LİFLİ BETONLARIN İKİ EKSENLİ EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMININ (ORANTISAL SINIR) BULUNMASI İÇİN YENİ BİR TEST YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali İkbal TUTAR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİFLİ BETONLARIN İKİ EKSENLİ EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMININ (ORANTISAL SINIR) BULUNMASI İÇİN YENİ BİR TEST YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali İkbal TUTAR
0000-0003-2577-075X

Doç. Dr. Hakan TÜRKER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİFLİ BETONLARIN İKİ EKSENLİ EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMININ (ORANTISAL SINIR) BULUNMASI İÇİN YENİ BİR TEST YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali İkbal TUTAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan TÜRKER

Beton, yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen çok düşük çekme dayanımı ve deformasyon kapasitesi nedeniyle oldukça gevrek davranır. Çeşitli yöntemlerle bu malzemenin bazı özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilir. Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bu yöntemlerden birisi karışıma lif eklemektir. Bu çalışmada, çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için önerilen Üçgen Plaka Yöntemi ile literatürde mevcut olan üç noktalı kiriş eğilme deneyi kullanılarak çeşitli testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, önerilen yöntemin lifli betonların eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla kullanılıp kullanılamayacağı tartışılmıştır. Çalışma kapsamında lifsiz kontrol betonlarıyla birlikte, beton hacmine oranla %0,3, %0,6 ve %0,9 oranlarında iki ucu kancalı çelik lif içeren üçgen plaka ve kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Taze hal özelliği olarak karışımların çökme değerleri ölçülmüştür. Sertleşmiş betonlar üzerinde ise basınç testi, üçgen plaka testi ve üç noktalı kiriş eğilme testleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin enerji yutma kapasitesi (tokluk) belirlenmiştir. Beton karışımlarına çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımı arasında kayda değer bir ilişki gözlenmemiştir. Ancak, artan lif oranıyla birlikte numunelerin taşıyabileceği maksimum yük, çekme dayanımı, enerji yutma kapasiteleri ve sünekliği önemli derecede artırmıştır. Bu test sonuçları dikkate alınarak iki test metodu karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üçgen plaka yöntemi, eğilmede çekme dayanımı, üç noktalı eğilme deneyi, lifli beton, enerji yutma kapasitesi
2022, vii + 78 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DEVELOPMENT OF A NEW TEST METHOD FOR DETERMINING THE TENSILE STRENGTH (PROPORTIONAL LIMIT) OF FIBROUS CONCRETE UNDER BIAXIAL BENDING STRESS

Ali İkbal TUTAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan TÜRKER

Although concrete has a high compressive strength, it is very brittle due to very low tensile strength and deformation capacity. Some features of this material may need to be improved by various methods. One of these methods to improve the mechanical properties of concrete is to add fiber to the mixture. In this study, various tests were carried out using the triangular plate method and the three-point beam bending test available in the literature to determine the flexural tensile strength of steel fibre reinforced concretes. By comparing the obtained results, it has been discussed whether the proposed triangular plate method can be used to determine the flexural tensile strength of fibre reinforced concretes. Within the scope of the study, triangular plate and beam samples containing steel fiber with hooks at both ends at the ratio of 0%, 0.3%, 0.6% and 0.9% of the concrete volume were prepared. The slump-flow value of the mixtures was obtained as fresh state properties. On hardened concrete, compression test, triangular plate test and three -point bending tests were performed. In addition, the energy absorption capacity of the samples were determined. No significant relationship was observed between the addition of steel fiber to concrete mixtures and the compressive strength. However, as the fiber ratio increased, the ultimate load, tensile strength, energy absorption capacity and ductility significantly increased. Considering these test results, two test methods were compared.

Key words: Triangular plate method, flexural tensile strength, three-point beam bending test, fibre reinforced concrete, energy absorption capacity
2022, vii + 78 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans dönemi boyunca benden desteklerini esirgemeyen, bana yol gösterici olan, tez konusunun belirlenmesinden sunumuna kadar geçen süreçte bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan sayın Doç. Dr. Hakan TÜRKER'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasında yardımlarını ve kıymetli tecrübelerini benden hiç esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Serkan SAĞIROĞLU'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İhtiyacım olduğunda bilgi ve desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda bana her zaman destek olan yüksek inşaat mühendisi İbrahim Abdelmoneim Mohammed HAMED'e, yüksek inşaat mühendisi Bashir Ahmad Mayar'a, yüksek inşaat mühendisi Moslem Noori'ye, inşaat mühendisi Ahmad Farid TURAN'a, inşaat mühendisi Masoud Ozbek'e, inşaat mühendisi Rüstem Sadri'ye ve Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü çalışanı Eyüp Tarhan'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan çelik liflerin temini için başta Mehmet Yerlikaya olmak üzere Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret AŞ'ye ve sentetik liflerin temini için başta Ufuk GÜNER olmak üzere Atlas1 Yapı ve Müh. AŞ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Katkılarından ötürü saygıdeğer jüri üyelerine teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca benden maddi/manevi desteklerini esirgemeyen ve bana güvenen aileme sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ali İkbal TUTAR
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
ABSTRACT vii
TEŞEKKÜR viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Lifli Betonun Tarihi 3
2.2. Lifli Betonun Önemi 3
2.3. Lifli Betonun Mekanik Özellikleri 4
2.4. Lif Çeşitleri 6
2.4.1. Doğal lifler 8
2.4.2. Sentetik lifler 8
2.4.3. Çelik lifler 9
2.5. Betonun Liflerle Güçlendirilmesi Kavramı 11
2.5.1. Basınç dayanımı 15
2.5.2. Yarmada çekme dayanımı 16
2.5.3. Eğilme dayanımı 18
2.6. Lifli Betonların Eğilme Davranışını Belirlemek İçin Kullanılan Test Yöntemleri . 19
2.6.1. BS EN 14651:2005+A1:2007 standardı 19
2.6.2. Üçgen plaka metodu 20
3. MATERYAL ve YÖNTEM 23
3.1. Deneysel Program 23
3.2. Malzeme Özellikleri 23
3.2.1. Çimento 23
3.2.2. Agrega 24
3.2.3. Kimyasal katkı 25
3.2.4. Çelik lif 26
3.2.5. Su 27
3.2.6. Beton karışımı 27
3.3. Deney Düzenekleri 28
3.3.1. Kalıplar 28
3.3.2. Beton mikseri 30
3.3.3. Yükleme çerçeveleri 30
3.4. Deneysel Prosedür 36
3.4.1. Karışım süreci 36
3.4.2. Deney süreci 37
3.5. Taze Beton Deneyleri 39
3.5.1. Çökme deneyi 39
3.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri 40
3.6.1. Basınç testi 40
3.6.2. Eğilme testi 40
3.6.3. Üçgen plaka testi 41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 42
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları 42

4.2. Üçgen Plaka Deney Sonuçları 42
4.2.1. 50 cm üçgen plaka deney sonuçları 42
4.2.2. 80 cm üçgen plaka deney sonuçları 49
4.3. Kiriş Deney Sonuçları 55
4.4. Belirli Deplasman Seviyeleri İçin Enerji Yutma Kapasiteleri..... 64
4.5. İki Yöntemin Karşılaştırılması..... 66
5. SONUÇ 71
KAYNAKLAR..... 74
ÖZGEÇMİŞ..... 81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
σ	Standart sapma veya metrik sistemde gerilmeyi (N/mm^2) ifade eder
S/Ç	Su/Çimento Oranı

Kısaltmalar	**Açıklama**
AÇY	Akma Çizgileri Yöntemi
ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	American Society for Testing Materials
BS	British Standard
COV	Coefficient of Variation
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement (Çatlak Ağzı Açıklığı Deplasmanı)
EFNARC	European Federation of National Associations Representing for Concrete
EN	European Norms
LOP	Limit of Proportionality (Orantılılık Sınırı)
MPa	Metrik Sistemde Basınç Birimi (N/mm^2)
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
ÜPY	Üçgen Plaka Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Betonda kullanılan bazı çelik lif türleri	10
Şekil 2.2.	Eğilme testleri sonucunda elde edilebilecek olası grafikler.....	12
Şekil 2.3.	Narinlik oranı ile absorbe edilen enerji miktarı arasındaki ilişki	13
Şekil 2.4.	Lif geometrisi ile aderans kuvveti arasındaki ilişki.....	14
Şekil 2.5.	Farklı lif oranlarına sahip beton için tipik yük-deplasman grafiği....	15
Şekil 2.6.	Kullanılan çelik lif oranı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	17
Şekil 2.7.	Çelik ve sentetik lifli betonların eğilme dayanımları	18
Şekil 2.8.	EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği detayı..	20
Şekil 2.9.	Üçgen plaka için kabul edilen göçme mekanizması ve SEM ile elde edilen asal gerilme durumu…….	21
Şekil 2.10.	Üçgen plakalar için mesnet ve yükleme detayları…….	22
Şekil 3.1.	Eleme öncesi agrega örnekleri……	25
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan tutkallanmış lifler…….	26
Şekil 3.3.	Liflerdeki kanca detayı……	26
Şekil 3.4.	500×500×50mm üçgen plaka ve 150×150×650mm kiriş kalıpları….	29
Şekil 3.5.	800×800×80mm üçgen plaka kalıpları……	29
Şekil 3.6.	Beton mikseri……..	30
Şekil 3.7.	Üçgen plaka deneylerinde kullanılan yükleme çerçevesi……...	31
Şekil 3.8.	Üçgen plaka deneylerinde kullanılan yükleme çerçevesi ve hidrolik piston……	31
Şekil 3.9.	Üçgen plaka numuneleri için mesnet taban plakası……..	32
Şekil 3.10.	Lineer potansiyometre……..	33
Şekil 3.11.	Veri toplama cihazı……..	33
Şekil 3.12.	Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için deney aleti……	34
Şekil 3.13.	EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği detayı..	34
Şekil 3.14.	Çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) ölçer……..	35
Şekil 3.15.	Deney düzeneğinde kullanılan hassas ölçüm aletleri…….	36
Şekil 3.16.	24 saat plywood kalıplarda bekletilen kiriş ve 50cm üçgen numuneler.	37
Şekil 3.17.	24 saat plywood kalıplarda bekletilen 80 cm üçgen numuneler……	37
Şekil 3.18.	Üçgen plaka metodu deney düzeneği……	38
Şekil 3.19.	EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği……	38
Şekil 3.20.	Lifli bir karışıma ait çökme deneyi görseli……	39
Şekil 4.1.	50 cm lifsiz üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,0)……	43
Şekil 4.2.	50 cm %0,3 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,3)……	44
Şekil 4.3.	50 cm %0,6 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,6)……	45
Şekil 4.4.	50 cm %0,9 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,9)……	46
Şekil 4.5.	50 cm tüm üçgen plakaların yük-deplasman grafiği……	47
Şekil 4.6.	50 cm tüm üçgen plakaların enerji yutma kapasiteleri……	47
Şekil 4.7.	80 cm lifsiz üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,0)…….	49

Şekil 4.8.	80 cm %0,3 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,3)……	50
Şekil 4.9.	80 cm %0,6 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,6)……	51
Şekil 4.10.	80 cm %0,9 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,9)……	52
Şekil 4.11.	80 cm tüm üçgen plakaların yük-deplasman grafiği……...	53
Şekil 4.12.	80 cm tüm üçgen plakaların enerji yutma kapasiteleri……...	54
Şekil 4.13.	Lifsiz kirişlere ait yükleme grafikleri ve örnek hasar mekanizması(%0)……	56
Şekil 4.14.	%0,3 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri ve hasar mekanizmaları(%0,3)……..	57
Şekil 4.15.	%0,6 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri (%0,6)……	58
Şekil 4.16.	%0,9 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri (%0,9)……	59
Şekil 4.17.	Tüm kiriş numunelerine ait yük-CMOD ve yük-deplasman grafikleri	60
Şekil 4.18.	Tüm kirişlere ait enerji yutma kapasiteleri…….	61
Şekil 4.19.	50cm üçgen plakalarda belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri…….	64
Şekil 4.20.	80cm üçgen plakalarda belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri…….	65
Şekil 4.21.	Kirişlerde belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri……	65
Şekil 4.22.	Tüm numuneler için enerji yutma kapasiteleri……..	66
Şekil 4.23.	50cm üçgen plaka ve kirişler arasındaki tokluk ilişkisi……..	69
Şekil 4.24.	80cm üçgen plaka ve kirişler arasındaki tokluk ilişkisi…….	70
Şekil 4.25.	Çelik liflerin yükleme öncesi (Solda, 3 adet) ve sonrası (Sağda, 4 adet) durumu……..	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Betonda kullanılan bazı liflere ait teknik özellikler.....	7
Çizelge 2.2.	Bazı sentetik lif türlerine ait karakteristik özellikler	9
Çizelge 2.3.	Çelik lifli betonların lifsiz betona kıyasla performansları	10
Çizelge 3.1.	Çimentonun kimyasal bileşimi.....	24
Çizelge 3.2.	Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	24
Çizelge 3.3.	Kimyasal katkının teknik özellikleri.....	25
Çizelge 3.4.	Liflerin teknik özellikleri	27
Çizelge 3.5.	$1m^3$ beton üretimi için kullanılan malzeme miktarları	28
Çizelge 4.1.	Çökme değerleri	42
Çizelge 4.2.	50 cm lifsiz üçgen plakaların kalınlık değerleri	43
Çizelge 4.3.	50 cm %0,3 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri	44
Çizelge 4.4.	50 cm %0,6 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri	45
Çizelge 4.5.	50 cm %0,9 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri……	46
Çizelge 4.6.	50 cm üçgen plakalara ait ortalama pik yük, tokluk ve çekme dayanımları……	48
Çizelge 4.7.	80 cm lifsiz üçgen plakaların kalınlık değerleri……	50
Çizelge 4.8.	80 cm %0,3 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri……	51
Çizelge 4.9.	80 cm %0,6 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri…….	52
Çizelge 4.10.	80 cm %0,9 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri……..	53
Çizelge 4.11.	80 cm üçgen plakalara ait ortalama pik yük, tokluk ve çekme dayanımları……	54
Çizelge 4.12.	Lifsiz kirişlerin basınç dayanımı değerleri……...	56
Çizelge 4.13.	%0,3 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri…….	58
Çizelge 4.14.	%0,6 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri…….	59
Çizelge 4.15.	%0,9 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri…….	60
Çizelge 4.16.	Tüm kirişlere ait ortalama pik yükler, tokluk ve varyasyon katsayıları…….	61
Çizelge 4.17.	Çelik lifli betonun eğilmede çekme dayanımı ve sınıflandırma sonuçları……..	63
Çizelge 4.18.	Her iki yöntemde tokluk için hesaplanan varyasyon katsayıları.	67
Çizelge 4.19.	50 cm üçgen plakalar için deney sonuçları……	67
Çizelge 4.20.	80 cm üçgen plakalar için deney sonuçları……	68
Çizelge 4.21.	Kirişler için deney sonuçları……..	68

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar kerpiç, tuğla, taş, ahşap, çelik, beton gibi çeşitli malzemeleri kullanarak barınaklar inşa etmişlerdir. Bu malzemelerin en yaygın kullanılanlarından biri olan betonun; kolay ulaşılabilir olması, düşük maliyeti, yangına karşı dayanıklı olması, nispeten su geçirmez özelliği ve plastik kıvamda iken kalıplanarak istenilen şeklin verilebilmesi gibi özellikleri onu avantajlı kılmaktadır. Ancak zamanla sertleşen ve dayanım kazanan bu malzeme, yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen çok düşük çekme dayanımı ve düşük deformasyon kapasitesi nedeniyle oldukça gevrek davranır. Değişen ihtiyaçlar ile birlikte birçok alanda kullanılan bu malzemenin bazı özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilir. Bu amaçla araştırmacılar betona çeşitli malzemeler ve kimyasal katkılar ekleyerek betonun bu gibi zayıf yönlerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bu yöntemlerden biri de karışıma lif eklemektir. Bu amaçla yapılan çalışmalar incelendiğinde betona lif eklenmesinin betonun şekil değiştirme kapasitesi, tokluk (enerji yutma kapasitesi), aşınma, darbe dayanımı, çekme dayanımı, kalıcı dayanım(residual strength) gibi mekanik özellikleri üzerinde önemli derecede pozitif etkilerinin olabileceği görülmektedir (Mardani-Aghabaglou vd., 2013).

Genel olarak lifler yapıya hem mikro hem de makro anlamda katkı sağlayabilir. Mikro anlamda lifler, matriste mikro çatlakların oluşmasını engelleyerek betonun yapısına katkıda bulunur. Makro anlamda ise oluşan mikro çatlakların genişlemesini engelleyerek yapının daha fazla enerji tüketebilmesini sağlarlar (Hilles ve Ziara, 2019). Bunu matriste oluşan gerilmenin bir kısmını kendi üzerlerine alarak, bir kısmını da tıpkı bir köprü gibi matrisin henüz çatlamamış kısımlarına aktararak başarırlar (Şimşek, 2016).

Günümüzde çok yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretilebilmekte ancak buna rağmen çekme dayanımları oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu nedenle halihazırda nispeten düşük olan ve tasarımlarda kritik bir rol oynayan çekme dayanımının doğru bir şekilde belirlenebilmesi çok önemlidir. Lifsiz ve lifli betonların çekme dayanımını belirlemek için farklı test yöntemleri mevcuttur. Bu metotların birçoğu ile tek eksenli gerilme durumu için çekme dayanımı bulunmaktadır. Türker (2015) tarafından çimento esaslı malzemelerin iki eksenli eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için

yeni bir test yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, iki eksenli gerilme durumunda çekme dayanımını veren mevcut yöntemlere göre daha basit bir deney düzeneği sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının asıl amacı çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımlarının, Üçgen Plaka Yöntemi (ÜPY) ile ve literatürde mevcut olan EN 14651:2005+A1:2007 standardı kullanılarak belirlenmesi ve bu iki test yönteminin karşılaştırılmasıdır. Bu kapsamda çimento hacmine göre %0, %0,3 , %0,6 , ve %0,9 oranlarında çelik lif içeren numuneler hazırlanmış ve bu numuneler her iki test metodu prosedürlerine göre test edilmiştir. Daha sonra her iki yöntemin belirlediği şekilde çekme dayanımları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması genel olarak beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de tezin amacı ve konusuyla ilgili genel bir bakış açısı sunulmaktadır.

Bölüm 2, lifli betonun tarihi, betonda kullanılan lif çeşitleri, lifli betonun mekanik özellikleri, lifli betonların çekme dayanımını etkileyen faktörleri ve çekme dayanımını belirlemek için kullanılan test yöntemleri hakkında literatür taraması içermektedir.

Bölüm 3'te, karşılaştırılan test yöntemlerinin genel özellikleri, hazırlanan deney düzenekleri, deneyde kullanılan malzeme ve beton karışımları hakkında detaylı bilgi içermektedir.

Bölüm 4'te deney sonuçları ve tartışmalar ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Bölüm 5'te ise çalışmada elde edilen sonuçlar aktarılarak tez sonuçlandırılmış ve bu tez konusuyla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalar için çeşitli öneriler sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lifli Betonun Tarihi

Eski çağlardan beri, çekme dayanımı düşük olan malzemeleri güçlendirmek için lifler kullanılmıştır. Yaklaşık 3500 yıl önce, Aqar Quf'un (bugünkü Bağdat yakınları) 57 m yüksekliğindeki tapınak kulesini inşa etmek için saman takviyeli güneşte kurutulmuş tuğlalar kullanılmıştır (Swamy, 1980, aktaran Bentur ve Mindess, 2007). Daha yakın tarihlerde ise, asbest lifleri yaklaşık 100 yıldır çimento bazlı ürünleri güçlendirmek için kullanılırken, selülozik lifler en az 50 yıldır ve daha sonraları çelik, polipropilen ve cam lifler son 30 yıldır aynı amaçla kullanılmaktadır (Hannant, 2003).

Asbest liflerinin çimento içerisinde yaygın olarak kullanımı, 1898'de Hatschek işleminin icadıyla başlamıştır. Bu ürün 20. yüzyıl boyunca inşaat sektöründe sıklıkla kullanılmıştır ancak asbestin sağlık üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle 1960-1970 yılları itibarıyla alternatif lif türleri önerilmiştir. Böylece 1960'lı yıllardan itibaren çelik, cam ve sentetik lifler betonda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (ACI Committee 544, 2002).

Günümüz anlamıyla lifli beton, ayrık ve süreksiz lifler içeren, hidrolik çimento ve çeşitli boyutlarda agregaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan betondur (Bentur ve Mindess, 2007).

2.2. Lifli Betonun Önemi

Günümüzde çeşitli ihtiyaçlara göre tasarlanmış ve farklı özelliklere sahip birçok beton türü kullanılmaktadır. Değişen ihtiyaçlar ile birlikte birçok alanda kullanılan bu malzemenin bazı özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilir. Bu amaçla araştırmacılar betona çeşitli malzemeler ve kimyasal katkılar ekleyerek betonun bazı zayıf yönlerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bu yöntemlerden biri de karışıma lif eklemektir. Beton karışımlarına eklenen liflerin yapıda meydana getireceği etkiler lifin şekline, çekme dayanımına, türüne, narinlik oranına ve karışımda hangi oranda kullanıldığına ve lifli betonun hazırlanma metoduna göre değişmektedir (Zeynal, 2008).

Çelik liflerin betonda oluşturabileceği bazı pozitif etkiler aşağıda sıralanmıştır:

- Betonun taşıma kapasitesinde ve sünekliğinde artış (Yardımcı, 2007).
- Etkin bir şekilde betonun çatlamaya karşı direncinde, darbelere karşı dayanımında enerji yutma kapasitesinde artış (Baradan vd., 2015).
- Donatı işçiliği ve maliyetlerde azalma
- Liflerin betona kazandırdığı özellikler sayesinde eleman boyutlarının küçültülebilmesi ve bu sayede malzemeden tasarruf edilebilmesi (Baradan vd., 2015).
- Zamana bağlı yorulmaya, kesme kuvveti etkilerine ve burulmaya karşı dayanımda artış (Şimşek, 2016).

2.3. Lifli Betonun Mekanik Özellikleri

Günümüzde yapı sektöründe en yaygın malzemelerden biri olarak kullanılan betonun; kolay ulaşılabilir olması, düşük maliyeti, yangına karşı dayanıklı olması, nispeten su geçirmez özelliği ve plastik kıvamda iken kalıplanarak istenilen şeklin verilebilmesi gibi özellikleri onu avantajlı kılmaktadır. Ancak zamanla sertleşen ve dayanım kazanan bu malzeme, yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen çok düşük çekme dayanımı ve deformasyon kapasitesi nedeniyle oldukça gevrek davranır. Düşük çekme dayanımına sahip olması onu çatlamaya karşı hassas bir hale getirir ve malzeme istenilen servis ömrüne ve yük taşıma kapasitesine ulaşamayabilir. İlk çatlak oluştuğunda beton mekanik dayanımını kaybeder ve ani bir şekilde kırılır (Aylie vd., 2015; Tiberti vd., 2015). Bu amaçla araştırmacılar, ilk çatlak yüküne ulaşıldıktan sonra tamamen göçmeyi önlemek için betona çeşitli malzemeler ve kimyasal katkılar ekleyerek betonun şekil değiştirme ve enerji yutma kapasitesi gibi mekanik özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır (Arslan, 2016; Wang vd., 2019). Bu malzemelere örnek olarak lifler verilebilir. Lifler genel olarak betonun pik yüke ulaştıktan sonraki davranışını iyileştirerek ilk çatlak sonrasında daha fazla enerji yutmasını ve daha büyük şekil değiştirmeler yapabilmesini sağlar.

Matrise lif eklenmesi betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilese de bunun olumlu ya da olumsuz etkileri olduğu konusunda hala tartışmalar vardır. Literatürde, bazı araştırmacılar lif takviyeli betonun mekanik özelliklerinde önemli bir artış tespit ederken;

bazı araştırmacılar ise, lif eklenmesiyle birlikte mekanik özelliklerde bir düşüş olduğunu bildirmiştir (Atis ve Karahan, 2009; Cakir, 2021; Dias ve Thaumaturgo, 2005; Fallah ve Nematzadeh, 2017; Hoang ve Fehling, 2017; Jiang vd., 2014; Kizilkanat vd., 2015; Mehta ve Monteiro, 2006; Meng ve Khayat, 2018; Singh vd., 2022; Sivakumar ve Santhanam, 2007; Song ve Hwang, 2004; Thillo vd., 2021; Thomas ve Ramaswamy, 2007; Wang vd., 2020; Yao vd., 2003). (Junwei vd., 2021) yaptıkları çalışmada tek kancalı bazalt liflerin, polivinil alkol (PVA) liflerin, çift kancalı çelik liflerin ve PVA liflerinin hepsinin betonun basınç dayanımını farklı oranlarda azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, tüm lif tiplerinde betonun eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. (Yan vd., 2021) yaptıkları çalışmada, eklenen bazalt, polipropilen ve cam liflerin hem tipinin hem de miktarının taze ve sertleştirilmiş ultra yüksek performanslı betonların (UHPC) özelliklerini etkilediğini bildirmiştir. %2,5 bazalt, polipropilen ve cam lif ilavesiyle basınç dayanımı sırasıyla %10,5, %8,8 ve %8,3 azalırken eğilme dayanımı %20,8, %26,9 ve %27,9 artmıştır. (Smarzewski, 2020), hacimce %3 oranında polipropilen kıvrımlı lif, cam lif ve bazalt lif içeren yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin (HPCC) basınç dayanımının sırasıyla %9, %19 ve %33 oranında azaldığını belirtmiştir. Bu çalışmaların hepsinde mekanik özelliklerdeki artış ve azalışın liflerin cinsi, uzunluğu ve lif oranı ile ilgili olduğu vurgulanmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, dayanımdaki azalmanın nedeni genellikle karışıma aşırı miktarda lif eklenmesine, lif topaklanmasına ve buna bağlı olarak matriste oluşan hava boşluklarına bağlanmıştır.

