

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETON İÇERİSİNDE KULLANILAN SENTETİK FİBER DONATILAR İLE GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLEN FİBER DONATILARIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDUL SAMED DEMİRHAN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2026

10790553

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETON İÇERİSİNDE KULLANILAN SENTETİK FİBER DONATILAR İLE GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLEN FİBER DONATILARIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDUL SAMED DEMİRHAN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2026

10790553

BEYAN

'Beton içerisinde kullanılan sentetik fiber donatılar ile geri dönüştürülen fiber donatıların performansının incelenmesi' adlı tez çalışmamın hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Abdul Samed DEMİRHAN

Tarih

.../.../2026

İmza

ÖN SÖZ

Çalışmamda, beton içerisinde kullanılan sentetik fiber donatılar ile geri dönüştürülen fiber donatıların beton içerisindeki performansı incelenmiştir. Çalışmamın tamamlanmasında tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Aylin Özodabaş'a, beton laboratuvarını çalışmalarına açan Polyfibers firmasına, Polyfibers firması Ar-Ge Müdürü Burak Erdal'a, Polyfibers firması beton laboratuvarı çalışanları Recep Çelik, Selman Sadıç, Halis Çelik'e ve her zaman yanımda olan eşime, biricik oğlum Aras'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Abdul Samed DEMİRHAN

2026

ÖZET

BETON İÇERİSİNDE KULLANILAN SENTETİK FİBER DONATILAR İLE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEN FİBER DONATILARIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Bu çalışmada, beton üretiminde kullanılan makro sentetik fiber donatılardan arta kalan malzemelerin geri dönüşüm granüllerine dönüştürülmesi ve bu granüllerin yeniden lif formunda üretilerek beton karışımlarında değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın temel hedefi, geri dönüştürülmüş sentetik liflerin beton içerisindeki mekanik ve yapısal performansını belirlemek ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi alternatifi olarak uygulanabilirliğini ortaya koymaktır. Geleneksel uygulamalarda saf hammaddeden üretilen fiber donatılara kıyasla geri dönüştürülebilir liflerin kullanımı; doğal kaynak tüketiminin azaltılması, atık miktarının düşürülmesi ve maliyet avantajı sağlanması açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda, liflerin çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi temel mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiş; beton içerisindeki performansları ise EN 14651 standardına uygun olarak gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyleri ile değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen artık gerilme değerleri ve moment taşıma kapasiteleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca mikro analiz çalışmaları ile fiber–beton matrisi arasındaki aderans mekanizması ve iç yapı etkileşimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, lif dozajının artırılmasının çatlak sonrası dayanım ve moment taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın geri dönüşüm oranının artması, lifli betonun yapısal katkısını azaltmaktadır. Tasarım perspektifinden değerlendirildiğinde, düşük ve orta düzey geri dönüşüm oranları (%0–5) ile yüksek lif dozajı (3 kg/m³) kombinasyonunun yapısal performans açısından en uygun çözüm olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek geri dönüşüm oranlarında ise lifli betonun tasarımdaki rolünün sınırlı tutulması ve kullanım amacının servis durumu performansı ile sınırlandırılması önerilmektedir. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş sentetik fiberlerin uygun oran ve dozajlarda beton içerisinde kullanılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yapısal performans açısından uygulanabilir ve yenilikçi bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Makro sentetik fiber donatı, geri dönüşüm granül hammaddesi, CMOD testleri, basınç dayanım testleri.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF SYNTHETIC FIBER REINFORCEMENT AND RECYCLED FIBER REINFORCEMENTS USED IN CONCRETE

This study investigates the recycling of residual materials from macro synthetic fiber reinforcements used in concrete production by converting them into recycled granules and reprocessing them into fiber form for reuse in concrete mixtures. The primary objective is to determine the mechanical and structural performance of recycled synthetic fibers within concrete and to evaluate their applicability as a sustainable construction material alternative. Compared to conventionally manufactured virgin fibers, the use of recyclable fibers is significant in terms of reducing natural resource consumption, minimizing waste generation, and providing economic benefits. Within this scope, the fundamental mechanical properties of the fibers, including tensile strength and modulus of elasticity, were experimentally determined. The structural performance of fiber-reinforced concrete was evaluated through three-point bending tests conducted in accordance with EN 14651. Residual stress values and moment carrying capacities obtained from the experiments were comparatively analyzed. In addition, microstructural analyses were carried out to examine the bond mechanism and internal interaction between the fibers and the concrete matrix. The findings indicate that increasing the fiber dosage has a decisive effect on post-crack strength and moment carrying capacity. However, an increase in the recycling ratio leads to a reduction in the structural contribution of fiber-reinforced concrete. From a design perspective, the combination of low to moderate recycling ratios (%0–5) and a high fiber dosage (3 kg/m³) was identified as the most appropriate solution in terms of structural performance. At higher recycling ratios, it is recommended that the role of fiber-reinforced concrete in design be limited and primarily confined to serviceability performance. In conclusion, the use of recycled synthetic fibers in appropriate ratios and dosages offers an environmentally sustainable, economically advantageous, and structurally feasible alternative for concrete production.

Keywords: Macro synthetic fiber reinforcement, recycled granule raw material, CMOD tests, compressive strength tests.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
GRAFİKLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	1
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin Kapsamı.....	4
2. PLASTİKLER VE ÇEVRE.....	5
2.1. Dünyada ve Türkiye’de Plastikler	5
2.2. Plastik Üretiminin, Plastik Atıkların Niceliksel Boyutları ve Zararları.....	6
2.3. Makro ve Mikro Plastiklerin Ekosisteme Zararları	8
2.4. Katı Atıklardan Plastiklerin Geri Kazanılması	9
2.4.1. Plastik Atıkların Granül ve Elyaf Olarak Geri Dönüşümü.....	12
3. LİFLİ BETONUN TANIMI, TARİHSEL GELİŞİMİ VE LİF TÜRLERİ.....	16

3.1. Lifli Betonun Tanımı ve Temel Prensipleri	16
3.2. Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi.....	17
3.3. Liflerin Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları.....	18
3.3.1. Yapısal Olmayan Uygulamalar	19
3.3.2. Yapısal Uygulamalar	19
3.4. Liflerin Geometrik ve Mekanik Özellikleri	20
3.5. Lif Türleri ve Beton İçerisindeki Kullanımları	22
3.5.1. Polipropilen Lifler	22
3.5.2. Çelik Lifler	24
3.5.3. Cam Lifler	26
3.5.4. Karbon Lifler	27
3.5.5. Bazalt Lifler	27
3.5.6. Polivinil Alkol (PVA) Lifler	27
3.5.7. Doğal Lifler	28
4. LİFLİ BETONLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	29
4.1. Lifli Betonlarda Taze Beton Özellikleri	29
4.2. Lifli Betonlarda Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	29
4.2.1. Basınç Dayanımı	29
4.2.2. Eğilme Dayanımı	30
4.2.3. Tokluk (Enerji Emme Kapasitesi)	31
5. MALZEME VE YÖNTEM	34

5.1. Agrega	34
5.2. Çimento	35
5.3. Polipropilen Lif.....	37
5.4. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı.....	37
5.5. Karışım Miktarları.....	38
6. DENEYLER VE BULGULAR	39
6.1. Polipropilen İplik Üzerinde Yapılan Deneyler	39
6.1.1. ISO 2062 Standardına Göre Çekme Deneyi	39
6.2. Beton Üzerinde Yapılan Deneyler	45
6.2.1. Taze Beton Deneyleri	45
6.2.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	47
6.3. SEM Analiz Bulguları ve Değerlendirmeler	57
7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	60
7.1. Beton Basınç ve Çökme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	60
7.2. Üç Noktalı Eğilme Testinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61
7.3. Çentikli Kiriş Testlerinden Moment Kapasitesinin Hesaplanması	74
7.4. Tasarım Rehberine Göre Yapılan Hesapların Değerlendirilmesi	78
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKÇA	87

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Plastik türlerine göre kurutma koşulları	13
Tablo 2.2. Plastiklerin ekstrüzyon yöntemi ve erime noktası.....	13
Tablo 5.1. Agreganın elek analizi.....	35
Tablo 5.2. Agreganın diğer özellikleri.....	35
Tablo 5.3. Çimsa Izo Power 42.5 Çimento fiziksel ve mekanik özellikleri	36
Tablo 5.4. Çimsa Izo Power 42.5 Çimento kimyasal özellikleri.....	36
Tablo 5.5. Polipropilen lifin karakteristik özellikleri	37
Tablo 5.6. FloorGrade® S 37 yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı özellikleri.....	38
Tablo 5.7. Çalışmada kullanılan içeriklerin miktarları.....	38
Tablo 6.1. F-0 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre sonuçları	42
Tablo 6.2. F-5 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre sonuçları	42
Tablo 6.3. F-10 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre sonuçları	43
Tablo 6.4. F-15 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre sonuçları	43
Tablo 6.5. CMOD ve δ arası ilişki.....	55
Tablo 7.1. Beton basınç ve çökme deney sonuçları	61
Tablo 7.2. R LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu.....	62
Tablo 7.3. F0-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	64
Tablo 7.4. F0-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	65
Tablo 7.5. F5-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	67
Tablo 7.6. F5-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	68
Tablo 7.7. F10-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	69
Tablo 7.8. F10-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	71
Tablo 7.9. F15-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	72
Tablo 7.10. F15-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu	74

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Geri dönüştürülmüş LLDPE granülleri, PP granülleri, selofan granülleri	14
Şekil 2.2. Geri dönüştürülmüş HDPE elyaf	14
Şekil 2.3. Tezde kullanılmış olan RPP	15
Şekil 3.1. Liflerin Sınıflandırılması	19
Şekil 3.2. Çelik liflerin şekilleri (TS 10513, 1992)	25
Şekil 4.1. Dahili yükler için elastik eğilme momentlerinin dağılımının şeması	31
Şekil 4.2. Deney numunesinin yükleme düzeneği	32
Şekil 4.3. Yük sehim eğrisi	33
Şekil 4.4. Enerji sehim eğrisi	33
Şekil 6.1. ISO 2062:2009 standardı CRE yöntemine göre iplik çekme deneyi	39
Şekil 6.2. Birim ağırlık kabı ve hava ölçer	46
Şekil 6.3. Yalın betonun çökme değerlerine bakılması	47
Şekil 6.4. R ve numune betonların çökme değerlerine bakılması.....	47
Şekil 6.5. R ve numune betonlardan küp numune alınması.....	48
Şekil 6.6. Küp numunelerin kürlenmesi.....	48
Şekil 6.7. Küp numunelerin kırımı.....	49
Şekil 6.8. Test numunesinin yüklenmesinin düzenlenmesi	50
Şekil 6.9. Kalıp doldurma prosedürü	51
Şekil 6.10. Eğilme deneyi test düzeneği kesilen çentiğin konumu ve çatlak ölçer.....	52
Şekil 6.11. Yük – CMOD eğrilerinden orantılık limitinin (F_L) belirlenmesi.....	53
Şekil 6.12. Yük-CMOD diyagramı ve F_j ($j = 1, 2, 3, 4$)	54
Şekil 6.13. En kesitte gerçek gerilme dağılımı (a) ve lineer gerilme dağılımı (b) kabul	54
Şekil 6.14. CMOD ölçümü için tipik düzenleme.....	55
Şekil 6.15. Sapmayı ölçmek için tipik düzenek	56

Şekil 6.16. F 0-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b:4KX).....	57
Şekil 6.17. F 5-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b:4KX).....	58
Şekil 6.18. F 10-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b:4KX).....	58
Şekil 7.1. Fiber takviyeli betondaki gerilim bloğu.....	75
Şekil 7.2. F0-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	79
Şekil 7.3. F0-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	79
Şekil 7.4. F5-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	80
Şekil 7.5. F5-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	81
Şekil 7.6. F10-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	82
Şekil 7.7. F10-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	82
Şekil 7.8. F15-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	83
Şekil 7.9. F15-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri	84

GRAFİKLER LİSTESİ

	Sayfa
Grafik 2.1. Üretim miktar verileri (2019-2022)	7
Grafik 2.2. Geri dönüşüm yüzde oranları (2019-2022).....	7
Grafik 2.3. Plastik atık ve geri dönüşüm değerlendirme türü	8
Grafik 5.1. Agreganın granülometri eğrisi	34
Grafik 6.1. İplik numuneleri ve çekme gerilmeleri.....	44
Grafik 6.2. İplik numuneleri ve elastisite modülleri.	45
Grafik 6.3. Referans ve numune betonların çökme değerleri.	46
Grafik 7.1. Beton basınç dayanımı deney sonuçları	61
Grafik 7.2. R CMOD-Yük değişimi grafiği	62
Grafik 7.3. F0-2 CMOD-Yük değişimi grafiği	64
Grafik 7.4. F0-3 CMOD-Yük değişimi grafiği	66
Grafik 7.5. F5-2 CMOD-Yük değişimi grafiği	67
Grafik 7.6. F5-3 CMOD-Yük değişimi grafiği	69
Grafik 7.7. F10-2 CMOD-Yük değişimi grafiği	69
Grafik 7.8. F10-3 CMOD-Yük değişimi grafiği	72
Grafik 7.9. F15-2 CMOD-Yük değişimi grafiği	72
Grafik 7.10. F15-3 CMOD-Yük değişimi grafiği	74
Grafik 7.11. Ortalama Fr_1 , MPa değerleri	77
Grafik 7.12. Ortalama Fr_4 , MPa değerleri	77
Grafik 7.13. Ortalama Moment Hesaplama Katsayısı	78

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

°C: Derece

B: Numune genişliği

CMOD: Çatlak ağzı açıklığı yer değişimi

CMOD_j (j=1,2,3,4): Çatlak açılma değerlerindeki kalıcı eğilmede çekme dayanımı

DKY: Doygun kuru yüzey

Dm³: Desimetre küp

E_{mod}: Elastisite modülü

F0-2: %0 granül içeren 2 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F0-3: %0 granül içeren 3 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F5-2: %5 granül içeren 2 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F5-3: %5 granül içeren 3 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F10-2: %10 granül içeren 2 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F10-3: %10 granül içeren 3 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F15-2: %15 granül içeren 2 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

F15-3: %15 granül içeren 3 kg/m³ sentetik fiber oranlı kiriş numunesi

***f_{ct,L}*:** Orantısal sınır (LOP) N/mm²

F_j CMOD_j (j=1,2,3,4): Çatlak açılma değerlerindeki kaydedilmiş olan yük değeri

F_L: LOP değerine karşılık gelen yük (N)

FR_j: Kalıcı eğilmede çekme dayanımı, j = 1, 2, 3 veya 4

FR_J: Kalıcı eğilmede çekme dayanımı

Fr₁: 0,5 mm kalıcı eğilmede çekme dayanımı

Fr₄: 3,5 mm kalıcı eğilmede çekme dayanımı

GPa: Giga Pascal

HDPE: Yüksek yoğunluklu polietilen

H: Beton kalınlığı

Hz: Hertz

h_{sp}: Orta açıklık da ki üst kısım ile çentik ucu arasındaki mesafe

Kgf: Kilogram-kuvvet

kN: Kilo Newton

L: Açıklık uzunluğu

LCA: Yaşam Döngüsü Analizi

LDPE: Düşük yoğunluklu polietilen

LLDPE: Lineer düşük yoğunluklu polietilen

LOP: Orantılılık Sınırı

MHK: Moment hesaplama katsayısı

Mm: Milimetre

MPa: Mega Paskal

Mu: Moment hesaplama katsayısı

N: Newton

PE: Polietilen

PET: Polietilen tereftalat

PP: Polipropilen

PS: Polistiren

PVA: Polivinil Alkol

PVC: Polivinil klorür

R: Referans numunesi

RPP: Geri Dönüştürülmüş PP Granüller

S: Standart sapma

SEM: Taramalı elektron mikroskopu

STD: Tablolarda standart sapma

TBHA: Taze birim hacim ağırlığı

V [%]: Değişim katsayısı

X: Ortalama

YYPE: Yüksek yoğunluklu polietilen

γ_m : Güvenlik faktör katsayısı

δ : Sehim(mm)

σ : Ortalama çekme dayanımı

σ_{r1} : EN14651 kiriş testinde 0.5 mm de meydana gelen ortalama aksenal çekme dayanımı

σ_{r4} : EN14651 kiriş testinde 3.5 mm de meydana gelen ortalama aksenal çekme dayanımı

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Yapı malzemeleri, birçok farklı sektör gibi, teknolojik ilerlemeler ve bu ilerlemelerin ortaya çıkardığı yeniliklerden doğrudan etkilenmektedir. Fiber donatıların kullanımı ve çalışma prensipleri, tarihsel olarak milattan önceki dönemlere kadar uzanmakta; o dönemde yapısal malzemelerde hayvan kılı veya insan saçları gibi organik lifler kullanılmaktaydı (Beaudoin, 1990: 15). Zamanla tuğla, harç ve kerpiç karışımlarında saman gibi doğal lifler tercih edilmeye başlanmıştır (Bentur ve Mindess, 2007: 24). İkinci Dünya Savaşı sonrasında yapılan teknolojik yenilikler, çimento ve yapı malzemeleri sektöründe farklı hammaddelerin daha etkin kullanılmasına olanak sağlamış ve fiber donatılı beton teknolojisini hızlandırmıştır (Mindess, 2020: 71).

20. Yüzyıla gelindiğinde, fiber takviyeli beton üzerine yapılan araştırmalar artmış ve laboratuvar deneyleri ile ürünlerin performans özellikleri detaylı olarak incelenmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler sonucunda fiberler, betonun bazı uygulamalarında temel donatı elemanı olarak kullanılmaya başlamıştır (ACI Committee 544, 2009: 2). Beton içindeki fiberlerin hammaddesi çelik, polipropilen (PP) gibi çeşitlilik göstermektedir. PP bazlı sentetik fiberler, ilk kez 1960'lı yıllarda üretilmiş ve 1970'lerden itibaren betonarme yapılarda kullanılmaya başlanmıştır (Johnston, 2001: 42). Üretim süreçlerindeki ilerlemeler sayesinde, betonda daha yüksek dayanım ve aderans sağlayan sentetik lifler geliştirilmiş ve bu liflerin kullanım alanı yaygınlaşmıştır (Banthia ve Gupta, 2004: 367).

Sentetik fiberler, beton içerisinde üç boyutlu bir dağılım oluşturarak çekme dayanımını artırmakta ve çatlak oluşumunu sınırlamaktadır (Kılıçarslan vd., 2023: 320). Beton matrisinde homojen dağıldıkları için oluşabilecek mikro çatlakları köprülemekte ve büyümelerini engellemektedir. Ayrıca, korozyona karşı dayanıklı olduklarından betonun uzun ömürlü olmasını ve yapısal dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır (Bentur ve Mindess, 2007: 132). Bunun yanı sıra, işçilik ihtiyacını azaltarak çelik donatı maliyetlerini düşürmekte ve genel sistem maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, sentetik fiberler farklı uygulama alanlarında mühendislik çözümlerine katkıda bulunmaktadır (Kılıçarslan vd., 2023: 320).

İnşaat sektöründe, yapı malzemelerinin teknolojik gelişmeleri, betonarme yapılarında karşılaşılan korozyon problemlerine yönelik alternatif donatı çözümlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Betonarme sistemlerde korozyonun yol açtığı yapısal kayıplar göz önüne

alındığında, sentetik makro fiber lifler etkili ve dikkat çekici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Kılıçarslan vd., 2023: 322). Yüksek çekme dayanımı, elastisite modülü ve hammaddesinin korozyona dayanıklı olması nedeniyle, bu lifler yapı çeliğinin yerine kullanılabilen modern bir alternatif sunmaktadır. Ancak, liflerin yüzey özelliklerinden kaynaklanan betonla aderans problemleri, bazı uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır.

Bu soruna çözüm olarak, deforme edilmiş kopolimer fiberlerle birleştirilen polipropilen (PP) lifler betonarme elemanlarda kullanılmış ve elde edilen performans sonuçları incelenmiştir. Farklı oranlarda fiber içeren beton numuneleri eğilme testine tabi tutulmuş, test sonuçları lif kullanımının betonun çekme dayanımını ve sünekliğini artırdığını, enerji yutma kapasitesini yükselttiğini ve mikro çatlaklar ile rötne kaynaklı çatlak oluşumunu azalttığını göstermiştir (Bentur ve Mindess, 2007: 136). Korozyonun olmaması sayesinde betonun uzun dönemli dayanıklılığı da önemli ölçüde artmıştır.

Sentetik makro fiberler, polimer esaslı ve yüksek dayanımlı malzemelerden üretilmiş olup, geleneksel çelik hasır, çelik tel ve benzeri donatıların yerine modern bir alternatif olarak kullanılabilir (Banthia ve Gupta, 2004: 370). İçlerinde yer alan farklı malzemelerin sinerjik etkisi sayesinde çatlak oluşumu minimize edilmekte ve beton daha dayanıklı hâle gelirken çekme dayanımı artmaktadır. Bu fiberler, doğal mikro donatılara (saman veya organik lifler) modern bir alternatif olarak görülmekte ve saha betonları, zemin betonları, çevre düzenleme projeleri, beton yollar, konut içi şap uygulamaları, otopark zeminleri, akaryakıt istasyonu sahaları, limanlar, tersaneler, dalgakıranlar ve tünel zemin stabilizasyonu gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir (Naaman, 2003: 389). Ayrıca, prekast elemanlarda da güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Makro fiberlerin en önemli avantajlarından biri, çelik hasıra kıyasla beton içinde üç boyutlu ve homojen dağılım sağlamasıdır (ACI Committee 544, 2010: 8). Minimum işçilik gereksinimi ile ekonomik çözümler sunması ve betonun ağırlığını artırmaması, daha verimli yapılar ortaya koymaktadır. Pas payı gerekliliğini ortadan kaldırarak daha ince kesitlerin tasarlanmasına imkân tanımakta ve korozyon riskinin sıfıra indirilmesiyle yapıların hizmet ömrünü uzatmaktadır (Mindess, 2020: 75).

Lifli yapı sayesinde betonun eğilme dayanımı, sünekliği ve enerji yutma kapasitesi belirgin biçimde artmaktadır. Lifli betonla ilgili sistematik çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamış ve birçok bilimsel araştırmaya konu olmuştur (Beaudoin, 1990: 18). Beton içinde rastgele dağıtılmış çelik liflerin hacim oranı, boyutu ve türlerinin betonun çekme, basınç ve eğilme davranışları üzerindeki etkilerini incelemiş, rastgele lif ekleme tekniğinin betonun gevrek

yapısını iyileştirerek onu daha sünek bir malzeme hâline getirdiğini göstermiştir (Shah ve Rangan, 1969: 45). Bu teknik, betonun mekanik özelliklerinde belirgin iyileşme sağlamış; çekme dayanımı, süneklik ve enerji yutma kapasitesi artmıştır. Çatlak oluşumunun sınırlandırılmasıyla lifli beton, daha dayanıklı ve uzun ömürlü yapılar sunmaktadır. Lifli beton performansını etkileyen faktörler arasında lif miktarı, boyutu, geometrisi ve narinliği yer almakta; ayrıca liflerin homojen dağılımı ve sertleşme süresince bu yapının korunması dayanım açısından kritik bir rol oynamaktadır (Özcan, 2018: 2).

Bu çalışma ile uyumlu başka bir çalışma da 4 kg/m³ lif dozajı içeren karışımlar yalın beton ile karşılaştırılmış ve en yüksek basınç dayanımı 55,8 MPa (Mega Pascal) değeri ile yalın betonda elde edilirken, bunu 52,5 MPa ile saf polipropilen lifle donatılmış beton karışımı izlemiştir. Aynı çalışmada elde edilen basınç dayanımı sonuçları da bu eğilimle uyumludur. Yalın beton ile karşılaştırıldığında, polipropilen lif takviyeli betonlarda basınç dayanımında bir azalma gözlenmiş olup, bu durum liflerin yüksek filament sayısına bağlı olarak beton matrisi içerisinde yerel boşlukların oluşması ve lif-matris ara yüzeyinde süreksizliklerin meydana gelmesiyle ilişkilendirilmektedir. Bu mikro yapısal düzensizlikler, basınç yükleri altında yük aktarım mekanizmasını olumsuz yönde etkilemektedir (Yin vd., 2016: 382).

1.2. Tezin Amacı

Polipropilen (PP), dünya genelinde en yaygın kullanılan plastik türlerinden biri olup özellikle ambalaj, tekstil, otomotiv, inşaat ve medikal sektörlerde geniş uygulama alanına sahiptir (Bledzki ve Gassan, 1999: 64). PP tüketiminin yıllar içerisinde sürekli artış göstermesi, malzemenin ekonomik ve pratik özelliklerinin endüstriler açısından cazip olmasından kaynaklanmaktadır. Hafifliği, dayanıklılığı ve düşük maliyeti sayesinde özellikle ambalaj sektöründe tercih edilen PP, 1960'lar ve 1970'lerden itibaren yaygın kullanım kazanmıştır (Beyer, 2000: 21).

Bu tez çalışmasının temel amacı, polipropilenin endüstriyel gelişimini ve özellikle inşaat sektöründeki kullanım potansiyelini incelemek, beton içerisinde sentetik fiber donatı olarak değerlendirilmesini araştırmaktır. PP'nin üretim avantajları, çok yönlülüğü ve geri dönüştürülebilir yapısı, sürdürülebilir malzeme arayışlarının hız kazandığı günümüzde önemini artırmaktadır. 2000'li yıllardan itibaren çevre dostu üretim ve geri dönüşüm süreçlerinin gelişmesiyle birlikte PP geri dönüşüm oranları yükselmiş ve daha dayanıklı, sürdürülebilir PP türlerinin geliştirilmesiyle kullanım alanları genişlemiştir (Andrady, 2011: 105).

Bu bağlamda çalışmanın amacı, beton içerisinde kullanılan PP bazlı fiberlerin performansını ortaya koymak, geri dönüştürülmüş PP malzemelerin yeniden lif hâline getirilerek beton üretiminde kullanılmasının maliyetleri düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyelini değerlendirmektir. Sürdürülebilirlik anlayışı doğrultusunda geri dönüşüm oranlarının artırılması ve biyolojik olarak parçalanabilen PP türlerine yönelik araştırmaların devam etmesi, bu çalışmanın önemini desteklemektedir (Al-Salem vd., 2009: 112).

1.3. Tezin Kapsamı

PP'nin ticari üretiminin 1950'lerde başlamasına rağmen gerçek anlamda yaygın kullanımının 1960'lar ve 1970'lerde özellikle ambalaj sektöründe gerçekleştiği belirtilmektedir (Beyer, 2000: 21). 1980'lerde otomotiv ve tekstil sektörlerinde düşük maliyet ve yüksek dayanıklılık avantajı nedeniyle kullanım alanlarının genişlediği, 1990'larda ise üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde PP bazlı ürünlerin çeşitliliğinin arttığı vurgulanmaktadır.

2000'li yıllardan itibaren çevre dostu üretim süreçlerinin gelişmesiyle PP geri dönüşüm oranlarının yükselmesi, endüstriler ve tüketiciler açısından önemli bir avantaj sağlamıştır (Andrady, 2011: 105). Günümüzde PP tüketimi artmaya devam etmekte; özellikle gelişmekte olan ülkelerde inşaat, otomotiv, medikal ve ambalaj sektörlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra biyolojik bazlı ve çevre dostu üretim yöntemlerinin geliştirilmesi hız kazanmış, sürdürülebilirlik doğrultusunda biyolojik olarak parçalanabilen PP türlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar sürmektedir (Al-Salem vd., 2009: 112).

Tezin uygulama kapsamı ise, beton içerisinde kullanılan sentetik fiber donatılarda polipropilenin rolüne odaklanmaktadır. PP, beton üretiminde hem ana hem de yardımcı donatı hammaddesi olarak tercih edilmektedir (Kılıçarslan vd., 2023: 322). Ayrıca beton içerisindeki makro sentetik fiberlerden arta kalan PP malzemelerin geri dönüşüm granülleri olarak değerlendirilmesi ve yeniden lif hâline getirilerek beton içerisinde kullanılması hem beton performansının araştırılması hem de maliyetlerin düşürülmesi açısından önem taşımaktadır (Özcan, 2018: 4).

Bu çalışma kapsamında, geleneksel olarak saf üretilip kullanılan beton lifleri yerine geri dönüştürülebilir PP liflerinin kullanımının çevresel sürdürülebilirliğe katkısı ve beton performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmektedir.

2. PLASTİKLER VE ÇEVRE

2.1. Dünyada ve Türkiye’de Plastikler

Plastik atıklar, su ekosistemlerinden kara ekosistemlerine kadar geniş bir alanda hem doğrudan hem de dolaylı yollarla canlılar ve çevre üzerinde önemli kirletici etkiler yaratmaktadır (UNEP, 2025). Doğada doğal olarak bulunmayan plastikler, petrol ve doğal gaz gibi petrokimyasal kaynaklardan üretilmektedir ve düşük maliyet ile yüksek kullanım kolaylığı nedeniyle günlük yaşamda yaygın olarak tercih edilmektedir (Rochman vd., 2013: 171).

Makro plastikler 5 milimetre (mm)’den ve mikro plastikler (5 mm’den küçük) ekosistemde birikerek tüm canlıları etkileyebilmekte, geri dönüşüm oranlarının düşük olması ise bu sorunu daha da ciddi hâle getirmektedir (Kumar vd., 2021: 9963). 1950’lerden itibaren nüfus artışı ve kimya endüstrisindeki gelişmeler, plastik ambalaj üretiminde hızlı bir yükselişe yol açmıştır. Avrupa ülkelerinde ekonomik büyüme ile birlikte plastik kullanımının yaygınlaşmasının temel nedenleri, esneklikleri, dayanıklılıkları ve düşük üretim maliyetleridir. Buna karşın, plastiklerin bu avantajlı özellikleri, çevre ve insan sağlığı açısından ciddi riskler taşımaktadır; yapılan araştırmalar, plastik atıkların ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerini ve geri dönüştürülemeyen plastiklerin imhasının iklim değişikliğine katkılarını ortaya koymaktadır.

Küresel tekstil ve lif üretimi incelendiğinde, lif üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık miktarının çevresel etkileri önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Tekstil değer zincirinin farklı aşamalarında çevresel ve atık açısından birçok kritik nokta olduğunu ortaya koymuştur. Tekstil üretim süreçlerinin önemli düzeyde kaynak kullanımı ve atık oluşumuna yol açtığı, özellikle lif üretimi ve kimyasal işlemler sırasında çevresel yüklerin yoğunlaştığı belirtilmektedir (UNEP, 2023: 26).

Sentetik lif üretimi ve tekstil endüstrisinin küresel lif üretimi içindeki payının yüksek olduğu ve bu nedenle üretim kaynaklı atık miktarının da önemli düzeylere ulaştığı vurgulanmaktadır. Örneğin, global lif üretiminin 2022’de yaklaşık 116 milyon ton olduğu ve %60’dan fazlasının sentetik liflerden oluştuğu bildirilmiştir (Niinimäki vd., 2025). Bu çerçevede, üretim sırasında oluşan atık/fire oranının %10–15 civarında olduğu kabulü, sadece tekstil sektöründeki genel atık yükünü anlamakla kalmayıp aynı zamanda sentetik lif üretim firelerinin de dünya ölçeğinde yıllık milyonlarca ton mertebesinde olduğunu göstermektedir (Niinimäki vd., 2025: 190).

2.2. Plastik Üretimini, Plastik Atıkların Niceliksel Boyutları ve Zararları

Plastik üretimi, 1950'lerden itibaren hız kazanarak küresel ölçekte ciddi bir çevresel sorun hâline gelmiştir. Özellikle 2000'lerden bu yana üretimdeki ivmelenme, sürdürülebilirlik ve çevre açısından kritik sonuçlara yol açmaktadır (Geyer vd., 2017: 4). Araştırmalar, yenilenemeyen hidrokarbon kaynaklarından elde edilen plastiklerin yıllık üretiminin 1950'de yalnızca 2 milyon ton iken, 2020'de 420 milyon tonu aştığını ortaya koymaktadır. Toplam plastik üretimi 9,2 milyar tona ulaşmış olup, bunun yarısından fazlası 2004 sonrası üretilmiştir.

