaralı çatlakta 25 numaralı kesme çatlağı ilerlemesi kaydedildi.
65	Kiriş ön yüzünde 26 ve 27 numaralı eğilme çatlağı oluşumları işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 4 numaralı eğilme çatlağında kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 28 numaralı eğilme çatlağı oluşumları gözlemlendi.
70	Kiriş ön yüzünde 7 numaralı çatlakta 29, 14 numaralı çatlakta 30, 22 numaralı çatlakta 31 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 17 numaralı çatlakla birleşen 32 numaralı çatlak oluşumu işaretlendi.
75	Kiriş ön yüzünde 26 numaralı çatlakta 33, 15 numaralı çatlakta 34 ve yeni çatlak oluşumu 35 numaralar ile işaretlendi. Kiriş arka yüzünde 36 numaralı yeni çatlak oluşumu, 5 numaralı çatlakta 37, 2 numaralı çatlakta 38, 20 numaralı çatlakta 39 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi.
76	Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; 27 numaralı çatlaktan yüke doğru ilerleyen ani çatlak oluşumu, mevcut çatlakların genişlemesi ve ilerlemesi ile güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.25–27 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarının gözlemlendiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.



A4.5R kirişi ön yüzü

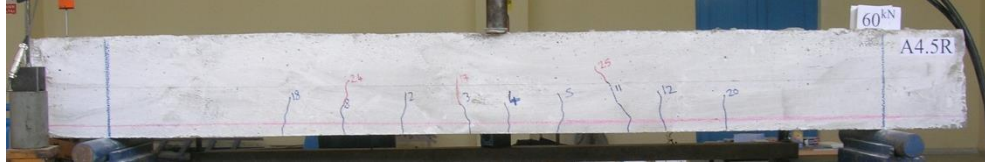


A4.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.25 Yükleme başlamadan önce A4.5R kirişi



A4.5R kirişi ön yüzü

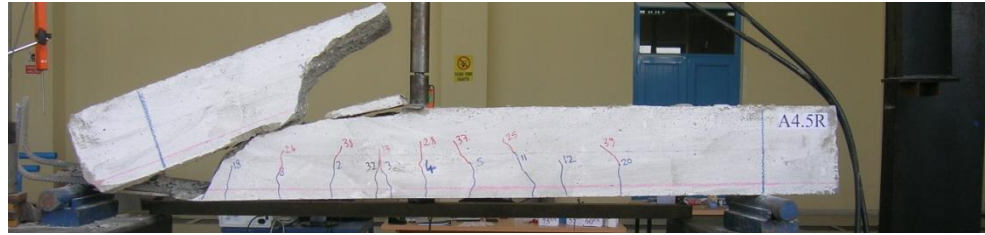


A4.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.26 Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A4.5R kirişi



A4.5R kirişi ön yüzü



A4.5R kirişi arka yüzü

Şekil 3.27 Maksimum yük taşıma kapasitesine (76 kN) ulaştığında A4.5R kirişi

3.1.3.2 A4.5F1.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.10'de A4.5F1.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.10 A4.5F1.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Kiriş ön yüzü açıklık ortasında 1 numaralı eğilme çatlak, kiriş arka yüzü 2 ve 3 numaralı eğilme çatlak oluşumları gözlemlendi.
30	Kiriş ön yüzündeki 1 numaralı eğilme çatlak, kiriş arka yüzünde 2 numaralı eğilme çatlak, kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan 5 numaralı gelişme kaydedildi.
35	İlave çatlak oluşumu gözlenmedi.
40	Kiriş ön yüzünde 6 numaralı eğilme çatlak, kiriş arka yüzünde 7 numaralı eğilme çatlak oluşumları gözlemlendi.

Çizelge 3.10 A4.5F1.0 kiriş deney sonuçları (devamı)

45	Kiriş ön yüzünde 8 ve 9 numaralı eğilme çatlak oluşumları, kiriş arka yüzünde kiriş arka yüzünde 10 ve 11 numaralı eğilme çatlak oluşumları gözlemlendi.
50	Kiriş ön ve arka yüzündeki mevcut çatlak genişliklerinde artış gözlemlendi.
55	Kiriş ön yüzünde 12 numaralı eğilme çatlak, kiriş arka yüzünde 13 numaralı eğilme çatlak oluşumları gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde 14 numaralı kesme çatlak, 15 ve 16 numaralı eğilme çatlakları, kiriş arka yüzünde kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 18 numaralı eğilme çatlak ve kiriş yüksekliğinin yarısı geçen 19 numaralı kesme çatlak oluşumları gözlemlendi.
65	Kiriş ön yüzü 12 numaralı eğilme çatlakta 20 numaralı gelişme kaydedildi.
70	Kiriş ön yüzünde 14 numaralı kesme çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 21 numaralı, 19 numaralı kesme çatlakta 23 numaralı kesme çatlak ve 24 numaralı eğilme çatlak kaydedildi.
75	Kiriş ön yüzünde 17 numaralı çatlakta 26, 21 numaralı çatlakta 25 numaralı gelişmeler ve 27 numaralı çatlak oluşumları kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 19 numaralı çatlakla birleşen 28 numaralı kesme çatlak oluşumu gözlemlendi.
80	Kiriş ön yüzünde 16 ve 22 numaralı çatlakları birleştiren 30 numaralı, 25 numaralı çatlakta 29 numaralı ve 31 numaralı eğilme çatlak oluşumları gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 32 numaralı ve 11 numaralı eğilme çatlakta 33 numaralı gelişme kaydedildi.
85	Kiriş ön yüzünde 17 numaralı çatlakla birleşen 34, açıklık ortasında 35 numaralı, kiriş arka yüzünde 23 numaralı çatlakta 36 numaralı gelişme kaydedildi. Kiriş taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 14, 21, 25 ve 29 numaralı kesme çatlaklarının, kiriş arka yüzünde 28, 19, 23 ve 36 numaralı kesme çatlaklarının genişlemesi ve ilerlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.28–30 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerlediği eğik çatlak oluşumlarının gözlemlendiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı söylenebilir.



A4.5F1.0 kirişi ön yüzü



A4.5F1.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.28 Yükleme başlamadan önce A4.5F1.0 kirişi



A4.5F1.0kirişi ön yüzü



A4.5F1.0kirişi arka yüzü

Şekil 3.29 Eğik çatlama kapasitesine (60 kN) ulaştığında A4.5F1.0kirişi



A4.5F1.0kirişi ön yüzü



A4.5F1.0kirişi arka yüzü

Şekil 3.30 Maksimum yük taşıma kapasitesine (85 kN) ulaştığında A4.5F1.0kirişi

3.1.3.3 A4.5F2.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.11’de A4.5F2.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.11 A4.5F2.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.

