

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**POLİMER ESASLI SENTETİK MAKRO LİF
TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Cem BACANLI

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL**

Yozgat 2019

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**POLİMER ESASLI SENTETİK MAKRO LİF
TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Cem BACANLI

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL**

Yozgat 2019

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110713002 numaralı öğrencisi Cem BACANLI'nın hazırladığı “**Polimer Esaslı Sentetik Makro Lif Takviyeli Betonların Mekanik Özellikleri**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 10/04/2019 Çarşamba günü saat 11:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliğiyle karar verilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fuat KÖKSAL
(Danışman)

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYA

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun .09.../05.../2019 tarih ve .22... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

.10.../05.../2019


Prof. Dr. Mustafa SAÇMACI
MÜDÜR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
2.1. Polimer Esaslı Sentetik Lifler	4
2.2. Betonlarda Kullanılan Sentetik Lifler	6
2.3. Betonlarda Kullanılan Sentetik Liflerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	7
2.4. Sentetik Lif Takviyeli Betonların Özellikleri.....	11
2.4.1. Akrilik Elyaf Takviyeli Beton	12
2.4.2. Aramid Elyaf Takviyeli Beton.....	13
2.4.3. Karbon Lif Takviyeli Beton.....	15
2.4.4. Naylon Lif Takviyeli Beton	19
2.4.5. Polyester Lif Takviyeli Beton.....	21
2.4.6. Polietilen Lif Takviyeli Beton	21
2.4.7. Polipropilen Lif Takviyeli Beton	22
2.4.7.1. Taze Beton Özellikleri ve İşlenebilirliği.....	22
2.4.7.2. Basınç Dayanımı.....	23
2.4.7.3. Statik Modül ve Darbe Hızı.....	23
2.4.7.4. Eğilme Dayanımı (Kopma Modülü).....	24
2.4.7.5. Darbe Dayanımı.....	25
2.4.7.6. Yorulma Dayanımı ve Dayanma Limiti	26
2.4.7.7. Eğilme Tokluğu ve Çatlak Sonrası Davranış.....	28
2.4.7.8. Büzülme ve Çatlama (Rötre)	31
2.4.7.9. Yapışma Gücü ve Yüksek Sıcaklıklarda Testler	34
2.4.8. Hibrit (Kombinasyon Birleşimli) Elyaf Takviyeli Beton.....	34
2.5. Kompozit Üretim Teknolojileri.....	35
2.6. Lif Parametreleri	36
2.7. Sentetik Lif Takviyeli Beton Uygulamaları	37
2.7.1. Karbon Lif Takviyeli Beton Uygulamaları	37
2.7.2. Polipropilen ve Naylon Elyaf Takviyeli Beton Uygulamaları.....	38
2.8. Sentetik Lifli Betonların Özellikleri.....	38
2.8.1. Basınç Dayanımı.....	38
2.8.2. Eğilme Dayanımı	40
2.8.3. Tokluk.....	42
2.8.4. Elastik Modül.....	43
2.8.5. Yarmada Çekme Dayanımı.....	45
2.8.6. Kırılma Enerjisi.....	47
2.8.7. Darbe ve Yorulma Dayanımı	48
2.8.8. Korozyon	50

2.8.9. Sünme ve Büzülme	51
2.8.10. Aşınma, Erozyon ve Kaviteasyon.....	54
2.8.11. Donma-Çözülme	55
2.9. Kırılma Enerjisi Ölçme Deney Yöntemleri.....	57
2.9.1. ASTM Yöntemi	57
2.9.2. RILEM Yöntemi	60
2.9.3. EN 14651 Yöntemi	62
3. DENEYSSEL ÇALIŞMA.....	64
3.1. Deneysel Malzemeler	64
3.1.1. Çimento.....	64
3.1.2. Agregat.....	64
3.1.3. Polimer Esaslı Sentetik Makro Lif.....	65
3.1.4. Akışkanlaştırıcı	66
3.1.5. Karışım Suyu	66
3.2. Karışım Oranları.....	66
3.3. Numune Üretimi.....	67
3.4. Beton Deneyleri.....	69
3.4.1. Taze Beton Deneyleri	69
3.4.1.1. Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyi	69
3.4.1.2. Hava Miktarı Tayini Deneyi.....	69
3.4.1.3. Slump (Çökme) Deneyi	71
3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	72
3.4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini	72
3.4.2.2. Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini	73
3.4.2.3. Yarmada Çekme Dayanımının Tayini	76
3.5. Deney Sonuçları	77
3.5.1. Taze Beton Deney Sonuçları.....	77
3.5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	77
3.5.2.1. Basınç Dayanımı	77
3.5.2.2. Eğilme Çekme Dayanımı	77
3.5.2.3. Yarmada Çekme Dayanımı	78
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	114

POLİMER ESASLI SENTETİK MAKRO LİF TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Cem BACANLI

Yozgat Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

2019; Sayfa: 128

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

ÖZET

Bu çalışmada, sentetik makro liflerin betonların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Dört farklı sentetik makro lif belirli oranlarda betona katılarak numuneler üretilmiştir. Karışımlarda su/çimento oranı sabit tutulmuştur. Üretilen numunelere 28 gün standart kür uygulandıktan sonra numuneler üzerinde basınç dayanımı ve eğilmede çekme deneyleri yapılmıştır. Eğilme çekme deneyinden yük-sehim eğrileri ve buna bağlı olarak tokluk değerleri hesaplanmıştır.

Eğilme deneyinden elde edilen deney sonuçlarından sentetik makro liflerin betonların ilk çatlak yükünü, eğilmede çekme dayanımını ve tokluğunu arttırdığı, buna karşılık basınç dayanımına etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sentetik lif takviyeli betonların eğilme dayanımı ve tokluk üzerinde elde edilen iyileşmenin lif tipine bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Sentetik Lif, Mekanik Özellikler

**MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER BASED SYNTHETIC
MACRO FIBER REINFORCED CONCRETE**

Cem BACANLI

**Yozgat Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of civil engineering
Master of science thesis**

2019; Page: 128

Thesis Supervisor: Professor Fuat KÖKSAL

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of syntetic macro fiber reinforced concrete was investigated. Concrete specimens were produced by using four different syntetic macro fibers. Water/cement ratio was kept constant im mixes. Compressive and flexural tensile tests were performed on specimens after 28-days standard curing. Load-deformation curves obtained from flexural tensile tests were used to evaluate the toughness of concretes.

From the flexural test results, it was observed that the syntetic macro fibers increase the first crack, flexural strength and toughness, however there were no significant effects on compressive strength. It was recorded that the enhancements on flexural strengths and toughnesses were dependent on fiber type.

Keywords: Concrete, Synthetic Fiber, Mechanical Properties

TEŞEKKÜR

Öncelikle mesleki hayatım ve yapmış olduğum tüm çalıőmalarım süresince bilgi ve tecrübesi ile bana hayatımın her alanında yardımcı olan çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitimin boyunca gerek araőtırmalarım gerekse tezimin yazım aşamasında hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen başta Sayın Yrd. Doç. Dr. Yuőa ŐAHİN'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat ŐAHİN'e ve emeği geçen Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatta desteklerini benden hiç esirgemeyen ve hiçbir konuda beni yalnız bırakmayan sevgili babam Arif BACANLI'ya, başarabileceğime inanan ve güvenen sevgili annem Gülden BACANLI'ya, her zaman her konuda en büyük destekçim olan ağabeyim Cahit BACANLI'ya, dualarını ve emeklerini benden esirgemeyen niőanlım Nazlı ÜMÜT'e teşekkürlerimi sunarım.

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Lif Türlerinin Önemli Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri [10].....	4
Tablo 2.2 Lif Tiplerine Ait tipik Fiziksel Özellikler [47]	9
Tablo 2.3 Aramid Elyaf Takviyeli Beton Kompozitlerinin Malzeme Özellikleri.....	16
Tablo 2.4. Karbon Liflerin Mekanik Özellikleri	17
Tablo 2.5. Polipropilen Lifli Beton Numunelerin Deney Sonuçları [98]	40
Tablo 2.6. SLB' ların Kalıcı Dayanım Faktörlerine Göre Sınıflandırılması [77]	60
Tablo 3.1 Portland Çimentosunun (CEM II A-L 42.5 R) Özellikleri.....	64
Tablo 3.2 Agrega Özellikleri.....	65
Tablo 3.3. Çalışmada Kullanılan Sentetik Liflerin Özellikleri.....	66
Tablo 3.4. Beton Karışım Oranları ve Taze Beton Deney Sonuçları	67
Tablo 3.5. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları	77
Tablo 3.6. Taze Beton Deney Sonuçları.....	78
Tablo 3.7. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	79
Tablo 3.8. Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları.....	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Akriklik Lif İçeriğine Karşı Ortalama Eğilme Mukavemeti [19].....	12
Şekil 2.2. Aramid Elyaf Takviyeli Betonun İki Yıllık Yaşlanmadan Sonra (%1,78 Liflerin Bükülme Mukavemeti) [37]	14
Şekil 2.3. Aramid Elyaf Takviyeli Betonun Hacimce %1,78 Liflerin Eğilme Direnci	15
Şekil 2.4. Çeşitli Gerilme Mukavemetlerine Sahip Hacimce %3 Hacim Karbon Elyaf İçeren Kompozitler İçin Eğilme Eğrilerine Karşı Tipik Eğilme Dayanımı [18]	17
Şekil 2.5. Naylon İçeriğine Karşı Farklı Yaştaki Darbe Mukavemeti [18]	18
Şekil 2.6. Akriklik, Aramid ve Naylon Elyaf Takviyeli Beton İçin Yüke Karşı Yük-Deplasman Eğrileri [18]	19
Şekil 2.7. Çeşitli Lif İçerikleri İçin Polietilen Fiber Takviyeli Betonun Tipik Eğilme Yükü-Eğilme Eğrileri [34].....	22
Şekil 2.8. Kopma Modülünün Kesit Alanına Oranı.....	25
Şekil 2.9. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton İçin Darbe Testi Sonuçları	26
Şekil 2.10. Polipropilen Fiber Takviyeli Betonun Yorulma Dayanımları [67]	28
Şekil 2.11. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton İçin Yük-Sapma Karşılaştırma Eğrileri	28
Şekil 2.12 Doğranmış Polipropilen Lif İçeren Optimize Kompozit İçin Temsili Sapma Eğrisi [80]	29
Şekil 2.13. Lif Hacmi İçeriğine Karşı Ortalama Çatlak Genişliği [83]	31
Şekil 2.14. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton Numuneleri ve Referans Beton Numuneleri İçin Çekme Gerilmesine Karşı Zamanla Değişen Rötire Çatlağı Grafikleri [43].....	32
Şekil 2.15. Karbon-Çelik Hibrit Elyaf Betonarme Tokluk-Güçlendirme Faktörü Grafiği	35
Şekil 2.16. Lif Çapı ve Denye İlişkisi [93]	36
Şekil 2.17. Değişik Lif Hacimlerinin Dayanım-Deformasyon İlişkisine Etkisi [131].....	39
Şekil 2.18. Betonun Elastiklik Modülünün Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	44
Şekil 2.19. a)7 Günde Matris-Lif Arayüzü b) 28.Günde Matris-Lif Arayüzü [115]	45
Şekil 2.20. Yarmada Çekme Dayanımının Lif Türü, Boyu ve Hacim Oranında Değişimi	45
Şekil 2.21. Betonda Kırılma Enerjisinin (Gf) Agregası Konsantrasyonu ile Değişimi [163] ...	48
Şekil 2.22. ASTM C 1018'e Göre ÇTDB Kirişler İçin Eğilme Deney Düzeneği [77].....	57
Şekil 2.23. Tam Elasto-Plastik Malzemenin Yük-Sehim Eğrisi.....	59
Şekil 2.24. RILEM Yöntemi Deney Düzeneği [78, 79]	61
Şekil 2.25. Tipik Yük-Sehim Eğrisi.....	61
Şekil 2.26. EN 14651' e Göre Eğilme Deneyi Düzeneği ($h_{sp}=125mm\pm 1mm$).....	63

Şekil 3.1. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi.....	65
Şekil 3.2. Agrega Çimento ve Su Karışım Harcı Hazırlanması.....	67
Şekil 3.3. Liflerin Harç İçerisine Katılması.....	68
Şekil 3.4. Karışım Harcının Numune Kaplarına Konulması.....	68
Şekil 3.5. Üretilmiş Numuneler.....	69
Şekil 3.6. Birim Hacim Ağırlık Deney Düzeneği.....	70
Şekil 3.7. Hava Miktarı Tayini Deney Düzeneği.....	70
Şekil 3.8. Slump (Çökme) Deney Düzeneği.....	71
Şekil 3.9. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deney Düzeneği.....	72
Şekil 3.10. Yükleme Düzeneği.....	73
Şekil 3.11. Tipik Yük-sehim Grafiği ve Artık Gerilme Noktaları.....	74
Şekil 3.12. Kiriş Numunesinin Eğilme Deneyi Sonrası Kesit Görünümü.....	75
Şekil 3.13. Kiriş Numunelerin Eğilme Deneyi Sonrası Görünümü.....	76
Şekil 3.14. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği.....	76
Şekil 3.15. Yarmada Çekme Dayanımı Grafiği.....	79
Şekil 3.16. NL-4 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	81
Şekil 3.17. NL-4 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	81
Şekil 3.18. NL-4 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	82
Şekil 3.19. NL-4 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin yük-sehim eğrisi.....	82
Şekil 3.20. NL-4 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	83
Şekil 3.21. NL-4 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	83
Şekil 3.22. NL-3 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	84
Şekil 3.23. NL-3 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	84
Şekil 3.24. NL-3 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	85
Şekil 3.25. NL-3 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	85
Şekil 3.26. NL-3 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	86
Şekil 3.27. NL-3 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	86
Şekil 3.28. NL-2 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	87
Şekil 3.29. NL-2 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	87
Şekil 3.30. NL-2 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	88
Şekil 3.31. NL-2 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	88
Şekil 3.32. NL-2 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	89
Şekil 3.33. NL-2 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	89
Şekil 3.34. NL-1 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	90
Şekil 3.35. NL-1 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	90

Şekil 3.36. NL-1 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	91
Şekil 3.37. NL-1 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	91
Şekil 3.38. NL-1 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	92
Şekil 3.39. NL-1 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi.....	92



KISALTMALAR

TS	: Türk Standartları
EN	: Avrupa Formu
YPB	: Yüksek Performanslı Beton
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
RPB	: Reaktif Pudra Betonu
SLB	: Sentetik Lifli Beton
ACI	: American Concrete Institute
YDSL B	: Yüksek Dayanımlı Sentetik Lifli Beton
ASTM	: American Society of Testing Materials
JSCE	: Japan Society of Civil Engineering
RILEM	: The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures
EN	: European Standard
SIFCON	: Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar
SLPB	: Sentetik Lifli Püskürtme Betonlar
YKS	: Yapı Kimyasalları Sanayi
ÇAAD	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
OKH	: Ortalama karesel hata
OMH	: Ortalama mutlak hata
J	: Joule
d	: Çap
d_e	: Eşdeğer çap
l	: Kiriş açıklığı
L	: Sentetik lif boyu
V_f	: Sentetik lif hacmi, (%)
f_{su}	: Sentetik lif dayanımı
in	: Inch
ksi	: Kips per square inch
μ	: Mikron
s	: Saniye
σ_{cc}	: Kompozitin çekme dayanımı
σ_{mu}	: Donatısız matrisin çekme dayanımını
f_m	: Yalın betonun maksimum eğilme dayanımını
f_{cc}	: Nihai eğilme dayanımını
f_{net}	: Net eğilme dayanımı
E	: Elastisite modülü
E_{cL}	: Kompozitin uzun doğrultudaki elastisite modülü
E_{cT}	: Kompozitin enine doğrultudaki elastisite modülü
E_f	: Sentetiklifin elastisite modülü
E_m	: Beton matrisinin elastisite modülü
E_c	: Betonun elastisite modülü
s/ç	: Su/çimento oranı
P	: Yük
δ	: Sehim

P	: Maksimum yük
S	: Mesnetler arası uzunluk
W₀	: Yük-sehim ve yük-ÇAAD eğrileri altında kalan alan
B	: Numune yüksekliği
D	: Numune yüksekliği
a	: Çentik derinliği
g	: Yer çekimi ivmesi
T_b	: Kiriş numunesinin tokluğu
G_F	: Kirişin numunesinin kırılma enerjisi
l_{ch}	: Karakteristik uzunluk
M_u	: Maksimum moment
f_c	: Silindir basınç dayanımı
f_{net}	: Net eğilme dayanımı
f_{ct,fl}	: Eğilmede çekme gerilmesi
h_{sp}	: Çentikli kirişlerde çentik ucu ile numunenin üst kısmı arasındaki mesafe

1. GİRİŞ

Beton kullanımı en yaygın olan yapı malzemelerinden bir tanesidir. Neredeyse tüm inşaat yapılarında beton kullanılmaktadır. Bina, köprü, baraj, yol, su yapıları ve diğer yapıların inşaatında kullanılan ve gün geçtikçe önemi artan yapı malzemesidir. Betonun yapılarda tercih edilmesinin başlıca sebepleri; dayanıklılığı, yangına karşı direnci, su geçirmezliği, ekonomik üretimi, enerji verimliliği, yerinde imalat gibi başlıca özellikleridir. Betonun tüm bu özelliklerinin yanı sıra kalıcılığa yani uzun süreli performansa sahip olması gerekmektedir. Günümüzde yapıyı devam ettirmekte olan akla gelebilecek tüm yeraltı ve yerüstündeki yapıların inşa edilebilmesi, özellikle dayanımı, rijitliği, tokluğu, sünekliği ve dayanıklılığı iyileştirilmiş yapı malzemelerinin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Bu özelliklere sahip malzemelerin son yıllarda geliştirilmesi ile bu tür malzemeler geleneksel taşıyıcı yapı malzemelerinden ayrılarak dayanıklılığı artırılmış olan “yüksek performanslı malzemeler” adı altında toplanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür malzemelere ihtiyaç giderek artmakta bazen süneklikte performansın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir [1].

Beton teknolojisinde son yıllarda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Normal betonların, en büyük kusuru gevrek bir mekanik davranış sergilemeleridir [2].

Gevrek davranış, betonun basınç dayanımı ne kadar yüksek olursa olsun betonun enerji yutma kapasitesini hep düşük seviyede tutar. Yüksek performanslı betonların tek zaafı gevreklik değil, yangın durumunda iyi performans sergileyememesidir. İlerleyen beton teknolojisi betonu mükemmelliğe taşıyan bir çözüm olan lif donatılı betonu geliştirmiştir. Betona katılacak lifler, betonu gevreklik zaafından kurtarıp sünekliğe taşımakla kalmamış, aynı zamanda basınç dayanımına ve betonun durabilitesine katkı sağlamıştır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda 4 farklı lif ile 36 farklı karışım üretilmiştir. Bütün karışımlar için standart basınç ve elastisite modülü deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Yarma çekme deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki silindir numuneler hazırlanmıştır. Kırılma enerjisi ve eğilme

dayanımlarını belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi uygulanmak üzere 600 mm uzunluğunda 150x150 mm kesite sahip kiriş numuneler üretilmiştir.

Yüksek dayanımlı betonların sünekliliklerinin artırılması için güncel olarak deneyler yapılmakta ve araştırmalar devam etmektedir.

Yüksek dayanımlı betonların normal betonlara oranla gevrek bir yapıya ve daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip oldukları bilinmektedir. Sentetik liflerin betona katılmasıyla betonların enerji yutma kapasitelerinde diğer bir deyişle sünekliliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmektedir.

Bilinen en eski lif takviyesi önceki zamanlarda kerpiç duvarların sıvasında kullanılan kile katılan saman lifidir. Takviyeli beton için ilk çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanımı ile başlamıştır. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve çeşitlerinin betondaki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılmış olarak bulunan sentetik liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımı arttırdığı görülmüştür [1-2-3-4]

Sentetik Lif Donatılı Beton (SLDB)' en belirgin özeliği sünekliliğinin ve enerji yutma kapasitelerinin normal betonlardan çok farklı bir davranış sergilemesidir.

Sentetik liflerin betona katılmasıyla sağlanan başlıca yararlar şöyle sıralanabilir;

- 1) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton üretimi olanak sağlaması,
- 2) Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi
- 3) Etkin çatlak kontrolü
- 4) Dayanıklılığın artırılması,
- 5) Donatı işçiliğinin azalması [2]

Sentetik Lif kullanımının betonlar üzerindeki avantajı matris çatlamasından sonra görülmektedir. Ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesine sahip betonların üretilmesinde sentetik lif kullanımı önemli bir yere sahiptir [5-6].

SLDB' lar endüstriyel zemin betonları, tünel kaplamaları ve beton borular gibi zemine oturan elemanların üretiminde de geleneksel donatılı betonların yerine tercih edilebilir [7-8].

Sentetik lifli betonların sünek bir davranış sergilemesi mekanik olarak enerji yutma kapasitesini artırmasından dolayı deprem kuşağında olan bölgeler için ayrı bir önem taşımaktadır. Bundan dolayı bina önem katsayısı yüksek olan tüm yapılarda rahatlıkla kullanılabilirler.

Sentetik lifli betonlar, normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Betonda Sentetik lif kullanımının betonun mekanik davranışı ve diğer özellikleri üzerine etkileri, bu tür betonların tasarım ilkeleri konusundaki çalışmalar, bilgisayar teknolojisindeki ve yeni deney tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak devam etmektedir [9].

Bu çalışma, 4 farklı sentetik makro liflerin sabit su/çimento oranına sahip betonlarda kullanılmasıyla elde edilen sentetik lif donatılı betonların mekanik özelliklerinin araştırılmasını içermektedir. Sentetik lif tipine ve lif içeriğine bağlı olarak betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi bu çalışmayı kapsamaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Polimer Esaslı Sentetik Lifler

Betonarme yapı elemanlarının matrisi (ana kütlesi) oldukça küçük kırılma sünekliği gösteren çimentodur. Matrisin bu çok sınırlı olan kırılma sürekliliği ve yine çok düşük olan eğilme mukavemeti değeri, yüzeye yakın bölgelerde istenmeyen çatlakların ortaya çıkmasına neden olur [10].

Tablo 2.1. Lif Türlerinin Önemli Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri [10]

Lif Tipi	Çap (µm)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Çelik	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-20
Cam	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Asbest (krokidolit)	0,02-0,4	3,40	196	3,5	2-3
Asbest (krisotil)	0,02-0,4	2,60	164	3,1	2-3
Polipropilen	20-200	0,9	5-77	0,5-0,75	8
Aramid (Kevlar)	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Karbon Tip I	9	1,90	380	1,8	0,5
Karbon Tip 11	9	1,90	230	2,6	1,0
Naylon (Tip 242)	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Selüloz	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Akrilik	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietilen	-	0,95	0,3	0,7	10
Ağaç lifi	-	1,50	71,0	0,9	-
Sisal keneviri	10-50	1,50	-	0,8	3,0
Bor '	-	2,63	379	2,76	-
Pamuk	-	1,50	4,8	0,4-0,7	3-10
Polyester	-	1,40	8,3	0,7-0,9	1,4
Pamuk-yün	-	1,50	6,9	0,4-0,7	10-25
Mineral yünü	-	2,70	69-117	0,4-0,8	0,6
Titanyum alaşımı	-	4,52	117	0,7	-
Hafif alaşım	-	2,69	72	0,5	-
Alümin	-	3,30	297	3	-
Polikristalin alümin	500-770	3,90	24,5	0,65	
Grafit I	8	1,90	380-415	1,5-2,1	0,5
Grafit 11	9	1,90	240-280	2,4-2,6	1,0
Çimento Matrisi	-	2,50	10-45	3,7x10 ⁻³	0,02

Liflerin varlığı çatlakların oluşmasını önlerken, büyük uzama değerinde çok sayıda, ince dağılımlı, gözle görülmeyen olumsuz etkileri göstermeyen zararsız çatlakların

oluşmasına neden olur. Lifli betonlar, katkısız matrisli betona göre oldukça uygun bir şekil değiştirme ve aynı zamanda yüksek mukavemet özelliği gösterir [11].

Arslan (1987), Phillips (1989), Uğurlu (1994) ve Bentur ve Mindes (1998) değişik ve farklı oranda liflerin en önemli fiziksel ve mekanik özelliklerini veren tabloları çıkarmışlardır. Bu tablolardan Tablo 2.1 elde edilmiştir [10].

Bilinen cam ve çelik liflerden ziyade, gün geçtikçe betonda belirli özelliklerin Wörner'e göre iyileştirilmesi amacıyla kullanıldığı 1992 yılında yaptığı çalışma ile kanıtlanmıştır. Sentetik organik lifler denildiğinde akla; polipropilen, poliakrilnitril, polivinilalkol ve aramid türü plastikler gelmektedir. Sentetik lifler betona mukavemet açısından yüksek veriler katmaktadır. Sentetik malzemeler, tipine göre betona hacimce %0,1 ile 0,2 arasında değişen hacim oranlarında katılabildiği ifade edilmektedir [12].

Türker'e (2000) göre; polipropilen fiber elyaf, beton güçlendirme konusunda günümüzdeki en yeni metottur. Polipropilen lifler esas olarak, çelik hasır ve benzeri güçlendiricilerin yerine kullanılmak üzere dizayn edilebilmektedir. Polipropilen lif takviye elemanlarının en önemli özelliği plastik gerilme çatlaklarını ve buna bağlı hasarları yok etmektir. Betonun çarpma mukavemetini %50'ye yakın oranlarda artırırken, basınç mukavemetini %10'a ulaşan oranlarda yükseltmektedir. Yüksek trafik altındaki alanlar, hava meydanları, köprüler ve tünel inşaatları başta olmak üzere; polipropilen liflerin her türlü betonarme yapıda kullanılması önerilmektedir [13].

Sentetik liflerin betona katılmasıyla birlikte Katkısız geleneksel betonlara oranla betonun mekanik özelliklerinde gözle görülür büyük farklılıklar elde edilmiştir. Sentetik lifler, betonun gevrek olan mekanik özelliğine ve betonun çekme şekil değiştirmesine oldukça katkı sağlayarak betona yarı-sünek davranış özeliği kazandırır. Betonun Tokluk özelliği ve çatlama dayanımı katkısız halinden çok daha iyileşme gösterir. Sentetik lifli beton elde etmek için, kimyasal katkılı veya katkısız geleneksel betonlara ek olarak sentetik lif katılması gerekmektedir. Sentetik lifler mekanik olarak beton elemanların performanslarının iyileştirilmesi için betona belirli oranlarda katılmaktadır [10].

2.2. Betonlarda Kullanılan Sentetik Lifler

Çelik, Cam veya doğal olmayan çeşitli elyaf lifler inşaatta kullanılmak üzere daha önceki araştırmalarda deneylere tabii tutulmuş ve çok önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Araştırmalarda kullanılan lif türleri doğal olmayan, petrokimya ve endüstriyel ortamlarda üretimi gerçekleştirilen insan yapımı yani sentetik liflerdir. Sentetik lifler organik kökenlidir. Polimerlerin oluşumunda çeşitli varyasyonlar kullanılmaktadır. Lif tipleri Portland çimentosu ile birlikte hazırlanan beton elemanlarla deneme aşamasına tabii tutulur. Akrilik, aramid, karbon, naylon, polyester, polietilen, polipropilen gibi Sentetik lif tipleri mevcuttur.

İnşaat malzemelerinin bir bileşeni olan sentetik elyaf ilk olarak 1965'te kullanıldı [15]. Sentetik tek lifli elyaflar ABD Mühendislik Araştırma Kolları Yeniden Arama ve Geliştirme Bölümü için patlamaya dayanıklı yapılarda kullanıldı [15].

İlk deneysel çalışmalardan beri, piyasada bulunan 6 ila 60 denye aralığındaki sentetik liflerin, bu raporda daha sonra açıklanacağı üzere, çatlamaı daha iyi dağıtması, çatlak boyutunu azaltması ve betonun diğer özelliklerini geliştirdiği gösterilmiştir [18].

1970'lerin sonunda ilk kullanılan sentetik lifler daha önceki uygulamalarda 300-400 denye aralığında ve daha düşük en-boy oranlarında yapıldığı ifade edilmiştir. Daha ince denye lifli elyaflar 1980'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır [18]. İnce denye elyafları, yani nispeten küçük çaplı ve yüksek en-boy oranlı elyaflarla yapılan uygulamalar daha önce kaba elyafların yaklaşık beşte biri kadar lif hacmi yüzdeleri ile araştırmaların başladığı ifade edilmiştir. Bu düşük hacimli uygulamalarda lif hacmi %0,1 ile 0,3 oranlarında yapıldığı belirtilmiştir. Yeni uygulama alanlarının ortaya çıkmasıyla birlikte, daha yüksek lif içeriklerinin ve diğer faktörlerin, tokluk indeksini artırıcı oranda farklılaştırdığı ifade edilmiştir [18].

Tokluk endeksi, ilk çatlamaadan sonra beton matris içerisindeki liflerin yük taşıma kapasitesinin bir göstergesidir. Temel olarak, yerinde dökme beton, hacim olarak

%0,4'e kadar, sentetik elyafların minimum karışımı ile uyum sağlayacağı ifade edilmiştir [18].

Elyaf uzunluğu ve lif konfigürasyonu, bu lif içeriğinde önemli faktörlerdir. Döşeme tipi uygulamalarda, Hacimce %0,3'e kadar harmanlanmış fibrilatlanmış polipropilen lif içeriği ile yorulma kuvveti önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir [17].

2.3. Betonlarda Kullanılan Sentetik Liflerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Aşağıda belirtilen liflerin genellikle portland çimento matrislerinde iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [18].

Akrilik; Akrilik elyaf ağırlıkça en az %85 akrilonitril içerir. Akrilik elyafların seçilen özellikleri Tablo 2.2.'de gösterilmektedir. Genellikle, tekstil endüstrisinde kullanılan akrilik elyaflar 30 ila 50ksi (207 ila 345 MPa) arasında bir gerilme mukavemetine sahiptir. Bununla birlikte, pek çok elyaf takviyeli beton ürününde asbest elyafının yerini almak üzere özel yüksek mukavemetli akrilik elyaflar geliştirilmiştir. Bu liflerin 145 ksi (1000 MPa) kadar çekme mukavemetleri olduğu ifade edilmiştir [19-20].

Aramid; (Aromatik Poliamit), 1965 yılında keşfedilen yüksek modüllü, yapay bir polimerik malzemedir. Uzun yıllar deneysel araştırmalardan sonra, bu materyali elyaf formunda üretmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Aramid elyafları 1970'lerin başında, başlangıçta ticari uygulamalar için üretildi. Aramid elyafını bir takviye şekli olarak betona dahil etme çalışmaları 1970'lerin sonunda başladı. Aramid elyaf takviyeli bir çimento matrisinin mekanik özelliklerinin daha ileri araştırmalara izin verecek kadar etkili olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Bununla birlikte, aramid elyafların yüksek maliyetlidirler. Aramid elyafları, Tablo 2.2.'de gösterildiği gibi, nispeten yüksek gerilme dayanımına ve yüksek çekme modülüne sahiptir. Aramid elyaflar, sentetik cam elyafın iki buçuk katı, birim ağırlık başına beş kat daha güçlü elyaflardır. Aramid elyafın mukavemeti 320 °F (160 °C)'ye kadar etkilenmez. Aramid elyaf 392 °F (200 °C) e kadar boyutsal stabilite sergiler ve sürünme direnci gösterir. Farklı çaplarda elyaf sayısına sahip Aramid lifler de mevcut olduğu ifade edilmiştir [22-23].

Karbon; Karbon lifleri, öncelikle havacılık endüstrisi içindeki uygulamaları için yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri nedeniyle geliştirilmiştir. Diğer sentetik elyaf türleriyle karşılaştırıldığında, karbon elyafları pahalıdır ve daha önce de belirtildiği gibi aramid elyafları ile de sınırlı ticari gelişme göstermiştir. Bununla birlikte, karbon elyaf takviyeli betonun (CFRC) fiziksel özelliklerini laboratuvar araştırmaları ile belirlemeye devam edildiği belirtilmiştir [24-25].

Karbon lifleri Tablo 2.2.'de gösterildiği gibi yüksek gerilme mukavemetine ve elastik modüle sahiptir. Ayrıca çoğu kimyasala karşı inerttirler. Genel amaçlı (GP) elyaflar, izotropik (yönlendirilmemiş elyaf yapısı) ziftten yapılmıştır ve gerilme dayanımı ve elastik modülü düşüktür [26].

Naylon; Naylon, amid fonksiyonel grubu olan CONH'nin varlığı ile karakterize edilen bir polimer ailesini tanımlayan genel bir addır [27].

Giyisi, ev eşyaları, endüstriyel ve tekstil uygulamaları için piyasada çeşitli naylon lif türleri mevcuttur. Farklı katkı madde seviyeleri (ışık ve ısı dengeleyiciler, donuklaştırma maddeleri vs.) ilave edilmesi, üretim koşulları (eğirme, çekme, Doku, vb.) ve lif boyutları (enine kesit şekli ve alanı, lif uzunluğu, vb.). Şu anda, sadece iki çeşit naylon elyaf, elyaf takviyeli beton için kullanılmaktadır. Bunlar naylon 6 ve naylon 6.6'dır [26].

Naylon elyafların dayanım, tokluk ve mükemmel elastik özelliğe sahip olduğu belirtilmiştir [28].

Naylon lifler için seçilen özellikler Tablo 2.2.'de gösterilmektedir [28]. Naylon hidrofiliktir, nem oranı %4,5'tir [29]. Naylon nispeten inert bir malzemedir ve güçlü alkaliler de dahil olmak üzere çok çeşitli organik ve inorganik maddelere dayanıklıdır. Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altında iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [30].

Polyester; Polyester lifler, örneğin, polietilen tereftalat (PET) sadece monofilament formunda bulunur. Çimento kompozitlerinde kullanılan polyester elyafların deneye değeri 15-100 arasında değiştiği ifade edilmiştir [31].

Bugüne kadar, beton endüstrisi için kullanılan polyester lifleri, termoplastik poliester alt grubuna aittir. Seçilen lif özellikleri Tablo 2.2. 'de gösterilmektedir. Tüm termoplastikler sıcaklığa duyarlıdır. Normal beton servis sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda lif özellikleri değişir. 536 °F (280 °C) üzerindeki sıcaklık moleküler bozulmaya neden olduğu ifade edilmiştir [28].

Polyester elyaflar biraz hidrofobiktir (fazla su absorbe etmezler) ve portland çimento betonunun hidrasyonunu etkilemediği ifade edilmiştir [32].