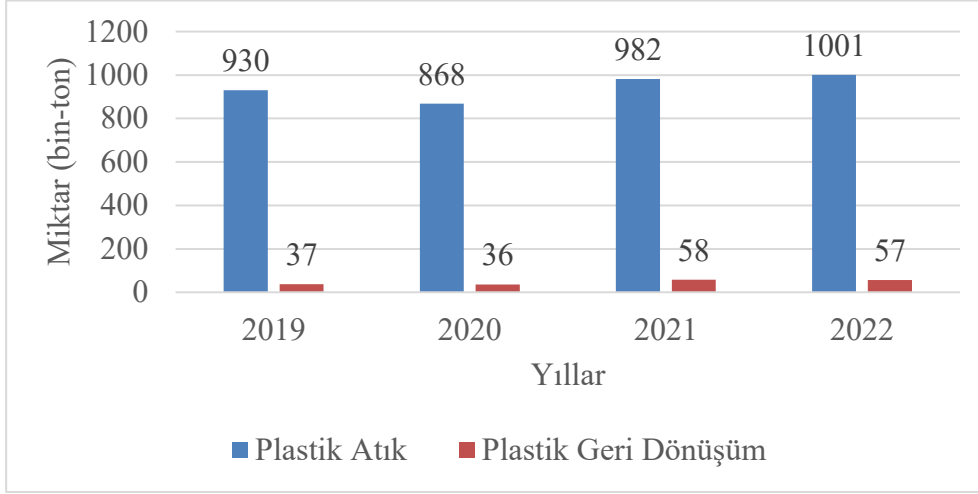
Üretilen plastiklerin yaklaşık %60'ının düzenli depolama alanlarına veya doğrudan çevreye bırakılması, küresel ölçekte atık yönetiminde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Plastik atık miktarı da benzer şekilde artış eğilimindedir; nitekim 2000 yılında 156 milyon ton olan yıllık plastik atık miktarı, 2019 yılında 353 milyon tona yükselmiştir (OECD, 2022). Plastik krizini derinleştiren bir diğer önemli unsur ise dünya nüfusundaki hızlı artıştır. 2000'de yaklaşık 6 milyar olan dünya nüfusu, 2011'de 7 milyara, 2022 itibarıyla ise yaklaşık 7,9 milyara ulaşmıştır. Bu artış eğilimi, özellikle katı atık yönetimi ve plastik kullanımına bağlı çevresel baskıları daha da artırmaktadır.

Sadece 2020'de plastik üretimi 400 milyon ton seviyesini aşmış ve bunun yaklaşık %40'ı tek kullanımlık plastiklerden oluşmuştur. Mevcut eğilimlerin devam etmesi durumunda, küresel plastik üretiminin 2050 itibarıyla 1.100 milyon tonu aşması beklenmektedir. Plastiklerin ekosistem için tehlikeli olmasının başlıca nedeni, %99'unun fosil yakıt kaynaklı bileşenlerden üretilmesidir; yalnızca %1'i yenilenebilir kaynaklardan (nişasta, selüloz, bitkisel yağ) elde edilmektedir (Geyer vd., 2017: 12).

Nüfus artışı ve üretim/tüketim artışı, ekosistem açısından ciddi tehditler oluşturmakta; düşük maliyet ve yüksek kullanım kolaylığı gibi avantajlar, döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında atıkların yeniden ekonomiye kazandırılmamasıyla çevresel sorunları derinleştirmektedir. Her yıl geri dönüştürülmeyen yaklaşık 20 milyon ton plastik, göllerden nehirlere ve denizlere ulaşmakta ve ekosistem üzerinde geri dönüşü güç etkiler yaratmaktadır (Jambeck vd., 2015: 768). Denizlerdeki kirliliğin %60'ını tek kullanımlık plastikler oluşturmakta, canlı türleri üzerinde ciddi etkiler gözlemlenmektedir; incelenen 555 balık türünden 386'sında plastik atık tespit edilmiştir.

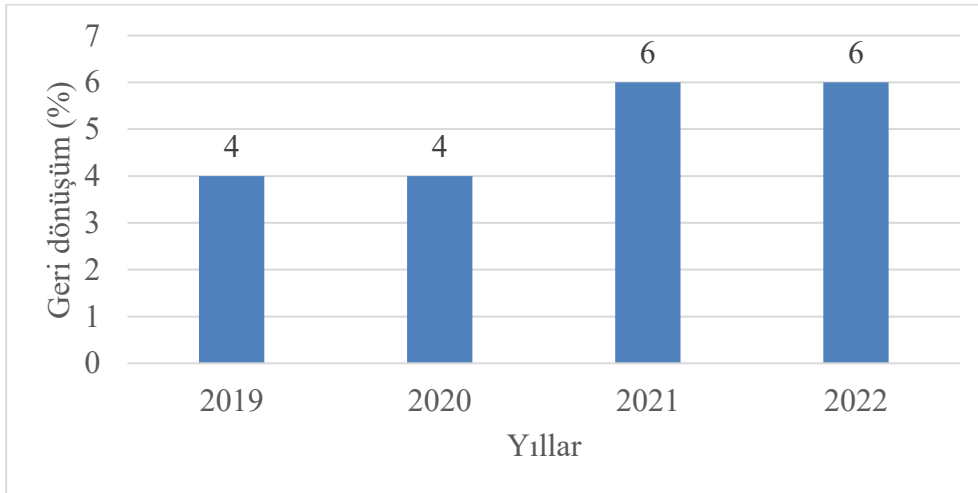
Üretilen plastiklerin yalnızca %9'u geri dönüştürülmekte, %12'si yakılmakta ve kalan %79'u çevreye bırakılmaktadır. Geri dönüştürülen ve yakılan miktar toplam üretimin yalnızca %21'ini oluşturduğundan, çevre üzerindeki etkiler giderek artmaktadır (Geyer vd., 2017: 12).

2019-2022 yıllarında dünyadaki yıllık üretilen plastik, demir ve diğer metallerin üretim miktarları Grafik 2.1. de geri dönüşüm yüzde oranları ise Grafik 2.2. gösterilmiştir.



Grafik 2.1. Üretim miktar verileri (2019-2022)

Kaynak: (Yakışık, H., 2023: 41)



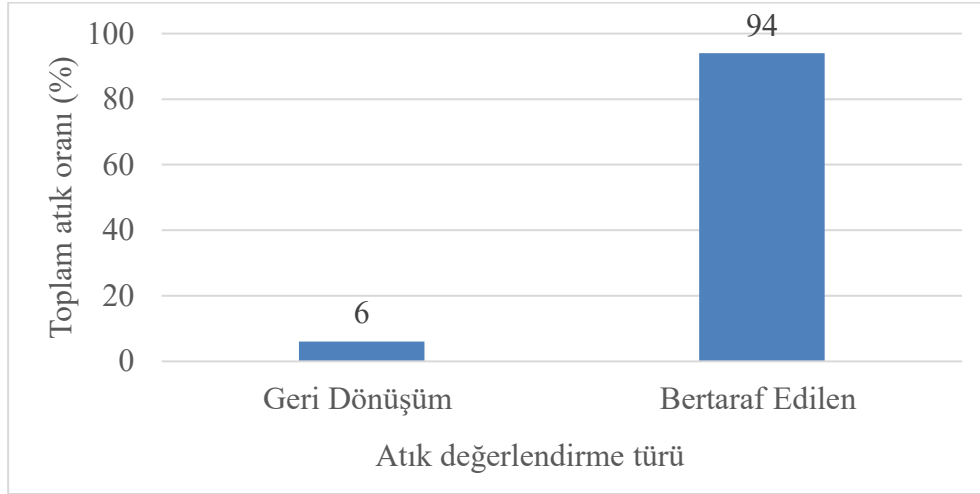
Grafik 2.2. Geri dönüşüm yüzde oranları (2019-2022)

Kaynak: (Yakışık, H., 2023: 41)

Grafik 2.3.'de plastik atıkların, 2022 verilerine göre sadece %6'sı geri dönüştürülürken %94'ü bertaraf edilmiş ya da ekosisteme salındığı gösterilmiştir.

Türkiye açısından plastik atık meselesine bakıldığında, 2021 yılında Türkiye'nin ürettiği 5 milyon 600 bin ton plastik atık, plastik yönetiminin ne denli önemli olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu miktar, Türkiye'yi en çok plastik atık üreten ülkeler sıralamasında dokuzuncu sıraya yerleştirmektedir. Diğer yandan, Türkiye'deki plastik atık geri dönüşüm

tesislerinde 2021 yılı itibariyle yangın sayısının 1'den 121'e yükselmesi, plastik atık yönetiminde ciddi eksiklikler bulunduğunu göstermektedir (Öztürk, 2022).



Grafik 2.3. Plastik atık ve geri dönüşüm değerlendirme türü

Kaynak: (Yakışık, H., 2023: 41)

2.3. Makro ve Mikro Plastiklerin Ekosisteme Zararları

Plastik üretimi ve buna bağlı plastik atık miktarının hızla artması, günümüz çevresel sorunlarının önemli bir bileşeni hâline gelmiştir. Plastiklerin ekonomik açıdan değerli bir hammadde mi yoksa ekosistem için büyüyen bir tehdit mi olduğu yönündeki tartışmalar giderek yoğunlaşmaktadır. Plastik atıklar yalnızca makro kapsamda katı atık formunda kalmamakta, zamanla fiziksel ve kimyasal süreçlerle daha küçük parçalara ayrılarak mikro plastiklere dönüşmektedir. Mikro plastik kavramı ilk kez Thompson tarafından ortaya atılmış ve 5 mm'den daha küçük plastik parçacıkları bu kategori altında tanımlanmıştır (Thompson vd., 2004: 349).

Plastiğin yaşam döngüsü boyunca maruz kaldığı aşınma, ısı değişimleri ve kimyasal etkileşimler sonucunda çevreye karışması kaçınılmaz hâle gelmiştir. Özellikle taşıt lastiklerinin aşınması, tekstil ürünlerinin yıkanması, kişisel bakım ürünleri ve tek kullanımlık ambalaj malzemeleri, mikro plastik oluşumuna en fazla katkı sağlayan kaynaklardır (Bouwmeester vd., 2015: 82). Sentetik kumaşların yıkanması sırasında her bir yıkamada binlerce mikro lifin su ortamına karıştığı bilinmektedir. Aynı şekilde pet şişelerin ve damacanelerin sıcaklık değişimleri altında mikro plastik salınımını artırdığı ve bu parçacıkların içme suyuna karışarak insanların vücuduna kadar ulaşabildiği belirlenmiştir (Karlsson vd., 2023: 5).

Plastik atıkların dögüsel ekonomi kapsamında yeniden değerlendirilmesi sürdürülebilir bir yaklaşım olarak sunulsa da bu durum tartışmalıdır. Çünkü plastikler,

üretimden bertarafa kadar her aşamada toksik katkı maddeleri içermekte ve bu maddeler hem çevre hem de insan sağlığı üzerinde önemli riskler oluşturmaktadır (Carbery vd., 2018). Makro plastiklerin doğada yüzlerce yıl çözünmeden kalması, deniz canlılarının bu maddeleri yanlışlıkla tüketerek ölmesine; mikro plastiklerin ise gıda zincirine ve insan dolaşım sistemine kadar girmesine yol açmaktadır.

Bu süreç, günümüzde Birleşmiş Milletler tarafından “üçlü gezegen krizi” olarak tanımlanan iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve kirlilik sorunlarının derinleşmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. 1970’lerden itibaren hızla artan sera gazı emisyonları ile iklim sisteminde gözlemlenen değişimler, 1990’lı yıllarda plastik kullanımındaki keskin artışla birleşerek küresel ölçekte çevresel bozulmayı hızlandırmıştır. Bu üçlü tehdit, yalnızca doğal ekosistemleri değil; yoksulluk, halk sağlığı, kentsel yaşam, su kaynakları yönetimi ve gıda güvenliği gibi kritik kalkınma alanlarını da olumsuz etkilemektedir (Steffen vd., 2015).

Dolayısıyla çevresel ve sosyal bileşenleri içermeyen büyüme modelleri, literatürde geleceği olmayan büyüme ya da sürdürülemez büyüme olarak nitelendirilmekte; özellikle düşük gelirli bölgelere yönelik kirlilik kaynaklı hastalık risklerini önemli ölçüde artırmaktadır. Plastik atık yoğunluğu ve kirlilik baskısı arttıkça hem ekosistemlerin hem de insan sağlığının korunması giderek zorlaşmakta; bu durum sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı önemli ölçüde geciktirmektedir.

2.4. Katı Atıklardan Plastiklerin Geri Kazanılması

Katı atıklar, küresel ölçekte giderek artan bir çevresel sorun olarak dikkat çekmekte olup bu konu özellikle 1980’li yıllardan itibaren uluslararası literatürde önemli bir yer edinmiştir (Tchobanoglous vd., 2002: 5).

Katı atık yönetimi, genel olarak üç temel strateji kapsamında ele alınmaktadır. Bunlar; atık oluşumunun kaynaktan azaltılması veya tamamen önlenmesi, atık bileşenlerinde yer alan çeşitli materyallerin geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanıma kazandırılması, kullanım özelliğini yitiren atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi veya uygun alanlarda depolanmasıdır (Williams, 2013: 21).

Katı atıkların güvenli biçimde gömülmesi için gerekli alanların giderek azalması, bu yönetim stratejilerinin önemini artıran başlıca sorunlardan biridir. Bu kapsamda geliştirilen politikaların temel gerekçeleri çevresel, ekonomik ve toplumsal faktörlerden oluşmaktadır. Bu nedenler arasında; atıkların yakılması sonucunda ortaya çıkan çevresel ve sağlık temelli sorunların kamuoyu tarafından tepkiyle karşılanması, fosil kaynakların kontrolsüz tüketimine

yönelik bilimsel çevrelerin uyarıları ve küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarındaki artış yer almaktadır (UNEP, 2018: 11).

Katı atık bileşenlerinin önemli bir kısmını polimerler oluşturmaktadır. Plastik, lastik ve kauçuk gibi yaygın kullanım alanına sahip birçok materyalin temel yapısını polimer türleri meydana getirmektedir. Güncel çalışmalar, dünya genelinde yıllık plastik tüketiminin yaklaşık 450 milyon ton düzeyine ulaştığını ve bu miktarın yaklaşık 370 milyon tonunun termoplastiklerden oluştuğunu göstermektedir (Geyer vd., 2017: 3). Plastik tüketiminde en yüksek payın ise %31 ile ambalaj sektörüne ait olduğu raporlanmaktadır.

Katı atıkların bileşenlerinden biri olan polimerler, plastik, lastik ve kauçuk gibi yaygın kullanım alanına sahip materyallerin temel yapı taşını oluşturmaktadır. Her yıl dünya çapında ortalama 450 milyon ton plastik tüketildiği belirtilmekte olup, bu miktarın 370 milyon tonunun termoplastiklerden meydana geldiği raporlanmaktadır. Plastik tüketiminde en büyük pay ambalaj malzemelerine ait olup, söz konusu malzeme türü %31'lik bir oranla lider konumda bulunmaktadır (Savaşçı vd. 2002).

Ambalaj malzemelerinin kullanım ömürlerinin genellikle oldukça kısa olması (1–3 ay), üretimden kısa bir süre sonra bu malzemelerin evsel katı atıkların içinde yer almasına neden olmaktadır. Buna karşılık dayanıklı tüketim ürünlerinde (1–5 yıl) veya inşaat sektöründe kullanılan plastiklerde (5–25 yıl) kullanım süresi daha uzun olduğu için bu kategorilerin katı atık miktarına katkısı sınırlı kalmaktadır. Bu durum, plastik kaynaklı katı atık sorununda özellikle plastik ambalaj malzemelerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Ağırlıkça katı atıkların yaklaşık %11'ini plastik ambalaj malzemeleri oluşturmakta olup, bu oran içinde polietilen (PE), türü plastiklerin payı oldukça yüksektir (European Environment Agency, 2020: 45). Bunun yanında, evsel katı atıkların işlenmesine yönelik uygulamalar ülkeler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Örneğin Fransa'da katı atıkların %32'si, İsveç'te %50'si, Danimarka'da %65'i ve İsviçre'de %80'i enerji elde etmek amacıyla kontrollü biçimde yakılmaktadır (World Bank, 2021: 112). Buna karşılık İngiltere'de katı atıkların yaklaşık %80'i hâlâ düzenli depolama sahalarına gömülmektedir. Almanya ise atıkların kaynağında ayrıştırılmasını zorunlu kılan ve materyallerin yeniden kullanımını teşvik eden kapsamlı bir geri dönüşüm sistemi geliştirmiştir.

Plastiklerin katı atıklardan geri kazanılmasında temel aşamalar; plastiklerin toplanması, gerektiğinde sıkıştırılarak yoğunlaştırılması ve yoğunlaştırılmış plastiklerin sınıflandırılarak işlenmesidir. Etkin bir geri dönüşüm sürecinin işletilebilmesi için plastiklerin sağlıklı biçimde

toplanması kritik öneme sahiptir. Batılı ülkelerde katı atıkların kaynağında sınıflandırılarak toplanması hem çevresel düzenlemeler hem de kamuoyu bilinçlendirme çalışmalarıyla desteklenmektedir. Almanya’da uygulanan yeşil nokta sistemi buna örnek teşkil etmektedir ve ekonomik etkileri açısından da dikkat çekicidir.

Plastiklerin hacim/ağırlık oranının yüksek olması, etkin ve ekonomik bir toplama altyapısının geliştirilmesini zorunlu hâle getirmektedir. Bu kapsamda batılı ülkelerde plastik sıkıştırma makineleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Gezici ünitelerde tercih edilen kompaktör makineleri yaklaşık 10 kat sıkıştırma kapasitesi sağlayarak çeşitli plastik türlerini yoğunlaştırabilmektedir. Sabit ünitelerde kullanılan düzleştirici ve delici makineleri ise balyalama sistemiyle çalışmakta ve %90’a varan hacim azaltımı gerçekleştirerek sıkıştırılmış plastikleri otomatik olarak küçük balyalar hâline getirebilmektedir (EEA, 2020: 47). Bu teknolojilerin yaygınlaşması, plastik geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sıkıştırma yöntemi ne olursa olsun, atık plastiklerin buldukları yerden işlenecekleri noktaya taşınmasında %60’a kadar maliyet tasarrufu sağlanmakta, taşınabilen miktar %90 oranında artırılabilir ve geri kazanılmış plastiklerden %40 daha fazla gelir elde edilebilmektedir. Eskiden, elle ayrılarak toplanan karışık plastik atıklar herhangi bir ayrıştırma yapılmadan karışım halinde doğrudan kullanılmaktaydı. Ancak bu yöntem, belirli sebeplerle artık geçerliliğini yitirmiştir. Geri kazanım sürecine en uygun plastik türleri; PE, PP, polivinil klorür (PVC) ve polietilen tereftalat (PET)’tir. Fakat PET’in yüksek erime sıcaklığı, PVC’nin bozulmasına neden olurken; PVC içermeyen uygulamalarda ise poliolefinlerin, PET’in malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Bununla birlikte, her geçen yıl katı atıklardan toplanan plastik miktarı artmakta ve bu atıklara yeterli tüketim alanı bulmak giderek zorlaşmaktadır. Bu nedenle, her plastik türünün mümkün olduğunca saf şekilde elde edilmesi önem taşımaktadır. Bu bağlamda, klasik elle tasnif yerine otomatik sınıflandırma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Al-Salem vd., 2009: 2632).

Plastiklerin sınıflandırılmasındaki temel amaç, geri kazanılan plastiklerin mümkün olan en yüksek saflıkta ve sabit özelliklerde elde edilmesini sağlamaktır. Bu nedenle plastik şişeler yalnızca malzeme türüne göre değil, aynı zamanda renklerine bağlı olarak da homojen bir şekilde ayrılmalıdır. Sınıflandırma sürecinin başlangıcında şişelerin, aynı malzemedan üretilmiş olsalar dahi kapak gibi farklı renkteki parçaları ayrılmakta ve taş, toprak gibi yabancı maddelerden arındırılmaktadır (Hopewell vd., 2009: 211). Daha sonraki aşamada şişeler, mıknatıs kullanılarak demir esaslı kirliliklerden temizlenmektedir.

Otomatik sınıflandırma sistemlerinde ise ultrasonik sensörler şişelerin konveyör bandı üzerindeki konumunu belirlerken, kızılötesi algılayıcılar plastik türünü tespit etmektedir. Ek olarak, otomatik kameralar şişelerin rengini tanımlamakta ve tüm veriler bilgisayar yazılımı tarafından işlenerek her bir şişe türüne göre sınıflandırılmaktadır (Al-Salem vd., 2017: 1038). Tanımlanan şişeler, pinomatik jet sistemleri aracılığıyla uygun konveyör bantlarına yönlendirilir.

Geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak sınıflandırma sistemlerinin hassasiyeti artırılmaktadır. Örneğin PVC ve PET şişelerin ayırımında X-ışını temelli sistemler son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Vilaplana vd., 2008: 907). Optik sensörlerin gelişmesi ile PP ve renksiz yüksek yoğunluklu polietilenin (YYPE) otomatik olarak birbirinden ayrılması mümkün hâle gelmiştir. Ayrıca ko-ekstrüde çok katmanlı plastiklerin ve bir plastiğin farklı türlerinin ayrılmasına yönelik otomatik sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesi üzerine araştırmalar devam etmektedir (Al-Salem vd., 2017: 1041). Bu teknolojik ilerlemeler, geri kazanılan plastiklerde saflığın ve kalitenin artırılması açısından önemli faydalar sunmaktadır.

2.4.1. Plastik Atıkların Granül ve Elyaf Olarak Geri Dönüşümü

Günümüzde plastik ürünlerin kullanımındaki hızlı artış, biyolojik olarak parçalanamayan bu malzemelerin çevrede uzun süre kalmasına ve ciddi kirlilik sorunlarına yol açmasına neden olmaktadır. Plastik tüketiminin yükselişine paralel olarak, çevresel etkilerinin incelenmesi ve atık yönetim sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik bilimsel çalışmalar da yoğunlaşmıştır. Literatürde, özellikle çalışma ofisleri gibi günlük yaşamda plastik kullanımının yoğun olduğu alanlarda iyi planlanmış geri dönüşüm stratejilerinin uygulanabilir ve etkili olduğu belirtilmektedir (Hopewell vd., 2009: 211).

Bu araştırmanın temel amacı, ofis ortamında toplanan plastik atıkların granül ve elyaf formuna dönüştürülerek geri kazanılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda ilk aşamada geri dönüşüm süreci için gerekli yatırım unsurları belirlenmiş; plastik kirliliğinin boyutunu ve ofis çalışanlarının geri dönüşüme katkı potansiyelini anlatan bilgilendirici materyaller hazırlanmıştır. Bu içerikler Ar-Ge personelinin en sık kullandığı ortak alanlara yerleştirilerek farkındalık oluşturulması hedeflenmiştir. Farkındalığı artırmak amacıyla plastik kirliliği, atık türleri ve geri dönüşüm proseslerine ilişkin eğitim programları düzenlenmiş; bu programlara tüm Ar-Ge çalışanlarının aktif katılımı teşvik edilmiştir. Bu uygulamalar sonucunda plastik atıkların toplanma miktarında gözle görülür bir artış sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması, geri dönüşümün kritik adımlarından biri olan ön arıtma sürecidir. Ön arıtma kapsamında plastik malzemeler türlerine göre ayrılmış, yıkanmış ve uygun koşullarda kurutulmuştur. Plastiklerin kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı olduğundan ayrıştırma adımının geri dönüşüm kalitesi üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır (Al-Salem vd., 2017: 1038). Örneğin PET ve Polistiren (PS) malzemelerin yaklaşık 70 derece (°C) 'de kurutulması gerekirken, düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) ve lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) 50°C'nin ve yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) 60°C'nin üzerine çıkılmaması önerilmektedir (Vilaplana & Karlsson, 2008: 907). Bu nedenle ayrıştırma ve kurutma işlemleri dikkatle yürütülmüştür. Plastik türlerine ait kurutma detaylarına ilişkin bilgiler Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Plastik türlerine göre kurutma koşulları

Plastik Türleri	Kurutma Koşulları (°C)	Kurutma Süresi (Saat)
PET	70	1
HDPE	60	1
PVC	40	1
LD/LLD-PE	50	1
PP	60	1
PS (POLİSTİREN)	70	1
SELOFAN	40	1

Kaynak: (İskender, Ö., & Atmaca, S. A., 2024: 33)

Plastik atıklar son olarak parçalanarak tekrar eritilmiş ve seçilen ekstrüzyon yöntemiyle aglomere edilmiştir. İki farklı yeniden ekstrüzyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlar granülasyon ve elyaf ekstrüzyonudur. Tablo 2.2'de plastik türlerine göre uygulanabilecek ekstrüzyon yöntemi ve erime noktası gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Plastiklerin ekstrüzyon yöntemi ve erime noktası

Plastik Türleri	Yeniden Ekstrüzyon Yöntemi	Erime Noktası (°C)
PET	Elyaf ekstrüzyonu	260
HDPE	Elyaf ekstrüzyonu	125
PVC	Granülasyon	180
LD/LLD-PE	Granülasyon	130
PP	Elyaf ekstrüzyonu, Granülasyon	160
PS	Granülasyon	230
SELOFAN	Granülasyon	175

Kaynak: (İskender, Ö., & Atmaca, S. A., 2024: 33)

Her plastik türü için en uygun ekstrüzyon yöntemi belirlenmiş ve bu yöntemle eritilmiştir. Bu süreç sonunda geri dönüştürülen LLDPE, propilen ve selofan granülleri üretim

sistemine hazır hale getirilmiş; laminasyon için kullanılan granüller yaklaşık 1 mm çapında, tabaka yapımı ise 3 mm çapında olacak şekilde düzenlenmiştir. Geri dönüştürülmüş LLDPE, propilen ve selofan granülleri şekil 2.1.'de, geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) elyafı şekil 2.2.'de tezde kullanılmış olan geri dönüştürülmüş PP granüller (RPP) ise şekil 2.3.'de görülebilmektedir.



şekil 2.1. Geri dönüştürülmüş LLDPE granülleri, PP granülleri, selofan granülleri

Kaynak: (İskender, ., & Atmaca, S. A., 2024: 33)



şekil 2.2. Geri dönüştürülmüş HDPE elyaf

Kaynak: (İskender, ., & Atmaca, S. A., 2024: 34)



Şekil 2.3. Tezde kullanılmış olan RPP

Elyaf üretiminde kullanılan ekstrüder sistemi, proses gereksinimlerine göre ayarlanabilir olup üretim süreçlerini yöneten sorumluların taleplerine göre yapılandırılmaktadır. Geri dönüşüm hattında gerçekleştirilen yıkama işlemlerinde kullanılan kimyasal maddeler ise tesisin teknik olanaklarına ve proses ihtiyaçlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, bazı işletmelerde sodyum hipoklorit tercih edilirken, bazı üretim hatlarında hidrojen peroksit kullanılması daha uygun görülmektedir. Bu kimyasal tercihi, geri dönüşüm kalitesini ve nihai ürün özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan PP geri dönüşüm granülleri, üretim hattında fireye ayrılmış PP ipliklerinin yeniden işlenmesiyle elde edilmiştir. Atık iplikler önce uygun şekilde parçalanmış, ardından ekstrüderden geçirilerek granül formuna dönüştürülmüştür. Elde edilen granüller, Şekil 2.3'te gösterildiği üzere yeniden kullanım için uygun özellikler sağlamaktadır. Bu çalışmada PP geri dönüşüm granülleri üretimden fireye çıkmış olan PP iplikleri geri dönüşüm granül haline Şekil 2.3.'teki gibi getirilip kullanılmıştır.

3. LİFLİ BETONUN TANIMI, TARİHSEL GELİŞİMİ VE LİF TÜRLERİ

3.1. Lifli Betonun Tanımı ve Temel Prensipleri

Lifli beton, beton matrisine belirli oranlarda ve homojen şekilde dağıtılmış kısa, süreksiz liflerin ilavesiyle elde edilen, geleneksel betona kıyasla geliştirilmiş mekanik ve durabilite özellikleri sergileyen kompozit bir yapı malzemesidir. Bu lifler; çelik, sentetik (polipropilen, poliamid, polivinil alkol vb.), cam, karbon veya doğal kökenli olabilmekte olup, betonun gevrek yapısını iyileştirerek daha sünek bir davranış göstermesini sağlamaktadır (ACI Committee 544, 2018: 2).

Geleneksel beton, basınç dayanımı yüksek ancak çekme dayanımı ve sünekliği sınırlı bir malzemedir. Betonarme yapılarda bu zayıflık donatı çeliği ile giderilmeye çalışılmaktadır. Ancak mikro ve makro çatlakların oluşumu, özellikle erken yaşlarda ve çekme gerilmelerinin etkili olduğu durumlarda kaçınılmazdır. Lifli beton yaklaşımı, beton içerisinde rastgele yönlendirilmiş liflerin çatlak ilerlemesini sınırlandırması ve çatlak köprüleme (mekanizması ile gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlaması esasına dayanmaktadır (Bentur & Mindess, 2007: 33).

Lifli betonun bir diğer temel prensibi, çoklu çatlak oluşumunu teşvik ederek tek ve ani kırılma yerine kontrollü ve yayılı bir hasar mekanizması oluşturmasıdır. Bu sayede lifli beton, darbe, yorulma ve dinamik yükler altında daha üstün bir performans sergilemektedir. Lif katkısı ile betonun çatlak genişlikleri sınırlandırılmakta, bu durum hem servis hem de dayanıklılık açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle su geçirimsizliğinin artırılması ve donatı korozyon riskinin azaltılması lifli betonun önemli faydaları arasında yer almaktadır (Neville, 2011: 6).

Lifli beton, klasik betonarme sistemlerin tamamen yerine geçmekten ziyade, tamamlayıcı bir çözüm olarak değerlendirilmelidir. Birçok uygulamada lifler, geleneksel donatı ile birlikte kullanılarak hibrit sistemler oluşturulmakta; böylece hem mikro hem de makro ölçekli çatlak kontrolü sağlanmaktadır. Püskürtme beton uygulamaları, endüstriyel zeminler, tünel kaplamaları ve prefabrik elemanlar lifli betonun yaygın kullanım alanları arasında yer almaktadır (di Prisco, Plizzari ve Vandewalle, 2009: 1262).

Sonuç olarak lifli beton, betonun zayıf yönlerini iyileştirmeyi amaçlayan, çok fazlı ve performans esaslı bir kompozit malzeme olarak modern yapı mühendisliğinde önemli bir yer tutmaktadır. Gelişen standartlar ve performans dayalı tasarım yaklaşımları ile lifli betonun kullanım alanlarının giderek genişlediği görülmektedir.

3.2. Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi

Lifli betonun mühendislik uygulamalarındaki gelişimi modern anlamda 1960'lı yıllarda çelik liflerin beton içerisine dahil edilmesiyle başlamış olsa da lif kullanımı esasen insanlık tarihinin çok daha erken dönemlerine dayanmaktadır. Eski Çağlarda lifler, bağlayıcı özelliğe sahip toprak, kil ve kireç esaslı malzemelerin mekanik performansını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Bu uygulamalar, lifli kompozit malzemelerin ilk örnekleri olarak değerlendirilmektedir (Bentur & Mindess, 2007: 3).

Mezopotamya ve Antik Mısır uygarlıklarında, güneşte kurutulan kerpiç tuğlaların içerisine saman ve bitkisel liflerin katıldığı bilinmektedir. Bu lifler, kuruma sırasında meydana gelen rötre çatlaklarını sınırlandırarak tuğlaların bütünlüğünü korumuş ve yapı elemanlarının dayanıklılığını artırmıştır. Arkeolojik çalışmalar, saman takviyeli kerpiçlerin lif içermeyen örneklere kıyasla daha az çatlak içerdiğini ve daha uzun süre dayanım gösterdiğini ortaya koymaktadır (Minke, 2006: 14).

Antik Yunan ve Roma dönemlerinde lif kullanımının daha sistematik hale geldiği görülmektedir. Romalılar, kireç esaslı harçlara hayvan kılı ve bitkisel lifler ekleyerek harçların çekme dayanımını ve aderans özelliklerini iyileştirmiştir. Özellikle su yapıları, hamamlar ve duvar kaplamalarında lif katkılı harçların kullanıldığı bilinmektedir. Harç bileşimlerinde organik katkıların kullanımına değinmiş ve bu katkıların dayanıklılığı artırıcı etkisini vurgulamıştır (Vitruvius, 1960: 40).

Roma betonunun bazı örneklerinde, lifli organik katkıların harcın bütünlüğünü artırmak amacıyla kullanıldığına dair bulgular mevcuttur. Lifler, beton benzeri bu erken dönem kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesini sınırlandırarak yapıların uzun süre ayakta kalmasına katkı sağlamıştır. Günümüze kadar ulaşan Roma yapılarının önemli bir kısmında bu tür katkıların dolaylı etkileri olduğu düşünülmektedir (Jackson, 2014: 90).

Orta Asya ve Anadolu coğrafyasında ise lif kullanımının özellikle kerpiç ve horasan harçlarında yaygın olduğu bilinmektedir. Hayvan kılı, saman ve keçi kılı gibi lifler; harcın kohezyonunu artırmak, çatlamayı azaltmak ve yapısal sürekliliği sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu geleneksel uygulamalar, modern lifli beton teknolojisinin temel prensipleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir (Çamlıbel, 2010: 41).