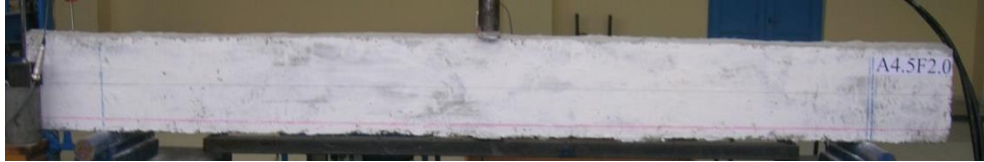
Çizelge 3.11 A4.5F2.0 kiriş deney sonuçları (devamı)

25	Kiriş mesnetlerinde kısmi ezilme gözlemlendi.
30	Kiriş arka yüzü açıklık ortasında 1 numaralı eğilme çatlak kaydedildi.
35	Kiriş arka yüzünde 2 numaralı çatlak oluşumu gözlemlendi.
40	Kiriş ön yüzünde 3, 4 ve 7 numaralı eğilme çatlak oluşumları ve 8 numaralı gelişme kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 2 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 5 numaralı kesme çatlak, 1 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısına ulaşan ve yüke doğru ilerleyen 6 numaralı eğilme çatlak oluşumu gözlemlendi.
45	İlave çatlak oluşumu gözlenmedi.
50	Kiriş ön yüzünde 4 numaralı çatlakta 9 numaralı ve açıklık ortasında 10 numaralı gelişme kaydedildi. Kiriş arka yüzünde 5 numaralı kesme çatlakta 11 numaralı ilerleme ve 12 numaralı eğilme çatlakları işaretlendi.
55	Kiriş ön yüzünde 7 numaralı eğilme çatlakta 13 numaralı ilerleme, 8 numaralı kesme çatlakta yüke doğru ilerleyen 14 numaralı kesme çatlak, kiriş arka yüzünde 15 numaralı eğilme çatlak oluşumu gözlemlendi.
60	Kiriş ön yüzünde 14 numaralı eğilme çatlakta 16 numaralı ilerleme ve kiriş arka yüzünde 17 numaralı eğilme çatlak oluşumu gözlemlendi.
65	Kiriş ön ve arka yüzündeki mevcut çatlak genişliklerinde artış gözlemlendi.
70	Yeni oluşan kesme çatlakları ile kiriş taşıma kapasitesine ulaştı.

Şekil 3.31–33 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarının gözlemlendiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine kesme –eğilme ile ulaştığı söylenebilir.

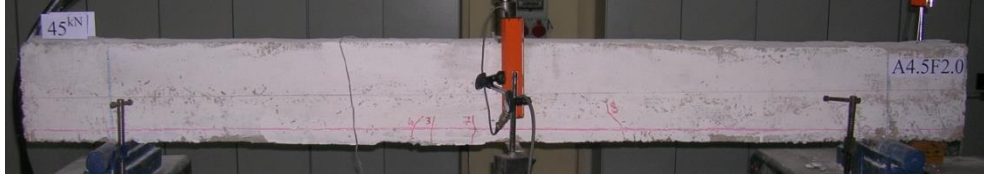


A4.5F2.0 kirişi ön yüzü



A4.5F2.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.31 Yükleme başlamadan önce A4.5F2.0 kirişi

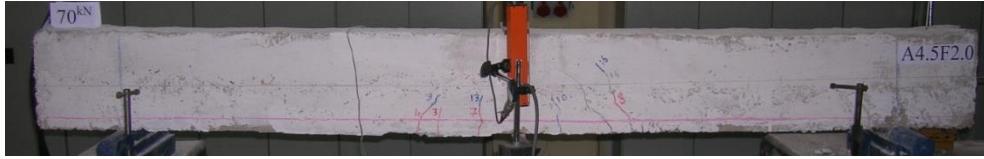


A4.5F2.0 kirişı ön yüzü



A4.5F2.0 kirişı arka yüzü

Şekil 3.32 Eğik çatlama kapasitesine (45 kN) ulaştığında A4.5F2.0 kirişi



A4.5F2.0 kirişı ön yüzü



A4.5F2.0 kirişı arka yüzü

Şekil 3.33 Maksimum yük taşıma kapasitesine (70 kN) ulaştığında A4.5F2.0 kirişi

3.1.3.4 A4.5F3.0 Kirişi Deney Sonuçları

Çizelge 3.12’de A4.5F3.0 kirişi deneyinde önemli görülen gelişmeler özetlenmiştir. Kiriş tek yönlü artan yüke maruz bırakılmış, başlangıç yükü ve yük artımı 5kN alınmıştır.

Çizelge 3.12 A4.5F3.0 kiriş deney sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Gözlenen gelişme
5	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
10	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
15	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
20	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
25	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
30	Çatlak oluşumu gözlenmedi.
35	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı eğilme çatlakları gözlemlendi.
40	İlave çatlak oluşumu gözlenmedi.
45	Kiriş ön yüzünde 1 numaralı eğilme çatlaklarında 2 numaralı ilerleme, 3 numaralı eğilme çatlakları oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 4 numaralı eğilme çatlakları gözlemlendi.

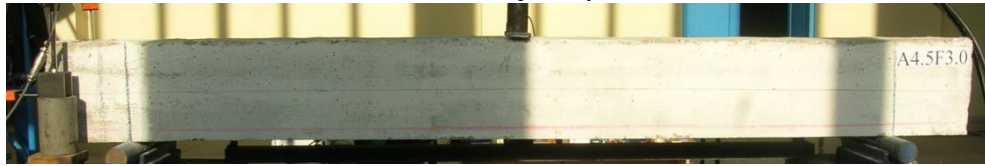
Çizelge 3.12 A4.5F3.0 kiriş deney sonuçları (devamı)

50	Kiriş arka yüzünde 5 ve 6 numaralı eğilme çatlağı oluşumları gözlemlendi.
55	Kiriş ön yüzünde 7 numaralı eğilme çatlağı oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 4 numaralı eğilme çatlağında 8 numaralı gelişme kaydedildi.
60	İlave çatlak oluşumu gözlenmedi.
65	Kiriş ön yüzünde 3 numaralı eğilme çatlağında 9 numaralı ilerleme gözlemlendi. 10 numaralı yeni çatlak oluşumu gözlemlendi. Kiriş arka yüzünde 11 ve 12 numaralı eğilme çatlakları işaretlendi.
70	Kiriş ön yüzünde 13 v14 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi.
75	İlave çatlak oluşumu gözlenmedi.
80	Kiriş ön yüzü 10 numaralı çatlakta kiriş yüksekliğinin yarısını geçen 15, kiriş arka yüzünde 11 numaralı çatlakta 16 numaralı çatlak oluşumları işaretlendi.
85	Kiriş ön yüzü 17 numaralı çatlak oluşumu işaretlendi.
90	Kiriş ön yüzü 18 numaralı eğilme çatlağı oluşumu kaydedildi.
95	Kiriş ön ve arka yüzündeki mevcut çatlak genişliklerinde artış gözlemlendi.
97	Kiriş eğilme taşıma kapasitesine ulaştı; kiriş ön yüzünde 7 numaralı eğilme çatlağının yüke doğru ilerlemesi ve genişlemesi, kiriş arka yüzünde 4 ve 8 numaralı eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve genişlemesi sonucu güç tükenmesi oluştu.

