



**LİFLERİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
BETONLARIN ÖZELLİKLERİNE VE
KIRILMA ENERJİLERİNE ETKİSİ**

Zinnur ÇELİK

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı
Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL**

2019

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

LİFLERİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNE VE KIRILMA ENERJİLERİNE ETKİSİ

Zinnur ÇELİK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

ERZURUM
2019

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**LİFLERİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN ÖZELLİKLERİNE
ve KIRILMA ENERJİLERİNE ETKİSİ**

Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL danışmanlığında, **Zinnur ÇELİK** tarafından hazırlanan bu çalışma 18/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Malzemeleri Bilim Dalı’nda **Doktora Tezi** olarak **oybirliği/oy çokluğu (5./5.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr. Fahriye KILINÇKALE

İmza:

Üye: Prof.Dr. Şemsi YAZICI

İmza:

Üye: Prof.Dr. Remzi ŞAHİN

İmza:

Üye: Prof.Dr. Fatih SEVİM

İmza:

Üye: Doç.Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 16.05.2019 tarih ve 21./...24 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan alınan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

LİFLERİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN ÖZELLİKLERİNE VE KIRILMA ENERJİLERİNE ETKİSİ

Zinnur ÇELİK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Yüksek süneklik, enerji yutma kapasitesi ve çekme dayanımından dolayı lif takviyeli beton yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında, kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri, mekanik özellikleri, eğilme davranışı ve kırılma enerjileri üzerine liflerin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, beton karışımlarına hacimce %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30 oranlarında bazalt, cam ve polipropilen lifler ilave edilmiştir. KYB karışım serilerinin, taze beton özellikleri (çökme – yayılma çapı, V-hunisi akış süresi, bloklanma oranı) ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, KYB karışımına lif ilavesi eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını önemli ölçüde geliştirdiğini gösterirken, basınç dayanımında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Polipropilen lif kullanılan seriler, yük-yerdeğiştirme eğrisinde pik yük sonrası sünek davranış sergilerken, bazalt ve cam lifli seriler ise pik yük sonrası başarısız bir davranış göstermişlerdir. Çalışma kapsamında, RILEM TC 50-FMC standardına göre çentikli numunelerde, yük – CMOD eğrisi kullanılarak belirlenen en yüksek kırılma enerjisi değeri, kontrol numunesine oranla %316 oranında artış elde edilen PPF-0.30 serisinde meydana gelmiştir. En düşük kırılma enerjisi değerleri ise, kontrol numunesine kıyasla, %11 ile %44 oranları arasında artış elde edilen GF serilerinde gözlenmiştir. GF serilerinde lif oranının artmasıyla, kırılma enerjisinde belirgin bir artış tespit edilememiştir. BF serilerinde ise, kırılma enerjilerinde %17 ile %61 oranları arasında artış meydana gelmiştir. Ayrıca, RILEM TC 162-TDF'de önerilen farklı CMOD noktalarındaki eğilme yükü kullanılarak, eşdeğer ve artık eğilme dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

2019, 180 sayfa

Anahtar Kelimeler: Lifli beton, kendiliğinden yerleşen beton, işlenebilirlik, eğilme davranışı, kırılma enerjisi, eğilme dayanımı parametreleri, darbe dayanımı

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EFFECT OF FIBERS ON THE CHARACTERISTICS AND FRACTURE ENERGY OF SELF COMPACTING CONCRETE

Zinnur ÇELİK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Division of Construction Materials

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Fiber reinforced concrete is widely used because of its high ductility, energy absorption capacity and tensile strength. In this thesis, the effects of fibers on fresh concrete properties, mechanical properties, flexural behavior and fracture energy were investigated. In the study, basalt, glass and polypropylene fibers were added to the concrete mixes by 0.15%, 0.20%, 0.25% and 0.30% by volume. Fresh concrete properties (slump flow diameter, V-funnel flow time, blocking rate) and mechanical properties of SCC mix series were investigated. The results show that the addition of fiber to the SCC mixture significantly improves the flexural and splitting tensile strength, while no significant change in the compressive strength has been observed. The series with polypropylene fiber exhibited ductile behavior after the peak load in the load-displacement curve, whereas the basalt and glass fiber series showed an unsuccessful behavior after peak load. In the scope of the study, the highest fracture energy value determined by using load - CMOD curve in notched samples according to RILEM TC 50 - FMC standard was obtained in PPF-0.30 series which achieved a %316 increase compared to the control sample. The lowest fracture energy values were observed in the GF series with an increase of %11 to %44 compared to the control sample. With the increase of fiber ratio in GF series, no significant increase in fracture energy could be detected. In the BF series, fracture energy increased by between %17 and %61. Also, residual and equivalent flexural strength values were calculated from the bending load at CMOD deflection points recommended in RILEM TC 162-TDF.

2019, 180 pages

Keywords: Fiber concrete, self-compacting concrete, workability, flexural behavior, fracture energy, flexural strength parameters, impact resistance

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda destek ve yardımını asla esirgemeyen, aktardığı bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bir araya gelerek bilgi, fikir ve tecrübeleri ile önemli katkılar sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Remzi ŞAHİN'e ve Sayın Prof. Dr. Fatih SEVİM'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi hiçbir yardımdan kaçınmayan ağabeyim Sayın Doç. Dr. Semet ÇELİK'e şükranlarımı sunarım.

Ayrıca hayatımın her anında yanımda olan, bütün çalışmalarımda olduğu gibi yine destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli eşime ve aileme şükranlarımı sunarım.

Zinnur ÇELİK

Nisan 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Özetleri.....	3
1.1.1. Normal betonda kırılma enerjisi ile ilgili çalışmalar.....	3
1.1.2. Normal lifli beton ile ilgili çalışmalar	9
1.1.3. Kendiliğinden yerleşen beton ile ilgili çalışmalar	19
1.1.4. Kendiliğinden yerleşen lifli beton ile ilgili çalışmalar	24
1.1.5. Kendiliğinden yerleşen betonlarda kırılma enerjisi ile ilgili çalışmalar.....	33
2. KURAMSAL TEMELLER.....	41
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)	41
2.1.1. Kendiliğinden yerleşen beton tasarımı	42
2.1.2. Kendiliğinden yerleşen beton karışımını oluşturan malzeme özellikleri	46
2.1.3. Kendiliğinden yerleşen taze beton reolojisi ve ölçüm yöntemleri	53
2.1.4. KYB’nin reolojik özelliklerinin ölçüm yöntemleri ve kabul kriterleri	55
2.1.4.a. Çökme – yayılma ve T ₅₀₀ süresinin belirlenmesi test yöntemi.....	56
2.1.4.b. V – hunisi test yöntemi.....	57
2.1.4.c. L – kutusu test yöntemi	58
2.1.4.d. Elek ayrışma direnç testi	59
2.2. Lifli Beton	61
2.2.1. Lifli betonların mekanik davranışı	65
2.2.1.a. Basınç dayanımı	65
2.2.1.b. Çekme dayanımı.....	66
2.2.2. Çatlak oluşumu sürecinde lif köprülemesi	67
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Lifli Beton	68

2.4. Kırılma Mekaniği	70
2.4.1. Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM).....	70
2.4.1.a. Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı	71
2.4.1.b. Enerji dengesi yaklaşımı	74
2.4.2. Non -lineer elastik kırılma mekaniği.....	77
2.4.2.a. Fiktif çatlak modeli.....	79
2.4.2.b. Boyut etkisi modeli	81
2.4.2.c. İki parametrelili model.....	83
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	84
3.1. Materyal.....	84
3.1.1. Çimento	84
3.1.2. Uçucu kül	85
3.1.3. Kimyasal katkı.....	87
3.1.4. Lifler.....	87
3.1.5. Agregası	88
3.1.6. Karışım suyu.....	88
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler.....	89
3.2.1. Elekler	89
3.2.2. Betonyer	89
3.2.3. Kalıplar.....	89
3.2.4. Beton presi.....	90
3.2.5. Yarmada çekme ve darbe dayanımı ölçüm aletleri	90
3.2.6. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi ölçüm aleti.....	92
3.2.7. Kendiliğinden yerleşen taze beton deneylerinde kullanılan aletler.....	92
3.3. Yöntem	93
3.3.1. Agregası deney yöntemleri	94
3.3.2. Lifli KYB karışımlarının hazırlanması.....	94
3.3.3. Taze beton deney yöntemleri	94
3.3.3.a. Çökme – yayılma deneyi	94
3.3.3.b. V – hunisi deneyi.....	95
3.3.3.c. L – kutusu deneyi	96
3.3.4. Sertleşmiş beton deneyleri.....	97

3.3.4.a. Basınç dayanımı	97
3.3.4.b. Yarmada çekme dayanımı	98
3.3.4.c. Eğilme dayanımı	98
3.3.4.d. Darbe direnci	100
3.3.4.e. Kırılma enerjisi ve eğilme parametrelerinin belirlenmesi	100
3.3.5. Seçilen parametreler, seviyeleri ve beton karışım oranları	104
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	106
4.1. Agrega Deneyleri	106
4.2. Taze Beton Deney Sonuçları	107
4.2.1. Çökme – yayılma deney sonuçları	107
4.2.2. V – hunisi ve L – kutusu deney sonuçları	112
4.3. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	116
4.3.1. Basınç dayanımı sonuçları.....	116
4.3.2. Yarmada çekme deneyi sonuçları.....	126
4.3.3. Eğilme dayanımı ve tokluk indislerinin belirlenmesi.....	131
4.3.4. Darbe enerjisinin belirlenmesi.....	146
4.3.5. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı parametrelerinin belirlenmesi	152
5. SONUÇ.....	167
KAYNAKLAR	171
ÖZGEÇMİŞ	181

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

f_{cf}	Eğilme dayanımı
a_0	Çentik derinliği
A_1	Yük – CMOD eğrisinin, CMOD ₁ 'e kadar eğri altındaki alan
A_2	Yük – CMOD eğrisinin, CMOD ₂ 'ye kadar eğri altındaki alan
A_3	Yük – CMOD eğrisinin, CMOD ₃ 'e kadar eğri altındaki alan
C_f	Etkili kırılma bölgesi
d_1, d_2	Enkesit boyutları
d_f	Lif çapı
d_{max}	Maksimum agrega çapı
F	Yük
f_{ct}	Yarmada çekme dayanımı
$f_{eq, 2}$	CMOD ₂ noktasındaki eşdeğer eğilme dayanımı
$f_{eq, 3}$	CMOD ₃ noktasındaki eşdeğer eğilme dayanımı
$f_{fct, L}$	0,05 mm'lik CMOD açıklığına karşılık gelen eğilme dayanımı
$f_{R, 1}$	CMOD ₁ noktasındaki artık eğilme dayanımı
$f_{R, 4}$	CMOD ₄ noktasındaki artık eğilme dayanımı
G_f	Boyut etkisi yöntemiyle hesaplanan kırılma enerjisi
G_F	Kırılma enerjisi
K_I	Gerilme yoğunluk faktörü
L	Mesnet uzunluğu
l_{ch}	Karakteristik uzunluk
L_f	Lif uzunluğu
N	Darbe sayısı
$P_{L/150}$	L/150'de kalan yük
$P_{L/600}$	L/600'de kalan yük
P_p	Pik yük
T_{50}	Çökme –yayıma deneyinde 50 cm çapa ulaşma süresi
$T_{L/150}$	L/150'ye kadar yük sapma eğrisi altındaki alan
$T_{L/600}$	L/600'e kadar yük sapma eğrisi altındaki alan

V_f	Lif hacmi
δp	Pik yükte net sapma
σ	Gerilme

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute
ASTM C	American Society for Testing and Materials
CMOD	Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
CTOD	Çatlak ucu açılma deplasmanı
EDS	Enerji Dağılımı Spektroskopisi
EFNARC	The European Federation of National Associations Representing producers of specialist building products for Concrete
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği
LVDT	Lineer Değişkenli Diferansiyel Transformatör
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standartları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Normal beton ile KYB'nin tasarım parametreleri açısından karşılaştırılması.....	44
Şekil 2.2. Kendiliğinden yerleşebilir beton için temel yöntem.....	55
Şekil 2.3. Çökme – yayılma ve T_{500} deney düzeneği.....	57
Şekil 2.4. V – hunisi deney düzeneği.....	58
Şekil 2.5. L – kutusu deney düzeneği	59
Şekil 2.6. Değişik lif tipleri.....	63
Şekil 2.7. Agreganın maksimum boyutuna bağlı olarak liflerin dağılımı.....	64
Şekil 2.8. Çatlak köprüleme üzerine farklı boyutlardaki liflerin etkisi.....	65
Şekil 2.9. Tek eksenli çekme gerilmesi altındaki lifli betonda kırılma süreci üzerine liflerin etkisi	68
Şekil 2.10. Yük altında bulunan ve içinde boşluk içeren bir malzemede gerilme yığılması	71
Şekil 2.11. Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu	72
Şekil 2.12. Bir levhada oluşan çatlak.....	73
Şekil 2.13. Sabit bir çekme gerilmesine (σ) maruz bırakılmış sonsuz bir birim plaka	75
Şekil 2.14. Çentikli bir numunenin çekme durumundaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi	78
Şekil 2.15. Betonda kırılma bölgesindeki mekanizmalar	79
Şekil 2.16. Fiktif çatlak yaklaşımının temel prensibi	81
Şekil 2.17. Bazant'ın boyut etkisi teorisi.....	82
Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül.....	85
Şekil 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan lifler.....	88
Şekil 3.3. Basınç dayanımı ve elastisite modülü ölçümü deney aleti	90
Şekil 3.4. Yarmada çekme dayanımı ölçümü deney aleti.....	91
Şekil 3.5. Darbe dayanımı ölçümü deney aleti	91
Şekil 3.6. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi ölçümü deney aleti	92
Şekil 3.7. Kendiliğinden yerleşen betonda çökme yayılma deneyi uygulaması.....	95