Tablo 2.2 Lif Tiplerine Ait tipik Fiziksel Özellikler [47]

Lif Tipi	Eşdeğer Çap (10 ⁻³)	Özgül Ağırlık	Gerilme Direnci, (ksi)	Elastik Modül, (ksi)	Maksimum uzama (%)	Tutuşma Sıcaklığı, Derece (°F)	Ayrışma sıcaklığı, Derece (°F)	Su emme (%)
Akrilik	0,5-4,1	1,16-1,18	39-145	2000-2800	7,5-50,0	—	430-455	1,0-2,5
Aramid I	0,47	1,44	425	9000	4,04,2018	Yüksek	900	4,3
Aramid II	0,4	1,44	340	17,000	2,05,2018	Yüksek	900	1,2
Karbon PAN HM	0,3	1,6-1,7	360-440	55,100	0,5-0,7	Yüksek	752	nil
Karbon PAN HT	0,35	1,6-1,7	500-580	33,400	1,0-1,5	Yüksek	752	nil
Karbon, pitch GP	0,39-0,51	1,6-1,7	70-115	4000-5000	2,0-2,4	Yüksek	752	3,7
Karbon, pitch HP	0,35-0,70	1,80-2,15	220-450	22,000-70,000	0,5-1,1	Yüksek	932	nil
Naylon	0,9	1,01,201 4	140	750	20	—	392-430	2,8-5,0
Polyester	0,78	1,34-1,39	33-160	2500	12-150	1100	495	0,4
Polietilen	1,0-40,0	0,92-0,96	11-85	725	3-80	—	273	nil
Polipropilen	—	0,90-0,91	20-100	500-700	15	1100	330	nil

Metrik Eşdeğer: 1 in. = 25,4 mm; 1 ksi = 6.895 MPa; (derece F- 32) /1,8 = derece C.

Polyester elyafların çimento matrisi içinde birleştirilmesi mekaniktir. Portland çimento betonunda polyester elyafların uzun süreli dayanıklılığı konusunda bir görüş birliği bulunmadığı belirtilmiştir [26].

Polietilen; Lif uzunluğu boyunca siğil benzeri yüzey deformasyonları olan monofilament formundaki polietilen, betonda takviye olarak kullanılmak üzere üretildiği ifade edilmiştir [33].

Bu deformasyonların çimento hamurundaki ve harçtaki mekanik bağlamayı iyileştirmesi amaçlanmıştır. Seçilen lif özellikleri Tablo 2.2.'de gösterilmektedir. Polietilen elyafların geleneksel karıştırma teknikleri kullanılarak %4'e kadar hacim yüzdeleri ile kolayca beton karışımlarında kullanılabilceği ifade edilmiştir [34].

Hamur biçiminde polietilen de beton karışımlarında kullanılmıştır. Bu uygulamada ince düzensiz elyaf lifi, filtrasyon sağlayacak çimento içerisinde bulunan ince tozları tutma ve asbest elyaflarının kullanımına alternatif olarak tasarlandığı belirtilmiştir [35-36].

Polipropilen; Monofilament form lifleri, malzemenin bir dairesel kesitli kalıptan sıcak çekildiği bir ekstrüzyon işlemiyle üretildiği ifade edilmiştir [37-38].

Polipropilen liflerin seçilen özellikleri Tablo 2.2.'de gösterilmektedir. Polipropilen hidrofobiktir, yani su emmez. Polipropilen elyafların beton matris içerisinde kimyasal olarak bağlanması beklenmemekle birlikte, yapışmanın mekanik etkileşimle gerçekleştiği ifade edilmiştir [39].

Polipropilen elyaflar homopolimer polipropilen reçineden üretilmekte ve birçok lif türüne göre erime noktası ile elastik modülünün düşük olduğu ifade edilmektedir [40].

Sıcaklığın sentetik lifler üzerindeki etkisi, bu tabloda, liflerin erime, oksitlenme veya ayrışma sıcaklıklarının listelenmesiyle gösterilmektedir. Sentetik elyafların, üretildikleri polimerlerin kristal kısımları, ısıtılarak sıvı hale dönüştürüldüğünde eritilmesiyle elde edilir. Bu fiziksel değişimin meydana geldiği sıcaklığa erime noktası denir. Bir elyafın erimeden önce bozunması halinde, erime noktasına

ulaşmadan önce daha düşük bir sıcaklıkta meydana gelebilecek olası birçok kimyasal tepkime sonucunda oluşur. Tipik bir ayrışma türü olan oksidasyondur. Oksidasyon, lifin havadaki oksijenle olan kimyasal reaksiyonundan kaynaklanır. Bir ayrışmanın meydana geldiği sıcaklığa dekompozisyon sıcaklığı denir. Ayrışma genelde lifin hızla renk değiştirmesiyle fark edildiği belirtilmiştir [40].

2.4. Sentetik Lif Takviyeli Betonların Özellikleri

Düşük hacimli sentetik elyafları kullanarak belirli uygulamalar için tasarım yöntemleri henüz geliştirilmemiştir. İstenilen uygulamaya bağlı olarak, farklı üreticiler farklı hacim içeriği ve lif geometrisi önerebilir. Kabul kriterleri ASTM Standart Spesifikasyon C 1116'da belirtilmiştir [41].

Sıkıştırma kuvveti, bölme gerilimi mukavemeti ve bükülme mukavemet testleri üzerine yapılan raporlar, sentetik liflerin nispeten düşük (0.1 ila 0.2) hacim yüzdesine uygulandıklarında, bu dayanım özelliklerinde belirgin bir iyileşmenin olgun örneklerde gözlenmeyeceği sonucuna vardıkları ifade edilmiştir [42].

Sertleşmiş beton için geliştirilmiş malzeme tokluğu, elyafın hacim içeriğine ve matristeki elyafın dayanıklılığına bağlıdır. Bazı fiber türleri için SNFRC ile gelişmiş tokluk ve çatlak kontrolü özellikleri belirtilmiştir [43].

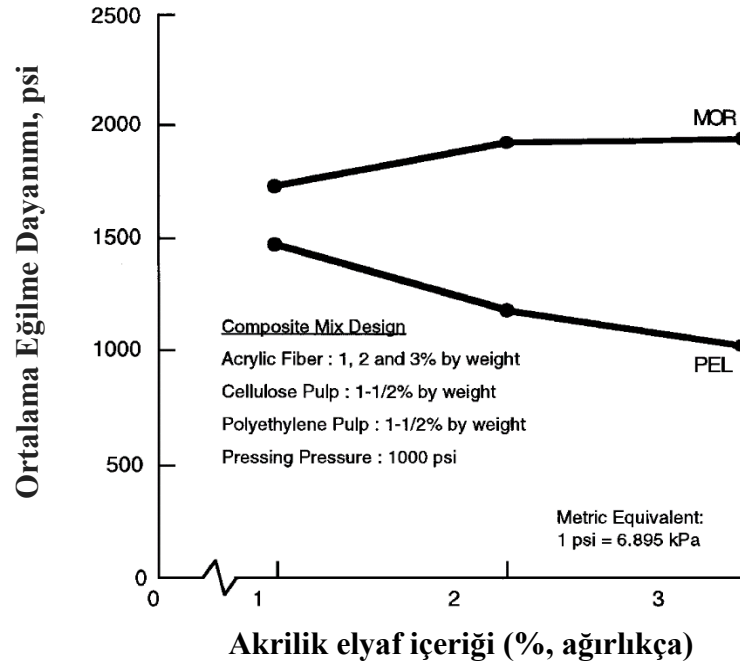
Lif takviyeli betonların eğilme direnci ve tokluk testi için kullanılan test yöntemleri yayınlanmıştır [44- 45]. Bu yöntemler, çekme ve çatlak kontrolü gibi diğer özel testlerde olduğu gibi sentetik lif takviyeli betonlara da uygulanmıştır. Büzülme ve çatlak kontrolünü değerlendirmek için standart test prosedürleri üzerine çalışmalar halen ASTM Alt-Komitesi C09.42 tarafından üstlenilmektedir. Mevcut ticari sentetik elyafların (naylon, poliester ve polipropilen) beton matrisi içine yapışması mekaniktir. Kimyasal bağ yoktur. Her maddenin elastikiyet modülü ve Poisson oranı, monofilament ya da fibrillenmiş banttan türetilen lif geometrisi ve tipliği gibi bağlama özellikleri üzerinde de etkili olacaktır. Düşme ağırlığı darbe testi ve tokluk indeks testi gibi testler çeşitli lif türlerinin bağlanma potansiyelini ve aynı zamanda lif hacmi, lif konfigürasyonu ve lif uzunluğu gibi diğer parametrelerin etkisini gösterdiği ifade edilmiştir [18].

2.4.1. Akrilik Elyaf Takviyeli Beton

Akrilik elyaf, asbest elyafının yerine kullanılmak üzere çimento esaslı kompozitler halinde uygulanmıştır. Bu işlemden, elyaf başlangıçta seyreltilmiş bir su ve çimento karışımı içine dağıtılır. Vakumla susuzlaştırma ile kombinasyon halinde bir basınç oluşturma prosesi yapılır [19-46].

Bu yöntemde, proses elyafı olarak adlandırılan diğer elyaf, karışımın homojenliğini korumak ve vakum susuzlaştırma işlemi sırasında ayrımı azaltmak için ilave edilir. Bunlar genellikle selüloz veya çok lifli hamur lifleridir. Akrilik elyaf, plastik yıpranma kırılmasının etkilerini azaltmak için geleneksel parti karıştırma işlemlerinde düşük hacimlerde de eklendiği ifade edilmiştir [20-47].

Yüksek mukavemetli akrilik elyafarla takviye edilmiş kompozitlerin performansı üzerine bazı imalat parametrelerinin etkileri hakkında veri sağlandığı ifade edilmiştir [19].



Şekil 2.1. Akrilik Lif İçeriğine Karşı Ortalama Eğilme Mukavemeti [19]

Bu araştırma; akrilik elyaf içeriği, işlem lifi içeriği, türü ve imalat esnasında kullanılan pres basıncının ürünün mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Kompozit performansını değerlendirmek için temel olarak eğilme dayanım testleri yapılmıştır.

Bir test serisinde, akrilik elyaf içeriği ağırlıkça %1 ile %3 arasında değiştiği görülmüştür. Akrilik elyaf içeriğine karşı ortalama eğilme dayanımı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi, kırılma katsayısının artması ve Orantılı Elastik Sınırın azaltılması için bir eğilim vardır. Çünkü birincil akrilik elyaf içeriği artmış, kullanılan işlem elyaflarının toplam ağırlık yüzdesinin, bileşiklerin ortalama bükülme mukavemetine çok az etkisi olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, üretim esnasında presleme basıncı 500 ila 1500 psi (3,5 ila 10,5 MPa) aralığında arttıkça, ortalama eğilme mukavemetinin arttığı belirtilmiştir [19].

2.4.2. Aramid Elyaf Takviyeli Beton

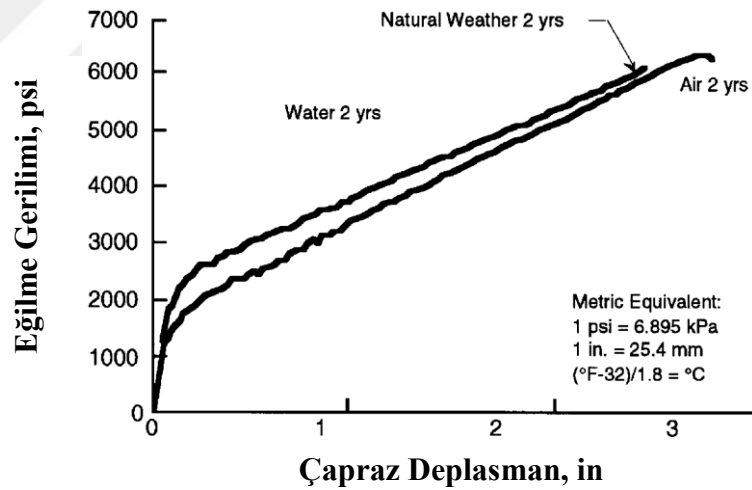
Aramid elyaf takviyeli çimento kompozitleri, geleneksel karıştırma ve şekillendirme teknikleri kullanılarak veya asbestli çimento ürünleri yapmak için kullanılan benzer üretim yöntemleriyle imal edilebildiği ifade edilmiştir [22-23].

Aramid elyaflar diğer polimerik elyaflardan nispeten daha pahalı olduğundan aramid elyaf takviyeli beton öncelikle yüksek gerilmeli bazı uygulamalarda asbest çimentosu yerine kullanıldığı ifade edilmiştir [18].

Çeşitli kür koşullarına tabi tutulan test numunelerine ait çekme ve eğilme testlerinin sonuçları Şekil 2.2'te gösterildiği belirtilmiştir [37].

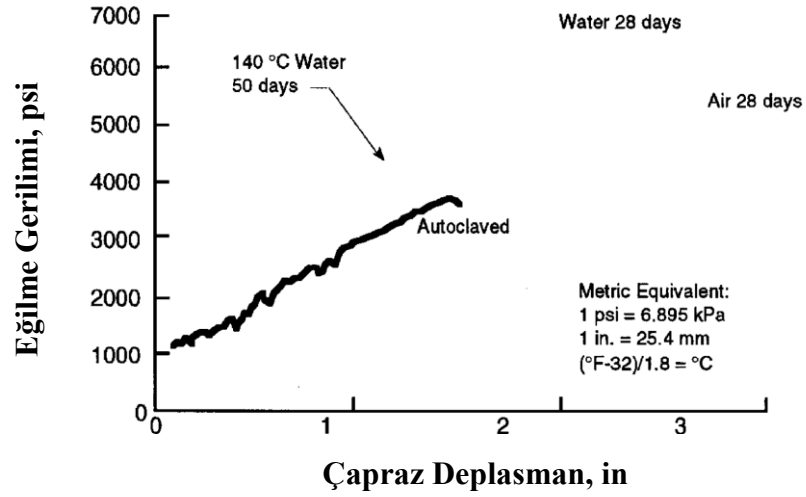
Sertleşme ve yaşlanma koşulları, test numuneleri arasında farklılık arz etmiştir. Deney sonuçları, aramid elyaf takviyeli betonun uzun süreli dayanma dayanıklılığını değerlendirmek için "Referans" numuneleri üzerinde yapılan testlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Referans numuneleri, testten önce normal bir 28 günlük nemli kürlenmeye tabi tutulur. Test Sonuçları Şekil 2.3'de gösterilmiştir [37].

1. Seçilen üç sertleştirme ortamı için en büyük gerilme mukavemeti ve kopma modülünün azalmadığı görülmüştür. (Suda iki yıl 68 F [20 C], 68 F [20 C] Garston, Birleşik Krallık'ta doğal havada ve iki yıl koşullarında)
Havada saklama koşulları için gerilme direnci ve darbe mukavemetleri artar ve oransal elastik limit gerilimi azalır. Suda saklama koşulları için, gerilme direnci ve darbe mukavemeti azalmıştır.
2. 140 °F'de suda saklama için malzeme davranışı (60 °C), 68 °C'de (20 °C) depolandıktan sonra gözlemlenene benzerdi.
3. 45 gün boyunca 300 °F (150 °C) havada saklama koşullarında, gerilme orantılı elastik sınırdaki ve nihai çekme dayanımında hafif bir düşüş ile sonuçlanmıştır.
4. Basınçlandırılmış kaptaki numuneler için gerilme, eğilme ve çekme mukavemetleri, kontrol numuneleri için kuvvetlere göre yaklaşık yüzde 30 daha azdır.



Şekil 2.2. Aramid Elyaf Takviyeli Betonun İki Yıllık Yaşlanmadan Sonra (%1,78 Liflerin Bükülme Mukavemeti) [37]

Farklı lif içeriğinin aramid elyaf takviyeli beton matrisinde çekme gerilmesi etkisini değerlendirmek için gerilme testleri yapılmıştır. Elyaf içeriği hacim olarak %0 ve %2 arasında değişken ve lif yönü tek yönlüdür. Sonuçlar, %1,45'in üzerinde lif içeriği için eğilme noktasının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, elyaf içeriği arttıkça, en büyük gerilme mukavemeti Young Modülü ve toklukluğun arttığı ifade edilmiştir [18].



Şekil 2.3. Aramid Elyaf Takviyeli Betonun Hacimce %1,78 Liflerin Eğilme Direnci

Nanni'ye göre aramid elyaf takviyeli çimento, beton ve harç için özellikle tokluk, darbe direnci ve eğilme performansında üstünlük sergilediğini belirtmişlerdir. Aramid elyafların maliyetlerine göre yaygın bir uygulama gösterdiği ifade edilmiştir [48].

2.4.3. Karbon Lif Takviyeli Beton

Karbon fiber takviyeli beton, toplu döküm ile imal edilebilir. Karbon fiber bir çimento matrisine tekli lifler halinde katılabilir. Oluşan hamuru karıştırma işlemi esnasında dahil edilen lifler karışım boyunca rasgele yönlendirildiği belirtilmiştir [49].

Bir başka raporda, karbonfiberlerin betona eklenmesinin; kırılma tokluğunun ve boyutsal stabilitenin arttığını ortaya koymuştur. Elyaf içeriğindeki artışla birlikte Yoğun silis dumanının uygun bir süperakışkanlaştırıcı dozuyla birlikte kullanılması, bir çimento hamuru içerisinde eşit dağılımın elde edilmesinde etkili bir yöntem olduğu ifade etmektedir [50-51].

Karbonfiber takviyeli beton kompozitlerinde lif oryantasyonunun ve dağılımının etkileri ifade edilmiştir [52].

Tablo 2.3 Aramid Elyaf Takviyeli Beton Kompozitlerinin Malzeme Özellikleri

Kürlenme/ Yaşlanma Koşulları	Gerilme özellikleri					Eğilme özellikleri				DD ft-lb/in, ²
	NGM (psi)	NGM, (%)	OES (psi)	OES (millionths)	EM (ksi)	KK (psi)	OES (psi)	OES (millionths)	EM (ksi)	
Su 28 gün	2335	1,53	1285	318	4045	6440	2235	891	2900	8,1
68 F 180 gün	2175	1,28	1340	252	5380	6440	2365	773	3115	7,0
2 yıl	1970	1,08	1030	210	4915	6310	2565	850	3250	5,7
Hava 180 gün	2088	1,79	1050	265	3990	6775	1825	853	2235	8,4
68 F 2 yıl	2146	1,69	554	167	3495	6585	1395	587	2540	10,5
Hava 2 yıl	2088	1,40	685	168	4105	6315	2275	768	3205	6,7
Su 7 gün	2130	1,24	1295	258	4945	5730	1915	713	2725	8,1
140 F 50 gün	2390	1,26	1045	230	4555	6020	1855	785	2320	5,9
180 gün	1780	1,11	910	185	4915	5540	2305	710	3320	5,2
Hava 7 gün	1900	1,69	1075	348	3335	4990	1985	1300	1665	7,1
300 F 45 gün	1755	1,91	530	252	2335	5455	1990	964	2405	9,5
Basınçlandırılmamış 180 F 16 saat	1365	1,14	805	212	3990	3610	1915	1290	1535	7,5
Kontrol 28 gün	1940	1,41	1110	283	3930	5280	1740	883	1985	10,9

Düşük modüllü karbon elyaflarını kullanan betonların etki testi sonuçları, kullanılan elyaf hacim oranına orantılı olarak darbe mukavemetinde ve kırılma enerjisinde önemli artışlar gösterdiği ifade edilmiştir [50].

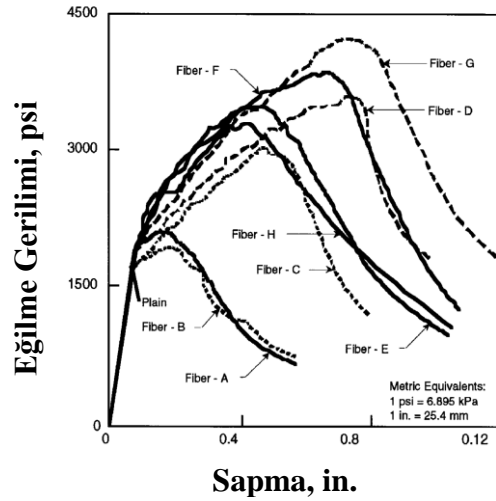
Bileşiklerin yaşı ile birlikte dayanım süresi, numunelerin bir yıl boyunca 64-122 °F (18 ve 50 °C) suda saklandıktan sonra ölçüldüğü ifade edilmiştir [52].

Tablo 2.4. Karbon Liflerin Mekanik Özellikleri

Lif Tipi	Gerilme Direnci (ksi)	Elastik Modül (ksi)	Uzama, (%)
Fiber-A	69,8	3860	1,65
Fiber-B	83,6	4426	1,89
Fiber-C	93,4	4237	2,22
Fiber-D	96,9	4498	2,17
Fiber-E	98,4	4455	2,19
Fiber-F	99,0	4295	2,33
Fiber-G	106,6	4469	2,38
Fiber-H	110,9	4701	2,36

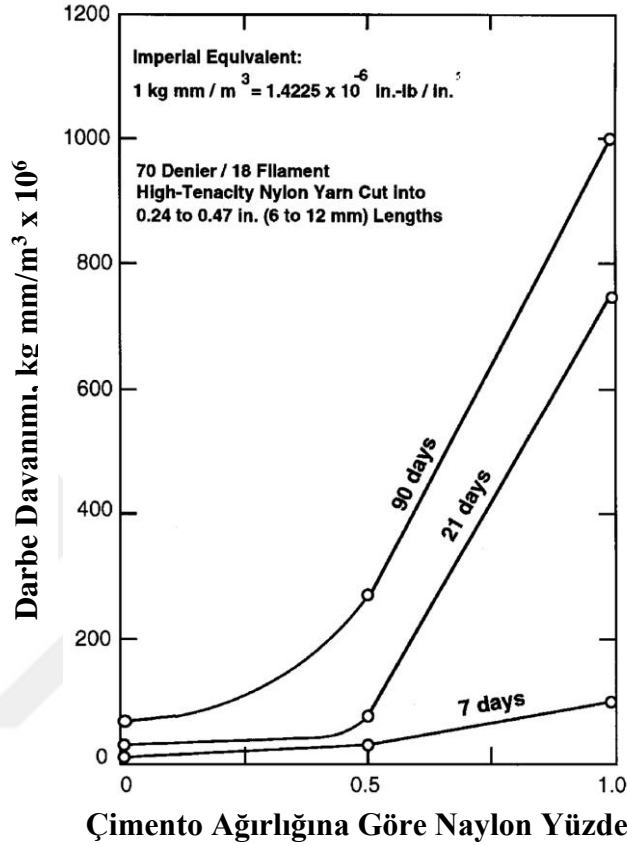
1 ksi = 6.895 MPa.

Tablo 2.4. testlerde dikkate alınan lif türlerinin her biri için gerilme mukavemetini, elastik modülü ve uzamayı gösterir



Şekil 2.4. Çeşitli Gerilme Mukavemetlerine Sahip Hacimce %3 Hacim Karbon Elyaf İçeren Kompozitler İçin Eğilme Eğrilerine Karşı Tipik Eğilme Dayanımı [18]

Şekil 2.4.'te her bir fiber türünü içeren kompozitler için elde edilen eğilme gerilmesi-eğilme eğrilerini göstermektedir.

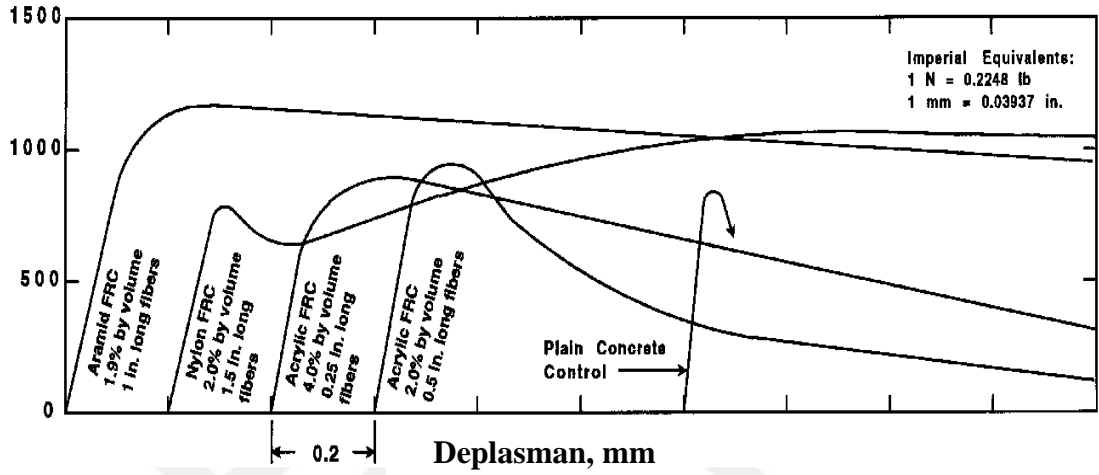


Şekil 2.5. Naylon İçeriğine Karşı Farklı Yaştaki Darbe Mukavemeti [18]

Bu eğilim, bir yıl boyunca 140 °F (60 °C) 'de suda saklanan kompozit numuneler için önemli bir dayanım kaybının bulunmadığı raporuyla ifade edilmiştir. Bu kompozit numuneler, püskürtme yoluyla suyu alınmış proses ile üretilmiş 0,43 inç (11 mm), 1,25 inç (32 mm) olmak üzere iki farklı elyaf uzunluğunda ve ağırlıkça %0,6 ile %1,3 elyaf içerecek şekilde kullanıldığı belirtilmiştir [52].

Dinamik yük testleri sonuçları, karbon elyaf takviyeli beton kompozitlerinin yorgunluk nedeniyle başlangıçta dayanımdan düştüğünü ve daha sonra bazı sınırlama dayanımlarının da azaldığını göstermektedir. Bu sınırlama dayanımlarının matris kırma gücünden çok daha büyük olduğu ifade edilmiştir. [53].

Bir başka çalışmada düşük modüllü zift tabanlı karbon elyafların çekme dayanımlarının karbon elyaf takviyeli beton kompozitlerin eğilme dayanımları üzerindeki etkileri ifade edilmiştir [51].



Şekil 2.6. Akrilik, Aramid ve Nylon Elyaf Takviyeli Beton İçin Yüke Karşı Yük-Deplasman Eğrileri [18]

Sonuçlara göre, çimento matrisini etkili bir şekilde takviye etmek için elyafın gerilme mukavemeti 93 ksi (640 MPa) 'dan daha yüksek olmalıdır. Liflerin çimento matrisi içerisinde 0,40 inç (10 mm) uzunluğunda ve rasgele olarak hacimce %3 karbon elyafı içerecek şekilde dağıldığı ifade edilmiştir [18].

2.4.4. Nylon Lif Takviyeli Beton

Nylon elyaf, betonda kullanılan en eski elyaf tiplerinden birisidir. [54-55].

Nylon liflerin, bir patlama durumunda mevcut olan, parçacık hızı, sağlam döşeme yüzeyi ve en uzaktaki parçaya olan uzaklık ile ölçülen darbe kuvvetlerini kontrol etmede özellikle etkili oldukları bulundu. Bu çalışmada patlamanın sonucu olarak nylonun darbe kuvvetlerine direnme yeteneğini doğrulandığı ifade edilmiştir [56].

Bu çalışmada, 3.28 ft (1,0 m) boşluklu küpler, sırasıyla, 0.24 ağırlık ile %12 ve uzunluğu 0,47 inç (6 ve 12 mm) liflerden oluşan iki farklı referans kullanılmıştır. Boşluklu küpler su ile doldurulmuş ve ortasına 1.76 oz (50 gm) patlayıcı

yerleştirilmiştir. Yazarlar, naylon liflerin patlama etkilerine dayanabildiklerini ve çatlak önleyici olarak rol aldığını doğruladıkları ifade etmiştir [56].

Naylon liflerin darbe direnci ve eğilme tokluğunu kazandırma kabiliyetinin iyi belgelendiği ifade edilmiştir [54-25-56-57].

Ağırlıkça %0,5 oranında bir elyaf içeriğinde naylon fiber takviyeli betonun bir başka değerlendirmesinde düz betontan 5 kat daha fazla darbe dayanımı ortaya çıktığı ifade edilmiştir [56]. Ağırlıkça %1'lik bir elyaf içeriğinde, darbe mukavemeti, Şekil 2.5 'te gösterildiği gibi düz betonunkinden 17 kat daha fazladır. Kurlenme koşulu ve lif içeriği (ağırlıkça %0,5 ila %4,0) gibi çeşitli parametrelerin etkilerini inceleyen deneyler sonucunda naylonun darbelere karşı direncini, sade betonunkinin 7,5 katından 15 katına arttırdığı ve bu değerlendirilmede Izod Sarkması yöntemi de kullanıldığı ifade edilmiştir [25].

Hacim olarak %0,5-3 arasında değişen oranlarda naylon liflerin beton içerisinde kullanılması ile tokluğun, sünekliğin ve çatlamanın kontrolünde önemli iyileşme olduğu ifade edilmiştir [30-59-60].

Tip III (yüksek erken dayanımlı) çimento ve silis kum matrisi kullanan bir çalışmada, kompakt bir gerilme testi kullanılarak ilk çatlak gerilmesi, maksimum kuvvet ve tokluk ölçülmüştür. Çentikli numuneler dört nokta eğilme yüküne tabi tutulmuş, Yükleme hattında yer değiştirmeyi ölçmek için numune çatlak ağzına bir klips aygıtı takılmış, Şekil 2.6. da veriler birinci çatlak geriliminde ve azami dayanımda bir artış gösterirken, hacmen %2-3 oranında naylon lif eklenmesiyle çatlak sonrası bölgede (tokluk) enerjiyi emme kabiliyetini geliştirdiği ifade edilmiştir [60].

Naylonun, ilk çatlaktan sonra betonun taşıma kapasitesini korumada ve arttırmada özellikle etkili olduğu belirtilmiştir [54-59-60]. Khajuria ve diğ. naylon takviyeli betonun hızlandırılmış bir yaşlanma ortamına maruz kaldıktan sonra tokluk ve çatlak kontrolü sağlama yeteneği gösterdiğini ifade etmiştir [30]. Hızlandırılmış çevre, uzun süreli dayanıklılığı belirlemek için 122 °F (50 °C) sıcaklığa ısıtılmış, doymuş tuzlu su çözeltisi kullanılmış ve 0,75 inç (19 mm) uzunluğunda naylon liflerle hacimce %0,5 oranında güçlendirilmiş eğilme kirişleri 360 güne kadar belirli zaman

aralıklarında bu ortama tabi tutulmuştur. Eğilme mukavemeti açısından çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Goldfein ve diğ. göre betonda artan eğilme direnci gösterdiği ifade edilmiştir [54-60-57]. Goldfein ve diğ. ise naylon liflerinin, yüksek fiber içeriklerinde bile eğilme mukavemetinin geliştirilmesine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir [25-59].

Ayrılma gerilimi mukavemeti ile ilgili olarak, hacimce %2,4 oranında naylon ilavesinin, mukavemeti önemli ölçüde arttırmadığı gösterilmi, bu değerlendirmenin amaçları doğrultusunda, çabuk priz alan beton ve silis kumu içeren harç karışımı kullanılmıştır. Düşük modüllü, sentetik elyafların beton pekiştirme ve özelliklerini artırma etkinliği elyaf/çimento arayüzü, elyaf geometrisi ve elyaf dağılımı ile kontrol edilmektedir. Belirli bir naylon lif türü ile çimento matrisi arasındaki düşük bağ kuvveti ifade edilmiştir [60].

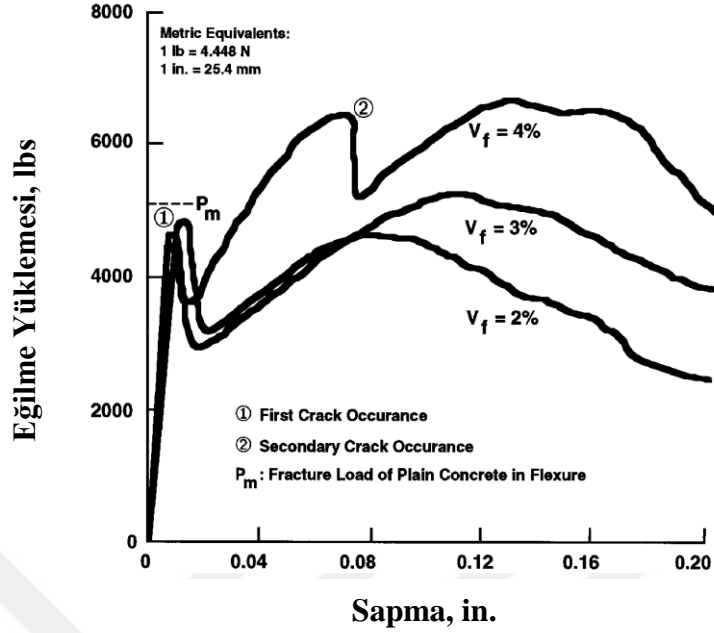
Naylon liflerin betonda büzülmeyi azaltma özelliği bir test serisinde gösterilmiştir. Naylon liflerin hacimce %1-3 aralığında değişen oranlarda eklenmesinin, boy değişimi ile ölçülen büzülmeyi %25 oranında azalttığı ifade edilmiştir [61].

2.4.5. Polyester Lif Takviyeli Beton

Polyester lifler betonda plastik çekmeye bağlı çatlama kontrol etmek için kullanıldığı ifade edilmiştir [60-62-63].

2.4.6. Polietilen Lif Takviyeli Beton

Şekilde 2.7’de gösterildiği gibi hacimce %2 ile %4 arasında değişen polietilen elyaf içeriği ile güçlendirilmiş beton, birinci çatlağa kadar doğrusal eğilme yükü eğilimi davranışı sergilemiştir. Bu davranışın ardından, liflerin beton kırılmasının başlayana kadar yükün liflere belirgin bir şekilde aktarılması ve yükün artmasına neden olduğu görülmüştür. Şekil 2.7 de gösterildiği gibi yük artmasına neden olduğu ve çok sayıda çatlamanın meydana geldiği ifade edilmiştir [34].



Şekil 2.7. Çeşitli Lif İçerikleri İçin Polietilen Fiber Takviyeli Betonun Tipik Eğilme Yüğü-Eğilme Eğrileri [34]

2.4.7. Polipropilen Lif Takviyeli Beton

Test verileri, polipropilen elyaf içeren kompozitler için %0,1 ile %10,0 arasında değişen hacim yüzdeleriyle derlenmiştir. Bu kompozitlerin malzeme özellikleri büyük oranda değişir ve lif hacmi, fiber geometrisi, üretim metodu ve matris bileşiminden etkilenir. Tüm sentetik elyaf türleri için geçerli olduğu ifade edilmiştir [4].

2.4.7.1. Taze Beton Özellikleri ve İşlenebilirliği

Lif içeriği hacimce %0,1 ile %2,0 arasında değişen harmanlanmış fibrilatlı polipropilen lifle güçlendirilmiş beton için üç farklı yöntemle (çökme, ters çökme koni süresi ve Vebe süresi) belirlenen taze beton özellikleri ve işlenebilirliği ifade edilmiştir [64-65].

Miksere eş zamanlı olarak fibrillenmiş polipropilen lifler, çimento ve agregalar eklenmiş olmasına rağmen, daha yüksek miktarlarda liflerde bile toplanma meydana gelmemiştir. Fibrilatlanmış polipropilen liflere sahip taze betonun yüzeyinde hava kabarcıkları ve ayrışma olmadığı ifade edilmiştir [64-66-67-65].