Şekil 3.34–35 incelendiğinde, kirişe uygulanan yük düzeyinin artışı ile eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleyen eğik çatlak oluşumlarının gözlemlendiği ve çatlak genişliklerinin artarak kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine kesme –eğilme ile ulaştığı söylenebilir.



A4.5F3.0 kirişi ön yüzü

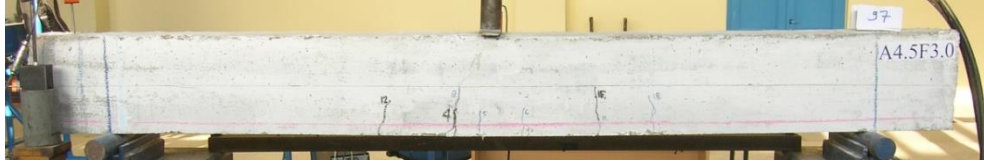


A4.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.34 Yükleme başlamadan önce A4.5F3.0 kirişi



A4.5F3.0 kirişi ön yüzü

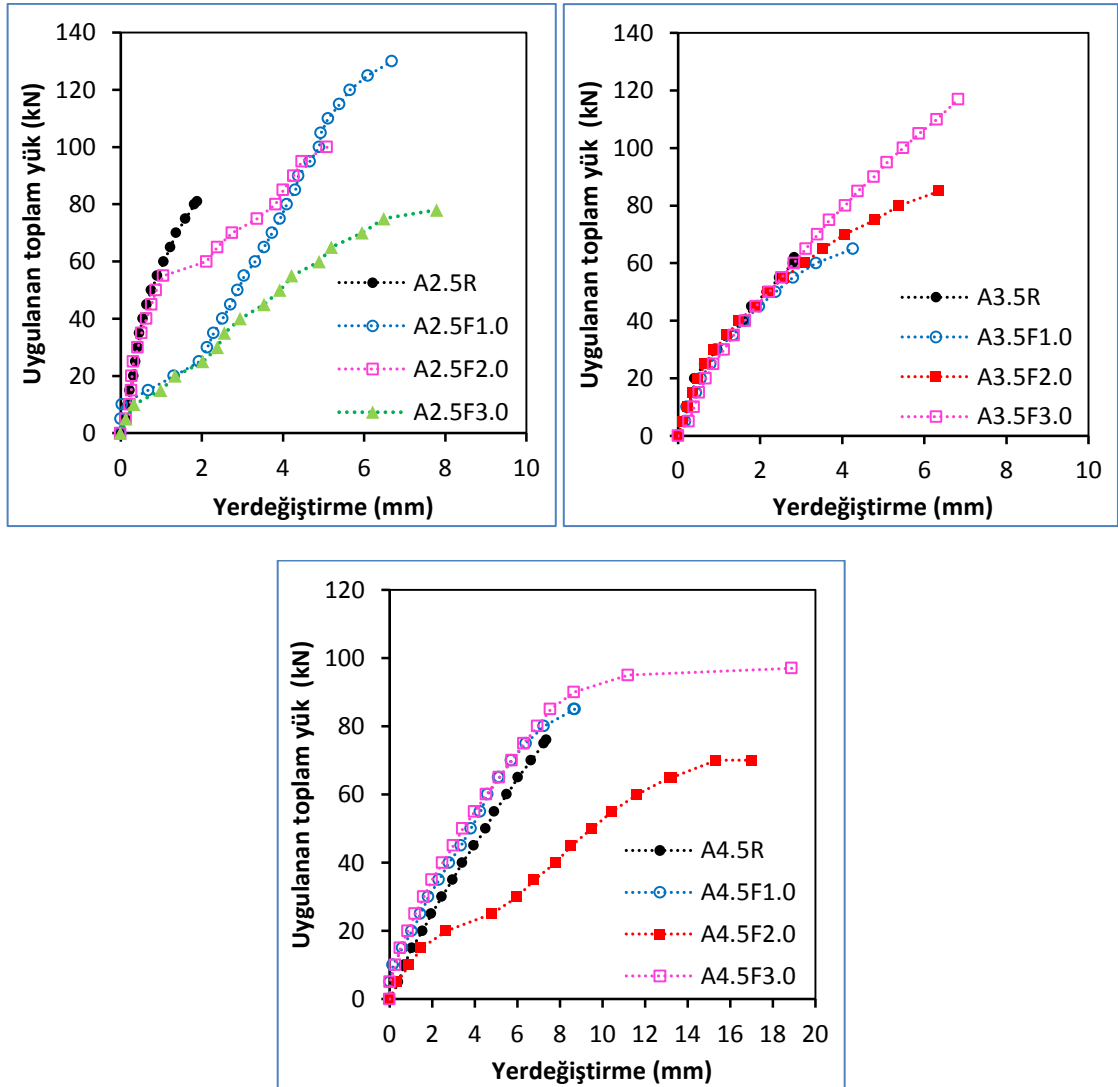


A4.5F3.0 kirişi arka yüzü

Şekil 3.35 Maksimum yük taşıma kapasitesine (97 kN) ulaştığında A4.5F3.0 kirişi

3.2 Kirişlerin Deneysel Yük-Yerdeğiştirme Eğrileri

A3.5F3.0, A4.5F2.0 ve A4.5F3.0 kirişleri haricindeki kirişlerde eğik çatlakların genişlemesi ile kesme kırılması biçiminde güç tükenmesi oluşmuştur. Tüm kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.36’da verilmiştir [11].



Şekil 3.36 Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri

Betonarme kirişlerde asal çekme gerilmeleri betonun çekme mukavemetini aştığında eğik çekme kırılmasının başladığı varsayılır ve diyagonal çatlaklar kiriş kesiti boyunca yayılır. Her bir kiriş için deneysel olarak bulunan diyagonal çatlama yükü (P_{cr}), eğik çatlak oluştuğunda açıklık ortası yerdeğiştirme (δ_{cr}), göçme yükü (P_u), göçme anında açıklık ortası yerdeğiştirme (δ_u), diyagonal çatlama mukavemeti (v_{cr}) ve göçme kesme mukavemeti (v_u) Çizelge 3.14’de verilmiştir[11]. Çizelgedeki eğik çatlama mukavemeti ve göçme kesme mukavemeti, kirişlerin çatlama ve göçme kesme kuvvetlerinin kesit genişliği (b_w) ve kesit etkili yüksekliğine (d) bölünmesi ile bulunmuştur.