Şekil 3.8. Kendiliğinden yerleşen betonda V - hunisi deneyi uygulaması	96
Şekil 3.9. Kendiliğinden yerleşen betonda L - kutusu deneyi uygulaması	97
Şekil 3.10. ASTM C 1609'a göre eğilme tokluk indisleri	99
Şekil 3.11. Çentikli kiriş numunenin geometrisi ve boyutları	101
Şekil 3.12. Çentikli numunelerde üç noktalı eğilme deneyinin uygulanışı	101
Şekil 3.13. RILEM TC 162-TDF'ye göre eğilme dayanımı parametreleri.....	102
Şekil 4.1. Lifsiz kontrol numunesinin yayılma formu	108
Şekil 4.2. Lifsiz ve cam lifli KYB karışımlarının çökme–yayılma çaplarının karşılaştırılması.....	109
Şekil 4.3. Lifsiz ve bazalt lifli KYB karışımlarının çökme–yayılma çaplarının karşılaştırılması.....	110
Şekil 4.4. Lifsiz ve polipropilen lifli KYB karışımlarının çökme–yayılma çaplarının karşılaştırılması.....	111
Şekil 4.5. Lifsiz ve cam lifli KYB karışımlarının V – hunisi ve bloklanma oranı sonuçları	113
Şekil 4.6. Lifsiz ve bazalt lifli KYB karışımlarının V–hunisi ve bloklanma oranı sonuçları	114
Şekil 4.7. Lifsiz ve polipropilen lifli KYB karışımlarının V–hunisi ve bloklanma oranı sonuçları	115
Şekil 4.8. Bazalt lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri	117
Şekil 4.9. Bazalt lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü	120
Şekil 4.10. Cam lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri	120
Şekil 4.11. Cam lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü.....	122
Şekil 4.12. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri.....	122
Şekil 4.13. Polipropilen lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü.....	124
Şekil 4.14. Bazalt lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri	127
Şekil 4.15. Cam lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri	128
Şekil 4.16. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri.....	129
Şekil 4.17. Bazalt lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri.....	132
Şekil 4.18. Bazalt lifli serilerin deney sonrası görünümleri.....	134
Şekil 4.19. Cam lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri	134

Şekil 4.20. Cam lifli serilerin deney sonrası görünümleri	135
Şekil 4.21. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri	136
Şekil 4.22. Polipropilen lifli serilerin deney sonrası görünümleri	137
Şekil 4.23. Bazalt lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri.....	138
Şekil 4.24. Cam lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri	138
Şekil 4.25. BF- 0.30 serisinin eğilme dayanım deneyi sonrası görünümü	139
Şekil 4.26. Polipropilen lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri	140
Şekil 4.27. PPF- 0.30 serisinin eğilme dayanım deneyi sonrası görünümü.....	141
Şekil 4.28. Kontrol, BF-0.15, GF-0.15 ve PPF-0.15 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri	143
Şekil 4.29. Kontrol, BF-0.20, GF-0.20 ve PPF-0.20 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri	144
Şekil 4.30. Kontrol, BF-0.25, GF-0.25 ve PPF-0.25 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri	144
Şekil 4.31. Kontrol, BF-0.30, GF-0.30 ve PPF-0.30 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri	145
Şekil 4.32. Polipropilen lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları.....	148
Şekil 4.33. Bazalt lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları	148
Şekil 4.34. Cam lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları.....	149
Şekil 4.35. PPF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri	150
Şekil 4.36. BF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri	150
Şekil 4.37. GF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri.....	151
Şekil 4.38. Bazalt lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri.....	153
Şekil 4.39. Cam lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri	153
Şekil 4.40. Polipropilen lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri	154
Şekil 4.41. Lifli karışımların tokluk değerleri	158
Şekil 4.42. Lif türü ve oranının eğilme dayanımı parametrelerine etkisi	159
Şekil 4.43. Karışım numunelerine ait kırılma enerjisi değerleri.....	160
Şekil 4.44. BF-0.15, GF-0.15 ve PPF-0.15 serilerine ait yük – CMOD eğrileri	161
Şekil 4.45. BF-0.20, GF-0.20 ve PPF-0.20 serilerine ait yük – CMOD eğrileri	162
Şekil 4.46. BF-0.25, GF-0.25 ve PPF-0.25 serilerine ait yük – CMOD eğrileri	162
Şekil 4.47. BF-0.30, GF-0.30 ve PPF-0.30 serilerine ait yük – CMOD eğrileri	163

Şekil 4.48. PPF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü	165
Şekil 4.49. BF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü	165
Şekil 4.50. GF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü.....	166



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. KYB karışım bileşenlerinin tipik aralığı.....	45
Çizelge 2.2. Mineral katkı malzemelerinin su ile reaksiyon kapasitelerinin sınıflandırılması	47
Çizelge 2.3. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları	50
Çizelge 2.4. Uçucu küllerin kimyasal özelliklerinin uygunluk kriterleri	51
Çizelge 2.5. Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin uygunluk kriterleri....	51
Çizelge 2.6. KYB'yi değerlendirmek için test özellikleri ve yöntemleri	56
Çizelge 2.7. KYB sınıfları ve uygunluk kriterleri.....	60
Çizelge 2.8. Çeşitli uygulama türleri için KYB'nin reolojik özellikleri	61
Çizelge 2.9. Çeşitli lif türlerinin özellikleri	62
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	84
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel - mekanik özellikleri.....	85
Çizelge 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri	86
Çizelge 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün fiziksel - mekanik özellikleri.....	86
Çizelge 3.5. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri	87
Çizelge 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	87
Çizelge 3.7. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları ve tasarım parametreleri	105
Çizelge 4.1. Kendiliğinden yerleşen taze beton özellikleri.....	107
Çizelge 4.2. KYB karışımlarına ait basınç dayanımı deney sonuçları	117
Çizelge 4.3. KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları	126
Çizelge 4.4. KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı deney sonuçları.....	131
Çizelge 4.5. Lifli karışımlara ait tokluk indisleri.....	142
Çizelge 4.6. KYB karışım serilerine ait darbe dayanımı deney sonuçları	147
Çizelge 4.7. Üç noktalı eğilme deneyinde elde edilen veriler	152
Çizelge 4.8. Üç noktalı eğilme deneyinde elde edilen eğilme dayanımı parametrelerinin ve kırılma enerjisi değerleri	156

1. GİRİŞ

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde ise mineral ve kimyasal katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir (Erdoğan 2013). Beton, yapı malzemeleri arasında ayrıcalıklı bir konuma sahiptir ve yapılarda bir asırdan fazla süredir ana yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Geleneksel betonun birçok olumlu özelliğine rağmen, bazı durumlarda istenilen özelliklerin elde edilmesinde yetersiz kalınmasından dolayı, özel beton türlerine gereksinim duyulmuştur. Örneğin, 1983 yılından başlamak üzere birkaç yıl boyunca, beton yapıların dayanıklılığı Japonya'da önemli sorun haline gelmiştir. Dayanıklı beton yapıların oluşturulması için betonun yeterince sıkıştırılması gerektiği ve bunun içinde vasıflı işçilere ihtiyaç olduğu bilinmekteydi. Bu kapsamda, 1980'li yılların ortalarında Japonya'da, sık donatılı ve dar kesitlere vibrasyon gerektirmeden, kendi ağırlığı altında akabilen özel bir beton türü olan kendiliğinden yerleşen beton teknolojisi geliştirilmiştir (Okamura and Ouchi 1999). Bu olumlu özelliklerine ilaveten, Kendiliğinden Yerleşen Beton inşaat uygulamalarında, işçilik maliyetini ve inşaat süresini azaltma, gürültü kirliliğinin ortadan kaldırma gibi birçok faydalar sunmaktadır (Baradan vd 2012). Uluslararası literatürde KYB, Self - compacting, Self – levelling ve Self – consolidating olarak isimlendirilmektedir.

Kendiliğinden Yerleşen Betonun (KYB), kendi ağırlığı altında akabilmesi için gerekli olan yüksek akıcılığın yanında ayrışma ve terleme gibi olumsuz beton özelliklerine karşıda dirençli olmalıdır. Bu nedenle, geleneksel betona kıyasla, KYB'de kimyasal ve mineral katkıların kullanılması gerekmektedir. KYB'de, yüksek akıcılık, betonun su miktarını arttırmaksızın, süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak düzenlenir. KYB karışımının viskozitesini arttırarak, KYB karışımının taşınması ve yerleştirilmesi sırasında artan akışkanlıktan kaynaklanan segregasyon ve terlemelerin üstesinden gelinebilir. Bu, genellikle yüksek hacimli bir hamur kullanılarak, maksimum agrega büyüklüğünü sınırlandırarak veya viskozite arttırıcı katkı maddeleri kullanarak sağlanır (Khayat 1999).

Beton, yüksek basınç dayanımı, düşük çekme ve enerji yutma kapasitesine veya tokluğuna sahip gevrek bir yapı malzemesidir (Jiang *et al.* 2014). Betona çeşitli tiplerde liflerin eklenmesi, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve enerji yutma ile süneklik, tokluk ve çatlama kapasitesi gibi mühendislik özelliklerini önemli ölçüde geliştirilebilir (Arslan 2016). Betonda lif kullanımının en önemli amaçları arasında, eğilme altında betonda çatlakların oluşumunu ve yayılmasını geciktirmek ve çatlak oluştuğundan sonra da köprüleme görevi yaparak sünek bir davranış sergilemesini sağlamaktır (Yazıcı *et al.* 2007). Beton teknolojisinde, çelik, polipropilen, cam, bazalt, karbon vs gibi değişik türlerde ve farklı uzunluk ve görünüm oranlarında (lif boyu/lif çapı) lifler kullanılmaktadır.

KYB, geleneksel betona kıyasla toplam agrega miktarının az olması, iri agrega miktarının ve çaplarının daha düşük olması, düşük su/bağlayıcı malzeme oranından dolayı daha gevrek bir yapıdadır (Baradan vd 2012). KYB’de lif kullanımının, geleneksel betonda olduğu gibi eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi betonun temel özelliklerini olumlu yönde etkileyeceği önceki çalışmalardan bilinmektedir (Yazıcı *et al.* 2007; Mazaheripour *et al.* 2011; Mastali *et al.* 2017; Algın and Ozen 2018).

Ancak, lif ilavesinin, betonun bazı mekanik özellikleri üzerinde olumlu etki oluşturmaya rağmen, taze betonun işlenebilirlik ve akıcılık gibi özelliklerini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu durum, kullanılan lif türüne, miktarına, boyutlarına ve lif boyunun, çapına oranı olarak ifade edilen görünüm oranı tarafından etkilenmektedir. Lifli betonların, homojen lif dağılımının sağlanması, etkili sıkıştırmanın sağlanarak hapsolmuş hava boşlukları riskinin azaltılması için, yerleştirmeyi kolaylaştıracak ve vibrasyon ihtiyacını azaltacak şekilde yeterince akıcı olarak tasarlanması gerekmektedir (Khayat and Roussel 2000; Yardımcı 2007).

Literatürde, genellikle çelik lifli KYB’lerle ilgili çalışmalara yoğunlaşmış olup; diğer lif türlerine ait çalışmalar sınırlı sayıdadır. Özellikle lifli KYB’lerde pik yük sonrası eğilme davranışı, RILEM TC 162 – TDF standardında belirtilen eğilme parametreleri ve tokluğu, darbe ve kırılma enerjileri ile ilgili literatürde boşluk bulunmaktadır. Bu nedenlerden

dolayı, tez çalışması kapsamında, bazalt, cam ve polipropilen lifler kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton karışımları üretilmiştir. Hazırlanan karışımlar üzerinde kendiliğinden yerleşebilirlik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, basınç, eğilme, yarmada çekme, darbe dayanımı ve eğilme parametreleri ile kırılma enerjisi gibi mekanik özellikler üzerine kullanılan lif türlerinin etkisi araştırılmıştır.

1.1. Kaynak Özetleri

1.1.1. Normal betonda kırılma enerjisi ile ilgili çalışmalar

Barr *et al.* (1986), numune kesitleri ve iri agrega boyutunun, normal ve lif takviyeli betonun kırılma tokluğu ve tokluk indeksi üzerindeki etkisine ilişkin deneysel çalışma yapmışlardır. Deneyler, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulan çentikli ve çentiksiz kırışlar ile kompakt basınç testine tabi tutulan numuneler vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem polipropilen hem de çelik lif takviyeli betonlarda 5, 10 ve 20 mm'lik iri agrega boyutundan yararlanılmıştır. Son dönemde yapılan çalışmaların aksine, kırış numunelerinden elde edilen kırılma tokluğu sonuçlarının, iri agrega boyutundan bağımsız olduğu yargısına varılmıştır. Sıkıştırılmış basınç testi uygulanan numunelerde, 10 mm agrega ile üretilen beton karışımları için maksimum kırılma tokluğu, 20 mm agrega ile üretilen beton karışımlarında ise minimum tokluk değerleri elde edilmiş olup; yine bu sonuçlarında diğer yayınlanmış sonuçlarla çatıştığı belirtilmiştir. Deneylerde kullanılan numune boyutlarındaki artış ile kırılma tokluğu değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Çelik lif takviyeli betonun tokluk indeksinin, aynı lif hacmine sahip polipropilen lif takviyeli betona göre yaklaşık iki katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Wolinski *et al.* (1987) çalışmalarında, maksimum agrega büyüklüğünün ve yükleme türünün, kırılma mekaniği parametreleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada statik ve çevrimli yükleme altında deformasyon kontrollü tek eksenli çekme testlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar, kırılma mekaniği parametrelerine agrega parçacık boyutunun etkisinin olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, sonuçların iki gruba ayrılabilceği; bunlardan biri maksimum agrega boyutu 2 ile 4 mm olan karışımlar

ve diğerinin ise maksimum agrega boyutu 8 ile 32 mm. arasında olan karışımlar olduğu açıklanmıştır. Bu gruplar arasında önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Zhou *et al.* (1995) çalışmalarında, 80 ile 115 MPa aralığında basınç dayanımına sahip, yüksek mukavemetli betonların (su bağlayıcı oranları 0.32 ve 0.23) kırılma mekaniği üzerine araştırma yapmışlardır. 100x100x500 ebadında kiriş numunelerde, 10 mm çakıl, 10 mm ile 20 mm kırılmış kireç taşı ile birlikte, çimento miktarının %10 ve %15 oranında silis duman ile yer değiştirilmiş içerikler kullanılmıştır. Her bir karışım içeriği için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, Young Modülü, K_{Ic} ve $CTOD_c$ belirlenmiştir. Silis dumanı içeriğini %10'dan %15'e artırılması, su bağlayıcı oranının yüksek olduğu betonların mekanik özellikleri üzerinde daha etkili olduğu belirtilmiştir. 20 mm kırılmış kireç taşı ile üretilen betonların, 10 mm kırılmış kireç taşı ve çakıldan üretilen betonlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değeri verdiği sonucuna varılmıştır. Agrega boyutu ve sertliği arttıkça kırılma enerjisinin arttığı ve K_{Ic} 'nin ise artan basınç dayanımına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Karakteristik uzunluğun (l_{ch}), yüksek dayanımlı betonun kırılmalığının iyi bir ölçümü olduğu yargısına varılmıştır.