Genel olarak bakıldığında betonun çekme ve eğilme dayanımları, çatlakların hızlı bir şekilde yayılmasını etkili bir şekilde önleyebilen çelik lifler sayesinde önemli ölçüde arttırılabilir (Mehta ve Monteiro, 2006). (ASTM C1609/C1609M-19a, 2019), (BS EN 14651:2005+A1:2007, 2007) ve (Rilem TC 162-TDF, 2002) standartlarında çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımını değerlendirmek için 3 noktalı veya 4 noktalı eğilme testleri önerilmiştir. Literatürdeki çalışmalar, çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımının genel olarak betonun dayanımına, lif oranına ve lif tipine bağlı olduğunu göstermiştir (Hu vd., 2018; Kelpša vd., 2015). Lif oranının uygun bir aralıkta yükseltilmesiyle çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımı arttırılabilir (Abbass vd., 2018; Choi vd., 2019). Beton dayanımının arttırılması ise, çelik lifli betonda oluşacak ilk çatlağın kontrol edilmesi açısından etkilidir (Lee, 2017). Ayrıca (Meda vd., 2012)

yaptıkları deneysel çalışmada, eğer karışımda yeterli miktarda lif kullanılırsa donatılı betonarme kirişlerin hasar mekanizmasının beton ezilmesinden çelik kopmasına kadar değişebileceğini gözlemlemiştir. Daha yüksek oranda lif kullanıldığında, betonun çatlama sonrası aşamadaki pekleşme davranışı daha belirgindir, buna kıyasla, lif içermeyen veya düşük oranda lif içeren beton genellikle istenmeyen bir yumuşama davranışı sergiler (Iqbal vd., 2015; Woo vd., 2014). Genel olarak literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, kanca uçlu çelik liflerin betonun eğilmede çekme dayanımını (Li vd., 2018; Soroushian ve Bayasi, 1991), çekme dayanımını (Wang vd., 2019) ve enerji yutma kapasitesini/tokluğunu (Soulioti vd., 2011) iyileştirmede etkili olduğu gözlenmiştir.

Lifli betonların yük-deplasman grafikleri incelendiğinde ilk çatlak öncesindeki davranış biçimi lifsiz betonlardan pek farklı değildir. Asıl fark çatlak sonrası davranışta görülmektedir (Sarzalejo vd., 2013). Lifli betonların geleneksel betona olan üstünlüğü, yapıda artan süneklikle birlikte kırılma boyunca yutulan enerjiyle sağlanmaktadır (Hilles ve Ziara, 2019). Lifsiz betonda ilk çatlak dayanımına ulaşıldıktan sonra malzeme gevrek bir şekilde kırılmakta ve yük taşıma kapasitesinde büyük bir düşüş gözlenmektedir. Buraya kadar olan davranış çatlama öncesi davranış olarak adlandırılabilir. Bu noktadan sonra ise liflerin davranışa etkisi görülmeye başlar. Lifler, yapıda oluşan mikro çatlakların genişlemesini engelleyerek yapının daha fazla enerji tüketebilmesini sağlarlar (Hilles ve Ziara, 2019). Bunu matriste oluşan gerilmenin bir kısmını kendi üzerlerine alarak, bir kısmını da tıpkı bir köprü gibi matrisin henüz çatlamamış kısımlarına aktararak başarırlar (Şimşek, 2016). Bu süreç ise çatlama sonrası davranış olarak adlandırılabilir. Bu mekanizma ile enerji yutma süreci de genellikle tokluk olarak adlandırılır.

2.4. Lif Çeşitleri

Genel olarak lifler, matriste homojen bir şekilde dağılan ve betonun yapısal bütünlüğünü arttıran malzemelerdir. Günümüzde birçok farklı tür ve boyutta lifler kullanılmaktadır. Bu liflerden bazılarına ait teknik özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Betonda kullanılan bazı liflere ait teknik özellikler (Bentur ve Mindess 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Lif Tipi	Çap (μm)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Çelik	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Cam	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Asbest (Krosidolit)	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0-3,0
Asbest (Krizolit)	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
Polipropilen	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramid	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2,0-4,5
Karbon	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Naylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16-20
Selüloz	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Akrilik	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietilen	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Ahşap Lifi	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3
Çimento Matrisi (Karşılaştırma amaçlı)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Tablodan da görüleceği üzere çelik lif, cam lifi ve asbest lifler, polimer liflere oranla daha yüksek çekme dayanımına sahiptir.

Betonda kullanılan lifler genellikle mikro lifler ve makro lifler olarak sınıflandırılır. Yapısal lif terimi genellikle uzunlukları 19-60 mm arasında olan makro lifler için kullanılır. Bu lifler, betonda oluşan çatlaklar arasında köprü görevi görerek çatlağın genişlemesini önler ve bu sayede yapının daha fazla enerji yutabilmesini sağlar. Bu nedenle makro liflerden özellikle betonun sertleşmiş hal özelliklerini iyileştirmesi beklenir. Mikro lifler ise betonun taze hal ve erken yaşta çekme ve eğilme dayanımlarını iyileştirmek ve böylece plastik büzülmeye karşı direnç oluşturmak için karışıma dahil edilir. Ayrıca, plastik büzülmenin yanı sıra kuruma büzülmesinin oluşturduğu çekme

kuvvetlerine karşı gerekli direnci de sağlar (Bothma, 2013). Bu lifler genel olarak 2-10 mm uzunluğunda ve 0,1-1 mm nominal çapındadır (Concrete Society Technical Report No. 63, 2007).

2.4.1. Doğal lifler

Eski çağlardan beri, çekme dayanımı düşük olan malzemeleri güçlendirmek için at kılı ve saman gibi lifler kullanılmıştır. Yaklaşık 3500 yıl önce, Aqar Quf'un (bugünkü Bağdat yakınları) 57 m yüksekliğindeki tapınak kulesini inşa etmek için saman takviyeli güneşte kurutulmuş tuğlalar kullanılmıştır (Swamy, 1980, aktaran Bentur ve Mindess, 2007). Bu tür malzemelerin konut yapımında kullanılmak üzere seçilmesinin en büyük nedenlerinden birisi hemen her yerde kolayca ve bol miktarda bulunabilmesidir. Ayrıca bu tür lifler, diğer lif türlerine göre daha az enerji ve daha sınırlı teknoloji kullanılarak elde edilebilir (ACI Committee 544, 2002). At kılı ve samana ek olarak sisal, bambu, şeker kamışı, ahşap lifleri, hindistan cevizi lifleri ve diğer bitkisel lifler doğal liflere örnek olarak verilebilir.

2.4.2. Sentetik lifler

Sentetik lifler genel olarak yapay bir şekilde elde edilen ve diğer lif türlerine oranla daha hafif olan polimer malzemelerdir. Günümüzde kullanılan sentetik lif türlerinden bazılarına polipropilen, polietilen, aramid, naylon, akrilik ve karbon örnek olarak verilebilir. (ACI Committee 544, 2002). Çimento içerisinde en yaygın olarak kullanılan sentetik lif türlerinden birisi polipropilen liflerdir. Polipropilen lifler korozyona, tuza ve alkalilere karşı dirençli malzemelerdir ve portland çimentosunun tüm çeşitleriyle uyumlu olarak kütle betonlarında, beton panel üretiminde ve temel betonlarında kullanılabilirler (Celep, 2010). Elastisite modülüne ve mukavemet özelliklerine göre, sentetik liflerin temel özellikleri geniş bir aralıkta değişebilir (Bentur ve Mindess, 2007). Yaygın olarak kullanılan bazı sentetik lif türleri ve bu liflere ait karakteristik özellikler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

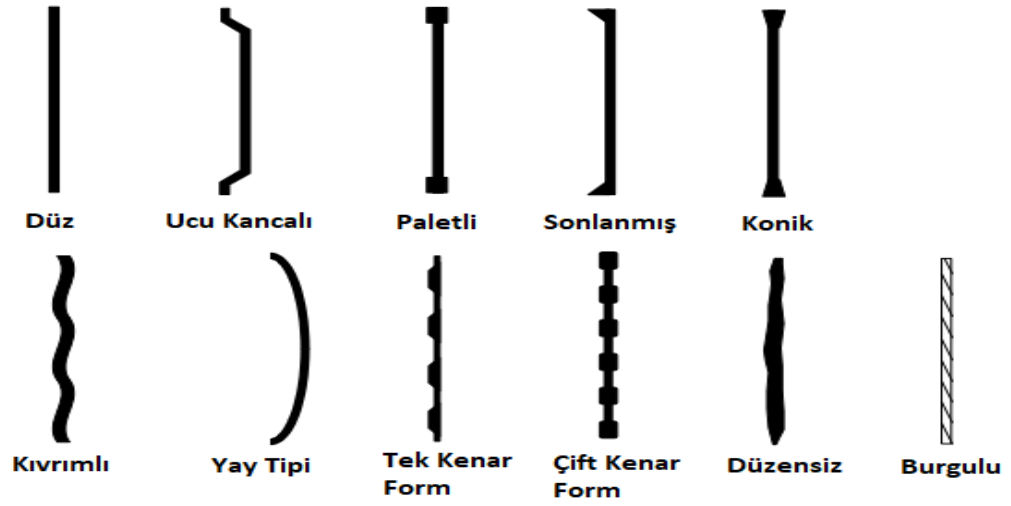
Çizelge 2.2. Bazı sentetik lif türlerine ait karakteristik özellikler (Bentur ve Mindess, 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Lif Tipi	Çap (μm)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Polipropilen	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramid	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2,0-4,5
Karbon	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Naylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16-20
Akrilik	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietilen	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Çimento Matrisi (Karşılaştırma amaçlı)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

2.4.3. Çelik lifler

Bu çalışmanın asıl amacı çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımlarının, Üçgen Plaka Metodu ve EN 14651:2005+A1:2007 standardı kullanılarak belirlenmesi ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. Çelik lifler genellikle püskürtme beton olarak tünel kaplamalarında, döşeme betonlarında, kaldırımlarda, liman ve uçak pisti gibi ağır yüklere maruz kalan zeminlerde kullanılmaktadır. Birçok uygulamada geleneksel donatıyla birlikte veya donatı yerine kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere uygun dozajda ve uygun tekniklerle uygulandığında betonun mekanik özelliklerinde önemli miktarda iyileşme sağlanabilmektedir. Lifler genel olarak betonun pik yüke ulaştıktan sonraki davranışını iyileştirerek ilk çatlak sonrasında daha fazla enerji yutmasını ve daha büyük şekil değiştirmeler yapabilmesini sağlar.

Betonda kullanılan bazı çelik lif türleri Şekil 2.1'de verilmiştir. Ayrıca çelik lifli betonların lifsiz betona kıyasla performansları Çizelge 2.3'te verilmiştir



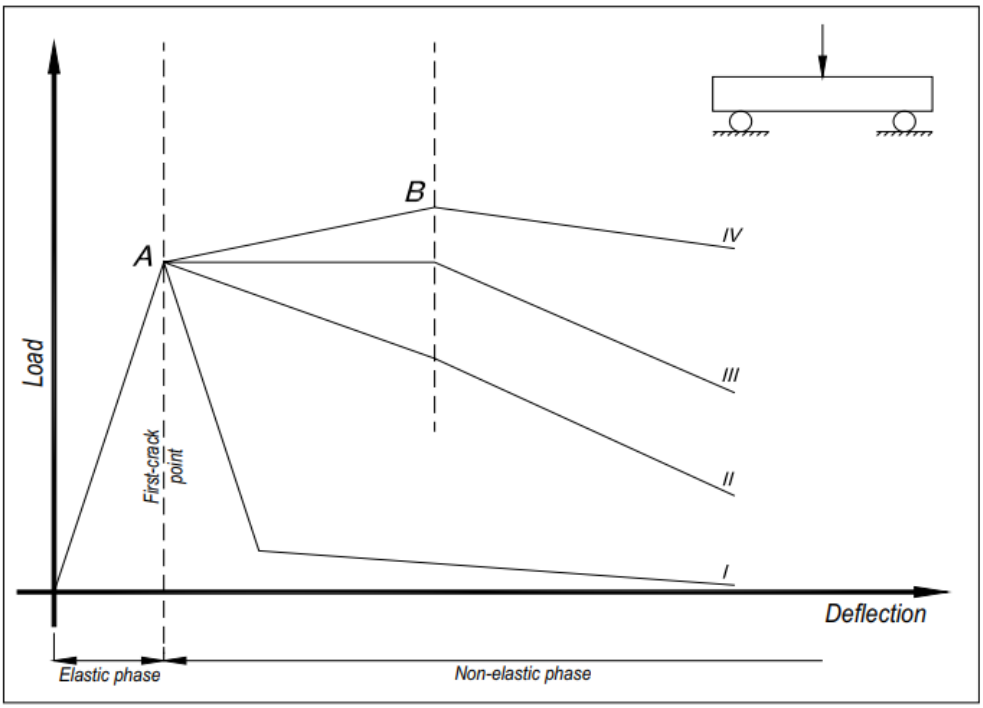
Şekil 2.1. Betonda kullanılan bazı çelik lif türleri
(Löfgren, 2005'ten değiştirilerek alınmıştır)

Çizelge 2.3. Çelik lifli betonların lifsiz betona kıyasla performansları
(Concrete Society Technical Report No. 63 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Özellik	**Çıkarımlar**
Aşınma Direnci	Kusmanın azalması sonucu iyileşme sağlanabilir.
Basınç Dayanımı	Küçük değişiklikler görülebilir
Elektrik Direnci	Genel olarak kullanılan lif dozajlarında, önemli bir değişiklik görülmemektedir
Yorulma Direnci	Düşük dozlarda bile iyileşme sağlanabilir
Eğilme Dayanımı	Yaygın olarak kullanılan lif dozajlarında, ilk çatlak mukavemetinde küçük değişiklikler görülebilir
Donma-Çözünme Direnci	Donma-çözülme döngüsünün neden olduğu bozulmayı azaltabilir
Darbe Direnci	Önemli iyileşme sağlanabilir
Elastisite Modülü	Genel olarak kullanılan lif dozajlarında, önemli bir değişiklik görülmemektedir
Kısıtlanmış Büzülme	Düşük lif dozajlarında bile gerilmelerin daha iyi dağılımı ile çatlak genişliklerini azaltabilir
Kayma Dayanımı	Donatı ile birlikte kullanılması halinde düşük dozajlarda bile iyileşme sağlanabilir
Şişme Direnci	Matris boyunca dağılmış olan çelik lifler, birleşim yeri gibi açıkta kalan alanlara üstün koruma sağlar
Termal Şok Direnci	Darbe direncinde olduğu gibi, düşük lif dozajlarında bile iyileşme sağlanabilir
Tokluk	Düşük lif dozajlarında bile önemli iyileşme sağlanabilir

2.5. Betonun Liflerle Güçlendirilmesi Kavramı

Yeterli çekme dayanımına sahip olan ve beton içinde homojen olarak dağılmış lifler, bir yandan beton içerisinde bir köprü vazifesi görerek dengeli yük aktarımını sağlar ve büzülmenin neden olduğu çatlakları engeller, diğer yandan liflerin dayanımındaki artışla beraber betonun sünekliğinin de artmasını sağlar. Bu da betonun enerji yutma kapasitesinin (tokluk) artmasını sağlar. Literatürde uygulanmakta olan hesap ve kontrol yöntemlerinin büyük çoğunluğunda, betonun gevrek davranışı göz önüne alınarak, genellikle betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir. Betonda lif kullanılması, gerilme özelliklerini ve gevrek davranışı stabilize etmeyi mümkün kılar. Bu şekilde, tasarım aşamasında kullanılan diğer mekanik özelliklerin yanında çekme mukavemetinden de yararlanılabilir. Uygulamadaki zorluklar göz önüne alındığında, çekme testleri genellikle beton üzerinde doğrudan yapılmamaktadır. Çekme dayanımının yanı sıra süneklik ve tokluğun değerlendirilmesi kirişler veya plakalar üzerinde eğilme testleri yoluyla dolaylı olarak gerçekleştirilmektedir (Sarzalejo vd., 2013). Şekil 2.2. lifli betonlar üzerinde gerçekleştirilen eğilme testlerinden elde edilebilecek olası sonuçları, yük-çatlak ağzı genişliği veya yük-deplasman davranışını gösteren grafikler aracılığıyla niteliksel olarak göstermektedir.



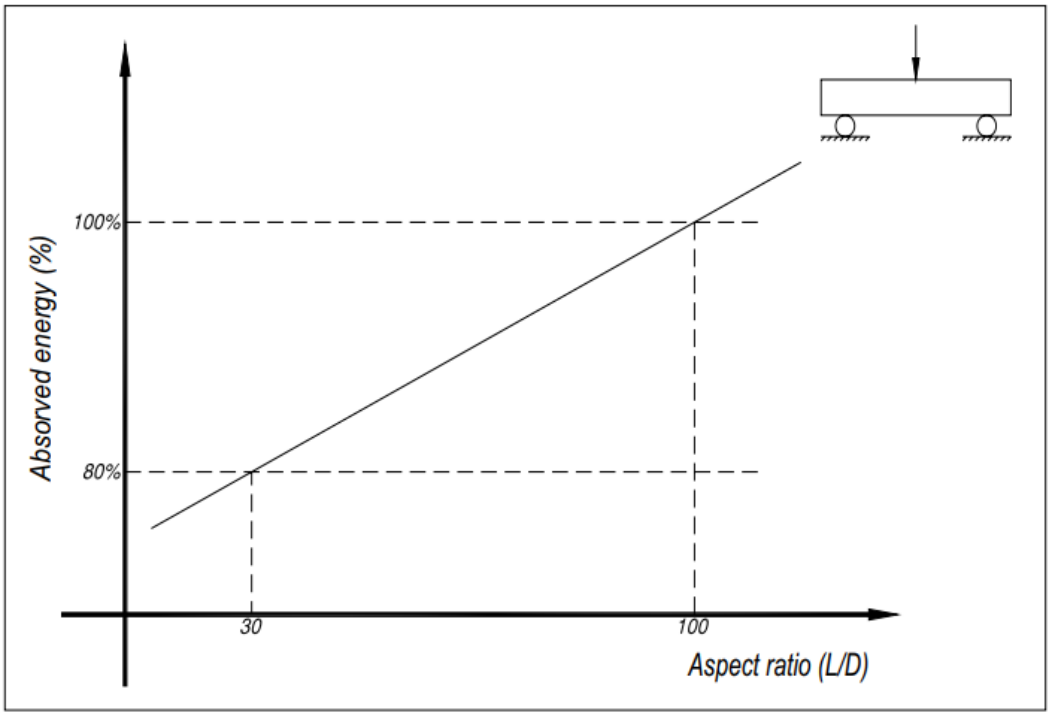
Şekil 2.2. Eğilme testleri sonucunda elde edilebilecek olası grafikler (Sarzalejo vd., 2013)

Beton için ilk çatlak yüküne ulaşmadan önce, malzemenin davranışı elastiktir ve eğilme testi sırasında numunede liflerin varlığından, türünden ve sayısından bağımsız olarak matriste bir kırılma meydana gelmemektedir. Buna karşılık, yükleme devam ettiğinde oldukça farklı davranışlar ortaya çıkabilmektedir, bu nedenle uygulanan yük "ilk çatlak noktası" olarak adlandırılan A noktasından itibaren artar:

- Eğri I, lifsiz ve donatısız geleneksel betonun davranışını gösterir. Yapı izostatik olduğundan (kiriş her iki uçtan basit mesnetli), tipik olarak gevrek malzemelerde görüldüğü şekilde, ilk çatlak yüklemesine ulaşıldıktan hemen sonra göçer.
- Eğri II, (lifli) betonun ilk çatlak noktasından itibaren, kademeli olarak yükte daha yavaş bir azalma (göçme durumu) yoluyla belirli bir enerjiyi (A-B) absorbe etme kabiliyetini gösterir (bozulma davranışı).
- Eğri III, I ve II'nin aksine, tipik bir sünek malzeme davranışını simgeler ve ilk çatlak noktasını geçen betonun, göçme meydana gelmeden önce sabit yük altında daha da yavaş bir şekilde önemli miktarda şekil değiştirebildiğini (A-B) gösterir (plastik davranış).

- Eğri IV, nihayet ilk çatlak noktasından sonra büyük bir deplasmanla birlikte (A-B) yükte bir miktar artış bile görülebilen davranışı gösterir (pekleşme davranışı).

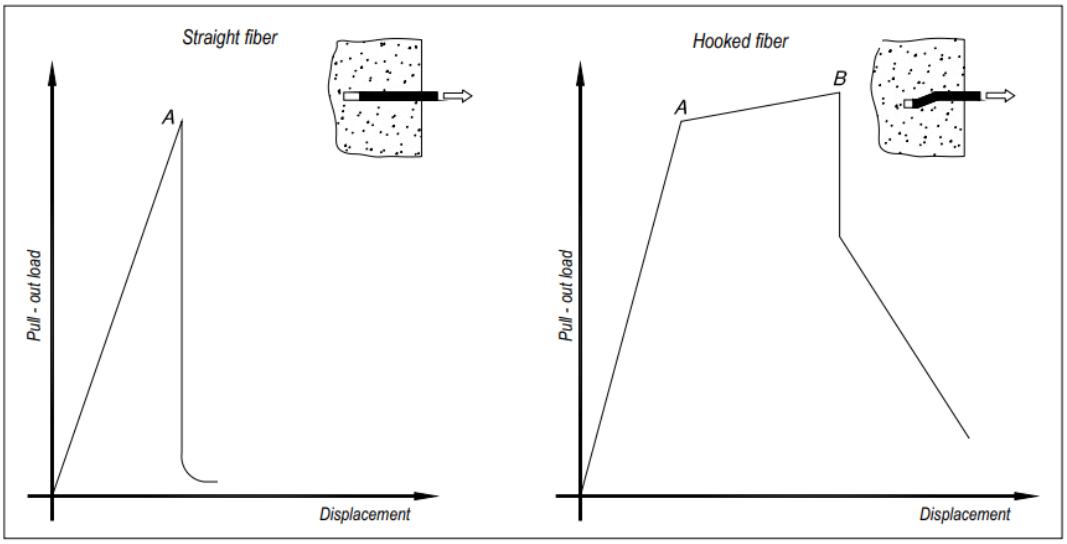
Betonun sergilediği tüm bu olası davranışların veya farklı süneklik ve tokluk seviyelerinin hem mevcut liflerin miktarına hem de bunların mekanik ve geometrik özelliklerine bağlı olduğu açıktır. Lif geometrisinin lifli betonun davranışı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, lif uzunluğu ile eşdeğer lif çapı arasındaki ilişki (L/d olarak adlandırılan narinlik oranı) betonun sünekliğini ve tokluğunu etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Şekil 2.3'te de görüldüğü üzere narinlik oranının artmasıyla birlikte absorbe edilen enerji de artmaktadır.



Şekil 2.3. Narinlik oranı ile absorbe edilen enerji miktarı arasındaki ilişki (Sarzalejo vd., 2013)

Aynı derecede önemli olan parametrelerden bir diğeri de liflerin mekanik özellikleridir ve bunların başında da lifin çekme dayanımı gelmektedir. Matrise kuvvetli bir şekilde bağlı olan lifler, yükleme esnasında matristen ayrılana kadar önemli miktarda enerji absorbe edilmesini sağlarlar. Ancak eğer lifler düşük çekme dayanımına sahip olursa, matris ile lif arasındaki kuvvetli aderans bozulmadan önce lifler kopabilir ve absorbe

edilen enerji miktarı azalabilir. Lif ile matris arasındaki aderansı artırmak için düz lifler yerine ucu kancalı lifler tercih edilebilir. Düz lif ve kancalı lifler arasındaki sıyrılma yükü-deplasman ilişkisini veren temsili grafik Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Lif geometrisi ile aderans kuvveti arasındaki ilişki (Sarzalejo vd., 2013)

Lifli betonun karakterini belirleyen bazı özellikler şunlardır :

- Liflerin geometrisi, narinlik oranı, dozajı, matriste yönelimi ve dağılımı,
- Matrisin dayanımı ve maksimum agrega boyutu,
- Lif-matris ara yüzünün özellikleri
- Uygulanan testlerin özellikleri: test boyutları, geometrisi ve yöntemi.