Çizelge 3.13 Deney sonuçları

Kirişler	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	v_{cr} (MPa)	v_u (MPa)	δ_u/δ_{cr}	v_u/v_{cr}
A2.5R	65	1.23	81	1.89	1.08	1.35	1.54	1.25
A2.5F1.0	85	4.31	130	6.69	1.42	2.17	1.55	1.53
A2.5F1.0R	70	4.41	88	5.71	1.17	1.47	1.29	1.26
A2.5F2.0	70	2.75	100	5.09	1.17	1.67	1.85	1.43
A2.5F3.0	60	4.90	78	7.79	1.00	1.30	1.59	1.30
A3.5R	60	2.81	62	2.83	1.00	1.03	1.01	1.03
A3.5F1.0	55	2.80	65	4.26	0.92	1.08	1.52	1.18
A3.5F2.0	60	3.08	85	6.36	1.00	1.42	2.06	1.42
A3.5F3.0*	95	5.09	117	6.83	1.58	1.95	1.34	1.23
A4.5R	60	5.51	76	7.37	1.00	1.27	1.34	1.27
A4.5F1.0	60	4.60	85	8.70	1.00	1.42	1.89	1.42
A4.5F2.0*	45	8.54	70	15.35	0.75	1.17	1.80	1.56
A4.5F3.0**	---	---	97	18.63	---	1.62	---	---

* Kesme-eğilme göçmesi

**Eğilme göçmesi

3.2.1 a/d Etkisi

Betonarme kirişte kesme taşıma gücü, hemen hemen daima iki mekanizmanın -kiriş etkisi ve kemerlenme etkisi- birleştirilmiş mukavemeti olmaktadır. Elastik kiriş teorisinde kabul edildiği gibi; iç moment kolu uzunluğu sabit kalırsa, tam kiriş etkisi elde edilebilir. Beton ve donatı arasındaki kenetlenme, kiriş açıklığında ortadan kalkarsa, kiriş tam bir gergili kemer gibi çalışır. Eğik çatlakların oluştuğu betonarme kirişlerde, çatlamış yapı nedeni ile, kenetlenmenin tam olarak sağlanması mümkün değildir. Bu durumda kiriş mukavemetinin bir kısmı kemer etkisi ile sağlanır. a/d oranı

küçük olan kirişlerde, momentin artması ve ankastre uçtaki kesitin küçülmesinin doğal bir sonucu olarak dışteki şekildeğiştirmeler hızla artar, artan şekildeğiştirmeler ile agrega kenetlenmesi ve donatı kaldıraç mukavemetleri hızla azalmaktadır. Öte yandan a/d oranı büyük olan kirişlerde kemer etkisinin oluşması zor olduğundan, yükün büyük bir kısmı kiriş davranışı ile; buna karşın a/d oranı küçük olan kirişlerde, yükün büyük kısmı kemer davranışı ile karşılanır [12].

Çizelge 3.13'den görüldüğü gibi, kesme açıklığının kiriş yüksekliğine oranı (a/d) azaldıkça eğik çatlama kesme mukavemeti artmaktadır. Bu artışta temel parametre, kemerlenme etkisindeki artıştır. a/d azaldıkça kirişin göçme kesme mukavemeti artmaktadır. A2.5R olan referans kirişi ile A4.5R olan referans kiriş karşılaştırıldığında, a/d=2.5 olan A2.5R kirişinin kesme mukavemetinin daha büyük olduğu görülmüştür. Benzer ilişki, hacimsel çelik lif oranı %2.0 olan A2.5F2.0 kirişinin kesme mukavemetinin A3.5F2.0 ve A4.5F2.0 kirişleri kesme mukavemetlerinden daha büyük olduğu, yerdeğiştirmenin ise daha küçük olduğu görülmüştür.

3.2.2 Çelik Lif Oranı Etkisi

Betonarme kirişlerde çelik lif kullanılmasının kiriş kesme mukavemeti ve şekildeğiştirme kapasitesini artırdığı Şekil 3.36 ve Çizelge 3.13'den görülebilir. A2.5 serisinde (A2.5R, A2.5F1.0R, A2.5F2.0), hacimsel çelik lif oranı %1.0 ve %2.0 kullanılmasının kiriş kesme mukavemetini %9 ve %24 artırdığı, yerdeğiştirme kapasitesinin ise, sırasıyla, 3.02 and 2.69 kat arttığı görülmüştür. Ayrıca, beton basınç mukavemeti yaklaşık aynı olan A2.5F1.0R ve A2.5F2.0 kirişlerinde hacimsel çelik lif oranı %1.0'den %2.0'ye artırıldığında, kesme mukavemetinin %14 arttığı fakat yerdeğiştirme kapasitesinde artış gözlenmemiştir.

A3.5 serisinde, hacimsel çelik lif oranı %1.0, %2.0 ve %3.0 kullanılması durumunda, kesme mukavemetlerinin, sırasıyla, 5%, 38% ve 89% arttığı, yerdeğiştirme kapasitelerinin ise, sırasıyla, 1.51, 2.25 ve 2.41 kat arttığı görülmüştür.

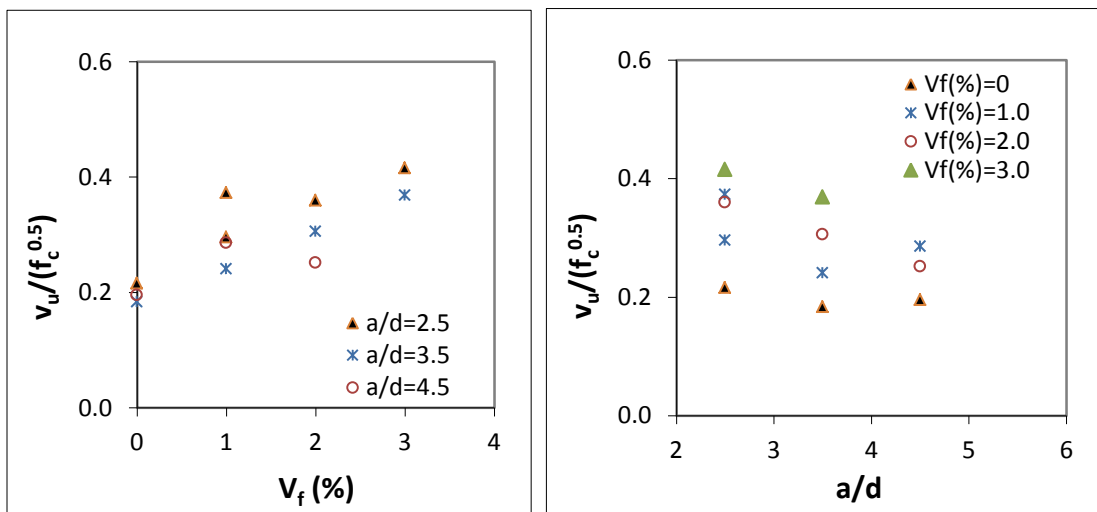
Şekil 3.36 ve Çizelge 3.13'den görüldüğü gibi, referans kirişlerin beton basınç mukavemeti daha büyük olmasına rağmen hacimsel çelik lif oranı %1.0 olan betonarme kirişlerin kesme mukavemeti referans kirişlerin kesme mukavemetinden daha büyük