2.4.7.2. Basınç Dayanımı

Polipropilen elyaf takviyeli beton için, elyaf içeriği hacimce %0,1 ile %2,0 arasında değişen basınç kuvvetleri belirtilmiştir [37-42-64-66-67-68]. Raporlanan sonuçlarda fikir birliği yoktur. Genel olarak, polipropilen liflerinin farklı miktarlarda eklenmesinin basınç dayanımı üzerinde bir etkisi olmadığı söylenebilir. Dikkat edilen ufak farklar, deneysel çalışmada beklenen değişikliklerdir. Bunlar aynı zamanda Sertleşmiş betonun içindeki hava miktarı ve birim ağırlıklarındaki farklılıklar nedeniyle de olabilir. Bununla birlikte, polipropilen liflerin ilavesi, basınç testinde beton silindir numunelerin bozulma modları ve mekanizmaları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu, özellikle yüksek mukavemetli fiber betonlar için geçerlidir, lif takviyesi olmayan betonlarda enerji emme yeteneği olmadığı için numuneler yüksek basınç altında sünekliği olmadığı için parçalanır. Elyaf beton silindirleri yükü sürdürmeye ve büyük deformasyonları parçalara bölmeden sürdüremeye devam ettiği ifade edilmiştir [64- 67].

Lif takviyeli ve kontrol betonlarına ait özel bir beton karışımı için, yüksek miktarlarda elyafın (hacimce %2,0), daha düşük işlenebilirliğe, daha fazla terlemeye ve ayrışmaya, kontrol betonlarına nispeten daha yüksek sıkışmış havaya (%13,9) ve daha düşük birim ağırlığa sahip beton üretildiği ifade edilmiş ve betonun basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Bu gözlem, yüksek miktarlarda elyaf kullanılması durumunda karışım oranlarının ayarlanmasının önemini ortaya koymaktadır [69]. Optimum karışım oranları, daha yüksek lif hacimleri kullanıldığında deneme karışımları ile elde edilmektedir [67]. Liflerin hacimce %0,1 ile %1,0 oranında ilave edildiğinde basınç dayanımında bir azalmanın olmadığı ifade edilmiştir [67].

2.4.7.3. Statik Modül ve Darbe Hızı

Eşit basınç dayanımı prosedürüne dayalı olarak karşılaştırma yapıldığında, Fibrilatlanmış polipropilen liflerin, hacimce %0,1 ile %2,0 arasında değişen miktarlarda ilave edilmesinin, ASTM C 469 testi kullanılarak belirlendiği üzere statik elastikiyet modülü üzerinden beton silindir numuneler test edildiğinde hem 7 hem de 28 günde herhangi bir etkisi olmadığı gösterilmiştir. Kirişler ve silindirler, ASTM C 597'ye göre elyaf içeriği hacimce %0,1 ile %2,0 arasında değişen elyaf

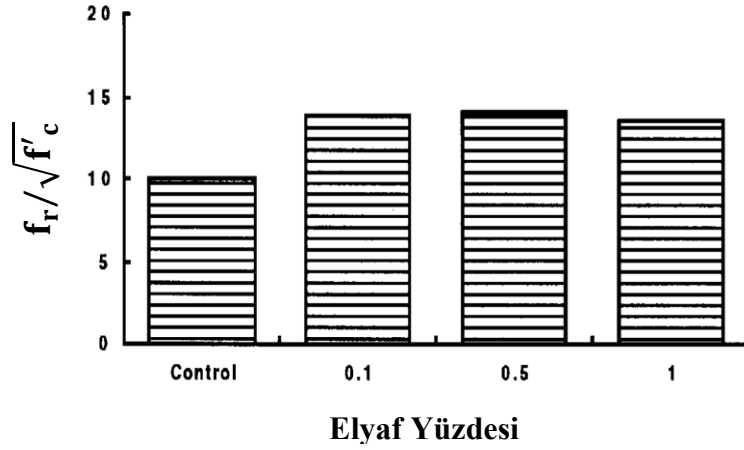
içerikli polipropilen elyaf takviyeli beton için titreşim hızı açısından 7 ve 28 gün test edilmiştir. Sonuç olarak ölçülen titreşim hızlarına göre ölçülen titreşim hızları üzerinde çok az bir etkisi olduğunu veya hiç olmadığı ifade edilmiştir [64-67].

2.4.7.4. Eğilme Dayanımı (Kopma Modülü)

Basınç mukavemeti sonuçlarına benzer şekilde, yayınlanmış literatürde polipropilen liflerinin birinci çatlak mukavemeti ve kopma modülü üzerindeki etkisi konusunda bir fikir birliği yoktur [42]. Hacim olarak %0,1 fibrile edilmiş polipropilen lif içeriğinde, eğilme dayanımında (%0,7 ila 2,6) hafif bir artış olduğu ve hacimce %0,2 ile %0,3 arasında hafif bir azalma olduğu bildirilmiştir. Ramakrishnan ve diğ. 7 ve 28 gün içinde belirlenen kopma modülünün, düz betona kıyasla hacim olarak %0,1 ile %0,3 oranında lif içeriğinde fibrile polipropilen elyaf betonarme için biraz daha büyük olduğunu ifade etmiştir [66].

Aynı temel karışım oranları kullanıldığında, lif içeriği hacimce %0,1'den %2,0'ye yükseldiğinde kopma modülü azaldığı ifade edilmiştir. Hacimce %2,0 oranında fibrillenmiş polipropilen elyaf takviyeli beton daha yüksek hava içeriğinden dolayı basınç dayanımı düşük olmakta ve eğilme dayanımı da düşük çıktığı ifade edilmektedir. Benzer şekilde hacimce %1,0 ve %1,5 fibrillenmiş polipropilen elyaf betonlar için basınç dayanımları düşük ve eğilme dayanımları da düşük olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak, doğrudan eğilme dayanımı karşılaştırmaları yanıltıcı olabilir [65].

Şekil 2.8, düz beton karışımına, çeşitli miktarlarda fibrilatlanmış polipropilen elyaf eklennesinin etkisini göstermektedir. Şekil 2.8'de , kopma modülü, f_r değerlerinin $\sqrt{f'_c}$ değerine bölünerek normalize edildiği gösterilmektedir. Uygun işlenebilirlik ve dayanım elde etmek için daha yüksek miktarda elyaf eklendiğinde karışım oranlarının uygun şekilde tasarlanması gerektiği açıkça ifade edilmiştir. Başka bir araştırmada, karışım oranları daha yüksek miktarlarda fibrilatlanmış polipropilen lifleri için deneme karışımları ile optimize edilmiştir [67]. Bu optimize edilmiş karışım oranları kullanıldığında, fibrilatlı polipropilen elyafların daha yüksek hacim yüzdeleri için basınç direncinde ve kopma modülünde herhangi bir değişiklik olmadığı ifade edilmiştir [18].



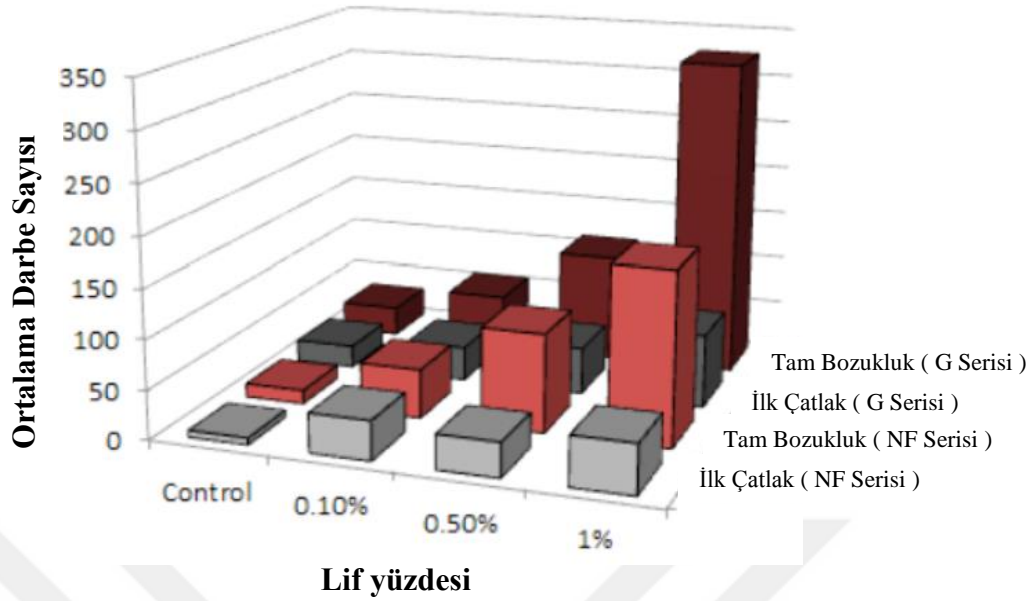
Şekil 2.8. Kopma Modülünün Kesit Alanına Oranı

2.4.7.5. Darbe Dayanımı

Darbe yüklemesi altındaki polipropilen elyaf takviyeli betonun performansını araştırmak için çok sayıda test düzeni kullanılmıştır. Polipropilen elyaf kullanıldığında arttırılmış darbe mukavemetine ilişkin raporlar bulunduğu ifade edilmiştir [54-64-69-70-71].

Darbe mukavemeti düzeltmesinin tek eksenli çekme modunda %15, eğilme modunda %50 kadar yüksek olduğu ifade edilmiştir. ACI Komitesi raporu 'na göre ACI " ağırlık düşürme " testi kullanılarak darbe dayanımı, lif içeriği hacim olarak %0,1 ile %2,0 arasında değişen ve tüm betonlar için aynı temel karışım oranlarına sahip polipropilen fiber takviyeli betonlar için ölçüldüğü ifade edilmiştir [69-74-75].

Bir başka araştırmada iki farklı karışım oranına sahip betonlar (NF Serisi için su-çimento oranı 0.40 ve G Serisi için 0.5) ve üç farklı lif içeriği (hacim olarak %0,1, %0,5 ve %1,0) kullanılarak betonarme dayanımı ACI " ağırlık düşürme " testi kullanılarak darbe dayanımı testi yapıldığı ifade edilmiş ve şekil 2.9'da Gve NF Serileri için ilk çatlak ve tam bozukluk için karşılaştırma çubuğu grafiği ifade edilmiştir [64] Lifli betonun düz betondan çok daha büyük darbe dayanımına sahip olduğunu ve ayrıca lif içeriği arttıkça darbe dayanımının arttığı ifade edilmiştir



Şekil 2.9. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton İçin Darbe Testi Sonuçları

Polipropilen fiber takviyeli beton için kırılma enerjisinde %33 ila %1000 arasında artış olduğu ifade edilmiştir [75-72].

Geleneksel donatılara ek olarak hem orta şiddette hem de yüksek dayanımlı beton numuneleri, hacimce %0,5, 1,5 inç (37 mm) uzunluğunda fibrillenmiş polipropilen lifler içermektedir. Darbeli kırılma enerjisindeki iyileşme orta kuvvetli beton (6000 psi [42 MPa]) kullanılarak iki kat, yüksek dayanımlı beton (12.000 psi [82 MPa]) kullanılarak yaklaşık on kat arttığı ifade edilmiştir [75-72].

2.4.7.6. Yorulma Dayanımı ve Dayanma Limiti

Elyaf takviyeli betonun önemli özelliklerinden biri, düz betona kıyasla yorulma mukavemetinin artırılmasıdır. Çoğu uygulamada, özellikle kaldırımlarda, köprü döşemelerinde, güvertelerde, apronlarda, endüstriyel zeminler ile deniz yapılarında eğilme yorulma dayanımı ve dayanıklılık sınırı, esas olarak, bu yapılar yorulma yük çevrimlerine maruz kaldığından, önemli tasarım parametreleridir.

Betonun dayanıklılık sınırı, kirişin, düz beton kopma modülünün yüzdesi olarak ifade edilen, iki milyon döngü ters çevrilmemiş yorulma yüküne dayanabileceği eğilme yorulma gerilmesi olarak tanımlanır. Çeşitli lif içeriğine sahip olan

polipropilen fiber takviyeli beton için eğilme yorulma dayanımı ve dayanma limitleri ifade edilmiştir [18-64-65].

Özel olarak, polipropilen liflerin ilavesi, küçük miktarlarda bile olsa, eğilme yorulma dayanımını arttırmıştır. Aynı temel karışım oranlarını kullanarak, üç fiber içeriği (hacim olarak %0,1, %0,2 ve %0,3) için eğilme yorulma dayanımı belirlenir ve iki milyon döngü için dayanım limitinin %15 ile %18'e yükseldiği ifade edilmiştir [66].

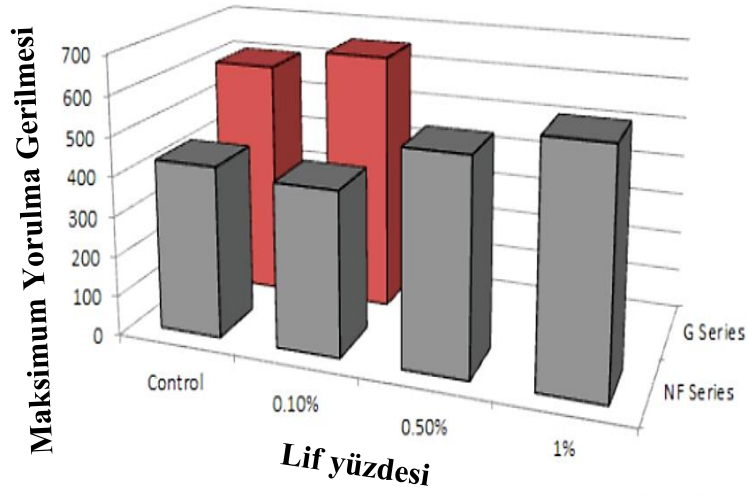
Polipropilen lifler de dahil olmak üzere dört çeşit lif için yorulma yüküne maruz kalan fiber betonarme betonun davranış ve performans özelliklerini belirlemek için bir başka kapsamlı araştırma yapıldığı ifade edilmiştir [69].

İki elyaf içeriğine sahip (hacimce %0,5 ve %1,0) ve aynı temel karışım oranlarını kullanan betonlar dört milyon döngüye kadar test edilmiştir. Polipropilen elyaf takviyeli betonda hacimce %0,5 ve %1,0 lifler için dayanıklılık limiti sırasıyla %67 ve %70 olduğu gözlenmiş ve düz kontrol betonunda, dayanma limiti %65 olduğu ifade edilmiştir [69].

Optimize edilmiş karışım oranları kullanılarak yapılan bir başka araştırmada, ağırlıkça %0,1, %0,5 ve %1,0 fiber içerikleri olan betonlar için eğilme yorulma dayanımları belirlendiği ifade edilmiştir [67].

Eğilme yorulma dayanımları Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, lif içeriği arttıkça yorulma dayanımının artmasına yönelik bir eğilim vardır. İki milyon döngü için dayanıklılık limitleri (maksimum eğilme yorulma dayanımının kopma modülüne oranı), düz betonarme ile karşılaştırıldığında sırasıyla yüzde %0,1, %0,5 ve %1,0 lif içeriği için hacim olarak %16, %18 ve %38 oranında arttığı ifade edilmiştir [67].

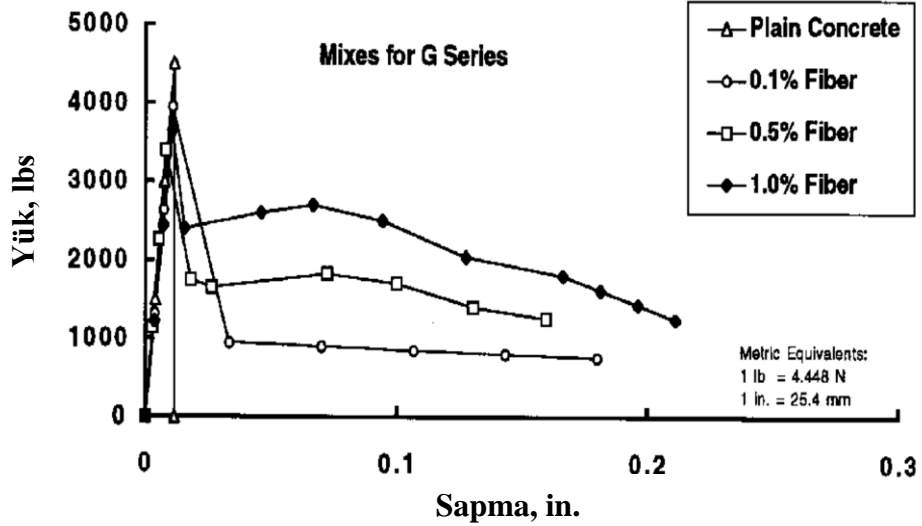
Çelik lif takviyeli betona benzer şekilde, polipropilen lif takviyeli beton, yorulma yüklemesine maruz kaldıktan sonra artmış statik eğilme dayanımı gösterir. Dolayısıyla, dayanma sınır değerinin altında yorulma stresine maruz kalan polipropilen elyaf takviyeli beton için, potansiyel kopma değerinde bir artış olduğu söylenebilir [64]



Şekil 2.10. Polipropilen Fiber Takviyeli Betonun Yorulma Dayanımları [67]

2.4.7.7. Eğilme Tokluğu ve Çatlak Sonrası Davranış

Elyaf içeriği için hacimce %0,1-2,0 aralığında değişen eğilme direnci ve çatlak sonrası davranış ifade edilmiştir [17-18-38-66-65-78-79].

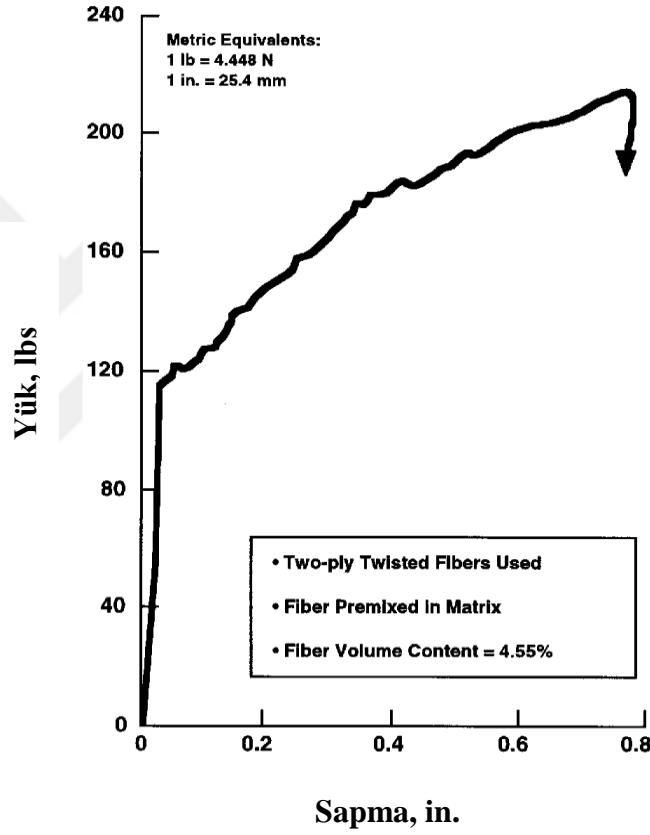


Şekil 2.11. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton İçin Yük-Sapma Karşılaştırma Eğrileri

Tokluk, ACI Komite Raporu 544.2R ve ASTM C 1018'de bildirilen ACI yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çoğunlukla, rapor edilen en eski sonuçlar ACI yöntemine

ve en son bildirilen sonuçlar ASTM yöntemine dayandığı ifade edilmiştir. Lif hacminin %0,2 ve %0,3'ü olan kirişler toklukta önemli bir artış göstermiştir [65].

Lif uzunluğu, elyaf malzemesi, fiber geometrisi ve bağlama özellikleri gibi faktörler tokluğu ve çatlak sonrası davranışları da etkiler. Polipropilen liflerin hacimce %0,1'lik bir elyaf içeriğine eklenmesinden ötürü, çatlak sonrası davranış ve betonun enerji emme kapasitesinde bir gelişme olduğu ifade edilmiştir [69-75].



Şekil 2.12 Doğranmış Polipropilen Lif İçeren Optimize Kompozit İçin Temsili Sapma Eğrisi [80]

Polipropilen elyaf takviyeli kirişler, yükleri ilk çatlak yükünün ötesinde, ancak düşük yük seviyesinde tutabilir. Elastik ve plastik şekil değiştirme enerjisini absorbe etmek ve çatlaklar boyunca çekme gerilimleri gerçekleştirebilme yeteneği sayesinde yük taşıyabilmesi önemli bir performans faktördür.

Bu faktörler, çatlak açma deformasyonları meydana geldikten sonra çatlakların büyümesini kontrol etmek için bir mekanizma sağlar. Fiber içeriğinin çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi üzerinde etkisi olduğu ifade edilmiştir [64].

Testlerde; maksimum yükün yüzdesi olarak ifade edilen yükte, hacimce %0,1, %0,5 ve %1,0 fiber içeren kirişler için yükteki çatlak sonrası azalmanın sırasıyla %45, %27 ve %26 olduğunu ortaya koymuştur. Yükte çatlak sonrası azalma, lif içeriği arttıkça genel olarak gösterildiği gibi azaldığı şekil 2.11’de ifade edilmiştir [64].

Naaman ve diğ. aynı zamanda, harmanlanmış fibrilatlanmış polipropilen elyafları ile takviye edilmiş kompozitlerin, belirli optimize koşullar altında üretildiğinde, ilk çatlama sonrası mükemmel bir davranış sergilediklerini ifade etmiştir [78].

Yukarıda tarif edilen harmanlanmış fibrillenmiş polipropilen elyaf takviyeli beton kompozitinin Şekil 2.12.’de temsili eğilme yükü sapma eğrisi grafiği verilmiştir. Çoklu matris kırılması, kompozitin çatlama sonrası davranışıyla ilişkilendirildi. Bir diğer test programında ise polipropilen elyaf takviyeli kompozitlerin, ilk çatlama yükünün ötesinde yükleri sürdürebildiğini gösterdiği ifade edilmiştir [38].

Bir Başka Araştırmada ise Monofilament veya fibrillenmiş elyaf takviyeli kompozitler kullanılarak yürütülmüştür. Elyaf içeriğinin yanı sıra çeşitli diğer değişkenlerin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için testler yapıldığı ifade edilmiştir [38].

Hem laboratuarda hem de sahada, göze çarpan püskürtme beton araştırması, hacimce %0,4-0,7 aralığındaki içeriklerde harmanlanmış fibrilatlı polipropilen fiberlerle yapıldığı ifade edilmiştir [17-80-81].

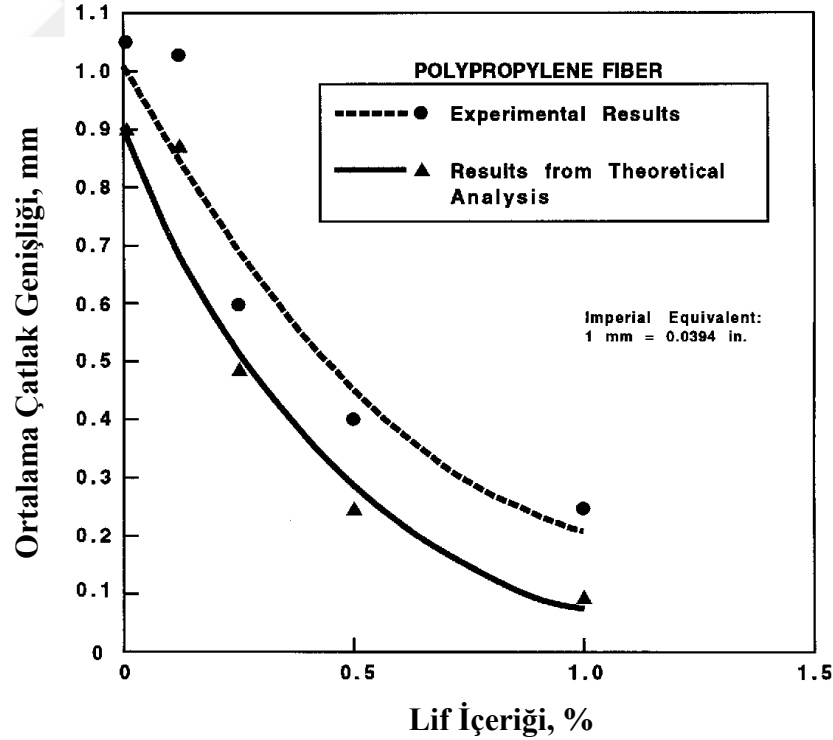
Tünel astar ve şev stabilizasyon uygulamalarında geleneksel takviye malzemelerinin yerini almak için harmanlanmış fibrilatlanmış polipropilen elyaflar kullanılmaktadır [80].

2.4.7.8. Büzülme ve Çatlama (Rötre)

Dikdörtgen ve kare olarak dökülmüş saha beton uygulama örnekleri, düşük hacimli sentetik naylon elyaf lif takviyesiyle betonun plastik çekme ve rötrede kaynaklanan çatlakları kontrol etme kabiliyetini göstermek için kullanılmıştır.

Düşük denye lifinin ve yüksek elyaf sayısının (birim hacim başına düşen elyaf sayısı), rötre çatlaklarının etkilerini azalttığı ifade edilmiştir [82-47]. Polipropilen lif takviyeli betonun rötre çatlaklarını kontrol etme kabiliyeti gösterdiği bazı çalışmalarda ifade edilmektedir [83]. Sınırlanmış rötre çatlama için ring tipi numuneler deneye tabi tutulmuştur.

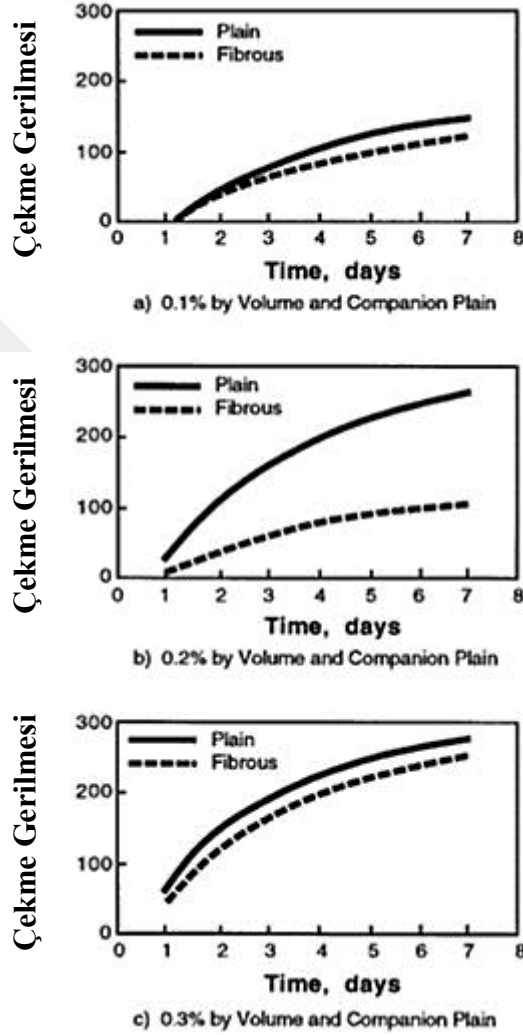
Özel üretim numunelerdeki büzülme (veya hacim değişiminde) azalmalar, hacim olarak %0,1 polipropilen elyaf kullanılarak azaldığı ifade edilmiştir [43].



Şekil 2.13. Lif Hacmi İçeriğine Karşı Ortalama Çatlak Genişliği [83]

Beton ringin tek eksenli çekme gerilmelerine maruz kaldığı kabul edilir ve çatlak genişliği özel bir mikroskop kullanılarak ölçülür. Yapılan deneylerde farklı miktarlarda polipropilen elyaftan yapılmış betonlar üzerinde çalışmalar yapılmış ve

bu çalışmalara ait sonuçlar Şekil.2.13'te gösterilmektedir. Polipropilen lif eklenmesinin düz beton ile karşılaştırıldığında, ortalama çatlak genişliğini önemli ölçüde azalttığı görülebilir.



Şekil 2.14. Polipropilen Fiber Takviyeli Beton Numuneleri ve Referans Beton Numuneleri İçin Çekme Gerilmesine Karşı Zamanla Değişen Rötne Çatlağı Grafikleri [43].

Polipropilenin veya diğer sentetik liflerin sınırlandırılmış koşullardaki hacim değişikliklerinden kaynaklanan çatlamalardaki etkilerini ölçmek için günümüzde standartlaştırılmış bir prosedür yoktur. Bununla birlikte, birçok prosedür öne

sürülmüş ve sonuçlar ASTM Alt Komitesi C09.42 Büzülme Test Grubu ile incelenmiştir.

Test numuneleri su altında bekletildi ve daha sonra hızlandırılmış kurutmaya tabi tutuldu. Aynı zamanda, kontrol numuneleri ile lif içeren numuneleri karşılaştırmak için zamana karşı büzülme grafiği çizilmiştir. Bu eğriler Şekil.2.14'te gösterilmektedir [43].

Hacimce %0,1 ile %0,3 arasında değişen polipropilen içerikleri için %12 ile %25 oranında plastik büzülme azalması olduğu ve plastik rötre testlerinin ASTM C 827 ile yapıldığı ifade edilmiştir. Testler sırasında, yüzeyde terleyen suyun miktarının, liflerin eklenmesiyle önemli ölçüde düştüğü, liflerin varlığının, agrega parçacıklarının yerleşmesini azalttığı, böylece kılcal damar kanallarının hasar görmesini önlediği ve plastik beton içerisindeki granüler-arası basınçların artmasını önlediği ileri sürüldüğü ifade edilmiştir [43].

Betonda ilk çatlama sonra, polipropilen liflerin çatlaklar boyunca gerilme stresini aktardıkları düşünülür ve çatlağın devam etmesini durdurmak veya sınırlandırmak için hareket ederler ve böylece daha az sayıda daha büyük çatlaklar yerine birçok ince saç çizgisi çatlakları meydana geldiği ifade edilmiştir [84].

Diğer araştırmalara göre düşük efektif çaplı polipropilen elyafın hacmen%0,1 olduğu durumda, beton dökümünden sonraki ilk birkaç saat içinde ortaya çıkan plastik rötre çatlakları için çatlak boyutunu önemli ölçüde sınırladığını göstermiştir [85-47].

Polipropilen elyafın daha yüksek hacimli içeriği ile takviye edilmiş kompozitlerin de sınırlanmış rötre ve rötreye bağlı çatlama etkilediği, betona eklenmiş %2 polipropilen elyaf takviyeli kompozitler, sertleşmiş betonda rötreden kaynaklanan çatlama etkili bir şekilde dağıtacak önemli çatlama sonrası tokluk sağladığı, Kısıtlanmış rötre testleri sırasında betonda meydana gelen çoklu çatlakların, betonun rötreye bağlı çatlama gerilmelerini dağıtma kabiliyetini gösterdiği ifade edilmiştir [86].

2.4.7.9. Yapışma Gücü ve Yüksek Sıcaklıklarda Testler

Genel olarak, polipropilen liflerle güçlendirilmiş betonda lif ile çimento hamuru arasında mekanik bir bağ bulunmaktadır. Polipropilen kimyasal olarak inert ve hidrofobiktir, böylece lif ile çimento hamuru arasında kimyasal reaksiyon potansiyeli bulunmamaktadır. Sonuç olarak, fibrillenmiş polipropilen elyafların mekanik bağları, monofilament polipropilen elyaflarından daha büyük olabilir [37].

Polipropilen lif takviyeli betonun bazı otoklav kür teknikleri ile uyumlu olamayabileceği gösterilmiştir [41]. Testlerin sonuçları, bir otoklavda 58 psi (0,4 MPa), 284 °F (140 °C) sıcaklıkta 24 saat süreyle kürlenene ve daha sonra 241 °F (116 °C) sıcaklıkta fırında kurutulan kompozitlerin, polipropilen liflerinin termal oksidatif bozunması nedeniyle süneklikte önemli bir kayıp yaşadığını göstermektedir.

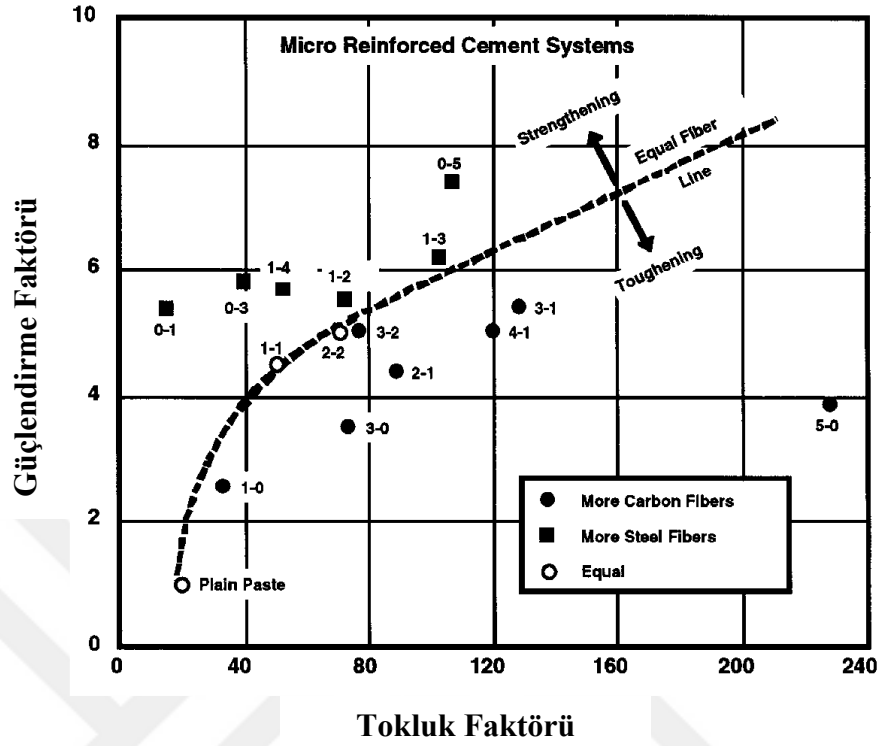
Termal bozulmanın kullanılan yüksek fırın kurutma sıcaklığından kaynaklandığı ve fırın kurutma ile bağlantılı olarak otoklav kürlemenin yalnızca kurutma sıcaklıklarının büyük ölçüde azaltıldığına kullanılabileceği ifade edilmiştir [87-88].

2.4.8. Hibrit (Kombinasyon Birleşimli) Elyaf Takviyeli Beton

Kapsamlı olarak araştırılmamasına rağmen, aynı beton karışımında iki veya daha fazla elyaf türünün kullanılması umut verici olarak kabul edilir. İki lifin karıştırılması ekonomik açıdan pek avantajlı olmadığı ifade edilmektedir. [89]. Daha yakın tarihli bir çalışmada çelik mikro lifler (25 mikron çapta ve 3 mm uzunluğunda) ve karbon mikro lifler (18 mikron çapta ve 6 mm uzunluğunda) hem tekil hemde karışım olarak incelenmiştir.