Aynı şekilde statik veya dinamik yükler altında lifli betonların mevcut özellikleri aşağıdaki işlemlere göre sınıflandırılabilir (Sarzalejo vd., 2013):

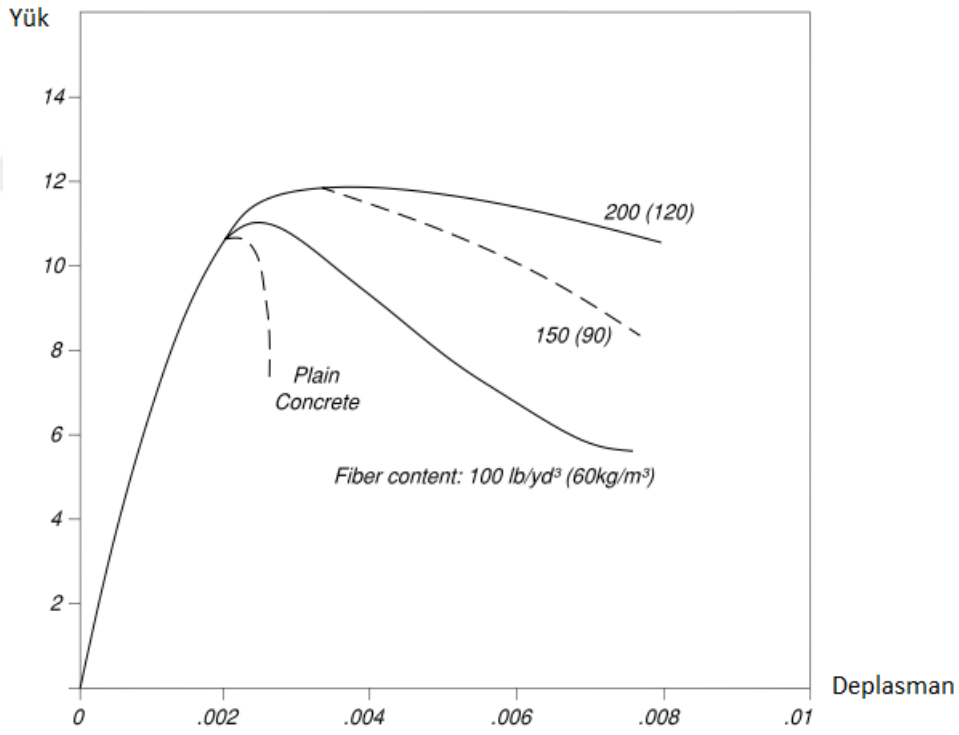
- Basınç,
- Doğrudan tek eksenli çekme,
- Dolaylı yarmada çekme,
- Dolaylı eğilmede çekme (tokluk ve kırılma enerjisinin ölçümü)
- Kesme ve burulma
- Yorulma
- Darbe

- Aşınma
- Sünme

2.5.1. Basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı lif eklenmesiyle birlikte önemli ölçüde değişiklik göstermez. Bunun nedeni, ilk çatlak oluştuktan sonra betonun basınç dayanımında büyük bir düşüş görülmesi ve sonrasında liflerin oluşturacağı herhangi bir gerilme köprülemesinin beton basınç dayanımına çok az katkı yapmasından kaynaklanmaktadır (Bentur ve Mindess, 2007).

Hacimce %1,5'tan az olmayan çelik lif içeriğinde basınç dayanımında bir miktar artış görülebilir. Pik yüke ulaştıktan sonra, malzeme, büyük ölçüde lif içeriğine bağlı olan belirgin bir süneklik gösterir (Şekil 2.5):



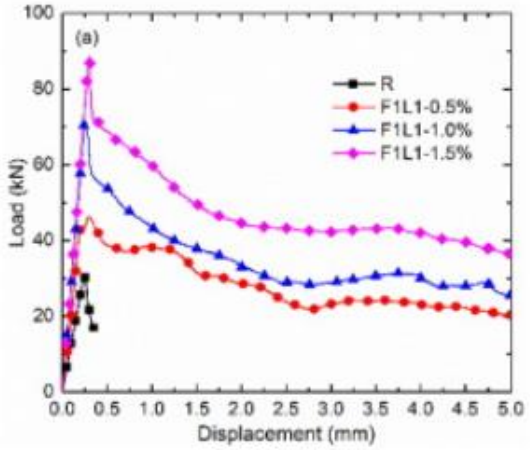
Şekil 2.5. Farklı lif oranlarına sahip beton için tipik yük-deplasman grafiği (Sarzalejo vd., 2013)

(Junwei vd., 2021) yaptıkları çalışmada tek kancalı bazalt liflerin, polivinil alkol (PVA) liflerin, çift kancalı çelik liflerin ve PVA liflerinin hepsinin betonun basınç dayanımını farklı oranlarda azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, tüm lif tiplerinde betonun eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. (Yan vd., 2021) yaptıkları çalışmada, eklenen bazalt, polipropilen ve cam liflerin hem tipinin hem de miktarının taze ve sertleştirilmiş ultra yüksek performanslı betonların (UHPC) özelliklerini etkilediğini bildirmiştir. %2,5 bazalt, polipropilen ve cam lif ilavesiyle basınç dayanımı sırasıyla %10,5, %8,8 ve %8,3 azalırken eğilme dayanımı %20,8, %26,9 ve %27,9 artmıştır. (Smarzewski, 2020), hacimce %3 oranında polipropilen kıvrımlı lif, cam lif ve bazalt lif içeren yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin (HPCC) basınç dayanımının sırasıyla %9, %19 ve %33 oranında azaldığını belirtmiştir. (Subaşı ve Emiroğlu, 2008) yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen lif ve çelik lif kullanımının işlenebilirlik ve basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre lif kullanımın basınç dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu bildirmişlerdir. (Topçu ve Canbaz, 2007) yaptıkları çalışmada beton hacmine oranla %0,05 ve %0,08 oranlarında polipropilen lif ile %0,65 oranında çelik lif ilavesiyle uçucu kül içeren betonlarda lif kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lif kullanımıyla birlikte başta eğilme dayanımı olmak üzere betonun mekanik özelliklerinde pozitif iyileşmeler olduğunu bildirmişlerdir. Lifli betonlar üzerinde yapılan çalışmaların çoğunda liflerin betona pozitif katkı sağladığı vurgulanmasına rağmen bazı çalışmalarda aksi sonuçlar elde edilmiştir. Dayanımlardaki azalmanın nedeni genellikle karışıma aşırı miktarda lif eklenmesine, lif topaklanmasına ve buna bağlı olarak matriste oluşan hava boşluklarına bağlanmıştır. (Junwei vd., 2021)

2.5.2. Yarmada çekme dayanımı

(Topçu ve Canbaz, 2007) yaptıkları çalışmada beton hacmine oranla %0,05 ve %0,08 oranlarında polipropilen lif ile %0,65 oranında çelik lif ilavesiyle uçucu kül içeren betonlarda lif kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lif kullanımıyla birlikte eğilme dayanımında ve yarmada çekme dayanımında artış görüldüğünü bildirmişlerdir. Bunun nedeni olarak da eğilme yükleri altında betonun mikro yapısında çekme gerilmeleri oluştuğunu ve kullanılan liflerin bu çekme gerilmelerine karşı koyduğunu, böylece betonun eğilme mukavemetinin artacağı

şeklinde yorumlamışlardır. (Wang vd., 2019) yaptıkları çalışmada çelik lif kullanımının betonun basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre artan lif oranıyla birlikte betonun basınç dayanımında ve yarmada çekme dayanımında artış gözlenmiştir. Ancak yarmada çekme dayanımında görülen artış basınç dayanımındaki artışa göre daha belirgindir. Referans beton, %0,5, %1,0 ve %1,5 oranında çelik lif kullanılan numunelere ait yarmada çekme deneyi sonuçları Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kullanılan çelik lif oranı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki (Wang vd., 2019)

(Song ve Hwang, 2004) yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı çelik lifli betonların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre %0,5, %1,0, %1,5, %2 oranlarında çelik lif kullanıldığında yarmada çekme dayanımı sırasıyla %19, %50, %86,2, %98,3 oranlarında artmıştır.

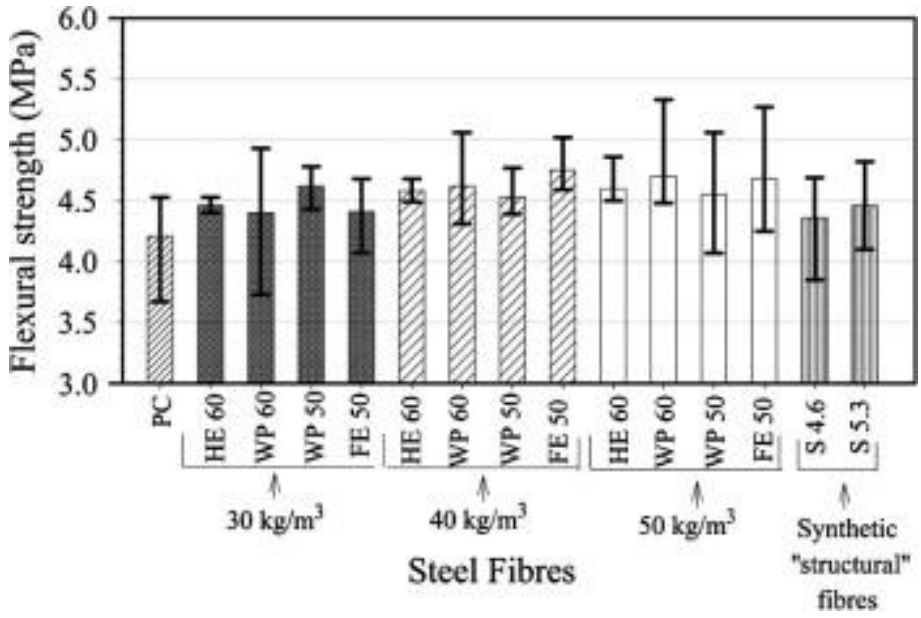
Bununla birlikte (Olesen vd., 2006) yaptıkları çalışmada, liflerin çekme yumuşaması (tensile softening) parametrelerini etkilemesi nedeniyle lifli betonların çekme dayanımını belirlemek için yarmada çekme testinin uygulanamayacağını bildirmişlerdir.

2.5.3. Eğilme dayanımı

Genel olarak bakıldığında betonun çekme ve eğilme dayanımları, çatlakların hızlı bir şekilde yayılmasını etkili bir şekilde önleyebilen çelik lifler sayesinde önemli ölçüde arttırılabilir (Mehta ve Monteiro, 2006).

(Topçu ve Canbaz, 2007) yaptıkları çalışmada beton hacmine oranla %0,05 ve %0,08 oranlarında polipropilen lif ile %0,65 oranında çelik lif ilavesiyle uçucu kül içeren betonlarda lif kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lif kullanımıyla birlikte eğilme dayanımında pozitif iyileşmeler olduğunu bildirmişlerdir.

(Soutsos et al., 2012) yaptıkları çalışmada farklı oran ve şekillerde çelik ve sentetik liflerin betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 50mm ve 60mm uzunluklarında kancalı, konik uçlu ve dalgalı çelik lifler ile sentetik liflerin kullanıldığı çalışmada çelik lifler için 30 kg/m^3, 40 kg/m3 ve 50 kg/m^3; sentetik lifler için ise 4,6 kg/m^3 ve 5,3 kg/m^3 lif dozajı seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda tüm lif çeşidi ve oranları için eğilme dayanımın arttığı gözlenmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Çelik ve sentetik lifli betonların eğilme dayanımları (Soutsos vd., 2012)

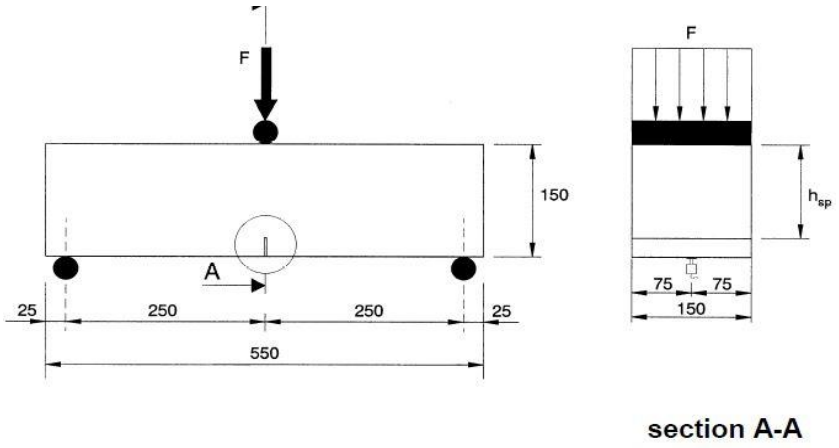
2.6. Lifli Betonların Eğilme Davranışını Belirlemek İçin Kullanılan Test Yöntemleri

Lifli betonların eğilmede çekme dayanımlarını belirlemek için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu testlerden bazıları aşağıda listelenmiştir:

- BS EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fibre concrete: Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) (BS EN 14651:2005+A1:2007, 2007)
- EFNARC Square Panel Test Method (EFNARC, 1999)
- BS EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete: Determination of energy absorption capacity of fiber reinforced slab specimens (BS EN 14488-5:2006, 2006)
- ASTM C1550:20 Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel) (ASTM C1550-20, 2020)
- ASTM C1609/C1609M-12 Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) (ASTM C1609/C1609M-19a, 2019)
- ASTM C293-08 Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading) (ASTM C293-08, 2010)

2.6.1. BS EN 14651:2005+A1:2007 standardı

Bu Avrupa standardı, metalik lifli betonların eğilmede çekme dayanımını ölçmek için kullanılmaktadır. Yöntem, orantılılık sınırının (LOP) ve bir dizi kalıcı eğilmede çekme dayanımı değerinin belirlenmesini sağlar ve 60 mm'den daha kısa olan metalik lifler için kullanılması uygundur. Ayrıca farklı tipte metalik liflerin birlikte kullanılması veya metalik liflerin diğer liflerle kombinasyonu için de kullanılabilir. Bu test metodunda 150mm genişlik ve 150mm yüksekliğe sahip olan ve uzunluğu 550 ile 700mm arasında seçilebilen kiriş numuneler kullanılır. Deney düzeneğine ait detayları içeren görsel Şekil 2.8’de gösterilmiştir



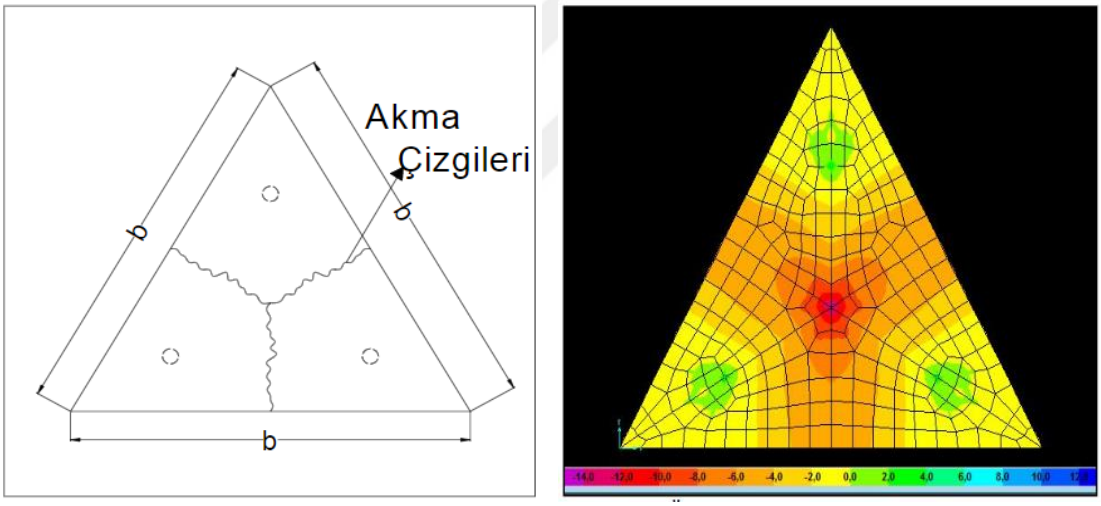
Şekil 2.8. EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği detayı

Eğer deney aleti çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) kontrollü olarak çalışıyorsa, makine, CMOD değeri 0,05 mm/dk sabit hızla artacak şekilde çalıştırılmalıdır. CMOD = 0,1 mm değerine ulaştığında, makine, CMOD değeri 0,2 mm/dk sabit hızla artacak şekilde çalışmaya devam ettirilmelidir. CMOD değeri 4 mm'yi geçene kadar deneye devam edilmelidir. Eğer deney aleti deplasman kontrollü olarak çalışıyorsa yukarıda bahsedilen CMOD değerleri, $\delta = 0{,}85\ CMOD + 0{,}04$ denklemi kullanılarak deplasman değerlerine çevrilmek kaydıyla aynı prosedür izlenerek deneyler gerçekleştirilebilir. Bu yöntemin diğer plaka yöntemlerine göre avantajı daha küçük deney numuneleri kullanıldığı için uygulama kolaylığı sağlaması ve genel olarak kabul gören bir yöntem olmasıdır. Ayrıca kirişte açılan çentiğin varlığı, kenar etkilerini ortadan kaldırır ve net bir şekilde ölçülebilen tek bir lokalize çatlağın oluşmasını sağlar. Bu sayede çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçülebilmektedir.

2.6.2. Üçgen plaka metodu

Bu metot, (Türker, 2015) tarafından çimento esaslı malzemelerin iki eksenli eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için önerilmiştir. Üçgen plaka numunelerinde çatlakların hangi yönde şekilleneceği kabaca tahmin edilebilmesine rağmen tam olarak konumlarını belirlemek zordur ve bu nedenle çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçülememektedir. Bu nedenle hesaplar yalnızca yük-deplasman eğrileri kullanılarak yapılabilmektedir.

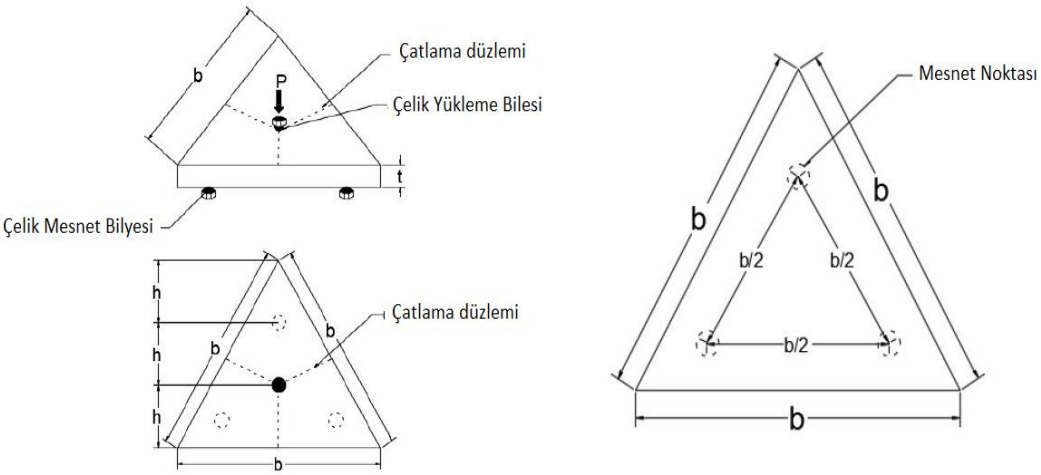
Bu yöntemin mevcut iki eksenli gerilme durumunda çekme dayanımını veren diğer yöntemlere göre avantajları vardır (Türker, 2015). İki eksenli eğilmede çekme dayanımının hesabı için basit bir formül önerilmiştir. Bu formül elde edilirken Akma Çizgileri Yöntemi'nden (AÇY) yararlanılmıştır. AÇY döşeme veya plak şeklinde çalışan sünek elemanların hesabında kullanılan plastik teoriyi temel alan güçlü bir yöntemdir (Shareef vd., 2020). (Türker, 2015), bu teoriyi baz alarak elde ettiği formülü gevrek bir malzeme üzerinde kullanmıştır ancak analitik sonuçlar ve deney sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu belirtmiştir. Ayrıca formülün ve kırılma mekanizmasının geçerliliğini kontrol etmek için sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak deney düzeneği modellenmiş ve elastik analiz gerçekleştirilmiştir. AÇY'ne göre belirlenen üçgen plaka mekanizma durumu ve sonlu elemanlar metodu sonucu elde edilen gerilme dağılımı Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Üçgen plaka için kabul edilen göçme mekanizması ve SEM ile elde edilen asal gerilme durumu
(Türker, 2015)

Üçgen plaka numuneleri için mesnet olarak eşkenar üçgen bir forma sahip çelik bir taban plakası tasarlanmış ve bu çelik plakanın üzerinde, her biri üçgen plaka numunelerin köşelerinden kenarortay uzunluğunun üçte biri kadar uzağa denk gelecek şekilde konumlandırılmış 3 adet altıgen somun ve bu somunların üzerinde de 30mm çapında üç adet çelik küresel bilye kullanılmıştır (Şekil 2.10). Hidrolik pistonun ucuna yerleştirilen küresel bilye ile üçgen plakaların ağırlık merkezine yükleme yapılmıştır. Bu bilyeler

sayesinde yükleme noktasal olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında üçgen numunelerde oluşan düşey deplasmanları ölçebilmek için numunelerin altına, ağırlık merkezine denk gelecek şekilde bir lineer potansiyometre yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.10).



Şekil 2.10. Üçgen plakalar için mesnet ve yükleme detayları

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Program

Bu bölümde, çalışmada uygulanan deneysel prosedürler ve kullanılan malzemeler hakkında kapsamlı bilgi verilmiştir. Çalışmanın asıl amacı çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımlarının, Üçgen Plaka Metodu ve EN 14651:2005+A1:2007 standardı kullanılarak belirlenmesi ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. Bu kapsamda çimento hacmine göre %0, %0,3 , %0,6 , ve %0,9 oranlarında çelik lif içeren 4 farklı grupta her lif oranı için üçer adet numune hazırlanmış ve bu numuneler her iki test metodu prosedürlerine göre test edilmiştir.

Karışım oranları, numune hazırlanması ve test yöntemlerinin detayları bu bölümde açıklanacaktır. Tüm deneysel çalışmalar Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2. Malzeme Özellikleri

3.2.1. Çimento

Bu çalışma sırasında tüm beton karışımlarının üretiminde Bursa'da bulunan Bursa Çimento firmasından temin edilen CEM I 42,5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun üretici firma tarafından sağlanan fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi

Oksit	**%**
SiO_2	18,81
Al_2O_3	5,71
Fe_2O_3	3,09
CaO	62,70
MgO	1,16
SO_3	2,39
$Na_2O + 0{,}658\ K_2O$	0,92
Cl	0,01
Çözünmeyen kalıntı	0,32
Kızdırma kaybı	3,20
Serbest CaO	1,26

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler		**CEM I 42.5 R**
Yoğunluk (gr/cm^3)		3,15
Mekanik Özellikler		
Basınç Dayanımı (MPa)	1-Günlük 2-Günlük 7-Günlük 28-Günlük	14,70 26,80 49,80 58,50
Dayanıklılık		≤ 10mm
Özgül Yüzey Alanı (Blaine, cm^2/gr)		3530
0,045 mm Elek Üstünde Kalan (%)		7,60

3.2.2. Agrega

Beton karışımlarında Bursa'da bulunan Beton firmasından temin edilen 0-5 mm ince ve 5-12 mm iri olmak üzere iki farklı tip kırma kireç taşı agrega kullanılmıştır. Karışımda kullanılabilecek en uygun granülometriyi elde etmek için ince ve iri agrega oranları her iki gruptan %50 alınarak kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Eleme öncesi agrega örnekleri

3.2.3. Kimyasal katkı

Tüm karışımlarda, yeterli işlenebilirliği ve hedeflenen slamp değerlerini sağlamak için AYDOS Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen Aydosper NBA 71 polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının üretici tarafından sağlanan bazı özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kimyasal katkının teknik özellikleri

Teknik Özellikler (Aydosper NBA 71)	
Kimyasal İçerik	Polikarboksilat esaslı
Görünüm/Renk	Kahverengi/Sıvı
Yoğunluk	1.19 ± 0.02 kg/l.
pH Değeri	7.0 ± 1
Klor İçeriği	< % 0.1
Alkali İçeriği	< % 5
Donma Noktası	-6 ºC

3.2.4. Çelik lif

Lif içeren betonlarda çimento hacmine göre %0,3 , %0,6 , ve %0,9 oranlarında BEKAERT firması tarafından sağlanan Dramix 3D 65/35BG iki ucu kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Bu liflerin çapı (d) 0,55mm, boyu (l) 35mm ve narinlik oranı (l/d) 65'tir. Çelik lif temin edilen firmanın ürün kataloğunda, liflerin homojen dağılımının sağlanması ve taze betonun kolaylıkla karıştırılabilmesi için tutkallandığını belirtilmiştir. Ayrıca (Yıldırım, 2002), yaptığı doktora tezi çalışmasında su ile temas eden tutkalın çözünerek liflerin harç içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını ifade etmiştir. Çalışmada kullanılan tutkallanmış lifler ve kanca detayı Şekil 3.2 ve 3.3'te gösterilmektedir. Kullanılan lifin, üretici tarafından sağlanan bazı özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan tutkallanmış lifler



Şekil 3.3. Liflerdeki kanca detayı

Çizelge 3.4. Liflerin teknik özellikleri

Karakteristik Özellik	Değer
Ticari İsim	Dramix 3D
Ana Malzeme	Çelik
Şekil	Her iki uçtan 3 defa kıvrılmış
Boy (mm)	35
Çap (mm)	0,55
Narinlik Oranı	65
Kg Başına Lif Sayısı	14711
Çekme Dayanımı (MPa)	1345
Elastisite Modülü (GPa)	200
Taşıma gücü sınır durumuna karşılık gelen birim şekil değiştirme	%0,8

3.2.5. Su

Betonların üretim ve kürleme aşamalarında şebekeden alınan içme suyu kullanılmıştır.