bulunmuştur. A2.5F1.0R, A3.5F1.0 ve A4.5F1.0 kirişleri kesme mukavemeti A2.5R, A3.5R ve A4.5R referans kirişleri kesme mukavemetinin, sırasıyla, 1.09, 1.05 ve 1.12 katı bulunmuştur. Ayrıca, A2.5F1.0R, A3.5F1.0 ve A4.5F1.0 kirişleri yerdeğiştirme kapasiteleri A2.5R, A3.5R ve A4.5R referans kirişleri yerdeğiştirmelerinin, sırasıyla, 3.02, 1.51 ve 1.18 katı bulunmuştur.

Hacimsel çelik lif oranının %3.0 kullanıldığı A4.5F3.0 kirişi kesme mukavemeti ve yerdeğiştirme kapasitesinin A4.5R kirişine göre, sırasıyla, 28% ve 2.53 kat, arttığı görülmüş ve kırılma biçimi kesme kırılmasından eğilme kırılmasına değişmiştir. Fakat, hacimsel çelik lif oranının %3.0 gibi yüksek miktarda kullanılması homojen karışım elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, çelik lifin etriyelerle birlikte kullanılması tercih edilebilir.

Şekil 3.36 ve Çizelge 3.13'den görüldüğü gibi, hacimsel çelik lif oranının %2.0'ye kadar artışı ile birlikte eğik çatlama mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Fakat, A2.5F2.0 ve A2.5F3.0 kirişleri eğik çatlama mukavemetleri karşılaştırıldığında, eğik çatlama mukavemetlerinde artış gözlenmemiştir.

Şekil 3.37'de boyutsuz kesme mukavemetinin ($v_u / f_c^{0.5}$) hacimsel çelik içeriği ve a/d oranına bağlı değişimi verilmiştir. a/d=2.5, a/d=3.5 ve a/d=4.5 değerlerinde hacimsel çelik lif içeriği artışı ile ($v_u / f_c^{0.5}$)'nun artış gösterdiği söylenebilir. V_f =%0, V_f =%1.0, V_f =%2.0 ve V_f =%3.0 değerlerinde a/d artışı ile ($v_u / f_c^{0.5}$)'nun azaldığı söylenebilir.



Şekil 3.37 Kirişlerin boyutsuz kesme mukavemetinin değişimi

ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN KESME MUKAVEMETİ

Etriyesiz çelik lifli betonarme kirişlerin göçme kesme mukavemeti ve eğik çatlama mukavemeti tahmini için literatürde çok sayıda bağıntı önerilmiştir. Bu çalışmadaki istatistiksel değerlendirmede, Arslan [13] tarafından yapılan çalışmada karşılaştırılan bağıntılar kullanılmıştır. Etriyesiz çelik lifli betonarme kirişlerin göçme kesme mukavemeti ve eğik çatlama mukavemeti tahmini için önerilen bağıntıların tahmini deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

4.1 Literatürde Önerilen Kesme Mukavemeti Bağıntıları

Etriyesiz çelik lifli betonarme kirişlerin kesme mukavemeti için Sharma [14] tarafından deneysel sonuçlardan üretilen bağıntı ACI 544 [15] tarafından da önerilmiştir.

$$v_u = k f_{ct} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25} \quad (\text{MPa}) \quad (4.1)$$

Bağıntıda f_{ct} betonun çekme mukavemeti, eğer f_{ct} doğrudan çekme deneyi ile bulunuyorsa $k = 1$, eğer f_{ct} dolaylı olarak çekme deneyi ile bulunuyorsa $k = 2/3$ ve eğer $f_{ct} = 0.79 f_c^{0.5}$ ise betonun ezilme modülü $k = 4/9$.

Narayanan ve Darwish [16] tarafından ampirik (4.2) bağıntısı önerilmiştir.

$$v_u = e \left(0.24 f_{sp} + 80 \rho \frac{d}{a} \right) + v_b \quad (\text{MPa}), \quad (4.2)$$

Bağıntıda $a/d > 2.8$ için $e = 1.0$ ve $a/d \leq 2.8$ için $e = 2.8(d/a)$, f_{sp} çelik lifli betonun silindir yarma dayanımı $f_{sp} = f_{cuf} / (20 - F^{0.5}) + 0.7 + F^{0.5}$ bağıntısı ile hesaplanır. Çelik lifli

betonun küp mukavemeti f_{cu} , çelik lif katsayısı $F = (L_f / D_f) V_f d_f$ (d_f çelik lif aderans katsayısı dalgalı lif için 0.5, deforme edilmiş lif için 0.75), eğik çatlak boyunca çelik liflerin çekme mukavemeti $v_b = 0.41\tau F$ ve fiber karışımın aderans gerilmesi τ değeri 4.15 MPa alınması önerilmiştir.

Ashour vd. [17] tarafından $a/d \geq 2.5$ olan çelik lifli betonarme kirişler için kesme mukavemeti tahmini için ACI 318'de önerilen kesme mukavemeti bağıntısı geliştirilerek (4.3)'de, Zsutty [22] tarafından önerilen bağıntı geliştirilerek (4.4)'de verilmiştir.

$$v_u = (0.7\sqrt{f_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2\rho \frac{d}{a} \text{ (MPa)}, \quad (4.3)$$

$$v_u = (2.11\sqrt{f_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} \text{ (MPa)}, \quad (4.4)$$

Çubuk model temel alınarak Swamy vd. [18] tarafından önerilen bağıntı (4.5)'de verilmiştir.

$$v_u = 0.37\tau V_f \frac{L_f}{D_f} + 0.167\sqrt{f_c} \text{ (MPa)}, \quad (4.5)$$

bağıntıda τ değerinin Narayanan ve Darwish (1987)'de tarafından önerildiği gibi 4.15 MPa alınmaktadır.