Tekil formda, çelik fiber, karbon fiberden daha iyi güçlendirme sağlamış ve ilginç bir şekilde, hibrit formda (kombinasyon halinde), Şekil 2.15'te gösterildiği gibi güçlendirme ve sertleşme için bireysel kapasitelerini korudukları ifade edilmiştir [90].

Bu nedenle, elyaf özelliklerini kontrol ederek ve uygun oranlarda birleştirerek tasarlanmış uygulamalar için hibrid fiber kompozitleri özel olarak hazırlanabileceği ifade edilmiştir [90].



Şekil 2.15. Karbon-Çelik Hibrit Elyaf Betonarme Tokluk-Güçlendirme Faktörü Grafiği [90]

2.5. Kompozit Üretim Teknolojileri

Kompozit Karışımı, her türlü sentetik elyaf takviyeli beton için yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Lifler ıslak karışıma doğrudan torbalardan, kutulardan veya besleyicilerden eklenirler. Harmanlanmış elyaf türleri elyaf demetlerinin parçalanmasını ve bunların karışım içerisinde homojen dağılmasını sağlamak için karıştırma işlemi sırasında mekanik çalkalanma gerektiği ifade edilmiştir. Polipropilen lifler, fabrikalarda gramajlı poşetler halinde hazırlanıp, çeşitli yöntemler kullanılarak betona dahil edildiği ifade edilmiştir [25-38-75-91].

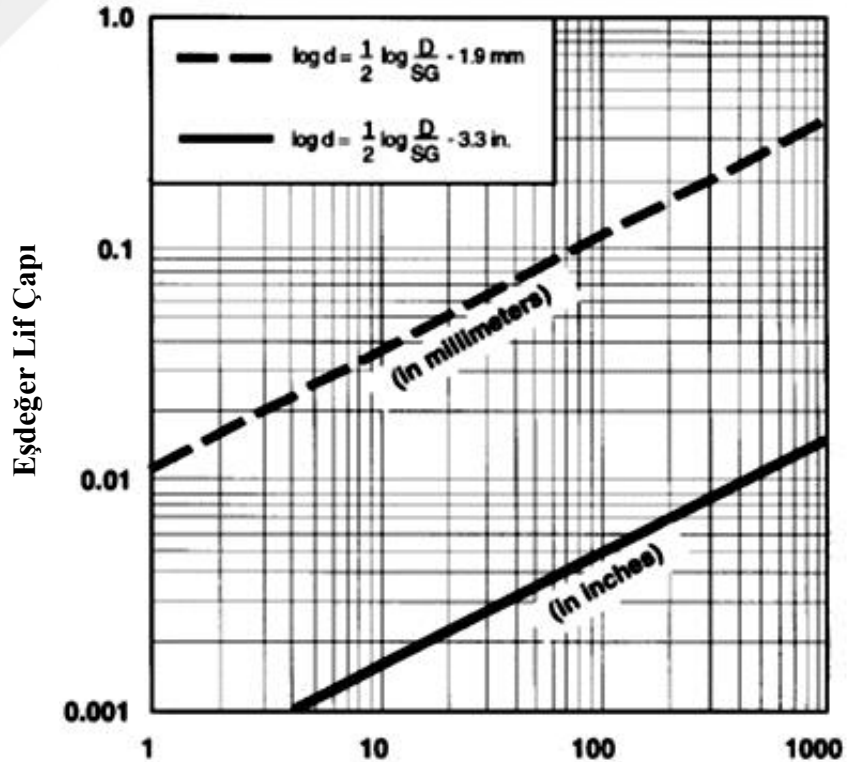
Monofilament veya fibrillenmiş kısa kesikli lifler şeklinde karıştırılabilirler. Polietilen elyafların, geleneksel karıştırma teknikleri kullanılarak %3'e varan hacim yüzdelerinde kolayca beton matrislerine dağıtılabileceği ifade edilmiştir [34].

Asbestli çimento levha imalinde kullanılan Hatschek sürecinde akrilik elyaf kullanılmıştır. Hidrofobik elyaflarda, elyaflar karışıma kaymayı azaltacak bir plastik

kayma mukavemeti sağlar. Elyafar konvansiyonel hazır betona, monofilament veya fibrillenmiş %0,1 hacimde katılarak kolayca üretilebilirler. Bununla birlikte, çökme kaybı bu noktadan sonra daha hızlı arttığı ve liflerin varlığından dolayı betonun işlenebilirliğinin azaldığı ifade edilmiştir [37-92].

Bununla birlikte, standart yerleştirme uygulamaları ile fiber beton kolayca çalışacak, yerleştirilecek ve pompalanacaktır. İlave karıştırma suyu gerekmez ve hiçbir ilave edilmemelidir. Geleneksel çökme testi elyaf takviyeli beton için uygun olmayan bir işlenebilirlik ölçütü olduğundan, işlenebilirliği değerlendirmek için ters çevrilmiş çökme konisi testinin (ASTM C 995) veya Vebe Testinin (ACI 211.3) kullanılması önerilir. Sentetik elyaflar genellikle hazır beton prekast fabrikalarında hazır betona ilave edilir ve beton kalıba yerleştirilirken geleneksel yöntemler kullanıldığı ifade edilir [37].

2.6. Lif Parametreleri



Lif Denye veya Fiber Özgül Ağırlık
Şekil 2.16. Lif Çapı ve Denye İlişkisi [93]

Mevcut ticari ve endüstriyel dökme beton uygulamalarında, sentetik elyaf, düşük hacimdeki elyaf ilavelerinde, beton hacmine dayalı olarak yaklaşık %0,1 sentetik lif eklenir.

Bu uygulamalarda, betonun dayanımı etkilenmeyeceği düşünülmekte ve çatlak kontrol özellikleri aranmaktadır.

Şekil 2.16'da deneylerle tanımlanan lif türü veya özgül ağırlığın ve inç veya milimetre cinsinden eşdeğer lif çapı arasındaki ilişkinin bir grafiği olduğu ifade edilmiştir [93].

2.7. Sentetik Lif Takviyeli Beton Uygulamaları

Sentetik lif takviyeli betonların ticari kullanımı şu anda dünya genelinde, esasen yerinde dökme beton uygulamalarında (örneğin, plakalar, kaldırımlar ve tünel kaplamaları gibi) ve fabrikada üretilen ürünlerin (kaplama panelleri, kaplama ve tonozlar) uygulamalarında kullanıldığı ifade edilmiştir [94].

Günümüzde, beton uygulamalarda düşük hacim içeren %0,1 ile %0,3 ve yüksek hacim içeren %0,4 ile %0,8 oranlarında iki farklı sentetik elyaf hacim içeriği kullanılmaktadır. Düşük hacim yüzdesi olarak anılan yüzde 0,1 ila 0,3 ve yüksek hacim yüzdesi olarak adlandırılan yüzde 0,4 ila 0,8'dir. Ayrıca iki farklı fiziksel elyaf şekli vardır. Bunlar monofilament ve fibrillenmiş banttardan üretilen elyaf [94].

Sentetik elyaf uygulamalarının çoğu, plastik rötre çatlama kontrol etmek için hacimce %0,1 seviyesindedir ve prekast ürünleri, püskürtme betonu ve yerinde dökme betonlar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Tipik olarak, elyafın uzunluğu 3/4 ile 21/2 inç (19 ile 64 mm) arasındadır veya 3/4 ile 11/2 inç (19 veya 38 mm) uzunluğundaki elyaflar kullanıldığı ifade edilmiştir [94].

2.7.1. Karbon Lif Takviyeli Beton Uygulamaları

Mevcut piyasada bulunan karbon fiber liflerinin, beton içerisinde uygulanması yüksek maliyetleri nedeniyle kısıtlıdır. Karbon fiber lifler diğer fiber türleri ile birlikte kullanılarak genel maliyet düşürülebilir. [37]. Irak'taki Al Shaheed Anıtı'nın inşasında agrega olarak mikro balonlarla hafif karbon elyaf takviyeli beton uygulanmıştır [24]. Japonya'nın Tokyo kentinde bulunan 37 katlı bir ofis binasının

inşaatına karbon lif takviyeli perde duvarlar yerleştirildiği ve bunun hem zaman hem de para bakımından önemli tasarruflar sağladığı ifade edilmiştir [49].

2.7.2. Polipropilen ve Naylon Elyaf Takviyeli Beton Uygulamaları

Bugüne kadar, çoğu polipropilen ve naylon lif takviyeli betonların ticari uygulamalarında düşük denye, düşük hacim yüzdesi (%0,1), monofilament (polipropilen ve naylon durumunda) veya fibrillenmiş lifler (polipropilen durumunda) kullanıldığı ifade edilmiştir [94- 160].

Bu lifler, yapısal ve biricil olmayan yük taşıma uygulamalarında kullanılmıştır. Sentetik lifli betonların, konut ve ticari alan endüstriyel döşemelerinde, zemin kaplamalarında, şev stabilizasyonu ve havuz inşaatı için püskürtme betonlarında, prekast ünitelerde ve portland çimentosu içeren püskürtme harç uygulamalarında kullanıldığı ifade edilmiştir [94- 160].

2.8. Sentetik Lifli Betonların Özellikleri

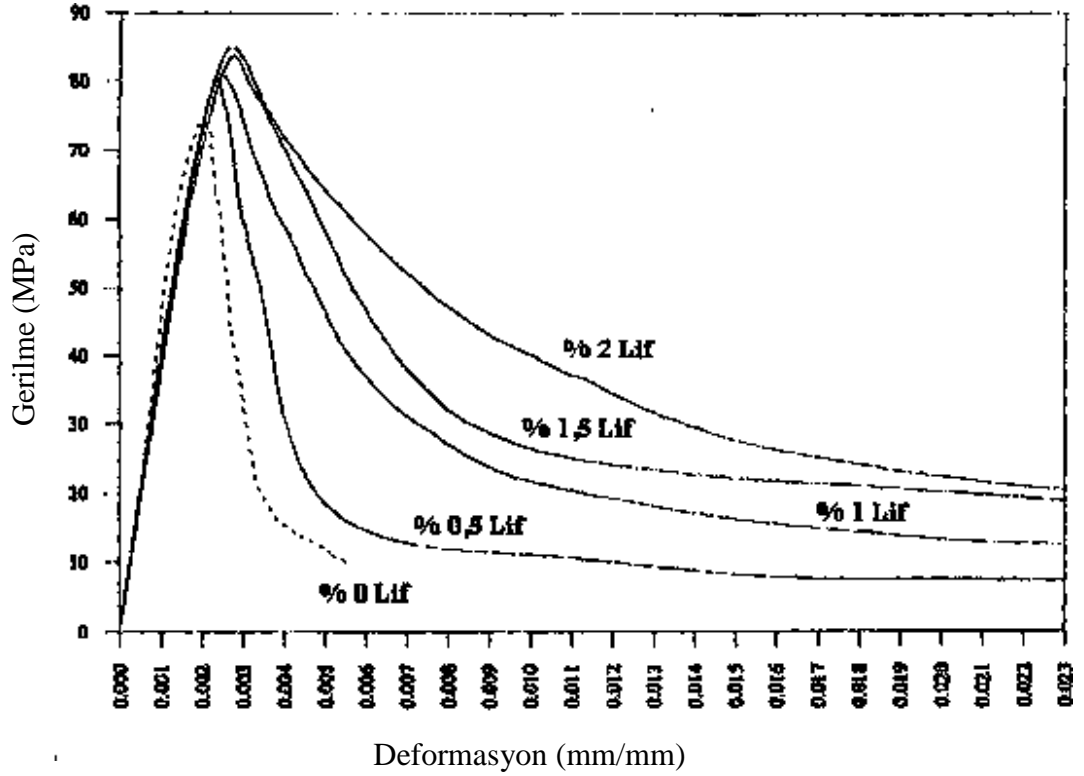
2.8.1. Basınç Dayanımı

Belirli basınç altında, lifler tarafından geliştirilen uzayabilirlik, statik yüklemeye altında ani ve patlayıcı kırılmayı önlemede ve dinamik yüklemeye altında enerji absorpsiyonunda faydalıdır. Araştırmalara göre; Betonda lif malzemesi olarak kullanılan cam, plastik ve polipropilen gibi malzemelerin ilavesi, yeni yapılan lif takviyeli betonda bir mukavemet artışı sağlamamaktadır [95].

Araştırmalara göre; kirişlerde, kolonlarda ve kat döşemelerinde olduğu gibi diğer yapı elemanlarında da eğilme veya çekme kuvvetleri meydana gelir. Bu basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerinin birlikte oluşturduğu gerilmelerden dolayı ve zor kesit tesirlerine karşı yapı elemanı asal çelik donatı ile birlikte çelik lifler ile kuvvetlendirilerek dayanımı oldukça önemli mertebede artırılabilir [96].

Yapılan Çalışmalara göre; genel mekanik özellikler üzerine temel olan düşük lif içeriği ile polipropilen lif (ince ve küçük yapılı) ve çelik lif karışımı takviyeli betonda lif boyutu, içeriği ve uçucu kül içeriğinin optimizasyonunu incelemiştir. Beton için ayrıca %1 ve 2.5 oranlarında Süperakışkanlaştırıcı da kullanılmıştır.

Araştırma sonuçları, betonun uçucu kül gibi küçük taneler içermesinin, liflerin düzenli dağılabilmesi için gerekli olduğunu göstermiştir. Liflerin katılması farklı mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir. Küçük lif tiplerinin katılması basınç dayanımında önemli etki yapmış, ama çekme mukavemetini (silindir yarma) az etkilemiştir. İri liflerde narinlik ayarlanarak, tahkim edilen mekanik özelliklerde artış sağlanmıştır. Karışık lifli sistemde bir sinerji etkisi vardır [97].



Şekil 2.17. Değişik Lif Hacimlerinin Dayanım-Deformasyon İlişisine Etkisi [131]

Uçucu kül içeriği arttıkça, betonun ilk ve sonraki günlerdeki basınç ve silindir yarma dayanımı daha da artmıştır.

Uçucu kül miktarı 100 kg/m^3 ve çimento içeriği 400 kg/m^3 olduğunda uygun değer polipropilen lif miktarının %0,15 olduğu anlaşılmıştır. Polipropilen, lif beton ağırlığının hafifletilmesini sağlamıştır. Karışık lif içeriğine sahip betonla, daha yüksek lif içeriğine sahip; ama tek tip çelik lif kullanılmış, beton ile hemen hemen aynı performansın sağlanması da mümkün olmuştur.

Tablo 2.5. Polipropilen Lifli Beton Numunelerin Deneş Sonuçları [98]

Kür Süresi	Polipropilen Lifli Beton			
	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Eğilme Dayanımı (MPa)
1 Gün	13,80	-	-	-
3 Gün	26,90	-	-	3,90
7 Gün	33,10	31,03	0,19	3,60
14 Gün	37,90	-	-	-
28 Gün	42,10	33,09	0,19	4,30

Vandenbossche ve Rettner'a göre, saha betonları ve beton yol üzerinde yapılmış oldukları araştırmalarda, polipropilen lifli beton kullanmışlardır. $1,8 \text{ kg/m}^3$ polipropilen lif içeriğine sahip su/çimento oranı 0,40 olan betonlar test edilmiş ve tablo 2.5'teki sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir [98].

1993 yılında yapılan çalışmaya göre, cam ve polipropilen gibi liflerin elastisite modülleri, betonun elastisite modülünden daha küçük olabilmektedir. Fakat çeliğın elastisite modülü betona nazaran çok daha fazladır ve bu nedenle çelik liflerin betonun taşıma gücünü diğer liflere göre daha fazla ölçüde arttırdığı ifade edilmiştir [99].

2.8.2. Eğilme Dayanımı

Sentetik liflerin beton ve harcın eğilme dayanımı üzerine etkisi, betonun eksenel çekme ve basınç etkisinden çok daha büyüktür. İki eğilme dayanımı değeri genellikle rapor edilir. İlk kırılma (eğilme) dayanımı yükü olarak adlandırılan, lineerlikten ayrılmanın başladığı yük-deformasyon eğrisindeki yüke tekabül eder. Diğerleri genellikle kırılma modülü ya da maksimum eğilme dayanımı olarak isimlendirilen, ulaşılan maksimum yüke tekabül eder. Dayanımlar, matris kırıldıktan sonra formül ile tekabül eden yükten hesaplandığı ifade edilmiştir [100].

İlk kırılma ve maksimum eğilme dayanımı kaydedilirken meydana gelen karışıklığı vurgular ve benzer bir matriste farklı lif tipleri ve miktarları kullanıldığı zaman sonuçlanabilen eğilme yükü-sehim eğrilerini gösterir. Daha büyük lif miktarları için iki yük tamamen ayrıdır, ama daha küçük lif hacimleri için ilk kırılma yükü maksimum yük dahi olabilir. Son kırılma eğrisinin şekli dizaynda önemlidir ve buna eğilme tokluğunun hesabına göre karar verildiği belirtilmiştir [100].

Eğilme tokluğu önemlidir ve bunun dayanım hesaplamaları üzerine düşüncelerde esas alınması açıkça belirtilmiştir.

İlk çatlak ve maksimum eğilme dayanımlarını belirlemek için kullanılan prosedürler, kalite kontrol için üçte bir nokta yükleme altında kirişlerde (100x100x350 mm) test etme üzerine esas alınmıştır. Diğer boyutlar ve şekiller daha yüksek ve düşük dayanımlar verdiği ifade edilmiştir [100].

İki nokta yüklemesi altında ve hatta merkez yüklemesi yapıldığında, test edilen standart kirişlerdeki değerleri farklı testlerde elde edilen sonuçlarla ilişkilendirmek mümkün olmaktadır. Bu standartta 100x100x350 mm'lik kirişlerin performansı ile ölçümler gerçekleştirilmektedir [100].

Maksimum eğilme dayanımı genellikle narinlik oranı ve betondaki lif hacmine bağlı olarak artar. Düşük narinlik oranına sahip liflerin (%50'den az) hacmin %0,5'inden az olması statik dayanım özellikleri üzerinde önemsiz etkiler yapar. Son çatlama yük-deformasyon karakteristikleri, çoğunlukla lif tipi seçimine ve kullanılan spesifik lif tipinin hacim yüzdesine bağlıdır. Belirli bir lif tipi miktarı kombinasyonunun maliyet etkisi, analiz ya da prototip testi ile değerlendirilebilir. Yüksek eğilme dayanımları, harçlarda çok kolay elde edilir. Harç için (su/çimento = 0.45-0.55) tipik değerler, lif tipi ve narinlik oranına bağlı %1,5 lif hacmi için 6.5-10 MPa civarındadır ve %2,5 lif hacmi için 13 MPa 'a yaklaştığı ifade edilmiştir [100].

Lif katkılı betonlar için, mevcut iri agrega oranı artışıyla dayanımlar düşer. Bu alanda elverişli düşünceler geleneksel ekipman yerleşimi ile birleşmiştir ve alıştırmalar genellikle üniform düz lifler için 100 civarında lif narinlik oranı ve hacim yüzdesiyle lif konsantrasyonunun üretimi genellikle sınırlıdır. 8 ila 19 mm

agrega ile hacimsel olarak %0,5 ila 1,5 lif içeren betonlar için 28 günlük maksimum eğilme dayanımları; genellikle su/çimento oranı, lif tipi ve narinlik oranına bağlı olarak 5,5-7,5 MPa civarındadır. Kıvrılmış lifler, yüzeyi şekilli lifler ve sonu ankrajlı lifler, aynı hacim konsantrasyonundaki düzgün yüzeyli liflere göre yüksek dayanımlar sağlar ya da daha düşük lif konsantrasyonu ile benzer dayanım sağlanmasına izin verir. Süperakışkanlaştırıcı bir katkı kullanımı ile su/çimento oranı azaltılırsa, dayanımlar bu değerlerin üzerine çıkabildiği ifade edilmiştir [100].

Yapılan Deneyleerde, yapmış olduğu eğilme deneylerinde 500 x 500 mm boyutunda ve kalınlığı 150 mm olan kare biçimli plaklar kullanmış, bunları lifli ve liffsiz olarak denemiştir. Eğilmede kullanılan numuneler üzerinde kırılma şekli, çatlak, tokluk ve basınç dayanımı incelemeleri yaptığı ifade edilmiştir [101].

2.8.3. Tokluk

Tokluk, dinamik veya darbe yüklerine ya da statik deformasyonlara maruz kalma, kırılmalara karşı koyabilme gibi hususlarda malzemeyi karakterize etmekte kullanılır ve malzemenin enerji emme kapasitesinin bir ölçüsüdür. Lifli betonlar üzerinde yapılan direkt çekme testlerinin kontrolünün zorlukları onların tokluk kontrolünde kullanılmasını engeller. Buradan da daha basit olan eğilme metodu, lifli betonların tokluk sınırlamaları için tavsiye edilir. Daha basit olmasının yanısıra, eğilme testleri lifli betonların çoğu pratik uygulamaları için yükleme durumlarını simüle ettiği ifade edilmiştir [100].

Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan Tokluğu ifade eder. Sentetik lifli betonların toklukları genellikle üçte bir veya orta noktalarından yüklenen (dört noktalı veya üç noktalı eğilme deneyleri) prizmatik giriş numunelerin çentikli veya çentiksiz olarak yapılan eğilme veya dörtkenarı serbest oturan plak deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrilerine bağlı olarak belirlenir.

Statik yükleme altında, numunenin ayrılmasını tamamlamadan önce absorbe edilen tüm enerji olan eğilmede yük deformasyon eğrisi altında kalan alan tokluk olarak tanımlanabilir.

2.8.4. Elastik Modül

Elastik modülü malzemeye uygulanan kuvvet ile bu kuvvet sonucu ortaya çıkan şekil değiştirme arasında ki bağlantıyı tanımlamaktadır [104].

Sentetik Liflerin betona eklenmesiyle Elastik Modülü değeri ± 25 artış göstermektedir [105]. Yalın malzemeler de çelik, cam gibi elastik modüllerinin deneysel olarak uygulamada kullanılması ve belirlenmesi, SLDB'ler gibi farklı malzemelerden elde edilen Kompozit malzemelere göre daha kolay olduğu ifade edilmiştir [106].

Beton ile ilgili yapılan deneylerde Sentetik Lif içeren betonların elastisite modülleri normal betonlara göre yüksek olduğu ifade edilmiştir [107-108].

Ayub vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında bazalt lif katkılı yüksek performanslı betonların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre betonun basınç dayanımının %2 oranında bazalt lif ilavesine kadar arttığı, lif oranı %3 olduğunda ise basınç dayanımının, artan lif hacmi betonda boşluk oranının artmasına neden olduğundan, %2,37 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Elastisitemodülü artan lif hacmiyle birlikte azalsa da bazalt lif kullanımının betonun elastisite modülüne önemli ölçüde etki etmediği sonucuna varılmıştır. Benzer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da bazalt liflerin betonun yarmada çekme dayanımını arttırdığı gerek çekme gerekse basınç kuvvetlerine maruz kalındığında maksimum yük etkisi altındaki şekil değiştirmelerin daha fazla olduğu ve bu durumun betonun daha sünek bir davranış göstermesine olanak sağladığı belirtilmiştir [109].

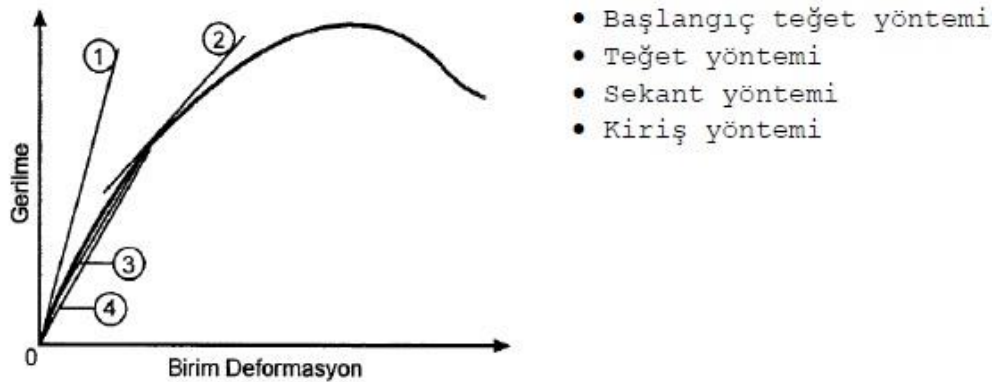
Bilgili ve Beycioğlu tarafından gerçekleştirilen, YTÜ BAP tarafından desteklenen araştırma projesi kapsamında bazalt liflerin betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerine etkileri, lifsiz ve cam lif katkılı betonlar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada 400 dozlu, su/bağlayıcı oranı 0,45 olan yüksek dayanımlı betonlar üretilmiş, bazalt ve cam lifler hacimce %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre lif oranı arttıkça basınç dayanımlarının lif katkısız numunelere göre olumsuz yönde etkilenmediği, ancak elastisite modüllerinin artan lif hacmiyle birlikte yaklaşık %5 oranında azaldığı tespit

edilmiştir. Daha önce farklı tipte liflerle yapılan çalışmalarda düşük lif oranlarında elastisite modülünde belirgin bir değişim olmadığı ancak artan lif hacmiyle birlikte işlenebilmenin olumsuz yönde etkilendiği ve elastisite modülünün azaldığı ifade edilmiştir [110-111].

Genel olarak yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerinde ise önemli ölçüde iyileşme olduğu görülmüştür.

Betonun mekanik özelliklerinin bilinmesi, betonarme elemanların tasarımı açısından oldukça önemlidir. Bu özelliklerin en önemlilerinden bir tanesi de betonun Elastisite Modülü'dür. Elastisite modülübetonun davranışında özellikle eğilme etkisindeki elemanlarda birim deformasyon kadar etkili olduğu ifade edilmiştir [115].

Özellikle elastik hesaplamaların dikkate alındığı yapısal tasarımlarda Şekil ya da yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için betonun elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Değişik yükler altında Şekil değiştirebilen bir yapıya sahip bütün malzemeler gibi beton da üzerine gelen yükün tipinden, büyüklüğünden ve süresinden etkilenecek belirli ölçüde Şekil değiştirme ya da başka bir deyişle deformasyon gösterdiği ifade edilmiştir [113].

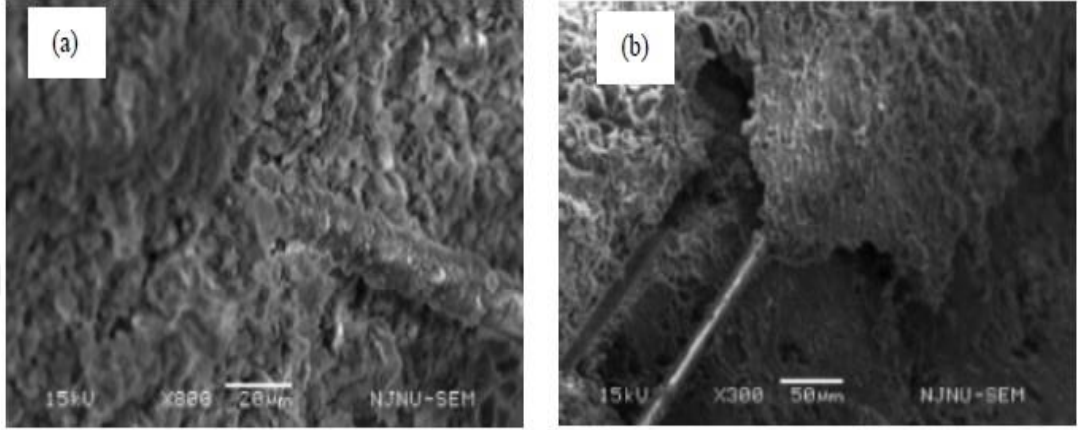


Şekil 2.18. Betonun Elastiklik Modülünün Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

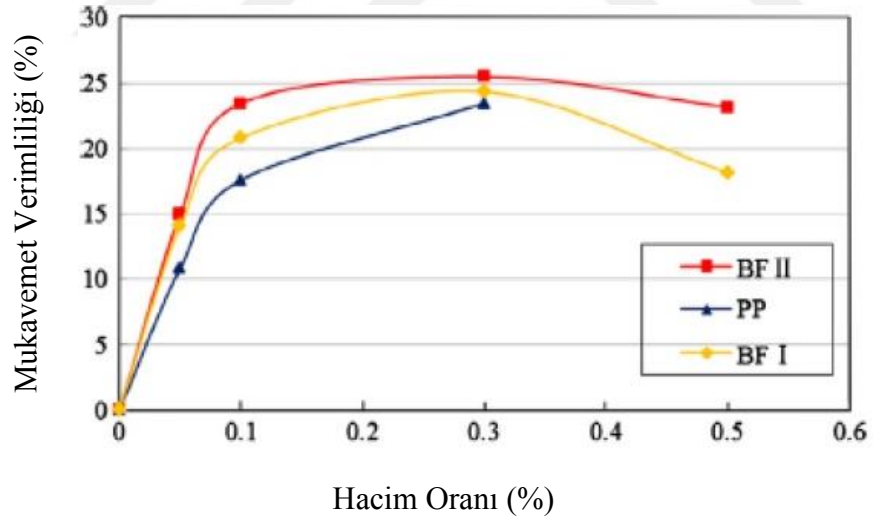
Betonun elastiklik modülünü belirleyebilmek için betonun “ σ - ϵ ” ilişkisi sanki doğrusal bir ilişkiymiş gibi kabul edilmekte ve gerçek olan eğriyi temsil ettiği varsayılan böyle bir doğru çizginin eğimi ile hesaplanabilmektedir. Bu amaçla şekil 2.18’de gösterilen dört değişik yöntemden birisi kullanıldığı ifade edilmiştir [114].

2.8.5. Yarmada Çekme Dayanımı

Çekme yüklerinin dolaylı olarak uygulanması ile çekme dayanımının tespit edildiği bu yöntem ‘Brezilya Yarma Deneyi’ olarak da adlandırılmaktadır. İlk olarak 1953 yılında Brezilyalı Carnerio ve Barcellas tarafından öngürülmüştür [115].



Şekil 2.19. a)7 Günde Matris-Lif Arayüzü b) 28.Günde Matris-Lif Arayüzü [115]



Şekil 2.20. Yarmada Çekme Dayanımının Lif Türü, Boyu ve Hacim Oranında Değişimi [123]

Yapılan deneyde 7 günlük ve 28 günlük betonu için lif arayüzleri Şekil 2.19 da gösterilmiştir [115].

Dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımının elde edilebilmesini belirleyen ve çekme standartlarının belirleyen yöntem olduğu ifade edilmiştir [116].

Yarmada Çekme dayanımında Sentetik Lif takviyeli betonların katkısı tek eksenli çekme ve eğilme dayanımları için yapılanlara oranla daha azdır. SLDB'lerin mekanik özelliklerini etkileyen narinlik, sentetik lif hacmi, sentek lif tipi matris özellikleri vb gibi bütün parametreler yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir [1-117]. SLDB'ların yarmada çekme dayanımları üzerinde yapılan çalışmalar, onun tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımları için yapılanlara kıyasla daha azdır. SLDB'ların tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını etkileyen bütün parametreler; Sentetik Lif hacmi, narinliği ve matris özellikleri yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir [1-118-119-120-117]. Ayrıca iki ucu kancalı ve uzunluğu boyunca çentikli tellerin yarmada çekme dayanımında en iyi iyileştirmeyi yapmaktadır.

Song *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada betona polipropilen lif ilave edip özelliklerini incelemişlerdir. Polipropilen lifi m³ te 600g olacak şekilde kullanmışlardır. Polipropilen lif ilavesiyle çökme değerinin azaldığı, basınç, darbe, yarmada çekme dayanımının ise arttığı sonucuna varmışlardır [121].

Bahadır (2010) yapmış olduğu çalışmada polipropilen liflerin beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Deney parametreleri olarak, farklı s/ç oranları (0,4-0,5-0,6) ve polipropilen lif katılma oranları (0,9 kg/m³-1,8 kg/m³) alınmıştır. Sonuç olarak polipropilen liflerin çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı, beton dayanıklılığına da katkı sağladığı belirlenmiştir [122].

Jiang vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada yukarıda verilen örneklerin aksine hacimce %0,5'e kadar kullanılan bazalt lifin normal dayanımlı betonların basınç dayanımlarına olumsuz bir etkisi olmadığı rapor edilmiştir.

Hatta bazalt lif ilavesi ile betonların basınç dayanımlarının erken yaşlarda arttığı, bu artışın 7. günde 22 mm uzunluğunda hacimce %0,3 oranında lif kullanılması halinde yaklaşık %10 kadar olduğu tespit edilmiştir. İlerleyen yaşlarda yapılan basınç deneylerinde ise lif katkısız betona göre bazalt lif katkılı betonların basınç

dayanımında gösterdiği bu olumlu etkinin nispeten azaldığı, hatta dayanımları olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bunun nedeni ise, ilerleyen yaşlarda lifler ile beton arayüzündeki aderansın zamanla azalması şeklinde ifade edilmiştir (Şekil 2.20).

Bunun yanı sıra bu çalışmada da bazalt lif kullanımının betonun yarmada çekme dayanımını belirgin bir şekilde arttırdığı belirtilmiştir. Bu artışın polipropilen lif (PP) kullanılan betonlara göre daha fazla olduğu, 12 mm uzunluğunda bazalt lif (BFI) kullanılan betonlarda artan lif oranıyla birlikte yarmada çekme dayanımının yaklaşık %14-24 arasında, 22 mm uzunluğunda bazalt lif (BFII) kullanıldığında ise artan lif oranıyla birlikte yaklaşık %15-25 arasında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 20). Eğilme dayanımı sonuçlarına göre de bazalt lifler polipropilen liflere göre daha iyi performans göstermiştir. Mekanik özellikler göz önüne alındığında Jiang vd. (2014) betonda kullanılması gereken optimum bazalt lif oranını %0,3 olarak önermişlerdir. Bu lif hacminin üzerindeki oranlar kullanılması durumunda betonun işlenebilmesi, liflerin beton içersinde homojen bir şekilde dağılması konularında problem oluşabileceği ve betonun mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki edebileceği belirtilmiştir [123].

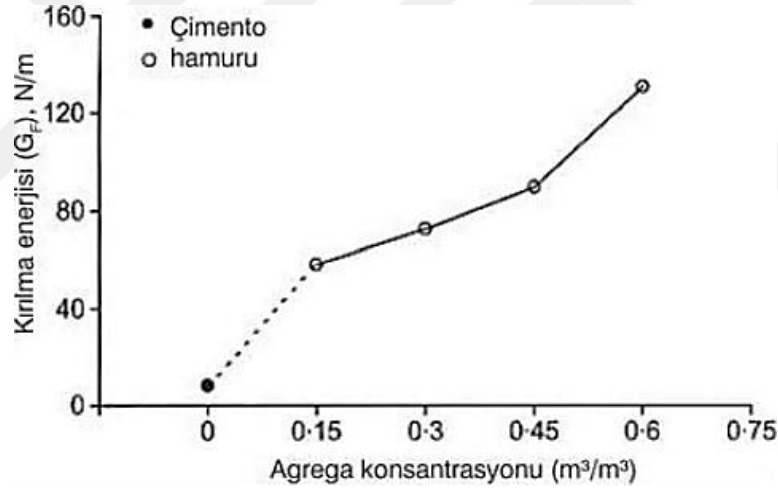
2.8.6. Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi (G_f), çatlak doğrultusuna paralel düzlemdeki birim yüzey alanında bir çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı olarak tanımlanabilir [124]. Lif eklenmesi, harç ve betonun mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artmasını sağlamıştır. Lifli betonda, lifsiz betona göre oluşan en önemli performans artışı, kırılma sırasında enerji yutma kapasitesinin artmasından ileri geldiği ifade edilmiştir [125].