3.2.6. Beton karışımı

Bu çalışmada tüm numuneler için aynı beton karışım oranları kullanılmıştır ve karışımlar kullanılan lif oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin çelik lif içermeyen kiriş numuneleri için "K-%0,0" ifadesi kullanılırken %0,3 oranında lif içeren kiriş numuneleri için "K-%0,3" ifadesi kullanılmıştır. Aynı şekilde çelik lif içermeyen üçgen plaka numuneleri için "Ü-%0,0" ifadesi kullanılırken %0,3 oranında lif içeren üçgen plaka numuneleri için "Ü-%0,3" ifadesi kullanılmıştır Dayanım sınıfı olarak normal dayanımlı beton seçilmiş ve S/Ç oranı 0,46 olarak tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. Betonda kullanılan malzemelerle ilgili detaylı bilgiler bu bölümde daha önce verilmiştir. Beton tasarımında kullanılan malzemelerin karışım oranları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. 1m^3 beton üretimi için kullanılan malzeme miktarları

Beton Karışım Oranları	
S/Ç	0,46
Çimento (Kg)	485
Su (Kg)	225
Kaba Agrega (Kg)	800
İnce Agrega (Kg)	800
Süper Akışkanlaştırıcı (Kg)	7,5

3.3. Deney Düzenekleri

3.3.1. Kalıplar

Bu çalışmada her iki test yöntemi için de kalıp olarak plywood plakalar kullanılmıştır. Plywood paneller her iki test yönteminde belirtilen boyutlarda kesilmiş ve birleştirilmiştir. EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre kiriş numuneler 150mm genişlik ve 150mm eninde olmalı, kiriş uzunluğu ise 550mm ile 700mm arasında seçilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılacak kirişler için boyutlar 150×150×650mm olarak seçilmiştir. Üçgen plaka metodu için ise herhangi bir boyut sınırlaması olmadığı için iki farklı boyda numune üretilmiştir. Bu numuneler için kullanılan kalıpların boyutları 500×500×50mm ve 800×800×80mm'dir (Şekil 3.4 ve 3.5). Üçgen plaka deneyinde numune boyutları seçilirken numune kalınlığı/kenarortay uzunluğu (t/r) oranı sabit tutulmuştur.



Şekil 3.4. 500×500×50mm üçgen plaka ve 150×150×650mm kiriş kalıpları



Şekil 3.5. 800×800×80mm üçgen plaka kalıpları

3.3.2. Beton mikseri

Betonun homojen bir şekilde karışımını sağlamak için 120 lt kapasiteli elektrikli mikser kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Beton mikseri

3.3.3. Yükleme çerçeveleri

Üçgen plaka deneyleri için Şekil 3.7'da gösterilen çelik çerçeve yükleme düzeneği olarak kullanılmıştır. Bu çerçeve ile farklı deney düzenekleri kurulabilmekte ve farklı boyut ve kapasitelerde pistonlar kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, üçgen plaka numunelerine yük uygulayacak otomatik bir piston çerçeve sisteme monte edilmiş ve bu pistonun ucuna 200 kN taşıma kapasiteli bir yük hücresi bağlanarak deney sırasında uygulanan yükler ölçülmüştür (Şekil 3.8). Deney sırasında üçgen numunelerde oluşan düşey deplasmanları ölçebilmek için numunelerin altına, ağırlık merkezine denk gelecek şekilde bir lineer potansiyometre yerleştirilmiştir. Uygulanan yük ve düşey deplasman verileri doğrudan pistondan alınamadığı için, yük hücresi ve lineer potansiyometreden alınan veriler bir veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.

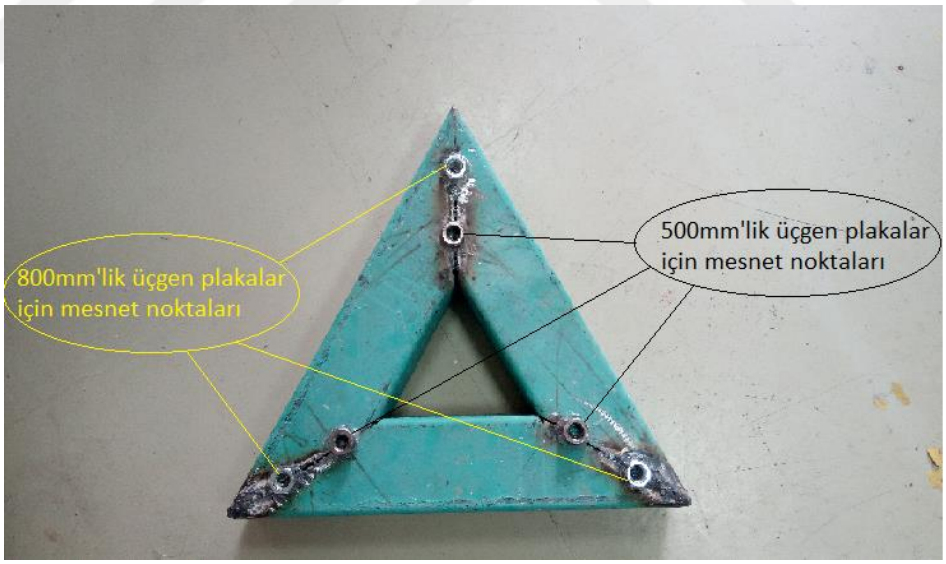


Şekil 3.7. Üçgen plaka deneylerinde kullanılan yükleme çerçevesi



Şekil 3.8. Üçgen plaka deneylerinde kullanılan yükleme çerçevesi ve hidrolik piston

Üçgen plaka numuneleri için mesnet olarak eşkenar üçgen bir forma sahip çelik bir taban plakası tasarlanmış ve bu çelik plakanın üzerinde, her biri üçgen plaka numunelerin köşelerinden kenarortay uzunluğunun üçte biri kadar uzağa denk gelecek şekilde konumlandırılmış 3 adet altıgen somun ve bu somunların üzerinde de 30mm çapında üç adet küresel bilye kullanılmıştır (Şekil 3.9). Kullanılan çelik bilyeler sayesinde üçgen plaka numuneler mesnetlerle noktasal olarak temas etmiş ve bu sayede sürtünme minimuma inmiştir. Ayrıca bu şekilde mesnet noktalarının üçgen plakanın köşelerinden uzaklaştırılmasıyla kenar ve köşelerde meydana gelebilecek ezilmeler önlenmiştir (Shareef vd., 2020). Hidrolik pistonun ucuna yerleştirilen küresel bilye ile üçgen plakaların ağırlık merkezine yükleme yapılmıştır. Bu bilyeler sayesinde yükleme noktasal olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında üçgen numunelerde oluşan düşey deplasmanları ölçebilmek için numunelerin altına, ağırlık merkezine denk gelecek şekilde bir lineer potansiyometre yerleştirilmiştir (Şekil 3.10). Yük hücresi ve lineer potansiyometreden alınan veriler bir veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.9. Üçgen plaka numuneleri için mesnet taban plakası



Şekil 3.10. Lineer potansiyometre



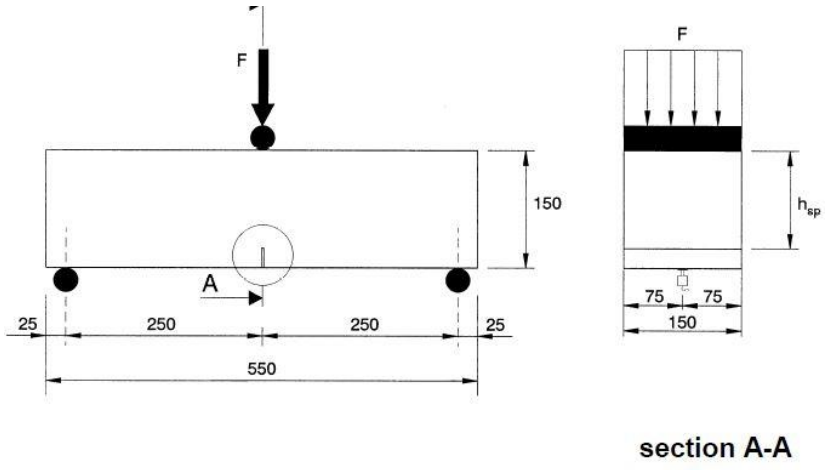
Şekil 3.11. Veri toplama cihazı

EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre ise kiriş deneyleri, (TS EN 12390-4, 2019) "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri" standardındaki makine sınıfı:1 gerekliliklerini karşılayan, kontrollü bir şekilde çalışabilen yani sabit bir oranla deplasman (CMOD veya deplasman) yapabilen ve yük-CMOD ya da yük-deplasman eğrilerinde tutarsız bölgeleri önlemek için yeterli rijitliğe sahip bir test makinesi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.12).



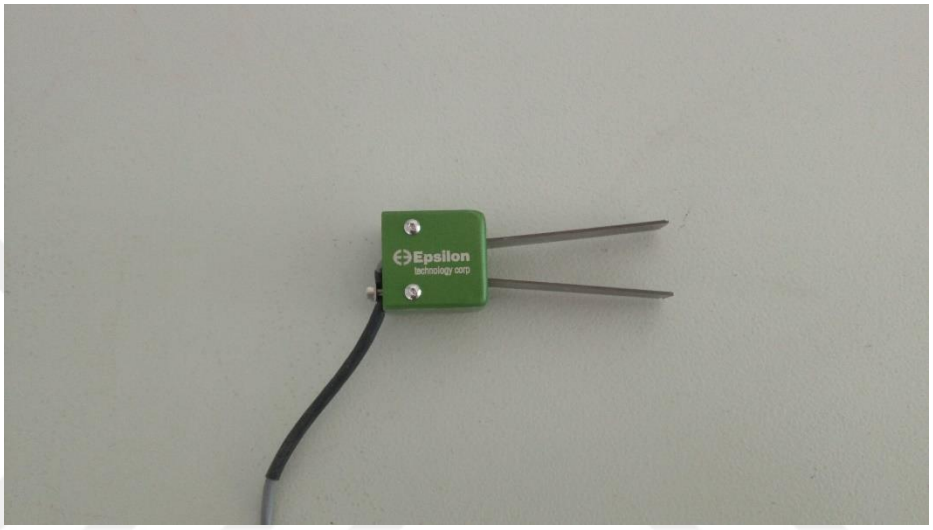
Şekil 3.12. Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için deney aleti

Bu test için 150x150x650mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Deney düzeneğine ait detayları içeren görsel Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği detayı

Kirişler 30mm çapında iki adet pürüzsüz yüzeye sahip çelik silindir üzerine oturtulmuş ve kirişin üstünde tam ortasından aynı özelliklere sahip bir silindir yardımıyla 3 noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Kirişlerin boyuna ekseninin tam orta noktasında 5 mm genişliğinde ve 125 mm derinliğinde bir çentik açılmıştır (bkz. Şekil 3.13). Bu çentiğin arasına yerleştirilen çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) ölçer cihazı (Clip-On Gages) ile deney sırasında yük miktarı arttıkça çentikte oluşacak çatlağın genişlemesi ölçülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) ölçer

Aynı zamanda kirişin boyuna ekseninin tam orta noktasında her iki kenara yerleştirilen lineer potansiyometreler ile yükleme sırasında kirişte oluşan düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen bu deplasman değerlerinin ortalaması alınarak yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan hassas ölçüm aletleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

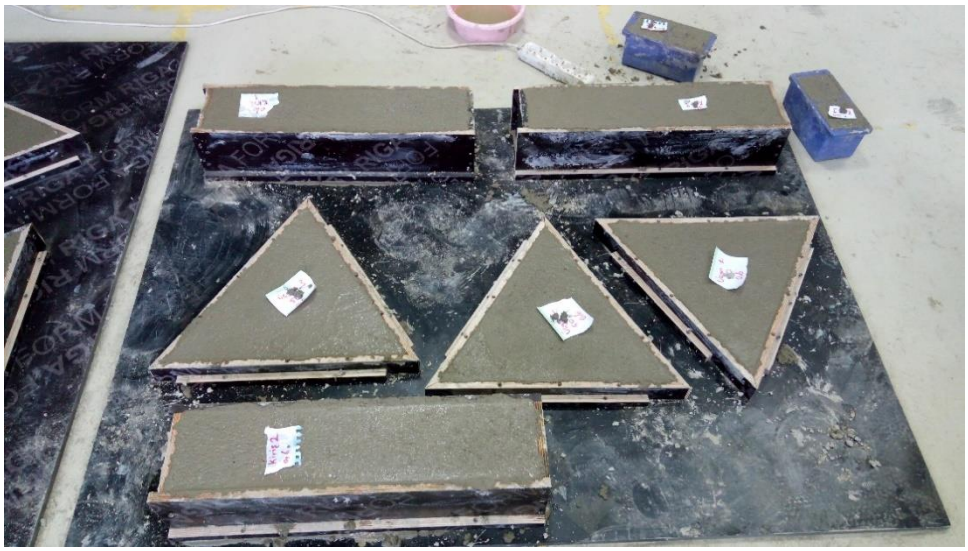


Şekil 3.15. Deney düzeneğinde kullanılan hassas ölçüm aletleri

3.4. Deneysel Prosedür

3.4.1. Karışım süreci

Beton karışımları hazırlanırken beton mikserine önce kaba ve ince agregalar eklenip karışım suyunun %50'si ile birlikte 2dk karıştırılmıştır. Daha sonra mikser çalışır durumdayken portland çimentosu ve çelik lifler yavaş yavaş eklenerek 1dk karıştırıldıktan sonra karışım suyunun geri kalanı ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı eklenmiş, homojen bir karışım sağlamak amacıyla 2dk daha karıştırılmıştır. Aynı işlemler tüm karışımlar için uygulanarak her bir karışım toplam 5dk karıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edildikten sonra hazırlanan beton, harici bir beton vibratörü yardımıyla kalıplara doldurulmuştur (Şekil 3.16 ve 3.17). Vibratör kullanılarak beton içerisinde hapsolan hava dışarı çıkarılmış ve bu sayede daha az boşluk içeren bir beton elde edilmiştir. Her karışımdan 100*100*100 mm boyutunda 3-4 adet küp numune alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpların içerisinde ve laboratuvar ortamında tutulmuştur. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin hepsi aynı koşullarda, sürekli nemli tutulacak şekilde kürlenmiş ve deney gününe kadar (28 gün) bekletilmiştir.



Şekil 3.16. 24 saat plywood kalıplarda bekletilen kiriş ve 50 cm üçgen numuneler

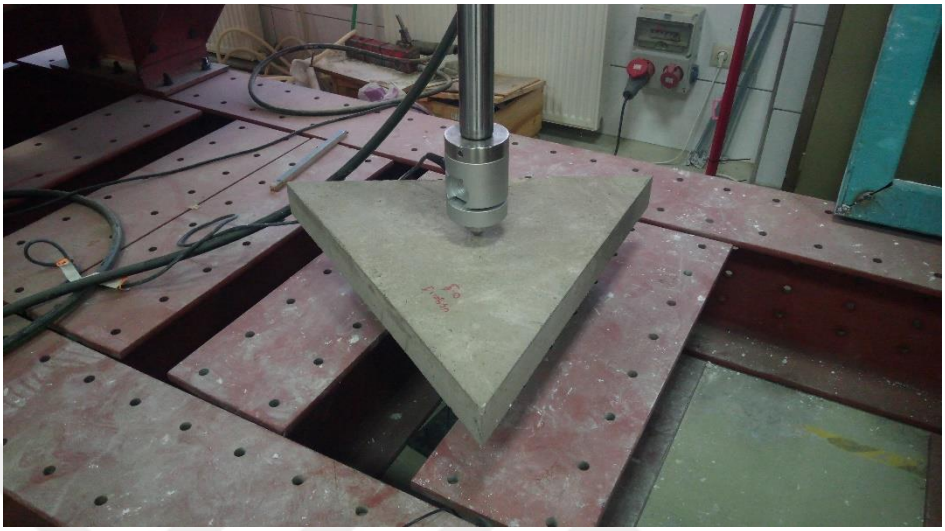


Şekil 3.17. 24 saat plywood kalıplarda bekletilen 80 cm üçgen numuneler

3.4.2. Deney süreci

Numuneler 28 gün uygun kür koşullarında bekletildikten sonra deneyler yapılmıştır. Üçgen numunelerde oluşan düşey deplasmanları ölçmek için numunelerin altına ağırlık merkezine denk gelecek şekilde bir lineer potansiyometre yerleştirilmiş ve yükleme sırasında 25 mm'ye kadar düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Yük hücresi ve lineer potansiyometreden alınan veriler bir veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmıştır.

Kirişler üzerinde yapılan eğilme deneyinde ise çentikte oluşan çatlağın genişliği ve kirişin yaptığı düşey deplasman ölçülmüştür. Kiriş deneyleri CMOD değeri 4 mm'yi aşana kadar devam ettirilmiştir. Her iki deney düzeneği Şekil 3.18 ve 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Üçgen plaka metodu deney düzeneği



Şekil 3.19. EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre deney düzeneği

3.5. Taze Beton Deneyleri

3.5.1. Çökme deneyi

Taze betonların işlenebilirliği (TS EN 12350-2, 2010) ve (ASTM C143, 2015) standartlarına göre yapılan çökme testi ile ölçülmüştür. Bu deneylerde mikserden çıkarılan taze beton harcı, çökme tepsisi üzerine yerleştirilen bir Abrams hunisinin içine doldurulmuştur. Doldurma işlemi 3 katman halinde yapılmıştır ve her katmanda beton düz bir şişleme çubuğu kullanılarak 25 defa şişlenmiştir. Huni tamamen doldurulup şişlendikten sonra Abrams hunisi yukarı yönde çekilerek taze betonun tepsi içinde yayılması sağlanmıştır. Çıkarılan huni ters çevrilip yayılmış olan harcın yanına konulmuştur. Daha sonra huni ile harç arasındaki yükseklik farkı çelik bir cetvel ile ölçülerek çökme değerleri elde edilmiştir. Lifli betonların çökme deneylerine ait örnek bir görsel Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Lifli bir karışıma ait çökme deneyi görseli

3.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bu çalışmada sertleşmiş beton deneyleri olarak numuneler üzerinde basınç dayanımı testi, üçgen plaka metodu ve EN 14651:2005+A1:2007 standardına uygun üç noktalı eğilme deneyi olmak üzere 3 farklı test uygulanmıştır.

3.6.1. Basınç testi

28 gün uygun kür koşullarında bekletilen 100x100x100mm boyutlu küp numuneler üzerinde (TS EN 12390-3, 2019) standardına uygun olarak basınç dayanımı testi yapılmıştır. Deneyde kullanılan pres makinesinin yükleme hızı saniyede 0,15-0,35 N/mm2'dir. Numunelerin ulaştığı maksimum yük, yükün uygulandığı yüzey alanına bölünerek küp numunelerin basınç dayanımları hesaplanmıştır.

3.6.2. Eğilme testi

28 gün uygun kür koşullarında bekletilen 150x150x650mm boyutlu çentikli kiriş numuneler üzerinde EN 14651:2005+A1:2007 standardına uygun olarak üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır (bkz. Şekil 3.19). Deneyde kullanılan pres makinesi deplasman kontrollü olarak ve yükleme hızı standartta belirtildiği üzere düşey deplasman değeri 0,13 mm'ye ulaşana kadar 0,08 mm/dk, düşey deplasman değeri 0,13 mm'yi aştıktan sonra ise 0,21 mm/dk olacak şekilde belirlenmiştir.
Kiriş numunelerin orantılılık sınırı Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$f\left(\frac{f}{ct}\right), L = \frac{3*FL*l}{2*b*hsp^2} \qquad (3.1)$$

Bu denklemde,

$f^{f}_{ct,L}$ orantılılık sınırını (N/mm^2),

F_L orantılılık sınırına karşılık gelen yükü (N),

l kiriş açıklığını (mm),

b numune genişliğini (mm);

h_{sp} çentiğin ucu ile kirişin üst noktası arasındaki mesafeyi (mm) ifade etmektedir.

Kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımı ise Denklem 3.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$fR,j = \frac{3*Fj*l}{2*b*hsp^2} \quad (3.2)$$

Bu denklemde,

f_{Rj} CMOD=CMOD$_j$ ya da $\delta = \delta_j$ (j=1,2,3,4,) değerine karşılık gelen kalıcı eğilmede çekme dayanımını (N/mm^2),

F_j CMOD=CMOD$_j$ ya da $\delta = \delta_j$ (j=1,2,3,4,) değerine karşılık gelen yükü (N),

l kiriş açıklığını (mm),

b numune genişliğini (mm);

h_{sp} çentiğin ucu ile kirişin üst noktası arasındaki mesafeyi (mm) ifade etmektedir (bkz. Şekil 3.13).

3.6.3. Üçgen plaka testi

28 gün uygun kür koşullarında bekletilen 500×500×50mm ve 800×800×80mm boyutlarındaki üçgen plaka numuneler üzerinde (Türker, 2015) tarafından önerilen üçgen plaka metoduna göre testler yapılmıştır (bkz. Şekil 3.18). Deneyde kullanılan pres makinesi deplasman kontrollü olarak ve yükleme hızı 1,0 mm/dk olacak şekilde uygulanmıştır.

Yükleme esnasında kesitte oluşan maksimum çekme gerilmesi Denklem 3.3'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma t = \frac{2P}{t^2\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Bu denklemde,

σ_t Malzemenin iki eksenli eğilmede çekme dayanımını (N/mm^2),

P Maksimum yükü (N),

t Üçgen plakanın et kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde üçgen plaka metodu ve EN 14651:2005+A1:2007 standardına göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler sunularak sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri kapsamında betonların işlenebilirliği çökme testi ile ölçülmüştür. Deneyler sırasında, tüm karışımların işlenebilirliğinin yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Beton karışımlarına ait çökme testi sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çökme değerleri

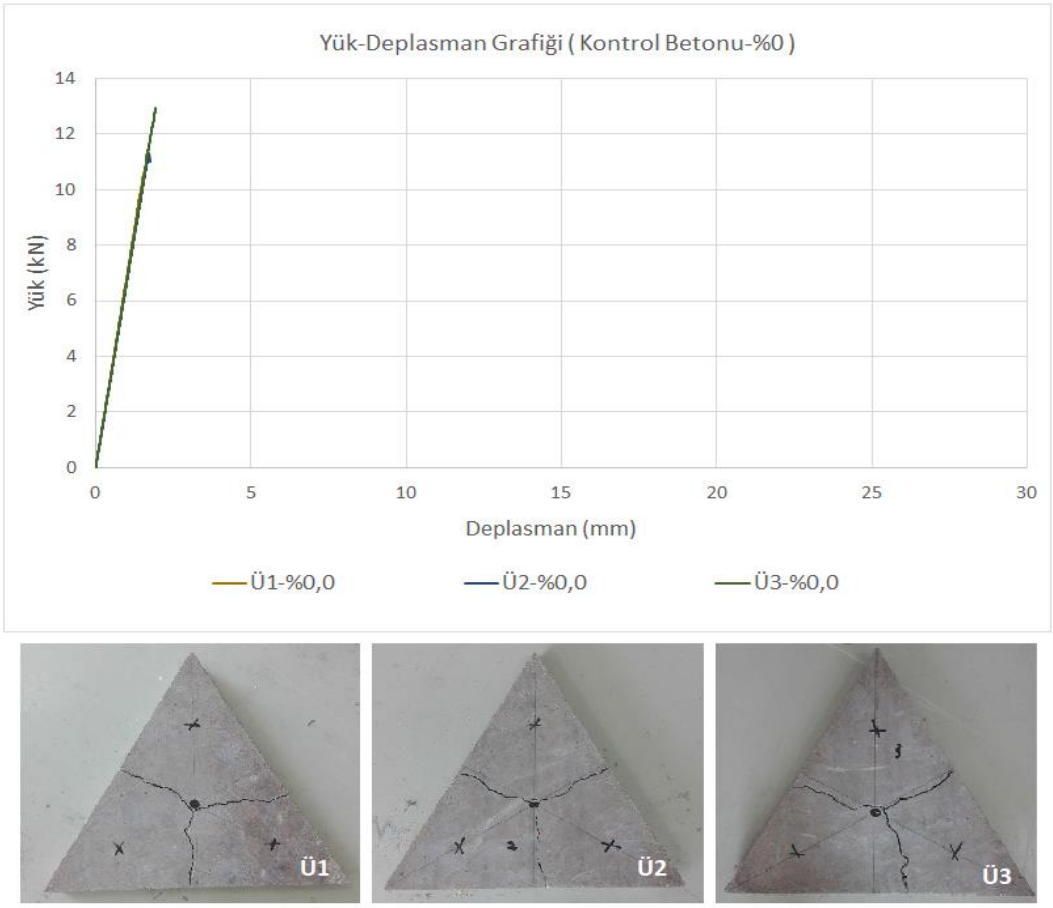
Karışımlar	Çökme Değeri (cm)
Kontrol Karışımı (Lifsiz)	20
%0,3 Lif İçeriği	16
%0,6 Lif İçeriği	11
%0,9 Lif İçeriği	7,5

4.2. Üçgen Plaka Deney Sonuçları

4.2.1. 50 cm üçgen plaka deney sonuçları

Bu bölümde 50 cm kenar uzunluğuna sahip eşkenar üçgen plakaların yük-deplasman grafikleri, hasar mekanizmaları, enerji yutma kapasiteleri (tokluk) ve çekme dayanımları ile bu veriler arasındaki ilişkiler sunularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri, yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilmiştir. Ayrıca her numune için hasar mekanizmalarını gösteren görsellerle birlikte numunelerin et kalınlığı ve ortalama basınç dayanımı değerleri sunulmuştur.