Etriyersiz kirişlerin kesme mukavemeti tahmini için Bazant ve Sun [19] tarafından önerilen bağıntı Imam vd. [20] tarafından geliştirilerek (4.6)'da verilmiştir.

$$v_u = 0.6 \frac{1 + \sqrt{\frac{5.08}{d_a}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{25d_a}}} \sqrt[3]{\rho(1+4F)} \left[f_c^{0.44} + 275 \sqrt{\frac{\rho(1+4F)}{\left(\frac{a}{d}\right)^5}} \right] \text{ (MPa)}, \quad (4.6)$$

Bağıntıda d_a maksimum agrega çapını göstermektedir. d_f değeri düz yüzeyli (smooth) çelik lifler için 0.5, deforme edilmiş çelik liflerde (deformed) ve kancalı uçlu (hooked) çelik lifler için 1.0 alınması önerilmiştir.

Khuntia vd. [21] tarafından (4.7) bağıntısı önerilmiştir.

$$v_u = (0.167 + 0.25F)\sqrt{f_c} \text{ (MPa)}, \quad (4.7)$$

Zsutty [22] tarafından kesme mukavemeti tahmini için önerilen bağıntı Kwak vd. [23] tarafından geliştirilerek Denklem (4.8) ve (4.9)'da sunulmuştur.

$$v_u = 2.1ef_{sp}^{0.7} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.22} + 0.8v_b^{0.97} \text{ (MPa)} \quad (4.8)$$

Bağıntıda $a/d > 3.5$ için $e = 1.0$, ve $a/d \leq 3.5$ için $e = 3.5(d/a)$.

$$v_u = 3.7ef_{sp}^{2/3} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} + 0.8v_b \text{ (MPa)}, \quad (4.9)$$

Bağıntıda $a/d > 3.4$ için $e = 1.0$, ve $a/d \leq 3.4$ için $e = 3.4(d/a)$.

RILEM [24]'e göre çelik lifli kirişlerin göçme kesme mukavemeti (4.10)'da verilmiştir.

$$v_{Rd,3} = 0.12k(100\rho f_c)^{1/3} + 0.7k_f k_l \tau_{fd} \text{ (MPa)}, \quad (4.10)$$

Bağıntıda $k = (1 + (200/d)^{0.5}) \leq 2$ (d mm boyutundadır), $\rho \leq 0.02$, k_f değeri dikdörtgen kesitler için 1, $k_l = (1600 - d)/1000 \geq 1$, $\tau_{fd} = 0.12f_{eq,3}$ ve $f_{eq,3}$ göçme durumundaki karakteristik basınç mukavemetidir.

Bazant ve Kim [25] ve CSA A23.3-04 [26]'de önerilen kesme mukavemeti bağıntıları Yakoub ([29] tarafından geliştirilerek $a/d \geq 2.5$ için (4.11-12) bağıntıları önerilmiştir.

$$v_u = 0.83\xi^3\sqrt{\rho} \left(\sqrt{f_c} + 249.28 \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{a}{d}\right)^5}} \right) + 0.162F\sqrt{f_c} \text{ (MPa)}, \quad (4.11)$$

$$v_u = \beta\sqrt{f_c}(1 + 0.70F) \text{ (MPa)}, \quad (4.12)$$

Bağıntıda agrega boyut etkisi katsayısı $\xi = 1/(1 + d/(25d_a))^{0.5}$, $\beta = [0.4/(1 + 1500\varepsilon_x)] [1300/(1000 + s_{xe})]$ (s_{xe} mm boyutundadır), kiriş açıklık ortasında boyuna donatıdaki birim deformasyon $\varepsilon_x = (M/d_v + V)/(2E_s A_s)$, M ve V kiriş kesitinde göçme anındaki moment ve kesme kuvvetidir. Eğilme donatısı için moment kolu d_v yaklaşık olarak $0.9d$ veya $0.72h$ (h kiriş yüksekliğini tanımlamaktadır) değerlerinden hangisi büyükse o değerin alınması önerilmiştir.

$s_{xe} = 35s_x / (16 + d_a) \geq 0.85s_x$, bağıntıda s_{xe} değeri, maksimum agrega boyutu d_a ve s_x çatlak arası uzunluğa bağlı olarak tanımlanmıştır.

Gandomi vd. [27] tarafından önerilen bağıntı (4.13)'de sunulmuştur.

$$v_u = 2 \frac{d}{a} (\rho f_c + v_b) + 2 \frac{d}{a} \frac{\rho}{(288\rho - 11)^4} + 2 \text{ (MPa)}. \quad (4.13)$$

Dinh vd. [28] tarafından önerilen bağıntı beton bölgesinin karşıladığı kesme mukavemetinin düşey bileşeni ve çelik lifler ile sağlanan eğik çekme mukavemetinin düşey bileşeninin toplamı ile ifade edilmiştir.

$$v_u = 0.13 \rho f_y + 1.2 \left(\frac{V_f}{0.0075} \right)^{1/4} \left(1 - \frac{c}{d} \right) \text{ (MPa)}, \quad (4.14)$$

Bağıntıda, eğilme donatısının akma mukavemeti f_y , basınç bölgesinin yüksekliği c (yaklaşık olarak $0.1h$ alınabilir).

Arslan [13] tarafından önerilen bağıntıda çelik liflerin ve eğilme donatısının kaldırıcı etkisi ve kirişin narinlik oranı dikkate alınarak (4.15) bağıntısı önerilmiştir.

$$v_u = \left(0.2 f_c^{2/3} \left(\frac{c}{d} \right) + \sqrt{\rho(1+4F)f_c} \right) \left(\frac{3}{a/d} \right)^{1/3} \text{ (MPa)}, \quad (4.15)$$

Burada c/d değeri ikinci derece $(c/d)^2 + 600(\rho/f_c)(c/d) - 600(\rho/f_c) = 0$ çözümünden bulunur.

4.2 Kesme Mukavemeti Bağıntılarının Değerlendirilmesi

Deneyisel sonuçlarda da verilen eğilme kırılması ile güç tükenmesi oluşan (A4.5F3.0), kesme-eğilme kırılması (A3.5F3.0 ve A4.5F2.0) oluşan kirişler ve referans (kontrol) kirişler dışındaki kirişlerin deneyisel kesme mukavemetleri Bölüm 4.1'deki bağıntılar karşılaştırılarak Çizelge 4.1'de verilmiştir. Karşılaştırma sonucu, Sharma [14], RILEM [24] ve Yakoub [29] (Denk. (4.12)) tarafından önerilen bağıntıların bu tez çalışmasında üretilen deneyisel kirişlerin kesme mukavemetlerini düşük tahmin ettiği görülmüştür. Narayanan ve Darwish [16], Ashour vd. [17], Imam vd. [20], Kwak vd. [23] ve Gandomi vd. [27] tarafından önerilen bağıntılara göre bulunan kesme mukavemetlerinin

deneyisel sonuçlara göre oldukça büyük olduğu görülmüştür. Yakoub [29] (Denk. (4.11)) ve Arslan [13] tarafından önerilen bağıntıların deneyisel kesme mukavemetlerini oldukça iyi tahmin ettiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında üretilen kirişlerin değerlendirilmesi sonucu, $a/d \geq 2.5$ olan kirişler için Arslan [13] bağıntısının en düşük varyasyon katsayısını verdiğinden dolayı en doğru çelik lifli betonarme kiriş kesme mukavemetini bağıntısı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1 Deneyisel/ Önerilen yaklaşımların istatistiksel sonuçları