Birçok yapıda kullanılan SLTB'ler Örneğin; Betonarme boru, prekast cephe giydirme elemanları, harpuşa, denizlik ve söveler ile prefabrikasyon yapı elemanlarında ortaya çıkan kalıptan çıkarma sırasında oluşan kırılmaları, yüzey kalitesindeki bozulmaları, çökme problemlerini ve kür nedeniyle oluşan termal çatlamları Polipropilen liflerin takviyesi ile Kırılmanın önüne geçtiği ifade edilmiştir [126].

Beton içinde sentetik lif arttığında kırılma enerjisinin belirgin bir şekilde arttığı söylenmiştir [127]. Peng at el. (2008) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinde lifli betonların soğutulması esnasında termal şokun beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Hızlı soğutma tekniklerinin termal şoka sebep olduğu ve havada soğutmaya nazaran, çekme mukavemetini, olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Polipropilen lifin basınç ve çekme mukavemetinin yanı sıra kırılma enerjisini de olumlu etkilediği ifade edilmiştir [128].

Şekil 2.22’de ise agrega konsantrasyonu arttıkça betonun kırılma enerjisinin arttığı görülmektedir. Bu şekilde kullanılan değerler Taşdemir ve Karihaloo (2001) tarafından mezo-mekanik bağıntılar kullanılarak hesaplandığı ifade edilmiştir [163].



Şekil 2.21. Betonda Kırılma Enerjisinin (G_F) Agrega Konsantrasyonu ile Değişimi [163]

Polipropilen lifler bitümlü karışımlarda ve asfalt uygulamalarında modifikasyon amaçlı olarak, karışımların düşük sıcaklıklarda kırılma enerjisini ortadan kaldırmak için kullanıldığı ifade edilmiştir [130].

2.8.7. Darbe ve Yorulma Dayanımı

Betonların içine katılan sentetik lifler betonun çatlama karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamada ki kabiletlerini büyük ölçüde artırmaktadır. Sentetik liflerin

betonun içine katılmasıyla servis yükleri altında, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların darbe ve yorulma direnci kapasitelerini önemli ölçüde iyileştirmektedir [8-69-131-132-133].

Sentetik Lifler betonların çekme dayanımı ve sünekliğini artırıyor olduğundan, betonların çatlamaya karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamadaki kabiliyetlerini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Ayrıca, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların yük altında darbeye ve yorulmaya karşı daha dirençli olmalarını sağlamaktadır. Böylece, betonların darbe ve yorulma altındaki hasar düzeyleri sentetik Lif kullanılmasıyla azaltılmış olmaktadır. Sentetik Lif katkısı matris içerisinde çatlakları köprüleme etkisi ve çatlak sonrası yük taşıma özeliği ile kazanılan yüksek süneklik, tekrarlı yükler altında SLDB'lerin göçmeye karşı dirençleri normal betonunkilere kıyasla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda betonların darbe dayanımları Sentetik Lif kullanılmasıyla 2-20 kat artabildiği ve yorulma dayanımlarının ise düşük tel içeriklerinde bile 1,25-2 kat iyileşme görüldüğü ifade edilmektedir [132-131]. Darbe ve yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler, özellikle tekrarlı dinamik yükler altındaki karayolu kaplama betonları, havaalanı ve endüstriyel zemin beton uygulamalarında önemli rol oynamaktadır.

Kiper (1996) tarafından yapılan çalışmada polipropilen liflerin plastik rötreinin önüne geçtiği ve beton kusmasını engellediği belirlenmiştir. Darbe dayanımında da çatlama esnasında beton parçalanmasına izin vermediği için ani göçme açısından betonu güçlendirdiği tespit edilmiştir [134].

Morris et al. (2002) tarafından yapılan çalışmada, 19 mm uzunluğunda %0, %0,1, %0,5, oranlarında hacimce polipropilen lif ilave edilerek güçlendirilmiş döşemelerin özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre lif miktarının artışı ile ters orantılı olacak şekilde basınç dayanımına etkisi belirlenmiştir. Darbe direncinin ise arttığı tespit edilmiştir [135]. Song et al. (2005) yaptıkları çalışmada betona polipropilen lif ilave edip özelliklerini incelemişlerdir. Polipropilen lifi m³ te 600g

olacak şekilde kullanmışlardır. Polipropilen lif ilavesiyle çökme değerinin azaldığı, basınç, darbe, yarmada çekme dayanımının ise arttığı sonucuna varmışlardır [121].

Nili and Afroughsabet (2010) tarafından yapılan çalışmada, deney parametreleri olarak s/ç ve polipropilen lif oranları değişimi kıstas alınmıştır. Ayrıca çimento ağırlığının %8'i kadar silis dumanı ile çimento yer değiştirilmiştir. 12 mm uzunluğundaki lifler %0-%0,2-%0,3-%0,5 olacak şekilde 4 farklı oranda kullanılmıştır. Bu çalışmada numunelerin basınç ve darbe dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, %0,5 polipropilen lif oranına kadar basınç dayanımı artmıştır. Darbe dayanımı ise lif oranı ile doğru orantılı olacak şekilde artış gösterdiği ifade edilmiştir [136].

Bahadır (2010) yapmış olduğu çalışmada polipropilen liflerin beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Deney parametreleri olarak, farklı s/ç oranları (0,4-0,5-0,6) ve polipropilen lif katılma oranları (0,9 kg/m³-1,8 kg/m³) alınmıştır. Sonuç olarak 18 Polipropilen liflerin çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı, beton dayanıklılığına da katkı sağladığı belirlenmiştir [122].

2.8.8. Korozyon

Korozyon, donatının paslanarak mukavemetini yitirmesi durumudur. Beton içindeki yüksek alkali ortamı, donatı çeliğine sıkıca yapışır ve bir film oluşturarak korozyonun önüne geçer [137]. Bazalt lifler ve epoksi reçine kullanılarak betonarme yapılarda kullanılan çelik formunda üretilen bazalt lifli donatılar da Amerika, Rusya ve Ukrayna gibi ülkeler başta olmak üzere birçok ülkede, bazı yapı elemanlarında donatı çeliğine alternatif olarak kullanılan ürünlerdendir. Lifli donatı, özellikle korozyon riski bulunan yapı elemanlarında donatı çeliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır [138]. Sentetik fiberlerin korozyon problemi olmadığı için, her tür çelik donatıya göre, dayanımında hiçbir değişim olmadan işlevini yapının ömrü boyunca koruyarak fark yarattığı ifade edilmiştir [139].

Lifli donatı, özellikle korozyon riski bulunan yapı elemanlarında donatı çeliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Donatı çeliğinden daha yüksek dayanıma sahip

olan bazalt lifli donatı, çelik donatıya oranla yaklaşık üç kat daha hafif olduğu ifade edilmiştir [138].

Polipropilen lifler endüstriyel tesisler, havaalanları, konutlar ve yüzme havuzlarını da içine alan uygulamalarda çarpma, aşınma dayanımı ve geçirimsizliği artırmaktadır. Bu lifler korozyondan etkilenmeyen, tuz ve alkalilere dayanıklı malzemeler olduğu belirtilmiştir [140]. Bazalt lifinde yardımcı elementler doğal olarak bulunduğundan sıcaklık stabilitesi oldukça yüksektir ve ekstra yardımcı bir elemente ihtiyacı olmadığı ifade edilmiştir [141].

Wei vd. tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda korozyon riskinin yüksek olduğu durumlarda diğer lifler yerine bazalt lifin kullanılabilceği, kimyasal etkilere maruz kalınması durumunda bazalt lif takviyeli kompozitler kullanılarak servis ömrünün uzatılabileceği belirtilmiştir [142].

Tüm bu özellikler bazalt lifin düşük maliyetli imalatıyla birleştirildiğinde karbon, lifli beton üretiminde, çelik ve cam liflerine kıyasla daha uygulanabilir olduğunu ortaya koyduğu ifade edilmiştir [143].

2.8.9. Sünme ve Büzülme

Beton veya sıvada kullanılan polipropilen lifin en önemli etkisi, beton dökümünden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülmeyle dolaylı olarak oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır [130]. Beton, zamana bağlı deformasyonu olan bir malzemedir ve bu deformasyonunun iki birleşkesi vardır. Büzülme (Rötre) ve Sünme. Bilindiği gibi, sünmenin basınç gerilmeleri altında oluşmasına karşın büzülme gerilmeden bağımsızdır [144]. Beton özellik olarak kuru ortamlarda büzülür. Büzülmenin gelişimi malzemelerin özellikleri de dâhil olmak üzere, sıcaklık ve ortamın nemine, betonun yaşına ve kütesine bağlı olduğu ifade edilmiştir [145]

Betonun rötresi kısıtlanırsa çekme gerilmesi oluşur ve beton çatlayabilir. Özellikle perde, döşeme ve beton kaplamalarında Rötre çatlakları genel bir sorundur. Sentetik liflerin beton matriksine rastgele eklenmesi ile Rötre çatlaklarını azaltmanın en etkili yoludur. Betonlar elemanlar mesnet durumlarından dolayı rötresi kısıtlandığı için çatlama eğilimi göstermektedirler. Sentetik lif miktarı SLDB'ların Sünme ve Büzülme özelliklerini etkileyen Sentetik lif ile ilgili en önemli parametredir. Sentetik liflerin sünme ve büzülme üzerinde iyileştirme yapması için matris içinde etkili

olacak şekilde yeteri kadar eklenmelidir. Düşük Sentetik liflerin miktarlarında bile çatlak genişliklerinde %70'lere ulaşan azalma görüldüğü ifade edilmiştir [132].

Kuru ortamlarda beton büzülür. Büzülmenin gelişimi malzemelerin özellikleri de dâhil olmak üzere, sıcaklık ve ortamın nemine, betonun yaşına ve kütlesine bağlı olduğu belirtilmiştir [146]. Eğer betonun rötresi kısıtlanırsa çekme gerilmesi oluşur ve beton çatlayabilir. Rötire çatlakları perde, döşeme ve beton kaplamalarında genel bir sorundur. Bu rötire çatlaklarını azaltmanın en etkili yolu beton matrisine rasgele dağıtılacak olan çelik tellerin takviyesidir. Betonlar hemen hemen mesnet durumlarından dolayı rötresi kısıtlandığı için çatlama eğilimi gösterirler. Sentetik lif bu durumda üç rol oynar. Sentetik lifler çok yönlü çatlak oluşumu sağlar, çatlak üzerinden gerilme transferi yaparlar ve bu gerilme transferi çatlakların kapanmasına müsaade edecek kadar uzun sürebilir. SLDB'ların sünme ve büzülme özelliklerini etkileyen çelik tel ile ilgili parametrelerin en önemlisi kullanılan çelik tel miktarıdır. Sentetik lif sünme ve büzülme özellikleri üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde yeterli miktarda bulunmalıdır. Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde %70' lere ulaşan azalma görülebildiği ifade edilmiştir [132].

Betonun büzülmesi çatlak oluşumunun en önemli sebeplerinden biridir. Rötrenin en önemli oluşma nedeni, makro ve mikro boşluklardaki suyun beton bünyesinden uzaklaşmasıdır. Ortamda bulunan suyun uzaklaşmasıyla betonda bir büzülme meydana gelir. Rötrenin iki önemli zararlı etkisi vardır. Bunlardan biri betonda çatlakların oluşması, diğeri de betonarme donatısının parazit gerilmelerin ortaya çıkmasıdır. Bu çatlamların önüne geçmek amacıyla, betona lif takviyesi yapılarak gerilme dağılımı oluşturulabilir. Özellikle yüksek yapı tasarımı yapılırken rötire göz önünde bulundurulduğundan özellikle çelik lifler kullanılmaktadır. Lif miktarının, narinlik oranının ve lif uzunluğunun kritik boyu aşmayacak şekilde artırılmasıyla rötrede azalmalar meydana geldiği ifade edilmiştir [147].

Mostofinejad *et al.* (2004) yaptıkları çalışmada polipropilen lifli betonun rötire çatlaklarına ve betonun işlenebilirliğine etkisini incelemiştir. Lifler %0,05- %0,1- %0,2 oranlarında 6mm, 12mm, 19mm olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak,

polipropilen liflerin rötre çatlaklarını azalttığı basınç dayanımını artırdığı, çökme değerini düşürdüğü tespit edildiği ifade edilmiştir [148].

Polipropilen lifler Deprem gibi ani ve şiddetli darbe yüklerine karşı, yapının enerji yutma kapasitesini artırması açılarından son derece önemlidir. Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan ve güçlendirme projelerinin vazgeçilmez unsuru olacağı düşünülen Kendiliğinde Yerleşen beton hiper akışkanlaştırıcı katkı, uçucu kül ve polipropilen lif kullanarak üretilmiş ve bu maddelerin kendinden yerleşen betonun performansına etkilerinin araştırılması amaçlandığı belirtilmiştir [130].

Betonun plastik safhasında elik liflerin çatlak önleyici ve sınırlayıcı etkisi de mevcuttur. Ancak, betonda mükemmel şekilde dağılmış olan polipropilen liflerin etkisine göre zayıftır. Bununla birlikte sertleşmiş betonda uzun dönemde kuruma bzlmelerinden dolayı oluşacak çatlakların azaltılmasında polipropilen lifler malzemeye belirli bir dayanıklılık ve tokluk vererek betonun mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı ifade edilmiştir [130].

Beton içerisinde polipropilen liflerin kullanılması betondaki rötre ve büzülme çatlaklarını azaltması, segregasyonu azaltması, betonu darbelere karşı koruması, yüzey aşınmalarını engelleyerek betonun ufalanmasını engellemesi, Prefabrik ve geleneksel yapıların kolon ve kiriş gibi iskelet sistemlerinde etriye sistemi ile paralel çalışarak deprem gibi ani ve şiddetli darbe yüklerine karşı yapının enerji yutma kapasitesini artırması açılarından son derece önemlidir. Deprem gibi ani ve şiddetli darbe yüklerine karşı yapının enerji yutma kapasitesini artırması açılarından son derece önemli olduğu ifade edilmiştir [130].

Polipropilen liflerin beton içerisinde gösterdiği en önemli özellik, betonun dklşnn ilk birkaç saati içerisinde meydana gelen plastik büzülmeden (rtreden) dolayı oluşan çatlamayı kontrol etmektir. Polipropilen lifler beton, sıva, şap, alçı, bitüm ve precast uygulamaları için kullanılan bir mikro donatı sistemi olduğu ifade edilmiştir [130].

Saha Betonları ve Şap Uygulamaları: Polipropilen liflerin en yaygın tercih edildiği uygulama alanıdır. Plastik büzülme, plastik çökme ve rötre çatlamlarını engellenmesi açısından en ekonomik ve pratik yöntemdir. Bunu yanı sıra yüzey aşınma direnci kazandırır. Pullanma, ufalanma ortadan kalkar. Minimum incelikte şap dökümüne izin verir. Ayrıca taşıyıcı olarak kullanılmayan hasır donatının yerine tali donatı sistemi olarak kullanıldığı belirtilmiştir [130].

Tamir ve Yapıştırma Harçları: İnşaat hatalarının ortadan kaldırılması için yaygın olarak kullanılan tamir harç ve dolgularında Polipropilen lif kullanıldığında elde edilecek kompozit malzemenin dayanıklılığı artacak ve büzülme problemleri ortadan kalkacağı belirtilmiştir [130].

2.8.10. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon

SLDB'lar ile ilgili yapılan çalışmalarda Sentetik liflerin betonların erozyon, aşınma ve Kavitasyon dirençlerini arttırdığı belirtilmektedir. Sentetik Lifler su yapılarında kullanılan betonların aşınma, kavitasyon ve kimyasal etkilerle meydana gelen erozyona karşı dirençlerini kısmen iyileştirmektedir [149]. Uygun şekilde üretilmeyen betonlar dış etkilere karşı dayanıksız olmaktadır. Yapıların bozulmasına yol açan fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik kökenli etmenler bulunmaktadır. Mekanik yolla oluşan hasarlar arasında aşınma, Erozyon ve Kavitasyon etkileri sayılabilir. Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler, beton yüzeylerin yıpranarak tahrip olmasına yol açmakta ve yüzeyin aşınmasına neden olmaktadır. Farklı bir aşınma şekli de hareket halinde bulunan suların meydana getirdiği aşınmadır. Bir tür erozyon olarak kabul edilebilecek böyle bir duruma beton su borularında tünellerde, barajlarda ve dolu savaklarda rastlanılır. Buralarda suların gayet hızlı bir şekilde hareket etmesi sonunda kavitasyon olayı da meydana gelerek beton devamlı olarak tekrarlanan çarpma etkilerine maruz kalır. Bu tür etkiler betonun hem önemli derecede korozyon yapmasına ve hem de büyük bir hızla aşınmasına neden olduğu belirtilmiştir [150].

Betonun aşınma direnci üzerine yapılan araştırmalarda [151-152] aşınma direncinin, uygulanan test metotlarına, yüzey bitirme yöntemlerine, aşınma kuvvetlerine maruz kalacak beton yüzeyinin yapısal özelliklerine, kür şartlarına, mineral katkı maddesi

kullanımına ve mukavemet özelliklerine bağlı olduğu belirtilmekte, dayanımı yakından ilgilendirmesi sebebiyle, su/çimento oranı, agrega-hamur ara yüzeyi, agrega ve bağlayıcı madde hamuru kalitesi gibi faktörlerin de, aşınma direnci üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir[153]. Aşınmaya karşı dayanıklı bir beton elde edebilmek için bazı mineral katkıların betona karıştırılması gerekmektedir. Bu amaçla metal agregaların ve çelik tozunun kullanılması iyi sonuçlar vermektedir. Bunlardan başka özel fırınlarda silis ile karbonun birleştirilmesinden meydana gelen harç ve betonların aşınma değerleri düşük bulunmuştur [150]. Önceki birçok çalışmada YFC ve pomzanın betonda aşınmayı etkisi ve beton durabilitesine olumlu katkısı araştırılmıştır [154-155].

2.8.11. Donma-Çözülme

Yaşamın farklı alanların da kullanılan liflerin (poipropilen, çelik, aramid, karbon) beton dayanımını ve dayanıklılığını artırması açısından betona katılması söz konusu olmuştur. Betonda lif kullanımı, betonun süneklik gibi bir özelliğinin iyileştirmesinin yönünde, betonun yangın, aşınma, donma ve çözülme gibi birçok özelliğine de olumlu etkide bulunduğu belirtilmiştir [147].

Dayanıklılık betonun fiziksel özelliklerine bağlıdır ve hizmet süresi boyunca betonun davranış karakterini belli eder. Donma çözülme olayı beton için fiziksel bir olaydır. Islanarak doygun hale gelen ve donma çözülme etkisi altında kalan tüm betonlar da donmanın kümülatif artışından dolayı kısa sürede hasarlar oluşmaktadır. Betona katılan sentetik lifler Donma-çözülme dayanımında artış sağladığı ifade edilmiştir [147].

(Kırca (2003) tarafından yapılan çalışmada, polipropilen liflerin beyaz çimento harcına etkisi araştırılmıştır. 1m³ betonda 600gr polipropilen lif kullanılmış, s/ç oranı 0,49 alınmıştır. Lifli numuneler kontrol numunelerine nazaran büzülme deformasyonlarını %25 azaltmış ve donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanımını %15 oranında artırdığı belirtilmiştir.) [147].

Juska ve arkadaşları (1999); Çevre ısıl etkilerin Lifli betonlar üzerine yapmış olduğu etkilerle ilgili daha önce yapılmış olan çalışmaları derlemişlerdir. Bu çalışmalar kür sıcaklığının üzerindeki ısılar, donma çözülme tesirleri ve değişik sıcaklık çevrimleri ile ilgilidir. Aşağıda bu çalışmalara örnekler verilmiştir [156].

Gomez ve Casto (1996); Cam Lifli kompozitler üzerinde, %2NaCl çözeltisi içinde donma (-17.8 °C)-çözülme (4.4 °C)deneyini uygulamışlardır. Numunelerin eğilme dayanımları ve diğer özelliklerinin önemli derecede kayba uğradığını görmüşlerdir (Juska vd.,1999) [156].

Kuklo ve Matala'ya (1991) göre, basınç dayanımı 60 ile 100 MPa olan yüksek dayanımlı betonların kullanımı 1980'lerin başlarından beri araştırmaktadır. Hava içeriği olmaksızın donmadayanıklılığı, yüksek mukavemetli betonda genellikle yüksektir. 28 günlük numuneler üzerinde yaptıkları araştırmalarda, -20 °C(havada) ve + 20 °C(suda) arasında 500 donma-çözülmeçevrimi uygulamışlar ve en iyi sonucu silis dumanlı ve dumansız hızlı şertleşen portland çimentosu ile elde edilmiştir. Cürufli çimento ve yavaş serleşen portland çimentosu iyi dayanıklılık göstermiştir. Özellikle de yaşlandıktan sonra dayanıklılığı azalttığı ifade edilmiştir [157].

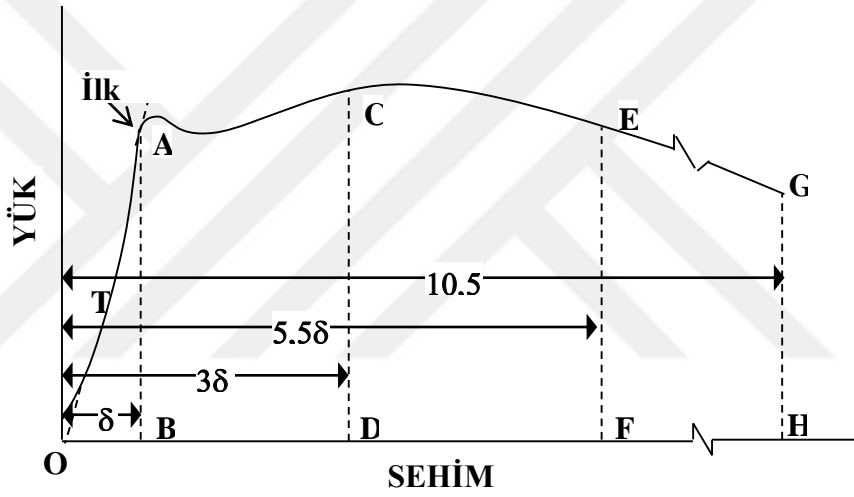
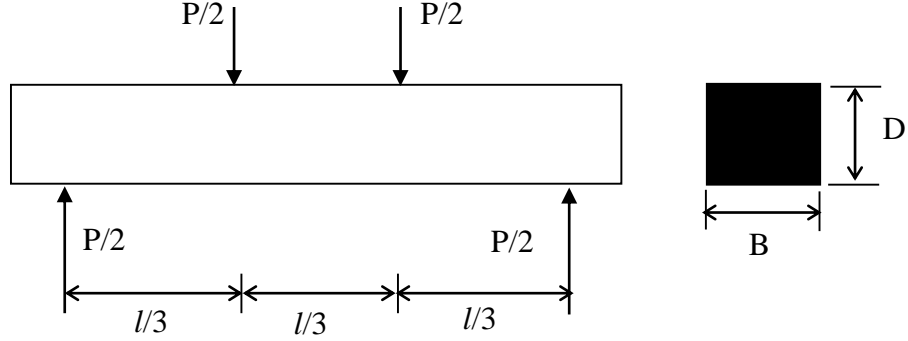
Yüksek dayanıklılığa sahip mikro yapısı yoğundur. Porozite araştırması ve ışınal araştırmalara göre; donma hasarı nedeniyle, başlangıç çapıyla boşlukların boyutu 50-100 mm arasında artış gösterdiği belirtilmiştir [157].

Araştırmalara göre (2001), Lif takviyeli polimer (Karbon, cam ve aramid)ile beton arasındaki bağ ve durabiliteyi araştırmışlardır.

Deney programında 152x152x610 mm boyutunda karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer levhalı ve önceden kırılmış 48 kiriş kullanılmıştır. Çalışmada 15 kirişin sonuçları verilmiştir. Kirişler önce tek nokta yüklemesi altında çatlatılmıştır, kirişler lif takviyeli polimer levhalı olarak denendikten sonra, sabit yük altında (%0, %25, %40) donma- çözülme, yüksek nem, yüksek sıcaklık ve ultraviyole gibi çevre etkilerine maruz bırakılmıştır. Daha sonra levhaların bağını daha iyi test etmek için kirişin boyuna çelik donatısı kesilmiştir.

Kiriş sonraki aşamada iki nokta yüklemesine maruz bırakılarak çatlak büyümeleri ve deformasyonlar kaydedilmiştir [158]. Yapılan çalışmaya göre (1991); kuru ve ıslak karışimli püskürtme lifli betonları, ASTM C666 suda donma-çözülme(A) yöntemine göre test etmiştir. Hava sürüklendiğinde ve yüksek oranlarda polipropilen lif kullanıldığında ıslak ve kuru karışimli püskürtme betonda donma çözülme durabilitesi sağlanabilmektedir [159].

2.9. Kırılma Enerjisi Ölçme Deney Yöntemleri



Şekil 2.22. ASTM C 1018'e Göre ÇTDB Kirişler İçin Eğilme Deney Düzeneği [77]

- İlk çatlakla kadar eğrilik yukarı doğru.
- İlk çatlakla kadar eğrilik aşağı doğru.

2.9.1. ASTM Yöntemi

Bu metot belirli sehime kadar malzeme davranışlarını tanımlayan tokluk indislerinin belirlenmesini içermektedir.

Tokluk indisleri, çelik tel donatılı betonun belirli bir sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanının ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alana oranı olarak ifade edilmektedir.

Ayrıca yük-sehim eğrisine bağlı olarak ilk çatlak yüküne karşı gelen eğilme dayanımının belirlenmesini de içermektedir. Kiriş numuneler üzerinde ASTM C

1018'e göre yapılan standart eğilme deney düzeneği Şekil 2.22.'te verilmektedir [77].

Kapalı çevrim kontrollü (sehim kontrollü) yükleme cihazı ile yapılan deney ile kirişin orta noktasında ölçülen sehime bağlı olarak elde edilen yük-sehim eğrilerinden tanımlanan tokluk indeksleri belirlenmektedir. Sehim hızı ise 0.1 mm/dakika olarak verilmektedir.

Bu metotta belirtilen ve tokluk indekslerinin hesaplamalarda kullanılan önemli sehim noktaları tipik yük-sehim eğrisi üzerinde Şekil 2.22' de verilmektedir [77]. Bu metotta yük-sehim eğrisinin lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta (A noktası) tanımlanarak ilk çatlak belirlenir.

Dış etkileri düzeltmek için deney eğrisinden ayrıldığı T noktasından itibaren yük-sehim eğrisinin lineer bölümünü temsil eden düz çizgi AT, O' noktasında yeni bir merkeze taşınır. Böylece O'TA çizgisi alan hesaplamalarında OTA yerine kullanılır. Yük-sehim eğrisinde ilk çatlak karşılık gelen yüke bağlı olarak ilk çatlama oluşturulan gerilme hesaplanır. İlk çatlama sehimini O'B uzunluğuna karşılık gelen sehim (δ) olarak belirlenir. İlk çatlak sehimine kadar, yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirtilir. Bu alan O'AB üçgen alanı ilk çatlak tokluğudur. Bu yöntemle elde edilen, yük sehim eğrisi altında kalan alan kullanılarak kırılma enerjisi hesaplanabilir. (a)(b) Bu yöntemde belirtilen tokluk indeksleri şu şekilde tanımlanmaktadır.

I₅ Tokluk İndeksi; ilk çatlak sehiminin 3 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

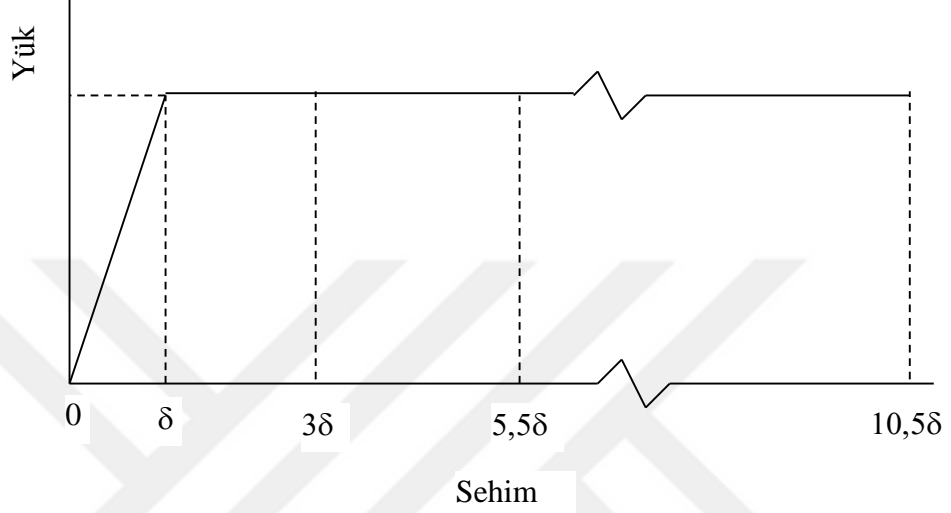
I₁₀ Tokluk İndeksi; ilk çatlak sehiminin 5,5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

I₂₀ Tokluk İndeksi; ilk çatlak sehiminin 10,5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

Tanımlanan bu tokluk indekslerinin hesaplanması ise Şekil 2.11.'e bağlı olarak aşağıda verilmektedir:

$$I_5 = \frac{O'ACD}{O'AB}, \quad I_{10} = \frac{O'AEF}{O'AB} \quad \text{ve} \quad I_{20} = \frac{O'AGH}{O'AB} \quad (2.1.)$$

Tam elasto-plastik bir malzeme için, yani ilk çatlaktan sonra elasto-plastik davranış durumunda I_j toklukindisi j değerine eşit olur.



Şekil 2.23. Tam Elasto-Plastik Malzemenin Yük-Sehim Eğrisi

Bu durumda, I_5 , I_{10} ve I_{20} toklukindislerindeki 5, 10 ve 20 değerleri ilk çatlakakadar olan lineer elastik kısma ve ondans sonra tam plastik sehimlere uygun gelmektedir (Şekil 2.23.)

Tokluk indisi değerinin düşük olması, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük ve enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu ifade etmektedir. Yüksek tokluk indislerinin elde edilebilmesi için çelik telin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi gereklidir.

Çatlama-sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterilebilir. ASTM C 1018'e göre kalıcı dayanım faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R_{5,10} = 20 (I_{10} - I_5) \quad (2.2.)$$

$$R_{10,20} = 10 (I_{20} - I_{10}) \quad (2.3.)$$

$R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ gibi kalıcı dayanım faktörleri, ölçülen ilk çatlak dayanımının yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra belirli sehime kadar ortalama kalıcı dayanımı ifade etmektedir. Kiriş deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinde, ilk çatlak oluşuktan sonra malzemenin yük-sehim eğrisi tam plastik davranış göstermesi durumunda $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=100$, yumuşama eğilimi göstermesi durumunda ise $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}<100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörleri sıfırdır ($R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=0$). ÇTDB' lar kalıcı dayanım faktörlerine göre Tablo 2.6.' deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.6. SLB' ların Kalıcı Dayanım Faktörlerine Göre Sınıflandırılması [77]

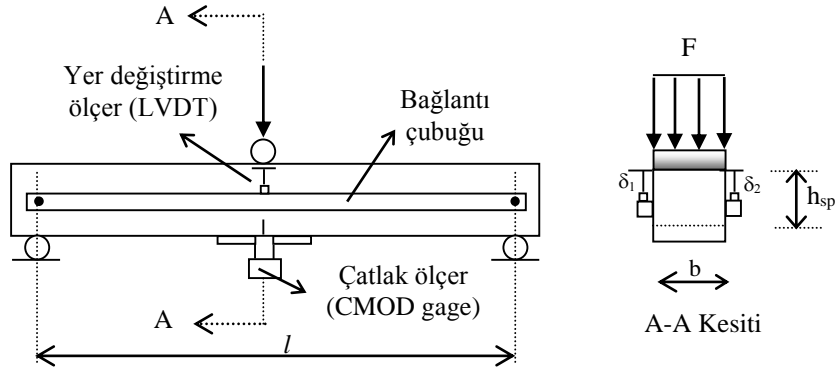
Sınıf	Değerlendirme	Kalıcı Dayanım Faktörü
I	Zayıf	<40
II	Orta	40-60
III	İyi	60-80
IV	Mükemmel	80-100

2.9.2. RILEM Yöntemi

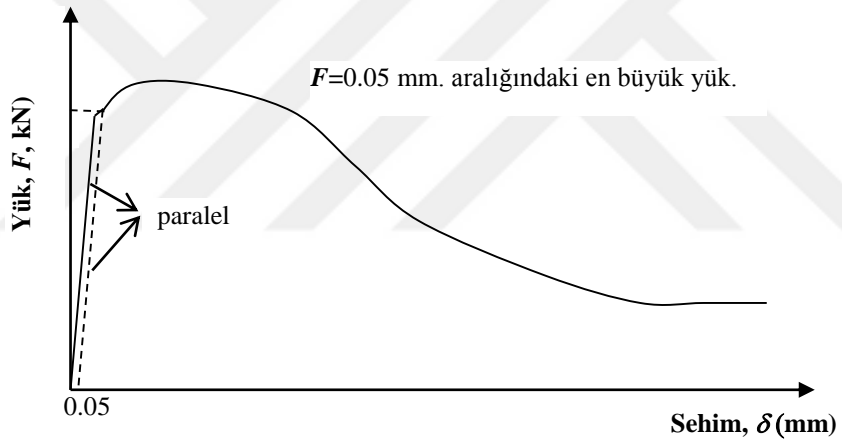
Bu yöntem, orta noktasından yüklenen çentikli kiriş numunelerinden elde edilen yük-sehim eğrisine bağlı olarak çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını belirlenmesini içermektedir [78-79].

Ayrıca çatlak ağzı açılmasını da opsiyonel olarak belirlenmektedir. Kiriş ortasındaki net sehime, kirişin yan yüzlerine takılan ve kiriş numunesine mafsallı bağlanan çubukların orta noktalarında ölçülen sehimlerin ortalaması olarak alınmaktadır. Deney düzeneği Şekil 2.26.' de verilmektedir [7879].