Lif içermeyen 50 cm üçgen kontrol numunelerine ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 48,35 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

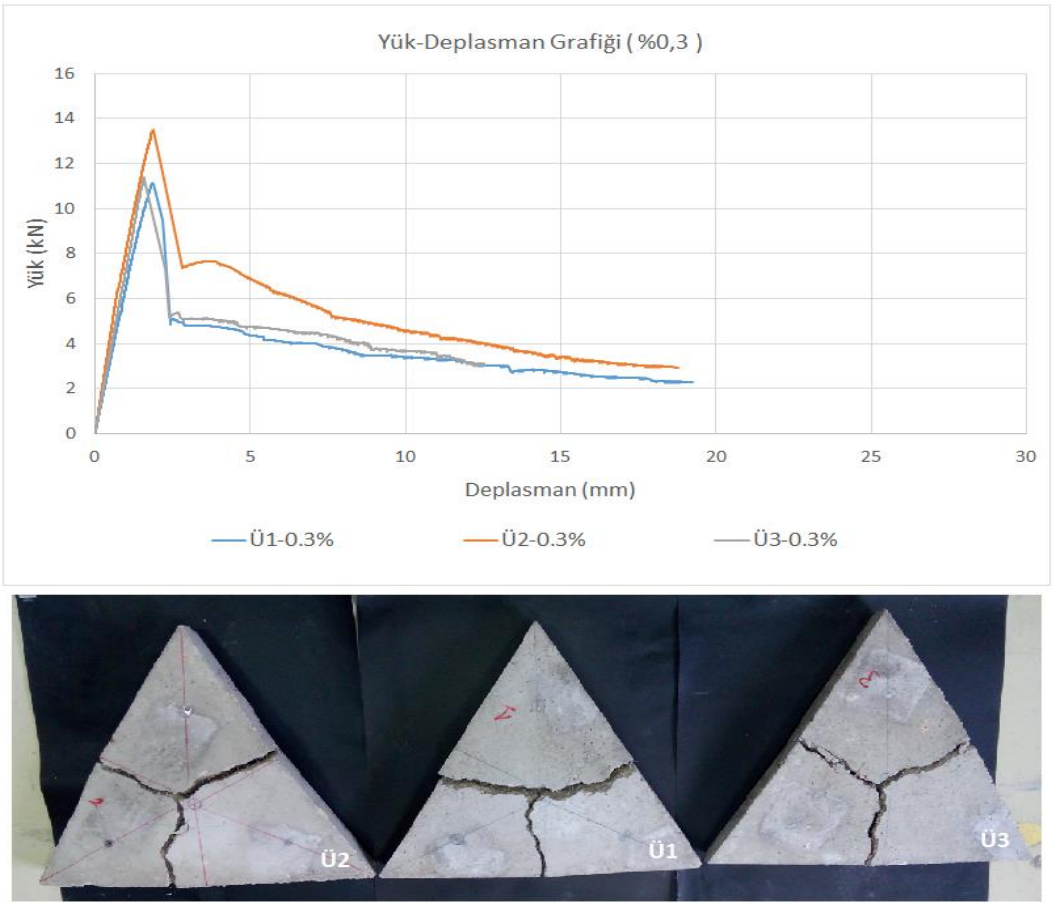


Şekil 4.1. 50 cm lifsiz üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,0)

Çizelge 4.2. 50 cm lifsiz üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,0	5,10
Ü2-%0,0	5,04
Ü3-%0,0	5,10

%0,3 oranında çelik lif içeren 50 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 52,21 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

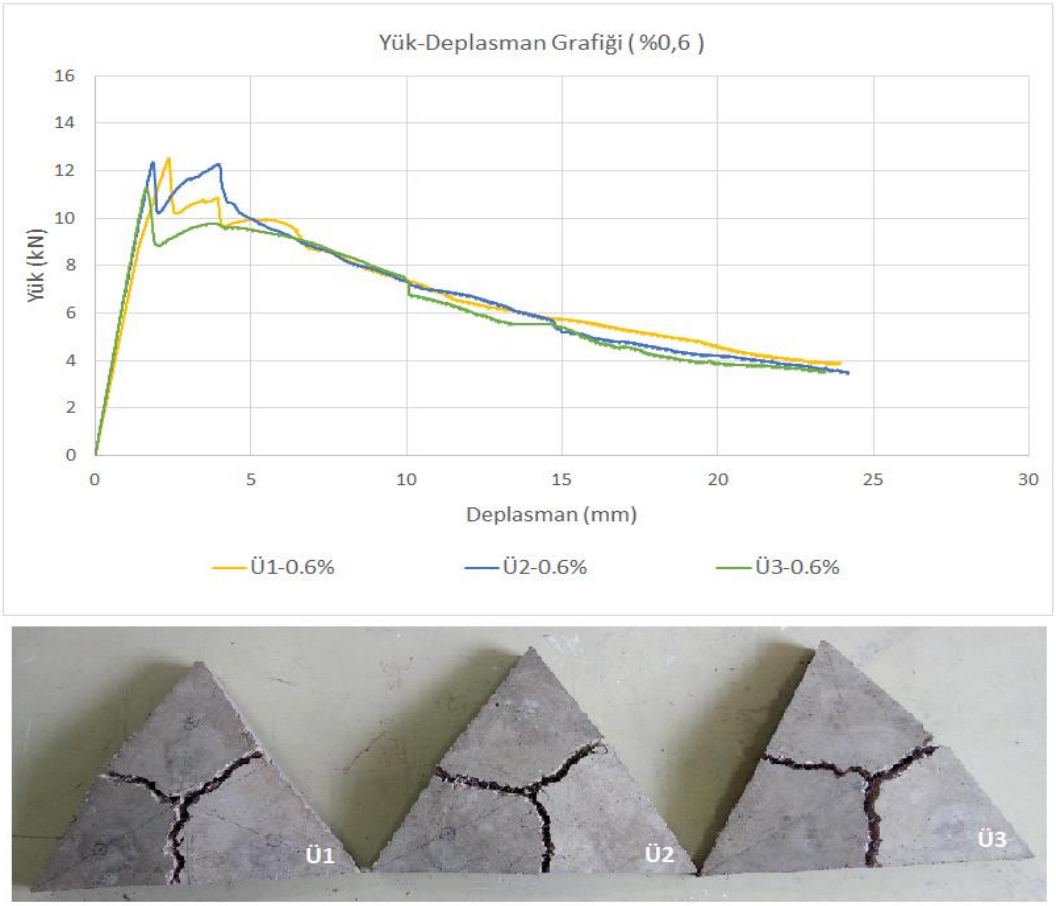


Şekil 4.2. 50 cm %0,3 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,3)

Çizelge 4.3. 50 cm %0,3 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,3	5,15
Ü2-%0,3	5,28
Ü3-%0,3	5,20

%0,6 oranında çelik lif içeren 50 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 54,01 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

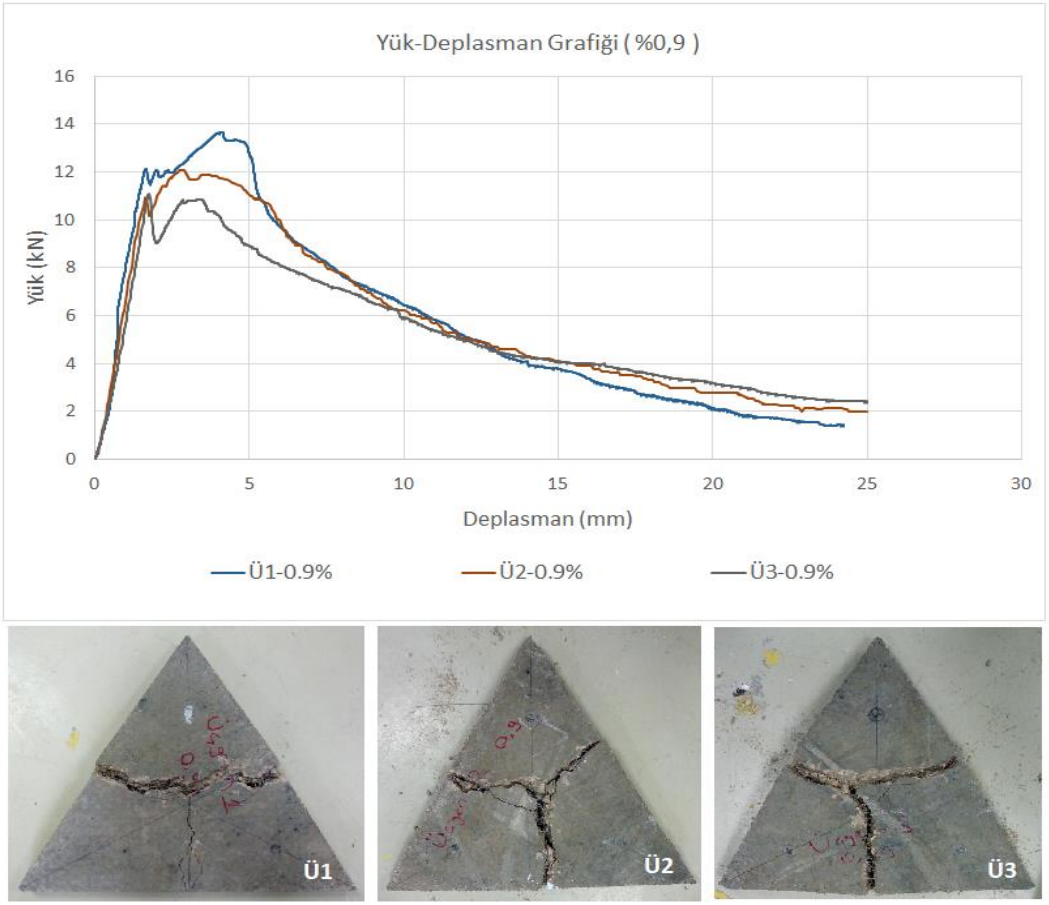


Şekil 4.3. 50 cm %0,6 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,6)

Çizelge 4.4. 50 cm %0,6 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,6	5,05
Ü2-%0,6	5,14
Ü3-%0,6	5,16

%0,9 oranında çelik lif içeren 50 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 47,88 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

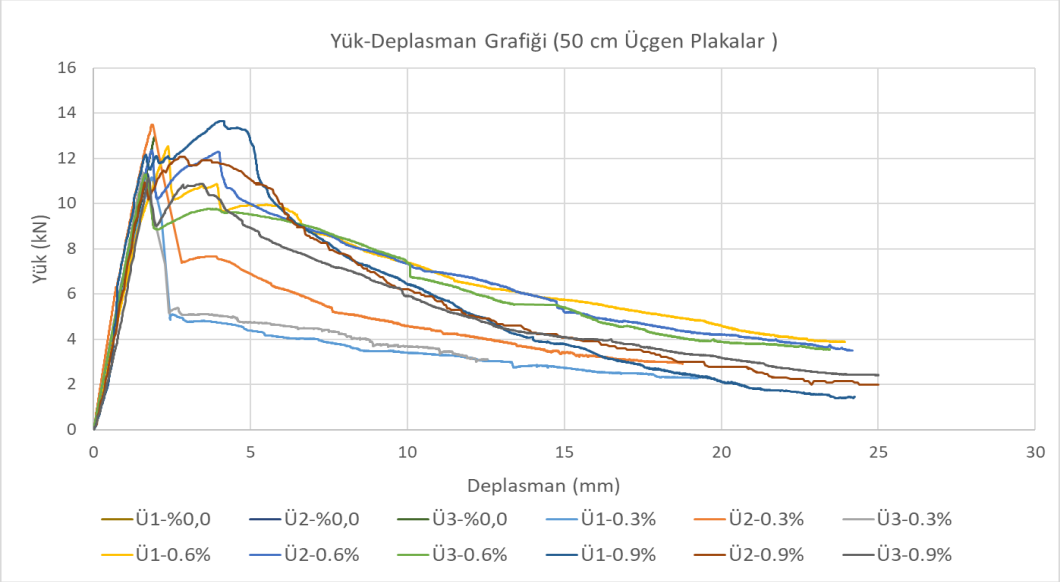


Şekil 4.4. 50 cm %0,9 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,9)

Çizelge 4.5. 50 cm %0,9 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

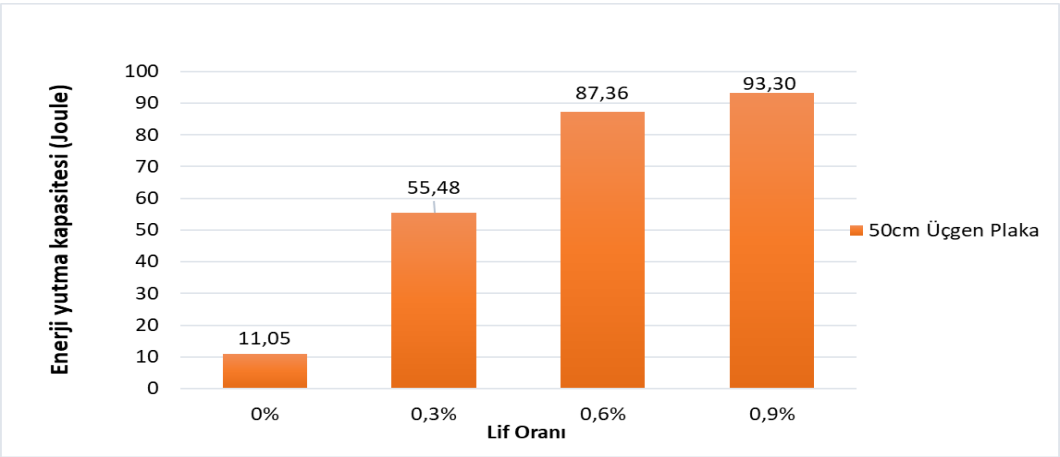
Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,9	5,11
Ü2-%0,9	5,17
Ü3-%0,9	5,09

50 cm kenar uzunluğuna sahip tüm üçgen plaka numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. 50 cm tüm üçgen plakaların yük-deplasman grafiği

50 cm kenar uzunluğuna sahip tüm üçgen plakalara ait enerji yutma kapasitelerini gösteren grafik Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Ayrıca ortalama maksimum yükler, tokluk değerleri ile varyasyon katsayısı ve Denklem 3.3'e göre hesaplanan çekme dayanımları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu değerler, her lif oranı için üç adet numunenin ortalamasını ifade etmektedir ve 10mm deplasman seviyesine kadar oluşan değerler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.6. 50 cm tüm üçgen plakaların enerji yutma kapasiteleri

Çizelge 4.6. 50 cm üçgen plakalara ait ortalama pik yük, tokluk ve çekme dayanımları

Numune	Ortalama maksimum yük (kN)	10mm deplasman için ortalama tokluk (Joule)	Tokluk için varyasyon katsayısı (COV-%)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı için varyasyon katsayısı (COV-%)
50cm Üçgen-%0	11,93	11,05	13	5,40	5
50cm Üçgen-%0,3	12,00	55,48	20	5,10	7
50cm Üçgen-%0,6	12,05	87,36	3	5,32	6
50cm Üçgen-%0,9	12,65	93,30	7	5,56	6

50 cm üçgen plakalar için elde edilen sonuçlara göre çelik lif eklenmesiyle birlikte yük taşıma kapasitesinde az miktarda bir artış gözlenmiştir. Bu artış oranları (lifsiz kontrol betonuna oranla) %0,3, %0,6 ve %0,9 oranında lif kullanılan numuneler için sırasıyla %0,62, %1,05 ve %6,01 olarak hesaplanmıştır. Artan lif oranıyla birlikte maksimum yüklerde büyük bir değişim görülmemesine rağmen ilk çatlak yükünden sonraki malzeme davranışı önemli ölçüde değişmektedir (bkz. Şekil 4.5).

%0,3 lif oranı için yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yük ani bir şekilde düşmüş, bu noktadan sonra pekleşme davranışı gözlenmemiş ve malzeme oldukça gevrek davranmıştır.

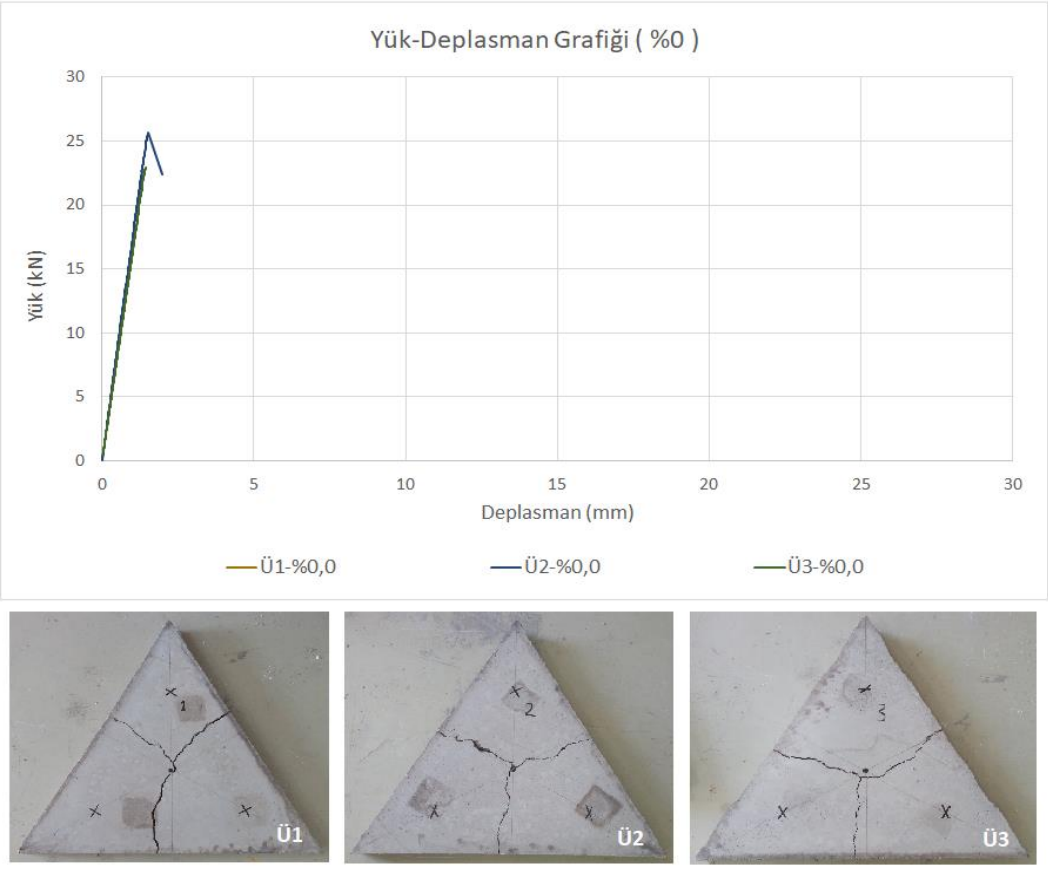
%0,6 lif oranı için de aynı şekilde yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yükte ani bir düşüş olmuştur ancak bu düşüş %0,3 lif oranı için gerçekleşen düşüşe kıyasla daha azdır. İlk çatlak sonrasında malzeme nispeten daha sünek davranmış ve grafiklerde bir miktar pekleşme gözlenmiştir.

%0,9 lif oranına sahip numuneler en sünek davranışı gösteren numunelerdir. Bu numunelerde ilk çatlak sonrasında yükte ani bir düşüş olmamış ve grafiklerde belirgim bir pekleşme davranışı gözlenmiştir.

Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde lif oranındaki artışla birlikte enerji yutma kapasitesinde de bir artış olmaktadır (bkz. Şekil 4.6).

4.2.2. 80 cm üçgen plaka deney sonuçları

Bu bölümde 80 cm kenar uzunluğuna sahip eşkenar üçgen plakaların yük-deplasman grafikleri, hasar mekanizmaları, enerji yutma kapasiteleri (tokluk) ile çekme dayanımları ve bu veriler arasındaki ilişkiler sunularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca her numune için hasar mekanizmalarını gösteren görsellerle birlikte numunelerin et kalınlığı ve basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. Lif içermeyen 80 cm üçgen kontrol numunelerine ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 46,77 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

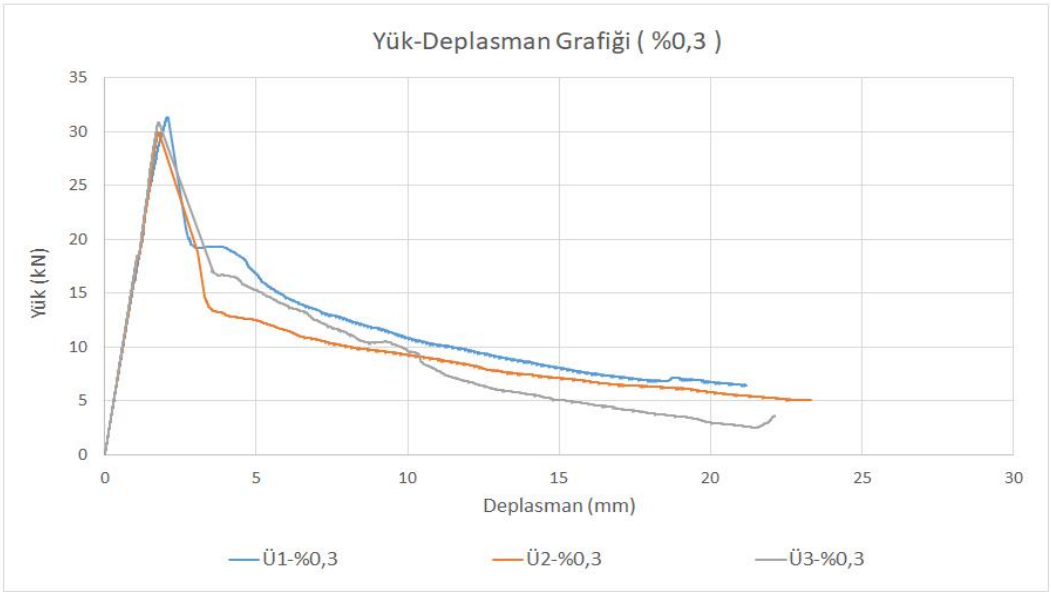


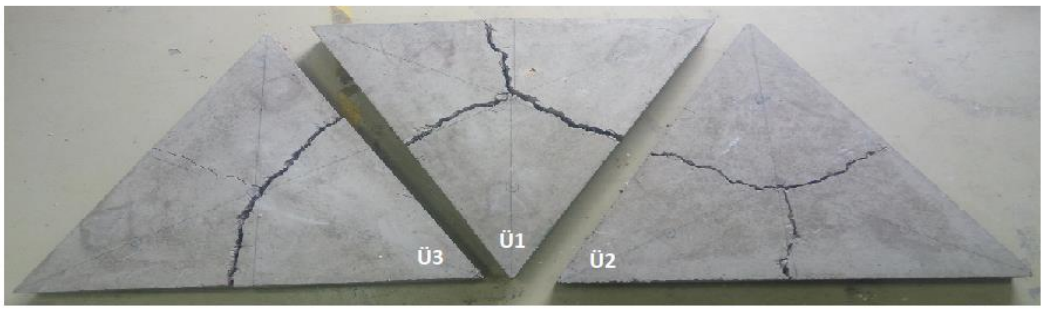
Şekil 4.7. 80 cm lifsiz üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,0)

Çizelge 4.7. 80 cm lifsiz üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,0	8,16
Ü2-%0,0	8,16
Ü3-%0,0	8,04

%0,3 oranında çelik lif içeren 80 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 50,06 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.8'de verilmiştir.