Amparano *et al.* (2000), betonun kırılma davranışı üzerine, agrega içeriğinin etkilerini inceleyen deneysel çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada, 48 adet geometrik olarak benzer olan beton kirişler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Betonun kırılma davranışının iki parametre (kırılma enerjisi G_f ve etkili kırılma bölgesi c_f) ile karakterize edildiği boyut etkisi metodu kullanılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Test sonuçları, agrega hacminin %45-75 aralığında arttırıldığında; (1) betonun basınç dayanımının hafifçe azaldığı (%15 oranında) ve pratik olarak sabit olduğu düşünülmüştür; (2) kırılma enerjisi G_f %0 - 25 aralığında değişiklik gösterdiği ve maksimum G_f yi veren kritik hacim fraksiyonunun olmadığı; ve (3) kırılma proses bölgesinin boyutunun azaldığı sonuçları elde edilmiştir. Beton basınç dayanımının azalması betonun zayıf bölgesi olan agrega arayüz bölgesindeki geçiş zonundan kaynaklandığı belirtilmiş ki; eklenen agrega miktarının bileşimi güçlendirdiği ancak bahse konu geçiş bölgesini zayıflatıldığı yargısına varılmıştır.

Kırılma enerjisi G_f artan agregâ içeriği ile azaldığı ve agregâ içeriğinin %65 olması ile minimum değere ulaştığı bu değerdan sonra tekrar arttığı sonucuna varılmıştır.

Çeşitli su/çimento oranlarında ($w/c=0.33, 0.43, 0.53$ ve 0.63) doğal çakıl agregâsından yapılmış, silis dumanı içeren veya içermeyen beton karışımları için kırılma tokluğu Prokopski and Langier (2000) tarafından incelenmiştir. Gerilme yoğunluğu faktörü K_{Ic}^S 'nin kritik değeri ile çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri olan $CTOD_c$ belirlenmiştir. Gerilme yoğunluğu faktörünün (K_{Ic}^S) en büyük değeri, silis dumanı ilaveli olan ve olmayan, en düşük su/çimento oranına sahip karışımlarda gözlenmiştir. Bu durum, mikro yapı testlerinde de gözlemlendiği gibi agregâ-çimento macunu geçiş bölgesindeki gözenekliliğinin düşük olmasına ve az sayıdaki yapısal kusurlarla beton karışımının kompakt bir yapıya sahip olduğuna bağlanmıştır. Su/çimento oranı arttıkça, agregâ-çimento macunu geçiş bölgesindeki yapısal gözeneklilikte bir artış meydana geldiği ve bu da çatlakların ilerlemesine neden olduğundan, daha düşük gerilme yoğunluk faktörü K_{Ic}^S 'nin elde edilmesine yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Agregâ-matris arayüzü, kırılma mekanizmalarında ve betonun kırılma tepkisinde öncü rol oynamaktadır. Guinea *et al.* (2002) çalışmalarında çimento ve agregâ ara yüzeyinin betonun kırılma parametreleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Aynı taş ocağından farklı türde kırılmış ya da yuvarlak şekilli agregalar kullanılmış ve matris ile parçacıklar arasındaki bağın iyileştirilmesi ya da bozulması için birkaç yüzey işlemi uygulanmıştır. Beton serilerinin kırılma enerjisi ile diğeri kırılma parametrelerini belirlemek için kırılma testleri (üç noktalı eğilme testleri ve Brezilya bölme testleri) gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, parçacıkların şekline bağlı olarak ara yüzeyin mukavemetinin kırılma enerjisini etkilediği ve kırılmış agregâlardan üretilen beton numunelerinde daha yüksek kırılma enerjisi elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca Xiao *et al.* (2004) çalışmalarında betonun kırılma işlem bölgesinin iri agregânın boyut ve şekline bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kırılmış agregânın düzensiz şeklinden dolayı yuvarlak agregaya göre agregâ ve matris arasında daha fazla etkileşime neden olacağı ve daha güçlü aderansa yol açarak kırılma enerjisini artıracakđı yargısına varılmıştır.

Chen and Liu (2004) çalışmalarında, agreganın betonda önemli bir bileşen olduğunu ve betonun iskeleti olarak kabul edildiği belirtilmiştir. Agreganın özelliklerinin yüksek performanslı betonun kırılma davranışı üzerinde büyük etkiye sahip olup; 50-80 MPa dayanımlı yüksek performanslı betonların kırılma parametreleri üzerine agrega boyutunun dağılımı ve agrega hacim fraksiyonunun etkisi üç noktalı eğilme testi ile incelenmiştir. Belirtilen boyutlara sahip çentikli beton kırımların G_F ve K_{Ic} değerleri, agrega boyutunun artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Düşük kırılma dayanımına sahip yüksek dayanımlı betonun, daha büyük boyutlu agrega ile yapılabileceği yargısına varılmıştır. Agreganın hacmi %40'dan %80'e yükseldiğinde, düşük dayanımlı betonun G_F ve K_{Ic} değerleri artmıştır. Yüksek mukavemetli beton için, G_F ve K_{Ic} 'nin maksimum değerleri agrega hacminin %60'ında elde edilmiştir.

Einsfield *et al.* (2006)'nin çalışmalarında, farklı basınç dayanımlarına sahip 115 adet numune, üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuş olup; yüksek performanslı betonların kırılma özellikleri üzerine yapılan deneysel bir araştırmanın sonuçları tartışılmıştır. Parametreler kırılma işi ve boyut etkisi yöntemi ile elde edilmiştir. Kırılma enerjisi bu iki yöntemle ölçülmüş ve elde edilen değerler arasında korelasyon sağlanmış; literatürde bulunan bazı sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Kırılma işi yöntemi (G_F) ile boyut etkisi yöntemi (G_f) tarafından ölçülen kırılma enerjileri arasındaki oran diğer araştırmacılar tarafından tahmin edilen değere eşit olduğu ($G_F / G_f \approx 2.5$); genellikle G_F 'nin beton basınç dayanımı arttıkça arttığı ve G_f 'nin ise artan basınç dayanımı ile hafif bir azalma eğilimi gösterdiği sonuçlarına varılmıştır.

İnce vd (2008)'nin çalışmalarında, betonun kırılma parametreleri ile su/çimento oranı arasındaki ilişkinin *Abrams* yasasına dayanan formüllerle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, numuneler üzerinde bir dizi üç noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Kırımların, su/çimento oranları 0,34 ile 0,85 aralığında değiştirilmiştir. Her bir karışımın kırılma parametreleri popüler bir kırılma mekaniği yaklaşımı olan iki parametrelili modele göre hesaplanmıştır. Çalışmada sunulan deneysel veriler, iki parametrelili modelin kırılma parametrelerinin, su/çimento oranları ile ters orantılı olduğu belirtilmiş olup; mevcut test sonuçlarının *Abrams* Yasası ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Bu uyumlu ilişki,

aynı tip çimento ve agrega malzemesi ile tüm numunelerin aynı koşullar altında kürlenmesi ve test edilmesine bağlanmıştır.

Agrega şeklinin, betonda kırılma enerjisi, çekme dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkisi Rocco and Elices (2009) tarafından yapılan çalışmada göz önüne alınmıştır. Bu amaçla, 8 adet çimento esaslı kompozit tasarlanmıştır. 36 adet çentikli kiriş test edilmiş ve kırılma enerjisi ile elastisite modulünün değerleri kaydedilmiştir. Çekme dayanımı dolaylı standart çekme testlerinden ölçülmüştür. Güçlü matris-agrega ara yüzleri için, kırılmış agrega ile yapılan beton numuneler, küresel olanlarla yapılmış betonunkinden biraz daha yüksek kırılma enerjisi değerleri sağlamış ve kırılma enerjisi, her iki agrega türü içinde agrega boyutuyla birlikte artmıştır. Karakteristik uzunluğa agrega şeklinin etkisi ile ilgili net bir eğilim bulunamamıştır. Zayıf matris-agrega ara yüzleri için, kırılma enerjisi, kırılmış agregalar için küresel olanlardan daha yüksektir. Ayrıca kırılmış agrega ile üretilen karışımların karakteristik uzunluğunda, küresel agregalı karışımlara kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Rao and Rao (2009) çalışmalarında yüksek dayanımlı betonun, Bazant'ın boyut etkisi ile RILEM tarafından önerilen kırılma işi yöntemi uyarınca belirlenen kırılma enerjisi (G_F) ve kırılma bölgesinin etkili uzunluğu (c_f) analiz edilmiştir. Kırılma parametreleri (G_F ve C_f), farklı boyutlara sahip geometrik olarak benzer çentikli beton numunelerde farklı çentik derinliklerinde ($a_0/d=0,10, 0,15$ ve $0,20$) maksimum yükün ölçülmesi ile tespit edilmiştir. Bazant'ın boyut etkisi ve RILEM'in kırılma işi yöntemi kullanılarak, numunenin büyüklüğü ve çentik derinliğinin bir fonksiyonu olarak hem kırılma enerjisinin hem de kırılma işlem bölgesinin etkili uzunluğunun değişimi tespit edilmiştir. Boyut etkisi yöntemiyle elde edilen kırılma enerjisi ve kırılma işlem bölgesi uzunluğu çentik derinliği oranları arttıkça azaldığı görülmüştür. Kırılma işi yönteminde ise kırılma enerjisi, numunenin boyutlarının büyümesiyle artmakta ve çentik derinliğinin artması ile de azalmakta olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang *et al.* (2009) çalışmalarında yüksek dayanımlı betonlardan üretilmiş çentikli kirişlerde, üç noktalı eğilme testlerini hem servo hidrolik bir makine hem de kendinden

ağırlık düşürme darbe cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kırılma enerjisi ve tepe yükü, yükleme noktasındaki yer değiştirme oranları üzerinden ölçülmüştür. Düşük yer değiştirme oranları altında ki (10^{-4} ile 10 mm/s) testler servo hidrolik makine ile gerçekleştirilmiştir; 10^2 'den 10^3 mm/s'ye ye kadar olan yer değiştirmelerde ise ağırlık düşürme darbeli makina kullanılmıştır. Sonuçlar, yükleme hızı arttıkça kırılma enerjisinin ve tepe yükünün arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, düşük yükleme hızının bu değerlere etkisinin daha az olduğu ve çoğunlukla boşlukların ve gözenekli yapıların içindeki serbest su varlığından kaynaklanan viskoz etkilerden dolayı olduğu yargısına varılmıştır. Yüksek oranlarda, kırılma enerjisindeki ve tepe yükteki artışların atalet etkisinden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Akçay vd (2012) çalışmalarında 100x100x500 mm. boyutlarında kırışlar üzerinde çentik/derinlik oranının 0,05 ve 0,5 olan numuneler üretmiş olup; kırılma işlemi bölgesinin, özellikle iri agregalara sahip betonlarda kırılma enerjisi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu etkiyi göstermek için çeşitli agrega hacmi fraksiyonlarıyla dört grup beton karışımı tasarlanmıştır. Sınır etkisi modeli temelli kırılma enerjisini elde etmek için tek bir boyuta sahip ancak farklı çentik boyutlu kırış numunelerinde üç noktalı eğilme testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, hem agrega hacim fraksiyonu hem de çentik boyutunun betonların kırılma enerjisine etkisini belirlemek üzere değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen beton kırılma enerjileri ile sınır etkisi modelinin benzer bir eğilime sahip olduğu gösterilmiştir. Sığ ve derin çentiklere sahip numuneler için sınır etkisi modeli ile elde edilen kırılma enerjileri, boyuta bağlı kırılma enerjilerinden belirgin derecede yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. %66 oranında agrega hacim oranlı karışımlarda, basınç dayanımı ve ayrıca kırılma enerjilerindeki hafif bir azalma, işlenebilirliğin azalması ve betonun hava içeriğindeki artıştan kaynaklandığı yargısına varılmıştır.

Siregar *et al.* (2017) araştırmalarında, farklı agrega boyut dağılımlarının, yüksek dayanımlı betonun kırılma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Üç agrega boyutu dağılımı ve iki farklı su/bağlayıcı oranı kullanılarak dökülen 63 adet çentikli kırış üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Betonun kırılma karakteristiğini belirlemek

için toplam kırılma enerjisi G_F ve kritik gerilme yoğunluğu faktörü K_{Ic} kullanılmıştır. Sonuçlar, agrega tane yapısının büyümesiyle, kırılma enerjisinin (G_F) önemli ölçüde azaldığını ve ayrıca K_{Ic} değerlerinin de azaldığı ancak λ 'ya sınırlı bağımlılık gösterdiği belirtilmiştir. Bunun aksine, toplam su/bağlayıcı oranının düşürülmesi, K_{Ic} değerini önemli ölçüde arttırmış ancak G_F üzerinde ölçülebilir bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Agreganın boyut dağılımı, betonun iç tane yapısının irileşmesini ifade eden λ değeriyle ölçülmüş ve yüksek dayanımlı betonun kırılma enerjisi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. λ 'nın 0.32'den 0.22'ye düşürülmesi, ölçülen kırılma enerjisi (G_F) değerinde %50'lik bir artışa neden olmuştur.

1.1.2. Normal lifli beton ile ilgili çalışmalar

Farklı bağlayıcı bileşimlerine sahip beton malzemelerin basınç, eğilme ve darbe özelliklerine nispeten düşük hacim fraksiyonlarında (%0.3'ün altındaki) polipropilen liflerin etkileri üzerine Alhozaimy *et al.* (1996) tarafından çalışma yapılmıştır. Sonuçların istatistiksel analizi, polipropilen lif takviyeli betonun mekanik özelliklerine ve ayrıca liflerin ve puzolanik katkıların bu özellikleri belirlemedeki etkileşimi üzerine güvenilir sonuçlar vermiştir. Polipropilen liflerin betonun basınç ve eğilme dayanımında istatistiksel olarak önemli bir etkisi olmadığı, darbe direncinin polipropilen liflerin varlığında artış gösterdiği sonuçlarına varılmıştır. Lif ve puzolanlar arasındaki pozitif etkileşimler de tespit edilmiştir. Polipropilen lifler eğilme tokluğunu %95 güven düzeyinde önemli ölçüde etkilemiş olup; ortalamada, %0,1, %0,2 ve %0,3 hacminde lif eklenmesi, sırasıyla %44, %271 ve %387 oranında eğilme tokluğunu arttırmıştır. Silis dumanı ilavesinin, sırasıyla, normal ve lifli betonların eğilme tokluğunu %48 ve %79 oranlarında arttırdığı tespit edilmiştir.

Sun ve Xu (2009) çalışmalarında, polipropilen lifin betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Agrega-çimento ara yüzey geçiş bölgesindeki kristal yapılarını gözlemlemek için taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Polipropilen lifin betonun mühendislik özellikleri üzerine etkilerini ölçmek için fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır. Sonuç olarak, lif kullanımının betonun

mikro yapısını önemli ölçüde değiştirdiğini, Ca(OH)_2 'nin kristalleşmesinde ve mikro boşluklarda azalma gözlemlenmiştir. Özellikle, Ca(OH)_2 'nin büyümesini kısıtlayan bir ağ oluşturmuştur. Polipropilen lif, kristalin miktarını, boyutunu ve agrega-çimento ara yüzey geçiş bölgesinde mikro-çatlamayı azaltmıştır. Polipropilen lifin, betonun basınç dayanımını, eğilme dayanımını ve yorulma ömrünü artırırken, su geçirgenliğini ve aşınma kütle kaybını da azalttığı sonucuna varılmıştır. Sonuçlar aynı zamanda, $0,9 \text{ kg/m}^3$ 'lük bir lif içeriğinin, bu çalışmada optimum beton performans değerlerini verdiği kanaatine varılmıştır.