Yükleme ise kiriş ortasındaki ortalama net sehime, $(\Delta_1+\Delta_2)/2$, 0.2 mm./dakika olacak şekilde kapalı çevrim kontrollü cihazda, sehime belirli bir noktaya gelinceye kadar sürekli kaydedilerek yapılmaktadır.



Şekil 2.24. RILEM Yöntemi Deney Düzenegi [78, 79].



Şekil 2.25. Tipik Yük-Sehim Eğrisi

Tipik yük-sehim eğrisi Şekil 2.26.' da verilmektedir

Orantılık sınırındaki yük (F) Şekil 2.26.'da verildiği gibi belirlenir. Bu yüke karşılık gelen kiriş ortasındaki eğilme momentini ise;

$$M = \frac{F l}{2} \quad (2.4.)$$

Olur ve burada l =numunenin açıklığıdır. Numenin kesiti boyunca gerilmenin doğrusal değiştiği kabulü ile F kuvvetinin yaptığı eğilmede çekme gerilmesi, $f_{ct, fl}$, aşağıdaki şekilde belirlenir;

$$f_{cr,fl} = \frac{3FL}{2bh_{sp}^2} \quad (2.5.)$$

Burada,

b =kiriş nununesinin genişliğini

h_{sp} = çentik ucu ile numunenin üst kısmı arasındaki mesafeyi

İfade etmektedir.

Bu yöntemde kırılma enerjisi;

$$G_F = \frac{W_0 + m(1-k^2)g\delta}{B(D-a)} \quad (2.6.)$$

Formülüyle verilmektedir. Burada W_0 yük-sehim eğrisi altında kalan alan (bu çalışmada 10 mm. sehime kadar olan alan), m mesnetler arasında kalan numune ağırlığı, g yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²), açıklık ortasındaki sehime, B numune genişliği, D numune derinliği, a çentik derinliği, k ise numune boyutlarına bağlı bir katsayı $k=(U/S)-1$ ve U numunenin boyu, S ise mesnetler arası uzunluktur.

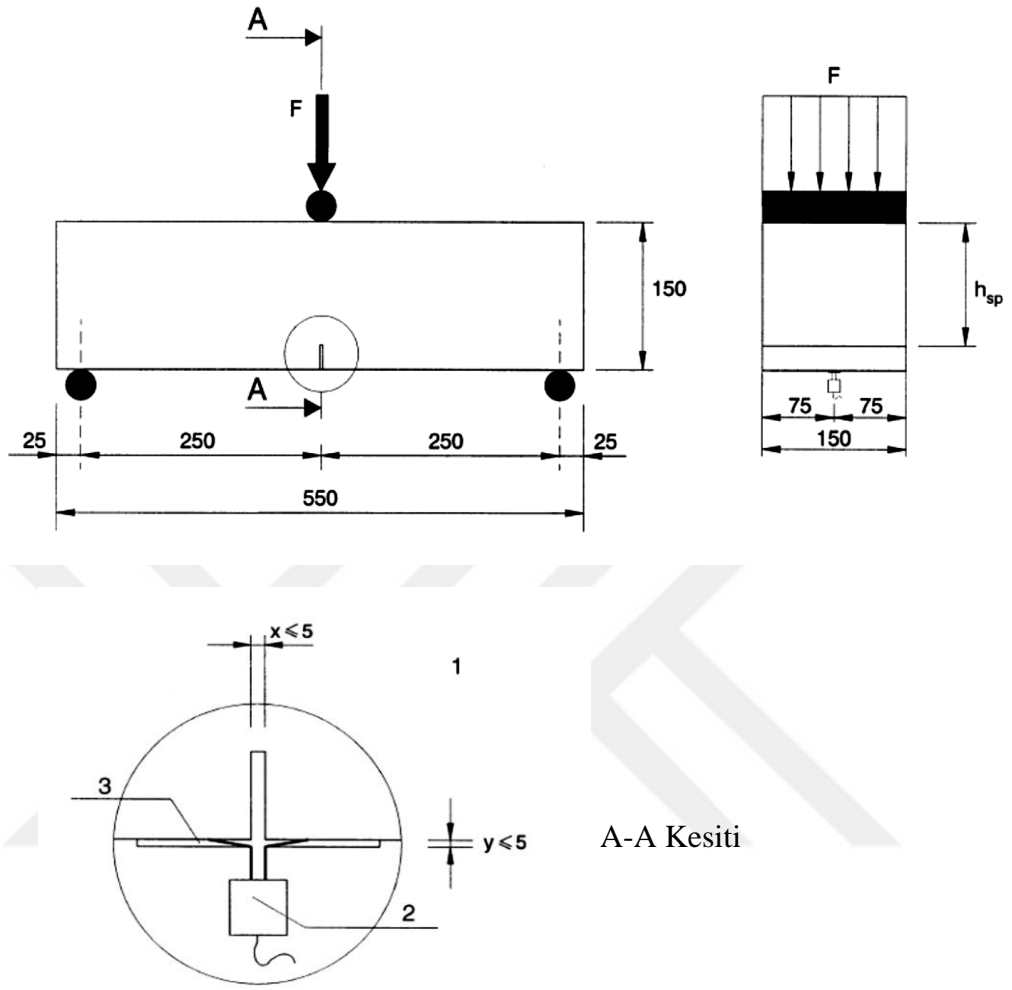
2.9.3. EN 14651 Yöntemi

Bu yöntem, orta noktasından yüklenen çentikli kiriş numunelerinden elde edilen yük-sehim eğrisine bağlı olarak lif donatılı betonların eğilme davranışını belirlenmesini içermektedir [81].

Ayrıca çatlak ağzı açılmasını da opsiyonel olarak belirlenmektedir. Kiriş ortasındaki net sehime, kirişin yan yüzlerine takılan ve kiriş numunesine mafsallı bağlanan çubukların orta noktalarında ölçülen sehimlerin ortalaması olarak alınmaktadır. Deney düzeneği Şekil 2.28.' te verilmektedir [81].

Burada;

1. Detay
2. Çatlak ölçer
3. Numune ve çatlak ölçer arasına konulan çelik levha



Şekil 2. 26. EN 14651' e Göre Eğilme Deneyi Düzeneği ($h_{sp}=125\text{mm}\pm 1\text{mm}$)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, harç karışım oranları, taze ve kuru haldeki harcın fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ve sonuçlarına yer verilmiştir.

3.1. Deneysel Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada, Çimsa Çimento fabrikasında üretilen CEM II A-L 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Portland Çimentosunun (CEM II A-L 42.5 R) Özellikleri.

Kimyasal Bileşim	
Bileşen, (%)	
MgO	1,57
SiO ₂	18,90
Al ₂ O ₃	5,15
Fe ₂ O ₃	3,36
Na ₂ O	0,40
CaO	63,59
SO ₃	2,65
K ₂ O	0,77
Kızdırma Kaybı	1,66
Çözünmeyen Kalıntı	0,74
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık g/cm ³	3,07
Özgül Yüzey cm ² /g.	3108

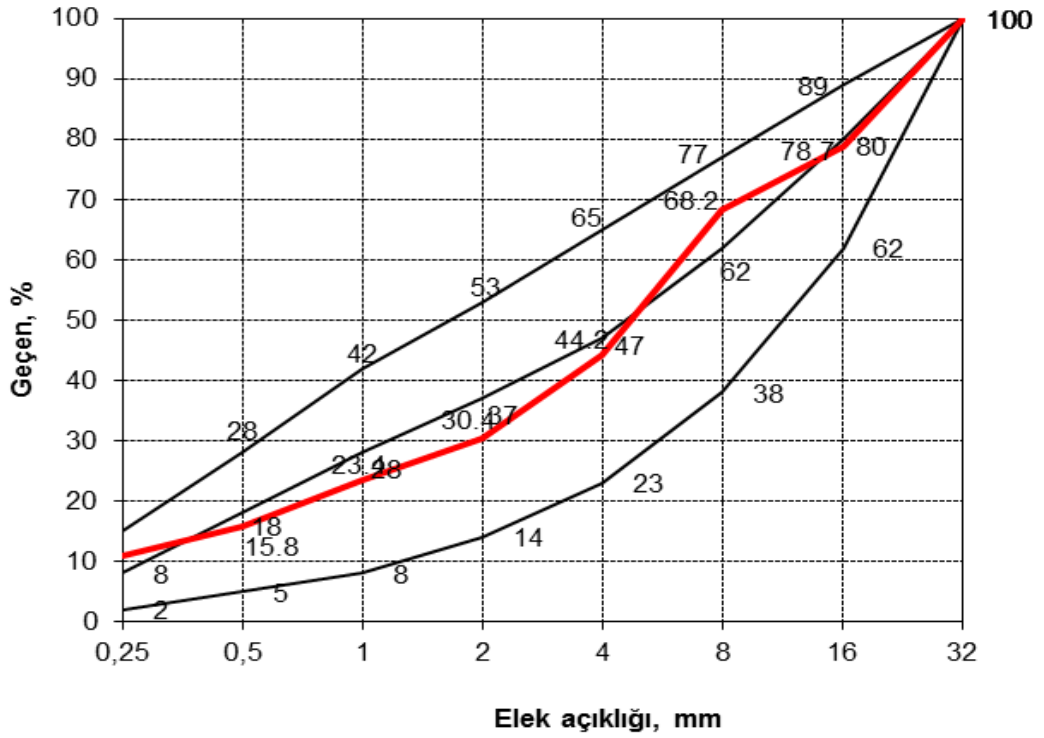
3.1.2. Agregata

Çalışma kapsamında kalker esaslı kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II agregaları kullanılmıştır. Agregalara ait tane boyut dağılımları ve fiziksel özellikler Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2 Agrega Özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Elek boyutu, mm							
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Kırma kum	2,63	1,2	22,5	32,6	48,5	63,0	90,1	100	100	100
Kırma taş I	2,70	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	3,3	74,5	100	100
Kırma taş II	2,71	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	14,8	100

%48 kırma kum, %27 kırma taş I ve %25 kırma taş II kullanılmasıyla elde edilen karışıma ait granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi

3.1.3. Polimer Esaslı Sentetik Makro Lif

Yapılmış olan deneysel çalışmada dört farklı sentetik naylon lif tipi kullanılmış ve lif özellikleri Tablo 3.3.’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada Kullanılan Sentetik Liflerin Özellikleri

Özellik	NL-1	NL-2	NL-3	NL-4
Çekme Dayanımı, Mpa	900	900	550-750	580
Elastic Modülü, GPa	5,15	5,15	5,75	12
Erime Sıcaklığı, °C	260	260	162-168	165-170
Yoğunluk g/cm ³	1,14	1,14	0,91	0,89-0,91
Uzunluk, mm	54	40	54	54
Çap, mm	0,55	0,80	0,34	0.90

3.1.4. Akışkanlaştırıcı

Harçların işlenebilirliğinin sağlanması ve karışım sırasında topaklanmanın önlenmesi için Grace Daracem marka 1025 E tipi süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldı.

3.1.5. Karışım Suyu

Bu çalışmada karışım suyu olarak ortalama sıcaklığı $20 \pm 3^\circ\text{C}$ olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışım Oranları

Harçların üretiminde standart harç karışım miktarları referans alınmıştır. Dört farklı lif tipinden aynı su/çimento oranında aynı akışkanlaştırıcı katkı ile bütün karışımlarda 4 farklı lif tipinden harç numuneleri üretilmiştir. Bu şekilde toplam 36 grup harç numunesi kullanılmıştır. Harç karışım miktarları Tablo 3.4'te verilmiştir.

Karışım hazırlanırken ilk önce çimento ve agrega ve karıştırıldı. Ardından Sentetik lif eklenip tekrar karıştırma işlemi yapılarak liflerin karışım içerisinde homojen dağılımı sağlandı. Daha sonrasında karışım suyu ve akışkanlaştırıcı katkı malzemesi

eklendi. Karışımların tamamı harç makinasında yapılmıştır. Karışım kodu NL-2 naylon lif tip 2 olan lifi ifade etmektedir.

Tablo 3.4. Beton Karışım Oranları

Karışım Kodu	NL-1	NL-2	NL-3	NL-4
Lif içeriği	4,0	4,0	3,0	3,5
Çimento, kg/m ³	350	350	350	350
Su, kg/m ³	170	170	170	170
Süperakışkanlaştırıcı, kg/m ³	3,6	3,6	3,6	3,6
Kırmakum, kg/m ³	875	875	875	875
Kırmataş I, kg/m ³	435	435	435	435
Kırmataş II, kg/m ³	470	470	470	470

3.3. Numune Üretimi

Her bir lif tipi için 6 adet 150x150x600 mm prizma numune ve 4 adet 150x300 mm (yükseklik=150 mm ve çap=300 mm) standart silindir numune üretilmiştir.

Reference



Şekil 3.2. Agrega Çimento ve Su Karışım Harcı Hazırlanması



Şekil 3.3. Liflerin Harç İçerisine Katılması



Şekil 3.3. Karışım Harcının Numune Kaplarına Konulması



Şekil 3.5. Üretilmiş Numuneler

3.4. Beton Deneyleri

3.4.1. Taze Beton Deneyleri

3.4.1.1. Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Üretilen betonlar üzerinde TS EN 12350-6' ya uygun olarak birim ağırlık deneyi yapıldı [94]. Deney düzeneği de Şekil 3.6' da verilmiştir.

3.4.1.2. Hava Miktarı Tayini Deneyi

Taze beton hava miktarı: beton içerisinde kapalı agregâ boşlukları dışındaki var olan havanın hacminin beton hacmine oranının % (Yüzde) olarak ifadesidir. Beton içerisindeki havanın miktarının bilinmesi ne kadar önemli ise, havanın beton üzerindeki etkilerinin bilinmesi de bir o kadar önemlidir. Deneyin amacı Taze beton içerisinde bulunan havanın belirlenmesinde amaç; taze betonun işlenebilirliğini, sertleşmiş betonun yoğunluğu, dayanımı, su geçirirmliliği, ısı ve ses yalıtımı gibi

zelliklerini etkileyen beton içindeki havanın miktarının hacim metodu ile belirlenmesidir. Taze beton hava içeriği TS 3261'e uygun olarak yaplmŖtır.



Ŗekil 3.6. Birim Hacim Ağırlık Deney Düzenegi



Ŗekil 3.7. Hava Miktarı Tayini Deney Düzenegi

Hava içeriği tayini deney düzenegi Ŗekil 3.7' de verilmiŖtir [161].

3.4.1.3. Slump (Çökme) Deneyi

Karışımların işlenebilirliği TS EN 12350-2'e uygun olarak slump deneyi ile belirlenmiştir. İşlenebilirlik deney düzeneği Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.8. Slump (Çökme) Deney Düzeneği

3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Üretildikten sonra 28 gün boyunca $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta standart küre tabii tutulan sertleşmiş beton numuneler üzerinde mekanik özelliklerin tayini deneyleri yapıldı. Yapılan dayanım deneyleri aşağıda verilmiştir.

3.4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini

Basınç dayanımı deneyleri her seri beton için 3 adet 150mmx300 mm. Standart silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-3'e uygun olarak yapılmıştır [163]. Elastisite modülü tayini için basınç deneyine tabii tutulan 2 adet silindir numunesi üzerinde kompresometre ile düşey deplasman ölçümü yapıldı. Basınç dayanımı deney düzeneği Şekil 3.9' da verilmiştir.

Elastisite modülü gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen maksimum yükün %5 ve %45' aralıklarına düşen gerilme-şekil değiştirme noktalarının doğrusal kabul edilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi olarak alındı.



Şekil 3.9. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deney Düzeneği

3.4.2.2. Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini

Eğilmede çekme dayanımı tayini deneyi ASTM C 1609 standardına uygun olarak yapılmıştır. Eğilme deney düzeneği Şekil 3.10’de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Yükleme Düzeneği

Eğilme deneyi kapalı çevrimli sehim kontrollü bir cihazla yapılabilmektedir. Yükleme hızı numune boyutuna ve sehim miktarına göre 0,025-0,3 mm/dakika aralığında seçilebilmektedir.

Hesaplamalar:

Eğilme dayanımı:

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.1)$$

Burada;

f: Gerilme değeri, MPa

P: Yük değeri, N

L: Mesnet açıklığı, mm

b: Numune genişliği, mm

d: Numune yüksekliği, mm

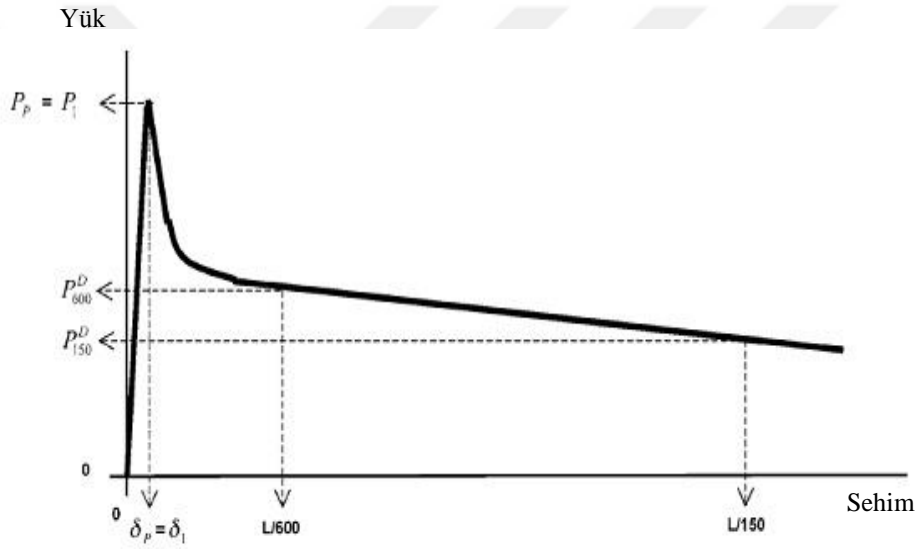
Artık gerilmeler:

$$f_i^D = \frac{P_i L}{bd^2} \quad (3.2)$$

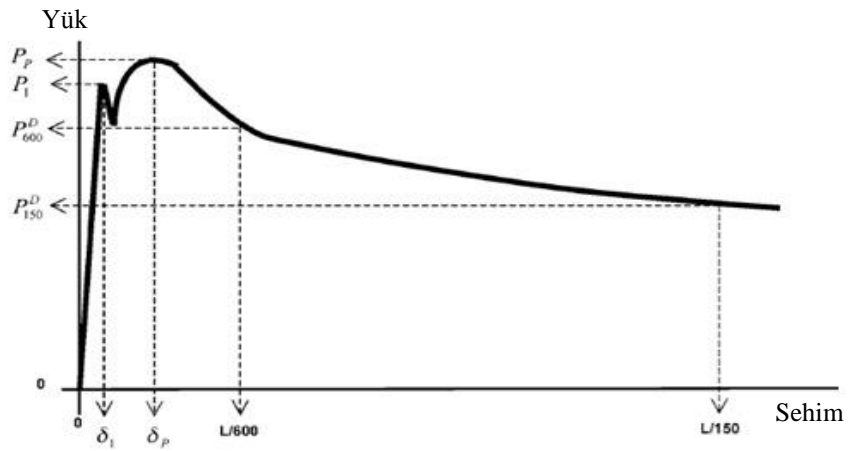
Burada;

f_i^D ve P_j sırasıyla, i. sehimdeki artık gerilme (MPa) ve yük (N) değerleridir.
Eşdeğer eğilme gerilme oranı:

$$R_{T,150}^D = \frac{150 * T_{150}^D}{f_1 bd^2} * 100 (\%) \quad (3.3)$$



(a)



(b)

Şekil 3.11. Tipik Yük-sehim Grafiği ve Artık Gerilme Noktaları

Burada;

$R_{7,150}^D$: Eşdeğer eğilme gerilme oranı, MPa

T_{150}^D : Tokluk, Joule (N.m)

f_1 : İlk-tepe dayanımı, MPa

Tipik yük-sehim grafiği ve artık gerilme noktaları Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

Grafiklerde;

L = Mesnet açıklığı

P_1 = İlk-tepe yükü

P_p = Tepe yükü

δ_1 = İlk-tepe yükündeki net sehim değeri

δ_p = Tepe yükündeki net sehim değeri

f_1 = İlk-tepe dayanımı

f_p = Eğilme dayanımı

P_{600}^D = L/600 net sehim değerindeki kalıcı yük değeri

f_{600}^D = L/600 net sehim değerindeki kalıcı gerilme değeri

P_{150}^D = L/150 net sehim değerindeki kalıcı yük değeri

f_{150}^D = L/150 net sehim değerindeki kalıcı gerilme değeri

T_{150}^D = L/150 net sehim değerine kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan



Şekil 3.12. Kiriş Numunesinin Eğilme Deneyi Sonrası Kesit Görünümü



Şekil 3.23. Kiriş Numunelerin Eğilme Deneyi Sonrası Görünümü

3.4.2.3. Yarmada Çekme Dayanımının Tayini



Şekil 3.34. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

Yarmada çekme dayanımı deneyleri TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde standart silindir numunelerin 6 cm yüksekliğinde dilimlere kesilmesiyle elde edilen numuneler üzerinde, 300 ton kapasiteli preste 0,05 MPa/s yükleme hızı uygulanarak yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.13'te verilmiştir.

3.5. Deney Sonuçları

3.5.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen betonlara ait taze birim ağırlık, çökme (slump deneyi) ve hava içeriği sonuçları Tablo 3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.5. Taze Beton Deney Sonuçları

Karışım Kodu	Taze Birim Ağırlık, kg/m ³	Çökme Değeri, cm	Hava İçeriği, %
NL-1	2412	13	1,2
NL-2	2410	12	1,1
NL-3	2408	13	1,3
NL-4	2415	13	1,2

3.5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.5.2.1. Basınç Dayanımı

Numunelerin elde edilen basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.7.'de verilmiştir..

3.5.2.2. Eğilme Çekme Dayanımı

Eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükü, Rezidüel dayanım, RDT, 150 ve tokluk değerleri Tablo 3.9'da verilmiştir. Ayrıca, eğilme deneyi sonucu elde edilen yük-sehim eğrileri de Şekil 3.14-3.37'de verilmiştir.

Lif donatılı betonların süneklikleri eşdeğer eğilme dayanım oranları dikkate alınarak değerlendirilmektedir (TR34 3rd Edition-Concrete industrial ground floors a guide to design and construction, 2003). Tepe yükü sonrası rezidüel pozitif moment taşıma kapasiteleri belirlenmesi için kullanılan lif miktarının eşdeğer eğilme dayanım oranı

için önerilen minimum %30 şartını sağlaması önerilmektedir. Eşdeğer eğilme dayanım oranı ASTM C 1609-C 1609M-10 için RDT,150 olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada RDT,150 değerleri NL-1, NL-2, NL-3 ve NL-4 lif tipleri için sırasıyla % 41.9, % 40.1, % 29.4 ve % 37.2 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında NL-3 lif tipi hariç diğer liflerin RDT,150 için önerilen değerleri sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 3.6. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

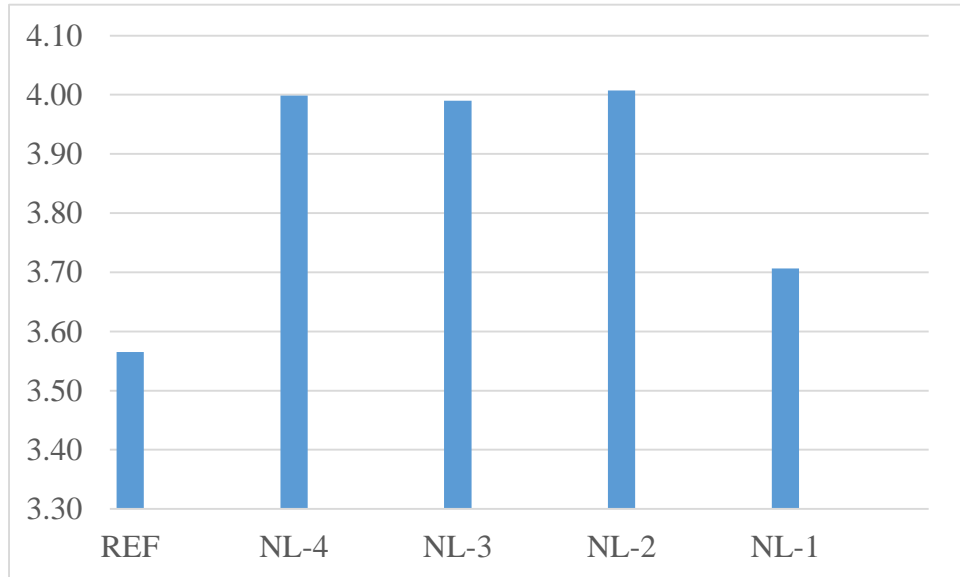
Karışım Kodu	Numune No.	7 Günlük Küp Basınç Dayanımı MPa	28 Günlük Silindir Basınç Dayanımı MPa	Ortalama 7 Günlük Küp Basınç Dayanımı MPa	Ortalama 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımı MPa
REF	1	42,2	46,1	40,57	44,27
	2	40,4	44,0		
	3	39,1	42,7		
NL-1	1	41,0	45,0	39,80	44,33
	2	38,2	44,7		
	3	40,2	43,3		
NL-2	1	39,2	45,8	39,10	43,97
	2	39,3	41,4		
	3	38,8	44,7		
NL-3	1	39,0	44,3	38,07	44,43
	2	38,8	45,0		
	3	36,4	44,0		
NL-4	1	32,1	45,0	35,97	44,60
	2	38,8	44,6		
	3	37,0	44,2		

3.5.2.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Numunelere ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Tablo 3.8’de gösterilmiştir. Yarmada çekme dayanım sonuçlarının grafik olarak gösterimi de Şekil 3.14’te verilmiştir.

Tablo 3.7. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

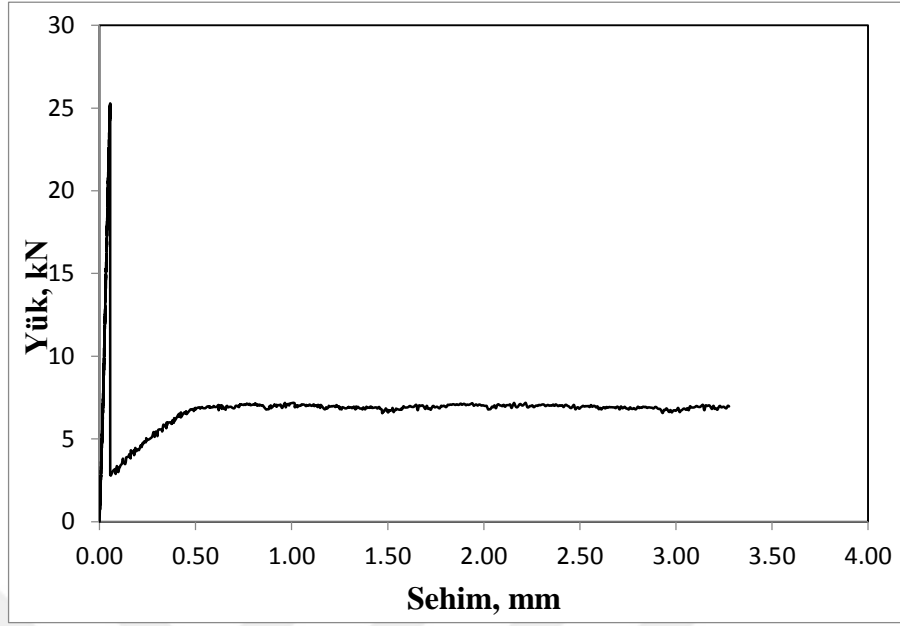
Kod	Kırılma Yüğü kN	Yarmada çekme dayanımı MPa	Ort.	Standard sapma	Çarpıklık
REF	53,0	3,75	3,57	0,20	-0,29
	46,5	3,29			
	53,0	3,75			
	49,0	3,47			
NL-4	55,0	3,89	4,00	0,41	0,25
	65,0	4,60			
	49,0	3,47			
	57,0	4,03			
NL-3	55,5	3,93	3,99	0,16	0,77
	54,0	3,82			
	56,0	3,96			
	60,0	4,25			
NL-2	60,5	4,28	4,01	0,30	-0,40
	55,0	3,89			
	60,5	4,28			
	50,5	3,57			
NL-1	51,0	3,61	3,71	0,27	0,64
	52,0	3,68			
	58,5	4,14			
	48,0	3,40			



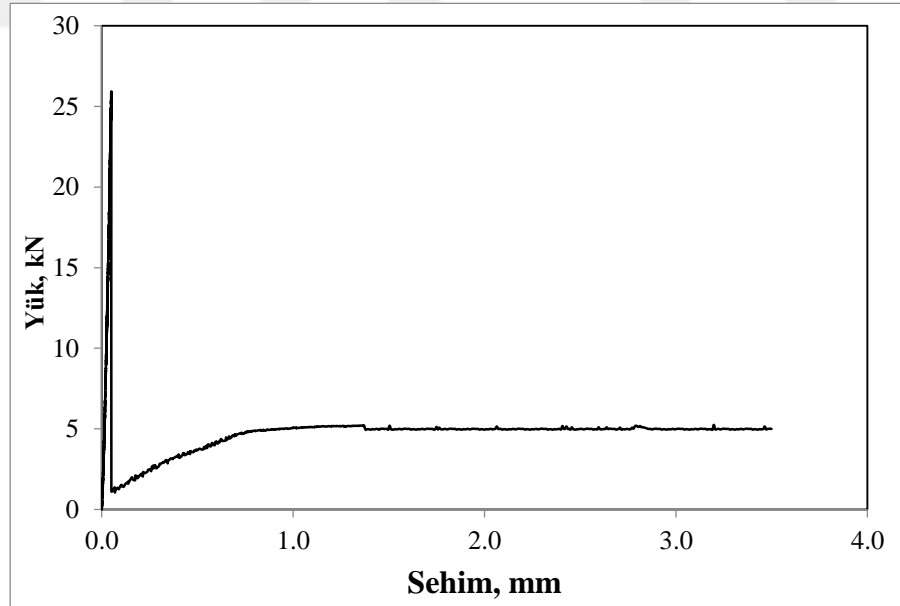
Şekil 3.45. Yarmada Çekme Dayanımı Grafiği

Tablo 3.8. Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

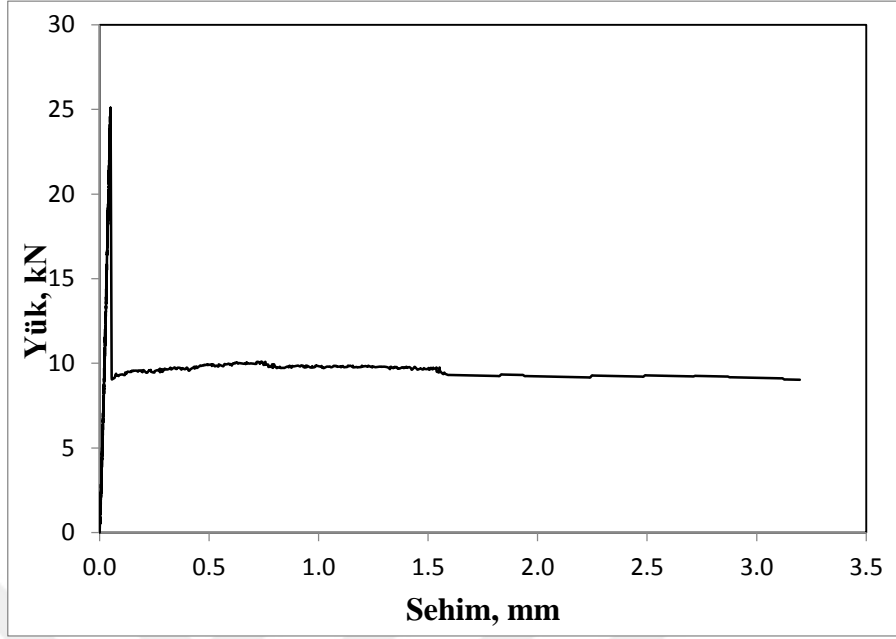
ASTM C1609/C1609M – 10										
Lif Tipi	Numune	Tepe yükü= ilk çatlak yükü	Sehim	Rezidüel yük	Tepe yükü dayanımı	Rezidüel dayanım	Tokluk	Eşdeğer eğilme dayanım oranı	Ortalama eşdeğer eğilme dayanım oranı	Ortalama Tokluk
	No.	$P_p=P_1$ (kN)	$\delta_p = \delta_1$ (mm)	(L/150=3 mm sehim için)	(ilk çatlak yükü dayanımı) $f_{p=f1}$ (MPa)	f_{150}^D (MPa)	T_{150}^D (0-3 mm sehim aralığı)	$R^D_{T,150}$ (%)	$R^D_{T,150}$ (%)	T_{150}^D (joule)
54/80	1	31,90	1,95	22,93	4,25	3,06	47,3	49,4	41,9	36,4
	2	23,67	1,73	7,37	3,16	0,98	27,0	38,0		
	3	32,20	1,71	8,76	4,29	1,17	35,1	36,4		
	4	24,28	1,82	15,80	3,24	2,11	35,0	48,0		
	5	32,04	2,09	15,11	4,27	2,01	42,7	44,4		
	6	29,58	1,84	7,62	3,94	1,02	31,1	35,1		
40/80	1	25,77	1,66	13,89	3,44	1,85	34,2	44,2	40,1	32,7
	2	28,77	2,10	6,51	3,84	0,87	34,6	40,1		
	3	29,97	2,00	7,06	4,00	0,94	35,8	39,8		
	4	27,55	1,96	9,93	3,67	1,32	33,7	40,8		
	5	26,95	1,53	10,25	3,59	1,37	29,2	36,1		
	6	24,18	1,47	10,20	3,22	1,36	28,8	39,7		
Forta Ferro	1	32,80	1,05	5,71	4,37	0,76	25,5	25,9	29,4	28,4
	2	34,06	1,19	3,53	4,54	0,47	25,5	25,0		
	3	30,25	1,63	1,92	4,03	0,26	23,7	26,1		
	4	35,05	2,23	2,38	4,67	0,32	36,9	35,1		
	5	31,07	2,11	2,21	4,14	0,29	30,0	32,2		
	6	29,97	1,88	2,74	4,00	0,37	29,1	32,3		
Barchip	1	25,28	1,67	6,95	3,37	0,93	28,9	38,1	37,2	27,7
	2	25,93	1,68	5,21	3,46	0,69	24,4	31,4		
	3	25,10	1,79	9,79	3,35	1,31	33,1	44,0		
	4	27,37	1,51	8,44	3,65	1,13	30,2	36,8		
	5	24,59	1,64	7,24	3,28	0,97	28,0	37,9		
	6	20,49	1,29	5,56	2,73	0,74	21,3	34,7		