Bağıntı	Ortalama değer	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
Sharma [14]	1.213	0.181	0.149
Narayanan ve Darwish [16]	0.608	0.192	0.316
Ashour vd. [17], Denk. (4.3)	0.512	0.199	0.389
Ashour vd. [17], Denk. (4.4)	0.795	0.229	0.288
Swamy vd. [19]	0.757	0.249	0.328
Imam vd. [21]	0.628	0.216	0.345
Khuntia vd. [22]	0.883	0.185	0.210
Kwak vd. [23], Denk. (4.8)	0.546	0.138	0.252
Kwak vd. [23], Denk. (4.9)	0.579	0.156	0.269
RILEM [24], (2003)	1.336	0.233	0.174
Yakoub [29], Denk. (4.11)	0.865	0.135	0.156
Yakoub [29], Denk. (4.12)	1.321	0.350	0.265
Gandomi vd. [27]	0.476	0.125	0.263
Dinh vd. [28]	0.711	0.181	0.255
Arslan [13]	0.831	0.106	0.128

4.3 Literatürde Önerilen Çatlama Kesme Mukavemeti Bağıntıları

Narayanan ve Darwish [16] tarafından eğik çatlama mukavemeti tahmini için önerilen ampirik bağıntı (4.16)'da sunulmuştur.

$$v_{cr} = 0.24 f_{sp} + 20 \rho \frac{d}{a} + 0.5 F \quad (\text{MPa}). \quad (4.16)$$

Kwak vd. [23] tarafından çelik lifli betonarme kirişlerin kesme mukavemeti tahmini için önerilen bağıntı çatlama kesme mukavemeti tahmini için de geliştirilmiştir (4.17).

$$v_{cr} = 3 f_{sp}^{2/3} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} \quad (\text{MPa}). \quad (4.17)$$

4.4 Eğik Çatlama Mukavemeti Bağıntılarının Değerlendirilmesi

Deneyisel sonuçlarda da verilen A4.5F3.0 kirişinde güç tükenmesi eğilme kırılması ile oluşmuştur. A3.5F3.0 ve A4.5F2.0 kirişlerinde ise kırılma kesme-eğilme kırılması ile gerçekleşmiştir. Diğer tüm kirişlerde kırılma kesme kırılması ile gerçekleşmiştir. Eğik çatlama mukavemeti bağıntılarının değerlendirilmesinde referans kirişler, A4.5F3.0, A4.5F2.0 ve A3.5F3.0 kirişleri çıkarılmıştır. Deneyisel kesme mukavemetlerinin önerilmiş kesme mukavemetlerine oranları karşılaştırılarak Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Karşılaştırma sonucu, Kwak vd. [23] tarafından önerilen eğik çatlama mukavemeti bağıntısının Narayanan ve Darwish [16] tahminine göre deneyisel sonuçları daha iyi tahmin ettiği görülmüştür.

Çizelge 4.2 Deneyisel/ Önerilen yaklaşımların istatistiksel sonuçları

Bağıntı	Ortalama değer	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
Narayanan ve Darwish [16]	0.861	0.193	0.224
Kwak vd. [23]	1.070	0.155	0.145

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tek yönlü artan yük etkilerine maruz referans kirişler ve çelik lifli betonarme etriyesiz kirişlerde a/d ve hacimsel çelik lif oranı değişiminin kesme mukavemetine etkisi incelenerek değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucu kirişlerde gözlenen çatlaklar her 5kN yük artışında işaretlenerek çatlak oluşumları gözlenmiştir. Beklenildiği gibi yüklemenin ilk aşamalarında eğilme çatlakları tüm kirişlerin orta açıklık bölgesinde yaklaşık kiriş eksenine dik yönde kılcal şeklinde gözlenmiştir. Yük artışı ile mevcut çatlak genişlikleri ve çatlak uzunlukları artmış, kiriş mesnetlerine doğru uzunluğu azalan yeni eğilme çatlakları gözlenmiştir. Göçmeye yakın yük etkisinde, eğilme çatlakları açıklık ortasındaki yüke doğru eğik çatlak oluşumu şeklinde geliştiği ve bu eğik çatlakların yüke ulaşmasıyla kesme kırılması oluşumu gözlemlendi.

Kirişlerin deneylerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Kirişlere çelik lif eklenmesi kesme kuvvetinde artışa ve çelik lifli kirişlerin referans kirişlerine göre daha sünek davranış sergilemelerini sağlamıştır.
- a/d azaldıkça (kemerlenme etkisi) kirişin göçme kesme mukavemeti artmaktadır. A2.5R olan referans kirişi kesme mukavemetinin A4.5R kirişi kesme mukavemetinden büyüktür. Hacimsel çelik lif oranı %2.0 olan A2.5F2.0 kirişinin kesme mukavemetinin A3.5F2.0 ve A4.5F2.0 kirişleri kesme mukavemetlerinden daha büyük, yerdeğiştirmelerin ise daha küçük olduğu görülmüştür.
- A2.5 serisinde (A2.5R, A2.5F1.0R, A2.5F2.0), hacimsel çelik lif oranı %1.0 ve %2.0 kullanılmasının kiriş kesme mukavemetini %9 ve %24 artırdığı , yerdeğiştirme kapasitesinin ise, sırasıyla, 3.02 ve 2.69 kat arttığı görülmüştür. Ayrıca, beton

basınç mukavemeti yaklaşık aynı olan A2.5F1.0 ve A2.5F2.0 kirişlerinde hacimsel çelik lif oranı %1.0'den %2.0'ye artırıldığında, kesme mukavemetinin %14 arttığı fakat yerdeğiştirme kapasitesinde azalma gözlenmiştir.