Polipropilen lif ve silis dumanı kullanılarak, 0,36 ve 0,46 su/çimento oranları ile hazırlanan beton karışımlarının darbe direnci ve dayanım performansını Nili and Afroughsabet (2010) tarafından incelenmiştir. Çalışmada, 12 mm uzunluğunda ve %0, %0,2, %0,3 ve %0,5'lik dört farklı hacim oranına sahip polipropilen lifler kullanılmıştır. Sonuçlar, polipropilen lif kullanımının beton karışımlarının mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Silis dumanının kullanımı, liflerin dağılmasını kolaylaştırmış ve mukavemet özelliklerini, özellikle darbe direncini arttırmıştır. %0,5 polipropilen lif kullanımında, eğilme dayanımının ve özellikle darbe yükü altında betonun performansının arttığı sonucuna varılmıştır. %0,2, %0,3 ve %0,5 oranlarında lif kullanılan karışımlarda yarmada çekme dayanımlarında, sırasıyla, %8, %14 ve %14 oranlarında artış tespit edilmiştir.

Normal beton ve lif takviyeli betonun, farklı su/çimento oranlarında ve farklı miktar ve tip (metalik veya polimerik) lifli karışımlar Carpinteri and Brighenti (2010) tarafından mekanik özellikler açısından değerlendirilmiştir. İncelenen beton karışımların basınç dayanımı ve çekme dayanımı gibi ana mekanik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiş ve kırılma davranışını da incelemek için birkaç numune üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, yer değiştirme kontrolü altında statik testler için çatlak yolları elde edilmiş ve farklı çatlak konfigürasyonları için yük deplasman eğrileri saptanmıştır. Kırılma yüzeyinin bir fraktal boyutla karakterize edildiğini varsayarak, kırılma enerjisinin bazı nicel değerlendirmeleri yapılmıştır. Daha sonra, düz ve lif takviyeli örneklerin

kırılma davranışı ve pik sonrası davranışları tartışılarak, takviye edici liflerin etkileri incelenmiştir.

Şahin ve Köksal (2011) çalışmalarında hem çelik lif hem de matris mukavemetlerinin yüksek dayanımlı betonunun kırılma enerjisi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın değişkenleri su/çimento oranı, çelik lif dayanımı ve çelik lif hacim fraksiyonu olmuştur. 0,35, 0,45 ve 0,55 su/çimento oranları ile 1100 ve 2000 MPa gerilme mukavemetli çelik lifler kullanılmış olup; çelik lif hacim fraksiyonları %0,33, %0,67 ve %1 olarak belirlenmiştir. Beton karışımların mekanik özellikleri, kırılma enerjileri ve karakteristik uzunlukları araştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, çelik lif hacim fraksiyonu ve çelik lif dayanımı, betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, yarma ve eğilme dayanımlarında önemli iyileştirmeler elde edilmiş ve yüksek çekme dayanımlı çelik lifler, düşük çekme dayanımlı liflerden daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, matris ve lif çekme mukavemetlerinin kırılma enerjisi ve karakteristik uzunluk üzerinde çok önemli etkileri kaydedilmiştir. Matris ve lif çekme mukavemetleri arasındaki ilişkinin önemi, zirve yükünden sonra ortaya çıkmış ve yük - yerdeğiştirme eğrisinin yumuşama kısmının, o ilişkinin bir sonucu olduğu kanaatine varılmıştır.

Karahan ve Atış (2011) çalışmalarında polipropilen lif ve uçucu kül içeren betonların dayanıklılık özellikleri üzerine kapsamlı bir inceleme yapmışlardır. İncelenen özellikler arasında taze betonun birim ağırlığı ve işlenebilirliği, sertleşmiş betonun basınç dayanımı, elastisite modülü, su emme, soğurma katsayısı, kuruma büzülmesi ve donma-çözülme direnci yer almaktadır. Beton karışımında kullanılan uçucu kül içeriği, ağırlık bazında %0, %15 ve %30, lif hacim fraksiyonu hacim bazında %0, %0,05, %0,10 ve %0,20 değerleri kullanılmıştır. Deney sonuçları, uçucu külün beton karışımlarına ilave edilmesiyle betonu iyileştirdiği; bununla birlikte, polipropilen lif kullanımının betonun işlenebilirliğini azalttığı belirlenmiştir. Uçucu kül kullanılan betona polipropilen lif ilave edilmesinin, basınç dayanımı ve elastisite modülünü iyileştirmede gözlemlenmiştir.

Polipropilen lif ve uçucu kül arasındaki pozitif etkileşimler arasında, uçucu kül kullanılan lifli betonun en düşük kuruma büzülmesi değerinin elde edilmesi gösterilmiştir. Polipropilen lif betonun donma-çözülme direncinin lifsiz betona kıyasla biraz arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, uçucu külün, betonun donma çözülme direncini, polipropilen liflere göre daha fazla arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Kakooei *et al.* (2012) çalışmalarında, polipropilen lif takviyeli betonların özelliklerini incelemişlerdir. Beton numunelerinin basınç dayanımı, geçirgenlik ve elektrik dirençleri incelenmiştir. Beton karışımlarda 0 ile 2 kg/m³ arasında değişen lifler kullanılmıştır. Ayrıca, mercan agregası ve silisli agrega ile yapılan numuneler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. 1,5 kg/m³ polipropilen lif ile yapılan beton karışımları, diğerlerine kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca, mercan agregalı beton karışımlarının, silis agregalı beton karışımlarına kıyasla daha az elektrik direnci ve basınç dayanımı değerleri verdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mercan agregalarının beton yapımında veya beton yapılarda kullanılması için uygun olmadığı yargısına ulaşılmıştır.

Cifuentes *et al.* (2013) incelemelerinde, polipropilen liflerin geometrik ve mekanik özelliklerinin, düşük, normal ve yüksek dayanımlı lif takviyeli betonun kırılma parametreleri ve sünekliği üzerindeki etkisi kapsamlı bir deneysel çalışma ile araştırmışlardır. Abdalla ve Karihaloo'nun basitleştirilmiş sınır etki yöntemi kullanılarak 88 adet çentikli kiriş üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Lif takviyesinin etkisi, özellikle yük-yer değiştirme eğrisinin kuyruk kısmında hissedilmiş ve bu kısımdan sonra, betonun boyuttan bağımsız özel kırılma enerjisinin etkisi analiz edilmiştir. Betonun süneklik analizi Hillerborg'un kırılma enerjisi sayılarına dayanılarak yapılmıştır. Farklı beton karışımları için lif takviyesinin süneklik üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Beton matrisinde PP liflerinin varlığı ve içeriği, lif takviyeli betonun mekanik özelliklerini hafifçe artırmış olmasına rağmen kırılma enerjisini ve sünekliğini büyük ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Bazalt lifinin betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi konulu çalışmasında Kabay (2014), su/çimento oranları 0,45 ve 0,60 olan yüksek ve normal dayanımlı

betonlarda farklı miktarda ve boyutlarda bazalt lif kullanarak toplam 10 karışım elde etmişlerdir. Çalışmada, düşük oranda bazalt lifi kullanılması durumunda bile eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma direncinde artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak bazalt lifi kullanılan beton karışımların basınç dayanımında azalma olduğu belirtilmiştir. Bazalt lifi kullanılan betonların kırılma enerjisi, referans beton numunesine kıyasla %126 ile %140 oranında artış göstermiştir.

Jiang *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada, bazalt liflerin hacimsel oranlarının (%0,5, %0,1, %0,3 ve %0,5) ve uzunluğunun lifli betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve civa intrüzyon porozimetresi ile birleştirilerek, basalt lifli betonunun mikroyapısı da incelenmiştir. Sonuçlar, lifin eklenmesinin, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk indeksini önemli ölçüde geliştirdiğini gösterirken, basınç dayanımında belirgin bir artış göstermediği gözlenmiştir. Ayrıca, lif uzunluğunun beton karışımların mekanik özelliklerini etkilediği gözlemlenmiştir. Lifsiz beton ile karşılaştırıldığında, 12 mm bazalt lif ile güçlendirilmiş betonun basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla %0,18-4,68, %14,08-24,34 ve %6,30-9,58 oranında, lif uzunluğu 22 mm kullanılması durumunda ise; basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla %0,55-5,72, %14,96-25,51 ve %7,35-10,37 oranlarında artmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında 4-19 mm uzunluğunda ve %0,05, %0,1 ve %0,3 oranlarında polipropilen lifler kullanılmış olup; eğilme dayanımı değerleri polipropilen lif hacim oranlarına göre sırasıyla %3,94, %5,25 ve %6,96 oranlarında artırmıştır. Erken yaşta bazalt lif ve matris arayüzü arasında iyi bir bağ gözlenmiş. Bununla birlikte, bu bağ 28 günde belirli bir dereceye kadar bozulmayı uğradığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, civa intrüzyon porozimetresi sonuçları göre, bazalt lif içeren beton karışımların daha fazla gözeneklilik sergilediğini tespit etmişlerdir.

Ayub *et al.* (2014) çalışmalarında, %3 hacim oranına kadar 25 mm uzunluğunda kırılmış bazalt lif içeren yüksek performanslı lif takviyeli betonun mekanik özellikleri ve mikroyapısını incelemişlerdir. 3 farklı tip beton karışımı olup; ilk tipte %100 çimento içeriği, diğer ikisinde ise, silis dumanı ve lokal olarak üretilen metakaolin ile %10

oranında çimento içeriğinin değiştirilmesiyle hazırlanmıştır. Her bir beton karışım tipi için, bazalt liflerinin %0-3 aralığında eklendiği dört karışım olmak üzere toplam 12 adet karışım üretilmiştir. Sonuçların incelenmesi neticesinde, beton karışımlarına bazalt liflerinin eklenmesi, basınç dayanımı değerlerini önemli oranda etkilemediği, lif içeren karışımların ortalama küp ve silindir basınç dayanımları değişiminin, kontrol numunelerinin kıyasla $\pm\%4$ aralığında olduğu bulunmuştur. Karışımların her biri için, yarmada çekme ve eğilme dayanımı, artan bazalt lif hacmi ile önemli ölçüde arttığı, kontrol numunesine (lifsiz) göre, %1, %2 ve %3 oranında bazalt lif kullanılması durumunda yarmada çekme dayanımında ortalama olarak sırasıyla %1,64, %5,27 ve %23,95, eğilme dayanımında ise %18,15, %36,12 ve %27,17 oranlarında artışlar gözlenmiştir.

Bazalt ve cam liflerinin yüksek dayanımlı beton içerisinde kullanılması uygulamaları karşılaştırmalı olarak Kızılkant vd (2015) çalışmalarında incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, lif eklenmesinin betonun basınç dayanımına ve elastisite modülüne anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bazalt lif takviyeli betonun yarmada çekme dayanımı lif dozaj artışı ile artarken, cam elyaf takviyeli beton için %0,50 lif dozunun ötesinde dayanım artışı gözlenmemiştir. Bazalt lif takviyeli betonda en yüksek basınç dayanımı %0,50, cam lif takviyeli betonda ise %0,75 oranında gözlemlenmiş olup; sırasıyla 66,6 ve 67,6 MPa'dır. Lifsiz beton karışımında ise basınç dayanımı 63,4 MPa değerine ulaşmıştır. Çekme dayanımına benzer bir eğilimde, bazalt lifli betonun eğilme dayanımı kademeli olarak artan lif içeriğiyle artmış; ancak, %0,50 lif içeriğinden sonra cam lif takviyeli beton için böyle bir değişikliğin olmadığı sonucuna varılmıştır. Kırılma enerjisi, hem bazalt hem de cam lifli beton için %0,25 dozaj sonrasında önemli ölçüde artmıştır. Bazalt lif takviyeli betonun K_{Ic} ve $CTOD_c$ sonuçları, bazalt lif ilavesinin çatlak direnci ve süneklik açısından, cam lifli karışımlara kıyasla betonun performansını daha iyi geliştirdiğini göstermiştir.

Afroughsabet ve Özbakkaloğlu (2015) çalışmalarında çelik ve polipropilen lifin, yüksek dayanımlı betonun mekanik ve bazı dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 60 mm uzunluğa sahip olan kanca uçlu çelik lifler %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,0'lık dört

farklı lif hacmi fraksiyonunda, 12 mm uzunluğa sahip polipropilen lifler ise %0,15, %0,30 ve %0,45 oranlarında kullanılmıştır. Tüm lif takviyeli betonlar, %10 oranında silis dumanı içermiştir. Beton karışımlarının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elektrik direnci ve su emme gibi özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları, silis dumanı ilavesinin normal betonun hem mekanik hem de dayanıklılık özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, çelik ve polipropilen liflerin dahil edilmesinin, her hacim fraksiyonunda yüksek dayanımlı betonun mekanik özelliklerini geliştirmiştir. %0,25, %0,3 ve %0,45 polipropilen lif içeren karışımların yarmada çekme dayanımı, referans betonunki ile karşılaştırıldığında, sırasıyla 28 günde %13, %16 ve %20, eğilme dayanımı ise %9, %10 ve %13 oranlarında artmıştır. Ayrıca %1 çelik lif ilavesinin betonun kopma mukavemetini ve çekme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. İncelenen çelik ve polipropilen liflerinin farklı kombinasyonları arasında en iyi performans, %0,85 çelik ve %0,15 polipropilen lif içeren karışımlarda elde edilmiştir.

Kızılkant (2016) çalışmasında, karbon lifin farklı hacim oranları ile takviye edilmiş yüksek dayanımlı betonun mekanik ve kırılma özellikleri üzerine inceleme yapmıştır. Kullanılan karbon lif miktarları hacim olarak %0,25 ile %1,00 arasında seçilmiştir. Karbon lif, basınç dayanımı, yük taşıma kapasitesi, kırılma enerjisi ve betonun tokluğunu iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Karbon lifin eklenmesi betonun işlenebilirliği azalttığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, karışım betonlarının basınç dayanımı kontrol betonuna kıyasla artmıştır. Betona hacimce %0,75 oranında karbon lif ilavesi ile betonun basınç dayanımında, kontrol betonuna oranla %8,80 daha yüksek değer elde edilmiştir.