Modern mühendislik yaklaşımıyla lifli betonun gelişimi 20. yüzyılın ortalarında başlamış, 1960'lı yıllardan itibaren çelik liflerin beton içerisine dahil edilmesiyle bilimsel ve deneysel çalışmalar hız kazanmıştır. 1970'li ve 1980'li yıllarda lifli betonun mekanik davranışı,

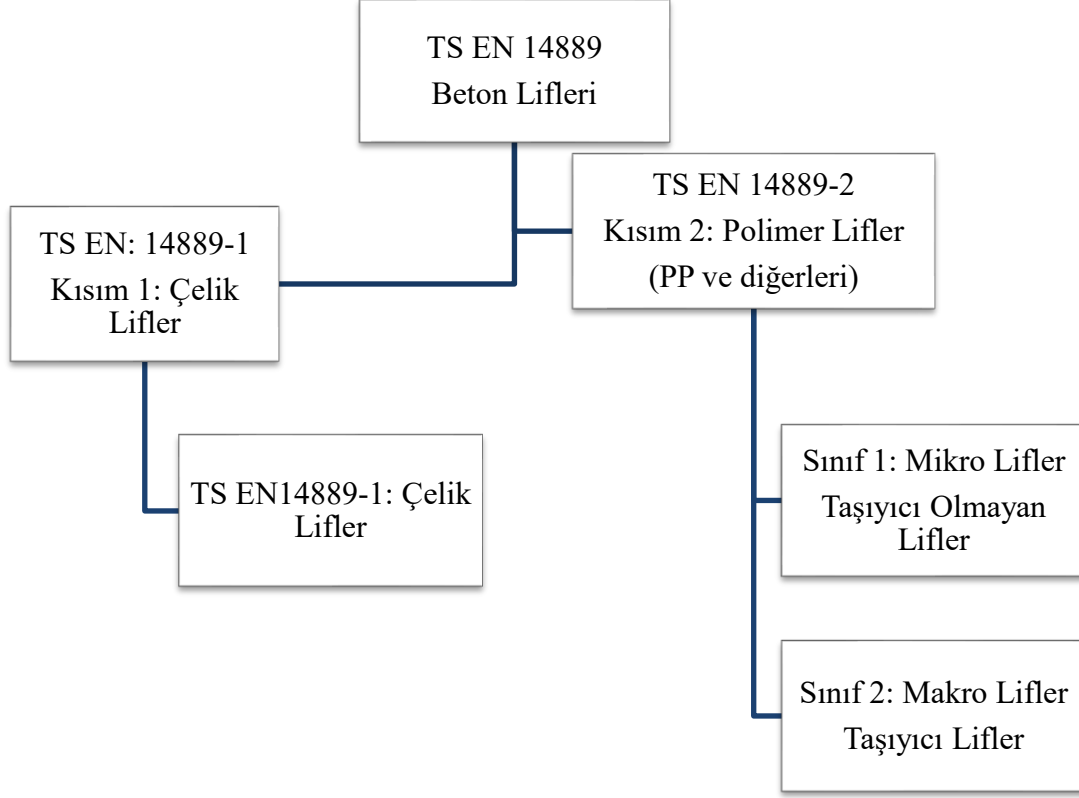
çatlak sonrası performansı ve tasarım esasları üzerine yapılan araştırmalar artmış; 1990'lı yıllardan itibaren sentetik lif üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte lifli beton daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde lifli beton; tünel kaplamaları, püskürtme beton uygulamaları, endüstriyel zeminler, prefabrik elemanlar ve darbe dayanımı gerektiren özel mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart ve yönetmeliklerin gelişmesiyle birlikte lifli beton, geleneksel donatının yerine veya tamamlayıcısı olarak kabul edilen bir yapı malzemesi haline gelmiştir (Taşdemir vd., 2025: 6).

3.3. Liflerin Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları

TS EN 14889 standardı kapsamında lifli betonlarda kullanılan lifler, malzeme türlerine göre çelik lifler ve polimer esaslı lifler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Çelik lifler genellikle soğuk çekilmiş çelik tellerden üretilmekte olup, korozyon dayanımını artırmak amacıyla galvanizli veya pirinç kaplamalı olarak imal edilebilmektedir. Bu lifler, beton matrisi ile aderansı artırmaya yönelik olarak farklı geometrik formlarda tasarlanmakta; düz, kancalı uçlu, kıvrımlı, yassı ya da konik uçlu tiplerde üretilebilmektedir. Lif geometrisi, lif-matris etkileşimini ve dolayısıyla betonun çatlak sonrası davranışını doğrudan etkilemektedir.

Polimer esaslı lifler ise çoğunlukla PP başta olmak üzere çeşitli sentetik hammaddelerden üretilmekte ve TS EN 14889-2 standardı kapsamında değerlendirilmektedir. Bu lifler, lif çapına bağlı olarak mikro ve makro lifler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Çapı yaklaşık 0,3 mm'den küçük olan polimer lifler mikro sentetik lifler olarak tanımlanmakta ve taze betonda plastik rötreye bağlı çatlakların kontrolünde etkin bir rol oynamaktadır. Çapı 0,3 mm'den büyük olan makro sentetik lifler ise çatlak sonrası yük taşıma kapasitesine katkı sağlayarak taşıyıcı veya yarı taşıyıcı amaçlarla kullanılabilirlerdir.

Bu sınıflandırma, liflerin beton içerisindeki işlevlerini net bir şekilde ortaya koymakta ve lifli beton tasarımında lif tipi ile kullanım amacının birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. TS EN 14889 standardı, liflerin beton performansına katkısını esas alan bu yaklaşımı ile performansa dayalı tasarım anlayışını desteklemektedir (TSE, Aralık 2006). Günümüzde kullanılan lifler şekil 3.1.'de sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.1. Liflerin Sınıflandırılması

Kaynak: (Taşdemir vd., 2025: 7)

3.3.1. Yapısal Olmayan Uygulamalar

Yapısal olmayan uygulamalarda lifli beton, çoğunlukla erken yaş ve plastik rötre çatlaklarının kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda genellikle mikro sentetik lifler tercih edilmektedir. Mikro lifler, taze beton içerisinde homojen şekilde dağılmakta ve betonun priz sürecinde meydana gelen hacim değişimlerine bağlı çatlakların oluşumunu sınırlandırmaktadır. Endüstriyel zeminler, kaplamalar, şaplar, kaldırım betonları ve prefabrik beton elemanlar bu gruba giren başlıca uygulamalardır (ACI Committee 544, 2018: 8). Ayrıca mikro sentetik lifler, betonun yangın dayanımını artırmada da önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda liflerin eriyerek beton içerisinde mikro boşluklar oluşturması, buhar basıncının düşürülmesine ve patlayıcı kopmaların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Kalifa, Menneteau ve Quenard, 2001: 1489).

3.3.2. Yapısal Uygulamalar

Yapısal uygulamalarda lifli beton, betonarme sistemlere alternatif veya tamamlayıcı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu tür uygulamalarda çelik lifler ve makro sentetik lifler

yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu lifler, betonun çatlak sonrası eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini artırarak daha sünek bir davranış sergilemesini sağlamaktadır.

Endüstriyel zeminler, depo ve fabrika döşemeleri, liman sahaları ve havaalanı apronları lifli betonun yaygın olarak kullanıldığı yapısal uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu tür döşemelerde lifler, geleneksel donatı miktarını azaltmakta veya bazı durumlarda tamamen ikame edebilmektedir. Ancak bu tür tasarımlar, performans esaslı deneysel verilerle desteklenmelidir. Endüstriyel zemin ve saha döşemelerinde lifli beton kullanımı, geleneksel hasır donatı uygulamasına kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Liflerin beton hacmi boyunca üç boyutlu olarak dağılması, çatlakların lokal değil yayılı bir şekilde kontrol altına alınmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle ağır yük taşıyan depo ve fabrika zeminlerinde, çatlak genişliklerinin sınırlandırılması ve yüzey performansının korunması açısından büyük önem taşımaktadır (di Prisco vd. 2009: 51).

Lifli betonun en yaygın kullanım alanlarından biri de püskürtme beton uygulamalarıdır. Özellikle tünel ve yeraltı yapılarında, çelik veya makro sentetik lif içeren püskürtme betonlar, kaya yüzeyinin stabilizasyonu ve geçici ya da kalıcı kaplama olarak kullanılmaktadır. Lifler, püskürtme betonun kohezyonunu artırmakta ve erken yaş dayanım kazanımını hızlandırmaktadır. Bu durum, geleneksel hasır donatı kullanımına kıyasla uygulama kolaylığı ve iş güvenliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (EFNARC, Haziran 2025).

Prefabrik beton sektöründe lifli beton, elemanların taşıma ve montaj aşamalarında oluşabilecek çatlakların sınırlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. İnce kesitli paneller, borular, menfezler ve cephe elemanları lifli betonun tercih edildiği başlıca prefabrik ürünlerdir. Lif kullanımı, elemanların servis ömrünü uzatmakta ve bakım ihtiyacını azaltmaktadır (ACI Committee 544, 2018: 26).

3.4. Liflerin Geometrik ve Mekanik Özellikleri

Lifli betonlarda liflerin beton performansına katkısı, liflerin geometrik ve mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Lif uzunluğu, çapı, en-boy oranı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi parametreler; lif-matris aderansı, çatlak köprüleme kapasitesi ve çatlak sonrası taşıma davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (ACI Committee 544, 2002: 9).

Lif uzunluğu, liflerin beton içerisindeki çatlakları köprüleme kabiliyetini doğrudan etkileyen temel geometrik bir parametredir. Kısa lifler genellikle mikro çatlakların kontrolünde etkili olurken, daha uzun lifler makro çatlakların ilerlemesini sınırlandırmakta ve çatlak sonrası yük taşıma kapasitesine katkı sağlamaktadır. Ancak lif uzunluğunun artması, betonun

işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilmekte ve lif topaklanması riskini artırabilmektedir (Neville, 2011: 623).

En-boy oranı, lif uzunluğunun lif çapına oranı olarak tanımlanmakta olup, lifli betonun mekanik davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yüksek en-boy oranı değerine sahip lifler, beton matrisi ile daha iyi aderans sağlayarak çatlak köprüleme kapasitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, çok yüksek en-boy oranı değerleri betonun işlenebilirliğini düşürebilmekte ve homojen lif dağılımını zorlaştırabilmektedir (di Prisco vd., 2009: 1266).

Çelik liflerde en-boy genellikle 50–100 aralığında olup, bu aralık yapısal uygulamalarda optimum performans sağlamaktadır. Sentetik liflerde ise lif çapının daha küçük olması nedeniyle en-boy değerleri daha yüksek olabilmektedir (ACI Committee 544, 2002: 20).

Liflerin çekme dayanımı, lifli betonun çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi açısından kritik bir mekanik özelliktir. Yüksek çekme dayanımına sahip lifler, çatlak açıldıktan sonra dahi yük transferini sürdürebilmekte ve betonun sünek davranış göstermesine katkı sağlamaktadır. Çelik liflerin çekme dayanımı genellikle 1000–2500 MPa aralığında iken, polimer esaslı sentetik liflerin çekme dayanımı daha düşük olmakla birlikte, betonun servis performansını artırmada etkili olmaktadır (ACI Committee 544, 2002: 40).

Çekme dayanımı, liflerin beton içerisinden sıyrılma veya kopma mekanizmasını da belirlemekte olup, lif–matris aderansı ile birlikte değerlendirilmelidir (Neville, 2011:630).

Elastisite modülü, liflerin beton matrisi ile birlikte deformasyon kabiliyetini belirleyen önemli bir mekanik parametredir. Çelik liflerin elastisite modülü yaklaşık 200 GPa (Giga Pascal) olup, betonunkine kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum, çelik liflerin çatlak oluşumundan hemen sonra yük taşımaya başlamasını sağlamaktadır. Buna karşılık sentetik liflerin elastisite modülü daha düşük seviyelerde olup, genellikle 5–10 GPa aralığındadır (ACI Committee 544, 2002, 40).

Liflerin elastisite modülü, lifli betonun mekanik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Deneysel çalışmalar; yüksek elastisite modülüne sahip liflerin beton matrisi ile birlikte deformasyona daha güçlü direnç göstererek çatlak sonrası dayanım ve sertlik artışı sağladığını, buna karşın düşük elastisite modülüne sahip liflerin betonun elastisite modülü üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Özellikle çelik liflerde düşük narinlik durumunda elastisite modülünde artış gözlenirken, yüksek narinlik değerlerinde elastisite modülünde azalma ortaya çıkmıştır (Yağmur, 2020: 1100).

3.5. Lif Türleri ve Beton İçerisindeki Kullanımları

3.5.1. Polipropilen Lifler

PP lifler, petrol türevlerinden elde edilen termoplastik esaslı organik malzemeler olup özellikle inşaat sektöründe mikro ve makro donatı olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu liflerin tercih edilmesinin temel nedenleri arasında, düşük yoğunlukları, yüksek kimyasal dayanımları ve alkali ortamlara karşı gösterdikleri üstün direnç bulunmaktadır. PP lifler, çimento esaslı sistemlerde hem taze hem de sertleşmiş betonun performansını artırmaya yönelik olarak kullanılır. Taze beton aşamasında en kritik faydası, dökümden sonraki ilk saatlerde ortaya çıkan plastik büzülme çatlaklarının oluşumunu önemli ölçüde azaltmasıdır. Bu yönüyle mikro PP lifler, özellikle yüzeysel çatlakların kontrolünde etkili bir çözüm sunar. Saf polipropilenden üretilen lifler, kullanım amaçlarına göre farklı boyutlarda ve geometride üretilmektedir. Mikro lifler daha çok plastik rötre çatlaklarını kontrol altına alırken, makro lifler ise saha betonları, endüstriyel zeminler, garaj döşemeleri, yürüyüş yolları ve şap uygulamalarında çelik hasır gibi geleneksel donatılara alternatif olarak kullanılabilir. Makro PP liflerin beton içerisindeki dağılımı, betonda üç boyutlu bir donatı etkisi oluşturarak yük aktarım mekanizmasını iyileştirir ve çatlak ilerlemesini sınırlandırır. Ayrıca PP liflerin yüksek alkali dayanımı, çimento hidratasyonunun oluşturduğu kimyasal ortama karşı bozulmadan uzun süre varlığını korumasını sağlar ve bu durum onları beton içinde güvenilir bir donatı malzemesi hâline getirir (Ersoy, 2001: 227). Bununla birlikte PP liflerin önemli bir dezavantajı, düşük sıcaklık dayanımlarıdır; malzemenin camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup bu değer altındaki koşullarda mekanik özelliklerinde belirgin düşüşler görülebilir. Lif donatılı betonun tarihsel gelişimi 1960'lı yıllara dayansa da bu dönemin ardından kullanım alanları hızla genişlemiştir. Özellikle Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği tarafından, betonun konvansiyonel silahlara karşı dayanımını artırmaya yönelik gerçekleştirilen kapsamlı araştırmalar, lifli beton teknolojisinin bilimsel temellerinin oluşmasında kritik rol oynamıştır. Bu çalışmalar sonucunda, lifli beton ve püskürtme beton uygulamalarına ilişkin deneysel ve teorik veriler sistematik biçimde ortaya konmuş; elde edilen bulguların ışığında ASTM tarafından ASTM C1116 standardı yayımlanmıştır (ASTM, 23 Ağustos 2023). Bu standart, lif donatılı betonun tanımı, sınıflandırılması ve kullanım koşullarını belirleyerek uygulamaların uluslararası düzeyde bir çerçeveye oturtulmasına önemli katkı sağlamıştır. (Aktürk, 2007: 69). ASTM 1116 standardına göre, bir betonun liflendirilmiş sayılması için hacimce %0,1 lif içermesi gerekmektedir. PP malzemenin yoğunluğu en az $0,9\text{ g/cm}^3$ olduğunda standartlara uygunluğu sağlamak amacıyla en az $0,9\text{ g/cm}^3$ dozaj kullanılmalıdır. PP liflerin yüksek

dayanımlı betonda basınç ve elastisite modülüne etkisi incelendiğinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir ancak hacimce %0,2 oranında kullanılan liflerin taze betonda çökme kaybına sebep olmuştur (ASTM, 23 Ağustos 2023).

Beton teknolojisinde yalnızca çelik ve cam lifler değil, belirli uygulama alanlarında sentetik lifler de etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu gruba poliakrilonitril, polivinilalkol, aramid ve özellikle polipropilen (PP) lifler dâhildir. Sentetik lifler, betonun çekme ve darbe dayanımını iyileştirerek mekanik performansa önemli katkı sağlar. Genellikle beton karışımlarında hacimce %0,1 ila %0,2 oranlarında kullanılan bu lifler, plastik rötre çatlaklarının oluşumunu azaltmaya yönelik etkileriyle öne çıkar. PP lifler ise son yıllarda beton performansını artırmada kullanılan en yeni yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte olup, çelik hasır veya çelik tellerin yerine alternatif bir mikro veya makro donatı sistemi olarak değerlendirilmektedir. Bu lifler; özellikle yoğun araç trafiğine maruz beton zeminler, endüstriyel döşemeler, beton yollar, ray altı betonları, püskürtme beton uygulamaları, segment üretimi ve prekast beton elemanlarında yaygın şekilde tercih edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2007: 112).

PP lifler, hazır beton sektöründe çelik hasır ve çelik tellere kıyasla hem maliyet hem de uygulama açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Liflerin korozyona uğramaması, yapı ömrünü uzatmakta ve betonun dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca, kilogram başına yüksek parçacık sayısına sahip olmaları sayesinde, beton dökümü sırasında oluşabilecek rötre çatlaklarını minimize eder ve çelik hasır veya tellere güvenilir bir alternatif oluşturur.

PP lifler, başta endüstriyel saha betonları olmak üzere beton yollar, havaalanı pistleri, tüneller, konut ve otopark betonları gibi farklı uygulamalarda kullanılmakta; betonun çarpma ve aşınma mukavemetini artırmakta ve geçirimsizlik özelliklerini geliştirmektedir. Bu lifler ayrıca alkali, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklıdır ve beton içindeki plastik gerilmeleri ve buna bağlı mikro çatlakları azaltmaktadır. Çelik hasırlarda %65 olan plastik gerilmeler, PP lif kullanıldığında %72'ye kadar düşmektedir (Yıldırım, 2002: 22).

Buna karşılık, yüksek oranda lif kullanımı betonun işlenebilirliğini ve çökme değerini olumsuz yönde etkileyebilir. Lif miktarı arttıkça betonun yayılma özelliği azalmakta ve işlenebilirliği zorlaşmaktadır. Yüksek hacim oranında (%1) lif kullanımı, betonun çekme dayanımını ve mekanik özelliklerini iyileştirirken, düşük oranda lif (%0,1–0,2) yalnızca çekme dayanımına katkıda bulunmaktadır (Yıldırım, 2002: 22).

Deneylerde kullanılan liflerin boyları değişkenlik göstermiştir; %40'ı 5 mm'den kısa, 0–25 mm arasında farklı uzunluklara sahip lifler, hacimsel olarak %0,15, 1,0, 1,3, 2,6 ve 3,9

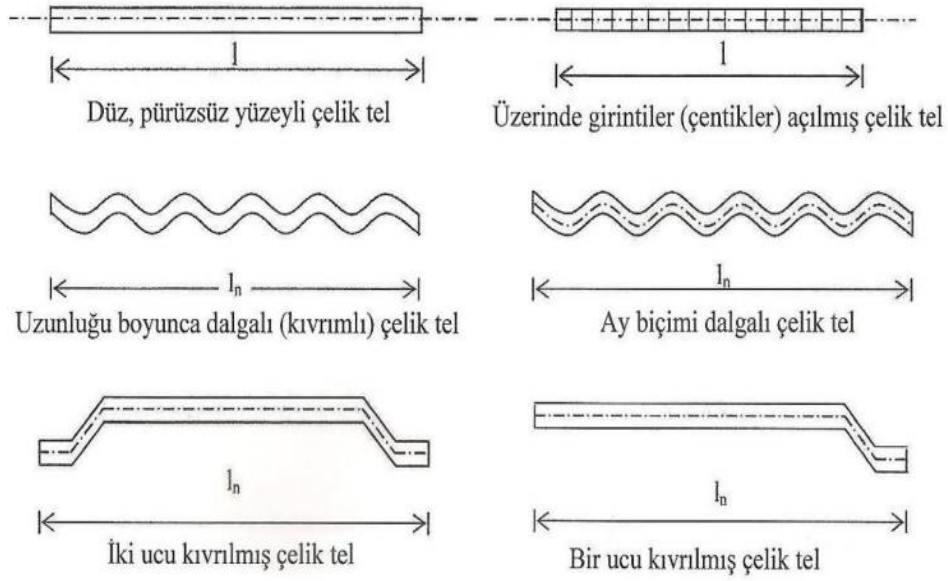
oranlarında beton karışımına eklenmiştir. Liflerin beton içerisindeki etkilerini incelemek amacıyla, su/çimento oranı 0,60–0,63 aralığında tutulmuş beton numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmalar, liflerin ince agrega ile birlikte kullanımının beton performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle %2,6 hacim oranında kullanılan mikro lifler, betonun eğilme mukavemetinde belirgin bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte, %1,3 oranındaki mikro lifler eğilme dayanımında kayda değer bir katkı sunmamış ve tüm oranlarda basınç dayanımı üzerinde anlamlı bir etki gözlemlenmemiştir (Wang vd., 2000: 316).

3.5.2. Çelik Lifler

Çelik lifler, temel olarak düşük karbonlu C 1008 çeliğinden üretilmektedir. Bu lifler, yüksek çekme dayanımına sahip olmalarının yanı sıra, düşük uzama kapasitesi göstermektedir. Standart değerler ışığında, çelik liflerin çekme dayanımı genellikle 1200 Mega Paskal (MPa) civarında iken, elastisite modülü 200 Giga GPa üzerinde ölçülmektedir (Kozak, 2013: 28).

TS 10513'e göre çelik lifler şekillerine göre üç gruba ayrılmıştır. Bunlar Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

- A- Düz, pürüzsüz yüzeyli teller
- B- Bütün uzunluğunca deforme olmuş teller
 - a- Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller
 - b- Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller
 - c- Ay biçimi dalgalı teller
- C- Sonu kancalı teller
 - a- İki ucu kıvrılmış teller
 - b- Bir ucu kıvrılmış teller (TSE, 08 Aralık 1992)



Şekil 3.2. Çelik liflerin şekilleri

Kaynak: (TSE 10513, 1992)

Çelik liflerin beton içerisindeki kullanım oranları lifin şekline beton ile olan performans uyumuna bağlıdır. Bu sebeple çeşitli şekil ve formlarda çelik lif üretilip kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda eğilme performansında, enerji yutma kapasitesinde beton içerisindeki en iyi performansı düz ve ucu kıvrımlı liflerin sağlandığı gözlenmiştir (Topçu & Uğurlu, 2016: 7373).

Kompozit bir malzeme olan çelik lifli beton çelik fiber liflerinin kaba ve ince agrega ile homojen bir şekilde harmanlanması ile meydana gelir. 1960'lı yıllardan beri inşaat sektöründe farklı uygulamalarda kullanılmaya başlayan çelik liflerin statik hesap metotları hala günümüzde geliştirilmeye devam etmektedir. Çelik lifli betonlar endüstriyel saha ve yol betonları gibi doğrudan zemine oturan betonlara birincil donatı olarak verilip milyonlarca metrekare beton dökülmüştür. Betonda meydana gelen çatlakları köprüleyerek gerilmeleri geniş alana aktaran çelik lifler betonu esnek ve çatlak miktarını azaltmış ve yük taşıma miktarını arttırmıştır (Yıldırım, 2002: 5).

Çelik liflerin betonda kullanımı, birçok avantaj sunar. Bunların başında yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek betonun elde edilmesi, donatı korozyonunun önlenmesi ve düzgün beton yüzeyinin sağlanması gelir. Ayrıca, etkin çatlak kontrolü ve donatı işçiliğinde azalma sağlanır. Çelik lifler, betonun basınç dayanımını etkileyebilir; %25 seviyesinde bir artış görülebileceği gibi, bazen dayanım kaybı da yaşanabilir. Bu durum, liflerin betondaki dağılımı ve yönelimi ile doğrudan ilişkilidir. Liflerin yüklenme doğrultusuna dik olması durumunda

basınç gerilmesine etkileri olmazken, paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artışına duyarlıdır. Çelik liflerin kullanımı, betona enerji yutma kapasitesi ve süneklik kazandırır.

Çelik teller, özellikle çatlağın oluşum sonrası davranışında önemli bir rol oynar. Uygun karışım tasarlandığında, çatlak oluşuktan sonra rastgele dağılmış çelik teller köprüleme etkisi yaratarak çatlağın ilerlemesini durdurabilir. Tellerin matristen sıyırılması sırasında çatlak genişlemesi geciktirilip önlenir ve bu süreç fazla enerji gerektirdiğinden, betonun tokluğu artar.

Çelik lifli betonların performansı belirli faktörlerden etkilenir: lif tipi, geometrisi, kullanım oranı, narinlik oranı, dağılımı ve yönelimi. Lifli betonlarda lifler ve agregalar birlikte etkileşim içinde olup bir toklaşma mekanizması oluşturur. Çatlak açıldıkça, liflerin köprüleme özelliği ön plana çıkar ve gerilmeleri taşırlar. Lifler sıyırıldıkça bir miktar enerji sönmümlenir; uçları kancalı olan lifler ise daha fazla enerji sönmümler ve kompozitin tokluğunu artırır. Geleneksel sıkıştırma işlemi görmüş çelik lifli betonlarda basınç yüklemeleri altında süneklik artışı gözlenir. Kompozitin enerji yutma kapasitesindeki artış, ani göçmeleri önlemekte kritik bir role sahiptir. Çelik lifli betonların çekme gerilmeleri altındaki performansı, basınç gerilmeleri altındaki performansa kıyasla daha yüksektir (Yalçın vd., 2007: 354).

Betonda yeterli miktarda çelik lifin varlığı dayanım ve enerji yutma kapasitesini artırır. Lif miktarı ve narinliği, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve tokluk üzerinde önemli etkilere sahiptir. Artan lif miktarı ve narinlik eğilme dayanımını, kırılma enerjisini ve tokluğu belirgin şekilde artırır. Literatürde çelik lifli betonun sünekliğinin yalın betonun sünekliğine göre yaklaşık 50 kat daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Yardımcı, 2007: 55).

3.5.3. Cam Lifler

Cam lifler, silis esaslı inorganik malzemelerden üretilen ve yüksek çekme dayanımı ile öne çıkan lif türleridir. Beton teknolojisinde genellikle alkaliye dayanıklı cam lifler tercih edilmektedir. Standart cam liflerin çimento hamurunun yüksek alkali ortamında dayanım kaybına uğraması nedeniyle, beton uygulamalarında zirkonyum katkılı özel cam lifler geliştirilmiştir (Bentur ve Mindess, 2007: 145).

Cam liflerin çekme dayanımı yaklaşık 1000–1700 MPa arasında değişmekte olup elastisite modülü 70–80 GPa civarındadır. Bu değerler, cam liflerin beton içerisinde yüksek çekme kapasitesi sağlamasına olanak tanır. Cam lifler özellikle ince kesitli elemanlarda, cephe panellerinde, prefabrik eleman üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam lifler beton içerisinde çatlak oluşumunu sınırlandırmakta ve özellikle erken yaş rötre çatlaklarının kontrolünde etkili olmaktadır. Ancak gevrek yapıları nedeniyle süneklik

katkıları çelik liflere kıyasla daha sınırlıdır. Ayrıca uzun süreli dayanım açısından alkali ortama karşı dirençleri, lif tipine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Yalçın vd., 2007: 361).

3.5.4. Karbon Lifler

Karbon lifler, yüksek performanslı kompozit uygulamalarında kullanılan, oldukça yüksek çekme dayanımına ve elastisite modülüne sahip liflerdir. Çekme dayanımları 3000–5000 MPa aralığında, elastisite modülleri ise 200–600 GPa arasında değişebilmektedir. Düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik performansları sayesinde özellikle ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2007: 158).

Beton içerisinde karbon liflerin kullanımı, özellikle yüksek dayanımlı ve özel amaçlı betonlarda görülmektedir. Elektriksel iletkenlik özellikleri sayesinde karbon lifli betonlar kendiliğinden ısınabilen yüzeyler, elektromanyetik koruma gerektiren yapılar ve yapısal sağlık izleme sistemlerinde kullanılabilirlerdir.

Bununla birlikte karbon liflerin yüksek maliyeti, yaygın saha betonlarında kullanımını sınırlandırmaktadır. Ayrıca liflerin beton içerisinde homojen dağılımının sağlanması özel karışım teknikleri gerektirmektedir.

3.5.5. Bazalt Lifler

Bazalt lifler, volkanik kayaların yüksek sıcaklıkta eritilerek lif hâline getirilmesiyle elde edilen inorganik liflerdir. Yüksek çekme dayanımı, kimyasal dayanıklılığı ve çevre dostu yapısı nedeniyle beton teknolojisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Sim vd., 2005: 504). Bazalt liflerin çekme dayanımı yaklaşık 1000–1500 MPa aralığında olup, özellikle agresif çevre koşullarında dayanıklı bir donatı alternatifini sunduğu belirtilmektedir (Dias ve Thaumaturgo, 2005: 52).

3.5.6. Polivinil Alkol (PVA) Lifler

Polivinil alkol (PVA) lifler, yüksek aderans özellikleri ve çatlak kontrolündeki üstün performansları nedeniyle özellikle mühendislik esaslı çimento yaygın biçimde kullanılmaktadır. PVA liflerin çimento matrisi içerisinde çoklu mikro çatlak oluşumunu teşvik ederek betonun gevrek kırılma davranışını sünek bir yapıya dönüştürdüğünü belirtmiştir (Li, 2003: 215). Bu lifler, yüksek çekme dayanımı ve uygun elastisite modülü sayesinde betonun çekme kapasitesini artırmakta ve çatlak ilerlemesini sınırlandırmaktadır.

Literatürde PVA liflerin çekme dayanımının yaklaşık 1200–1600 MPa aralığında olduğu, elastisite modülünün ise 30–40 GPa seviyelerinde bulunduğu ifade edilmektedir (Li,

2003: 216). Bu özellikleri sayesinde PVA lifler, özellikle yüksek performanslı betonlarda çatlak genişliğinin kontrol altına alınmasında etkili bir donatı malzemesi olarak değerlendirilmektedir.

PVA liflerin en belirgin avantajı, çimento hamuru ile güçlü kimyasal bağ kurabilmesidir. Bu durum lif-matris ara yüzey aderansını artırmakta ve liflerin sıyrılmadan önce daha fazla enerji yutmasını sağlamaktadır. Böylece beton içerisinde çoklu ince çatlak mekanizması gelişmekte ve süneklik önemli ölçüde artmaktadır (Li, 2003: 220).

Bununla birlikte, PVA liflerin maliyeti polipropilen ve çelik liflere kıyasla daha yüksektir. Ayrıca liflerin beton içerisinde topaklanma eğilimi göstermesi nedeniyle karışım tasarımında özel katkılar ve dikkatli karıştırma prosedürleri uygulanması gerektiği belirtilmektedir (Yang vd., 2007: 48).

3.5.7. Doğal Lifler

Doğal lifler; jüt, sisal, hindistancevizi, keten ve bambu gibi bitkisel kaynaklardan elde edilen yenilenebilir donatı malzemeleridir. Sürdürülebilirlik açısından düşük karbon ayak izine sahip olmaları nedeniyle çevre dostu beton üretiminde alternatif bir lif türü olarak değerlendirilmektedir (Li vd., 2006: 186). Doğal liflerin beton içerisinde kullanımı, çatlak kontrolünü iyileştirmekte ve darbe dayanımını artırmaktadır.

Yüzeyi modifiye edilmiş hindistancevizi lifleri ile üretilen çimento kompozitlerinde mekanik performansın arttığını ve çatlak oluşumunun sınırlandığını rapor etmiştir (Li vd., 2006: 188). Bununla birlikte doğal liflerin yüksek su emme kapasitesi ve biyolojik bozulmaya açık yapıları, uzun vadeli dayanıklılık açısından önemli sınırlamalar oluşturmaktadır.

Doğal liflerin alkali ortamda bozulmasını önlemek amacıyla kimyasal modifikasyonlar, mineral kaplamalar ve lif yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmakta; bu yöntemlerle beton içerisindeki uzun süreli performansın artırılacağı ifade edilmektedir (Li vd., 2006: 190).

4. LİFLİ BETONLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

4.1. Lifli Betonlarda Taze Beton Özellikleri

Lifli betonlarda yapılan deneylerde lif dozajının artmasının çökme değerinin azalmasına ve-be işlenebilme değerinin, su emme değerinin ve hava miktarının artmasına sebep olmaktadır (Yıldırım, 1994: 18).

Taze betonda lif kullanımının en önemli etkisi işlenebilirlik gelmektedir, bu durum betonun yayılması olarak açıklanmaktadır. Betonda kullanılan lif oranı arttıkça işlenebilirlik düşmektedir. Betonda özel katkıları kullanılarak, su /çimento oranı artırılarak ve kaba agrega oranı azaltılarak işlenebilirlik uygun düzeye getirilebilir. Ayrıca içerisindeki hava miktarı gibi özellikleri değerlendirmek için farklı test metotları kullanılmaktadır.