- Referans kirişlerin beton basınç mukavemeti daha büyük olmasına rağmen hacimsel çelik lif oranı %1.0 olan betonarme kirişlerin kesme mukavemeti referans kirişlerin kesme mukavemetinden daha büyük bulunmuştur. A2.5F1.0R, A3.5F1.0 ve A4.5F1.0 kirişleri kesme mukavemeti A2.5R, A3.5R ve A4.5R referans kirişleri kesme mukavemetinin, sırasıyla, 1.09, 1.05 ve 1.12 katı bulunmuştur. Ayrıca, A2.5F1.0R, A3.5F1.0 ve A4.5F1.0 kirişleri yerdeğiştirme kapasiteleri A2.5R, A3.5R ve A4.5R referans kirişleri yerdeğiştirmelerinin, sırasıyla, 3.02, 1.51 ve 1.18 katı bulunmuştur.
- Hacimsel çelik lif oranının %3.0 kullanıldığı A4.5F3.0 kirişi kesme mukavemeti ve yerdeğiştirme kapasitesinin A4.5R kirişine göre, sırasıyla, 28% ve 152%,arttığı görülmüş ve A4.5R kirişinde kesme kırılması A4.5F3.0 kirişinde ise eğilme kırılması oluşumu gözlenmiştir. Fakat, hacimsel çelik lif oranının %3.0 gibi yüksek miktarda kullanılması homojen karışım elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, elemana etkiyen kesme kuvvetinin karşılanmasında yüksek oranda hacimsel çelik lif kullanılması yerine çelik lifin etriyelerle birlikte kullanılması tercih edilmelidir.
- Hacimsel çelik lif oranının %2.0'ye kadar artışı ile birlikte eğik çatlama mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Fakat, A2.5F2.0 ve A2.5F3.0 kirişleri eğik çatlama mukavemetleri karşılaştırıldığında, eğik çatlama mukavemetlerinde artış gözlenmemiştir.

Çelik lifli betonarme kirişler için önerilen kesme mukavemeti bağıntılarının deneysel (referans kirişler, A4.5F3.0, A4.5F2.0 ve A3.5F3.0 çıkarılarak) sonuçlarla karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlara çıkarılabilir:

- Sharma [14], RILEM [24], ve Yakoub [29], (Denk. (4.12)) tarafından önerilen bağıntıların deneysel kirişlerin kesme mukavemetlerini düşük tahmin ettiği görülmüştür. Narayanan ve Darwish [16], Ashour vd. [17] (Denk. (4.3)), Imam vd. [20], Kwak vd. [23] ve Gandomi vd. [27] tarafından önerilen bağıntıların ise, deneysel kirişlerin kesme mukavemetlerini yüksek tahmin ettiği görülmüştür.

Yakoub [29] (Denk. (4.11)) ve Arslan [13] tarafından önerilen bağıntıların deneysel kesme mukavemetlerini oldukça iyi tahmin ettiği görülmüştür.

- Eğik çatlama mukavemeti bağıntıları değerlendirildiğinde, Kwak vd. [23] tarafından önerilen eğik çatlama mukavemeti bağıntısının Narayanan ve Darwish [16] tahminine göre deneysel sonuçları daha iyi tahmin ettiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Swamy, R.N., Mannat, P.S., (1974). "A Theory for the Flexural Strength of Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, 4(2):313-325.
- [2] Suasis, W., Shah, S.P.,(1983),"Properties of Concrete Subjected to Impact Journal of Structural Engineering", 109(7):1727-1741.
- [3] Dupont, D., Vandewalle, L. (2002), "Bending Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Beams", International Congress on Challenges of Concrete Construction, Dundee, 81-90.
- [4] Şener, S., Çağatay B., Begimgil M., Ogün F., (1999), "Çelik Lifli Çentikli Kirişlerde Boyut Etkisi", Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul.
- [5] Corley W. G. (2002), "Applicability of Seismic Design in Mitigating Progressive Collapse", Construction Technology Laboratories Report, Inc., Skokie, Illinois Nist workshop.
- [6] Topçu, İ. B., (2006). Beton Teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir
- [7] TS 10513, (1992). Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [8] Bayasi, Z. and Soroushian P., (1991), "Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, 88:129-134.
- [9] TS 500, (2000). Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [10] Birincioglu M. İ., Ulusoy S., ve Arslan G., "Evaluation of Shear Strength Approaches of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Slender Beams without Stirrups", International Conference on Civil and Environmental Engineering ICOCEE–Cappadocia 2015, Nevşehir, Türkiye, May 20-23, 2015. (kabul edildi)
- [11] Keskin R.S.O., Birincioglu M.İ., Ulusoy S. ve Arslan G., "An Experimental Study on the Shear Strength of Low- and Normal-Strength SFRC Beams without Stirrups", SEM.

- [12] Arslan, G., (2005), "Tersinir Yükler Altında Betonarme Çubukların Kesme Mukavemeti", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Arslan G. (2014), "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Slender Beams", KSCE Journal of Civil Engineering, 18(2):587-594.
- [14] Sharma, A.K. (1986), "Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams", ACI J. Proc., 83(4):624-628.
- [15] ACI Committee 544, (1986). State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-86), ACI Manual of Concrete Practice, Detroit.
- [16] Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S. (1987), "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", ACI Struct. J., 84(3):216-227.
- [17] Ashour, S.A., Hasanain, G.S. and Wafa, F.F. (1992), "Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Struct. J., 89(2):176-184.
- [18] Swamy, R.N., Jones, R. and Chiam, A.T.P. (1993), "Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams", ACI Struct. J., 90(1):103-114.
- [19] Bazant, Z.P. and Sun, H.H. (1987), "Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups", ACI Mater. J., 84(4):259-272.
- [20] Imam, M., Vandewalle, L. and Mortelmans, F. (1994), "Shear Capacity of Steel Fiber High-Strength Concrete Beams", Proceedings of the ACI International Conference on High Performance Concrete (SP-149), Singapore.
- [21] Khuntia, M., Stojadinovic, B. and Goel, S.C. (1999), "Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Struct. J., 96(2):282-289.
- [22] Zsutty, T. (1971), "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests", ACI J. Proc., 68(2):138-143.
- [23] Kwak, Y.K., Eberhard, M.O., Kim, W.S. and Kim, J. (2002), "Shear strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Struct. J., 99(4):530-538.
- [24] RILEM TC 162-TDF (2003), " σ - ϵ -Design Method", Mat. Struct., 36(8):560-567.
- [25] Bazant, Z.P. and Kim, J.K. (1984), "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams", ACI J. Proc., 81(5):456-468.
- [26] Canadian Standard Association (2004), CSA A23.3-04 Design For Concrete Structures, Toronto, ON, Canada.
- [27] Gandomi, A.H., Alavi, A.H. and Yun, G.J. (2011), "Nonlinear Modeling of Shear Strength of SFRC Beams Using Linear Genetic Programming", Struct. Eng. Mech., 38(1):1-25.

- [28] Dinh, H.H., Parra-Montesinos, G.J. and Wight, J.K. (2011), "Shear strength Model for Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement", ASCE J. Struct. Eng., 137(10):1039-1051.
- [29] Yakoub, H.E. (2011), "Shear Stress Prediction: Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Struct. J., 108(3):304-314.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Semih ULUSOY

Doğum Tarihi ve Yeri :11.06.1988-Kağızman

Yabancı Dili :İngilizce

E-posta :smhulusoy@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	İnegöl Turgutalp Anadolu Lisesi	2007