Arslan (2016) tarafından yapılan araştırmada, bazalt lif takviyeli beton ve cam lif takviyeli betonun kırılma davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla kırılma enerjisini belirlemek için üretilen 50x100x480 mm boyutlarında çentik derinliğinin, kiriş yüksekliğine oranı 0,3 olan çentikli kirişlerde 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ lif içeriği kullanılarak üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çentikli kiriş numunelerinin kırılma enerjileri, RILEM tarafından önerilen çatlak ağzı açılma yer değiştirmesi ile analiz edilmiştir. Buna ek olarak, çimento macunu, agrega, bazalt ve cam

lif bileşenlerinin mikro yapısal analizi; taramalı elektron mikroskopisi ve Enerji-Dağılımlı X-ışını Spektroskopi incelemelerine dayanılarak gerçekleştirilmiş ve analizleri üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlar, lif içeriğinin kırılma enerjisine etkilerinin çok önemli olduğunu göstermiştir. Hem bazalt lif hem de cam lif takviyeli betonların yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı, lif içeriğinin artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Buna rağmen yüksek miktarda lif içeriği kullanılan karışımlarda eğilme dayanımında hafif bir düşüş gözlenmiştir. Öte yandan, basınç dayanımı ve elastisite modülüne lif ilavesi etkisinin önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır. En yüksek kırılma enerjisi cam lifli karışımlar için 96,06 N/mm, bazalt lifli karışımlarda ise 87,79 N/mm olarak elde edilmiş olup; kontrol numunesine göre yaklaşık %35 civarında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek performanslı polipropilen (YPP) liflerin, üç farklı hacimde iri agrega ile hazırlanan hafif agregalı beton karışımların, mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Li vd (2016) araştırılmıştır. Mekanik özellikler arasında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı bulunmaktadır. Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak agrega/çimento macunu ve lif/çimento macunu olmak üzere iki tip ara yüzey geçiş bölgesi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, liflerin eklenmesinin, mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Lif kullanımının yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, eğilme tokluğu ve darbe dayanımı değerlerini artırdığı, basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkinin olmadığı tespit edilmiştir. Yüksek performanslı polipropilen liflerin ilavesi 9 kg/m³'ün (%0,95) ötesinde arttırıldığında, liflerin beton karışımındaki dağılımının çok zor hale geldiği ve işlenebilirliğin olumsuz şekilde etkilendiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak, basınç dayanımı değerleri önce artmış ve daha sonra lif içeriğinin artmasıyla azalmıştır. 9 kg/m³ lif kullanımında, farklı hacimdeki iri agrega karışımlarında (3 farklı tür) en yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiş olup; bunlar, lifsiz betona kıyasla %10,6, %7,7 ve %4,7 oranında daha yüksek sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca, lif ilavesinin çekme dayanımını önemli ölçüde artırabileceği sonuçlardan görülmüştür. Örneğin, 9 kg/m³ (%0,95) lif içerikli üç farklı hacimde agrega kullanılan beton

karışımlarında, en yüksek yarmada çekme dayanımı değerlerine ulaşılmış olup; bunlar %33,33, %36,23 ve %40,73 oranında lifsiz betona kıyasla artış olduğu gözlenmiştir. Karışımlarının eğilme dayanımının ise yine aynı lif oranında (9 kg/m^3) farklı agrega hacimlerine göre, %48,83, %37,37 ve %46,55 oranlarında arttığı yapılan çalışmada bildirilmiştir.

Çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı betonun kırılma davranışının incelenmesi ve yüksek dayanımlı normal beton ile karşılaştırılması Kazemi *et al.* (2017) tarafından yapılan incelemede ele alınmıştır. Deneysel bir programa dayanarak, RILEM tarafından tavsiye edildiği gibi 54 adet çentikli kiriş üzerinde üç noktalı eğilme testi serisi yapılmıştır. Kırılma parametreleri, kırılma işi yöntemi ve boyut etkisi yöntemi olmak üzere iki yöntemle ölçülmüştür. Daha sonra bu iki yöntemden elde edilen kırılma parametreleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, çelik lif içeriğinin artmasıyla, kırılma işi yöntemindeki kırılma enerjisi (G_F) ve boyut etkisi yöntemindeki kırılma enerjisi (G_f) değerlerinin arttığını fakat kırılma işi yönteminde bu artışın daha önemli olduğunu göstermiştir. İşlem bölgesinin etkili boyutu (c_f) ve karakteristik uzunluğu (L_{ch}), çelik liflerin artmasıyla birlikte artmış; bu yüksek dayanımlı normal betonun liflerin takviyesiyle daha sünek hale geldiğini göstermiştir. Çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı betonun için boyut etkisinden elde edilen kırılma parametrelerinin doğruluğu, düşük çelik lif hacim fraksiyonları için kabul edilebilir olduğu yargısına varılmıştır. Ayrıca, G_F/G_f oranı yüksek dayanımlı normal beton için yaklaşık 2,5 iken, çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı betonda ise yaklaşık 10,5'e yükselmiştir.

Geri dönüşümlü öğütülmüş kauçuk agregaları hem normal beton (PC) hem de çelik lifli betonun kırılma özellikleri üzerine ve lastik agregaların yüksek enerji absorbe etme kapasitesine olan etkisi Noaman *et al.* (2017) çalışmalarında araştırmışlardır. Deneysel çalışmada beton tipi (normal ve çelik lifli beton) için göz önüne alınan değişkenler, hacimce değiştirme oranları olarak öğütülmüş kauçuk agrega içeriği %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ince agrega ile yer değiştirilmiştir. En/boy oranı 80 ve çapı 0,75 mm olan, sabit bir hacim olarak %0,5 oranında kanca tipi lifler kullanılmıştır. Çalışmada normal ve çelik lif takviyeli kauçuklaştırılmış beton karışımların mekanik özellikler,

kırılma enerjisi, gerilme yoğunluğu faktörü, kritik gerilme enerjisi salınım oranı, elastik plastik kırılma tokluğu parametresi ve karakteristik uzunlukları araştırılmıştır. Sonuç olarak, normal ve çelik lifli beton karışımlarında kırılma enerjisi, %20'ye kadar kauçuk oranına kadar yükselmiştir. Bu değiştirme oranının ötesinde kırılma enerjisi azalmış olup; bu durum çimento matrisindeki mukavemet kaybına bağlanmıştır. Lastik agrega, kanca uçlu çelik lif ile kombinasyon halinde, kauçuk içeriğinin %5'den %20'ye değiştirilmesi durumunda normal betonun kırılma enerjisinde %190'dan %246'ya kadar bir artış belirlenmiştir. Ayrıca karakteristik uzunluk, kauçuk agrega içeriğinin %25'e kadar artması ile artışına devam ettiği sonucuna varılmıştır.

Çeşitli bazalt lif dozajları kullanılarak, bazalt lif takviyeli beton (BFRC) üzerine bir araştırma Pickel *et al.* (2018) tarafından yapılmıştır. Beton karışımları 35 MPa'lık bir hedef dayanıma sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Beton, taze durumda çökme ve hava içeriği açısından, sertleşmiş durumda ise basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk açısından test edilmiştir. Bu testler kullanılarak, BFRC'nin davranışı araştırılmış ve benzer oranlarda polipropilen, polietilen sentetik lifler ve kıvrılmış çelik lifler kullanılarak üretilen lif takviyeli betonlarla karşılaştırılmıştır. Bazalt lif kullanılan karışımlarda, yarmada çekme ve eğilme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Ancak bazalt liflerin, basınç dayanımı ve çatlama sonrası davranış üzerinde çok az etkiye sahip olduğu bulunmuş ve incelemede, bazalt liflerin makro çatlama sonrası kopma gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Sadrmomtazi *et al.* (2018) çalışmalarında, farklı silis dumanı içeriğinin (bağlayıcı malzeme ağırlığının %0, %5, %10, %15) ve bazalt liflerin (hacimce %0, %1, %1,5) içeriğinin beton karışım numunelerinin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çimentolu kompozit malzemelerin akışkanlığı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluğu, su emme ve özgül elektriksel dirençleri incelenmiştir. 28 günlük numunelerde çimentolu matrisin mikro yapısındaki lif bağının kalitesi taranmış ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri (SEM) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kümelenmenin yüksek miktarlarda liflerde (%1,5) ve silis dumanında (%15) meydana geldiğini ve bunun da karıştırma ve döküm sorunlarına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Bazalt liflerin ilavesi beton karışımlarda eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunu sırasıyla 2 ve 6 kat arttırmıştır; bununla birlikte, basınç dayanımında %47'lik bir azalmaya neden olmuştur. Geçiş bölgesinin kalitesi SEM görüntüleri ile açıkça değerlendirilebilmiştir. Silis dumanının ilave edilmesi, lif - matris geçiş bölgesi üzerinde olumlu etkilere neden olmuştur. %5-15 silis dumanı içeren numunelerde, kristalize yapıdaki azalmaya ve şekilsiz yapıların ortaya çıkmasına bağlı olarak, bağ davranışında veya dayanımda önemli bir iyileşme gözlenmiştir.

Polipropilen ve bazalt lifin kombinasyonlarını kullanarak, hibrid lifli yüksek performanslı beton karışımların mekanik özellikleri Smarzewski (2019) tarafından incelenmiştir. Deneysel araştırmada, normal beton ve %1 ve %2 oranlarında bazalt ve/veya polipropilen lif takviyeli betonlar üretilmiş ve küp, kiriş ve çentikli prizmatik numuneler kullanılarak mekanik testler yapılmıştır. Çalışmada, karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu ile kırılma enerjisi gibi özellikleri araştırılmıştır. Lif kullanılan karışımların basınç dayanımı değerlerinde, normal betona kıyasla düşüşler tespit edilmiştir. Yarmada çekme ve eğilme dayanımında ise, lif kullanımının olumlu etkileri gözlenmiş ve dayanımlarda artış elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada, düşük elastisite modülü ve düşük en boy oranına sahip polipropilen liflerin, yüksek elastisite modülü ve daha yüksek en boy oranına sahip bazalt liflerden daha yüksek deformasyon kapasitesi ve daha iyi kırılma enerjisi değerleri elde edildiği gözlenmiştir.

1.1.3. Kendiliğinden yerleşen beton ile ilgili çalışmalar

Bouzoubaa and Lachemi (2001), çalışmalarında 9 adet KYB ve 1 adet kontrol beton karışımı üretmiş ve incelemişlerdir. Karışımlarda çimento içeriği sabit (400 kg/m^3), su/çimento oranları ise 0,35-0,45 arasında değiştirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton karışımlarda F sınıfı uçucu kül %40, %50 ve %60 oranında çimento miktarı ile değiştirilmiştir. KYB'lerin 28 günlük basınç dayanımı 26 ile 48 MPa arasında değişen değerlere ulaşmıştır. Sonuçlar yüksek miktarda F sınıfı uçucu külü içeren bir KYB üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. KYB karışımlarından bir grup hariç 500-700

mm aralığında bir yayılma, 3 ile 7 sn. arasında değişen T_{50} süresi, %1,9 ile %14 arasında değişen bir ayrışma direnci elde edilmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) elastisite modülü, sünme ve rötre gibi özelliklerini geleneksel beton (GB) ile karşılaştırmak üzere Persson (2001) deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, su bağlayıcı oranı 0,24 ile 0,80 arasında değişen 8 adet beton karışım numunesi üretilmiştir. Üretilen beton karışımlar, suda ve havada kürlenmiş olup; betonların yarısı KYB diğer yarısı GB olarak tasarlanmıştır. Sonuç olarak, KYB'nin elastisite modülü, sünme ve rötre gibi özelliklerinin geleneksel betona göre önemli ölçüde farklılık göstermediği kanaatine varmışlardır.

Su/çimento oranının ve süperakışkanlaştırıcı dozaj seviyelerinin farklı kombinasyonlarına sahip beş farklı KYB karışımı Felekoğlu vd (2007) tarafından üretilmiş ve incelenmişlerdir. Karışımların kendiliğinden yerleşen beton özellikleri için optimum parametrelerini belirlemek için çökme akışı, V-hunisi, L-kutusu gibi çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, aynı çimento dozajına ($\sim 377 \text{ kg/m}^3$) sahip karışımlar, serbest su içeriğini (227 'den 140 lt/m^3) azaltmak suretiyle üretilmiş ve aynı zamanda 65-80 cm aralığında bir çökme akışı değeri elde etmek için süperakışkanlaştırıcı dozajı ($3,7$ ile $13,0 \text{ lt/m}^3$) arttırılmıştır. Bununla birlikte, karışımların taze haldeki davranışı sırasıyla 3 ve 46 sn'lik V-hunisi süreleri ile tamamen farklı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, KYB üretmek için optimum su/çimento oranının, hacimce 0,84 - 1,07 aralığında olduğu kanaatine varılmıştır. Bu aralığın üstünde ve altında bulunan karışım oranlarının betonun tıkanmasına veya ayrışmasına neden olabileceği belirtilmiştir.

Şahmaran ve Yaman (2007) tarafından yapılan çalışmada, ASTM C 618'in incelik gereksinimlerini karşılamayan, yüksek hacimli uçucu kül içeren, lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun taze ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Uçucu kül içeren karışımlarda, ağırlıkça %50 oranında çimento ile uçucu kül yer değiştirmiştir. İki farklı çelik lif kombinasyonu kullanılarak toplam lif içeriği 60 kg/m^3 'de sabit tutulmuştur. Betonun taze özelliklerini değerlendirmek için çökme akış süresi ve çapı, V-hunisi ve

hava içeriği uygulanmıştır. Sertleşmiş özellikler olarak ise betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı tespit edilmiştir. Sonuçlar, yüksek hacimli iri uçucu kül kullanımı nedeniyle beton dayanımında bir miktar azalma olmasına rağmen, lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton üretmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Yüksek oranda uçucu kül içeren KYB karışımlarının erken yaş dayanımları Sukumar *et al.* (2008) tarafından incelenmiştir. Aynı oranlarda farklı bileşimlere sahip geleneksel betonlar ve KYB numuneleri, 12-18 saat ve 1-3-7-21-28 günlük basınç dayanım deneyine tabi tutulmuş ve erken yaş dayanım kazanma durumları incelenmiştir. Farklı bileşimlerdeki KYB'ler için dayanım kazanma hızı aynı bileşimdeki geleneksel betonlar için beklenen değerlerden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. 12 saatlik ve 1 günlük numune dayanımları, 28 günlük numune dayanımına kıyasla sırasıyla %10 ile %18 değerlerine ulaşmıştır.