4.2. Lifli Betonlarda Sertleşmiş Beton Özellikleri

4.2.1. Basınç Dayanımı

Betona eklenen lifler; basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve özellikle süneklik üzerinde belirgin etkiler oluşturur. Ancak basınç yüklemeleri altında lif katkısının etkisi çoğunlukla dayanımı artırmaktan ziyade, betonun göçme anındaki sünek davranışını geliştirmek şeklinde ortaya çıkar. Bu nedenle lifli betonlarda basınç dayanımındaki iyileşme sınırlı olabilir; asıl kazanım, çatlak ilerlemesini geciktiren ve ani göçmeyi engelleyen daha tok bir yapı elde edilmesidir. Yapısal tasarım açısından betonun karakteristik küp dayanımı temel belirleyici olsa da lif katkısının performans artırıcı yönü daha çok çekme davranışı ve kırılma mekaniğine ilişkindir (Bentur ve Mindess, 2007: 145).

Cam, PP ve çeşitli plastik esaslı lifler, taze ve sertleşmiş beton davranışını değiştirirse de bu lif türleri basınç dayanımını belirgin şekilde artırmaz. Bunun nedeni, bu liflerin elastisite modüllerinin beton matrisi ile uyumsuz olması ve basınç yükü altında matrisin yük aktarım mekanizmasına sınırlı katkı sağlamalarıdır. Ayrıca, bu tür liflerin yüksek filament sayısı, matris içinde daha fazla boşluk ve zayıf bölge oluşmasına yol açarak basınç dayanımındaki artışı engelleyebilir. Bununla birlikte, çekme ve eğilme davranışında, çatlak köprüleme etkisi sayesinde önemli iyileşmeler gözlemlenir; enerji yutma kapasitesi ve süneklik belirgin şekilde artar (ACI, Temmuz 2018).

4.2.2. Eğilme Dayanımı

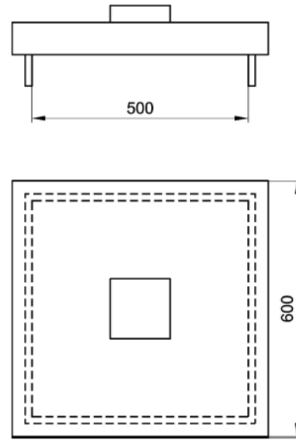
Liflerin beton içerisinde belirli bir dozajda kullanılması, çekme gerilmeleri altında betonun mekanik performansını önemli ölçüde artırır. Lifli betonlar, çekme gerilmeleri karşısında, basınç gerilmelerine kıyasla çok daha yüksek bir dayanım ve enerji yutma kapasitesi sergiler. Yükleme sırasında zemin betonları kısa sürede çatlamaya meyilli olsa da lifler çatlakların her iki ucunu bir köprü gibi birleştirerek betonun taşıma kapasitesini yükseltir ve bu süreçte maksimum enerji yutma kapasitesine ulaşmasını mümkün kılar). Lifli betonların çatlakları köprüleyen ve sınırlandıran bu özelliği lifleri çelik hasırların alternatifi olarak saha betonlarında kullanılabilir hale getirmiştir (Taşdemir vd. 2006: 450).

Çelik tel takviyeli betonlarda kırılma süreci, çatlakların yavaşça ilerleme göstermesi sırasında tellerin beton malzemedeki sıyrılmaya çalışması ile başlar. Nihai göçme ise çatlakların kontrolsüz bir şekilde yayılmasıyla, tellerin tamamen betondan ayrılması ve içsel kayma gerilmelerinin taşıma kapasitesini aşması sonucu meydana gelir. Betonun eğilme dayanımındaki artışın temel nedeni, matris fazında ilk çatlak oluştuğunda, tellerin betona uygulanan yükü tel ile beton arasındaki aderans bölgesindeki çatlamalara kadar taşıyabilmesidir (Gao vd., 1999: 307).

Beton lifleri uyarınca makro sentetik ve çelik lifler artık moment kapasitesini çatlama sonrası sağlamaktadır (TR34- Concrete Industrial Ground Floors, 2013: 20).

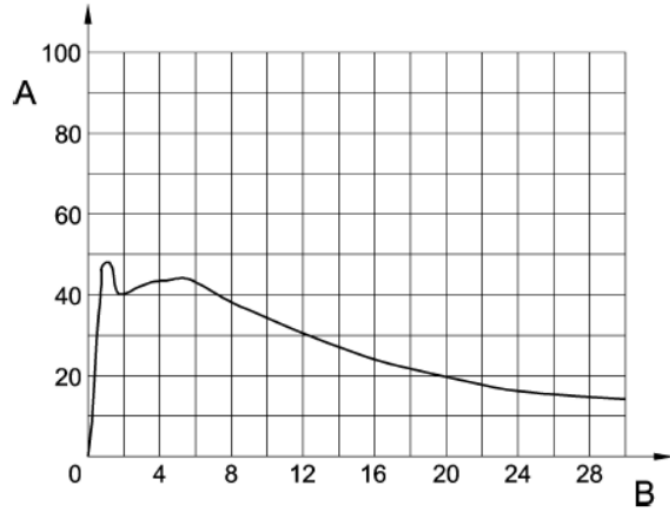
Şekil 4.1.'de dahili yükler için elastik eğilme momentlerinin dağılım şeması görülmektedir.

gününden 3 gün öncesine kadar belirtilen şartlara uygun olarak kür işlemine tabi tutulmalı ve test anına kadar nemli kalacak şekilde korunmalıdır. Test genellikle numunenin hazırlanmasından itibaren 28. günde gerçekleştirilir (TSE, Nisan 2002). Şekil 4.2.'de gösterilen test düzenine göre, deneye alınan plaka numunesi deformasyon kontrollü bir test makinesinde işleme sokulmalıdır. Makine, plakanın merkezine $(1 \pm 0,1)$ mm/dk hızında sabit bir yükleme uygulamalıdır. Deney, plakanın merkezindeki deformasyon miktarı 30 mm'yi aştığında tamamlanır. Yük ve deformasyon verileri, en az 30 mm'lik bir deformasyon elde edilene kadar sürekli olarak veri toplama cihazı ya da XY yazıcı ile kaydedilmelidir. Şekil 4.3.'de görülen enerji grafiği gerçekleşen işi temsil eder ve bu grafik, Şekil 4.4.'de gösterilen yük-deformasyon eğrisine dayanılarak hesaplanır. Yük-deformasyon eğrisi altında yer alan 0 ile 25 mm aralığındaki alanın büyüklüğü joule cinsinden enerji yutma kapasitesini ifade eder.



Şekil 4.2. Deney numunesinin yükleme düzeni

Kaynak: (TS EN 14488-5: 2006-10, 2006:6)



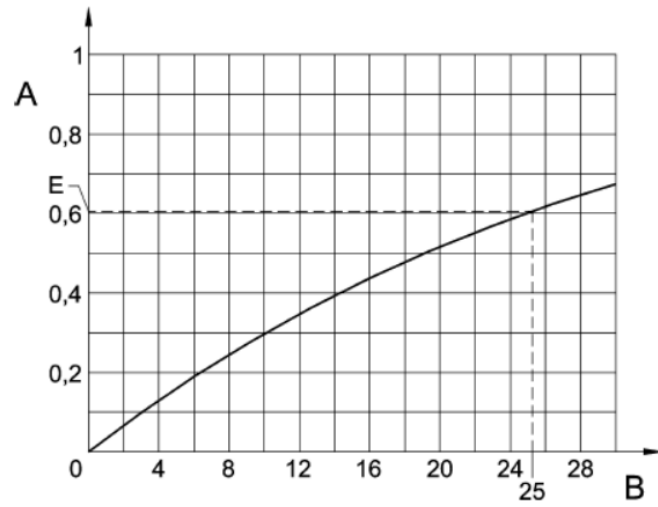
Açıklamalar:

A Yük, kN,

B Merkezdeki sehim, mm,

Şekil 4.3. Yük sehim eğrisi

Kaynak: (TS EN 14488-5: 2006-10, 2006:7)



Açıklamalar:

A Enerji, J (10'),

B Merkezdeki sehim, mm,

E Enerji yutma kapasitesi.

Şekil 4.4. Enerji sehim eğrisi

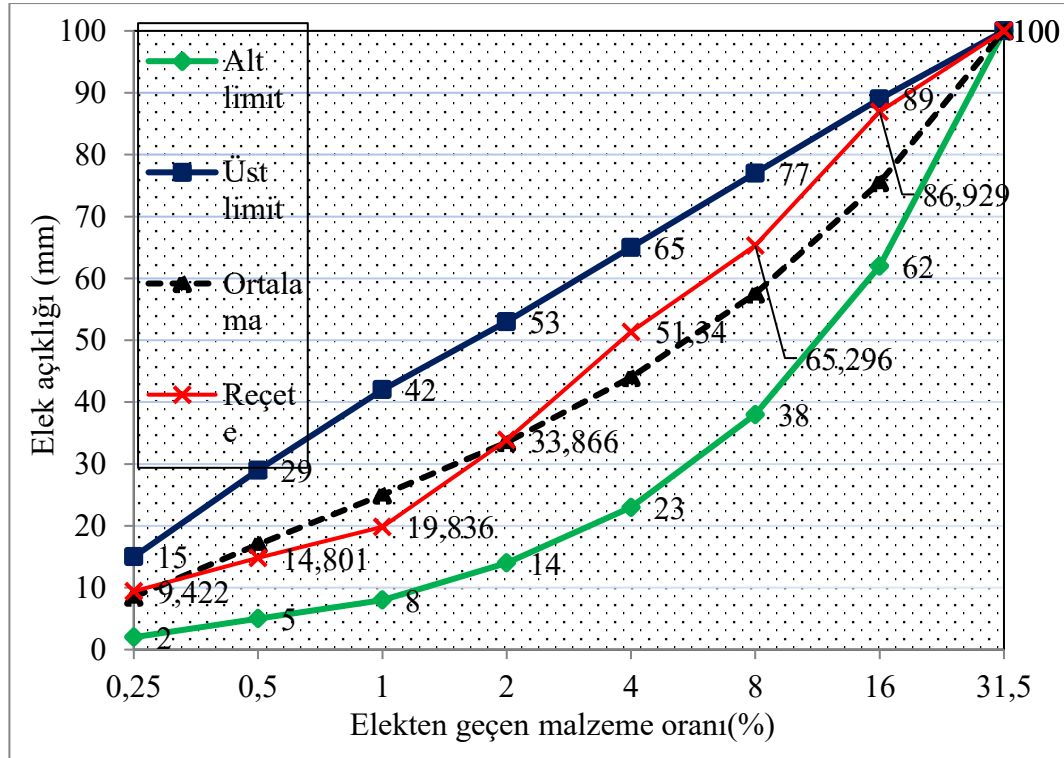
Kaynak: (TS EN 14488-5: 2006-10, 2006:7)

5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1. Agregat

Bu çalışmada kullanılan agregatlar, Bilecik'te bulunan Öz Dağ İş Beton firmasının agregat tesislerinden temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan agregatların granülometri eğrisi Tablo 5.1.'de sunulmuştur. Agregatlar üç farklı fraksiyonda olarak; 0–0.5 mm kırmataş tozu, 4–16 mm doğal çakıl (1 No) ve 16–32 mm kırmataş (2 No) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agregatın maksimum tane çapı 22 mm olarak belirlenmiştir (TSE, Aralık 2003).

Agregatların birim hacim ağırlığı TS 3529'a göre gerçekleştirilmiştir (TSE, Aralık 1980). Özgül ağırlık deneyleri ise TS 3526'ya göre gerçekleştirilmiştir (TSE, Aralık 1980). Gerçekleştirilen her iki deney de agregatların doygun kuru yüzey (DKY) durumunda gerçekleştirilmiştir. Agregata ait diğer fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 5.2.'de sunulmaktadır. Ayrıca granülometri eğrisinin TS 706'da belirtilen sınır değerler içerisinde kaldığı Grafik 6.1.'de gösterilmiştir. Elek analizi sonuçları ise Tablo 5.1.'de ayrıntılı olarak sunulmuştur (TSE 706, Aralık 2003).



Grafik 5.1. Agregatın granülometri eğrisi

Tablo 5.1. Agreganın elek analizi

Elek (mm)	Taş Tozu	1 No	2 No	Karışım
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	56,4	86,9
10	100,0	100,0	0,0	70,0
8	100,0	76,1	0,3	65,3
5,6	100,0	100,0	0,0	70,0
4	99,3	8,3	0,1	51,3
2	67,2	1,1	0,1	33,9
1	39,2	1,0	0,1	19,8
0,5	29,1	1,0	0,1	14,8
0,25	18,4	1,0	0,1	9,4
0,125	11,3	1,0	0,1	5,9
Karışım	50	20	30	100

Tablo 5.2. Agreganın diğer özellikleri

Malzeme	Oran %	Hacim (Dm ³)	Dky Özgül Ağırlık	Ağırlık Kg.
Taş Tozu	50,0	348,4	2,63	916,2
1 No	20,0	139,3	2,69	374,8
2 No	30,0	209,0	2,70	564,3

5.2. Çimento

Çalışmada kullanılan çimentolar, Çimsa Izo Power 42.5 (CEM II/A-M (P-Q) 42.5 R) türü Portland kompoze çimentodur. EN 197-1:2011 standardına göre bu çimento; Portland çimentosu klinkeri, puzolan, doğal olarak kalsine edilmiş kil ve alçıtaşından oluşmaktadır. Çimentoya ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 5.3'te, kimyasal özellikler ise Tablo 5.4'te sunulmaktadır. Yoğunluk g/ cm³ birimi olarak verilmiştir.

Tablo 5.3. Çimsa Izo Power 42.5 Çimento fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	Değerleri	Minimum	Maksimum
Özgül Ağırlık	3,07 g/cm ³	-	-
Özgül Yüzey	4200-4400 cm ² /g	-	-
Priz Başlangıcı	160-180 dk	60	-
Priz Sonu	210-230 dk	-	-
Su	%27,0-28,0	-	-
Hacim Sabitliği	1,0 mm	-	10
0,045 mm Elekte Kalıntı	%1,5-3,0	-	-
2 Günlük Basınç Dayanımı	25-27 MPa	20	-
28 Günlük Basınç Dayanımı	50-52 MPa	42,5	62,5

Kaynak: (Çimsa Izo Power 42,5 Teknik Veri Sayfası, 2024:1)

Tablo 5.4. Çimsa Izo Power 42.5 Çimento kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler (Ağırlıkça %)
Çözünmeyen Kalıntı	6,0-9,0
SiO ₂	22,0 – 23,0
Al ₂ O ₃	5,0 – 6,0
Fe ₂ O ₃	2,5 – 3,0
CaO	57,0 – 60,0
MgO	1,7-2,0
SO ₃	3,20 – 3,60
Kızdırma Kaybı	3,0 – 4,5
Na ₂ O	0,2 – 0,4
K ₂ O	0,5 – 0,7
Cl	0,02 – 0,05

Kaynak: (Çimsa Izo Power 42,5 Teknik Veri Sayfası, 2024:1)

5.3. Polipropilen Lif

Deneylerde kullanılan saf PP den üretilmiş malzemenin karakteristik özellikleri Tablo 5.5.'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Polipropilen lifin karakteristik özellikleri

Bileşim	Saf Polipropilen
Tip	Makro Sentetik Fiber Kıvrık Form
Uzunluklar	Standart 54 Mm
Boy/En Oranı	112
Renk	Beyaz veya Gri
Özgül Ağırlık	0.91gr / Cm ³
Emod	8.5 GPa
σ	600-650 MPa
Fiber Sayısı	100000+/Kg
Korozyon	Yok
Emilim	Emilimsiz
Manyetizma	Antimanyetik
Erime Noktası	165° C
Yanma Noktası	>360° C

Kaynak: (Polyfibers Teknik Veri Sayfası, 2025: 2)

5.4. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Beton üretiminde kullanılan FloorGrade® S 37 yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı olup, betona yüksek düzeyde akışkanlık kazandıran veya aynı akışkanlık seviyesinin daha düşük su kullanılarak elde edilmesini sağlayan, böylece beton dayanımını belirgin biçimde artıran yüksek performanslı bir su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcıdır. Ürün, betonun erken yaş dayanımını yükseltmek ve kıvam koruma özelliklerini geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Özellikle soğuk hava koşullarında yüksek erken dayanım sağlamak üzere formüle edilen FloorGrade® S 37, modifiye edilmiş sentetik karboksilat polimeri esaslı olup kontrollü üretim süreçleri sayesinde stabil bir ürün olarak sunulmaktadır. Katkı, kalsiyum klorür içermemekte ve beton karışımında %1 oranında kullanılmaktadır (TSE, Ocak 2004). Katkının temel özellikleri Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. FloorGrade® S 37 yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı özellikleri

Teknik Özellik	Açıklama
Renk	Kahverengi
Yoğunluk (20°C)	1,050 ± 0,020 G/Cm ³
Potansiyel Hidrojen 20°	5,0 ± 1,5
Toplam Klor Miktarı:	<0,10 M.-%
Önerilen Dozaj	%0,5-2,0

Kaynak: (FloorGrade® S 37 Teknik Veri Sayfası, 2025: 2)

5.5. Karışım Miktarları

Çalışmada kullanılan beton, C30/37 dayanım sınıfındadır. Hesaplamalarda esas alınan çökme değeri, karışımın lif içermesi nedeniyle yüksek tutulmuş ve yalın beton için 20 cm olarak belirlenmiştir. Karışım bileşenlerinde su/çimento oranı 0,55 tutulmuş olup karışımda kullanılan değerler Tablo 5.7.'de verilmiştir. Karışımda PP lifler ise 2 kg/m³ ve 3 kg/m³ dozajlarında uygulanmıştır. Üretim sürecinde kullanılan PP lifler, saf PP'nin yanı sıra %5, %10 ve %15 RPP lif türlerini de kapsamaktadır.

Tablo 5.7. Çalışmada kullanılan içeriklerin miktarları

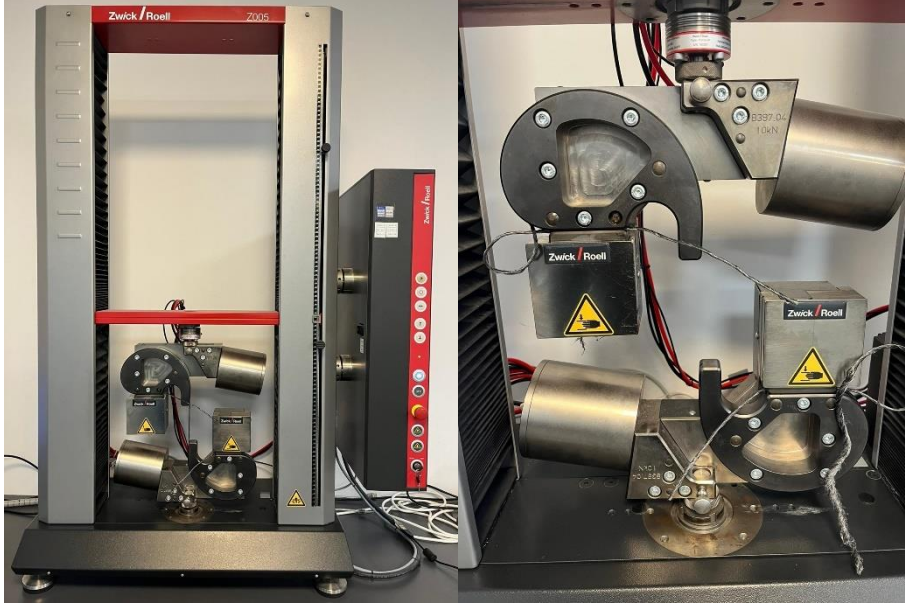
Numune Adı	Çimento	Taş Tozu (0-4 mm)	1 No Agrega (4-11 mm)	2No Agrega (11-22 mm)	Süper Akışkanlaştırıcı (Kg)	PP (Kg)	RPP (Kg)
R	320	916,2	374,8	564,3	3,2	-	-
F0-2	320	916,2	374,8	564,3	3,2	2,00	0
F0-3	320	916,2	374,8	564,3	3,2	3,00	0
F5-2	320	916,2	374,8	564,3	3,2	1,90	0,10
F5-3	320	916,2	374,8	564,3	3,2	2,85	0,15
F10-2	320	916,2	374,8	564,3	3,2	1,80	0,20
F10-3	320	916,2	374,8	564,3	3,2	2,70	0,30
F15-2	320	916,2	374,8	564,3	3,2	1,70	0,30
F15-3	320	916,2	374,8	564,3	3,2	2,55	0,45

6. DENEYLER VE BULGULAR

6.1. Polipropilen İplik Üzerinde Yapılan Deneyler

6.1.1. ISO 2062 Standardına Göre Çekme Deneyi

Bu deney, ipliklerin çekme özelliklerini kopma mukavemeti, kopma uzaması ve gerilme davranışı belirlemek amacıyla, ISO 2062:2009 standardında tanımlanan CRE yöntemine uygun olarak Zwick Roell cihazı Şekil 6.1.'deki gibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. ISO 2062:2009 standardı CRE yöntemine göre iplik çekme deneyi

Bu deneyin temel amacı, PP ipliklerin mekanik performansını değerlendirerek beton ve kompozit malzemelerdeki davranışlarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda, belirli bir ölçüde hazırlanmış iplik numunesi, sabit uzama hızına sahip bir çekme test cihazına yerleştirilmiş ve kopma anına kadar yük uygulanarak numunenin gerilme–uzama tepkisi kaydedilmiştir. Test sırasında yük–uzama verileri sürekli olarak izlenmiş, kopma anındaki maksimum taşıma kapasitesi ile kopma uzaması belirlenmiştir. Ayrıca elastisite modülü ve maksimum yük değerleri, cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Deney prosedürü, ISO 2062:2009 standardında tarif edilen CRE yöntemine uygun şekilde ve Zwick Roell çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (ISO, 01 Aralık 2009).

Deneyin amacı PP ipliğın mekanik dayanım özelliklerini belirleyerek, liflerin beton veya kompozit yapılarıdaki performansını değerlendirmektir. Deneyde belirli bir uzunluktaki iplik numunesi, sabit uzama hızına sahip bir çekme cihazına yerleştirilir. Numune, kopma noktasına kadar uzatılarak ipliğın kopma mukavemeti ve kopma uzaması değerleri ölçülür. Test

yapılırken standarda uygun ölçüde yerleştirilen iplik uygun uzama hızında çekilerek iplik kopuncaya kadar yük-uzama verileri kayıt edilir. Kopma anındaki maksimum yük ve elastisite modülü makineden otomatik olarak alınır (ISO, 01 Aralık 2009).

Bu çalışmam Polyfibers iplik laboratuvarında yapılmış olup, saf PP (F-0) üretilen iplikler, %5 (F-5), %10 (F-10) ve %15 (F-15) oranlarında geri dönüşüm granülü ilavesiyle üretilen ipliklerin çekme dayanımı ve elastisite modülü ISO 2062 standardına göre yapılan testler ile belirlenmiştir.

Tablo 7.1'de sunulan bulgulara göre F-0 ipliği, ortalama 650 MPa çekme dayanımı ve 8.5 GPa elastisite modülü göstermiştir. Tablo 7.2'de yer alan sonuçlarda ise F-5 numunesinin çekme dayanımı 630 MPa, elastisite modülü ise 8.2 GPa olarak ölçülmüştür. Tablo 7.3'te verilen F-10 numunesi için bu değerler sırasıyla 600 MPa ve 8 GPa'dır. Son olarak, Tablo 7.4'e göre F-15 numunesinin çekme dayanımı 590 MPa, elastisite modülü ise 7.9 GPa olarak belirlenmiştir. ISO 2062 standardına göre gerçekleştirilen bu testlerden elde edilen çekme dayanımları Grafik 7.1'de, elastisite modülleri ise Grafik 7.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, geri dönüşüm oranı arttıkça malzemenin mekanik performansında belirgin bir düşüş meydana geldiğini göstermektedir. Bu azalma, geri dönüşüm sürecinin polipropilen zincir yapısında bozulmaya neden olması, zincir uzunluklarının kısılması ve kristal yapının azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Böylece liflerin çekme dayanımı ve rijitliği geri dönüşüm oranı ile ters orantılı olarak düşmektedir.

Tablo 6.1., Tablo 6.2., Tablo 6.3. ve Tablo 6.4. de PP iplik numuneleri üzerinde ISO 2062:2009 standardına göre gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mekanik değerleri Grafik 6.1'de çekme dayanımları, elastisite modülleri ise Grafik 6.2'de verilmektedir.

ISO 2062 standardına uygun olarak gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda elde edilen veriler, geri dönüşüm granülü ilavesinin PP ipliklerin mekanik performansı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. PP'den üretilen F-0 serisi iplikler, tüm deney grupları içerisinde en yüksek ortalama çekme dayanımı (σ) ve elastisite modülü (Emod) değerlerini sergilemiştir. Bu durum, saf polimer matrisinin daha homojen bir moleküler yapı sunması ve üretim sürecinde polimer zincir uzunluklarının korunması ile ilişkilendirilmektedir (Karger-Kocsis, 2019: 35). Ayrıca F-0 serisinde gözlenen düşük varyasyon katsayıları, üretim sürecinin kararlı olduğunu ve ölçümlerin yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.











F-5 serisi ipliklerde, σ ve Emod saf PP' ye kıyasla sınırlı bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Ancak bu düşüşün, mekanik performans açısından kritik seviyelere ulaşmadığı ve ipliklerin yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde koruduğu tespit edilmiştir. Literatürde, düşük oranlarda geri dönüştürülmüş PP ilavesinin polimer zincir sürekliliğini tamamen bozmadığı ve yük aktarım mekanizmasının etkin şekilde devam ettiği belirtilmektedir (Vilaplana ve Karlsson, 2008: 33). Bu bağlamda, F-5 serisi ipliklerin süreklilik karakterini büyük ölçüde koruduğu ve sürdürülebilirlik açısından avantajlı bir alternatif sunduğu söylenebilir.

F-10 serisi ipliklerde ise σ ve Emod' da ki azalma daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş PP granüllerinde moleküler ağırlık dağılımının genişlemesi, zincir kısalması ve önceki kullanım döngülerine bağlı termal ve oksidatif bozulmalar ile açıklanmaktadır (Al-Salem vd., 2009: 2625). Bununla birlikte, F-10 serisinde elde edilen mekanik değerlerin tamamen işlevsiz bir davranışa işaret etmediği, ancak yüksek performans gerektiren uygulamalarda dikkatli değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

F-15 serisi ipliklerde ise mekanik performanstaki düşüşün daha belirgin olduğu görülmektedir. σ ve Emod değerleri tüm seriler arasında en düşük seviyelerde ölçülmüş; buna ek olarak standart sapma ve varyasyon katsayılarında artış gözlenmiştir. Bu durum, yüksek geri dönüşüm oranlarında malzeme homojenliğinin azaldığını ve mikro yapıda zayıf ara yüzey bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir (Kumar vd., 2011: 899). Literatürde de yüksek oranlı geri dönüştürülmüş PP kullanımının, rijitlik kaybı ve erken hasar oluşumu riskini artırdığı vurgulanmaktadır (Hopewell vd., 2009: 2115).

Seriler arası genel değerlendirme yapıldığında, geri dönüşüm granülü oranı arttıkça σ ve Emod de kademeli ve sistematik bir azalma eğilimi olduğu açıkça görülmektedir. Bu eğilim, geri dönüştürülmüş PP esaslı lif ve iplikler üzerinde yapılan önceki çalışmalarla uyumludur (Vilaplana ve Karlsson, 2008: 116). Özellikle %5 geri dönüşüm oranının, çevresel sürdürülebilirlik kazanımı sağlarken mekanik performans üzerinde sınırlı bir olumsuz etki yarattığı; buna karşılık %10 ve %15 oranlarında performans kayıplarının daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.











Tablo 6.1. F-0 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre mekanik sonuçları

Legend	No.	F _{max} N N	F _{max} kg kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{Test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
	1	2560	260,79	8,69	643,37	10,6	30000	11,10	9,40	8,39
	2	2510	255,69	8,52	654,18	10,5	30000	10,99	9,34	8,44
	3	2510	256,43	8,55	635,19	10,3	30000	10,90	9,66	8,29
	4	2520	256,59	8,55	639,45	10,8	30000	11,25	9,13	8,35
	5	2530	257,64	8,59	664,33	10,8	30000	11,25	9,29	8,69
	6	2500	255,26	8,51	645,70	10,5	30000	10,99	9,45	8,44
	7	2480	252,69	8,42	65382	10,5	30000	10,97	9,03	8,57
	8	2500	255,14	8,50	665,24	10,4	30000	10,94	9,10	8,64
	9	2520	256,60	8,55	643,11	10,6	30000	11,09	9,26	8,43
	10	2550	259,80	8,66	655,40	10,7	30000	11,24	9,17	8,57

Statistics:

Series	F _{max} N N	F _{max} kg kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{Test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
n = 10									
\bar{x}	2520	256,66	8,56	649,98	10,6	30000	11,07	9,28	8,48
s	22,8	2,33	0,08	6,24	0,2	0,000	0,13	0,189	0,17
V [%]	0,91	0,91	0,91	0,91	1,51	0,00	1,22	2,03	2,05











Tablo 6.2. F-5 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre mekanik sonuçları

Legend	No.	F _{max} N N	F _{max} kg kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{Test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
	1	2510	255,69	8,52	635,44	10,5	30000	10,99	9,25	8,23
	2	2520	256,59	8,55	623,72	10,8	30000	11,25	9,04	8,21
	3	2530	257,64	8,59	645,40	10,8	30000	11,25	9,20	8,42
	4	2500	255,26	8,51	618,74	10,5	30000	10,99	9,35	8,14
	5	2480	252,69	8,42	635,93	10,5	30000	10,97	8,94	8,20
	6	2500	255,14	8,50	639,19	10,4	30000	10,94	9,01	8,35
	7	2520	256,60	8,55	640,54	10,6	30000	11,09	9,16	8,31
	8	2550	259,80	8,66	627,27	10,7	30000	11,24	9,08	8,24
	9	2460	250,89	8,36	632,43	10,3	30000	10,91	8,99	8,23
	10	2500	255,39	8,51	619,11	10,5	30000	11,03	8,90	8,21

Statistics:

Series	F _{max} N N	F _{max} kg kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{Test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
n = 10									
\bar{x}	2510	255,57	8,52	631,77	10,6	30000	11,07	9,09	8,25
s	24,2	2,47	0,08	6,54	0,2	0,000	0,13	0,146	0,11
V [%]	0,97	0,97	0,97	0,97	1,51	0,00	1,21	1,61	1,37











Tablo 6.3. F-10 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre mekanik sonuçları

Legend	No.	F _{maxN} N	F _{maxkg} kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
	1	2210	225,30	7,51	614,24	9,9	30000	10,25	8,25	8,37
	2	2180	221,80	7,39	597,18	9,5	30000	9,89	8,40	7,84
	3	2190	223,19	7,44	601,47	9,9	30000	10,30	7,86	8,07
	4	2230	227,08	7,57	621,14	9,8	30000	10,25	8,38	8,24
	5	2190	223,16	7,44	604,84	9,7	30000	10,22	8,33	8,19
	6	2220	226,42	7,55	589,70	10,0	30000	10,40	7,95	7,74
	7	2180	222,03	7,40	609,81	9,8	30000	10,18	8,09	8,13
	8	2210	225,37	7,51	603,44	10,1	30000	10,47	7,99	8,10
	9	2180	222,05	7,40	593,15	9,8	30000	10,22	7,89	7,85
	10	2180	222,23	7,41	610,16	10,0	30000	10,39	7,83	8,39

Statistics:

Series	F _{maxN} N	F _{maxkg} kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
n = 10	2200	223,86	7,46	604,51	9,8	30000	10,26	8,10	8,09
\bar{x}	2200	223,86	7,46	604,51	9,8	30000	10,26	8,10	8,09
s	19,5	1,99	0,07	5,42	0,2	0,000	0,16	0,225	0,17
V [%]	0,89	0,89	0,89	0,89	1,82	0,00	1,55	2,78	2,16

Tablo 6.4. F-15 iplik numunelerinin ISO 2062 standardına göre mekanik sonuçları

Legend	No.	F _{maxN} N	F _{maxkg} kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
	1	2180	221,80	7,39	594,31	9,5	30000	9,89	8,26	7,21
	2	2190	223,19	7,44	603,16	9,9	30000	10,30	7,73	8,17
	3	2190	223,16	7,44	585,17	9,7	30000	10,22	8,20	7,43
	4	2170	220,93	7,36	594,44	9,7	30000	10,09	7,95	7,57
	5	2220	226,42	7,55	603,81	10,0	30000	10,40	7,82	8,11
	6	2180	222,03	7,40	601,77	9,8	30000	10,18	7,95	8,27
	7	2210	225,37	7,51	597,11	10,1	30000	10,47	7,85	7,82
	8	2180	222,05	7,40	590,82	9,8	30000	10,22	7,76	8,19
	9	2180	222,23	7,41	596,34	10,0	30000	10,39	7,69	7,97
	10	2160	220,59	7,35	602,57	9,9	30000	10,25	7,73	8,02

Statistics:

Series	F _{maxN} N	F _{maxkg} kg	σ _{g/den} g/den	σ _{MPa} MPa	dL at F _{max} %	Titer den	t _{test} s	E _{mod} GPa	E _{mod} (%10-%30F _{max}) GPa
n = 10	2180	222,78	7,43	596,95	9,8	30000	10,24	7,89	7,87
\bar{x}	2180	222,78	7,43	596,95	9,8	30000	10,24	7,89	7,87
s	18,1	1,85	0,06	4,95	0,2	0,000	0,17	0,198	0,14
V [%]	0,83	0,83	0,83	0,83	1,89	0,00	1,64	2,51	1,78

Tablolarda verilen değerler ve açıklamaları aşağıdaki gibidir;

F_{max(N)}: Numunenin kopma anında taşıdığı maksimum kuvvetin Newton (N) cinsinden değeridir. Bu parametre, ipliğin kopmaya karşı gösterdiği direnci ifade eder.