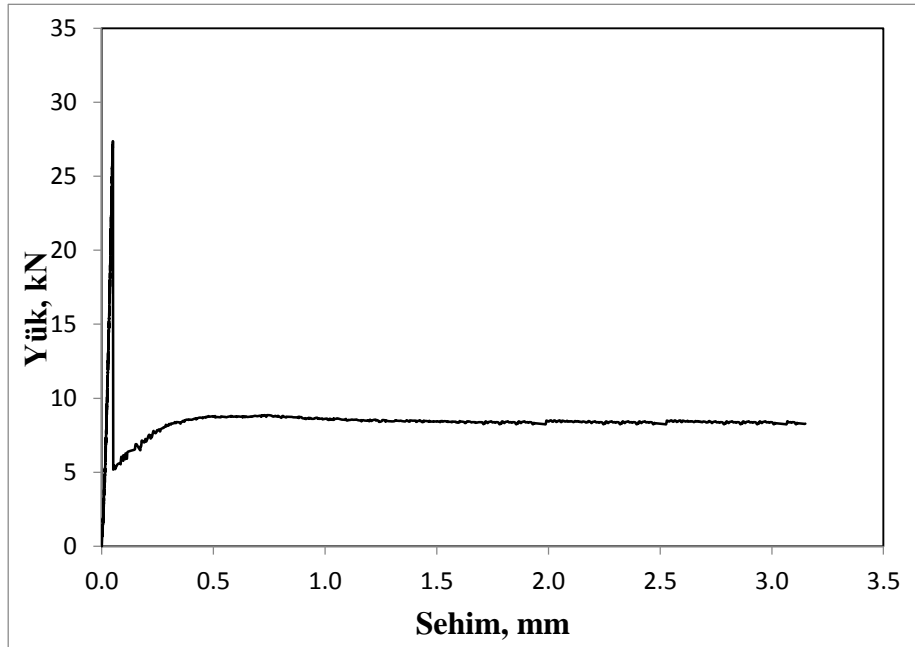
Şekil 3.16. NL-4 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



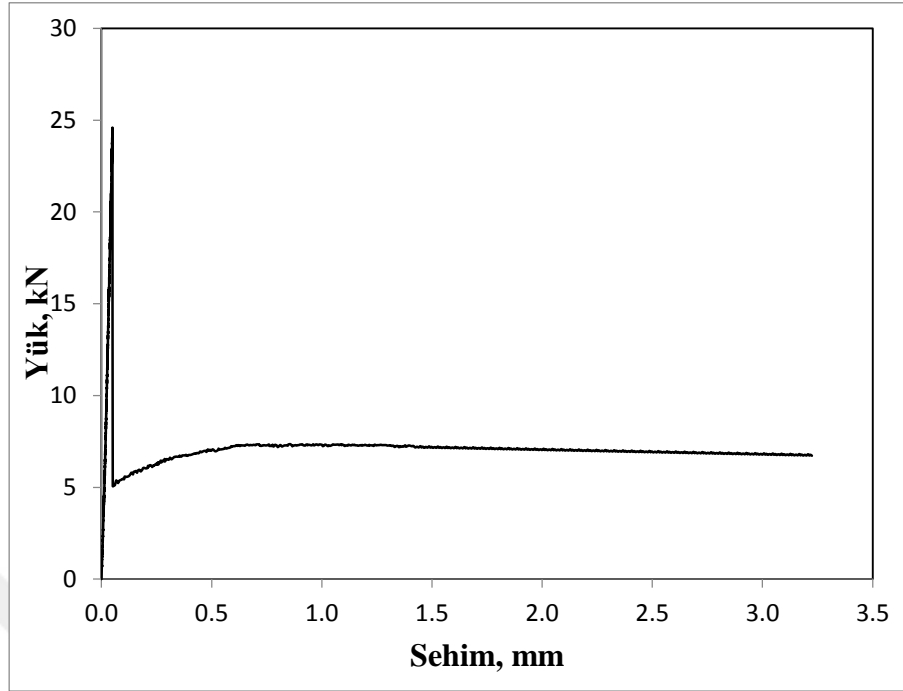
Şekil 3.17. NL-4 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



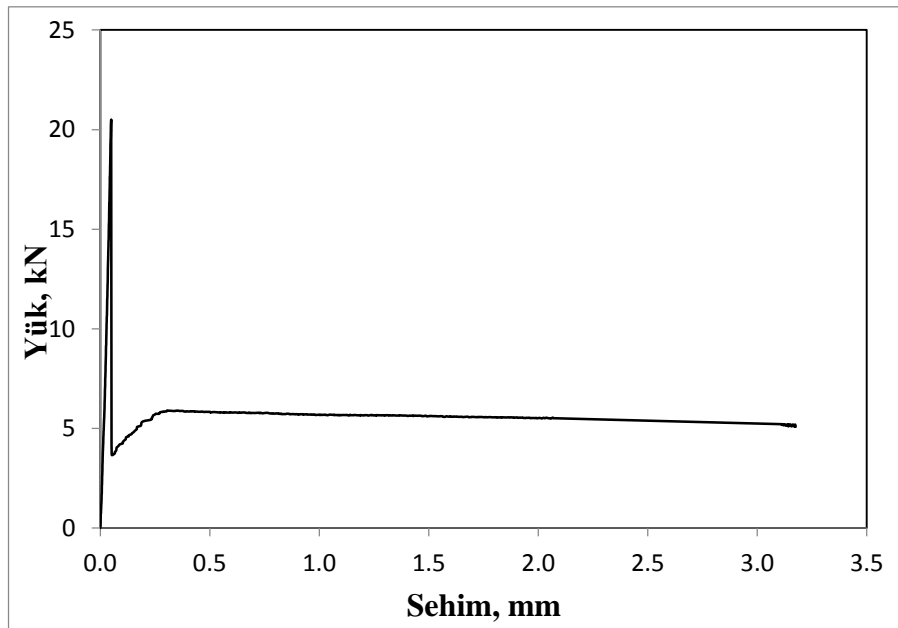
Şekil 3.18. NL-4 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



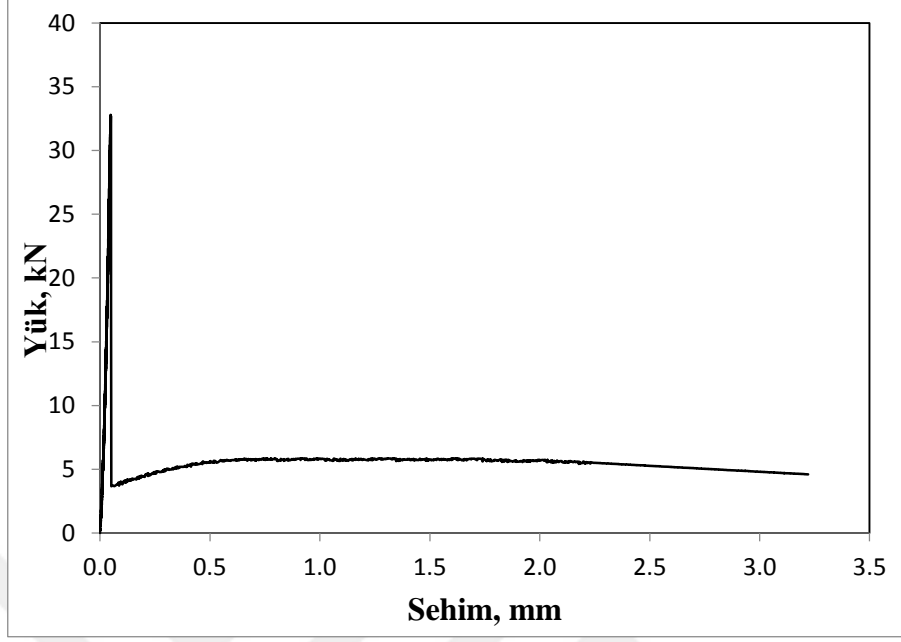
Şekil 3.19. NL-4 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



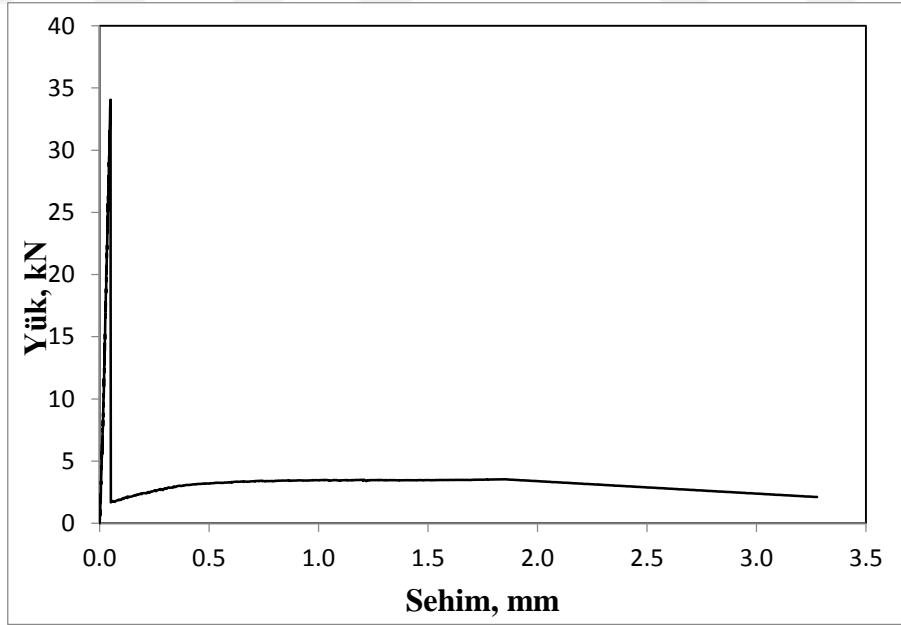
Şekil 3.20. NL-4 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



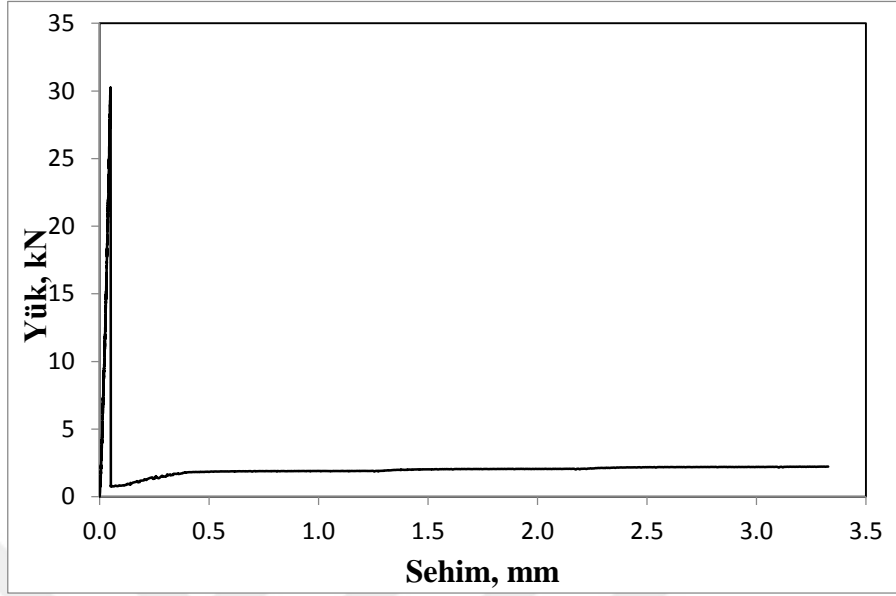
Şekil 3.21. NL-4 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



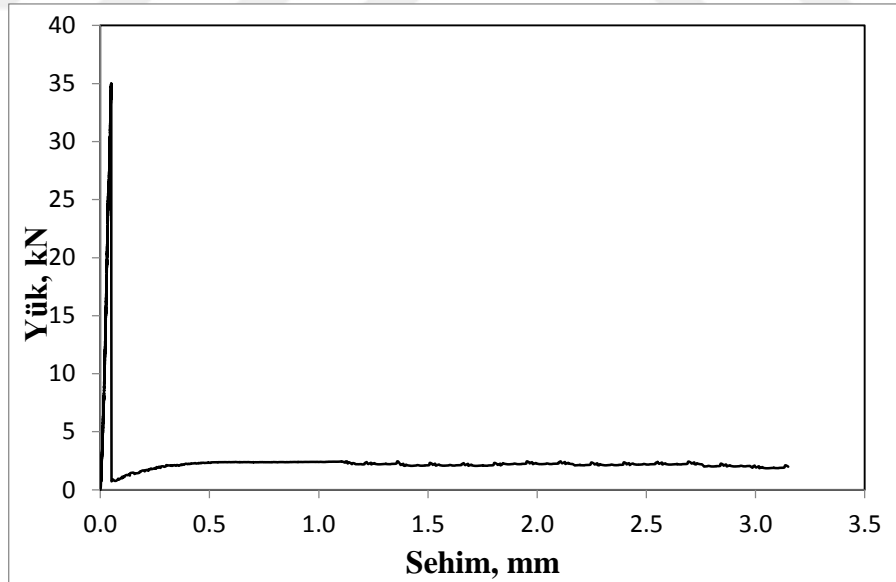
Şekil 3.22. NL-3 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



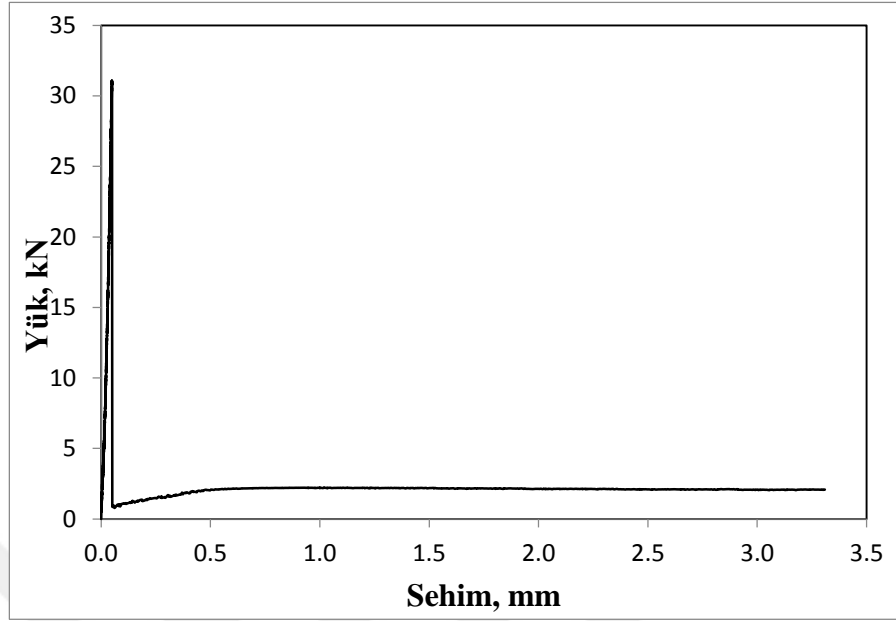
Şekil 3.23. NL-3 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



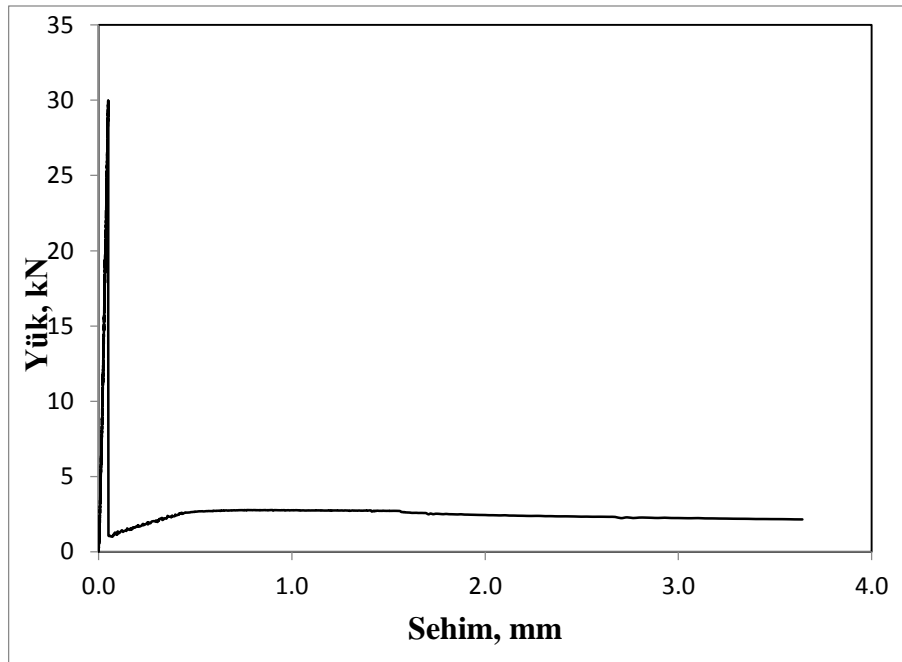
Şekil 3.24. NL-3 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



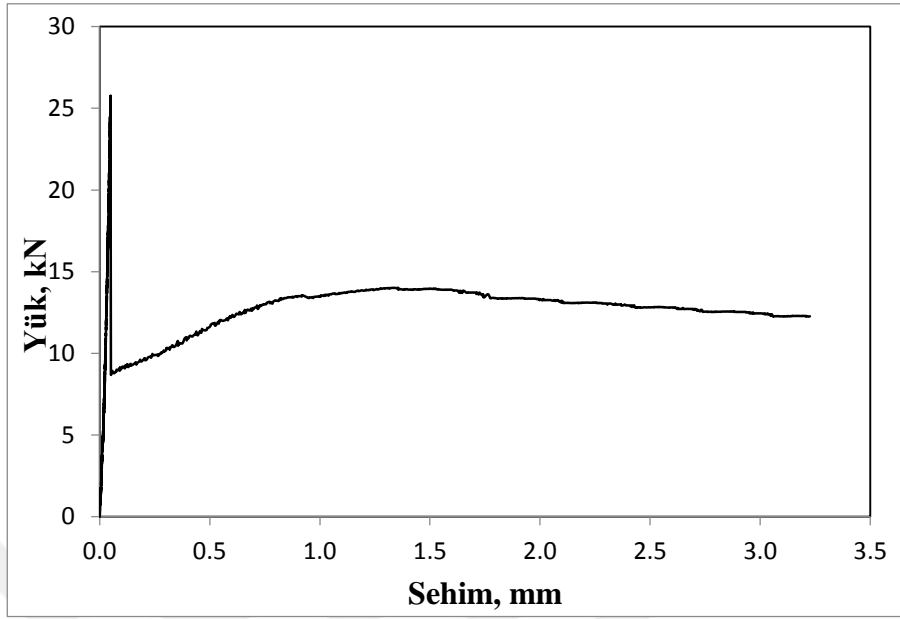
Şekil 3.25. NL-3 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



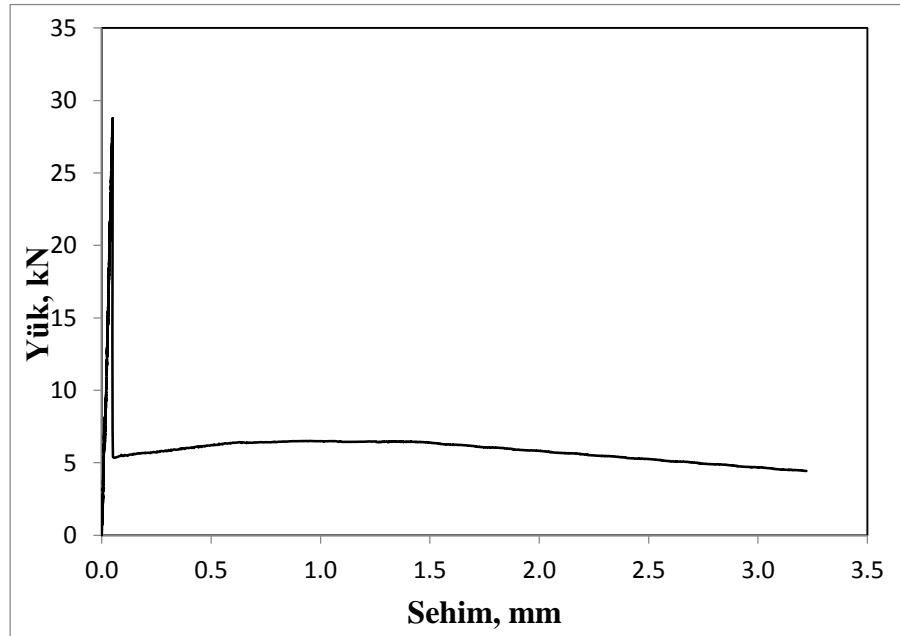
Şekil 3.26. NL-3 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



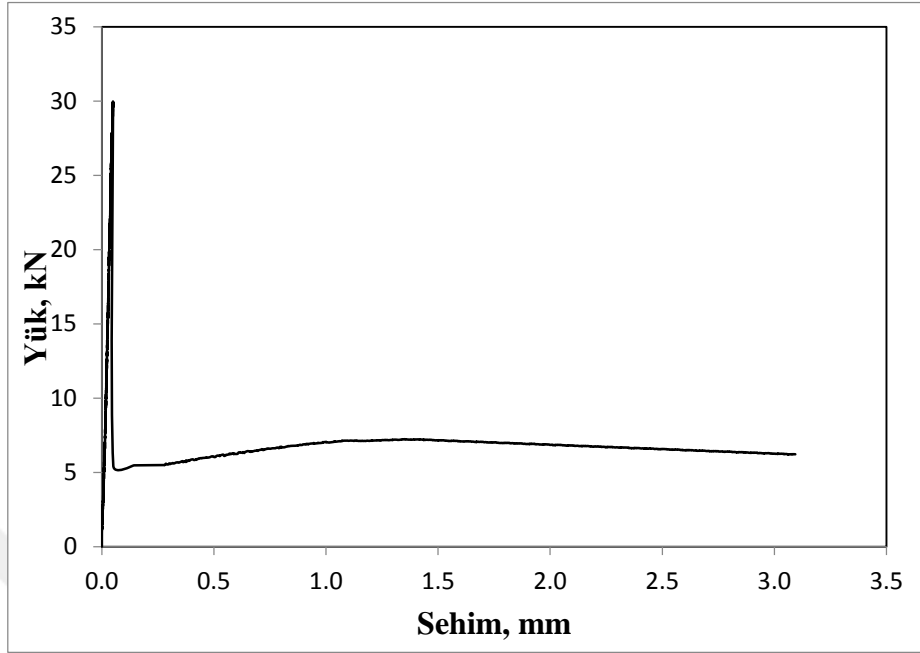
Şekil 3.27. NL-3 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



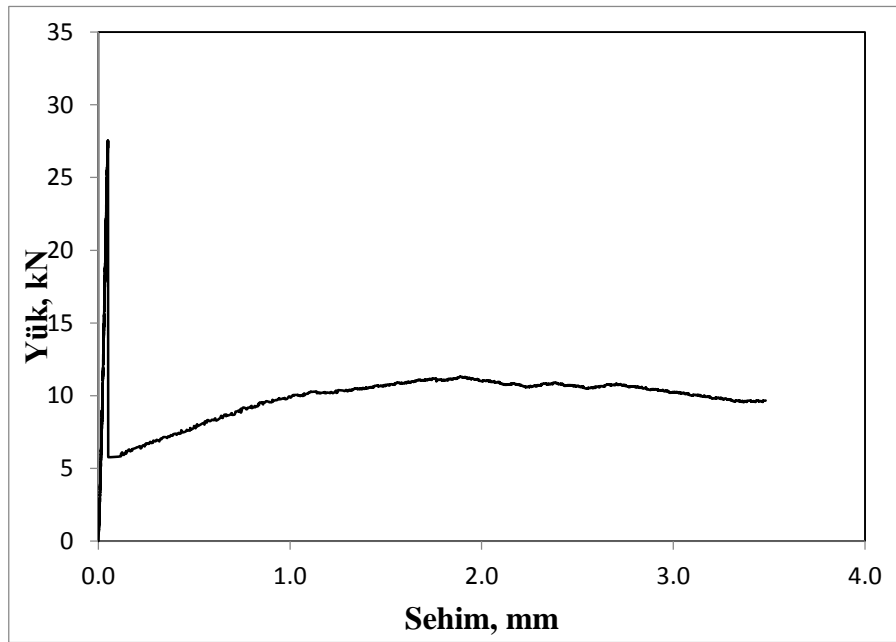
Şekil 3.28. NL-2 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



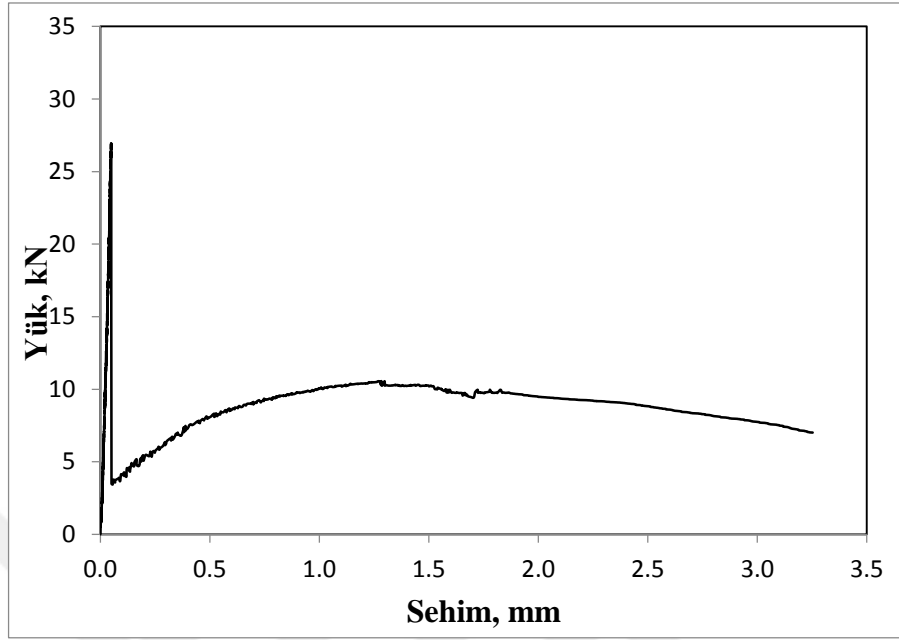
Şekil 3.292. NL-2 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



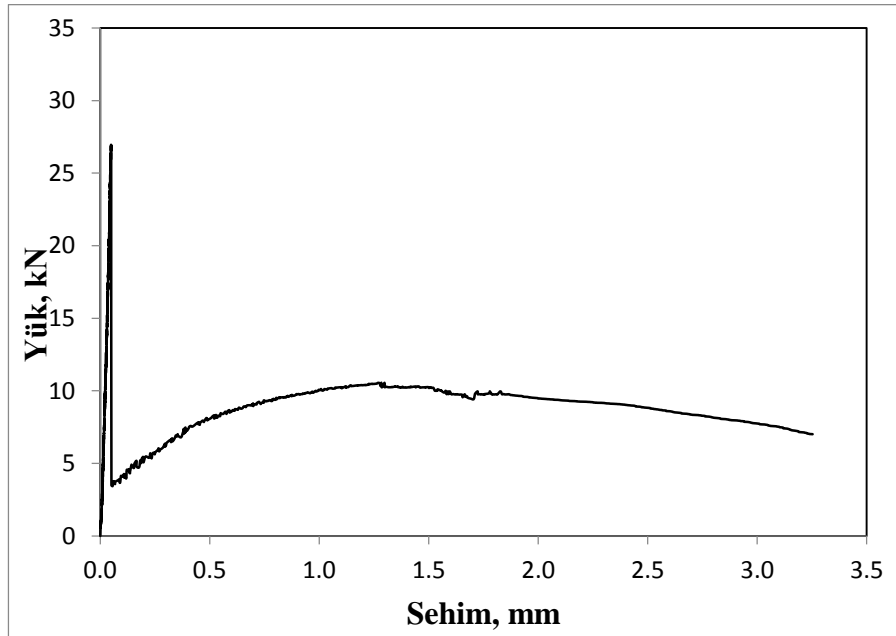
Şekil 3.30. NL-2 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



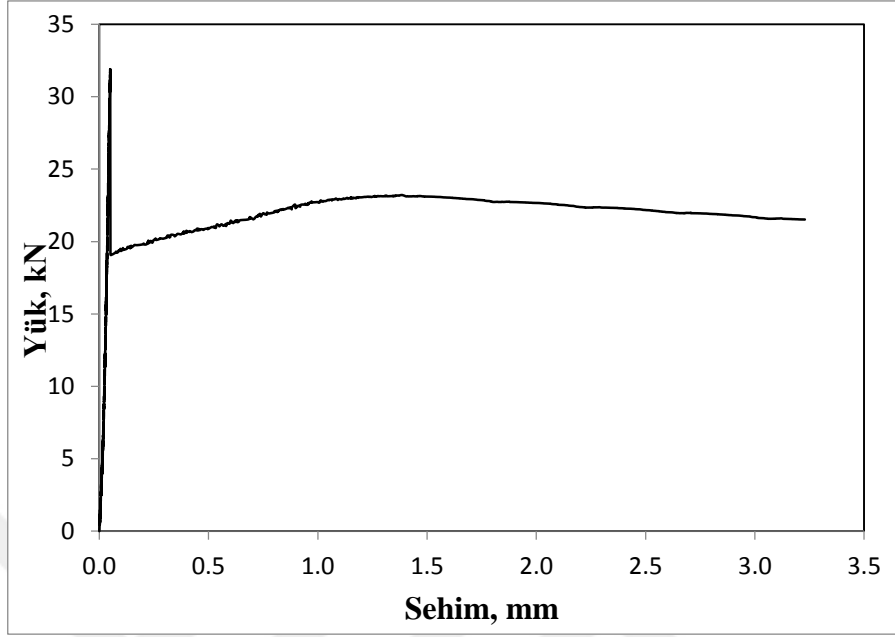
Şekil 3.31. NL-2 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



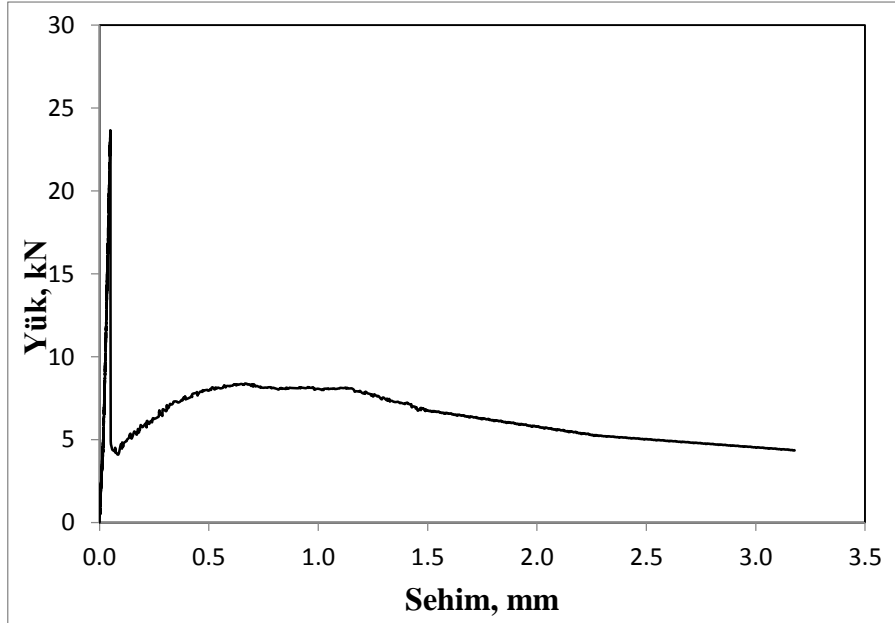
Şekil 3.32. NL-2 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



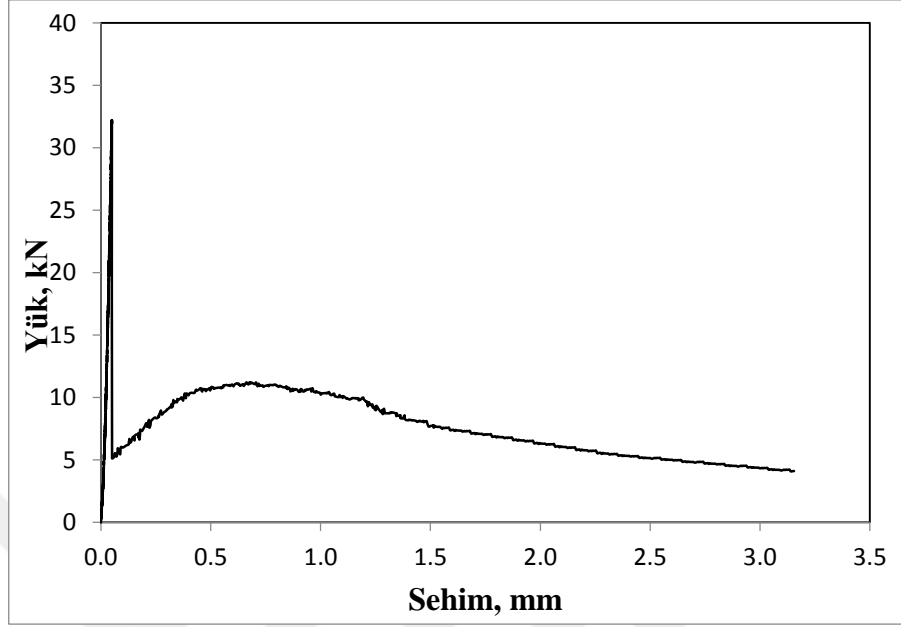
Şekil 3.33. NL-2 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



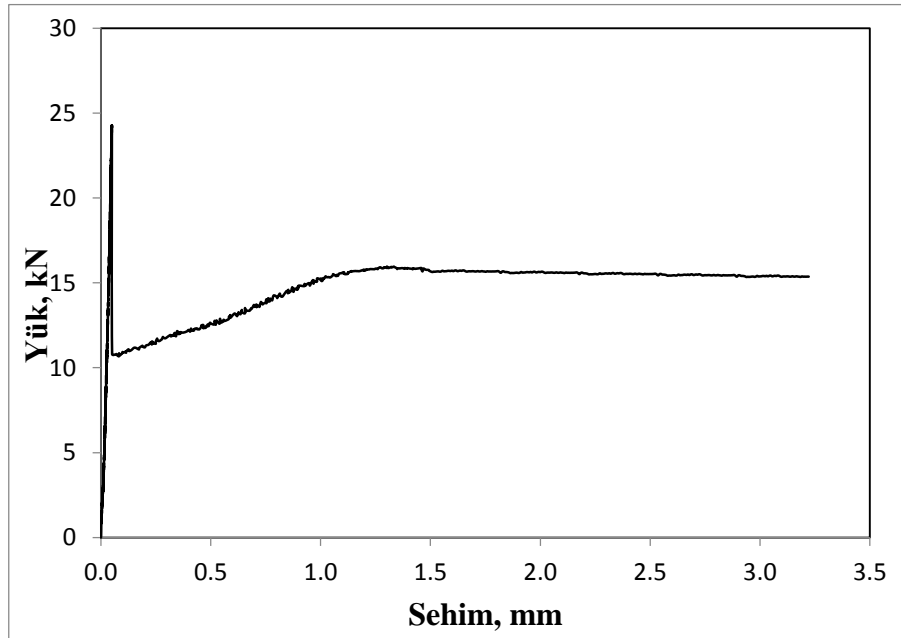
Şekil 3.34. NL-1 Kodlu ve 1 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