Dinakar *et al.* (2008) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek oranda uçucu kül kullanılarak üretilen KYB'lerin dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Değişik dayanım sınıflarında tasarlanan geleneksel betonlar ile farklı bileşimlerde KYB üretebilmek için kontrol betonuna %10, %30, %50, %70 ve %85 oranlarında uçucu külün çimento ile yer değiştirilmesi suretiyle elde edilen beton karışımlar karşılaştırılmıştır. Bu beton karışımların dayanıklılık özellikleri açısından permeabilite, su emme, asit saldırısı etkisi ve hızlı klorür geçirgenliği deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, aynı dayanım sınıfındaki KYB numuneleri geleneksel betonlara göre daha yüksek permeabilite ve su emme ile daha düşük asit saldırısı ve klorür difüzyonu değerlerini vermiştir. Ayrıca, daha düşük dayanımlı (20-30 MPa) kendiliğinden yerleşen betonlarda yaklaşık %70-85'lik, 60-90 MPa'lık daha yüksek dayanımlı beton üretebilmek için ise yaklaşık %30-50 uçucu kül kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yazıcı (2008) çalışmasında, %30'dan %60'a kadar çeşitli oranlarında çimentoyu C sınıfı uçucu kül ile yer değiştirerek, kendiliğinden yerleşen beton numuneler üretmiştir. Beton

numunelerin yayılma çapları 710 mm ile 825 mm arasında değişen oranlarda elde edilmiştir. Artan uçucu kül içeriği ile T_{50} süresi artmıştır. Çimento yerine %10 silis dumanı içeren serilerde, uçucu kül içeriğindeki artış akış değerlerini yaklaşık olarak eşit tutarken karışımların plastik viskozitesini düşürmüştür. Başka bir deyişle, uçucu kül ve silis dumanının bir araya getirilmesi süper akışkanlaştırıcı talebini arttırmıştır. Bu durum mineral katkı maddelerinin özgül ağırlıklarının çimentodan daha düşük olması nedeniyle, uçucu kül ve silis dumanı ile artan macun hacmine bağlanmıştır. Genellikle, %50 ve %60 oranlarında uçucu küllü karışımları haricinde taze haldeki tüm karışımlarda benzer işlenebilirlik özellikleri elde edilmiştir. Ayrıca, test sonuçları, çimentonun %10 silis dumanı ve %60 uçucu kül ile değiştirilmesi ile 68,2 MPa basınç dayanımının 90 gün içinde elde edilebileceğini göstermiştir.

Kou and Poon (2009) çalışmalarında, geri dönüşümlü beton agregasını, kendiliğinden yerleşen betonda (KYB) hem iri hem de ince agregalar olarak kullanarak karışımlar üretmiş ve KYB karışımlarının taze ve sertleşmiş özelliklerini değerlendirmişlerdir. Üç seri KYB karışımı %100 geri dönüştürülmüş iri agregalar ile hazırlanmış ve dere kumu yerine farklı seviyelerde geri dönüştürülmüş ince agregalar kullanmışlardır. Çimento miktarı, tüm beton karışımları için sabit tutulmuştur. KYB karışımları %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş ince agregalar ile hazırlanmış, ilk iki seride karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,53 ve 0,44 olarak belirlenmiştir. Üçüncü seride KYB karışımları %100 geri dönüştürülmüş beton agregası (hem iri hem de ince) ile hazırlanmış, su/bağlayıcı 0,44, 0,40 ve 0,35 değerlerinde üç farklı oran kullanılmıştır. Bu KYB karışımlarının taze, sertleşmiş ve dayanıklılık özelliklerini kapsayan farklı testler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, dere kumu ve geri dönüştürülmüş ince agregalardan yapılmış KYB karışım özellikleri arasında yalnızca küçük farklar olduğunu belirtmişlerdir.

F sınıfı uçucu kül ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) özelliklerini incelemek üzere Siddique (2011) tarafından deneysel bir program yürütülmüştür. Beton karışımlar %15 ile %35 arasında değişen F sınıfı uçucu külün beş farklı oranı ile hazırlanmıştır. İncelenen özellikler arasında kendiliğinden yerleşen beton parametreleri

(çökme akışı, J halkası, V-hunisi, L-kutu ve U-kutusu) ve dayanım özellikleri (basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı) araştırılmıştır. KYB karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları 30 - 35 MPa arasında ve yarmada çekme dayanımları ise 1,5 ile 2,4 MPa arasında değişmiştir. KYB karışımlarının yayılma akışı 600-700 mm. aralığındadır. Betonun tüm karışımlar için 500 mm çapa ulaşması için yayılma akışı süresi 4,5 saniyeden az olduğu sonucuna varılmıştır.

Hava, su ve buhar kürüne maruz bırakılan kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımların basınç dayanımlarındaki değişim Bingöl ve Tohumcu (2013) tarafından çalışmalarında tartışılmıştır. Deneysel çalışmada KYB karışımları, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında çimento yerine silis dumanı (SD) ve %25, %40 ve %55 oranlarında ise uçucu kül (UK) kullanılarak üretilmiştir. Mineral katkıların kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı %15 SD kullanan beton numunelerde ve 28 günlük su küründe gözlenmiştir. Hava kürü, tüm gruplarda basınç dayanımı kayıplarına neden olduğu belirtilmiştir. SD'nin değiştirme yüzdesindeki artış basınç dayanımında artışlara, UK içeriğinin artması ise basınç dayanımında azalmalara neden olmuştur. Taze ve sertleşmiş beton test sonuçları, SD ve UK kullanarak kabul edilebilir KYB karışımları elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. En yüksek basınç dayanımı değerleri 28 gün süreyle su içinde kürlenmiş numunelerden elde edilmiştir. Hava kürü basınç dayanımını azaltmış ve en düşük dayanım değerleri hava ile kürlenmiş gruplardan elde edilmiştir.

Nikbin *et al.* (2014) çalışmalarında mevcut uluslararası kodlar ile diğer araştırmacılar tarafından öngörülen denklemleri kullanarak KYB'nin mekanik özellikleri arasında kapsamlı bir değerlendirme ve karşılaştırma sunmuşlardır. Bu nedenle, yapılan deneysel çalışmada, farklı su/çimento oranlarında ve farklı toz içeriğine sahip on altı KYB karışımının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların doğrulanması için birçok araştırmacı tarafından KYB ve NB için kapsamlı bir veri kullanılmıştır. Su/çimento oranının 0,35'den 0,7'ye yükselmesiyle basınç dayanımı %66, çekme gerilmesi %51 ve elastisite modülü ise %44 oranında azalmıştır.

Kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) işlenebilirliğine ve mekanik özellikleri üzerine düşük kireçli uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve mikro kalsitin etkisini incelemek amacıyla yapılan deneysel bir araştırmanın sonuçlarını Beycioğlu ve Aruntaş (2014) çalışmalarında sunmuştur. Deneysel programda, Portland çimentosu, kısmen düşük kireçli uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu ile toplam bağlayıcının ağırlığının %20, %40 ve %60 oranında ve mikro kalsit tüm karışımlarda toplam agreganın %5 ve %10 oranında değiştirilmiştir. Yeni durumda KYB'lerin işlenebilirliği, çökme yayılma çapı ve zamanı, V-hunisi akış süresi, L-kutusu bloklanma oranı, U-kutusu yükseklik farkı ve J-Ring akış çapı testleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, sertleşmiş halde 7, 28 ve 90 günlük sürelerde KYB'lerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü ölçülmüştür. Sonuç olarak, düşük kireçli uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve mikro kalsit kullanılması KYB'lerin akışkanlığını, geçiş kabiliyetini ve viskozitesini olumlu etkilediği belirtilmiştir. Düşük kireçli uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun yüksek hacimde ikame edilmesiyle hazırlanan KYB karışımları, normal beton ile karşılaştırıldığında, yeterli mekanik performans gösteren KYB'ler üretilebilir hale geldiği sonucuna varılmıştır.

1.1.4. Kendiliğinden yerleşen lifli beton ile ilgili çalışmalar

Çelik, polipropilen ve alkali dirençli cam lifli yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen hafif betonların reolojik ve mekanik özellikleri Haist *et al.* (2002) tarafından incelenmiştir. Çalışmada kullanılan çelik, polipropilen ve cam liflerin uzunlukları sırasıyla 35, 12 ve 12 mm olarak seçilmiştir. Liflerinin kullanılmasıyla artan lif dozajına karşılık çökme – yayılma değerlerinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Çelik life oranla polipropilen ve cam liflerinin çok daha az dozajlarda daha az yayılma çapı olduğu belirlenmiştir. Beton hacminin %0,2'si kadar cam veya polipropilen lif kullanılması çökme – yayılma değerinde yaklaşık %34'e varan azalma olmuştur; benzer etki çelik liflerin hacimce %1 oranında kullanılmasıyla meydana gelmiştir. Bu durum polipropilen ve cam lifinin inceliğine yani özgül yüzeylerinin çelik life oranla fazla olmasından kaynaklandığı yargısına varılmıştır. Çalışmada liflerin yüksek miktarda kullanılması durumunda yayılma tablası üzerinde lif ve kaba agrega birikimleri gözlemlenmiş ve

asimetrik yayılma elde edildiği belirtilmiştir. Bu durumun özellikle polipropilen ve cam liflere göre daha uzun olan çelik lifli karışımlarda çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen taze beton sonuçlarına göre araştırmacılar, KYB’de akıcılık ve yerleşebilirlik fazla etkilenmeden kullanılabilecek lif miktarının lif tipine büyük ölçüde bağlı olduğunu ve oran olarak çelik lifler için hacimce %0,5, polipropilen ve cam lifler için ise hacimce %0,1 oranının kullanılabilecek maksimum oran olduğunu tespit etmişlerdir.

Yardımcı (2007) çalışmasında, çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların (ÇLKYB) reolojik, mekanik ve kırılma özellikleri üzerine çelik lif narinliği, miktarı ile karışımın ince ve kaba agrega oranının (İA/KA oranı) etkisi incelemiştir. Lifsiz KYB’de su/çimento oranı, su/toz madde oranı ve toplam agrega miktarı sabit tutularak, agrega fazında ince agreganın kaba agregaya oranının (İA/KA oranı) arttırılması ile; taze birim hacim ağırlığı azalmış, hava miktarı artmış, KYB’nin doldurma yeteneği ve akıcılığı gelişmiş (yayılma çapı), viskozitesi ve akışa karşı gösterdiği direnç azalmış (T50 süresi ve V-kutusu akış süresi), engeller arasından geçiş yeteneği gelişmiş olduğu sonuçlarına varılmıştır (L-kutusu bloklanma oranı artmaktadır). Belirli bir lif dozajında, karışımın İA/KA oranının arttırılması ile ÇLKYB’nin lifsiz duruma göre yayılma çapı kaybı en az düzeye indirilmiş ve geçiş yeteneği geliştirilmiştir. ÇLKYB’de lif miktarı ve lif narinliğinin arttırılması ile yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı artış gösterdiği belirlenmiştir. 55 ve 80 narinlikli lifli karışımlar için, lifsiz duruma göre belirgin yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı artışı 40 kg/m^3 lif dozajından sonra elde edildiği sonucuna varılmıştır. Lifsiz KYB’de karışımın İA/KA oranının arttırılması ile kırılma enerjisi ve karakteristik boy belirgin bir şekilde azalmış ve daha gevrek davranış göstermiştir.

Kendiliğinden yerleşen lifli hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırıldığı Mazaheripour *et al.* (2011) incelemelerinde; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme dayanımı, numunenin 28 gün süreyle kürlenmesinden sonra ölçülmüştür. Betonda %0,3 hacim oranında polipropilen lif kullanılması, çökme akışında %40’lık bir azalma ile sonuçlanmıştır (720 mm’den 430 mm’ye). Ayrıca %0,2 ve %0,1

kullanılması durumunda ise sırasıyla 560 ve 680 mm. değerlerinde çökme-yayılma çapları elde edilmiştir. Polipropilen lif kullanılan karışımlarda, lif kullanımının kendiliğinden yerleşen hafif betonun basınç dayanımını ve elastisite modulünün üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, lifin bu çalışmada belirlenen maksimum hacminin kullanılması durumunda, yarmada çekme dayanımını %14,4 ve eğilme dayanımını ise %10,7 arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kaba agrega gradasyonunun (A/B oranı, boyut 5-10 mm iri agrega ağırlığı/boyutu 10-20 mm iri agrega ağırlığı) kendiliğinden yerleşen beton (KYB) özellikleri üzerine etkisi Zhao *et al.* (2012) çalışmalarında değerlendirilmiştir. Bu amaçla, 4/6, 5/5, 6/4, 7/3, A/B oranına sahip dört adet KYB karışımı hazırlanmış, çeşitli A / B oranlarına sahip agrega yoğunluğunun, KYB'nin taze özellikleri, mekanik özellikleri, gözeneklilik ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Test sonuçları, A/B oranında 4/6 ile 7/3 arasındaki değişimle birlikte, başlangıç çökme akışı, blokaj ve segregasyon oranı azalırken, taze KYB'nin ıslak yoğunluğu artmıştır. A/B oranı 6/4 olan KYB karışımlarında, maksimum mekanik özelliklere, en az gözenekliliğe, karbonatlaşma derinliğine, klorür iyonu difüzyon katsayısına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Çeşitli A/B oranlarına sahip KYB karışımlarının basınç dayanımları 3, 7, 28, 90 günlük kür periyotlarında 36,4 ile 41,5 MPa, 44,4 ile 46,5 MPa, 50,6 ile 53,6 MPa ve 58,7 ile 60,3 MPa arasında değişmiştir. KYB'nin eğilme dayanımı gelişimi 3, 7, 28, 90 günlük kür periyotlarında sırasıyla 8,95 – 9,3 MPa, 9,56 – 9,82 MPa, 10,68 – 10,85 MPa ve 11,58 – 11,71 MPa olduğu sonucuna varılmıştır.

Aslani and Nejadi (2013) araştırmalarında, dört adet KYB karışımı (normal ve çelik, polipropilen ve hibrid lifli kendiliğinden yerleşen beton) üzerinde deneysel program gerçekleştirmişlerdir. Betonun mekanik özellikleri arasında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri incelenmiştir. Bu mekanik özellikler 3, 7, 14, 28, 56 ve 91 günlerde test edilmiştir. Propilen lif, çelik lif ve hibrit lif karışımlarında lif miktarları sırasıyla 5, 30, 18 kg/m³ kullanılmıştır. Bu çalışmada, tüm karışımlarda KYB'nin çökme akışı 600-700 mm arasında, 500 mm çapa ulaştığı çökme akışı süresi (T₅₀) 4,5 saniyeden az ve J halkası çapları ise 560-655 mm aralığında olduğu belirtilmiştir.