F_{max(kg)}: Kopma anındaki maksimum kuvvetin kilogram-kuvvet (kgf) cinsinden karşılığıdır. Newton değerinin kgf birimine dönüştürülmesiyle elde edilir ve pratik karşılaştırmalar için kullanılır.

$\sigma_{g/den}$: İpliğin kopma gerilmesinin gram/denye cinsinden ifadesidir. Denye başına düşen yük miktarını gösterir ve özellikle tekstil liflerinin mukayese edilmesinde kullanılır.

σ_{MPa} : İpliğin gerilme dayanımı olup, kopma anında birim alana düşen gerilmenin MPa cinsinden değeridir. Lifin gerçek mukavemetini temsil eden temel mekanik parametredir.

$d_{LatFmax}$: Kopma yükündeki uzama miktarının yüzde cinsinden değeridir. Numunenin kopmadan önce ne kadar şekil değiştirdiğini gösterir ve ipliğin sünekliğini değerlendirmede kullanılır.

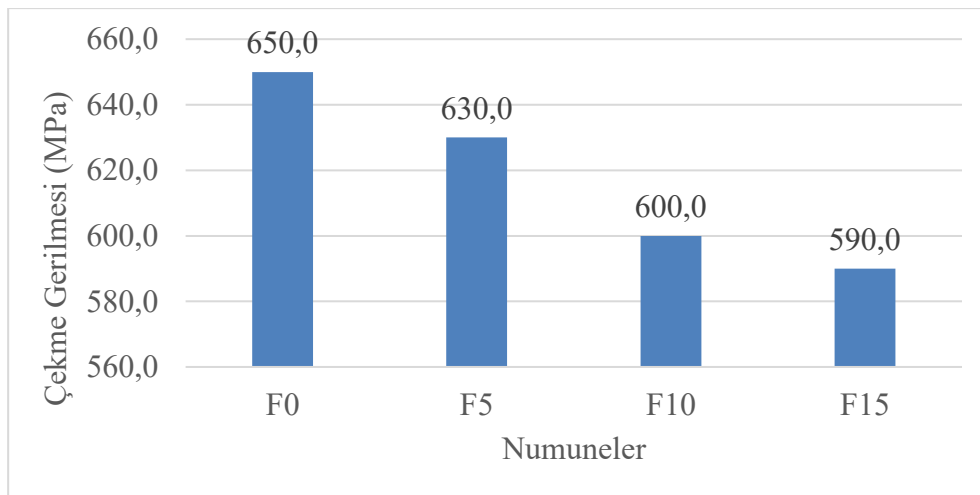
Titer: İpliğin inceliğini ifade eden denye değeridir. Denye, 9000 metrelik lifin gram cinsinden kütesidir. Numunenin geometrik karakteristiğini belirtir.

T_{test} : Test süresini saniye cinsinden ifade eder. CRE yönteminde sabit uzama hızına göre uzama zamanı kaydedilir.

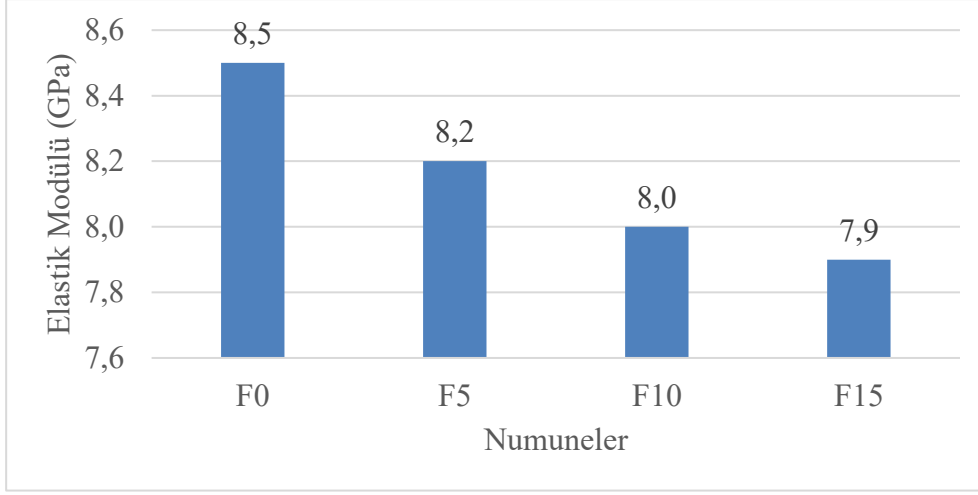
Emod: İpliğin elastisite modülü olup GPa cinsinden değeridir. Malzemenin elastik davranıştan sorumlu parametresi olup rijitliği gösterir.

$Emod(\%10-\%30F_{max})$: Elastisite modülünün sadece çekme eğrisinin %10 ile %30 yük bölgesi arasında hesaplanan değeridir. Bu bölge, ipliğin lineer elastik davranışının daha kararlı olduğu aralık kabul edildiği için tercih edilir.

Tablonun alt bölümünde verilen istatistiksel değerler; x (ortalama), s (standart sapma), V [%] (değişim katsayısı) gibi parametrelerden oluşmakta olup, test sonuçlarının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini göstermektedir.



Grafik 6.1. İplik numuneleri ve çekme gerilmeleri



Grafik 6.2. İplik numuneleri ve elastisite modülleri

ISO 2062 standardına göre yapılan testlerden Grafik 7.1. ve Grafik 7.2. de elde edilen mekanik değerler geri dönüşüm oranı arttıkça hem çekme dayanımında hem de elastisite modülünde belirgin bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Bu azalmanın sebebi kullanılmış geri dönüşüm granüllerinin ikinci kez ısıl işlem görmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu düşüş, %5 geri dönüşüm oranına kadar sınırlı düzeydedir. F-05 numunenin kullanımının ipliğin mekanik özelliklerindeki bu azalmanın kabul edilebilir sınır değerde olması ile birlik de PP atıklarının yeniden değerlendirilmesiyle çevresel açıdan sürdürülebilir iplik üretiminin mümkün olduğunu göstermektedir.

6.2. Beton Üzerinde Yapılan Deneyler

6.2.1. Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri taze birim hacim ağırlığı (TBHA), hava içeriğinin belirlenmesi ve yayılma deneyleridir.

6.2.1.1. Taze Birim Hacim Ağırlığı (TBHA) ve Hava İçeriğinin Belirlenmesi

TBHA ve hava içeriğini belirlemek amacıyla hazırlanan numuneler, 8 desimetre küp (dm^3) hacimli birim ağırlık kabı ve 5 gram hassasiyetli laboratuvar terazisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Numune, kap içerisine üç tabaka hâlinde yerleştirilmiş; her tabaka yerleştirilirken beton kendi ağırlığıyla sıkışacak şekilde 25 kez şişleme işlemi uygulanmıştır. Üst tabaka tamamlandıktan sonra yüzey mala ile düzeltilmiştir. Hava içeriğinin belirlenmesi için numune hava ölçer kabına aktarılmış, cihazın iki karşılıklı vanası açılarak su ile doldurulmuş ve karşı vanadan su çıkışı görüldüğünde vanalar kapatılmıştır. Basınç dengelendiğinde hava içeriği ölçümü gerçekleştirilmiştir (ASTM, 01 Haziran 2022). Deneyde

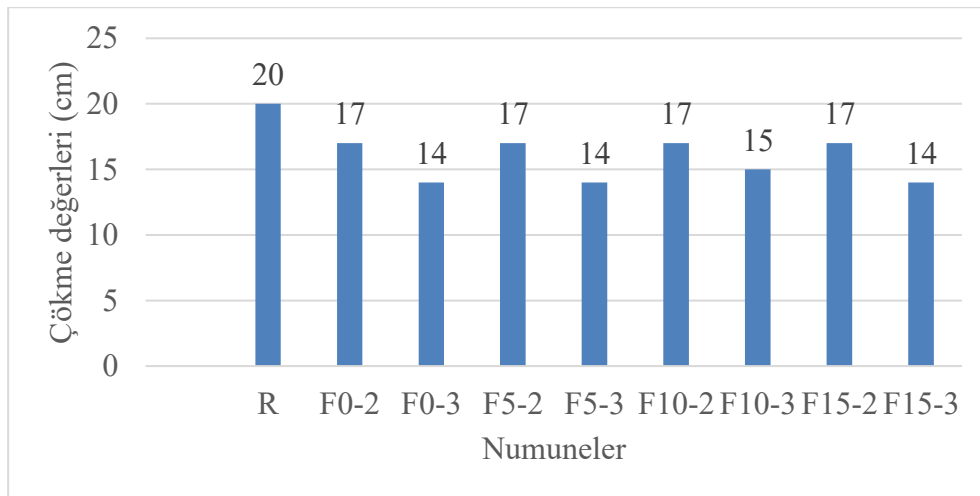
kullanılan birim hacim kabı ile hava ölçer Şekil 6.2.'de gösterilmektedir. Tüm deneysel işlemler Polyfibers fabrikasının beton laboratuvarında yürütülmüştür. Literatürde de benzer yöntemlerin taze betonun birim ağırlık ve hava miktarının doğru biçimde belirlenmesinde yaygın olarak kullanıldığı ifade edilmektedir.



Şekil 6.2. Birim ağırlık kabı ve hava ölçer

6.2.1.2. Çökme Deneyi

R, F0-2, F0-3, F5-2, F5-3, F10-2, F10-3, F15-2, F15-3 serilerinin çökme deneyi ile tayini yapılmıştır. Çökme deneyinde Grafik 6.3.'de görüldüğü gibi R betonda ölçülen değer 20 cm iken 2 kg/m³ dozajda bu değer 17 cm, 3 kg/m³ dozajda ise 15 cm olarak ölçülmüştür. Çökme değerindeki bu düşüşün sebebi liflerin betonu bir arada tutarak yalın betondan daha düşük çökme vermesidir. Bu durum TS EN 12350-2 standardına uygun olarak yapılan çökme deneyi Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.'teki resimlerde görüldüğü gibi ölçülmüştür (TSE, 30 Eylül 2019).



Grafik 6.3. Referans ve numune betonların çökme değerleri



Şekil 6.3. Yalın betonun çökme değerlerinin belirlenmesi



Şekil 6.4. R ve numune betonunun çökme değerlerinin belirlenmesi

6.2.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

6.2.2.1. Beton Basınç Dayanımı

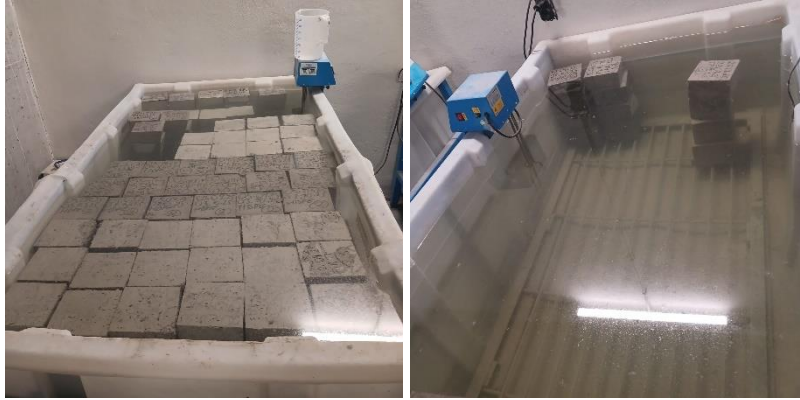
Betonun basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına uygun olacak şekilde 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp numuneler her seriden dörder adet alınmıştır.

Beton numuneler standart metal mikser içerisinde hazırlanmış olup dökümden önce su emmez ve sızdırmaz kalıplar yağlanmıştır. Hazırlanan numuneler kalıba üç kademe dökülmüş olup her kademe Şekil 6.5.'deki gibi 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Kalıp tam doldurulduğunda betonda boşluk kalmaması vibrasyon masasında titreştirilmiştir. Vibrasyondan sonra kalıbın yüzeyi betonla doldurulup yüzeyi çelik mala ile düzeltilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplarından çıkarılmış ve Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi kür havuzuna

bırakılmıştır. 28 günün sonunda çıkartılan numuneler Şekil 6.7.'de görüldüğü gibi beton pres cihazında kırılarak basınç dayanımları ölçülmüştür (TSE, 30 Eylül 2019).



Şekil 6.5. R ve numune betonlardan küp numune alınması



Şekil 6.6. Küp numunelerin kürlenmesi



Şekil 6.7. Tek eksenli beton basınç dayanım deneyi

6.2.2.2. Eğilme Dayanımı

TS EN 14845-2 standardı kapsamında, lif ilavesi yapılmış taze betondan üretilen çentiklenmiş kiriş numunelerinin mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla ($550 \times 150 \times 150$ mm) prizmatik numune hazırlanmıştır. Bu numuneler, 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından, metalik lifli betonlar için kabul görmüş eğilme çekme deney prosedürü olan TS EN 14651 standardına uygun şekilde teste tabi tutulmuştur (TSE, Aralık 2006).

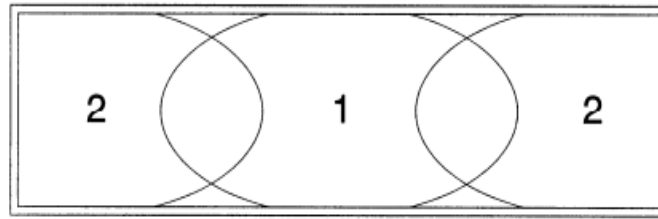
Deney düzeneğinde, çentikli kirişler 500 mm açıklığa sahip iki mesnet üzerine oturtulmuş olup yükleme, standartta tanımlandığı şekilde numunenin tam orta noktasından uygulanmıştır. Böylece üç noktalı yükleme prensibine göre lifli betonun çatlama davranışı ve artık eğilme çekme dayanımları belirlenmiştir.

TS EN 14651 standardı, lif katkılı betonun eğilme çekme dayanımını belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir test yöntemini tanımlamaktadır. Bu yöntem, hem orantılılık sınırı (LOP) hem de bir dizi artık eğilme gerilme dayanımı değerinin tayin edilmesini mümkün kılmaktadır. Test prosedürü, uzunluğu 60 mm'yi aşmayan liflerin değerlendirilmesine yönelik tasarlanmıştır. Bununla birlikte, farklı türdeki liflerin kombinasyonu ve metalik liflerin diğer liflerle birleştirildiği durumlarda da uygulanabilir niteliktedir. Lifli betonun çekme dayanımı, yük-çatlak ağız açıklığı yer değiştirme eğrisi veya basit olarak desteklenmiş ve çentikli prizma test numunesi üzerine uygulanan merkezi nokta yükü ile oluşturulan yük-sehim eğrisi üzerinden hesaplanan artık eğilme çekme dayanımları ışığında değerlendirilir. Bu standart kapsamında kullanılan cihazlar, Şekil 6.8.'de gösterildiği üzere belirli teknik gerekliliklere uygun olarak

deneyinin stabilitesini değerlendirmek için bir kontrol yöntemi de sunmaktadır. Deneysel program kapsamında gerçekleştirilen serilere ait eğilme testlerinden elde edilen CMOD verileri kullanılarak, uygulanan testin stabilitesi bu standart çerçevesinde kontrol edilmiştir. İlk olarak, EN 14651:2005 standardının genel içeriği kısaca tanıtılmıştır. Ardından, tez çalışmasının deneysel bölümünden elde edilen yük-CMOD verileri temel alınarak serilerin LOP çekme dayanımı ile 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve 3,5 mm çatlak ağız açıklığı deplasmanlarındaki kalan eğilme dayanımları hesaplanmıştır (TSE, 31 Mart 2008).

- **Test Numunelerinin Alınışı ve Kürleme**

Test numuneleri, nominal boyutları 150 mm genişlik ve derinlik, uzunluğu ise 550 mm ile 700 mm arasında değişen uygun prizmatik şekillerden oluşmalıdır. Bu boyut ve şekil, maksimum agrega boyutunun 32 mm'yi aşmadığı ve liflerin uzunluğunun 60 mm'yi geçmediği durumlar için uygundur. Numunelerin hazırlanması sürecinde, kalıbın doldurulma prosedürü Şekil 6.9.'da detaylı bir şekilde belirtilmiş olup, birinci bölmenin hacmi ikinci bölmenin hacminin iki katı olacak şekilde düzenlenmelidir. Kalıp doldurulurken test numunesinin toplam yüksekliğinin yaklaşık %90'ına kadar malzeme konulmalı ve ardından sıkıştırılmalıdır. Bu işlem sırasında, malzeme düzleştirilip sıkıştırma işlemi harici titreşim yöntemiyle gerçekleştirilmelidir. Ancak, kendiliğinden yerleşen beton kullanılması durumunda, kalıp sıkıştırma işlemi yapılmaksızın doğrudan doldurulmalı ve üst yüzeyi düzeltilmelidir (TSE, 31 Mayıs 2008).



Şekil 6.9. Kalıp doldurma prosedürü

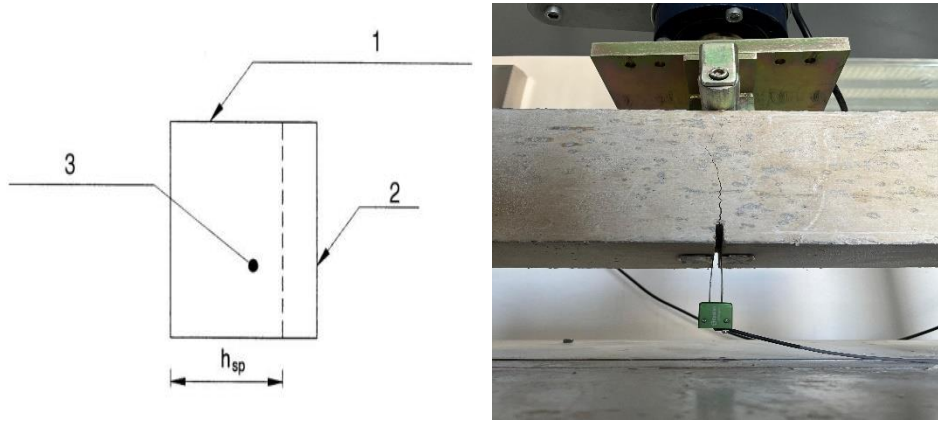
Kaynak: (TS EN 14651, 2008: 7)

Fiberli beton numunesi alma tarihi ve zamanı kaydedilmelidir. Fiberli beton numuneler, alındıkları yerden taşınmadan, kalıp içerisinde (16 saatten az, 3 günden fazla olmamak üzere) yeterli sertliğe ulaşmaya kadar; dış etkilerden, şoktan titreşimden ve kurumadan korunmalıdır. Fiberli Beton numuneleri, kalıptan çıkartıldıktan sonra, deney yapılıncaya kadar, 20°C (±2°C) sıcaklıktaki su içerisinde (veya %95 nemli ortamda) kür edilmelidir. Fiberli beton numuneler,

alındıktan hemen sonra taşınmamalı/hareket ettirilmemelidir; üzeri ıslak bez ve naylonla örtülerek, 1 gün süreyle bekletilmelidir. Alınan fiberli beton numuneler genellikle (beton içeriğine bağlı olarak) 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak test tarihine kadar su kürü uygulanmalı veya nemli (%95) ortamda bekletilmelidir.

- **Çatlak Ağız Açılması (CMOD)**

Numuneler, Şekil 6.10.'da görüldüğü gibi boyuna eksenleri etrafında 90° döndürülecek ve daha sonra, numunenin genişliği boyunca, açıklığın ortasında kesilecektir. 1 Döküm sırasında üst yüzey, 2 çentik, 3 test numunesinin kesitidir.



Şekil 6.10. Eğilme deneyi test düzeneği kesilen çentik konumu ve çatlak ölçer

Kaynak: (TS EN 14651, 2008: 7)

Şekil 6.10.'da olduğu gibi çentik genişliği 5 mm veya daha az, h_{sp} (orta açıklık da ki üst kısım ile çentik ucu arasındaki mesafe) $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ olmalıdır (TSE, 31 Mayıs 2008).

Test numuneleri, aksi belirtilmedikçe, testten en az 3 saat öncesine kadar testereden sonra en az 3 gün boyunca EN 12390-2'ye göre kürlenmelidir.

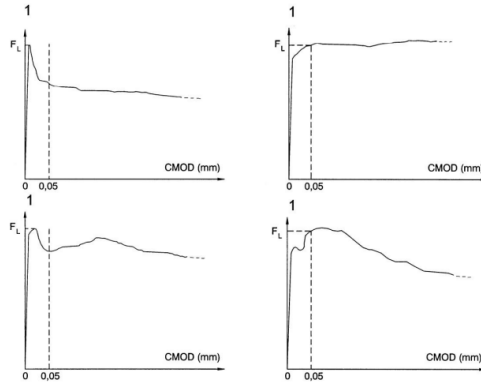
- **Orantılılık Limiti (LOP)**

LOP lifli betonların mekanik performansını belirlemede önemli bir parametredir ve çentikli prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyleriyle tespit edilir. LOP, çentik ucundaki gerilme olarak tanımlanır ve bu gerilme, çatlamanın gerçekleşmediği orta noktanın enine kesitinde etkidiği varsayılır. EN-14651 standardına göre, $f_{ct,L}^f$ (orantısız sınır (LOP) N/mm^2) hesaplaması aşağıdaki gibidir.

$$f_{ct,L}^f = (3 \times F_L \times l) \div (2 \times b \times h_{sp}^2) \quad (6.1)$$

Bu hesaplama için kullanılan formülde temel değişkenler; $f^{ct,L}$, F_L (LOP değerine karşılık gelen yük (N)), l (açıklık uzunluğu), b (numune genişliği) ve h_{sp} 'dir.

Orantılılık limitindeki F_L yük değeri ise deneysel yük – CMOD grafiği üzerinden ölçülür. Bu işlem sırasında, CMOD grafiğinde 0,05 mm değerinden yük eksenine paralel bir doğrultu çizilir. Çizilen bu doğru ile grafikteki yük – CMOD eğrisi arasında oluşan maksimum yük değeri, orantılılık limiti için F_L olarak kabul edilir. Bu yöntem sayesinde LOP' un hassas bir şekilde belirlenmesi sağlanır. Lifli betonların üç noktalı eğilme deneyinde gösterebileceği eğilme davranışına göre elde edilebilecek yük – CMOD eğrisi karakterlerine göre alınması gereken F_L değerleri şematik olarak Şekil 6.11.'de gösterilmiştir (TSE, 31 Mayıs 2008).



Şekil 6.11. Yük – CMOD eğrilerinden orantılık limitinin (F_L) belirlenmesi

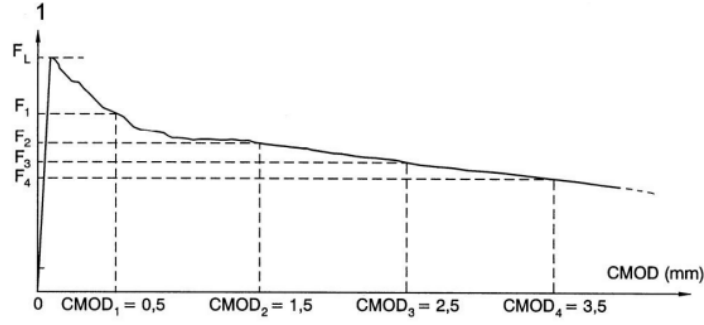
Kaynak: (TS EN 14651, 2008: 13)

- **Kalıcı Eğilmede Çekme Dayanımı ($f_{R,j}$)**

Kalan eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki gibidir.

$$f_{R,j} = (3 \times F_j \times l) \div (2 \times b \times h_{sp}^2) \quad (6.2)$$

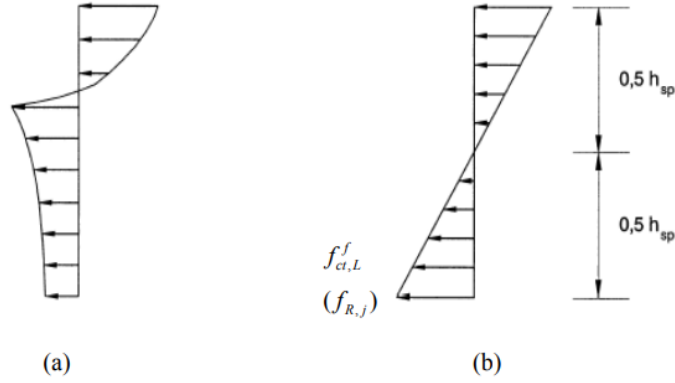
Burada, $f_{R,j}$, $CMOD_j$ ($j=1,2,3,4$) (çatlak açılma değerlerindeki kalıcı eğilmede çekme dayanımı) veya $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$)'ya çatlak açılma değerindeki sehim değerine karşılık gelen kalıcı eğilmede çekme dayanımı (N/mm^2), F_j $CMOD_j$ ($j=1,2,3,4$) çatlak açılma değerlerindeki kaydedilmiş olan yük değeri veya $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$)'ya karşılık gelen yüküdür. Şekil 6.12.'de belirli bir lif dozajına sahip tipik bir lifli beton yük – CMOD grafiğinden şematik olarak F_L değerleri gösterilmiştir (TSE, 31 Mayıs 2008).



Şekil 6.12. Yük-CMOD diyagramı ve F_j ($j = 1, 2, 3, 4$)

Kaynak: (TS EN 14651, 2008: 13)

Üç noktalı Eğilme testinde yükün etkilediği kesitte oluşacak eğilme dayanımı Şekil 6.13.'teki gibidir.



Şekil 6.13. En kesitte gerçek gerilme dağılımı (a) ve lineer gerilme dağılımı (b) kabulü

Kaynak: (TS EN 14651, 2008: 14)

Şekil 6.13.'de görüldüğü gibi lineer gerilme dağılımı kabulü yapılırsa,

LOP ($f_{ct,L}^f$) ve kalan eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$f_{Rj} = (3 \times F_j \times l) \div (2 \times b \times h_{sp}^2) \quad (6.3)$$

$$f_{ct,L}^f = (3 \times F_L \times l) \div (2 \times b \times h_{sp}^2) \quad (6.4)$$

- **CMOD ve Sehim (δ) Arasındaki Eşdeğerlik**

TS EN 14651 standardında CMOD ile δ arasındaki bağıntıyı aşağıdaki denklemde göstermiştir. Dönüşüm Tablo 6.5.'de gösterilmiştir.

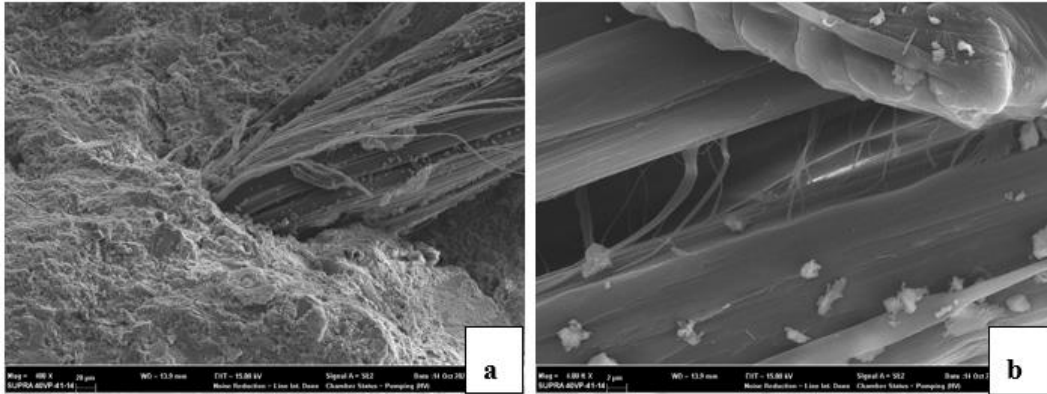
$$\delta = 0,85 \times CMOD + 0,04 \quad (6.5)$$

çalıştırılmalıdır. Testin ilk iki dakikası boyunca, yük ve karşılık gelen CMOD değerleri saniyede en az 5 kez (5 Hz) kaydedilmelidir. Bu süreden sonra kayıt hızı saniyede en az 1 kez (1 Hz) olacak şekilde azaltılabilir. Test, CMOD değeri en az 4 mm'ye ulaştığında sonlandırılmalıdır. Eğer CMOD F_L ile CMOD 0,5 mm arasındaki yük değerlerinin minimumu, CMOD 0,5 mm'ye karşılık gelen yükün %30'undan azsa, test prosedürü kararsızlık açısından kontrol edilmelidir. Eğer sehim artış hızını kontrol eden bir test cihazı kullanılıyorsa, yukarıda belirtilen test prosedürü, CMOD ile ilgili parametreler, sehim ile ilgili parametrelere dönüştürülmek şartıyla uygulanmalıdır. Çatlağın yarığın dışında başladığı testler geçersiz sayılmalı ve reddedilmelidir (TSE, 31 Mayıs 2008).

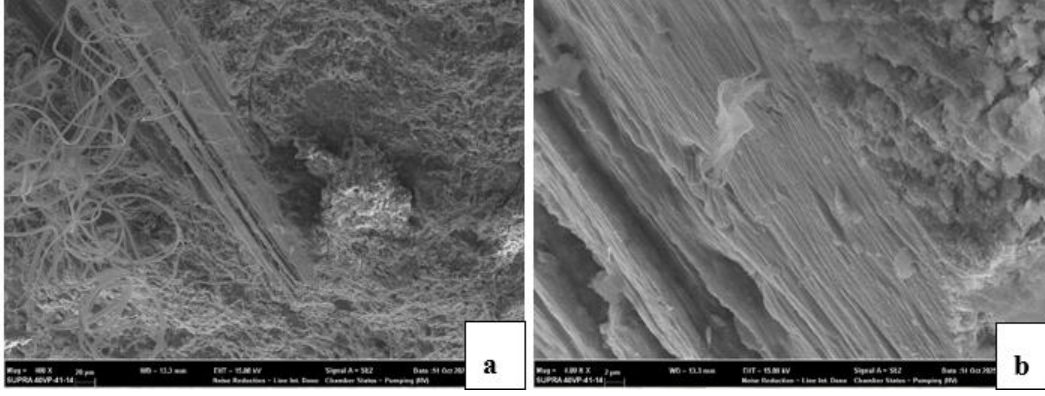
6.3. SEM Analiz Bulguları ve Değerlendirmeler

Şekil 6.16. a da 400 kat b de ise 4000 kat büyütülerek F0-3 numunesine, Şekil 6.17. a da 400 kat b de ise 4000 kat büyütülerek F5-3 numunesine, Şekil 6.18. a da 400 kat b de ise 4000 kat büyütülerek F10-3 numunesi SEM görüntülerine bakılmıştır.