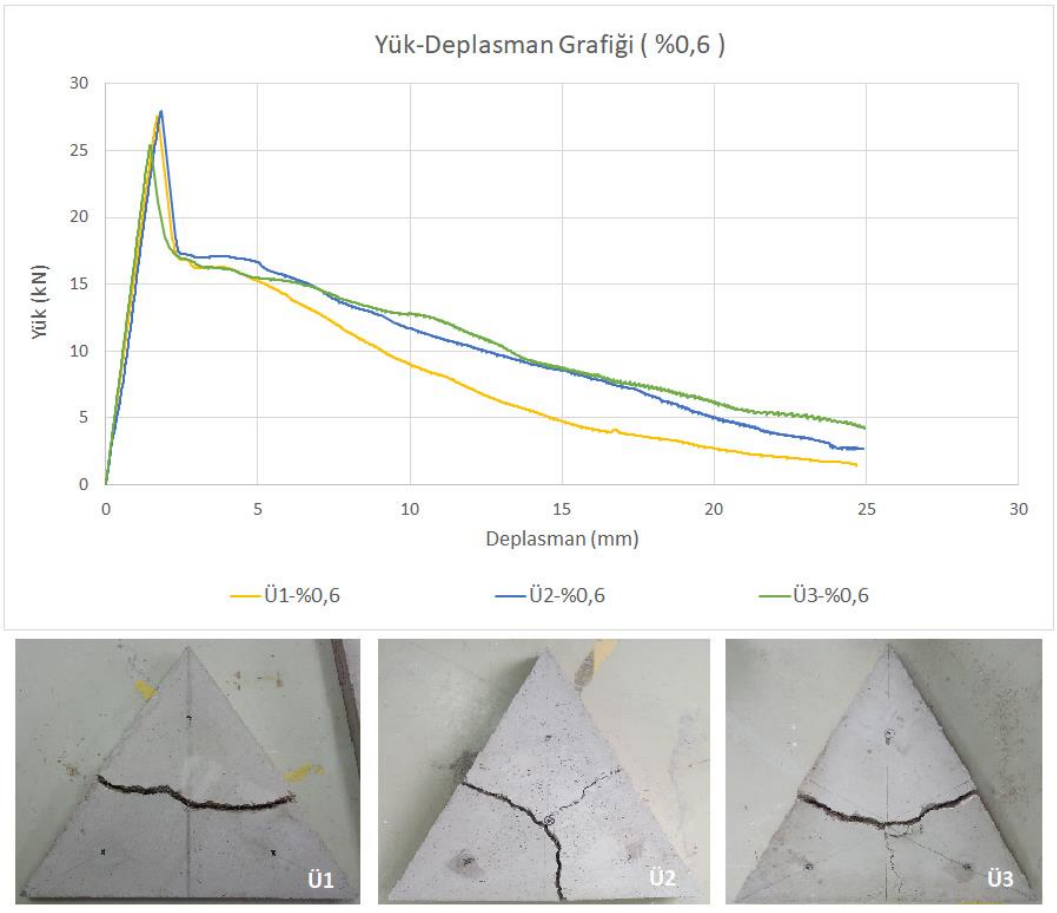


Şekil 4.8. 80 cm %0,3 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,3)

Çizelge 4.8. 80 cm %0,3 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,3	8,28
Ü2-%0,3	8,09
Ü3-%0,3	8,07

%0,6 oranında çelik lif içeren 80 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 44,96 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

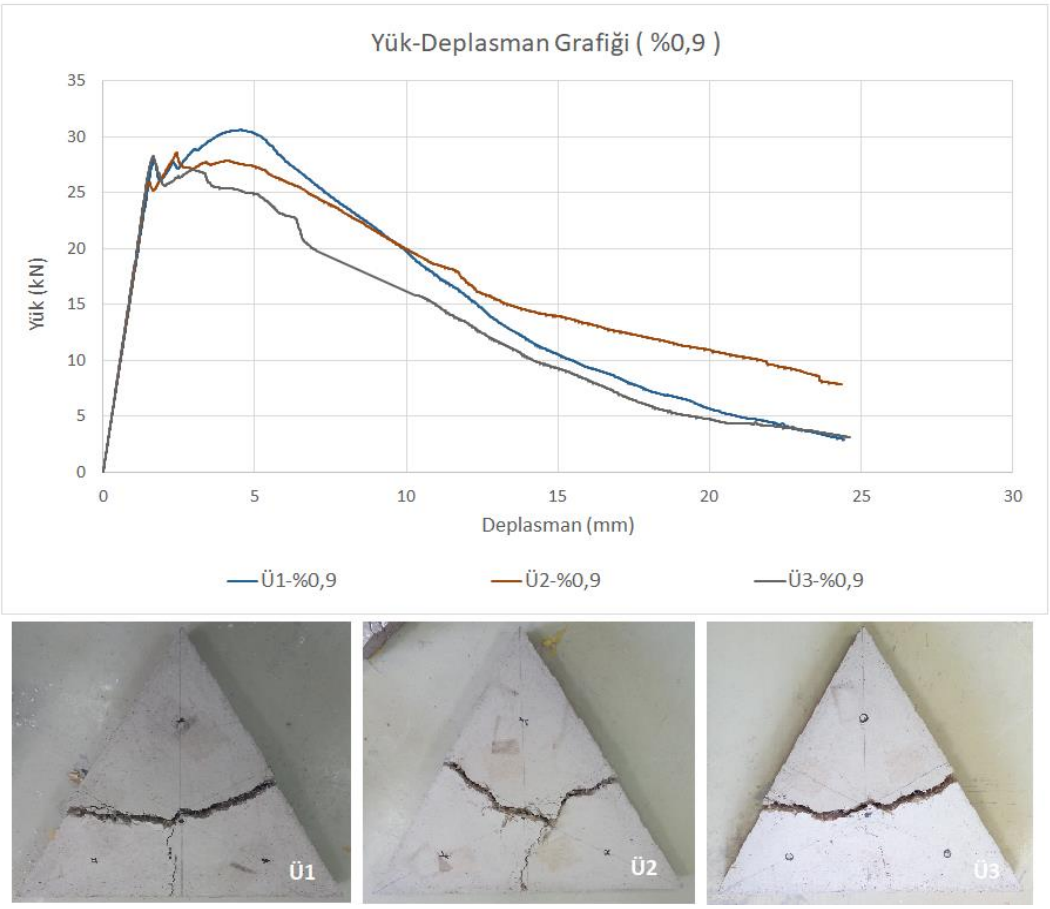


Şekil 4.9. 80 cm %0,6 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,6)

Çizelge 4.9. 80 cm %0,6 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,6	8,07
Ü2-%0,6	8,00
Ü3-%0,6	7,92

%0,9 oranında çelik lif içeren 80 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalara ait yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 41,80 MPa'dır ve numunelere ait et kalınlıkları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

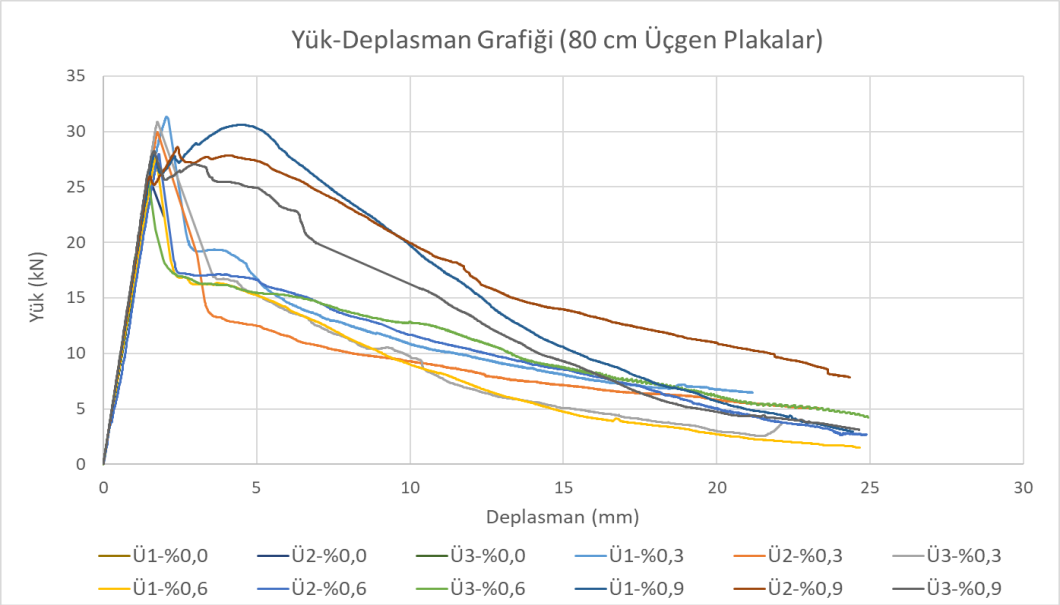


Şekil 4.10. 80 cm %0,9 lifli üçgen plakaların yük-deplasman grafiği ve hasar mekanizmaları (%0,9)

Çizelge 4.10. 80 cm %0,9 lifli üçgen plakaların kalınlık değerleri

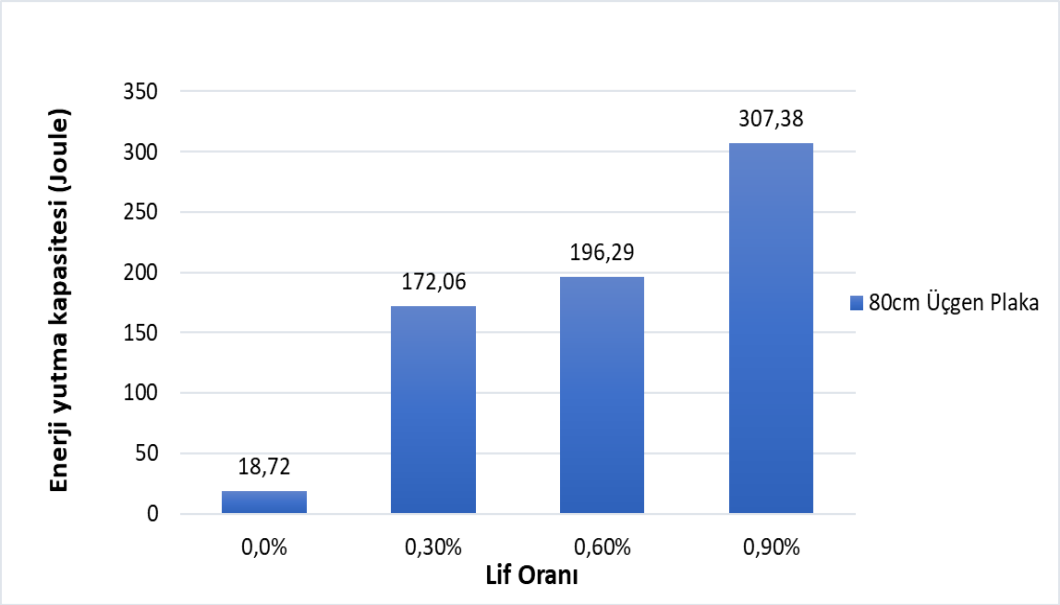
Numune	Kalınlık (cm)
Ü1-%0,9	8,22
Ü2-%0,9	8,32
Ü3-%0,9	8,08

80 cm kenar uzunluğuna sahip tüm üçgen plaka numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 80 cm tüm üçgen plakaların yük-deplasman grafiği

80 cm kenar uzunluğuna sahip tüm üçgen plaka numunelere ait enerji yutma kapasitelerini gösteren grafik Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Ayrıca bu numuneler için ortalama maksimum yük değerleri, tokluk değerleri ile tokluk için hesaplanan varyasyon katsayıları ve Denklem 3.3'e göre hesaplanan çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. Bu değerler, her lif oranı için üç adet numunenin ortalamasını ifade etmektedir ve 15mm deplasman seviyesine kadar oluşan değerler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.12. 80 cm tüm üçgen plakaların enerji yutma kapasiteleri

Çizelge 4.11. 80 cm üçgen plakalara ait ortalama pik yük, tokluk ve çekme dayanımları

Numune	Ortalama maksimum yük (kN)	15mm deplasman için ortalama tokluk (Joule)	Tokluk için varyasyon katsayısı (COV-%)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı için varyasyon katsayısı (COV-%)
80cm Üçgen-%0	23,85	18,72	10	4,18	5
80cm Üçgen-%0,3	27,66	172,06	8	4,81	5
80cm Üçgen-%0,6	27,00	196,29	7	4,87	2
80cm Üçgen-%0,9	29,15	307,38	8	5,00	4

80 cm üçgen plakalar için elde edilen sonuçlara göre çelik lif eklenmesiyle birlikte yük taşıma kapasitelerinde bir miktar artış gözlenmiştir. Bu artış oranları (lifsiz kontrol betonuna oranla) %0,3, %0,6 ve %0,9 oranında lif kullanılan numuneler için sırasıyla

%15,98, %13,22 ve %22,25 olarak hesaplanmıştır. Artan lif oranıyla birlikte maksimum yüklerde bir miktar artış görülürken ilk çatlak yükünden sonraki malzeme davranışı da önemli ölçüde değişmektedir (bkz. Şekil 4.11).

%0,3 lif oranı için yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yük ani bir şekilde düşmüş, bu noktadan sonra pekleşme davranışı gözlenmemiş ve malzeme oldukça gevrek davranmıştır.

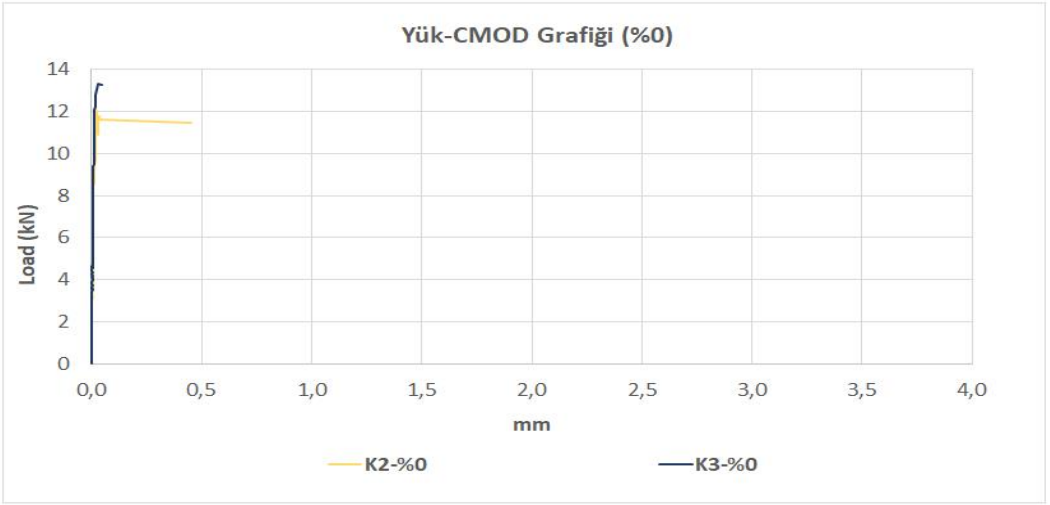
%0,6 lif oranı için de aynı şekilde yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yükte ani bir düşüş olmuştur ancak bu düşüş %0,3 lif oranı için gerçekleşen düşüşe kıyasla daha azdır. İlk çatlak sonrasında süneklik açısından büyük bir değişim gözlenmemiştir.

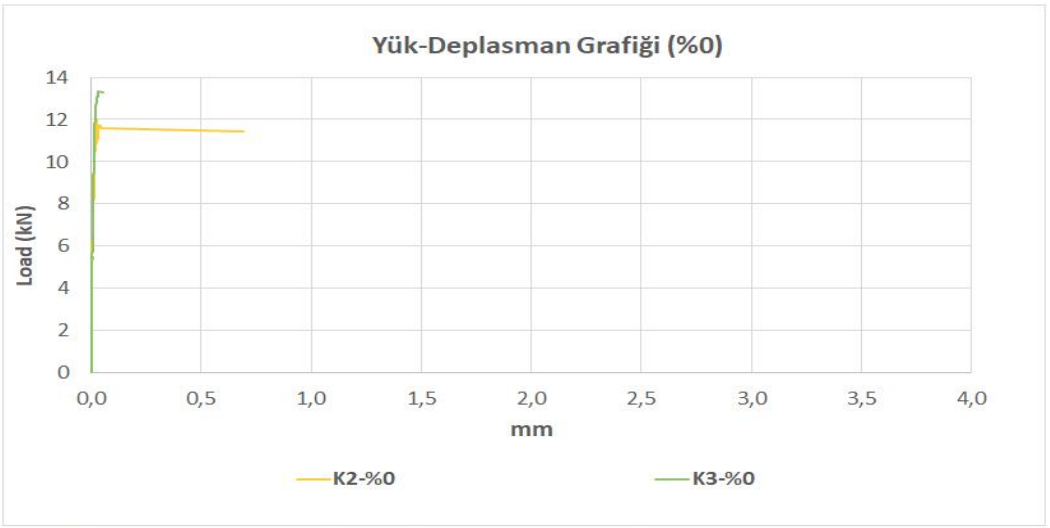
%0,9 lif oranına sahip numuneler en sünek davranışı gösteren numunelerdir. Bu numunelerde ilk çatlak sonrasında yükte ani bir düşüş olmamış ve grafiklerde belirgim bir pekleşme davranışı gözlenmiştir.

Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde lif oranındaki artışla birlikte enerji yutma kapasitesinde de bir artış olmaktadır (bkz. Şekil 4.12).

4.3. Kiriş Deney Sonuçları

Bu bölümde 150×150×650mm kenar uzunluklarına sahip kiriş numunelerin yük-deplasman grafikleri, hasar mekanizmaları, enerji yutma kapasiteleri (tokluk) ile çekme dayanımları ve bu veriler arasındaki ilişkiler sunularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri, yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilmiştir. Ayrıca her numune için hasar mekanizmalarını gösteren görsellerle birlikte 100*100*100mm küp numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı testi sonuçları tablolar halinde verilmiştir. Tablolarda bulunan basınç dayanımı değerleri, o numuneye ait tüm küpler üzerinde yapılan basınç dayanımı test sonuçlarının ortalamasını ifade etmektedir. Lif içermeyen kontrol numunelerine ait yük-CMOD grafiği ve yük-deplasman grafiği ile birlikte örnek bir hasar mekanizması Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numuneler için basınç dayanımı testi sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir. Deney sırasında yapılan ölçüm hatası nedeniyle K1-%0 isimli lifsiz kiriş numunesi bu çalışmada dikkate alınmamış ve sonuçları sunulmamıştır.





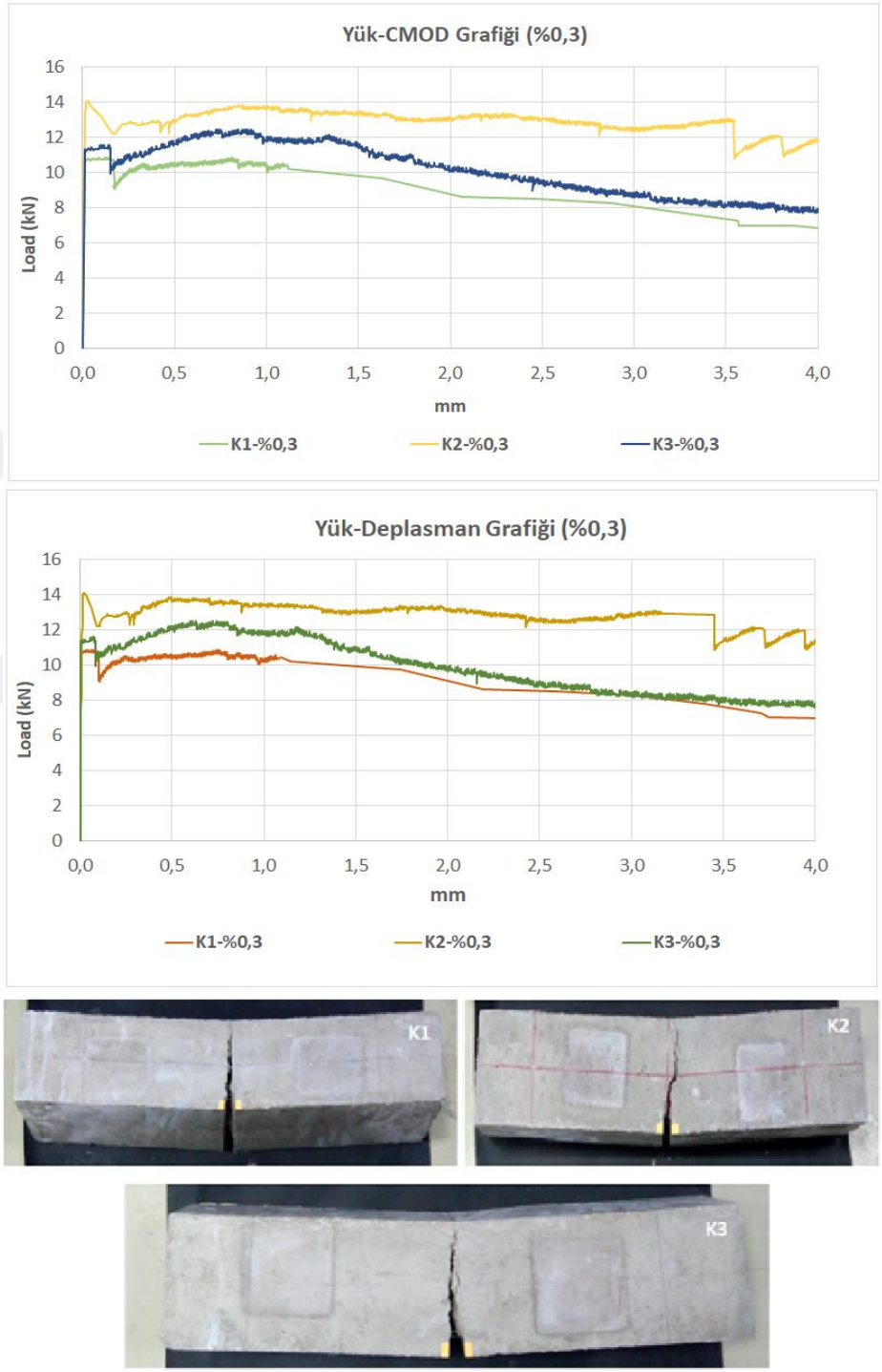


Şekil 4.13. Lifsiz kirişlere ait yükleme grafikleri ve örnek hasar mekanizması (%0)

Çizelge 4.12. Lifsiz kirişlerin basınç dayanımı değerleri

Numune	**Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)**
K2-%0	47,06
K3-%0	

%0,3 oranında çelik lif içeren kiriş numunelerine ait yük-CMOD grafiği ve yük-deplasman grafiği ile birlikte numunelerin hasar mekanizması Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelere ait basınç dayanımları Çizelge 4.13'te verilmiştir.

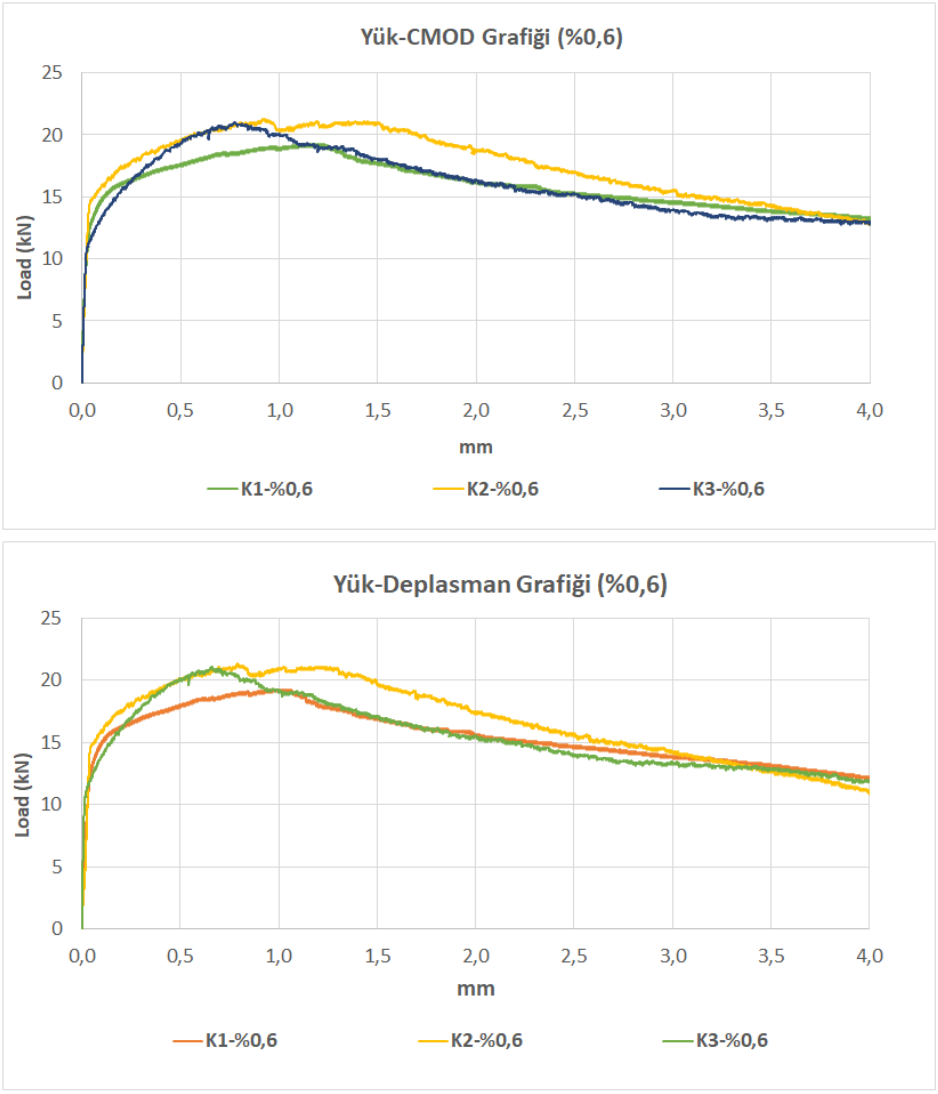


Şekil 4.14. %0,3 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri ve hasar mekanizmaları (%0,3)

Çizelge 4.13. %0,3 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri

Numune	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
K1-%0,3	
K2-%0,3	48,78
K3-%0,3	

%0,6 oranında çelik lif içeren kiriş numunelerine ait yük-CMOD grafiği ve yük-deplasman grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelere ait basınç dayanımları Çizelge 4.14'te verilmiştir.