L-kutusu ve V-hunisi deneylerinde ise lifli karışımlarda bloklanma olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlara dayanarak: hibrit lifli KYB karışımının ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülünün sırasıyla normal KYB, polipropilen lifli KYB ve çelik lifli KYB karışımlarınınkinden daha yüksek olduğu; çelik lifli karışımının ortalama çekme dayanımının ise diğer karışımlarından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yakhlaf *et al.* (2013) çalışmalarında, karbon liflerin kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Farklı karbon lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında, %0, %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 karbon lif ve iki su-bağlayıcı oranı (0,35 ve 0,40) kullanılarak beton karışımlar üretilmiştir. Beton karışımlarının akma kabiliyeti (doldurma kabiliyeti ve geçirme kabiliyeti), çökme akışı, J-halkası çökme akışı ve T50 çökme akışı süreleri belirlenmiştir. Beton karışımlarının segregasyon direnci elek stabilite testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Görsel stabilite indeksi (VSI) ayrıca betonun segregasyon direncini değerlendirmek için kullanılmıştır. Taze karıştırılmış beton karışımları hava içeriği ve birim ağırlık bakımından test edilmiştir. Sertleşmiş beton karışımlarında, liflerin dağılımını gözlemlemek için bir Taramalı Elektron Mikroskopu ile test edilmiştir. Test sonuçları, artan karbon fiber miktarının doldurma yeteneğini ve betonun geçirme yeteneğini azalttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, karbon liflerinin betonun segregasyon direnci üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, karbon liflerin varlığında belirgin bir hava sıkışması olmamıştır. Karbon lifler iyi dağılmış ve betonun birim ağırlığını hafifçe azaltmıştır. %1 karbon lifli KYB karışımları, betonun doldurma kabiliyetini KYB standartlarına getirmek için çok fazla miktarda yüksek oranda su azaltıcı katkı (toz malzemenin %8,00) kullanılmıştır.

Beigi *et al.* (2013) tarafından yapılan araştırma kapsamında, nanosilika ile çelik, polipropilen ve cam liflerin beton karışımları üzerine etkilerini değerlendirmek amaçlanmıştır. Mekanik özellikler açısından, basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımı, tokluk ve elastisite modülü, reolojik açıdan ise L-kutusu, çökme akışı, T₅₀ süresi gibi taze beton özellikleri değerlendirilmiştir. Nanosilika çimento ağırlığının %0, %2, %4 ve %6 oranları ile üç çeşit takviye edici lif hacimce (çelik: %0,2, %0,3 ve %0,5,

polipropilen: %0,1, %0,15 ve %0,2 ve cam: %0,15, %0,2 ve %0,3) eklenerek nanosilika muhteviyatı ile A, B, C ve D olarak etiketlenen 40 beton karışımı üretilmiştir. Çalışmanın sonuçları hem nanosilika hem de liflerin optimum oranlarda varlığının, kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. Farklı türdeki takviye liflerinin kullanılması, taze KYB'nin reolojik özelliklerini olumsuz şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, nanosilika kullanılması, KYB'nin viskozitesini arttırırken KYB'nin dayanıklılığını azaltmış olup; bu durum nanosilikanın hiper aktivitesine bağlanmıştır. Çelik lif takviyeli betonda, lifin %3 oranına kadar arttırılması başlangıçta basınç dayanımını zirve değerine ulaştıracak şekilde arttırmış ve daha sonra azalmıştır, eğilme ve çekme mukavemetleri lif oranı artışı ile birlikte nispeten lineer bir artış belirlenmiştir. Polipropilen elyaf takviyeli betonda liflerin yüzdesini arttırarak basınç dayanımı azalırken, eğilme ve yarmada çekme dayanımları artmıştır. Cam lif takviyeli betonda ise basınç dayanımı referans numuneden tamamen yüksek olduğu; bununla birlikte, lif içeriğinin artması ile, basınç dayanımını azalması, buna karşın eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

KYB'de kullanılan liflerin (çelik ve polipropilen liflerin) optimum içeriğini belirlenmesi için Kamal *et al.* (2014) tarafında çalışma yapılmıştır. Farklı tür liflerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini belirlemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Çelik ve polipropilen lif farklı oranlarda, kendiliğinden yerleşen taze betona eklenmiştir. Kullanılan çelik liflerin yüzdeleri çimento içeriğinin %0,5, %0,75 ve %1,0, polipropilen lif oranları ise çimento içeriğinin %0,5, %1,0 ve %1,5 olarak belirlenmiştir. Optimum çelik ve polipropilen lif oranının, sırasıyla çimento içeriğinin %0,75 ve %1,0 olduğu kanaatine varılmıştır. Polipropilen ve çelik lifli beton karışımları, lif ilavesi olmayan kontrol numunesine göre, lif içeriğinden bağımsız olarak 28 günlük basınç dayanımı değerlerini, sırasıyla, %13 ve %37 oranında arttırmıştır.

Cam lif ile güçlendirilmiş kendiliğinden yerleşen betonun darbe dayanımı ve mekanik özellikleri Mastali *et al.* (2016) tarafından incelenmiştir. Örnek karışımlar, %0,25, %0,75 ve %1,25 lif hacimlerinde olmak üzere üç grupta geri dönüştürülmüş cam lif ile takviye edilmiştir. Lif ilaveli kendiliğinden yerleşen betonun darbe dayanımı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Matris içindeki geri dönüştürülmüş cam lifin bozulma mekanizmasını algılamak için Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş cam liflerin eklenmesi, mekanik özellikleri ve darbe dayanımını artırmış olup, hacimce %1,25 oranında lif kullanılan numunelerde maksimum basınç, eğilme ve darbe dayanımı kaydedilmiştir. Karışımların basınç, eğilme ve darbe dayanımı sonuçlarındaki yükseliş, artan cam elyaftan kaynaklı olarak, lif/matris arayüzey bağındaki güçlenmeye bağlanmıştır.

F sınıfı uçucu kül ve çengelli çelik liflerle üretilen kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) özellikleri Siddique *et al.* (2016) tarafından incelenmiştir. Reolojik (çökme akışı, V-hunisi, L-kutusu, U-kutusu), dayanım (basınç, çekme ve eğilme dayanımı) ve geçirgenlik özellikleri (gözeneklilik, hızlı klorür permeabilitesi) üzerine çelik liflerin, hacimce %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında kullanılmasının etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, KYB'nin hacimce %0,5 ve %1,0 çengelli çelik lif kullanılması durumunda işlenebilirliğinin, EFNARC tarafından belirlenen aralıkta bulunduğunu ve lif hacim fraksiyonlarının %1,5'e kadar artmasıyla bir dereceye kadar düştüğünü göstermiştir. Bu, EFNARC ve ACI 237 R tarafından öngörülen diğer reolojik özelliklerin azalmasına yol açmıştır. KYB'nin özelliklerinde iyileşme, çelik liflerin arayüzeyleri veya bağ kuvvetlerindeki güçlenme ve uçucu kül kullanımı ile gözeneklerin azalmasından kaynaklı olduğu yargısına varılmıştır. Buna karşın, lif içeriğindeki artışla birlikte 28 günlük beton deney sonuçlarına göre, basınç dayanımının 34,6'dan 38,5 N/mm²'ye, yarmada çekme dayanımının 3,8'den 6,2 N/mm²'ye ve eğilme dayanımında ise 5,5'den 8,2 N/mm²'ye kadar artış gözlenmiştir. KYB karışımlarında hacimce çelik lif içeriğinin artmasıyla, gözeneklilik %9,3'ten %9,9'a yükselmiş ve ultrasonik darbe hızında %28'lik bir düşüş gözlenmiştir.

Mastali and Dalvand (2016) çalışmalarında, çimento ile silis dumanını yer değiştirerek, geri dönüştürülmüş çelik liflerin, kendiliğinden yerleşen beton üzerine etkilerini

araştırmış ve mekanik özellikleri ile darbe direncini incelemeyi amaçlamışlardır. Mekanik özellikleri ve darbe direncini karakterize etmek için %0,25, %0,5 ve %0,75'lik farklı lif hacmi fraksiyonlarına sahip 144 numune deneysel olarak test edilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları bakımından karakterize edilmiştir. Elde edilen geniş deneysel veri tabanı ile, geri dönüştürülmüş çelik liflerle takviye edilmiş kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri arasındaki korelasyonu araştırmak için regresyon analizi kullanılarak bir analiz yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Silis dumanının çimento ile yer değiştirilmesi ve geri dönüşümlü çelik lif eklenmesi, karışımların işlenebilirliğini azaltmıştır.
- Silis dumanı ve geri dönüşümlü çelik lifin kombine etkileri sonucunda, karışımların darbe direnci ve mekanik özellikleri gelişmiştir.
- Çimentonun, silis dumanı ile yer değiştirilmesi, nihai yük taşıma kapasitesini, nihai yük taşıma kapasitesine karşılık gelen deplasmanı, kırışların eğilme yükü altında kalıcı dayanımını arttırmış, ancak numunelerin eğilme sertliği üzerinde anlamlı bir etki gözlenmemiştir.
- Basınç dayanımının en yüksek değeri %0,75 oranında geri dönüştürülmüş çelik lif kullanılmasıyla elde edilmişken, yarmada çekme ve eğilme dayanımında ise %0,25 oranında geri dönüştürülmüş çelik lif içeren kendiliğinden yerleşen lifli beton karışımlarında elde edilmiştir.

Tabatabaeian *et al.* (2017), yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun (YDKYB) reolojik, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine hibrid lif kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, çengel uçlu çelik ve polipropilen lifler olmak üzere iki tür lif kullanmışlardır. Çalışmada, 1 tanesi kontrol karışımı, 1 tanesi %0,5 çelik lif, 4 tanesi %0,5 hibrid lif (çelik ve polipropilen), 1 adet %1,0 çelik lif ve diğer 4 tanesinde %1,0 hibrid lif içeren toplam 11 farklı karışım hazırlanmıştır. Reolojik özellikleri araştırmak için çökme akışı, J halkası ve V-hunisi testleri uygulanmıştır. KYB karışımların mekanik özellikleri açısından basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı testleri uygulanarak incelenmiştir. Ayrıca, ultrasonik darbe hızı, betonun kalitesini ve

bütünlüğünü değerlendirmek için tahribatsız bir test olarak uygulanmıştır. Reolojik ve mekanik özellikler üzerine liflerin etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Çimento hamurunun akışını engelleyen liflerin varlığı nedeniyle YDKYB'deki çökme akışı azalmıştır. Polipropilen liflerin (%0,2 ve %0,3) kullanıldığı hibrid lif takviyeli karışımlar çökme akışını, çelik liflere kıyasla düşürmüş olup; bu durum polipropilen gibi organik liflerin yüksek su emme özelliğine bağlanmıştır.
- KYB'ye lif ilavesi nedeniyle V-hunisi akış süresi artmıştır. Çelik liflere oranla, polipropilen lifler V-hunisi akış süresinin arttırılmasında daha büyük etkiler göstermiştir. Çelik liflerin polipropilen liflerle yer değiştirilmesi, V-hunisi akış süresini yaklaşık %66 oranında artmasına neden olmuştur. KYB'ler için tüm V-hunisi akış süresi (6-12 sn.) arasında olduğu belirtilmiştir.
- Çelik liflerin polipropilen liflerle yer değiştirilmesi, tüm hibrid lifli numunelerin basınç dayanımını yaklaşık %38'e varan oranlarda azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, polipropilen liflerin, gözenekliliğine ve sıkışan havanın betondaki oranının artmasına bağlanmıştır.
- YDKYB'nin 28 günlük yarmada çekme dayanımı , %0,5 ve %1 çelik lif ilavesi ile büyük ölçüde artmıştır. Çelik liflerin kullanımının %0,5'den %1'e çıkması durumunda, yarmada çekme dayanımı çarpıcı bir şekilde artmıştır. Bununla birlikte, polipropilen lifler yarmada çekme dayanımını azar azar düşürmüş ve hatta bazı hibrid lif takviyeli numunelerde kontrol numunesine oranla daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

Sivakumar *et al.* (2017) tarafından yapılan araştırmada, metakaolin (MK) ve alkali dirençli cam lif takviyesinin KYB karışımlarının performansı üzerine etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Cam lifli KYB karışımlarından, %0,1 ile %0,8 oranları arasında toplam sekiz adet üretmişlerdir. Bu çalışmada reolojik (L-kutusu, çökme akışı, T_{50} süresi), mekanik (basınç, çekme ve eğilme mukavemeti) ve dayanıklılık (klorür iyon penetrasyonu ve su emme) özellikleri araştırılmıştır. Test sonuçlarına göre lif içeriğindeki artış ile işlenebilirlikte azalma olduğu gözlenmiş olup; kontrol numunesinde 680 mm. olan yayılma çapı %0,8 cam lif takviyeli betoda 552 mm. olduğu belirtilmiştir. Cam

liflerin beton basınç dayanımı üzerinde pozitif etki yaratmadığı tespit edilmiştir. Cam lifli KYB'nin yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı, lif dozunda artış ile birlikte artmıştır. Dayanıklılık çalışmalarında ise, cam lifin dahil edilmesinin, klorür iyon penetrasyonu ve betonun su emme direncini marjinal olarak düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Normal beton (NB) ile kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) sertleşmiş özellikleri Subhan vd (2016) tarafından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 12 mm uzunluğunda 600 gr/m³ miktarındaki cam liflerin KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkisinde incelenmiştir. Normal beton, KYB ve cam lifli KYB karışımları 0,35 su/çimento oranı ile hazırlanmıştır. Cam lif ilavesinin KYB'nin işlenebilirlik özelliklerini biraz azalttığı gözlenmiştir. KYB'nin basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı NB'den biraz daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte, KYB'nin kopma modülü ve elastisite modülü NB'ye göre daha düşük bulunmuştur. Cam lif ilavesinin, kendiliğinden yerleşen betonların, basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu, ancak kopma modülünü ve yarmada çekme dayanımını ise önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir.

Mastali *et al.* (2017) çalışmalarında, kendiliğinden yerleşen betonda geri dönüştürülmüş karbon liflerin kullanımının fizibilitesini araştırmışlardır. Lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş özellikleri, farklı lif uzunlukları 10, 20 ve 30 mm ile birlikte, %0,5, %1, %1,5 ve %2 farklı lif hacim oranları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Lifli karışım numunelerinin akışkanlık ve viskozite gibi taze beton özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, örneklerin ultrasonik darbe hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı gibi sertleşmiş beton özellikleride test edilmiştir. Mekanik özellikleri ve darbe dayanımını karakterize etmek için 130 adet numune deneysel olarak test edilmiştir.