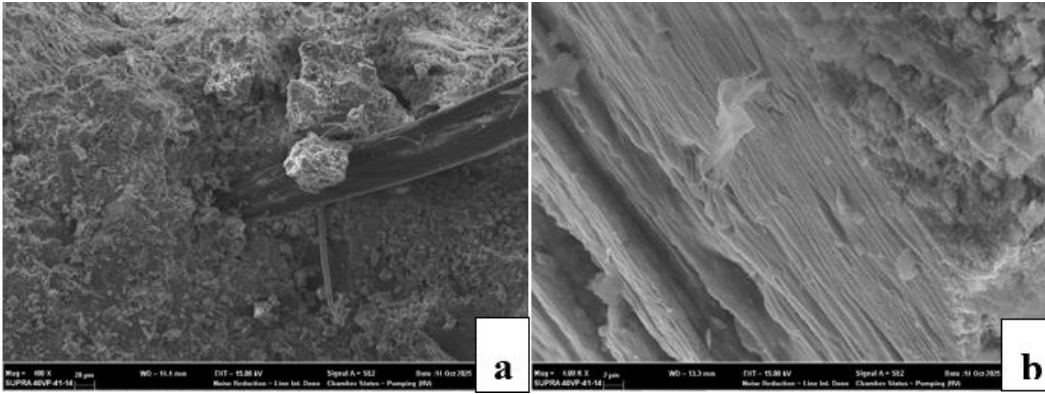
Bakılan numuneler de F0-3 numunesinin yüzeyinde daha düzgün, homojen ve süreklilik gösteren bir yapı gözlemlenirken geri dönüştürülmüş granül içeren liflerde yüzeyde mikro boşluklar, girinti-çıkıntılar ve süreksizliklerin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum, geri dönüşüm oranındaki artışın lif-matris arayüzündeki aderans kuvvetini zayıflattığını ve mikro yapısal düzeyde heterojen bir yüzey oluşumuna neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.16. F 0-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b:4KX)



Şekil 6.17. F5-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b: 4KX)



Şekil 6.18. F10-3 numunesinin SEM görüntüsü (a: 400X, b: 4KX)

Geri dönüştürülmüş liflerde gözlemlenen yüzey düzensizliklerinin temel nedeni, polimerin geri dönüşüm süreci sırasında maruz kaldığı ısıl bozulma, oksidatif yaşlanma ve zincir kırılmaları olarak değerlendirilmektedir. Bu süreçler sonucunda polimer zincir uzunluğu azalmakta, moleküler düzen bozulmakta ve yüzeyde erime anomalileri, mikro çatlaklar ve katman ayrışmaları meydana gelmektedir. Ayrıca, geri dönüşüm sırasında polimere karışan katkı kalıntıları da lif yüzeyinde homojen olmayan bölgeler oluşturarak, çimento hamuru ile olan fiziksel ve kimyasal etkileşimi zayıflatmaktadır. Bu mikro yapısal düzensizlikler, lif-beton arayüzünde yeterli kohezyonun sağlanamamasına neden olurken, özellikle liflerin çekme veya eğilme yükleri altında daha kolay ayrılmasına yol açmaktadır. Bu durum, makro düzeyde gözlenen kalıcı eğilmede çekme dayanımı (F_{R1}) ve moment katsayısı düşüşleriyle doğrudan ilişkilidir. Nitekim, mekanik testlerde geri dönüştürülmüş granül oranı arttıkça F_{R1} (0,5 mm kalıcı eğilmede çekme dayanımı) ve F_{R4} (3,5 mm kalıcı eğilmede çekme dayanımı) değerlerinde meydana gelen azalma, bu mikroyapısal gözlemlerle tutarlıdır.

F0-3 numunesi hem oldukça düzgün, süreklilik arz eden bir yüzey yapısına sahiptir. Bu özellik, lifin çimento matrisine daha iyi gömülmesini ve yük transferinin daha verimli olmasını

sağlamaktadır. Buna karşın, F5-3 ve F10-3 numunelerindeki görüntülerde yüzey boyunca oluşan mikro boşluklar, erime kaynaklı deformasyonlar ve yüzey çatlakları açıkça gözlemlenmektedir. Bu yapısal bozukluklar, özellikle matrisin lif çevresini tam olarak sarmasını engellemekte, bu da düşük yoğunluklu bir geçiş bölgesi meydana getirmektedir.

Verilen mekanik test sonuçları ile SEM analizleri birlikte değerlendirildiğinde, geri dönüştürülmüş granül oranının %0'dan %5'e ve %10'a çıkarılmasıyla mekanik özelliklerde gözlenen azalmanın doğrudan mikroyapısal bozulmalarla ilişkili olduğu görülmektedir. %0 granül içeren F0 numunesinde homojen lif dağılımı, güçlü lif-matris ara yüzey aderansı ve sınırlı porozite sayesinde çekme gerilmesi 650 MPa ve elastisite modülü 8,5 GPa olarak ölçülmüştür. Bu yapı, etkin gerilme transferinin sağlandığını ve yükün lif ile matris arasında dengeli biçimde paylaşıldığını göstermektedir.

Granül oranının %5'e çıkarıldığı F5 numunesinde SEM görüntülerinde kısmi lif çekip çıkma izleri ve lokal ara yüzey ayrılmaları gözlenmiş; buna bağlı olarak çekme dayanımı 630 MPa'a düşerek yaklaşık %3,1 oranında azalmış, elastisite modülü ise 8,2 GPa 'a gerileyerek yaklaşık %3,5'lik bir kayıp göstermiştir. Bu azalma, ara yüzey bağ dayanımındaki düşüş nedeniyle efektif yük transfer alanının azalmasıyla ilişkilidir.

%10 granül içeren F10 numunesinde ise artan lif kümelenmesi, belirgin lif ile matris arasındaki bağın kopması veya zayıflamasına ağırlı bölgeleri ve mikro boşluk yoğunluğu dikkat çekmektedir. Yüksek büyütme görüntülerde lif yüzeylerinin daha temiz görünmesi, ara yüzey kopmasının baskın kırılma mekanizması olduğunu göstermektedir. Bu mikroyapısal kusurlar gerilme yığılmalarını artırarak efektif taşıyıcı kesit alanını azaltmış ve çekme dayanımında toplamda yaklaşık %7,7'lik (650 → 600 MPa), elastisite modülünde ise yaklaşık %6'lık (8,5 → 8,0 GPa) bir düşüşe neden olmuştur.

Sonuç olarak, granül oranındaki artışın mekanik performansı düşürmesinin temel nedeni; artan porozite, ara yüzey zayıflaması ve lif dağılımındaki heterojenliktir. Mekanik dayanımdaki %6–8 aralığındaki azalma, SEM görüntülerinde gözlenen ara yüzey kusurlarının ve yük transfer etkinliğindeki kaybın nicel bir yansımasıdır. Bu durum, kompozit sistemlerde makro ölçekteki mekanik davranışın, mikro ölçekteki arayüz bütünlüğü ve iç yapı homojenliği tarafından belirlendiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1. Beton Basınç ve Çökme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

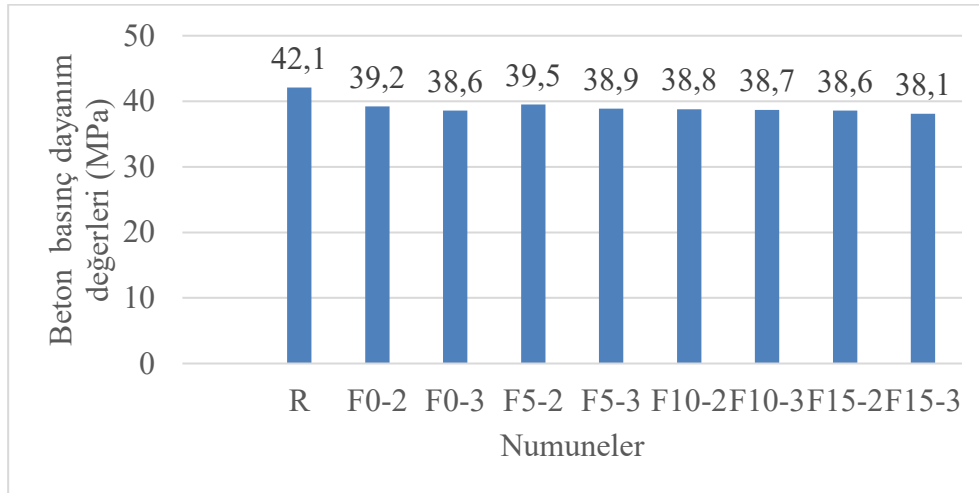
Tablo 7.1. ve Grafik 7.1.'de beton basınç ve çökme deney sonuçları gösterilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarına göre R numunemiz 42,1 MPa ile en yüksek dayanım değerini göstermiştir. Granül katkı içeren karışımlarda dayanım değerleri 38,1–39,5 MPa aralığında gerçekleşmiş olup referans numuneye göre %6 ile %10 oranında azalma belirlenmiştir. Aynı granül oranında dozajın 2 kg/m³'ten 3 kg/m³'e çıkarılması basınç dayanımını düşürmüştür. Bu durumun, artan dozaj ile birlikte beton iç yapısında boşluk oranının artması ve granül ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin zayıflaması sonucu betonun kompaktlığının azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Liflerin miktarına ve tipine bağlı olarak taze betonun çökme değerinin azaldığı ve işlenebilirliğinin düştüğü gözlemlenmiştir (Korkut vd., 2017: 564). Basınç dayanımının da olumsuz etkilenebileceği belirtilmiştir. Daha yüksek lif dozajı karışımda hava boşluklarını artırdığından basınç dayanımı üzerinde bir düşüş eğilimi de gözlemlenebilir (Korkut vd., 2017: 568).

Beton karışımlarına PP liflerin ilave edilmesi, taze betonun işlenebilirliğini ve çökme değerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu etki özellikle lif miktarı arttıkça daha belirgin hale gelir; çünkü lifler beton taneleri arasındaki sürtünmeyi artırarak akışkanlığı azaltır. Bu nedenle, eşit çökme değerini tutturmak için daha fazla su azaltıcı katkı veya beton reçetesinde ayarlamalar gerekebilir. Özellikle makro sentetik lif oranı yükselirken su azaltıcı katkı ihtiyacı da artacaktır (Latifi, 2020: 45)

Tablo 7.1. Beton basınç ve çökme deney sonuçları

Numune Adı	Dozaj Kg/m ³	Granül Oranı	Referans Beton Çökme Değeri	Fiberli Beton Çökme Değeri	Tek Eksenli Beton Basınç Dayanım Değeri MPa
R	-	-	20	-	42,1
F0-2	2	%0	20	17	39,2
F0-3	3	%0	20	14	38,6
F5-2	2	%5	20	17	39,5
F5-3	3	%5	20	14	38,9
F10-2	2	%10	20	17	38,8
F10-3	3	%10	20	15	38,7
F15-2	2	%15	20	17	38,6
F15-3	3	%15	20	14	38,1



Grafik 7.1. Beton basınç dayanımı deney sonuçları

7.2. Üç Noktalı Eğilme Testinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

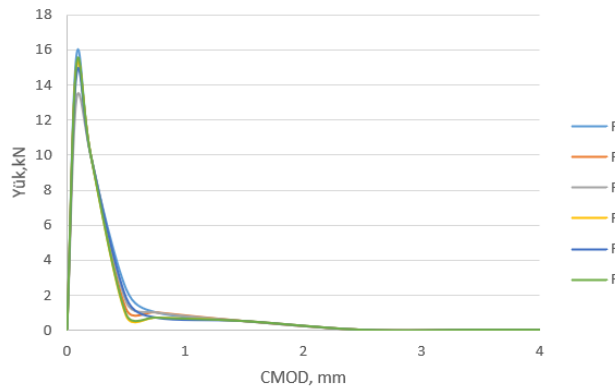
EN 14651 test standardına göre 6 ‘şar kiriş numune 2 kg/m³ PP lif dozajlı, 3 kg/m³ PP lif dozajlı beton kullanılarak; %0, %5, %10 ve %15 geri dönüşüm granülü kullanılarak hazırlanmış ve 28 gün sonrasında kırılmıştır; kırılan numunelerden F05-2 numunesine ait 2 adet numune kırım esnasında zayı olmuş 4 kiriş numunesinin ortalama değerleri alınmıştır, diğer numunelerde alınmış olan 6 adet kiriş EN14651 standardına uygun olarak kırılmış ve sonuçları

değerlendirmeye alınmıştır, ayrıca bu tablolarda standart sapma (STD), CMODJ j = 1, 2, 3 veya 4'teki CMOD değerleri, Moment hesaplama katsayısı (MHK) gösterilmiştir.

Kırılan numunelerden R'ye ait R LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.2.'de, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.2.'de; F0-2'ye LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.3.'de, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.3.'de; F0-3'ye LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.4.'de, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.4.'de; F5-2'ye ait LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.5.'de CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.5.'de; F5-3' ye ait LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.6.'da CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.6.'da; F10-2' ye ait LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.7.'de, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.7.'de; F10-3' e ait LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.8.'de, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.8.'de; F15-2' ye ait LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.9.'da, CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.9.'da; F15-3'e ait CMOD LOP,CMOD ve MHK değerleri Tablo 7.10.'da CMOD-Yük değişimi ise Grafik 7.10.'da gösterilmiştir.

Tablo 7.2. R LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

R	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5 mm Fr1, MPa	CMOD 1,5 mm Fr2, MPa	CMOD 2,5 mm Fr3, MPa	CMOD 3,5 mm Fr4, MPa	Moment Hesaplama Katsayısı (MHK)
1	5,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,05
2	4,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,03
3	4,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,04
4	4,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,02
5	4,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,04
6	4,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,02
Ortalama	4,7	0,5	0,0	0,0	0,0	0,03
STD	0,28	0,16	0,00	0,00	0,00	0,01



Grafik 7.2. R CMOD-Yük değişimi grafiği

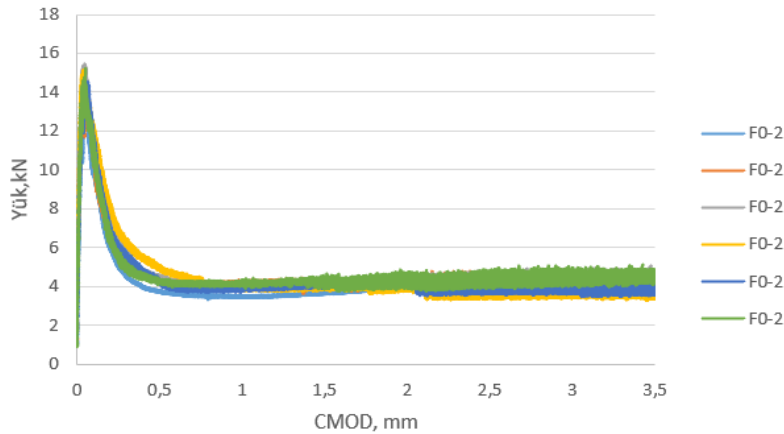
EN 14651 standardına göre gerçekleştirilen eğilme deneyleri kapsamında Tablo 7.2.'de ki R değerleri ile Tablo 7.3.'de F0-2 serilerinin değerleri karşılaştırıldığında, lif ilavesinin betonun çatlak öncesi eğilme davranışı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu, çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değerlerinin her iki seri için de ortalama 4,7 MPa seviyesinde gerçekleştiği ve bu bağlamda anlamlı bir artış veya azalış meydana gelmediği görülmüştür. Buna karşılık, çatlak sonrası davranışı tanımlayan artık eğilme dayanımlarında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. CMOD = 0,5 mm seviyesinde Fr_1 değeri yalın beton numunelerinde ortalama 0,5 MPa olarak ölçülürken, F0-2 serisinde bu değer 1,4 MPa' a yükseldiği ve yaklaşık %180 oranında bir artış sağlandığı belirlenmiştir. CMOD = 1,5 mm ve üzerindeki çatlak açıklıklarında yalın beton numuneleri yük taşıma kapasitesini neredeyse tamamen kaybederek gevrek bir kırılma davranışı sergilerken, F0-2 serisi numunelerde Fr_2 , Fr_3 ve Fr_4 değerlerinin sırasıyla yaklaşık 1,3–1,4 MPa seviyelerinde korunması, sentetik liflerin çatlak yüzeyleri arasında etkin bir köprüleme mekanizması oluşturarak çatlak ilerlemesini sınırladığını ve artık taşıma kapasitesini sürdürdüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu davranış, yük–CMOD eğrilerinde tepe yükünden sonra ani bir düşüşün gerçekleşmediği, bunun yerine daha kararlı ve sünek bir yük taşıma rejiminin geliştiğini göstermiştir. Ayrıca, moment hesaplama katsayısının (MHK) yalın beton için ortalama 0,03 iken F0-2 serisinde 0,25 değerine ulaşması, lif katkısı ile birlikte çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %700'ün üzerinde bir artış meydana geldiğini ve lifli betonun enerji yutma kapasitesinin önemli ölçüde yükseldiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, düşük lif dozajlarında dahi sentetik liflerin betonun çatlak sonrası taşıma performansını belirgin biçimde iyileştirdiğini, ancak çatlak öncesi dayanım üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymakta olup, literatürde EN 14651 standardına göre gerçekleştirilen benzer çalışmalarda rapor edilen eğilimlerle yüksek düzeyde paralellik göstermektedir. Özellikle sentetik liflerin gevrek kırılma davranışını baskılayarak sünek davranışı teşvik etmesi, söz konusu lif tipinin yapısal olmayan ve yarı yapısal uygulamalarda çatlak kontrolü ve artık dayanım gereksinimleri açısından etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 7.4.'de F0-3 değerleri ile, Tablo 7.2.'de R numunelerinin değerleri karşılaştırıldığında ilk çatlak çekme dayanımı açısından benzer bir performans sergilemiş; çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değerlerinin R için 4,7 MPa iken F0-3 için 4,4 MPa olup yaklaşık %6'lık sınırlı bir azalma gözlenmiştir. Buna karşılık çatlak sonrası davranışta belirgin ve yapısal açıdan kritik bir iyileşme elde edilmiştir. R numunelerinde CMOD 0,5 mm seviyesinde Fr_1 değeri ortalama artık dayanım 0,5 MPa ile sınırlı kalmış CMOD = 1,5 mm ve

üzerindeki çatlak açıklıklarında R beton numuneleri yük taşıma kapasitesini neredeyse tamamen kaybederek gevrek bir kırılma davranışı sergilerken F0-3 numunelerinde CMOD 0,5 mm seviyesinde Fr_1 değeri ortalama 1,5 MPa artık dayanım elde edilmiş ve bu değer R numunelerine göre yaklaşık %200 daha yüksek gerçekleşmiştir. CMOD'un 1,5–3,5 mm aralığında artmasıyla F0-3 numunelerinin artık dayanımı 1,7–1,9 MPa seviyelerinde korunmuş, böylece R betonun taşıma kapasitesini tamamen kaybettiği çatlak açıklıklarında dahi anlamlı bir yük taşıma yeteneği sağlanmıştır. Ayrıca moment hesaplama katsayısı bakımından F0-3 numunelerinin ortalama değeri 0,32 iken R numunelerinde bu değer 0,03 seviyesinde kalmış; lifli betonun eğilme etkisi altındaki etkinliğinin yaklaşık 10 kat arttığı ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, F0-3 lif katkısının betonun ilk çatlak dayanımını sınırlı ölçüde etkilemesine karşın, çatlak sonrası süneklik, enerji yutma kapasitesi ve yapısal artık dayanım açısından çok belirgin bir performans artışı sağladığını açıkça göstermektedir.

Tablo 7.3. F0-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F0-2	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5 mm Fr ₁ , MPa	CMOD 1,5 mm Fr ₂ , MPa	CMOD 2,5 mm Fr ₃ , MPa	CMOD 3,5mm Fr ₄ , MPa	MHK
1	4,3	1,2	1,2	1,3	1,3	0,23
2	4,6	1,4	1,3	1,4	1,4	0,25
3	5,0	1,4	1,4	1,5	1,5	0,26
4	4,8	1,6	1,3	1,3	1,3	0,25
5	4,7	1,4	1,3	1,3	1,3	0,24
6	4,9	1,4	1,4	1,5	1,5	0,26
Ortalama	4,7	1,4	1,3	1,4	1,4	0,25
STD	0,25	0,13	0,08	0,10	0,10	0,01

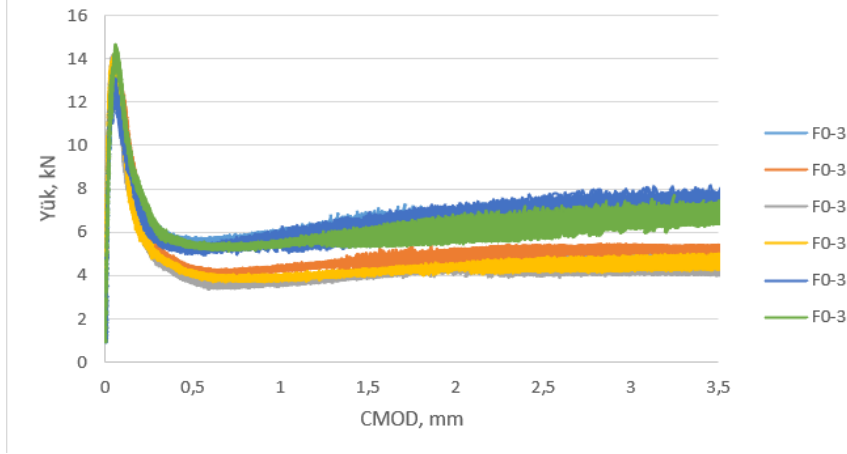


Grafik 7.3. F0-2 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.3.'de F0-2 değerleri ile Tablo 7.4.'de F0-3 değerleri karşılaştırıldığında, her iki lifli beton serisinin çatlak öncesi eğilme davranışlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri F0-2 serisi için ortalama 4,7 MPa, F0-3 serisi için ise yaklaşık 4,4 MPa olarak ölçülmüş olup, F0-3 serisinde yaklaşık %6 mertebesinde sınırlı bir azalma söz konusudur. Buna karşılık çatlak sonrası davranışta F0-3 serisinin F0-2'ye kıyasla daha üstün bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. CMOD 0,5 mm seviyesinde F0-2 serisinde ortalama Fr_1 değeri 1,4 MPa iken, F0-3 serisinde bu değer 1,5 MPa' a yükselmiş ve yaklaşık %7'lik ilave bir artış sağlanmıştır. Daha belirgin farklar, daha büyük çatlak açıklıklarında ortaya çıkmış; CMOD, 1,5–3,5 mm aralığında F0-2 serisinde Fr_2 – Fr_4 değerleri yaklaşık 1,3–1,4 MPa seviyelerinde sabitlenirken, F0-3 serisinde bu değerlerin 1,7–1,9 MPa aralığına yükseldiği ve böylece çatlak sonrası artık dayanımın yaklaşık %30–40 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum, F0-3 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F0-2 serisinde ortalama 0,25 iken F0-3 serisinde 0,32 değerine ulaşmış; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %25–30 mertebesinde ilave bir artışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, her iki lifli beton serisi de yalın betona kıyasla sünek ve enerji yutma kapasitesi yüksek bir davranış sergilemekle birlikte, F0-3 serisinin özellikle büyük çatlak açıklıklarında daha yüksek artık dayanım ve eğilme etkinliği sunarak yarı yapısal ve performans odaklı uygulamalar açısından F0-2 serisine göre daha avantajlı bir davranış ortaya koyduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 7.4. F0-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F0-3	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5 mm Fr_1 , MPa	CMOD 1,5 mm Fr_2 , MPa	CMOD 2,5 mm Fr_3 , MPa	CMOD 3,5mm Fr_4 , MPa	MHK
1	4,2	1,8	2,1	2,3	2,3	0,38
2	4,5	1,4	1,5	1,7	1,7	0,28
3	4,5	1,2	1,3	1,5	1,5	0,25
4	4,5	1,3	1,3	1,5	1,5	0,25
5	4,2	1,7	1,9	2,1	2,2	0,36
6	4,7	1,7	2,0	2,2	2,4	0,38
Ortalama	4,4	1,5	1,7	1,9	1,9	0,32
STD	0,20	0,25	0,36	0,36	0,41	0,06



Grafik 7.4. F0-3 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.3.'de F0-2 değerleri ile Tablo 7.5.'de F5-2 değerleri karşılaştırıldığında, F5-2 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 5,1 MPa iken F0-2 serisi için ise 4,7 MPa olarak ölçülmüş olup, F5-2 serisinde yaklaşık %7 mertebesinde sınırlı bir azalma söz konusudur.

Buna karşılık çatlak sonrası davranışta F0-2 serisinin F5-2'ye kıyasla daha üstün bir performans sergilediği görülmektedir. CMOD = 0,5 mm seviyesinde F0-2 serisinde ortalama Fr_1 değeri 1,4 MPa iken, F5-2 serisinde bu değer 1,2 MPa' a düşmüş ve yaklaşık %14'lük ilave bir azalış görülmüştür. CMOD = 1,5–3,5 mm aralığında F0-2 serisinde Fr_2 – Fr_4 değerleri yaklaşık 1,3–1,4 MPa seviyelerinde sabitlenirken, F5-2 serisinde bu değerlerin 1,1–1,2 MPa aralığına düştüğü ve böylece çatlak sonrası artık dayanımın yaklaşık %15 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F0-2 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F0-2 serisinde ortalama 0,25 iken F5-2 serisinde 0,22 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %12 mertebesinde ilave bir azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı dozajda geri dönüşüm granül oranı arttıkça performans azalmıştır.

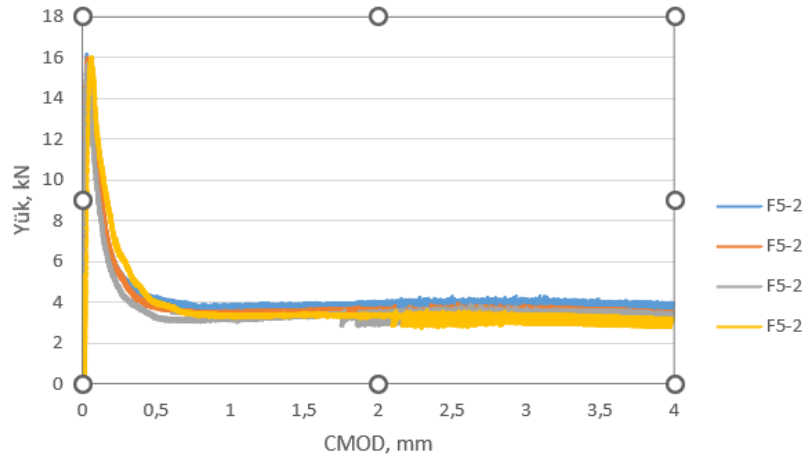
Tablo 7.4.'de F0-3 değerleri ile Tablo 7.6.'de F5-3 değerleri karşılaştırıldığında, F0-3 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 4,4 MPa iken F5-3 serisi için ise 5,0 MPa olarak ölçülmüş olup, F5-3 serisinde yaklaşık %13 mertebesinde bir artış söz konusudur.

Çatlak sonrası davranışta F0-3 serisinin F5-3'e kıyasla daha üstün bir performans sergilediği görülmektedir. CMOD 0,5 mm seviyesinde F0-3 serisinde ortalama Fr_1 değeri ile F5-3 Fr_1 değeri aynı olup 1,5 MPa'dır. CMOD = 1,5–3,5 mm aralığında F0-3 serisinde Fr_2 – Fr_4 değerleri yaklaşık 1,7–1,9 MPa seviyelerinde sabitlenirken, F5-3 serisinde bu değerlerin

1,7–1,8 MPa aralığına düştüğü ve böylece çatlak sonrası artık dayanımın yaklaşık %5 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F0-3 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F0-3 serisinde ortalama 0,32 iken F5-3 serisinde 0,30 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %6 mertebesinde ilave bir azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı dozajda geri dönüşüm granül oranı arttıkça performans azalmıştır.

Tablo 7.5. F5-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F5-2	LOP	CMOD	CMOD	CMOD	CMOD	MHK
	Fctl, MPa	0,5mm Fr ₁ , MPa	1,5 mm Fr ₂ , MPa	2,5 mm Fr ₃ , MPa	3,5 mm Fr ₄ , MPa	
1	5,2	1,3	1,2	1,3	1,3	0,23
2	5,1	1,2	1,1	1,2	1,2	0,22
3	5,0	1,1	1,1	1,1	1,2	0,21
4	5,1	1,3	1,1	1,1	1,1	0,21
Ortalama	5,1	1,2	1,1	1,2	1,2	0,22
STD	0,08	0,10	0,05	0,10	0,08	0,01



Grafik 7.5. F5-2 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.5.'de F5-2 değerleri ile Tablo 7.6.'da F5-3 değerleri karşılaştırıldığında, F5-2 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 5,1 MPa iken F5-3 serisi için ise 5,0 MPa olarak ölçülmüş olup, bu iki seri için değerler çok yakındır.

Çatlak sonrası davranışta F5-2 serisinin F5-3'e kıyasla daha düşük bir performans sergilediği görülmektedir. CMOD = 0,5 mm seviyesinde F5-2 serisinde ortalama Fr₁ değeri 1,2 MPa iken F5-3 Fr₁ değeri 1,5 MPa'dır. CMOD = 1,5–3,5 mm aralığında 1,1,-1,2 MPa iken F5-

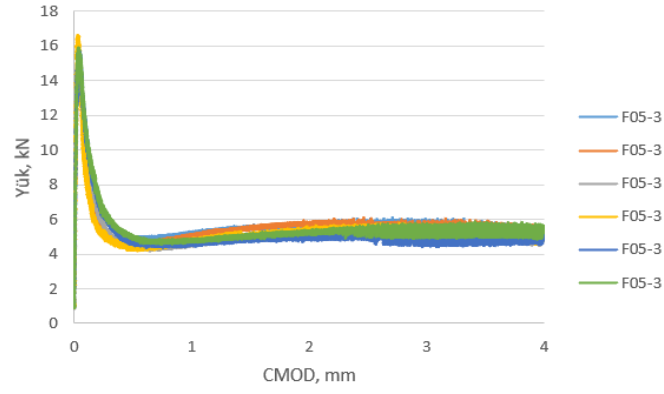
3 serisinde bu değerlerin 1,7–1,8 MPa aralığına yükseldiği ve böylece çatlak sonrası artık dayanımın yaklaşık %33 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum, F5-3 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F5-3 serisinde ortalama 0,30 iken F5-2 serisinde 0,22 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %26 mertebesinde artışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı geri dönüşüm granülünde dozaj arttıkça performans artmaktadır.

Tablo 7.5.’de F5-2 değerleri ile Tablo 7.7.’de F10-2 değerleri karşılaştırıldığında, F5-2 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 5,1 MPa iken F10-2 serisi için ise 4,7 MPa olarak ölçülmüş olup, bu iki seride %7 oranında azalma gözlemlenmiştir.

Çatlak sonrası davranışta F5-2 serisinin F10-2’e kıyasla daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. CMOD = 0,5 mm seviyesinde F5-2 serisinde ortalama Fr1 değeri 1,2 MPa iken F10-2 Fr1 değeri 1,1 MPa’dır. CMOD = 1,5–3,5 mm aralığında 1,1,-1,2 MPa iken F10-2 serisinde bu değerlerin 0,9–1,0 MPa aralığına düşmüş artık dayanımın yaklaşık %18 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F5-2 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F5-2 serisinde ortalama 0,22 iken F10-2 serisinde 0,18 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %18 mertebesinde azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı dozajda geri dönüşüm granül oranı arttıkça performans azalmıştır.

Tablo 7.6. F5-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

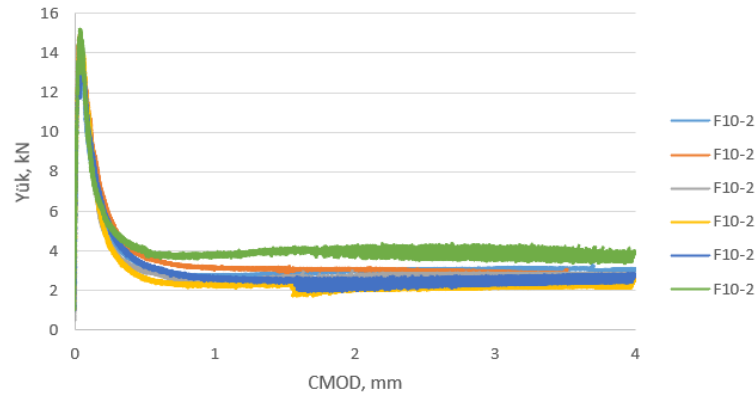
F5-3	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5mm Fr1, MPa	CMOD 1,5 mm Fr2, MPa	CMOD 2,5 mm Fr3, MPa	CMOD 3,5 mm Fr4, MPa	MHK
1	4,7	1,6	1,8	1,8	1,8	0,31
2	5,0	1,5	1,8	1,9	1,8	0,30
3	4,8	1,4	1,6	1,7	1,8	0,29
4	5,3	1,4	1,6	1,8	1,7	0,28
5	5,0	1,5	1,6	1,6	1,6	0,28
6	5,1	1,6	1,6	1,8	1,8	0,31
Ortalama	5,0	1,5	1,7	1,8	1,8	0,30
STD	0,21	0,09	0,10	0,10	0,08	0,01



Grafik 7.6. F5-3 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.7. F10-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F10-2	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5mm Fr1, MPa	CMOD 1,5 mm Fr2, MPa	CMOD 2,5 mm Fr3, MPa	CMOD 3,5 mm Fr4, MPa	MHK
1	4,5	1,1	0,9	1,0	1,0	0,19
2	4,8	1,2	1,0	1,0	0,9	0,18
3	4,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,16
4	4,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,14
5	4,5	1,1	0,8	0,8	0,9	0,18
6	4,9	1,3	1,3	1,3	1,3	0,23
Ortalama	4,7	1,1	0,9	1,0	1,0	0,18
STD	0,16	0,19	0,21	0,19	0,18	0,02



Grafik 7.7. F10-2 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.6.'da F5-3 değerleri ile Tablo 7.8.' de F10-3 değerleri karşılaştırıldığında, F5-3 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 4,7 MPa iken F10-3 serisi için ise 4,8 MPa olarak ölçülmüş olup, bu iki seride benzer davranış gözlemlenmiştir.