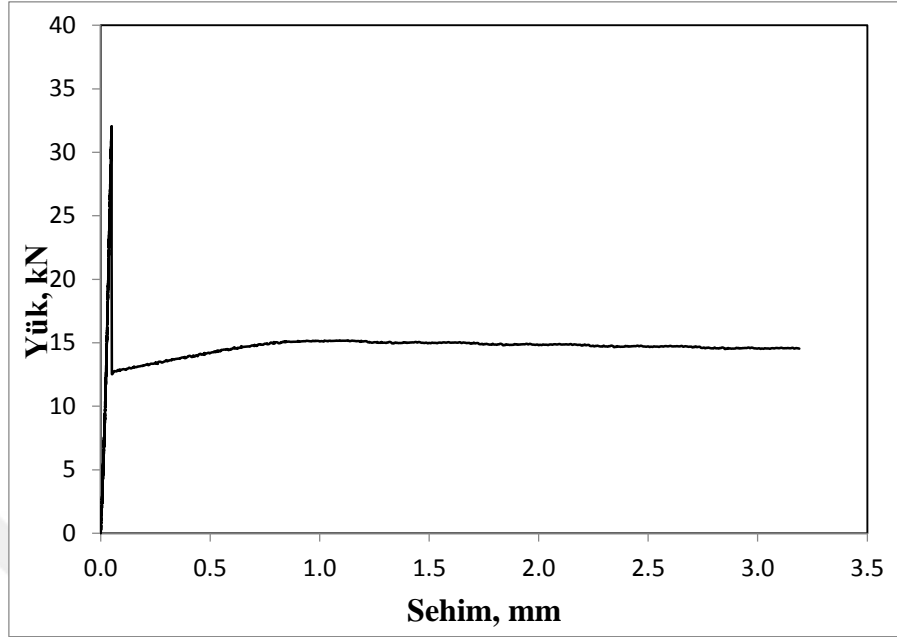
Şekil 3.35. NL-1 Kodlu ve 2 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



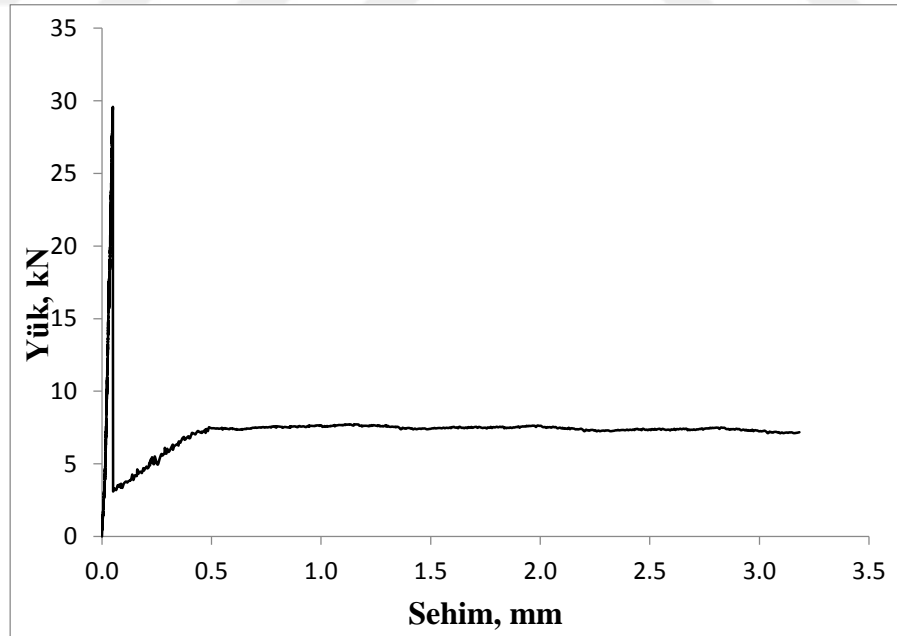
Şekil 3.36. NL-1 Kodlu ve 3 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



Şekil 3.37. NL-1 Kodlu ve 4 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



Şekil 3.38. NL-1 Kodlu ve 5 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi



Şekil 3.39. NL-1 Kodlu ve 6 No'lu Numune İçin Yük-Sehim Eğrisi

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kiriş numunelerin ortalama tokluk değerleri NL-1, NL-2, NL-3 ve NL-4 lif tipi için sırasıyla 36,40 Joule, 32,70 Joule, 28,40 Joule ve 27,70 Joule olarak elde edilmiştir. Kiriş numunelerin ortalama eşdeğer eğilme dayanımı oranları NL-1, NL-2, NL-3 ve NL-4 lif tipi için sırasıyla %41,90, %40,10, %29,40, %37,20 olarak elde edilmiştir. Yarmada çekme deney sonuçlarında ise naylon lif katkısının betonun yarmada çekme dayanımına referans numunelere göre büyük oranda katkı sağladığı görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarına aşağıdaki verilmiştir:

- Numunelere ait 28 günlük silindir basınç dayanımları dikkate alındığında numunelerin C40/50 beton sınıfına sahiptir.
- Bütün lif tipleri için taze betonların birim ağırlık, hava içeriği ve çökme değerlerinde lifsiz (referans) betonlara kıyasla belirgin değişiklik gözlenmemiştir.
- Eğilme deneyi ile 3 mm sehime kadar yapılan yükleme sonrası bütün lif tipleri için hiçbir numunede ikiye ayrılma gözlenmemiştir.
- NL-3 tipi liflerin yumuşak yapısından dolayı taze beton içerisinde üretim sırasında kesite dik lif oryantasyonu sağlanmasında zorluk yaşanmıştır.
- Herbir lif tipi için eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numunelerde ilk çatlak yükü ve tepe yükü aynı değer olarak elde edilmiştir.
- Herbir lif tipi için ilk çatlak yükü sonrası bütün kiriş numunelerde ani bir düşme (yük boşalması) ve bunu izleyen bir toparlanma elde edilmiştir. Bu tür davranışlar (ani düşme veya yük-sehim eğrisinde süreksizlik) genellikle lif içeriğinin yetersiz olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Ani düşme sonrası bütün kiriş numunelerde yükün tekrar artma eğilimi gösterdiği (yük taşımaya devam ettiği) belirlenmiştir.
- Herbir lif tipi için ilk çatlak yük değerlerinde ortalama %10 değişiklik gözlenmiştir, ancak betonun heterojen yapısı nedeniyle diğer mekanik dayanımlarda olduğu gibi bu durum beklenen bir sonuçtur.
- Bütün lif tipleri için kiriş numunelerin ilk çatlak yüküne karşı gelen sehime değerleri ortalama olarak 0,05-0,1 mm arasında elde edilmiştir. Lif donatılı betonlarda ilk çatlak yükü için sehime değeri genellikle 1 mm'nin altında oluşmaktadır.
- Eğilme deneyi ile elde edilen yük-sehim eğrileri dikkate alınarak 3 mm sehime kadar hesaplanan tokluk değerleri (3 mm sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan) incelendiğinde en yüksek ortalama tokluk değeri

NL-1 lif tipi için 36,4 joule olarak belirlenmiştir. Ortalama tokluk değeri en düşük NL-4 lif tipi için 27,7 joule olarak elde edilmiştir.

- Lif donatılı betonların süneklikleri eşdeğer eğilme dayanım oranları dikkate alınarak değerlendirilmektedir (*TR34 3rd Edition-Concrete industrial ground floors a guide to design and construction, 2003*). Tepe yükü sonrası rezidüel pozitif moment taşıma kapasiteleri belirlenmesi için kullanılan lif miktarının eşdeğer eğilme dayanım oranı için önerilen minimum %30 şartını sağlaması önerilmektedir. Eşdeğer eğilme dayanım oranı ASTM C 1609-C 1609M-10 için $R^D_{T,150}$ olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada $R^D_{T,150}$ değerleri NL-1, NL-2, NL-3 ve NL-4 lif tipleri için sırasıyla % 41.9, % 40.1, % 29.4 ve % 37.2 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında NL-3 lif tipi hariç diğer liflerin $R^D_{T,150}$ için önerilen değerleri sağladığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Köksal, F., Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
2. Taşdemir, M.A., Bayramov F., Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İtü dergisi/d Cilt 1, Sayı 2, 125-144, Aralık, 2002.
3. Taşdemir, M.A., Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 9-11, 24 Kasım, 1999.
4. Balaguru, P.N., Narahari, R., Patel, M., Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 89 (6), 541-545, 1992.
5. Banthia, N., Trottier, J-F., Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part II: Toughness Characterization, ACI Materials Journal, 92 (2),146-154, 1995.
6. Barros, J.A.O., Trotier, J.F., Flexural Behaviour of SFRC: Testing and Modelling, Journals of Materials in Civil Engineering, 11 (4), 331-339, 1995.
7. Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E., Yerlikaya, M., Endüstriyel Zemin Betonları, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 2006.
8. Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M., Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 159-166, November 4-7, 2002.
9. Eyüp Taşkan, Çelik Tel Kanca Tipinin Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Yozgat 2017
10. Salih T. Y. Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması Doktora Tezi Elazığ, 2002

11. Halm,1992 / Halm, J.,1992, Ausgangstoffe, Herstellverfahren und Eigenschaften von Glasfaserbeton, Faserbeton, Vortrage der DBV (Deutscher Beton- Verein e.V.)-Arbeitstangung, Duisburg.
12. Wörner, J.D.,1992, Sachstandbericht 'Faserbeton mit Synthetischen Organischen Fasern'und Anwendungen in der Praxis, Faserbeton, Vortrage der DBV- Arbeitstangung, Duisburg.
13. Türker, T., 2000, Betonarmede Oluşan İç Gerilimlere Karşı Önlem, İnşaat ve Malzeme, The Constructuion and Materials Magazine, ISSN 1301- 2738, Sayı:150, 24-25.
14. Öznur D. Gündelik Hayatta Plastik Malzemenin Anlamları: Mutfak Objeleri Üzerine Bir Araştırma, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009
15. Sentetik tek lifli elyaflar ABD Mühendislik Araştırma Kolları Yeniden Arama ve Geliştirme Bölümü için patlamaya dayanıklı yapılarda kullanıldı
16. Morgan, D. R.; McAskill, N.; Richardson, B. W.; and Zellers, R. C., “A Comparative Evaluation of Plain, Polypropylene Fiber, Steel Fiber, and Wire Mesh Reinforced Shotcrete,” Transportation Research Board, Washington D. C., Jan. 1989
17. Ramakrishnan, V, and Bjorn, J. L., “Fatigue Strength and Endurance Limit of Plain and Fiber Reinforced Composites—A Critical Review,” Pro- ceedingsof the International Symposium on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures, Madras, India, Dec. 1991, pp. 381-405.
18. Wang, Y., and Backer, S., “An Experimental Study of Synthetic Fiber Reinforced Cementitious Composites,” Journal of Materials Science, (Accepted for publication).
19. Daniel, J. I., and Anderson, E. D., “Acrylic Fiber Reinforced Cement Composites,” Third International Symposium on Developments in Fibre

Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium FRC 86, Vol. 1, RILEM Technical Committee 49-TFR, July 1986.

20. Hahn, H.; Karl, S.; and Worner, J. D., Properties of Polyacrylonitrile Fiber Reinforced Concrete, SP-105, Session on Fiber Reinforced Concrete, Baltimore, Nov. 1986, 13 pp.
21. Walton, P. L., and Majumdar, A. J., "Properties of Cement Composite Reinforced with Kevlar Fibres," Journal of Materials Science, Vol. 13, 1978, pp. 1075-1083.
22. Gale, D. M.; Riewald, P G.; and Champion, A. R., "Cement Reinforcement with Man-Made Fibers," International Man-Made Fibres Congress, E. I. Du Pont de Nemours and Co., Dornbirn, Austria, Sept. 1986.
23. Konczalski, P, and Piekarski, K., "Tensile Properties of Portland Cement Reinforced with Kevlar Fibers," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 1, Oct. 1982, pp. 378-384.
24. Akihama, S.; Suenage, T.; and Banno, T., "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composite and the Application of Large Domes," Kajima Institute of Construction Technology, Kajima Corporation, Tokyo, Japan, July 1984.
25. Walton, P. L., and Majumdar, A. J., "Cement Based Composites with Mixtures of Different Types of Fibres," Composites, Sept. 1975, pp. 209-216.
26. Ersoy, H. Y., (2001). Kompozit malzeme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye.
27. The Condensed Chemical Dictionary, Van Nostrand, Rheinhold Company, New York, 8th ed., p. 635.
28. Cook, J. G., Handbook of Textile Fibers, Morrow Publishing Company, Ltd., Durham, England, 1984, pp. 261-283.

29. Moncrieff, R. W., *Man-Made Fibers*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959, pp. 324-333.
30. Khajuria, A.; Bohra, K.; and Balaguru, P. N., *Long-Term Durability of Synthetic Fibers*, SP-126, American Concrete Institute, Detroit, 1991, pp. 851-868.
31. Sorenson, W. R., and Campbell, T. W., *Preparative Methods of Polymer Chemistry*, Interscience Publishers, Inc., New York, 1961.
32. Golding, *Polymers and Resins*, D. Van Nostrand Co., 1959, pp. 288-289.
33. Kobayashi, K., "Development of Fibre Reinforced Concrete in Japan," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 1, Construction Press, Feb. 1983.
34. Kobayashi, K. and Cho, R., "Flexural Behavior of Polyethylene Fibre Reinforced Concrete," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, No. 1, Construction Press, Feb. 1981.
35. Gale, D. M., and Shin, H., "Cement Matrix Composites and Method for Making Same," U.S. Patent 4,608,089, Aug. 26, 1986.
36. Gale, D. M.; Guckert, J. R.; and Shelburne, S. S., "Oriented Polyethylene Pulp for Asbestos Replacement in Cement Building Products," *Textile Composites in Building Construction—Part I, Cement-Based Composites and Geotextiles*, FITAT, Lyon, France, July 1990, pp. 47-56.
37. Hannant, D. J., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley and Sons, Ltd., New York, 1978, 213 pp.
38. Dave, N. J., and Ellis, D. G., "Polypropylene Fibre Reinforced Cement," *The International Journal of Cement Composites*, Vol. 1, No. 1, May 1978, pp. 19-28.

39. Rice, E., Vondran, G. and Kunbargi, H., "Bonding of Fibrillated Polypropylene Fibers to Cementitious Materials," Materials Research Society Proceedings, Pittsburgh, Vol. 114, 1988, pp. 145-152.
40. Mai, Y. W.; Andonian, R.; and Cotterell, B., "Thermal Degradation of Polypropylene Fibers in Cement Composites," International Journal of Composites, Vol. 3, No. 3, Aug. 1980, pp. 149-155.
41. "Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete," ASTM Standards for Concrete and Aggregates, Vol. 04.02, ASTM C 1116, 1989.
42. Zollo, R. F., Collated Fibrillated Polypropylene Fibers in FRC, SP81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 397-409.
43. Zollo, R. F.; Ilter, J. A.; and Bouchacourt, G. B., "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibre," Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium FRC 86, Vol. 1, RILEM Technical Committee 49-TFR, July 1986.
44. "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete," ASTM Standards for Concrete and Mineral Aggregates, Vol. 04.02, ASTM C 1018.
45. "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, ACI Committee Report 544.2R 78, July 1978.
46. Daniel, J. I., and Shah, S. P., "Thin Precast Fiber Reinforced Cement Panels," Materials and Membrane Behavior, Proceedings of the Sessions at Structures Congress, '87, Structural Division of the American Society of Civil Engineers, Aug. 17-20, 1987.
47. Padron, I., and Zollo, R. F., "Effect of Synthetic Fibers on Volume Stability and Cracking of Portland Cement Concrete and Mortar," ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, July-Aug. 1990, pp. 327-332.

48. Nanni, A., "Properties of Aramid Fiber Reinforced Concrete and SIFCON," *J. of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 1, Feb. 1992, pp. 1-15.
49. "Carbon-Fiber Reinforced Concrete Curtain Walls," *Concrete Construction*, Jan. 1986, p. 49.
50. Bantia, N., and Ohama, Y., "Dynamic Tensile Fracture of Carbon Fiber Reinforced Cements," *Proc., Int'l Conf. On Recent Developments in FRC*, Cardiff, Sept. 1989, pp. 251-260.
51. Ohama, Y.; Amano, M.; and Endo, M., "Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement with Silica Fume," *Concrete International*, Vol. 7, No.3, 1985, pp. 58-62.
52. Ali, M. A.; Majumdar, A. J.; and Rayment, D. L., "Carbon-Fibre Reinforcement of Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, 1972, pp. 201-212.
53. Biggs, A.; Bowen, D. H.; and Kollek, J., *Proceedings of the 2nd International Carbon Fibre Conference*, the Plastics Institute, London, 1974.
54. Goldfein, S., "Fibrous Reinforcement for Portland Cement," *Modern Plastics*, Vol. 42, No. 8, 1965, pp. 156-160.
55. Williamson, G. R., "Response of Fibrous Reinforced Concrete to Explosive Loading," *Technical Report No. 2-48*, Department of the Army, Ohio River Division Laboratory, U. S. Corp of Engineers, Cincinnati, Ohio, Jan. 1966.
56. Sridhara, S.; Kumar, S.; and Sinare, M. A., "Fiber Reinforced Concrete," *Indian Concrete Journal*, Oct. 1971, pp. 428-442.
57. Brochenbrough, T. W., and Davis, C. F., "Progress Report on Fiber Reinforced Concrete," *The Delaware State Highway Department, Civil Engineering Department*, University of Delaware, Newark, Jan. 1970.
58. Goldfein, S., "Impact Resistant Concrete Admixture," *United States Patent 3,645,961*, Feb 29, 1972.

59. Paramasivan, P.; Nathan, G.; Wong, K.; and Liu, P., "Study of Fiber Reinforced Concrete," First Australian Conference on Engineering Materials, The University of New South Wales, 1974, pp. 333-350.
60. Wang, Y., and Backer, S., "An Experimental Study of Synthetic Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal of Materials Science*, (Accepted for publication).
61. Brochenbrough, T. W., and Patterson, D. N., "Fiber Reinforced Methacrylate Polymer Concrete," *ACI JOURNAL*, July-Aug. 1982, pp. 325- 328.
62. Casamatta, D. M., "Synthetic Fiber Reinforced Concrete," *Code News*, Vol. 1986, No. 6, Nov.-Dec. 1986.
63. Jakel, G. R., "Fiber Reinforced Concrete Products and Their Formation; Polyesters, Cellulose Pulp," U.S. Patent #US3899344, Aug. 1975.
64. Nagabhushanam, M.; Ramakrishnan, V.; and Vondran, G., "Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concrete," *Transportation Research Record 1226*, National Research Council, Washington D.C., 1989, pp. 36-47.
65. Ramakrishnan, V.; Wu, G. Y.; and Hosalli, G., "Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes," *Transportation Research Record 1226*, National Research Council, Washington D. C., 1989, pp. 6977.
66. Ramakrishnan, V.; Gollapudi, S.; and Zellers, R., *Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 159-177.
67. Vondran, G. L.; Nagabhushanam, M.; and Ramakrishnan, V., "Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concretes," *Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*, edited by R. N. Swamy and B. Barr, Elsevier Applied Science, London and New York, 1990, pp. 533-543.

68. Malisch, W. R., "Polypropylene Fibers in Concrete—What Do the Tests Tell Us?" *Concrete Construction*, Apr. 1986, pp. 363-368.
69. Ramakrishnan, V.; Wu, G. Y.; and Hosalli, G., "Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concrete," *Transportation Research Record 1226*, National Research Council, Washington D. C., 1989, pp. 17-24.
70. Hannant, D. J.; Zonsveld, J. J.; and Hughes, D. C., "Polypropylene Film in Cement Based Materials," *Composites*, Vol. 9, No. 2, Apr. 1978, pp. 83-88.
71. Fairweather, A. D., "The Use of Polypropylene Fiber to Increase Impact Resistance of Concrete," *Proc. Int'l Bldg. Exhibition Conf. on Prospects for FRC Materials*, London, 1971, Bldg. Research Station, Watford, 1972, pp. 41-43.
72. Banthia, N.; Mindess, S.; and Bentur, A., "Impact Behavior of Concrete Beams," *Materials and Structures (Paris)*, Vol. 20, No. 119, 1987, pp. 293-302.
73. Mindess, S.; Banthia, N.; and Cheng, Y., "The Fracture Toughness of Concrete under Impact Loading," *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, 1987, pp. 231-241.
74. Bhargava, J., and Rhenstrom, A., "Dynamic Strength of Polymer Modified and Fiber Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, 1977, pp. 199-208.
75. Mindess, S., and Vondran, G., "Properties of Concrete Reinforced with Fibrillated Polypropylene Fibres under Impact Loading," *Cement and Concrete Research*, Pergamon Journals, Ltd., USA, Vol. 18, 1988, pp. 1091-115.
76. ACI Committee 544.2R, 1989, *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit.

77. Mindess, S.; Banthia, N.; and Bentur, A., "The Response of Reinforced Concrete Beams with a Fibrous Concrete Matrix to Impact Loading," *Int'l Journal of Cement Composites (UK)*, Vol. 8, No. 3, 1986, pp. 165-170.
78. Naaman, A. E.; Shah, S. P.; and Throne, J. L., *Some Developments in Polypropylene Fibers for Concrete*, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984.
79. Gopalaratnam, V. S.; Shah, S. P.; Batson, G. B.; Criswell, M. E.; Ramakrishnan, V.; and Wecharatana, M., "Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, July-Aug. 1991, pp. 339-353.
80. Morgan, D. R.; McAskill, N.; Carette, G. G.; and Malhotra, V. M., "Evaluation of Polypropylene Fiber Reinforced High Volume Fly Ash Shotcrete," *CANMET International Workshop on Fly Ash in Concrete*, Calgary, Alberta, Oct. 1990.
81. Malhotra, V. M.; Carette, G. G.; Bilodeau, A.; and Dibble, D., "Fiber Reinforced High Volume Fly Ash Shotcrete for Controlling Aggressive Lactates from Exposed Rock Surfaces and Mine Tailings," *CANMET*, June 1989.
82. Dahl, A., "Plastic Shrinkage and Cracking Tendency of Mortar and Concrete Containing Fibermesh," *FCB Cement and Concrete Research Institute*, Trondheim, Norway, Report ISBN No: 82-595-4060-6 Nov. 9, 1985, pp. 1-23.
83. Grzybowski, M., and Shah, S. P., "Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 41, No. 148, Sept. 1989.
84. Vondran, G., *Making More Durable Concrete With Polymeric Fibers*, Mather International Conference, SP-100, American Concrete Institute, Detroit, May 1987, pp. 377-396.
85. Vondran, G., and Webster, T., *The Relationship of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete to Permeability*, SP 108, American Concrete Institute, Detroit, 1988, pp. 85-97.

86. Swamy, R. N., and Stavrides, H., "Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking," ACI JOURNAL, Vol. 76, No. 3, Mar. 1979, pp. 443-460.
87. Vondran, Gary L., "Plastic Fiber Reinforced Concrete," Proceedings of Concrete Technology Seminar 3, Michigan State University, East Lansing, Feb. 1988, pp. 8.1-8.23.
88. Underwriters Laboratory Fire Resistance Directory, R11194, DTD, Oct. 15, 1990.
89. Kobayashi, K., and Cho, R., "Flexural Characteristics of Steel Fiber and Polypropylene Fiber Hybrid Reinforced Concrete," Composites, Vol. 13, 1982, pp. 164-168.
90. Bantia, N., and Sheng, J., "Micro-Reinforced Cementitious Materials," Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 211, Boston, Nov. 1990.
91. 544.1R-52
92. Raithby, K. D.; Galloway, J. W.; and Williams, R. T., "Polypropylene Reinforced Cement Composites for Surface Reinforcement of Concrete Structures," The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5, No. 3, Aug. 1983, pp. 193-197.
93. Zollo, R. F., "Synthetic Fiber Reinforced Concrete: Some Background and Definitions," Seminar on Polymeric Fibers: Their Effect on Concrete and Concrete Cracking," World of Concrete 89, Atlanta, Feb. 1989.
94. Zollo, R. F., and Hays, C. D., "Fibers vs. WWF as Non-Structural Slab Reinforcement," Concrete International, American Concrete Institute, Vol. 13, No. 11, Nov. 1991, pp. 50-55.

95. Hughes, B.P. Fattuhi, N.I.,1977, Stress- Strain Curves for Fiber Reinforced Concrete in Compression, Cement and Concrete Research, Vol. 7, pp. 173-184.
96. Arslan, A. Ve Aydın, A.C., 1999 b, Lifli Betonların Genel Özellikleri, Hazır Beton, 67-75.
97. Qian, C.X. And Stroeven, P.,2000, Development of hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research 30, 63-69.
98. Vandebossche, J.M. And Rettner, D.L., 1999, One- Year Performance Summary of Whitetopping Test Sections at the Mn/ROAD Test Facility, the Accelerated Pavement Testing International Conference.
99. Arslan, A.,1993, Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli, Türkiye Dergisi, İMMOB İnşaat Mühendisler Odası Birliği, Sayı:369, 29-33, Ankara.
100. ACI 544.4R, 1989, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit.
101. Taşdemir, M.A., 2000, Mön İnşaat Tarafından Almanya- Antalya arasındaki Karayolları Tünellerinde Kullanılacak Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar üzerinde Yapılan Deneyler ile ilgili, Teknik Rapor, Proje No: 2000/323, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İstanbul.
102. Schnütgen, B.,1992, Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons, Faserbeton, Vortrage der DBV (Deutscher Beton-Verein E.V.)- Arbeitstagung, Duisburg.
103. Koç, V., ve Birinci, F.,2012, Lifli Betonda Boyut Etkisi Toklu ve Kırılma Enerjisi, SDU International Journal of Technologic Sciences, Samsun,2012
104. (<https://www.insaathaber.org/elastisite-modulu/>)

105. Halit Yazıcı Lifli Beton Ders Notları (<http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/OZEL%20BETON/ozelbeton-ders4-LIFLI.pdf>)
106. Yunus Gündüz, Çelik Tel Donatılı Betonlarda Kırılma Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Yozgat 2016
107. Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D., Wood D., Properties of Steel Fibre Reinforced Shotcrete, Canadian Journal of Civil Engineering, 21, 564-575, 1994.
108. Husamuddin, S.N., Antoine, E.N., Prediction Model for Elastic Modulus of High-Performance Fiber Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, 92(3), 304-314, 1995.
109. Chen, C.W. and Huang, S.T., (2011). Implementing KM programmes using fuzzy QFD, Total Qual Man & Business Excel, 22(4), 387-406.
110. Bilgili, A., ğamandar, A. ve Beycioğlu, A., (2010). Taze Betonun Reolojik Özellikleri Arasındaki ĞliĞkinin Bulanık Mantık Yöntemiyle Ğncelenmesi, e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences, NWSA (www.newwsa.com), 5 (3), 486-493.
111. Uygunoğlu, T. ve Ünal, O., (2005). Seyitömer Uçucu Külünün Betonun Basınç Dayanımının Etkisi Üzerine Bulanık Mantık Yaklaşımı, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1 (1), ss: 13-20.
112. Demir, F., (2005). Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Elastisite Modülü Belirlenmesi için Bir Bulanık Yaklaşımı, Deprem Sempozyumu, 23-24.
113. Topçu, Ğ.B. ve Uğurlu, A., (2007). Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini, ĞMO Teknik Dergi, 4055-4067, Yazı 268
114. Erdoğan, T.Y., (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Ankara.

115. http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YM2/YM-II%2312_Sertleşmiş Betonun Diğer Özellikleri
116. Ayaz, Y., Çitil, Ş., Temiz, Ş. (2014). Ksu Mühendislik Bilimleri Dergisi 2014
117. Gao, J., Sun, W., Morino, K., Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced, High-Strength, Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 307-313, 1997.
118. Yıldırım, M.A. Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Tel Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
119. Taylor, M., Lydon, F.D., Barr, B.I.G., Toughness Measurement on Steel Fibre-Reinforced High Strength Concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 329-340, 1997.
120. Lim, D.H., Oh, B.H., Experimental and Theoretical Investigation on the Shear of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams, Engineering Structures, 21, 937-944, 1999.
121. Song P, Hwang S, Sheu B., 2005. Strength properties of nylon-and polypropylenefiber- reinforced concretes. Cem Concr Res; 35:1546–50.
122. Bahadır, F., 2010. Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özellikleri, Eskişehir, Y. Lisans Tezi.
123. C. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. Materials and Design, 58:187- 193, 2014.
124. RILEM Technical Committee 50-FMC Draft Recommendation: Determination of The Fracture Energy of Mortar and Concrete By Means of Three point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, 18, (106), 287-291, 1985.

125. Gözde KURT, Lif İeriği ve Su/imento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2006
126. <http://acikerisim.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8746/199602.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
127. Yoo, D. Y., et al., Material and Bond Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Micro Steel Fibers, Composites: Part B 58, 122-133, 2014
128. Peng Z, Qing-fu L., 2008. Experiment and study on tensile strength of polypropylene fiber reinforced cement stabilized macadam.
129. Yılmaz A., Fikret B., Mehmet Ali T., Betonun Kırılma Mekanik İ; Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler ile Kırılma Parametreleri Arasındaki Bağıntılar, Türkiye Mühendislik Haberleri, 248.Pdf
130. Abdulhamid A., Polipropilen Lif Takviyeli Betonarme Kirişlerin Deneysel ve Analitik Olarak Araştırılması, Y. Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2014
131. Marar, K., Eren, Ö., elik, T., Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, Materials Letters, 47, 201-304, 2001.
132. Bayramov F., Ilki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A., Yerlikaya M., SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 2, Istanbul, Turkey, 73-82, April 4-7, 2004.
133. Johnston, C. D., Zemp, R. W., Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete- Influence of Fiber Content, Aspect Ratio and Type, ACI Materials Journal, 88(4), 374-383, 1991.

134. Kiper O., 1996. Some characteristics of high strength fiberreinforced lightweight aggregate concrete. *Cem Concr Compos*; 25:207–13.
135. Morris W., Vico A, Vazquez M, 2002. De Sánchez S. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. *Corros Sci*; 44:81–99.
136. Nili, M., Afroughsabet, V., 2010, Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 879-886. Nili, M., Afroughsabet, V., 2010, The Effects of Silica Fume and Polypropylene Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 927-933.
137. (<http://www.aykutozdemir.com.tr/insaat/korozyon.html>)
138. Mert C.S. Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi, Y. lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2013
139. <http://www.forta.com.tr/brand-detail/forta-ferro>
140. S. Taner Yıldırım ve Çevdet Emin E., Çelik, Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donma-Çözülme Etkilerinin Araştırılması, İzmit, 2015 / Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi
141. V.B. Brik, V. Ramakrishnan, N. Tolmare. Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete. *Idea Program Final Report*, Contract No. NCHRP-45, November, 1998.
142. B. Weib, H. Caoa, S. Songb. Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, 527:4708-4715, 2010.
143. S. Deb. The Impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar. *Composite Materials*, 286-290, July, 2012.

144. (<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/4079.pdf>)
145. Arslan, A., Aydın., A.C., Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 26 Kasım 1999.
146. Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitmann Publishing, London,1975.
147. Majid A., Polipropilen Lif Takviyeli Betonların Yüksek Sıcaklık Etkilerinden Sonra Basınç Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
148. Mostofinejad D. 2004, Polipropilen Liflerin Etkisi Betonun Rötire Çatlaklarında ve İşlenebilirliğinde, İsfahan İnşaat Mühendislik Fakültesi, İsfahan, İran.
149. Miao, C., Mu, R., Tian, Q., Sun, W., Effect of Sulfate Solution on the Frost Resistance of Concrete with and Without Steel Fibre Reinforcement, Cement and Concrete Research, 32, 31-34, 2002.
150. Postacıoğlu, B, 1986. Bağlayıcı Maddeler Beton, 1 175. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul
151. Sadegzadeh M, Page C. L, and Kettle C.J, 1987. Surface Micro Structure and Abrasion Resistance of Concrete, Cement Concrete Research, 17) 581–590
152. Atış C.D., Karahan O, Arı K, Çelik Ö and Bilim C, 2009. Relation Between Strength Properties (flexuralandcompressive) and Abrasion Resistance of Fiber (steelandpolypropylene) Reinforced Fly Ash Concrete, J. Mater. Civil Engineering, 21 402– 408.
153. Oymaeland S., Yeğınobalı A, 1996. Bitümlü Şist Külü Katkısının Betonda Aşınma Dayanımına Etkisi, Proceedings of the Fourth National Concrete Conference, 359–367.

154. Binici H, 2007. Effect of Crushed Ceramic and Basaltic Pumice as Fine Aggregates on Concrete Mortars Properties, Construction and Building Materials, 211191-1197.
155. Yüksel İ., Bilir T and Özkan Ö., 2007. Durability of Concretein Incorporating NonGround Blast Furnace Slag and Bottom Ash as Fine Aggregate, Building and Environment, 422651-2659.
156. Juska, T., Dutta, P., Carlson, L. And Weitsman, J., Thermal Effect, 1999, Gap Analysis for Durability of Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infranstructure, Chapter 5, 40-51.
157. Kukko, H. And Matala, S., 1991, Effect of Composition and Aging on the Frost Resistance of High-Strength Concrete, Durability of Concrete, Second International Conference, Volume I, SP-126-12, 229-248, Montreal, Canada
158. Myers, j.j., Murthy, S., Micelli, F.,2001, Effect of Combined Environmental Cycles on the Bondof FRP Sheets to Concrete, Proceedings-Composites In Construction 2001 International Conference, Porto, Portugal.
159. Mongan, D. R.,1991, Freeze Thaw Durability of Steel and Polypropylene Reinforced Shotcretes: A Review. Durability of Concrete. Second International Conference, Held in Montreal, Canada; Ed. By V.M. Malhotra; American Concerete Institute, Detroit, Mı, Vol.2,901-918, (ACI SP-126).
160. Krenchel, H., and Shah, S. P., “Applications of Polypropylene Fibers in Scandinavia,” Concrete International, Vol. 7, No. 3, Mar. 1985.
161. TS 3261 Taze Betonda Hava Miktarının Hacim Metodu İle Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1978
162. TS 3114, Beton Basınç Mukavemeti Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1990.

163. MA Tasdemir, Bhushan Lal Karihaloo, Effect of aggregate volume fraction on the fracture parameters of concrete: a meso-mechanical approach 2001



ÖZGEÇMİŞ

Cem BACANLI, 1989 yılında Yozgat'ta doğdu. İlkokulu Cumhuriyet İlköğretim okulunda, lise öğrenimini ise Serpil Akdağ Lisesi'nde tamamlamıştır. 2008 yılında Bozok Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini başlamış olup 2012 yılında başarıyla mezun olmuştur.

2013 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği Programında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

İletişim Bilgileri:

Adres: Fatih Sultan Mehmet Mah. Evrenpaşa Cad. No:47/B
34470-Sarıyer/İSTANBUL

GSM: 0 543 966 06 66

E-Posta: cembacanli@gmail.com