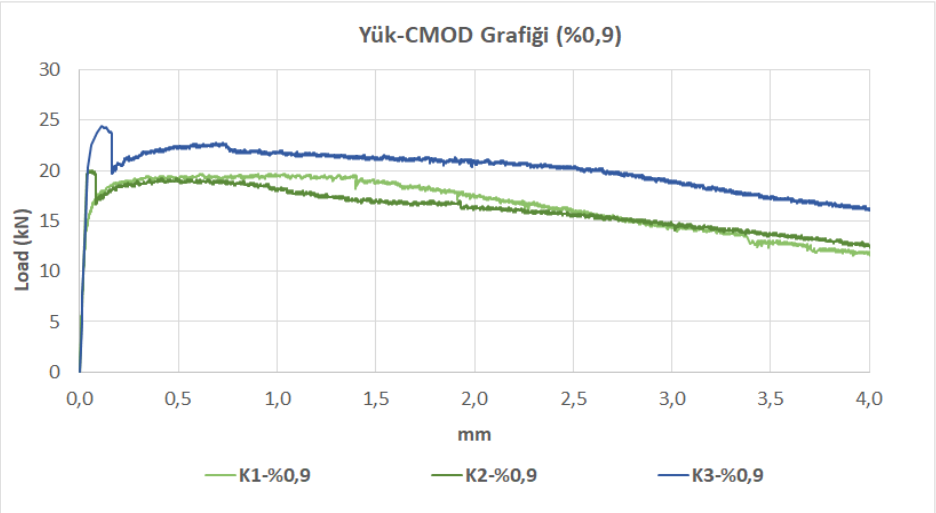


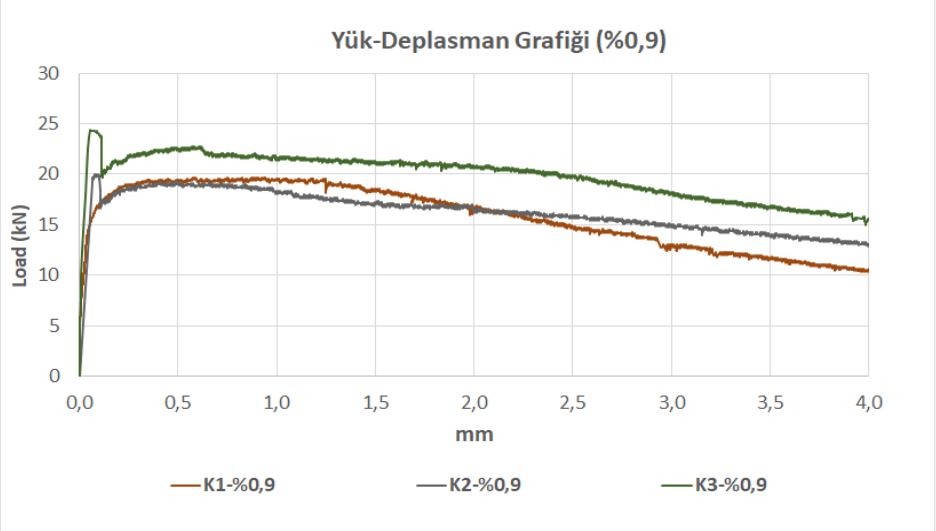
Şekil 4.15. %0,6 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri (%0,6)

Çizelge 4.14. %0,6 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri

Numune	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
K1-%0,6	46,69
K2-%0,6	
K3-%0,6	

%0,9 oranında çelik lif içeren kiriş numunelerine ait yük-CMOD grafiği ve yük-deplasman grafiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Ayrıca bu gruptaki numunelere ait basınç dayanımları Çizelge 4.15'te verilmiştir.



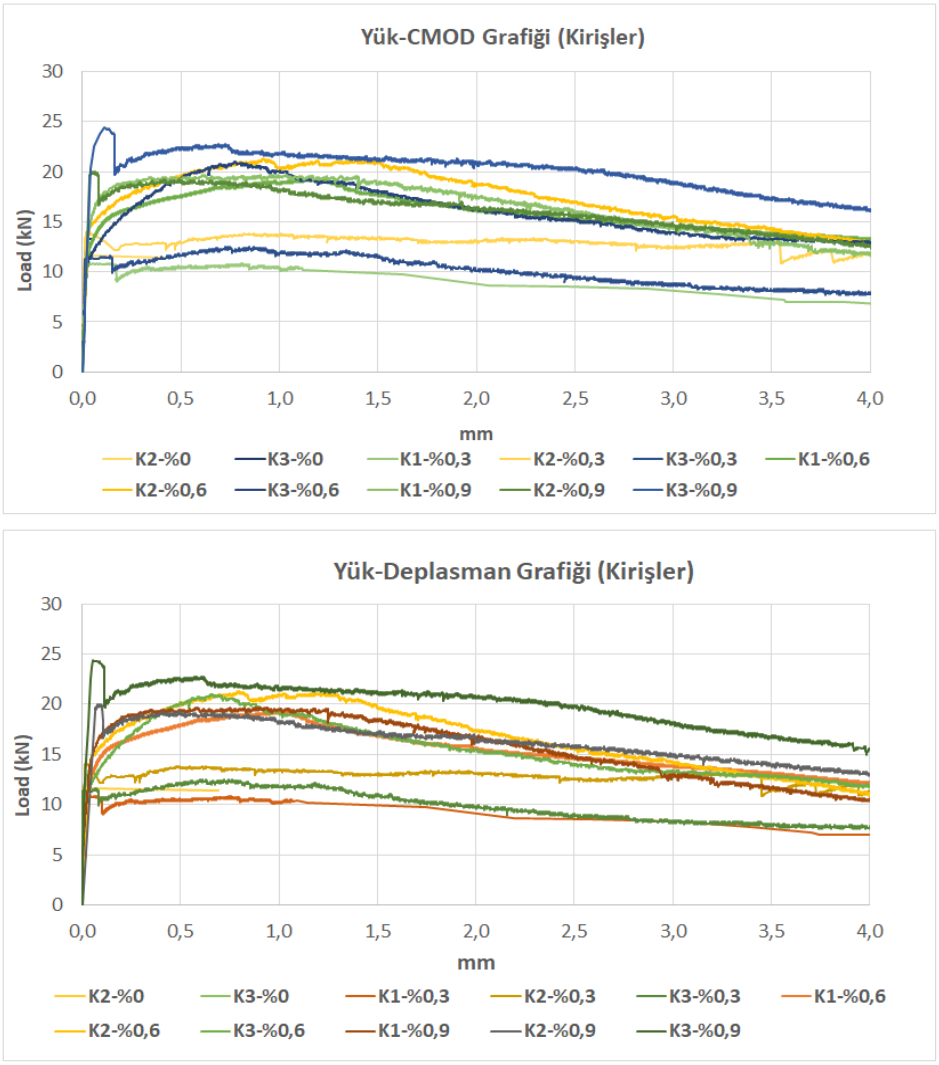


Şekil 4.16. %0,9 lifli kirişlere ait yükleme grafikleri (%0,9)

Çizelge 4.15. %0,9 lifli kirişlerin basınç dayanımı değerleri

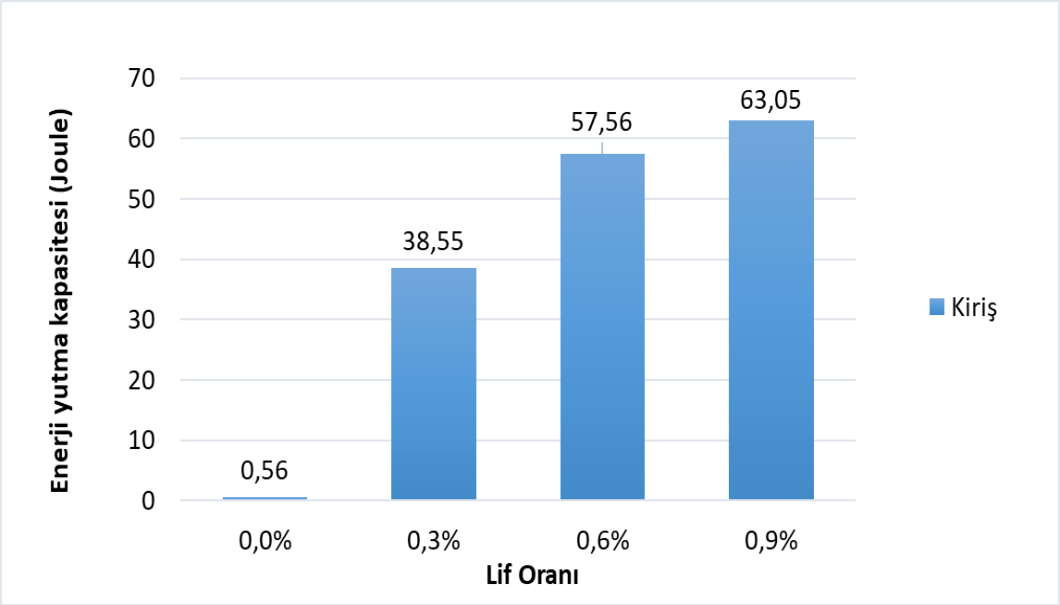
Numune	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
K1-%0,9	
K2-%0,9	50,61
K3-%0,9	

Tüm kiriş numunelerine ait yük-CMOD ve yük-deplasman grafikleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir



Şekil 4.17. Tüm kiriş numunelerine ait yük-CMOD ve yük-deplasman grafikleri

Tüm kiriş numunelerine ait enerji yutma kapasitelerini gösteren grafik Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Ayrıca bu numuneler için ortalama maksimum yük değerleri, tokluk değerleri ve tokluk için hesaplanan varyasyon katsayıları Çizelge 4.16'da verilmiştir. Bu değerler, her lif oranı için üç adet numunenin ortalamasını ifade etmektedir ve 3,5mm deplasman seviyesine kadar oluşan değerler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.18. Tüm kirişlere ait enerji yutma kapasiteleri

Çizelge 4.16. Tüm kirişlere ait ortalama pik yükler, tokluk ve varyasyon katsayıları

Numune	Ortalama maksimum yük (kN)	3,5mm deplasman için ortalama tokluk (Joule)	Tokluk için varyasyon katsayısı (COV-%)
Kiriş-%0	11,41	0,56	18
Kiriş-%0,3	12,45	38,55	16
Kiriş-%0,6	20,53	57,56	5
Kiriş-%0,9	21,37	63,05	13

Grafiklerdeki kalıcı eğilmede çekme dayanımı fRj (MPa), sırasıyla 0,5, 1,5, 2,5 ve 3,5 mm'lik belirtilen CMOD değerlerine karşılık gelen mukavemet olarak tanımlanır ve Denklem 3.2'ye göre hesaplanır. Bu denklemde kullanılan Fj (N), sırasıyla 0,5, 1,5, 2,5 ve 3,5 mm olarak belirtilen CMOD değerlerine karşılık gelen yüklerdir.

Aynı şekilde orantılılık sınırı olarak ifade edilen $f^{f}_{ct,}$ L, CMOD ≤ 0,05 mm aralığındaki maksimum gerilmeyi (MPa), FL de bu orantılılık sınırına karşılık gelen yükü (N) tanımlamaktadır. (Model Code 2010, 2013)'a göre karakteristik f_{R1k} değeri ve f_{R3k} ile f_{R1k} değerlerinin birbirine oranı (yani f_{R3k}/f_{R1k}) lifli betonun çatlama sonrası dayanımını sınıflandırmak için kullanılır. Burada f_{R1k}, kullanılabilirlik sınır durumunu; f_{R3k}/f_{R1k} ise nihai sınır durumunu ifade eder.

Karakteristik dayanım değerleri Denklem 3.4 ve 3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$fLk = fL - 1{,}645 * \sigma \tag{3.4}$$

$$fRjk = fRj - 1{,}645 * \sigma \tag{3.5}$$

Bu denklemdeki σ, f_L ve f_{Rj} değerleri için standart sapmayı ifade etmektedir. Denklem 3.1 ve 3.2'ye göre hesaplanan tüm dayanım değerleri, Denklem 3.4 ve 3.5'e göre hesaplanan karakteristik dayanım değerleri ve sınıflandırmada kullanılan diğer değerler MPa cinsinden Çizelge 4.17'de sunulmuştur.

Çizelge 4.17. Çelik lifli betonun eğilmede çekme dayanımı ve sınıflandırma sonuçları

Numune	f_t (MPa)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)	f_{Lk} (MPa)	f_{R1k} (MPa)	f_{R3k} (MPa)	f_{R3k} / f_{R1k}	f_{R1k}/ f_{Lk}	**Sınıf**
K2-%0	3,66	3,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K3-%0	4,06	4,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1-%0,3	3,30	3,29	3,19	2,99	2,58	2,24	2,58	2,70	1,60	0,59	1,04	2,5a
K2-%0,3	4,28	4,28	3,93	4,07	3,97	3,93	3,58	3,43	2,99	0,87	0,96	3b
K3-%0,3	3,80	3,49	3,54	3,48	2,86	2,47	2,78	3,04	1,88	0,62	1,09	3a
K1-%0,6	5,87	4,02	5,34	5,38	4,67	4,25	3,42	4,87	4,26	0,87	1,43	4b
K2-%0,6	6,49	4,53	5,97	6,37	5,18	4,35	3,93	5,51	4,77	0,87	1,40	5b
K3-%0,6	6,41	3,63	5,89	5,50	4,64	4,04	3,03	5,43	4,23	0,78	1,79	5b
K1-%0,9	6,00	4,79	5,87	5,74	4,91	3,91	3,38	5,10	3,85	0,75	1,51	5b
K2-%0,9	6,10	6,09	5,78	5,14	4,78	4,16	4,68	5,02	3,72	0,74	1,07	5b
K3-%0,9	7,43	6,86	6,81	6,50	6,20	5,30	5,45	6,04	5,14	0,85	1,11	6b

(Model Code 2010, 2013) sınıflandırmasına göre, Çizelge 4.17'nin son satırındaki sayı ve harfler sırasıyla f_{R1k}'nın dayanım aralığını ve f_{R3k}/f_{R1k} oranını temsil eder. Örneğin sınıflandırmada bir numune için sunulan "3b" ifadesi, o numunenin f_{R1k} değerinin 3 ile 4 MPa arasında olduğunu ve f_{R3k}/f_{R1k} oranının 0,7 ile 0,9 arasında olduğunu gösterir. Sınıflandırmada (a, b, c, d, e) harfleri kullanılır ve (a) harfinden (e) harfine doğru gidildikçe ilk çatlak sonrası davranış biçimi, yumuşama davranışından pekleşme davranışına geçişi ifade eder.

Ayrıca çelik lifler, $f_{R3k}/f_{R1k} > 0,5$ ve $f_{R1k}/f_{Lk} > 0,4$ şartlarını sağlamak koşuluyla nihai sınır durumundaki beton için geleneksel donatı yerine (ayrıca kısmen) kullanılabilir. Bu koşullar gevrek kırılmayı önlemek için uygulanmaktadır (Chen vd., 2021). Çizelge 4.17'den görüldüğü üzere tüm kiriş numuneleri ilgili koşulu sağlamaktadır.

Tüm kiriş numuneleri için elde edilen sonuçlara göre çelik lif eklenmesiyle birlikte yük taşıma kapasitelerinde artış gözlenmiştir. Bu artış oranları (lifsiz kontrol betonuna oranla) %0,3, %0,6 ve %0,9 oranında lif kullanılan numuneler için sırasıyla %9,13, %79,92 ve %87,27 olarak hesaplanmıştır. Artan lif oranıyla birlikte maksimum yüklerde artış görülürken ilk çatlak yükünden sonraki malzeme davranışı da önemli ölçüde değişmektedir (bkz. Şekil 4.17).

%0,3 lif oranı için yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yük ani bir şekilde bir miktar düşmüş, bu noktadan sonra zamanla yükte azalma görülmüştür.

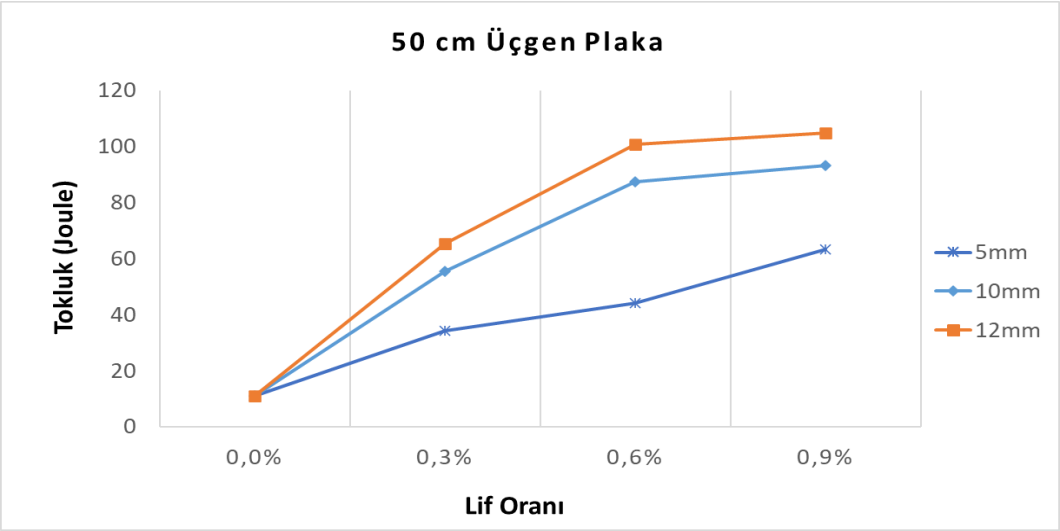
%0,6 lif oranı için yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yükte bir düşüş olmamış ve zamanla pekleşme davranışı gözlenmiştir.

%0,9 lif oranı için yük-deplasman grafiklerinde ilk çatlak sonrasında yük ani bir şekilde bir miktar düşmüş, bu noktadan sonra zamanla pekleşme davranışı gözlenmiş ve artan deplasmanla birlikte taşıma gücü nispeten korunmuştur.

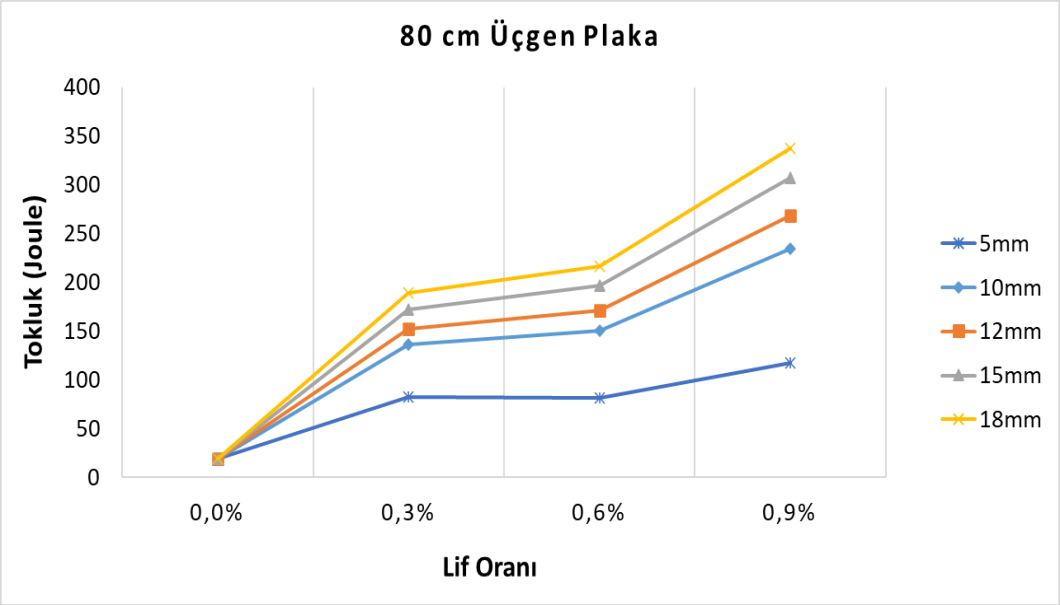
Enerji yutma kapasiteleri ve maksimum yükler incelendiğinde lif oranı artıkça maksimum yük ve enerji yutma kapasitesinde bir artış olmaktadır (Çizelge 4.16). Aynı şekilde artan lif oranıyla birlikte eğilmede çekme dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir (Çizelge 4.17).

4.4. Belirli Deplasman Seviyeleri İçin Enerji Yutma Kapasiteleri

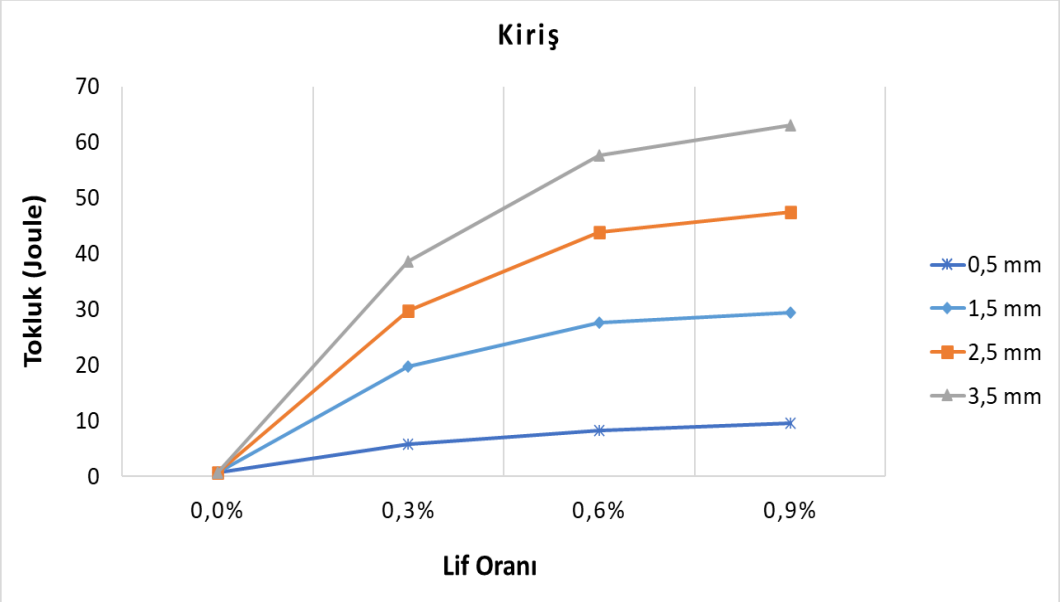
50 cm üçgen plakalar, 80 cm üçgen plakalar ve kirişlerde belirli deplasman seviyeleri için hesaplanan enerji yutma kapasiteleri sırasıyla Şekil 4.19-4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. 50cm üçgen plakalarda belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri



Şekil 4.20. 80cm üçgen plakalarda belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri



Şekil 4.21. Kirişlerde belirli deplasman seviyeleri için tokluk değerleri

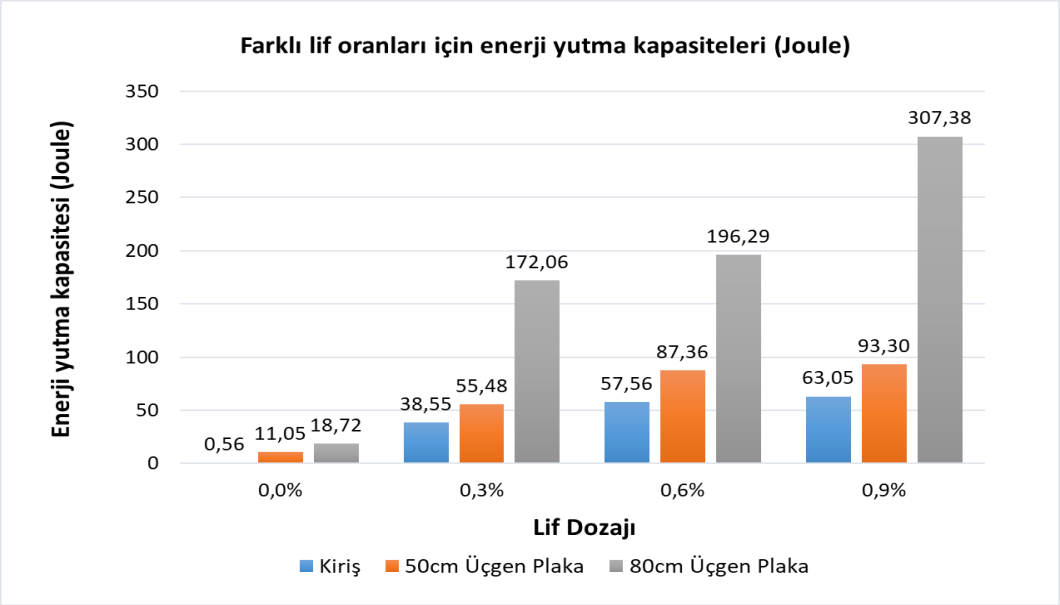
50 cm üçgen plakalarda lif oranının etkisi 5mm deplasman seviyesinden sonra daha belirgin olmaktadır (Şekil 4.19). Benzer şekilde 80 cm üçgen plakalarda 5mm'ye kadar olan deplasman seviyelerinde liflerin etkisi ihmal edilebilir (Şekil 4.20).

Kirişlerde ise bu sınır değeri 0,5mm kabul edilebilir (Şekil 4.21). Bunun temel nedeni, yükleme sırasında bu sınır değerlerine ulaşana kadar matrisin karakteri daha baskındır ve

lifler henüz tamamen devreye girmemiştir, ancak çatlak genişliği belli bir sınır değerini aştıktan sonra lifler devreye girerek matristeki gerilmeyi üzerine alır ve matrisin henüz hasar görmemiş olan diğer bölümlerine aktarırlar. Artan lif oranıyla birlikte bu mekanizmanın enerji yutma kapasiteleri üzerindeki etkisi de artar.

4.5. İki Yöntemin Karşılaştırılması

Her iki yöntem için tüm numunelere ait enerji yutma kapasitelerini gösteren grafik Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Tüm numuneler için enerji yutma kapasiteleri

Şekil 4.22 incelendiğinde, tüm numuneler için lif oranı arttıkça enerji yutma kapasitelerinin de arttığı görülmektedir. Lif oranının %0,3'ten %0,9'a çıkarılmasıyla tokluk değerleri yaklaşık 2 katına çıkmaktadır. Her lif oranı için en büyük tokluk değerleri 80 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakalarda elde edilmiştir. Bunun sebebi, bu numunelerin boyutlarının diğerlerine oranla daha büyük olması nedeniyle daha büyük deplasmanlar yapabilmesi ve bu sayede daha fazla enerji yutabilmesidir.

Kiriş deneylerinde en düşük lif oranında bile numunelerde pekleşme davranışına bir eğilim gözlenmiştir. Üçgen plaka deneylerinde ise numuneler düşük lif oranları için genellikle yumuşama eğilimi sergilerken artan lif oranlarıyla birlikte daha sünek bir davranış görülmektedir.

Test sonuçlarının dağılımının bir göstergesi olarak, her iki yöntemle test edilen tüm numunelerde enerji yutma kapasiteleri için hesaplanan varyasyon katsayıları Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

Çizelge 4.18. Her iki yöntemde tokluk için hesaplanan varyasyon katsayıları

Lif oranı	50cm üçgen plaka metodu (COV-%)	80cm üçgen plaka metodu (COV-%)	Kiriş metodu (COV-%)
%0	13	10	18
%0,3	20	8	16
%0,6	3	7	5
%0,9	7	8	13

Her iki yöntemle test edilen tüm numunelerde maksimum ortalama yük ve çekme dayanımları ile bu değerler için hesaplanan ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayıları Çizelge 4.19-21'de verilmiştir.