Çatlak sonrası davranışta F5-3 serisinin F10-3'e kıyasla daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. $CMOD = 0,5$ mm seviyesinde F5-3 serisinde ortalama Fr_1 değeri 1,5 MPa iken F10-3 Fr_1 değeri 1,3 MPa 'dır. $CMOD = 1,5-3,5$ mm aralığında 1,7,-1,8 MPa iken F10-3 serisinde bu değerlerin 1,4-1,6 MPa aralığına düşmüş artık dayanımın yaklaşık %15 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F5-3 serisinde lif-matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F5-3 serisinde ortalama 0,30 iken F10-3 serisinde 0,26 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %13 mertebesinde azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı dozajda geri dönüşüm granül oranı arttıkça F5-2, F10-2 de olduğu gibi performans azalmıştır.

Tablo 7.7.'de F10-2 değerleri ile Tablo 7.8.'de F10-3 değerleri karşılaştırıldığında, F10-3 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 4,7 MPa iken F10-3 serisi için ise 4,8 MPa olarak ölçülmüş olup, bu iki seride benzer davranış gözlemlenmiştir.

Çatlak sonrası davranışta F10-3 serisinin F10-2'e kıyasla daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. $CMOD = 0,5$ mm seviyesinde F10-3 serisinde ortalama Fr_1 değeri 1,3 MPa iken F10-2 Fr_1 değeri 1,1 MPa 'dır. F10-3 serisinde $CMOD = 1,5-3,5$ mm aralığında 1,4,-1,6 MPa iken F10-2 serisinde bu değerlerin 0,9-1,0 MPa aralığına düşmüş artık dayanımın yaklaşık %50 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F10-2 serisinde lif-matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F10-3 serisinde ortalama 0,26 iken F10-2 serisinde 0,18 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %30 mertebesinde azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı geri dönüşüm granül oranında dozaj arttıkça F5-2, F5-3 de olduğu gibi performans artmıştır.

Tablo 7.7.'de F10-2 değerleri ile Tablo 7.9.'da F15-2 değerleri karşılaştırıldığında, F10-2 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 4,7 MPa iken F10-3 serisi için ise 4,8 MPa olarak ölçülmüş olup, bu iki seride benzer davranış gözlemlenmiştir.

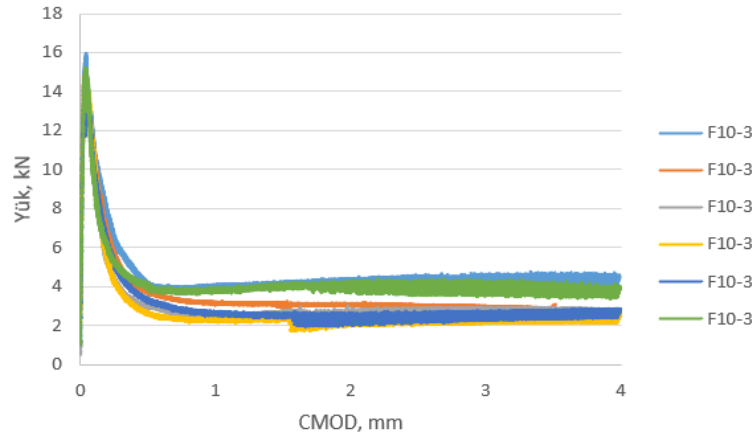
Çatlak sonrası davranışta F10-2 serisi ve F15-2 serisi yakın performans göstermiştir. $CMOD = 0,5$ mm seviyesinde F10-2 serisinde ve F15-2 serisinde Fr_1 değerleri 1,1 MPa 'dır. F10-2 ve F15-2 serilerinde $CMOD = 1,5-3,5$ mm aralığında değerler 0,9,-1,0 MPa 'dır. Nitekim moment hesaplama katsayısı F10-2 ve F15-2 serilerinde 0.18 çıkmış olup yakın performans göstermişlerdir.

Tablo 7.8.'de F10-3 değerleri ile Tablo 7.10.'da F15-3 değerleri karşılaştırıldığında, F10-3 serisinin çatlak öncesi dayanımı temsil eden LOP değeri 4,8 MPa iken F15-3 serisi için ise 4,6 MPa olarak ölçülmüş olup, %4 'lük bir azalış gözlemlenmiştir.

Çatlak sonrası davranışta F10-3 serisinin F15-3'e kıyasla daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. CMOD = 0,5 mm seviyesinde F10-3 serisinde ortalama Fr1 değeri 1,3 MPa iken F15-3 de Fr1 değeri 1,3 MPa 'dır. F10-3 serisinde CMOD = 1,5–3,5 mm aralığında 1,4,-1,6 MPa iken F15-3 serisinde bu değerlerin 1,3–1,4 MPa aralığına düşmüş artık dayanımın yaklaşık %10 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, F10-3 serisinde lif–matris etkileşiminin ve çatlak köprüleme mekanizmasının daha etkin çalıştığını, çatlak ilerlemesinin daha kararlı bir şekilde sınırlandığını göstermektedir. Nitekim moment hesaplama katsayısı F10-3 serisinde ortalama 0,26 iken F15-3 serisinde 0,24 değerindedir; bu da çatlak sonrası eğilme kapasitesinde yaklaşık %7 mertebesinde azalışa işaret etmiştir. Sonuç olarak, aynı dozajda geri dönüşüm granül oranı arttıkça performans F5-2, F10-2 de olduğu gibi performans azalmıştır.

Tablo 7.8. F10-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

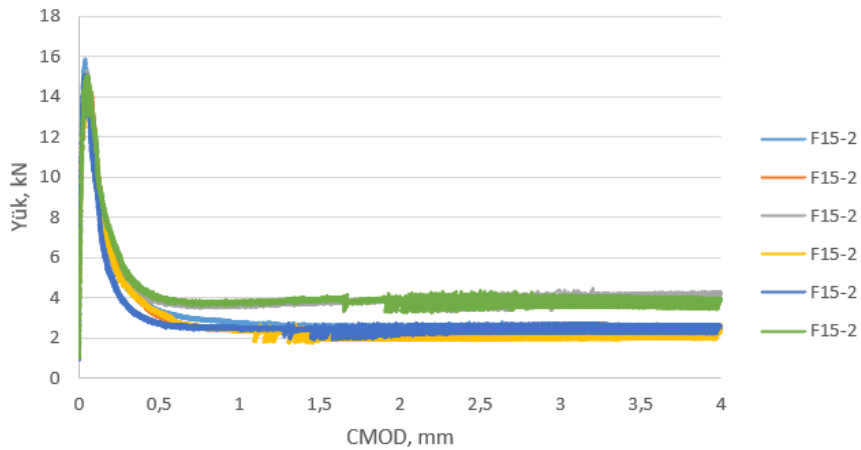
F10-3	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5mm Fr1, MPa	CMOD 1,5 mm Fr2, MPa	CMOD 2,5 mm Fr3, MPa	CMOD 3,5 mm Fr4, MPa	MHK
1	5,1	1,3	1,4	1,4	1,5	0,25
2	4,7	1,1	1,1	1,2	1,3	0,22
3	5,2	1,4	1,6	1,8	1,8	0,29
4	4,5	1,1	1,1	1,3	1,3	0,22
5	5,0	1,6	1,8	2,1	2,1	0,34
6	4,5	1,2	1,2	1,3	1,4	0,24
Ortalama	4,8	1,3	1,4	1,5	1,6	0,26
STD	0,31	0,19	0,29	0,35	0,32	0,05



Grafik 7.8. F10-3 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.9. F15-2 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F15-2	LOP	CMOD	CMOD	CMOD	CMOD	MHK
	F _{ct1} , MPa	0,5mm Fr ₁ , MPa	1,5 mm Fr ₂ , MPa	2,5 mm Fr ₃ , MPa	3,5 mm Fr ₄ , MPa	
1	5,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,17
2	4,7	1,0	0,8	0,8	0,8	0,16
3	4,9	1,2	1,2	1,3	1,3	0,23
4	4,8	1,1	0,8	0,7	0,8	0,17
5	4,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,16
6	4,8	1,3	1,2	1,3	1,3	0,23
Ortalama	4,9	1,1	0,9	1,0	1,0	0,18
STD	0,14	0,14	0,21	0,27	0,25	0,03



Grafik 7.9. F15-2 CMOD-Yük değişimi grafiği

Tablo 7.9.'da F15-2 değerleri ile Tablo 7.10.'da F15-3 numunelerinin değerleri karşılaştırıldığında, her iki serinin de çatlak oluşumu sonrası yük taşıma kapasitesini belirli bir

seviyede koruduğu, ancak artık dayanım düzeyleri ve çatlak açıklığına bağlı performanslarının belirgin biçimde farklılaştığı görölmektedir. Orantılık sınırı dayanımları incelendiğinde, F15-2 serisinin ortalama 4,9 MPa, F15-3 serisinin ise 4,6 MPa değerine sahip olduğu ve F15-2'nin yaklaşık %6–7 oranında daha yüksek başlangıç çekme dayanımı sunduğu belirlenmiştir. Bu durum, ilk çatlak öncesi davranış açısından F15-2'nin daha rijit ve kırılğan bir karakter sergilediğini göstermektedir. Ancak çatlak sonrası davranışa geçildiğinde tablo tersine dönmektedir.

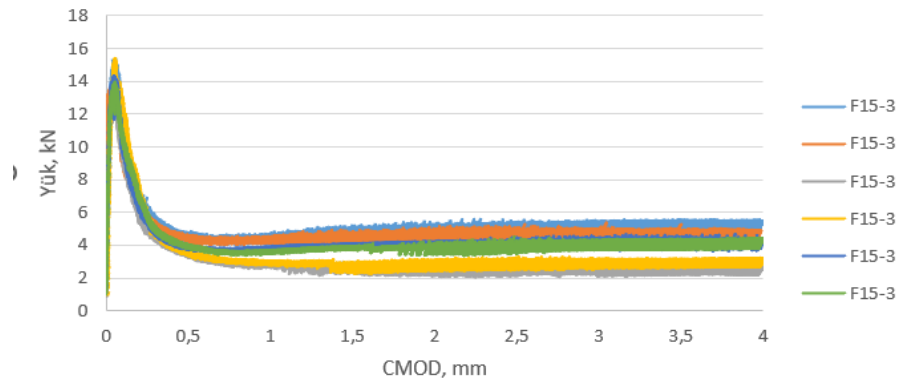
CMOD = 0,5 mm F_{r1} 'de F15-3 serisinin ortalama artık çekme dayanımı 1,3 MPa iken, F15-2 serisinde bu değer 1,1 MPa'dır; bu da F15-3'ün yaklaşık %18 daha yüksek bir çatlak sonrası taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu fark, CMOD arttıkça daha da belirgin hale gelmektedir. CMOD = 1,5 mm ve 2,5 mm seviyelerinde F15-3 serisinin CMOD = 1,5–3,5 mm değerleri sırasıyla ortalama 1,3 MPa- 1,4 MPa iken, F15-2 serisinde bu değerler yaklaşık 0,9–1,0 MPa aralığında kalmıştır. Özellikle CMOD = 3,5 mm'de F15-3 serisinin değeri %40 oranında daha yüksek bir artık dayanım sunduğu görölmektedir. Bu sonuçlar, F15-3 numunelerinde liflerin çatlak köprüleme mekanizmasını daha etkin biçimde sürdürdüğünü ve büyük çatlak açıklıklarında enerji yutma kapasitesinin belirgin şekilde arttığını ortaya koymaktadır.

Yük–CMOD eğrileri de bu bulguları desteklemektedir. F15-2 eğrilerinde, pik yük sonrası hızlı bir düşüş ve daha düşük seviyede azalan bir artık yük bölgesi gözlenirken, F15-3 eğrilerinde pik sonrası düşüşün daha sınırlı olduğu ve daha yüksek bir artık yük platosunun korunduğu görölmektedir. Bu durum, F15-3 serisinin daha sünek bir davranış sergilediğini ve çatlak ilerlemesi sırasında yük transferinin lifler aracılığıyla daha etkin biçimde sağlandığını göstermektedir. Ayrıca F15-3 serisinde moment hesaplama katsayısının ortalama 0,24 olması, F15-2 serisinin 0,18'lik değerine kıyasla yaklaşık %33 daha yüksek olup, eğilme altında çatlak sonrası moment taşıma kapasitesinin anlamlı ölçüde arttığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, F15-2 serisi daha yüksek orantılık sınırı dayanımı ile ilk çatlak öncesi performansta avantaj sağlarken, F15-3 serisi çatlak sonrası dayanım, süneklik ve enerji yutma kapasitesi açısından belirgin şekilde üstün bir davranış sergilemektedir. Bu bağlamda, servis yükleri altında çatlak kontrolünün ve yüksek deformasyon seviyelerinde taşıma kapasitesinin kritik olduğu yapısal uygulamalar için F15-3 lif içeriğinin daha uygun olduğu; buna karşılık erken yaş veya düşük deformasyon seviyelerinde rijitliğin ön planda olduğu durumlarda F15-2'nin yeterli bir performans sunabileceği değerlendirilmektedir. Bu da dozaj arttıkça performansın arttığını göstermektedir.

Tablo 7.10. F15-3 LOP, CMOD ve MHK değerler tablosu

F15-3	LOP Fctl, MPa	CMOD 0,5mm Fr1, MPa	CMOD 1,5 mm Fr2, MPa	CMOD 2,5 mm Fr3, MPa	CMOD 3,5 mm Fr4, MPa	MHK
1	4,9	1,5	1,6	1,7	1,8	0,30
2	4,4	1,5	1,5	1,6	1,6	0,28
3	4,3	1,1	0,9	0,9	0,9	0,18
4	4,9	1,1	0,9	1,0	1,0	0,19
5	4,6	1,2	1,3	1,3	1,4	0,24
6	4,5	1,3	1,3	1,5	1,4	0,24
Ortalama	4,6	1,3	1,3	1,3	1,4	0,24
STD	0,25	0,18	0,29	0,33	0,34	0,06



Grafik 7.10. F15-3 CMOD-Yük değişimi grafiği

7.3. Çentikli Kiriş Testlerinden Moment Kapasitesinin Hesaplanması

EN14651 standardına uygun olarak yapılan kiriş testlerinden elde edilen F_{r1} ve F_{r4} değerleri elde edilmiştir. Güvenlik faktör katsayısı (γ_m) ve beton kalınlığı (h) olan bir saha betonunun elde edilen bu değerler kullanılarak EN 14651 kiriş testinde 0.5 mm de meydana gelen ortalama aksenal çekme dayanımı (σ_{r1}), EN14651 kiriş testinde 3.5 mm de meydana gelen ortalama aksenal çekme dayanımı (σ_{r4}), saha betonunun nihai moment kapasitesi (M_u) ve MHK hesaplanmıştır.

$$\sigma_{r1} = 0,45 \times F_{r1} \quad (7.1)$$

$$\sigma_{r4} = 0,37 \times F_{r4} \quad (7.2)$$

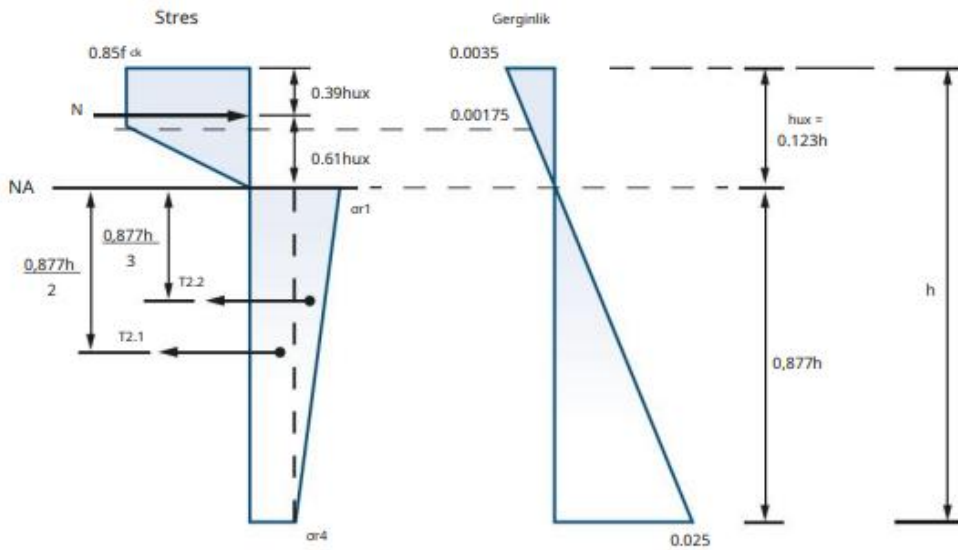
$$M_u = \frac{h^2}{\gamma_m} \times (0,29 \times \sigma_{r4} + 0,16 \times \sigma_{r1}) \quad (7.3)$$

Aynı saha betonunda güvenlik faktörü ve beton kalınlığı değişmeyeceğinden MHK aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$MHK = (0,29 \times \sigma_{r4} + 0,16 \times \sigma_{r1}) \quad (7.4)$$

Zemin kesitinde, nihai sınır durumunda, çatlağın ucundaki aksenal çekme dayanımının σ_{r1} olduğu ve çekme yüzeyinde (çatlağın açılması) üçgen şeklinde σ_{r4} olduğu varsayılır. Şekil 7.1.' de fiber takviyeli betondaki gerilim bloğu gösterilmiştir.

EN 14651 kiriş numunelerinden anlaşılacağı üzere geri dönüşüm granülü oranı arttıkça moment hesaplama katsayısı oranı azalmaktadır.



Şekil 7.1. Fiber takviyeli betondaki gerilim bloğu

Kaynak: (TR34- Concrete Industrial Ground Floors., 2016: 22)

Tüm denemelere ait ortalama Fr_1 , MPa değerleri Grafik 7.11.'de, ortalama Fr_4 , MPa değerleri Grafik 7.12.'de, ortalama MHK ise Grafik 7.13.'de gösterilmiştir

%0 geri dönüşüm oranına sahip numunelerde lif dozajının 2 kg/m^3 'ten 3 kg/m^3 'e çıkarılmasıyla birlikte tüm performans göstergelerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Ortalama Fr_1 değeri $1,4 \text{ MPa}$ ' dan $1,5 \text{ MPa}$ ' a yükselirken, bu artış erken çatlak sonrası rijitliğin ve lif-matris aderansının iyileştiğine işaret etmektedir. Daha çarpıcı bir artış ise Fr_4 değerinde görülmekte olup, $1,4 \text{ MPa}$ ' dan $1,9 \text{ MPa}$ ' a karşılık gelen yaklaşık %35'lik yükseliş, büyük çatlak açıklıklarında liflerin etkin köprüleme sağladığını ortaya koymaktadır. Buna paralel olarak moment hesaplama katsayısı $0,25$ 'ten $0,32$ 'ye yükselmiş, böylece eğilme altında çatlak sonrası moment taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, geri

dönüşüm içermeyen referans numunelerde lif dozaj artışının özellikle süneklik ve enerji yutma kapasitesi üzerinde son derece etkili olduğunu göstermektedir.

%5 geri dönüşüm oranına sahip numunelerde, 2 kg/m³ lif dozajında Fr₁ değeri 1,2 MPa seviyesinde kalırken, dozajın 3 kg/m³'e çıkarılmasıyla Fr₁ değeri 1,5 MPa' a yükselmiş ve yaklaşık %25'lik bir artış sağlanmıştır. Bu durum, sınırlı geri dönüşüm oranlarında lif miktarının artırılmasının erken çatlak sonrası taşıma kapasitesini telafi edici bir rol oynadığını göstermektedir. Fr₄ değerleri incelendiğinde ise 1,2 MPa' dan 1,8 MPa' a ulaşan artış, çatlak ilerlemesi boyunca liflerin çekip çıkma ve kopma mekanizmalarının daha etkin çalıştığını ortaya koymaktadır. Moment hesaplama katsayısının 0,22'den 0,30'a yükselmesi de bu yorumu desteklemekte olup, %5 geri dönüşüm oranında lif dozajının artırılmasıyla referans numunelere yakın hatta bazı açılardan karşılaştırılabilir bir eğilme performansı elde edildiği söylenebilir.

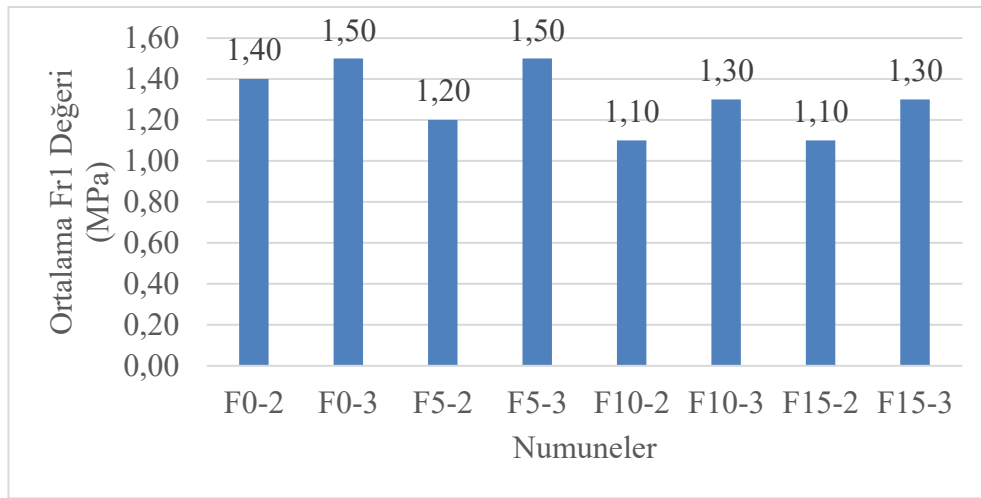
%10 geri dönüşüm oranına sahip numunelerde genel olarak dayanım seviyelerinde bir düşüş eğilimi gözlenmektedir. 2 kg/m³ lif dozajında Fr₁ değeri 1,1 MPa, Fr₄ değeri ise 1,0 MPa seviyesinde kalmış olup, bu durum geri dönüştürülmüş liflerin matrisle olan aderansının ve homojen dağılımının sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Ancak lif dozajının 3 kg/m³'e çıkarılmasıyla Fr₁ değeri 1,3 MPa' a, Fr₄ değeri ise 1,6 MPa' a yükselmiş ve sırasıyla yaklaşık %18 ve %60 oranında artış sağlanmıştır. Moment hesaplama katsayısındaki artış ise, yüksek geri dönüşüm oranına rağmen lif miktarının artırılmasının çatlak sonrası eğilme davranışını anlamlı ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, %10 geri dönüşüm oranında lif dozajı kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

%15 geri dönüşüm oranına sahip numunelerde, en düşük çatlak sonrası performans değerleri elde edilmiştir. 2 kg/m³ lif dozajında Fr₁ ve Fr₄ değerlerinin sırasıyla yaklaşık 1,1 MPa ve 1,0 MPa seviyelerinde kalması, geri dönüştürülmüş lif oranının artmasıyla birlikte lif-matris etkileşiminin zayıfladığını ve çatlak köprüleme etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Lif dozajının 3 kg/m³'e çıkarılması bu olumsuz etkiyi kısmen telafi etmiş; Fr₁ değeri 1,3 MPa' a, Fr₄ değeri ise 1,4 MPa' a yükselmiştir. Moment hesaplama katsayısının 0,18'den 0,24'e çıkması da bu iyileşmeyi doğrulamakla birlikte, elde edilen değerlerin %0 ve %5 geri dönüşüm oranlarına sahip numunelerin altında kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, yüksek geri dönüşüm oranlarında lif kalitesi ve yüzey özelliklerinin çatlak sonrası performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

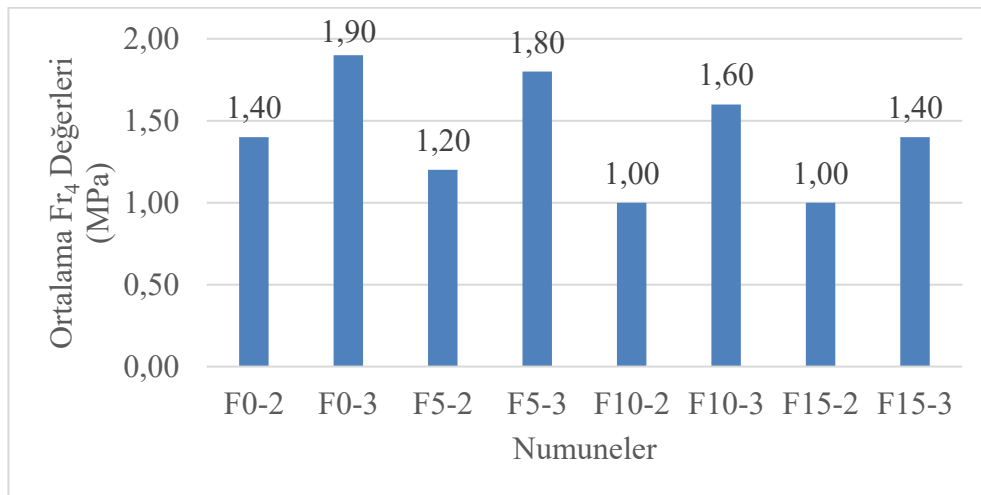
Tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde, lif dozajının artırılmasının her geri dönüşüm oranında çatlak sonrası dayanımı ve moment taşıma kapasitesini artırdığı; ancak geri

dönüşüm oranı arttıkça bu artışın sınırlı kaldığı görülmektedir. Düşük ve orta seviyedeki geri dönüşüm oranlarında (%0–%5), 3 kg/m³ lif dozajı ile yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesi elde edilirken, yüksek geri dönüşüm oranlarında (%10–%15) lif dozajı artışı performansı iyileştirse de referans seviyelere tam olarak ulaşamamaktadır.

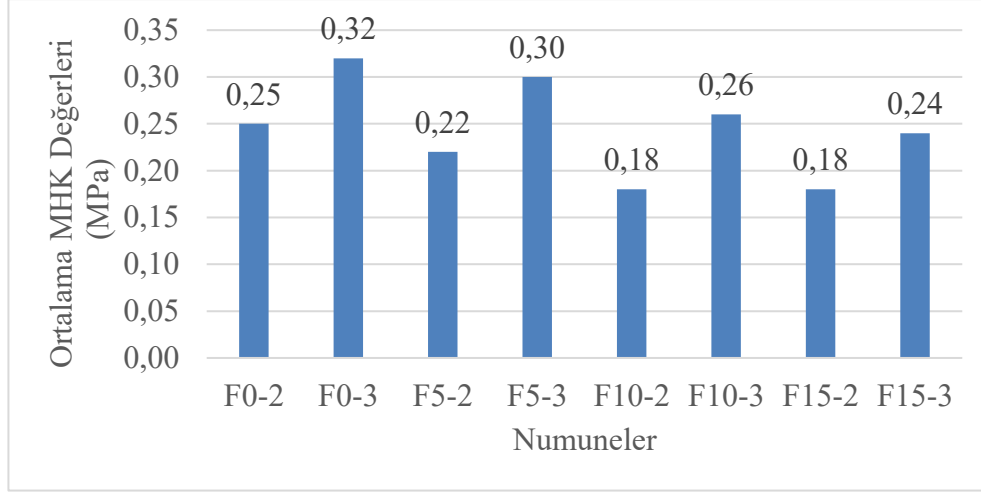
Bu çalışmada elde edilen çatlak sonrası dayanım ve moment hesaplama katsayısı sonuçları, lifli betonların eğilme elemanlarında servis ve nihai durum tasarımı açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır. EN 14651 kapsamında, özellikle Fr₁ değeri servis durumunu, Fr₄ değeri ise nihai durum davranışını temsil etmekte olup, bu parametreler lifli betonun donatıya katkı potansiyelinin değerlendirilmesinde temel kriterlerdir.



Grafik 7.11. Ortalama Fr₁, MPa değerleri



Grafik 7.12. Ortalama Fr₄, MPa değerleri

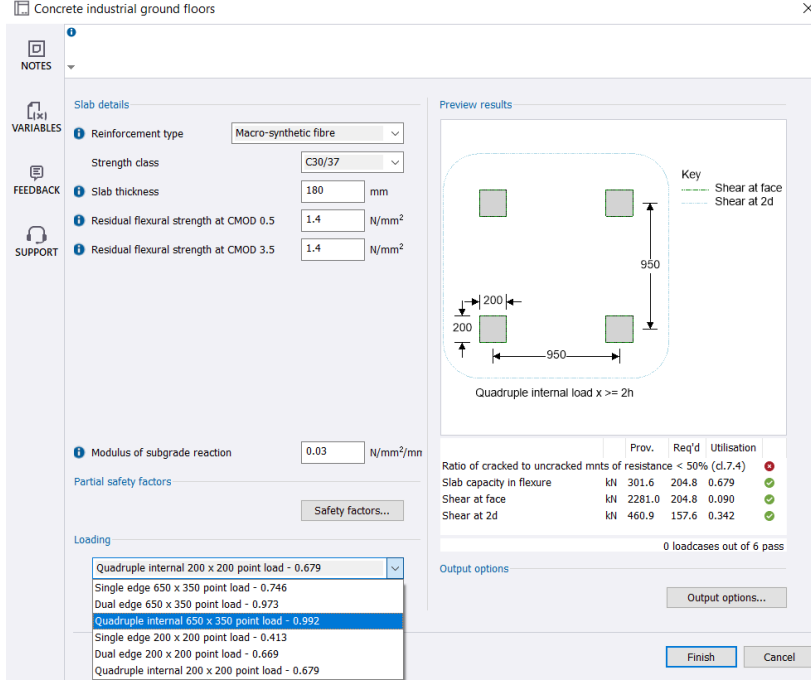


Grafik 7.13. Ortalama moment hesaplama katsayısı MPa değerleri

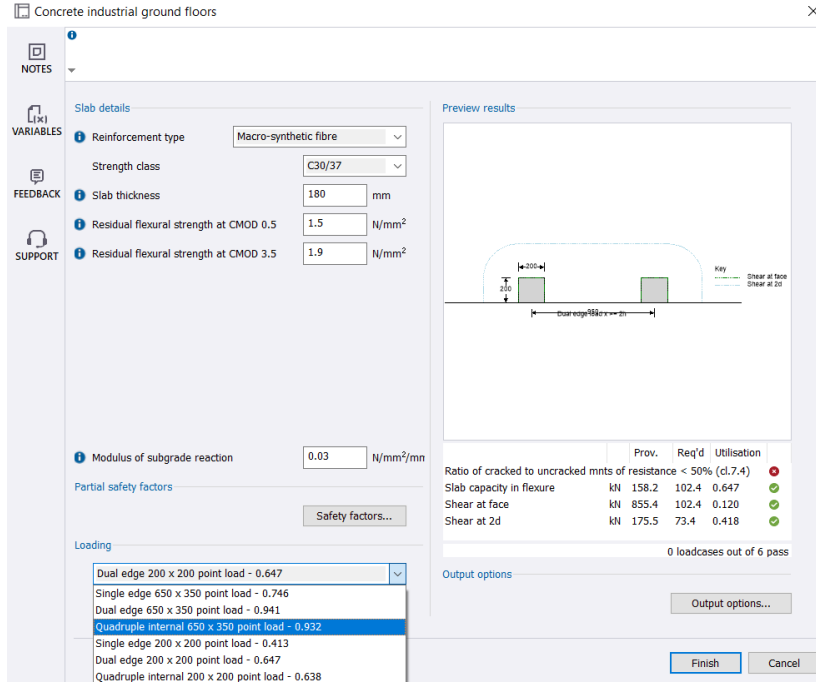
7.4. Tasarım Rehberine Göre Yapılan Hesapların Değerlendirilmesi

Numunelerden alınan sonuçlar Teknik Rapor 34 – Beton Endüstriyel Zemin Döşemeleri: Tasarım ve Uygulama Rehberine göre 150 kN/dingil yüküne sahip tır ve 64 kN/dingil yüküne sahip forklift yüklerine göre hesaplar yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Burada hesap yapılırken deneylerde kullanılan beton sınıfı ile aynı beton sınıfı (C30/37) kullanılmış olup beton yüksekliği 180 mm alınıp zemin yatak katsayısı 0.03 N/ mm³ alınarak hesaplar yapılmıştır. Hesaplarda yükün karşılanabilmesi için tasarım yükü etkisinin taşıma kapasitesine oranının birden küçük olması gerekmektedir.

F0-2 numunesinde $F_{r1} = 1,4$ MPa ve $F_{r4} = 1,4$ MPa değerleri iken, F0-3 numunesinde bu değerler $F_{r1} = 1,5$ MPa ve $F_{r4} = 1,9$ MPa değerlerine çıkmıştır. Şekil 7.2.'de F0-2 numunesi Teknik Rapor 34 – Beton Endüstriyel Zemin Döşemeleri: Tasarım ve Uygulama Rehberine göre yapılan hesaplara istinaden 150 kN/dingil yüküne sahip bir tır en kritik durumda 0.992 katsayısı ile yükü kurtarıken Şekil 7.3.'de F0-3 numunesi 0.941 ile kurtarmaktadır. İki numune de 64 kN/dingil yüküne sahip bir forklift yükünü karşılamaktadır.



Şekil 7.2. F0-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

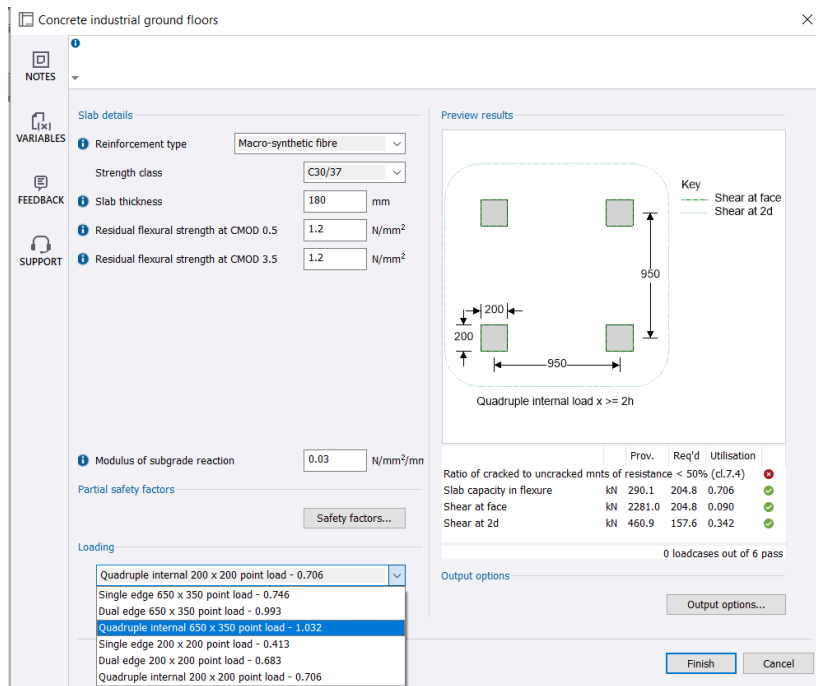


Şekil 7.3. F0-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

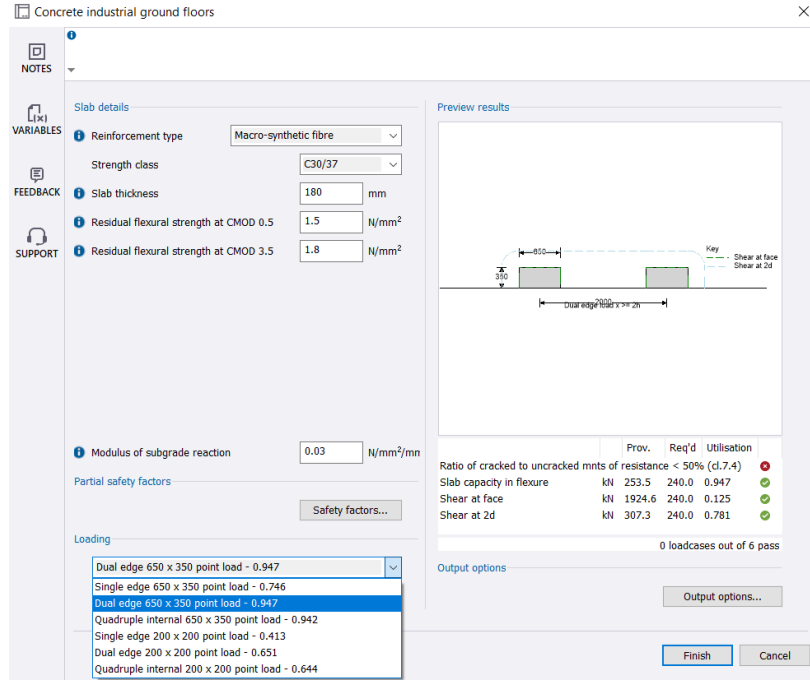
F0-2'de moment hesaplama katsayısı 0,25 iken F0-3'de elde edilen yüksek F_{r1} ve F_{r4} değerleri ile birlikte moment hesaplama katsayısının 0,32 seviyesine ulaşması dozajın artışı ile moment taşıma kapasitesinin artışı göstermektedir. Geri dönüşüm granülü kullanılmayan bu karışımlarda çatlak sonrası eğilme kapasitesinin yüksek olması sebebi ile liflerin kısmi veya tam donatı ikamesi amacıyla tasarımda dikkate alınabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda,

düşük geri dönüşüm oranlarında 3 kg/m^3 lif dozajında özellikle 150 kN/dingil yüküne sahip tır yükü bulunan endüstriyel zeminler, lojistik depoları, beton yollar vb. gibi yapıların saha betonlarında yapısal açıdan uygun bir çözüm sunmaktadır.

F5-2 numunesinde $Fr_1 = 1,2 \text{ MPa}$ ve $Fr_4 = 1,2 \text{ MPa}$ değerleri iken, F5-3 numunesinde bu değerler $Fr_1 = 1,5 \text{ MPa}$ ve $Fr_4 = 1,8 \text{ MPa}$ değerlerine çıkmıştır. Şekil 7.4.'de F5-2 'de 150 kN/dingil yüküne sahip bir tır en kritik durumda taşınması gereken yükü taşıyamayıp 1.032 ile kadar üzerinde kalmıştır. Şekil 7.5'de F5-3'de Fr_1 ve Fr_4 artışından dolayı gerekli yükü 0.947 ile karşılamaktadır. İki numune de 64 kN/dingil yüküne sahip bir forklift yükünü karşılamaktadır.



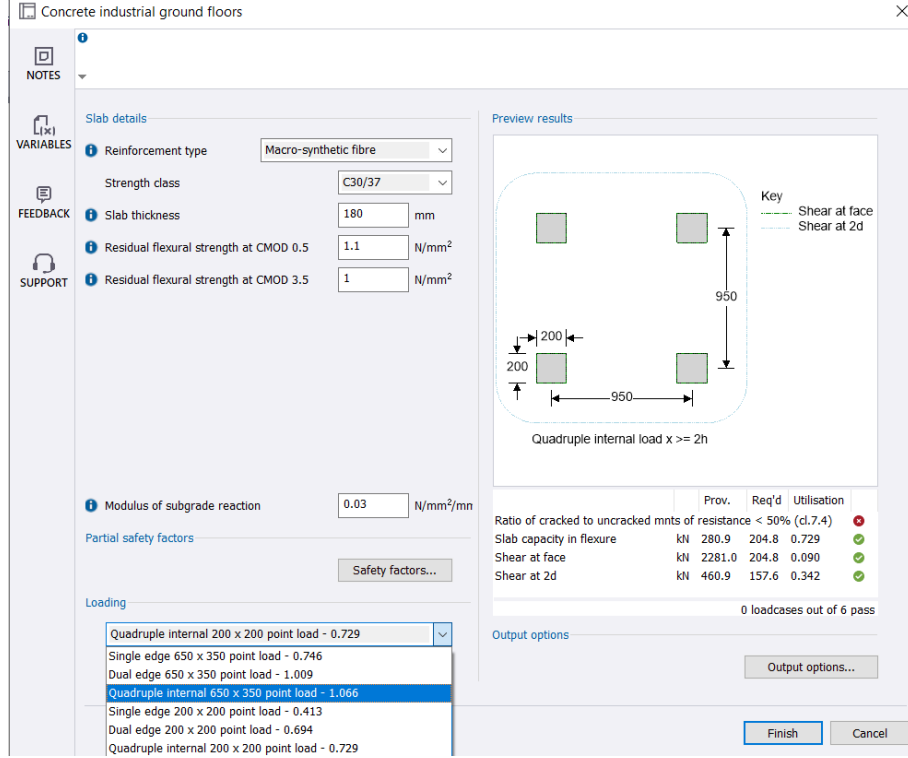
Şekil 7.4. F5-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri



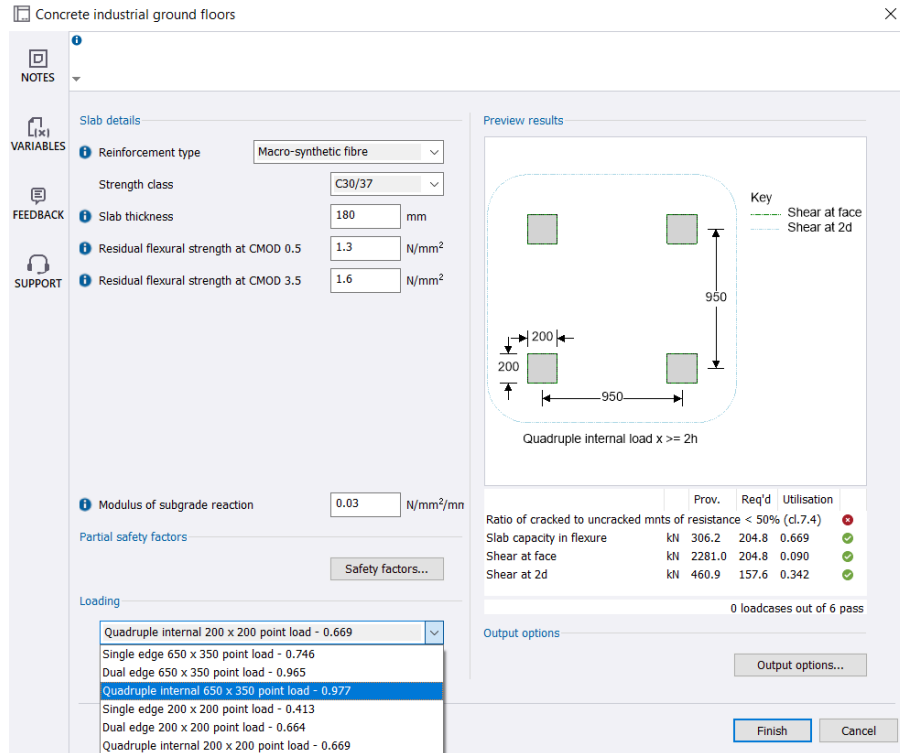
Şekil 7.5. F5-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

F5-2'de moment hesaplama katsayısı 0,22 iken F5-3'de elde edilen yüksek F_{r1} ve F_{r4} değerleri ile birlikte moment hesaplama katsayısının 0,30 seviyesine ulaşması dozajın artışı ile moment taşıma kapasitesinin artışı göstermektedir. Bu nedenle, %5 geri dönüşüm oranına sahip lifli betonların minimum 3 kg/m^3 dozajında çevresel sürdürülebilirlik hedefleri gözetilerek tır yükü bulunan belirli yapılarda güvenle kullanılabilirliği değerlendirilmektedir. 2 kg/m^3 dozajlarda ise forklift yükü bulunan yapılarda güvenle kullanılabilirliği göstermektedir.

F10-2 numunesinde $F_{r1} = 1,1 \text{ MPa}$ ve $F_{r4} = 1,00 \text{ MPa}$ değerleri iken, F10-3 numunesinde bu değerler $F_{r1} = 1,3 \text{ MPa}$ ve $F_{r4} = 1,6 \text{ MPa}$ değerlerine çıkmıştır. F10-2 numunesi Teknik Rapor 34 – Beton Endüstriyel Zemin Döşemeleri: Tasarım ve Uygulama Rehberine göre yapılan hesaplara istinaden Şekil 7.6.'da 150 kN/dingil yüküne sahip bir tır en kritik durumda 1.066 katsayısı ile yükü kurtarmamıştır. Şekil 7.7.'de F10-3 numunesi 0.977 ile sınır değerde kurtarmaktadır. Burada iki numune de 64 kN/dingil yüküne sahip yapılarda rahatlıkla kurtarmaktadır.



Şekil 7.6. F10-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

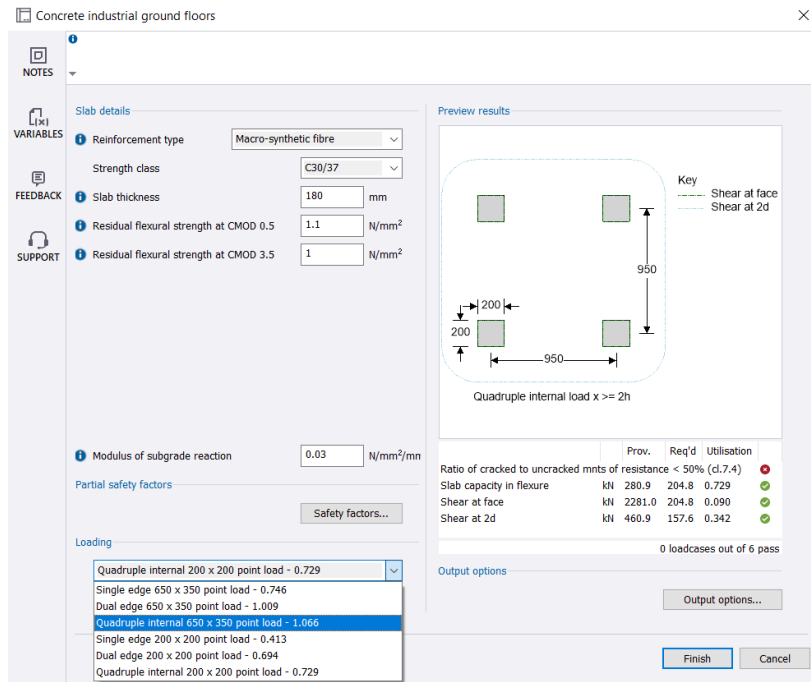


Şekil 7.7. F10-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

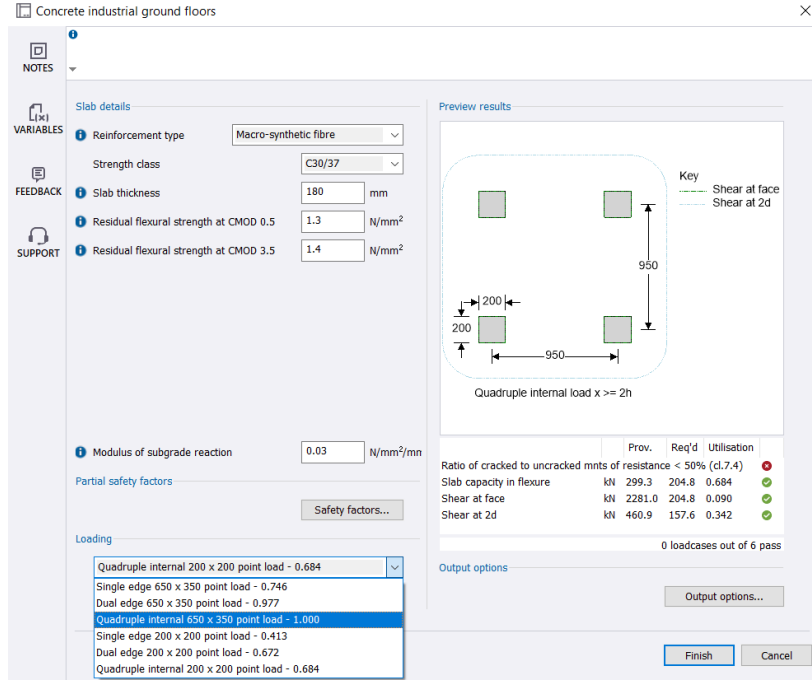
F10-2’de moment hesaplama katsayısı 0,18 iken F10-3’de elde edilen yüksek F_{r1} ve F_{r4} değerleri ile birlikte moment hesaplama katsayısının 0,26 seviyesine ulaşması dozajın artışı ile

moment taşıma kapasitesinin artışı göstermektedir. Bu sonuçlar, orta düzey geri dönüşüm oranlarında lif dozajının artırılmasının, lifli betonun çatlak sonrası yük taşıma kapasitesini ve eğilme sünekliğini tasarım açısından kabul edilebilir seviyelere taşıyabildiğini göstermektedir. Ancak bu tür karışımların, ağır yüke maruz kalan zeminlerden ziyade hafif yük trafiğine maruz kalan zeminlerde tercih edilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

F15-2 numunesinde $F_{r1} = 1,1$ MPa ve $F_{r4} = 1,0$ MPa değerleri iken, F15-3 numunesinde bu değerler $F_{r1} = 1,3$ MPa ve $F_{r4} = 1,4$ MPa değerlerine çıkmıştır. Şekil 7.8.'de F15-2 'de 150 kN/aks dingil yüküne sahip bir tır en kritik durumda taşınması gereken yükü taşıyamayıp 1.066 ile üzerinde kalmıştır. Fakat Şekil 7.9.'da F15-3'de her ne kadar F_{r1} ve F_{r4} artış olsa da gerekli yükü karşılamayıp 1.000 değerinde kalmıştır. İki numune de 64 kN/dingil yüküne sahip bir forklift yükünü karşılamaktadır.



Şekil 7.8. F15-2 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri



Şekil 7.9. F15-3 150 kN/dingil yükü ve 64 kN/dingil yükü hesaplama değerleri

F15-2'de moment hesaplama katsayısı 0,18 iken F15-3'de elde edilen yüksek F_{r1} ve F_{r4} değerleri ile birlikte moment hesaplama katsayısının 0,24 seviyesine ulaşmıştır. Moment hesaplama katsayısının en fazla 0,24 seviyesinde olması, yüksek geri dönüşüm oranlarının lif-matris aderansını olumsuz etkilediğini ve liflerin çatlak köprüleme etkinliğini sınırladığını göstermektedir. Tasarım açısından değerlendirildiğinde, %15 geri dönüşüm oranına sahip lifli betonlar tır yükünden ziyade sadece forklift yükü bulunan yapılarda kullanımı uygun görülmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Genel olarak, tasarım açısından bakıldığında lif dozajının artırılmasının çatlak sonrası dayanım ve moment taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici olduğu; ancak geri dönüşüm oranı arttıkça lifli betonun yapısal katkısının azaldığı görülmektedir. Bu kapsamda, düşük ve orta düzey geri dönüşüm oranları (%0–5) ile yüksek lif dozajı (3 kg/m³) kombinasyonunun, 150 kN/dingil tır yüküne sahip lifli betonun tasarımda donatı katkısı sağlayacak şekilde kullanılabilmesi açısından en uygun çözüm olduğu değerlendirilmektedir. %5 üzeri geri dönüşüm oranında ise hafif yük olan 64 kN/dingil forklift yüküne sahip yapılarda kullanımı uygun bulunmuştur.

PP lif üretimi sırasında oluşan firelerin yeniden granül haline getirilerek üretim sürecine dahil edilmesi, birincil polipropilen hammadde ihtiyacını azaltarak birim lif maliyetinde düşüş sağlamasından ve %5 geri dönüşüm oranında mekanik performansın tasarım kriterlerini karşılayabilmesi, maliyet ile yapısal güvenliğin birlikte sağlanabileceğinden teknik bulgularına ek olarak, geri dönüştürülmüş PP granül kullanımının ekonomik ve çevresel açıdan da önemli kazanımlar sağladığı değerlendirilmektedir.

Çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar çerçevesinde, geri dönüştürülmüş PP lifli betonların performansının yalnızca taşıma kapasitesi temelinde değil, çevresel etki ve uzun dönem dayanım kriterleri dikkate alınarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda, ilerleyen çalışmalarda hem Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) hem de durabilite temelli araştırmalara yer verilmesi gerekmektedir.

LCA yaklaşımı çerçevesinde, geri dönüştürülmüş PP granül içeren liflerin hammadde temini, üretim ve kullanım aşamalarını kapsayan sistem sınırları içerisinde incelenmesi önerilmektedir. Küresel ısınma potansiyeli, birincil enerji tüketimi ve karbon ayak izi gibi göstergeler üzerinden yapılacak karşılaştırmalı analizler ile geri dönüşüm oranının çevresel etkiler üzerindeki katkısı ortaya konulmalıdır. Bu doğrultuda, %0–5 geri dönüşüm oranı ve 3 kg/m³ lif dozajı kombinasyonunun yalnızca yapısal performans açısından değil, çevresel etki–performans dengesi bakımından da uygunluğu değerlendirilmelidir.

Durabilite bakımından ise geri dönüştürülmüş lifli betonların uzun dönem davranışının kapsamlı deneysel çalışmalarla belirlenmesi önerilmektedir. Lif–matris aderansındaki değişimlerin tekrarlı yükler, yorulma davranışı ve çatlak gelişimi üzerindeki etkileri incelenmeli; ayrıca aşınma direnci, darbe dayanımı, donma-çözülme etkisi ve kimyasal dayanım gibi parametreler değerlendirilmelidir. Mekanik performans sonuçlarının LCA ve

durabilite verileri ile birlikte ele alınması, geri dönüştürülmüş PP lifli betonların sürdürülebilir ve güvenilir bir yapı malzemesi olarak tasarım pratiğinde daha sağlıklı biçimde konumlandırılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- ACI Committee**, American Concrete Institute. *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*. America: American Concrete Institute. Kabul Temmuz 2018, 544.
- ACI Committee**, American Concrete Institute. *Report on Fiber Reinforced Concrete*. America: American Concrete Institute. Kabul Temmuz 2009, ACI 544.1R-96.
- ACI Committee**, American Concrete Institute. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. America: American Concrete Institute. Kabul 2002, ACI 544.1R-96.
- Aktürk, M. (2007)**. *Polipropilen Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2017)**. Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A review. *Waste Management*, 32(12), 1037–1055.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009)**. Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643.
- Andrady, A. L. (2011)**. Microplastics In The Marine Environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605.
- ASTM**, Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (1994). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. Kabul 12 Şubat 2025, ASTM C125-24.
- ASTM**, Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by The Pressure Method*. Kabul 01 Haziran 2022, ASTM C231/C231M.
- ASTM**, Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu. *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete*. Kabul 23 Ağustos 2023, ASTM C1116.
- ASTM**, Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu. *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement*. Kabul 22 Ekim 2019, ASTM C219-19.
- Beaudoin, J.J. (1990)**. *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete (Principles, Properties, Developments and Applications)*. Noyes Publications.
- Banthia, N. & Gupta, R. (2004)**. Influence of Polypropylene Fiber Geometry on Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 367–373.

- Bentur, A. & Mindess, S.** (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. CRC Press.
- Beyer, G.** (2000). *Polypropylene Handbook: Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications*. Hanser Verlag Publications.
- Bledzki, A. K., & Gassan, J.** (1999). Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274.
- Bouwmeester, H. P., Hollman, C., & Peters, R. J.** (2015). Potential Health Impact of Environmentally Released Micro- and Nanoplastics in the Human Food Production Chain: Experiences from Nanotoxicology. *Environmental Science & Technology*, 49(15), 8932-8947.
- BS EN**, British Standard. *Test Method for Metallic Fibre Concrete — Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual)*. İngiltere: İngiliz Standartı, Kabul 31 Mart 2008, BS EN 14651:2005 +A1:2007.
- Carbery, M., O'Connor, W., & Palanisami, T.** (2018). Trophic Transfer of Microplastics and Mixed Contaminants in The Marine Food Web and Implications for Human Health. *Environment International*, 115, 400-409.
- Concrete Society.** (2016). *Technical Report 34: Concrete Industrial Ground Floors* (4th ed.). The Concrete Society
- Çamlıbel, N.** (2010). Geleneksel Yapı Malzemeleri ve Koruma Sorunları. Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları.
- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C.** (2005). Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49–54.
- di Prisco, M., Plizzari, G., & Vandewalle, L.** (2009). Fibre Reinforced Concrete: New Design Perspectives. *Materials and Structures*, 42(9), 1261–1281.
- EFNARC**, European Federation of National Associations Representing for Concrete. Specification and Guidelines for Sprayed Concrete. UK: EFNARC, Kabul 11 Haziran 2025, Londra: EFNARC ENC 463.
- European Environment Agency (EEA).** (2020). *Plastics, The Circular Economy and Europe's Environment*. EEA Report No. 18/2020. [Erişim: 06.12.2025, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/plastics-the-circular-economy-and>].
- Erdal, M.** (2011). *Beton Teknolojisi ve Tasarımı*. Teknik Yayıncılık.

- Ersoy, H.Y. (2001).** *Kompozit Malzeme*. Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti.
- Gao, J., Sun, W., & Morino, K. (1999).** Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced, High Strength, Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 19, 307-313.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017).** Production Use and Fate Of All Plastics Ever Made. *Science Advances*, 3(7), 5.
- Golin, A. P., Choi, D., & Ghahary, A. (2021).** Hand Sanitizers: A Review of Ingredients, Mechanisms of Action, and Effectiveness Against Coronaviruses. *American Journal of Infection Control*, 49(1), 106–115.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009).** Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2115–2126.
- ISO, Uluslararası Standardizasyon Örgütü.** *Textiles — Yarns from Packages — Determination of Single-End Breaking Force and Elongation at Break Using Constant Rate of Extension (CRE) Tester*. İsviçre: Uluslararası Standardizasyon Örgütü, Kabul 01 Aralık 2009, ISO 2062.
- İskender, Ö., & Atmaca, S. A. (2024).** Plastik Atıkların Granül ve Elyaf Olarak Geri Dönüşümü. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 7(3), 31–35.
- Jackson, M. D. (2014).** *Roman Concrete: Engineering and Durability*. University of California Press.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., & Law, K. L. (2015).** Plastic Waste Inputs From Land Into The Ocean. *Science*, 347(6223), 768-771
- Johnston, C. D. (2001).** *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Kalifa, P., Menneteau, F. D., & Quenard, D. (2001).** Spalling and Pore Pressure In HPC at High Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499.
- Kocsis, J.K, & Tamas, B. (2019).** *Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites*. Springer.
- Karlsson, T., Kärrman, A., & Magnusson, K. (2023).** Sources and Pathways of Microplastics to The Environment. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114–128.

- Kılıçarslan, H. vd.** (2023). Beton Uygulamalarında Sentetik Fiber Donatıların Teknik ve Ekonomik Avantajları Hakkında., *Beton 2023 Kongresi Bildirisi*, s. 320-327.
- Korkut, F., Türkmenoğlu, Z. F., Taymuş, R. B., & Güler, S.** (2017). Effect of Steel and Synthetic Fibers on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 560-570.
- Kozak, M.** (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, 26-35. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3 (5), 26-35.
- Kumar, R., Kiran, B., Mishra, S., Bhatia, A., & Goel, S.** (2021). Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services and Climate Change. *Sustainability*, 13(17), 9963.
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K.** (2011). *A Review on Tertiary Recycling of High-Density Polyethylene to Fuel*. Resources, Conservation and Recycling, 55, 893–910.
- Latifi, M. R.** (2020). *Makro Sentetik Polipropilen Lif Kullanımının Beton Karışımlarının Taze ve Sertleşmiş Hal Özelliklerine Etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Lea, F. M.** (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4th ed.). Oxford: Elsevier.
- Li, V. C.** (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC): A review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215–230.
- Li, Z., Wang, L., & Wang, X.** (2006). Cement Composites Reinforced with Surface Modified Coir Fibers. *Journal of Composite Materials*, 40(13), 1177–1188.
- Mindess, S.** (2020). Developments in fiber reinforced concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(2), 65–78.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D.** (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Minke, G.** (2006). *Building With Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.
- Naaman, A. E.** (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 386–397.
- Neville, A. M.** (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A.** (2020). The Environmental Price of Fast Fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200.

- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD).** (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. [Erişim: 06.12.2025 <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>]
- Özcan, Z.** (2018). *Betonarme Elemanlarda Sentetik Makro Fiber Liflerin Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması*. 2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, s.955-961.
- Öztürk, M.** (2022). *AB'nin Atık İhracatının Ana Hedefi Türkiye Mi?* [Erişim Tarihi: 06.12.2025, [AB'nin atık ihracatının ana hedefi Türkiye mi? | Independent Türkçe](#)].
- Rochman, C. M., Browne, M. A., Halpern, B. S., Hentschel, B. T., Hoh, E., Karapanagioti H. K., Rios-Mendoza, L.M., Takada, H., Teh, S. & Thomson, R.C.** (2013). Classify Plastic Waste As Hazardous. *Nature*, 494(7436), 169–171.
- Sanchez, F., & Sobolev, K.** (2010). Nanotechnology in Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071.
- Savaşçı, Ö. T., Uyanık, N., & Akovalı, G.** (2002). *Plastikler ve Plastik Teknolojisi*. Pagev Yayınları.
- Shah, S. P. & Rangan, B. V.** (1969). Steel Fiber Reinforced Concrete. *Materials Science and Engineering*, 66(1), 45–52.
- Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y.** (2005). Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6–7), 504–512.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., & Cornell, S. A.** (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347(6223), 1–10.
- Taşdemir, M.A., Akçay, B., Yerlikaya, M., Bayramov, F. & Orhan, Ş.** (2025). *Lif Donatılı Betonların Evrimi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E. & Yerlikaya, M.** (2006). *Endüstriyel Zemin Betonları*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F.** (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (2nd ed.). McGraw-Hill.

- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davids, A., Rowland, J.S., John, A. W.G., McGonigle, D., & Russell, A. E.** (2004). Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, 304(5672), 838–838.
- Topçu, İ. B., & Uğurlu A.** (2006), Çelik Lifli Betonlara Farklı Kıvam Yöntemlerinin Uygulanması ve Bunlar Arasındaki İlişkiler, 7371-7378, *İMO Teknik Dergi*, 449(1), 7373.
- The Concrete Society.** (2013). *Concrete Industrial Ground Floors: A Guide to Design and Construction*. 4th Edition. The Concrete Society, Camberley.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Beton Agregaları.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 2003, Ankara: TS 706 EN 12620.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Beton Agregalarının Birim Ağırlık Tayini.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 1980, Ankara: TS 3529.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 1980, Ankara: TS 3526.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul 08 Nisan 2002, TS EN 12390-2.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Çelik Teller – Beton Donatısı Olarak Kullanılan Lif Teller – Tarifler, Sınıflandırma ve Şartlar.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 1992, TS 10513.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin Bölüm 2: Beton Katkılar-Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Ocak 2004, Ankara: TS EN 934-2.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Lifler- Betonda Kullanım İçin- Bölüm 2: Betona Etki.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 2006, Ankara: TS EN 14845-2.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Lifler- Betonda Kullanım İçin- Bölüm 2: Polimer Lifler-Tarifler, Özellikler ve Uygunluk.* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Aralık 2006, Ankara: TS EN 14889-2.
- TSE,** Türk Standartları Enstitüsü. *Metal Lifli Beton- Deney Yöntemi- Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini (Kalıcı orantısız sınır (LOP)).* Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Mayıs 2008, Ankara: TS EN 14651 + A1.

- TSE**, Türk Standartları Enstitüsü. *Püskürtme Beton- Deneyler: Bölüm 5: Lif takviyeli Plaka Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesinin Tayini*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Ekim 2006, TS EN 14488-5.
- TSE**, Türk Standartları Enstitüsü. *Taze Beton Deneyleri – Bölüm 2: Çökme Deneyi*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul Eylül 2019, TS EN 12350-2.
- Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB)** (2025). *Beton Nedir?* [Erişim: 21.04.2025, <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/beton-nedir/>].
- United Nations Environment Programme (UNEP)** (2018). *Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability*. [Erişim: 06.12.2025, [content](#)]
- United Nations Environment Programme**. (2023). *Sustainability and Circularity in The Textile Value Chain: A global Roadmap*. [Erişim: 27.02.2026, <https://www.unep.org/>]
- United Nations Environment Programme (UNEP)** (2025). *Plastic Pollution*. [Erişim: 13.11.2025, <https://www.unep.org/plastic-pollution>]
- Vilaplana, F., & Karlsson, S.** (2008). Quality Concepts for The Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(4), 904–934.
- Vitruvius**, (1960). *The Ten Books On Architecture*. (Çev) M. H. Morgan, Dover Publications.
- Wang, X., Li, H., & Chen, Y.** (2000). Effect of Fiber Length and Volume Fraction on Permeability and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 315–322.
- Williams, P. T.** (2013). *Waste Treatment and Disposal* (2nd ed.). Wiley.
- Williams, D. B., & Carter, C. B.** (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science* (2nd ed.). Springer.
- World Bank** (2021). *What a Waste 2.0: Global Snapshots of Solid Waste Management*. World Bank Publications.
- World Bank** (2023). *World Population Growth*. Retrieved from [Erişim: 14.11.2025, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>].
- Yağmur, E.** (2020). Lifli Betonlar İçin Elastisite Modülü Tahmini. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1098–1109.

- Yardımcı, M. Y.** (2007). *Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı*. (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yakışık, H.** (2023). Plastik Atıklar ve Sürdürülebilirlik: Türkiye’de Plastik Atık Yönetimi. *Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 9(2), 36–55.
- Yalçın, M., Taşdemir, C., Gökalp İ., Ekim, H. & Yerlikaya, M.** (2007). Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı, 7. *Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Gelişmeler ve Uygulamalar*, 31(1), 353-362.
- Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y., & Li, V. C.** (2007). Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Research*, 37(3), 475–483.
- Yıldırım, M.A** (1994). *Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Lif Kullanımının Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Yıldırım, S.T** (2002). *Lif takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması*. (Doktora Tezi.) Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M., & Sivakugan, S.** (2016). Comparative Evaluation of Virgin and Recycled Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 114, 134–141.