Çizelge 4.19. 50 cm üçgen plakalar için deney sonuçları

	Üçgen Plaka Metodu (50cm)					
Lif Oranı	**Ortalama maksimum yük (kN)**	**Standart sapma (maksimum yük için)**	**Varyasyon (COV-%) (maksimum yük için)**	**Ortalama çekme dayanımı (MPa)**	**Standart sapma (çekme dayanımı için)**	**Varyasyon (COV-%) (çekme dayanımı için)**
%0	11,93	0,72	6	5,40	0,25	5
%0,3	12,00	1,05	9	5,10	0,34	7
%0,6	12,05	0,55	5	5,32	0,32	6
%0,9	12,65	0,71	6	5,56	0,35	6

Çizelge 4.20. 80 cm üçgen plakalar için deney sonuçları

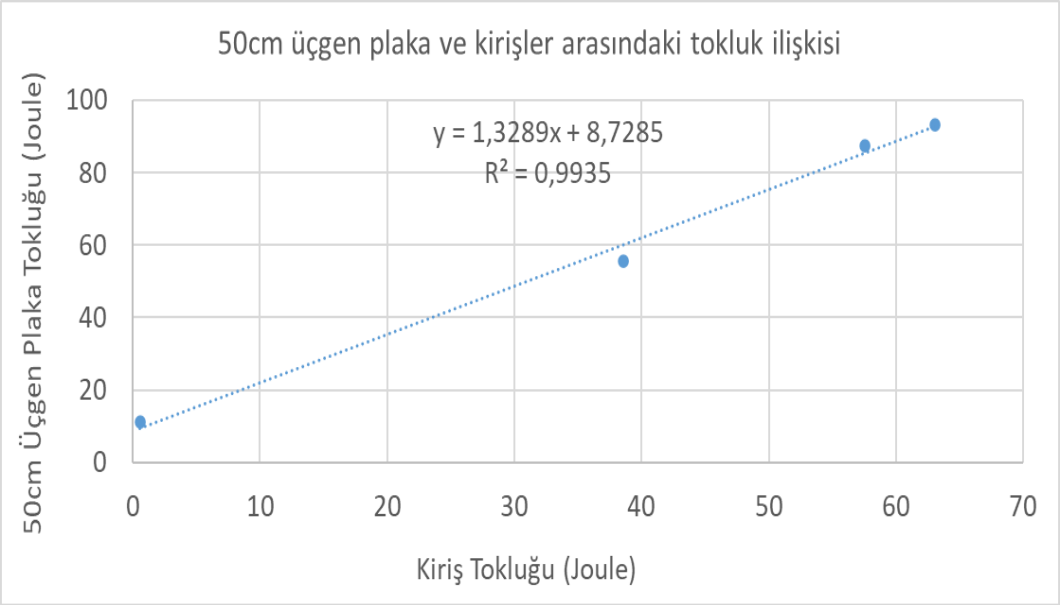
	Üçgen Plaka Metodu (80cm)					
Lif Oranı	**Ortalama maksimum yük (kN)**	**Standart sapma (maksimum yük için)**	**Varyasyon (COV-%) (maksimum yük için)**	**Ortalama çekme dayanımı (MPa)**	**Standart sapma (çekme dayanımı için)**	**Varyasyon (COV-%) (çekme dayanımı için)**
%0	23,85	1,26	5	4,18	0,20	5
%0,3	27,66	0,52	2	4,81	0,08	2
%0,6	27,00	1,13	4	4,87	0,15	3
%0,9	29,15	1,05	4	5,00	0,19	4

Çizelge 4.21. Kirişler için deney sonuçları

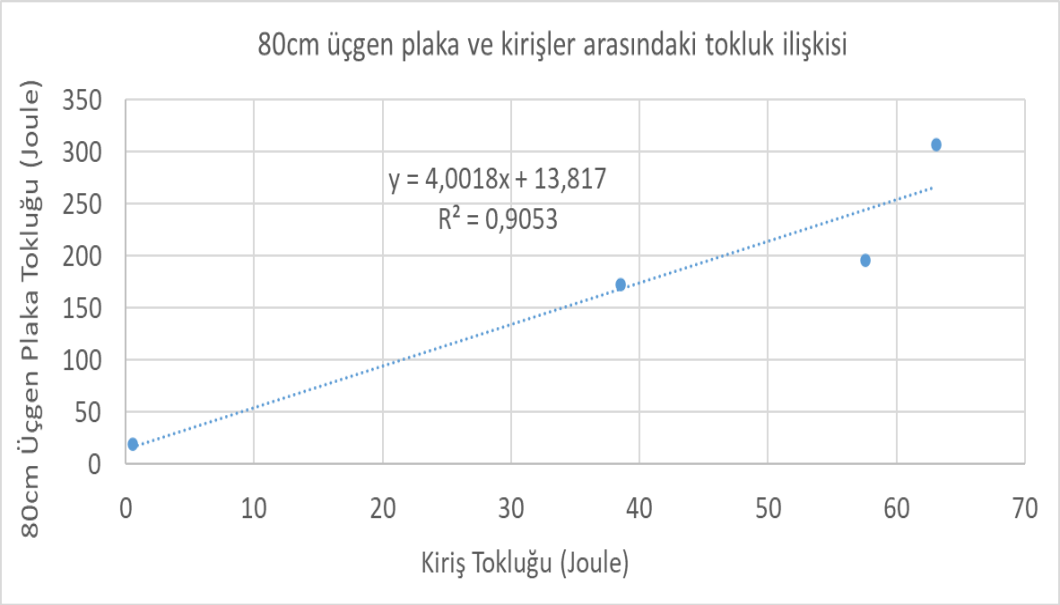
	Kiriş Metodu					
Lif Oranı	**Ortalama maksimum yük (kN)**	**Standart sapma (maksimum yük için)**	**Varyasyon (COV-%) (maksimum yük için)**	**Ortalama çekme dayanımı (MPa)**	**Standart sapma (çekme dayanımı için)**	**Varyasyon (COV-%) (çekme dayanımı için)**
%0	11,41	1,86	16	3,86	0,20	5
%0,3	12,45	1,32	11	3,79	0,40	10
%0,6	20,53	0,90	4	6,25	0,27	4
%0,9	21,37	2,14	10	6,51	0,65	10

Ortalama maksimum yük, çekme dayanımı ve tokluk değerleri için elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm numune tiplerinde varyasyon katsayılarının birbirine yakın ve oldukça küçük değerler olduğu görülmektedir. 50 cm ve 80 cm kenar uzunluğuna sahip eşkenar üçgen plakalara ait varyasyon katsayıları, kiriş numunelerine ait varyasyon katsayılarından nispeten daha küçüktür.

Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde, 50 cm üçgen plakaların tokluğu kirişlerin tokluğundan yaklaşık 1,33 kat daha büyüktür ve her iki yöntem arasındaki korelasyon katsayısı 0,9935 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde 80 cm üçgen plakaların tokluğu kirişlerin tokluğundan yaklaşık 4 kat daha büyüktür ve her iki yöntem arasındaki korelasyon katsayısı 0,9053 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde iki yöntem arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Farklı numune tipleri arasındaki tokluk ilişkisini gösteren grafikler Şekil 4.23 ve 4.24'te gösterilmiştir.

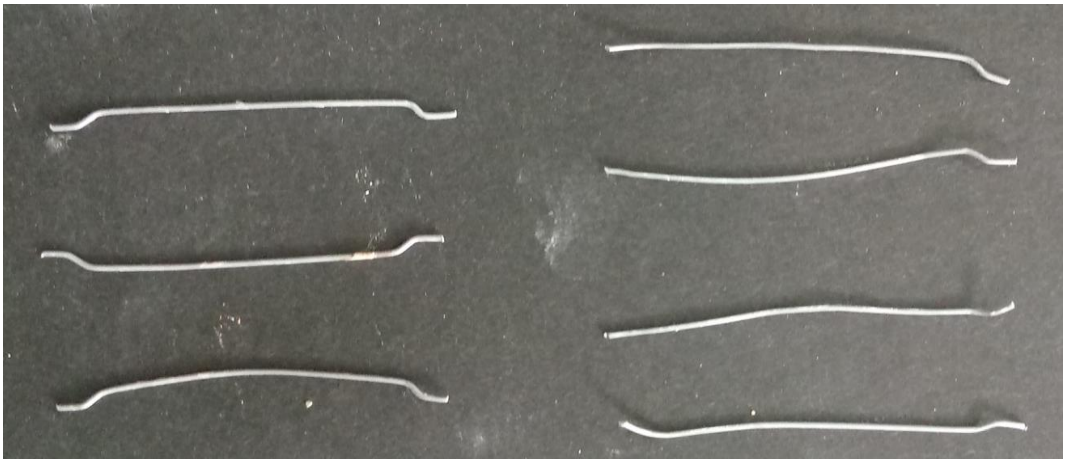


Şekil 4.23. 50cm üçgen plaka ve kirişler arasındaki tokluk ilişkisi



Şekil 4.24. 80cm üçgen plaka ve kirişler arasındaki tokluk ilişkisi

Yükleme sonrasında hasar gören numuneler detaylı olarak incelendiğinde çelik liflerin taşıma kapasitesine ulaşmadan beton içerisinden sıyrıldığı görülmüştür. Karışımlarda kullanılan çelik liflerin orijinal halleri ve yükleme sonrası halleri Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Şekil 4.25 dikkatli incelendiğinde yükleme esnasında, çelik lifin uçlarında bulunan kancalar tamamen düz bir hal alana kadar liflerin yük taşımaya devam ettiği sonucuna varılabilir. Bu sayede liflerin betondan sıyrılması ve elemanın göçme durumuna geçmesi gecikmiştir. Böylece yapı daha fazla enerji sönümleyerek sünek davranış sergileyebilmektedir.



Şekil 4.25. Çelik liflerin yükleme öncesi (Solda, 3 adet) ve sonrası (Sağda 4 adet) durumu

5. SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, çeşitli oranlarda iki ucu kancalı çelik lif içeren çentikli kiriş numuneler ve üçgen plakalar üzerinde testler (sırasıyla BS EN 14651:2005+A1:2007 metodu ve Üçgen Plaka Metodu) gerçekleştirilmiştir. Bu test yöntemleri göz önüne alındığında karışımların enerji yutma kapasiteleri (tokluk), maksimum yükler, çekme dayanımları ve basınç dayanımları gibi performans özellikleri incelenmiştir. Tüm karışımlar ve numune tipleri için yük-deplasman grafikleri ve enerji yutma kapasiteleri elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen test sonuçlarına dayanarak aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Karışımlara eklenen çelik lif miktarı arttıkça yayılma değerleri düşmüştür ancak yine de seçilen lif oranlarında beton karışımlarının işlenebilirliğinde ve kalıplara yerleştirilmesinde bir sorun yaşanmamıştır.
- Deney sonuçları incelendiğinde lif oranı ile basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı görülmektedir. Artan lif oranıyla birlikte bazı numunelerde basınç dayanımı artarken bazı numunelerde ise düşmektedir. Genel olarak tüm numunelerde basınç dayanımı değerleri birbirine yakındır ancak %0,9 lif oranına sahip 80 cm'lik üçgen plakaların ortalama basınç dayanımı 41,80 MPa ile genel trendin altında kalmıştır. Bunun nedeni, bu numune hazırlanırken homojen bir karışımın sağlanamamış olması ihtimali veya tüm numunelerin kürleme işleminin sürekli nemli tutulan dışarıya açık bir ortamda yapılması olabilir.
- Karışımlara çelik lif eklendiğinde ilk çatlak sonrasında enerji yutma kapasitesi ve yük taşıma kapasitesinin önemli oranda arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artışın büyük oranda %0,6 lif oranına kadar gerçekleştiği, bu lif oranından sonra artış miktarının sınırlı kaldığı söylenebilir.
- 50 cm üçgen plakalarda lif oranının etkisi 5mm deplasman seviyesinden sonra daha belirgin olmaktadır. Benzer şekilde 80 cm üçgen plakalarda 5mm'ye kadar olan deplasman seviyelerinde liflerin etkisi ihmal edilebilir. Kirişlerde ise bu sınır değeri 0,5mm kabul edilebilir. Bunun temel nedeni, yükleme sırasında bu sınır değerlerine ulaşana kadar matrisin karakteri daha baskındır ve lifler henüz tamamen devreye girmemiştir, ancak çatlak genişliği belli bir sınır değerini

aştıktan sonra lifler devreye girerek matristeki gerilmeyi üzerine alır ve matrisin henüz hasar görmemiş olan diğer bölümlerine aktarırlar. Artan lif oranıyla birlikte bu mekanizmanın enerji yutma kapasiteleri üzerindeki etkisi de artmaktadır.

- Karışımlara çelik lif eklenmesi, genel olarak tüm numune tipi ve lif oranlarında çekme dayanımını arttırmıştır. Yalnızca 50 cm üçgen plakalar için %0,3 ve %0,6 lif oranları için çekme dayanımında bir miktar azalma görülmüştür. 50 cm kenar uzunluğuna sahip üçgen plakaların kalınlığı (50mm) ile kullanılan çelik liflerin uzunluğunun (35mm) birbirine çok yakın olması bu azalmanın nedeni olabilir. Ayrıca enerji yutma kapasiteleri, çekme dayanımları ve maksimum yükler için hesaplanan varyasyon değerleri incelendiğinde 80cm'lik üçgen plakalarda, 50 cm'lik üçgen plakalara göre daha güvenilir sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Bu nedenle üçgen plaka metodu kullanılarak yapılacak testlerde çok küçük boyutlara sahip numunelerin kullanılmaması önerilmektedir.
- Test sonuçlarına dayanarak, kiriş metodu ve üçgen plaka metodu ile elde edilen enerji yutma kapasiteleri arasında iyi bir korelasyon olduğu söylenebilir.
- Lifsiz betonlarda üçgen plaka metodu için önerilen akma çizgileri yöntemi ve hasar mekanizması düşünüldüğünde, ilgili yöntemin lifli betonlar için de geçerli olduğu gözlenmiştir. Numunelerde gözlenen hasar mekanizması, akma çizgileri yöntemiyle elde edilen mekanizmayla uyumludur.
- Üçgen plaka metodunda önerilen formül, maksimum yük ve numune kalınlığına bağlıdır. Bu sayede farklı boyutlarda üçgen plakalar üretilerek deneyler yapılabilir.
- Üçgen plaka numunelerinde gözlenen hasar mekanizmasının, akma çizgileri yöntemiyle elde edilen mekanizmayla uyumlu olması, maksimum yük, enerji yutma kapasitesi ve çekme dayanımları için hesaplanan standart sapma ve varyasyon katsayısı değerlerinin oldukça küçük olması önerilen üçgen plaka metodunun güvenilir olduğunu göstermektedir.
- Üçgen plaka metodunda gerilme iki eksenli olduğu için; tünel kaplamalarında, döşeme betonlarında, kaldırımlarda, liman ve uçak pisti gibi ağır yüklere maruz kalan zeminlerde oluşan gerilmenin hesabında, tek eksenli gerilmeye göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

- Üçgen plaka metodunun dezavantajı, büyük boyutlu üçgen plakaların ağır olması ve deney düzeneğine yerleştirme zorluğudur. (EN14651 deneyinde kirişler nispeten daha hafiftir). Ancak bu metodun, numune yüzeyindeki pürüzsüzlüğe karşı hassasiyeti oldukça azdır, çünkü kullanılan dairesel bilyeler sayesinde tüm mesnetler noktasaldır. Dolayısıyla mesnetler ve numune arasındaki sürtünme ihmal edilebilecek düzeydedir. Sonuçta, kiriş deneyinde mesnet ve yükleme aparatı olarak kullanılan silindirlerin tüm uzunluk boyunca beton numunesi ile temas etmeleri gerekir.

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında, çelik lif içeren yapısal elemanlarda basit ve tutarlı test yöntemlerinin kullanılabilmesi için aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla; üçgen plaka metodu, betonun ilk çatlak sonrası davranışını değerlendiren diğer yöntemlerle de karşılaştırılabilir (EFNARC kare plaka metodu, yuvarlak plaka metodu, EFNARC çentikli kare plakalarda üç noktalı eğilme deneyi vb.).
- Bu çalışmada dayanım sınıfı olarak normal beton sınıfı ve lif olarak ise bir çeşit çelik lif kullanılmıştır. Önerilen test yöntemi, farklı beton sınıflarında, çeşitli tip ve boyutlara sahip liflerin farklı oranlarda kullanımıyla test edilebilir.
- Üçgen plaka metodunda önerilen formül, maksimum yük ve numune kalınlığına bağlıdır. Bu nedenle üçgen plakaların kenar uzunlukları için herhangi bir sınırlama yoktur. Ancak daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek amacıyla çok küçük geometrilere sahip numunelerin kullanılmaması önerilmektedir.
- Farklı lif türleri bir arada kullanılarak üçgen plaka metodunun hibrit lif kullanımı durumunda geçerliliği test edilebilir.
- Yukarıda önerilenlere ek olarak, üçgen plaka metodu için uygun bir sonlu eleman modeli oluşturularak ilgili analizler yapılabilir. Böylece deneysel sonuçlar sonlu eleman analizleriyle karşılaştırılabilir ve önerilen yöntemin güvenilirliği test edilebilir.

KAYNAKLAR

Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, *168*, 556–569. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164

ACI Committee 544. (2002). *State of the art report on fiber reinforced concrete (544R.1R-96)*.

Arslan, M. E. (2016). Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement. *Construction and Building Materials*, *114*, 383–391. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.176

ASTM C143. (2015). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.

ASTM C293-08. (2010). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*. https://doi.org/10.1520/C0293-08

ASTM C1550-20. (2020). *Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)*. https://doi.org/10.1520/C1550-20

ASTM C1609/C1609M-19a. (2019). *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-19A

Atis, C. D., & Karahan, O. (2009). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, *23*(1), 392–399. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002

Aylie, H., Antonius, & Okiyarta, A. W. (2015). Experimental study of steel-fiber reinforced concrete beams with confinement. *Procedia Engineering*, *125*, 1030–1035. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.158

Baradan, B., Yazıcı, H., & Aydın, S. (2015). *Beton* (İkinci Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Bentur, Arnon., & Mindess, Sidney. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites*. Taylor & Francis.

Bothma, J. (2013). *Literature review on macro synthetic fibres in concrete*.

BS EN 14488-5:2006. (2006). *Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens*.

BS EN 14651:2005+A1:2007. (2007). *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.

Cakir, F. (2021). Evaluation of mechanical properties of chopped glass/basalt fibers reinforced polymer mortars. *Case Studies in Construction Materials*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00612

Celep, G. (2010). *Polipropilen lifli betonların ısıl özelikleri* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Chen, G., Gao, D., Zhu, H., Song Yuan, J., Xiao, X., & Wang, W. (2021). Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades. *Structures*, *33*, 3644–3654. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.016

Choi, W. C., Jung, K. Y., Jang, S. J., & Yun, H. do. (2019). The influence of steel fiber tensile strengths and aspect ratios on the fracture properties of high-strength concrete. *Materials*, *12*(13). https://doi.org/10.3390/ma12132105

Concrete Society Technical Report No. 63. (2007). *Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete*.

Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*, *27*(1), 49–54. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044

EFNARC. (1999). *European specification for sprayed concrete: guidelines for specifiers and contractors*.

Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, *132*, 170–187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100

fib Model Code for Concrete Structures 2010. (2013). In *fib Model Code for Concrete Structures 2010* (pp. 74–150). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/9783433604090.ch5

Hannant, D. J. (2003). Fibre-reinforced concrete. In J. Newman & B. S. Choo (Eds.), *Advanced concrete technology-Processes* (1., pp. 6/1-6/17). Butterworth-Heinemann.

Hilles, M. M., & Ziara, M. M. (2019). Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *22*(3), 920–928. https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2019.01.003

Hoang, A. le, & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *153*, 790–806. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130

Hu, H., Papastergiou, P., Angelakopoulos, H., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF). *Construction and Building Materials*, *187*, 553–564. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.206

Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., & Bier, T. A. (2015). Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). *Construction and Building Materials*, *98*, 325–333. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.112

Jiang, C., Fan, K., Wu, F., & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, *58*, 187–193. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056

Junwei, Z., Shijie, L., & Hongjian, P. (2021). Experimental investigation of multiscale hybrid fibres on the mechanical properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, *299*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123895

Kelpša, Š., Augonis, M., Daukšys, M., Augonis, A., & Žirgulis, G. (2015). Empirical calculation method of residual flexural tensile strength fR,1 of SFRC. *Mechanika*, *21*(4), 257–263. https://doi.org/10.5755/j01.mech.21.3.9551

Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., & Akça, A. H. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, *100*, 218–224. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006

Lee, J. H. (2017). Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, *168*, 216–225. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.052

Li, B., Xu, L., Shi, Y., Chi, Y., Liu, Q., & Li, C. (2018). Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *181*, 474–486. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.065

Löfgren, I. (2005). *Fibre-reinforced concrete for industrial construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis* [Doktora Tezi]. Chalmers University of Technology.

Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Ramyar, K., & Yılmaz, G. (2013). *Farklı liflerin kendiliğinden yerleşen betonun taze hal ve mekanik özelliklerine etkisi*. 52–62. https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2020/12/52-62.pdf

Meda, A., Minelli, F., & Plizzari, G. A. (2012). Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, *43*(8), 2930–2937. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.003

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). McGraw Hill.

Meng, W., & Khayat, K. H. (2018). Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(4). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212

Olesen, J. F., Østergaard, L., & Stang, H. (2006). Nonlinear fracture mechanics and plasticity of the split cylinder test. *Materials and Structures*, *39*(4), 421–432. https://doi.org/10.1617/s11527-005-9018-3

Rilem TC 162-TDF. (2002). *Test and design method for steel fibre reinforced concrete: bending test*.

Sarzalejo, A. G., Rossi, B., Perri, G., Winterberg, R., & Aristeguieta, R. E. P. (2013). *Fibers as structural element for the reinforcement of concrete*.

Shareef, F. A., Türker, H. T., Mirkheel, H., Arslan, T., Mayar, B. A., & Deliktaş, B. (2020). Lifli betonun çekme dayanımı üzerindeki boyut etkisinin üçgen plaka deney

yöntemi ile belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *8*(3), 1923–1935. https://doi.org/10.29130/dubited.568890

Şimşek, O. (2016). *Beton ve beton teknolojisi* (5.). Seçkin Yayıncılık.

Singh, A., Liu, Q., Xiao, J., & Lyu, Q. (2022). Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction. *Construction and Building Materials*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126616

Sivakumar, A., & Santhanam, M. (2007). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, *29*(8), 603–608. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.006

Smarzewski, P. (2020). Comparative fracture properties of four fibre reinforced high performance cementitious composites. *Materials*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/ma13112612

Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *18*(9), 669–673. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027

Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, *88*(2), 129–134.

Soulioti, D. v., Barkoula, N. M., Paipetis, A., & Matikas, T. E. (2011). Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete. *Strain*, *47*(s1), e535–e541.

Soutsos, M. N., Le, T. T., & Lampropoulos, A. P. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, *36*, 704–710. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042

Subaşı, S., & Emiroğlu, M. (2008). Lif kullanılan kendiliğinden yerleşen betonlarda işlenebilirlik ve basınç dayanımı arasındaki ilişki analizi. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, *20*(3).

Thillo, L. van, Blom, J., Moreels, A., & Craeye, B. (2021). Influence of aggregates, glass fibre reinforcement and recycled aggregates on polyester mortar. *Construction and Building Materials*, *293*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123534

Thomas, J., & Ramaswamy, A. (2007). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(5). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385)

Tiberti, G., Minelli, F., & Plizzari, G. (2015). Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. *Cement and Concrete Research*, *68*, 24–34. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.011

Topçu, I. B., & Canbaz, M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, *21*(7), 1486–1491. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.026

TS EN 12350-2. (2010). *Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi*.

TS EN 12390-3. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*.

TS EN 12390-4. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri*.

Türker, H. T. (2015). Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımlarını bulabilmek için yeni bir yöntem önerisi: Üçgen plaka yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *30*(4). https://doi.org/10.17341/gummfd.02170

Wang, W. C., Wang, H.-Y., Chang, K.-H., & Wang, S.-Y. (2020). Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials*, *245*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118387

Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., & Xin, H. (2019). The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/7520549

Wang, X. hua, Zhang, S. rong, Wang, C., Cao, K. lei, Wei, P. yong, & Wang, J. xin. (2019). Effect of steel fibers on the compressive and splitting-tensile behaviors of cellular concrete with millimeter-size pores. *Construction and Building Materials*, *221*, 60–73. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.069

Woo, S. K., Kim, K. J., & Han, S. H. (2014). Tensile cracking constitutive model of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). *KSCE Journal of Civil Engineering*, *18*(5), 1446–1454. https://doi.org/10.1007/s12205-014-0335-3

Yan, P., Chen, B., Afgan, S., Aminul Haque, M., Wu, M., & Han, J. (2021). Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre. *Construction and Building Materials, 279*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489

Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research, 33*(1), 27–30. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-4

Yardımcı, M. Y. (2007). *Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yıldırım, S. T. (2002). *Lif Takviyeli Betonların Performans Özeliklerinin Araştırılması* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.

Zeynal, E. (2008). *Çelik Lif ve S/Ç Oranlarının Çelik Lifli Betonların Darbe Mukavemetine ve Mekanik Özelliklerine Etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.