Sonuç olarak, artan lif uzunluğu ve içeriği, ultrasonik darbe hızını ve lifli karışım numunelerinin akışkanlık ve viskozite özelliklerini azaltmış; darbe dayanımı ve mekanik özelliklerini arttırmıştır. Lif hacminin ve uzunluğunun artmasına bağlı olarak

gözenekliliğin fazlalaşmasına rağmen basınç dayanımındaki artış, çatlak açılmasının önlenmesinde geri dönüştürülmüş karbon liflerinin yüksek kapasitesi nedeniyle olduğu sonucuna bağlanmıştır. Ayrıca lif uzunluğu 30 mm olan örneklerde en yüksek basınç ve darbe dayanımına ulaşılırken, 20 mm lif uzunluğu ile güçlendirilmiş numunelerde en yüksek eğilme dayanımı tespit edilmiştir. Çalışmada en yüksek eğilme indeksleri, %1 lif hacim oranlı ve 10 mm lif uzunluğu içeren karışımlarda belirlenmiştir. Artan lif hacim fraksiyonu, eğilme tokluğunu sürekli olarak arttırmış, böylece %2 lif hacim fraksiyonu ve 30 mm lif uzunluğu içeren takviyeli numunelerde maksimum eğilme tokluğu artışı gözlenmiştir. Bu artış, normal kendiliğinden yerleşen betonla yapılan referans numuneye kıyasla yaklaşık 30 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Cam ve polivinil alkol (PVA) liflerinin KYB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisi Subhan and Arshad (2018) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, %0,1, %0,2 ve %0,3 oranında cam ve PVA lifleri içeren ve su/toz malzeme oranı 0,35 olan karışımlar hazırlanmıştır. Taze beton özellikleri yayılma çapı, T_{50} süresi, L-kutusu ve V-hunisi testleri kullanılarak incelenmiştir. Sertleşmiş beton özellikleri olarak da, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı değerleri elde edilmiştir. Deneyler, liflerin işlenebilirlik özelliklerini (akış kabiliyeti, geçirme kabiliyeti ve ayrışmaya karşı direnç) hafifçe azaldığını ortaya çıkarmıştır. Sertleşmiş beton özellikleri lif ilavesinden sonra geliştiği ve bu iyileşmenin cam lifli KYB karışımlarında daha fazla olduğu gözlenmiştir.

1.1.5. Kendiliğinden yerleşen betonlarda kırılma enerjisi ile ilgili çalışmalar

Beygi *et al.* (2013) çalışmalarında KYB'nin kırılma özellikleri üzerine yapılan deneysel bir araştırmayı incelemişlerdir. Farklı su/çimento (w/c) oranlarında 154 adet çentikli giriş üzerinde üç noktalı eğilme testleri yapmışlardır. Numuneler, 0.35 ile 0.70 arasında değişen su/çimento oranlarındadır. Tüm karışımlar için, ortak kırılma parametreleri, Kırılma İş Yöntemi (KİY) ve Boyut Etkisi Yöntemi (BEY) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarında, KYB'de su/çimento oranının 0,7'den 0.35'e düşürülmesiyle: (a) kırılma tokluğunun lineer olarak arttığını; (b) kırılmalık

sayısının yaklaşık olarak iki katı olduğunu; (c) boyut etkisi modelinde işlem bölgesinin efektif boyutu (c_f) ile kırılma işi yöntemindeki karakteristik uzunluğunun (l_{ch}) azaldığını ki; bu durumunda agrega-hamur geçiş bölgesindeki yapısal gözenekliliğin değişiklikleri ile belirlemişlerdir. Ayrıca sonuçlar, KİY ile ölçülen kırılma enerjisi (G_F) ile BEY’de ölçülen kırılma enerjisi (G_f) arasında $G_F \cong 2.92G_f$ gibi bir korelasyonun olduğunu göstermişlerdir.

Hossain *et al.* (2013) çalışmalarında, farklı hacimlerde polivinil alkol (PVA) ve metalik liflerin hacimce en fazla %0,30 oranında birleştirilerek 18 adet kendiliğinden yerleşen beton karışımı geliştirmişlerdir. Tüm lifli beton karışımlar taze ve mekanik özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Taze beton özelliklerden (çökme akışı, L-kutu geçiş kabiliyeti, V-hunisi akış süresi ve ayrışma indeksi) ve sertleşmiş beton özelliklerinden (kırılma enerjisi ve basınç/eğilme/yarmada çekme dayanımı) üzerine fiber tipi/boyutu/dozajı ve kombinasyonunun (hibrid karışımlarda) etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, taze beton özelliklerinden akışkanlık/geçiş kabiliyeti azalmış ve V-hunisi akış süresi lif hacmindeki artış ile birlikte artmıştır. Lifli beton karışımlarında, özellikle metalik lifler kullanılan karışımlarda kırılma enerjisi, basınç/eğilme/yarmada çekme dayanımına göre daha fazla oranda artmıştır. Basınç dayanımında %10, eğilme dayanımında ise %124'lük bir artışa kıyasla, kırılma enerjisinde yaklaşık %507'lik artış gözlemlenmiştir.

Kırılma parametrelerinin ve çatlama davranışının iyi bilinmesi, KYB’nin erken yaştan başlayıp olgunlaşmaya kadar KYB yapısının tasarımında ve ayrıca değerlendirilmesi ve dolayısıyla hasarın önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Beygi *et al.* (2014a) çalışmalarında 0,45 ve 0,65 su/çimento oranlarına sahip KYB karışımları için farklı yaşlarda (örneğin 3 gün, 7 gün, 28 gün ve 90 gün) kırılma parametrelerinin ve buna karşılık gelen süneklik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bunu yapmak için 120 adet çentikli kiriş üzerinde üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, sonuçların yorumlanması için Boyut Etkisi Yöntemi (BEY) ve Kırılma İş Yöntemi (KİY) uygulanmıştır. Analiz sonuçları, betonun 3 gün ile 90 gün arasında ; (a) BEY’den elde edilen kırılma enerjisi (G_f) ve KİY’den elde edilen kırılma enerjisi (G_F) değerleri artmıştır, (b) BEY’de elde edilen proses bölgesinin efektif boyutu (C_f) ile KİY’de elde

edilen karakteristik uzunluk (L_{ch}) betonun kırılma dayanıklılığı arttıkça azalmıştır, (c) Kırılma tokluğu önemli derecede artmıştır, (d) Kırılma dayanıklılığı sayısı yaklaşık iki katına çıkmıştır. Ayrıca, farklı yaşlarda çatlamanın sayısal modellerinin kalibrasyonu için uygulanan G_F / G_f oranı 2.70'e eşit olduğu sonucuna varılmıştır.

Beygi *et al.* (2014b) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, iri agrega maksimum boyutunun, KYB'nin kırılma özellikleri ve gevrekliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneysel bir programa dayanarak, RILEM tarafından önerildiği üzere, 86 çentikli kırış üzerinde üç noktalı eğilme testi serisi gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımlar için, parametreler kırılma işi yöntemi ve boyut etkisi yöntemi ile analiz edilmiş ve çatlak sayısal modellerin kalibrasyonunda kullanılan bu yöntemler arasında bir korelasyon elde edilmiştir. Deney sonuçları, iri agrega boyutunun artmasıyla, kırılma işi yöntemi ile bulunan kırılma enerjisi (G_F) ve boyut etkisi yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi (G_f)'nin arttığını ve bu durum fraktal boyutların değişimi ile açıklanmıştır. KYB sünekliği, kırılma işi yöntemindeki karakteristik uzunluk (L_{ch}) ve boyut etkisi yöntemindeki kırılma işlem bölgesi uzunluğu (C_f) aracılığıyla ölçülmüş ve arttıkları gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, G_F ve G_f değerleri arasındaki korelasyon oranının yaklaşık 2.94'e eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Kırılma tokluğu, 9,5 mm'lik azami agrega boyutunun kullanıldığı karışımlara kıyasla, 19 mm'lik azami agrega boyutu kullanılan karışımlarda %20 civarında arttığı tespit edilmiştir.

İri agrega hacminin KYB'nin kırılma özellikleri üzerine etkisi ise Nikbin *et al.* (2014) tarafından incelenmiştir. Deneysel bir programa dayanarak, 58 adet çentikli kırış üzerinde üç noktalı eğilme testi serisi gerçekleştirilmiştir. KYB, %30, %40, %50 ve %60'lık (toplam agrega hacminin yüzdesi olarak) değişen yüzdelerde iri agrega ile hazırlanmıştır.¹ Sonuçlar, iri agrega hacminin KYB'de %60'dan %30'a düşürülmesiyle kırılma işi yönteminden elde edilen kırılma enerjisi (G_F) ile boyut etkisi yönteminden elde edilen kırılma enerjisi (G_f) değerleri azalmıştır ki; bu durum fraktal boyutların⁽¹⁾ değişimiyle

⁽¹⁾ Mandelbrot (1967) tarafından, doğada bulunan düzensiz şekillere sahip cisimlerin geometrilerini tanımlamak amacıyla önerilen bir terimdir.

açıklanabilmektedir. Süneklik değerini temsil eden kırılma işi yöntemindeki karakteristik uzunluk (L_{ch}) ve boyut etkisi yöntemindeki kırılma işlem bölgesi uzunluğu (C_f) değerlerinde önemli oranda azalma olmuştur. Kırılma sayısı yaklaşık üç kat artmıştır. İri agrega hacminin %30'dan %60'a yükselmesiyle karakteristik uzunluk (L_{ch}) 251,8 mm. den 358,3 mm. kırılma işlem bölgesi uzunluğu (C_f) ise 8,9 mm. den 27,5 mm. ye kadar artmıştır. %60 oranında iri agrega kullanılan karışımlarda kırılma tokluğu %30 iri agrega kullanılan karışımlara oranla %38 oranında artmıştır. İri agrega hacminin %30'dan %60'a yükselmesi, KYB'nin kırılma parametreleri üzerinde diğer mekanik özelliklere göre daha fazla etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Karamloo *et al.* (2016a) çalışmalarında maksimum agrega boyutunun (d_{max}) kırılma parametreleri ve kendiliğinden yerleşen hafif betonun gevrekliği üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Farklı boyutlardaki 84 çentikli kiriş üzerinde bir dizi üç noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Maksimum agrega boyutu 9,5; 12,5 ve 19 mm ve su/çimento oranları 0,35 ve 0,40 olan altı karışım üzerinde inceleme yapılmıştır. Her bir karışımda, parametreler boyut etkisi yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonuçlar d_{max} arttıkça fraktal boyutlarda meydana gelen değişikliklerle açıklanabilen kırılma tokluğunun ve enerjisinin arttığını göstermiştir. Kırılma işlem bölgesi efektif uzunluğu vasıtasıyla ölçülen süneklik artmıştır. Maksimum agrega boyutu 9,5 mm'den 19 mm'ye yükseldiğinde kırılma enerjisi sırasıyla 0,35 ve 0,40 su/çimento oranlarında %47,7 ile %86,7 oranlarında artış göstermiştir. Aynı maksimum agrega boyutuna sahip karışımlar için, su/çimento oranının artması kırılma işlem bölgesinin efektif uzunluğu aracılığıyla ölçülen sünekliği azaltmıştır.

Kendiliğinden yerleşen hafif betonların, su/çimento oranının mekanik özelliklere ve kırılma davranışına etkileri Karamloo *et al.* (2016b) tarafından yapılan çalışmada tartışılmıştır. Bu amaçla, 0,35'den 0,5'e kadar farklı su/çimento oranlarına sahip dört karışım bileşimi, iri ve ince agregaların maksimum agrega boyutu ve ağırlığı sabit tutulacak şekilde hazırlanmıştır. Kırılma parametrelerini belirlemek için, her bir karışım için 12 adet çentikli kiriş numunesi hazırlanmış ve sonuçlar boyut etkisi yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, su/çimento oranı, kırılma davranışı ve mekanik özellikler

arasında belirgin bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kırılma enerjisinin, su/çimento oranından oldukça etkilendiği belirtilmiştir ki; su/çimento oranı 0,35'den 0,5'e yükseldiğinde, kırılma enerjisi %65,9 oranında azalmıştır. Çalışmada, su/çimento oranı 0,35'den 0,5'e yükseldiğinde, kendiliğinden yerleşen hafif betonun elastisite modülü, basınç ve yarmada çekme dayanımında sırasıyla %24,7, %40,9 ve %36,8 oranlarında azaldığı sonucuna varılmıştır.

Nikbin *et al.* (2016) çalışmalarında mineral katkıların, KYB'nin kırılma davranışı ve sünekliği üzerine etkisini incelemiştir. Deneysel bir programa dayanarak, 118 adet çentikli kiriş üzerinde üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Su/çimento oranı 0,47 ve 0,60 olan farklı oranlarda mineral katkı içeren beton numuneler hazırlanmıştır. Tüm karışımların, kırılma parametreleri, kırılma sayısal modellerini kalibre etmek için kullanılan metotlar arasında uygun korelasyon elde etmek için kırılma işi yöntemi ve boyut etkisi yöntemi ile analiz edilmiştir. KYB'de mineral katkı malzemesi içeriğindeki artış ve su/çimento oranındaki azalma göz önüne alındığında, kırılma enerjileri, kırılma işi yönteminde (G_F) ve boyut etkisi yönteminde (G_f) hafif artmıştır. Kırılma işi yönteminde ki karakteristik uzunluk (L_{ch}) ve boyut etkisi yönteminde ki kırılma işlem bölgesi uzunluğu (C_f) azalmıştır ki; bu durum, paketleme yoğunluğundaki bir artışa ve gözenek boyut dağılımındaki değişikliklere bağlı olabileceği yargısına varılmıştır. Buna ek olarak, sonuçlar G_F ve G_f değerleri arasında önemli bir korelasyon olduğunu göstermiştir ($G_F/G_f = 3,0$).

Gesoglu vd (2017) çalışmalarında, çimento ile yer değiştirme malzemesi olarak kullanılan çeşitli miktarlarda plastik atık tozu içeren KYB'lerin mekanik ve kırılma özelliklerini ele almışlardır. Çimento ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında plastik atık tozu ile yer değiştirilmiş ve böylece 700 ± 30 mm'lik bir sabit yayılma çapı olan, toplam bağlayıcı içeriği 550 kg/m^3 ve su/bağlayıcı oranı 0,35 olan 6 adet KYB karışımı tasarlanmıştır. KYB'lerin mekanik özellikleri açısından, yarmada çekme dayanımı, net eğilme dayanımı ve elastisite modülü test edilmiştir. Ayrıca, çentikli kirişlerde üç noktalı eğilme testi ile betonun kırılma özellikleri belirlenmiştir. Bulgular, PVC toz modifiye KYB'lerin mekanik özelliklerinin azaldığını ve betonun daha gevrek hale geldiğini göstermiştir.

Plastik atık tozu malzemesinin zayıf doğası nedeniyle, modifiye betonlarda yük-yer değiştirme eğrisi altındaki alan ve dolayısıyla kırılma enerjisinin daha düşük olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, plastik atık tozunun daha elastik özelliğinden dolayı, daha yüksek nihai deplasman, karakteristik uzunluk ve daha yüksek gerilim değeri elde edilmiştir. Kırılma enerjisi ve karakteristik uzunluk, yüksek korelasyon katsayısı ile basınç parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceği ve bu parametreler arasında doğrudan bir ilişki olduğu yargısına varılmıştır.

Atık lastik ilavesinin kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerine ve eğilme altındaki kırılma özelliklerine etkisi Bideci vd (2017) tarafından çalışmalarında araştırılmıştır. Bu çalışmada, 25, 50 ve 75 mm uzunluklarında mekanik olarak kesilmiş atık lastikleri, iri agregalarla hacimsel olarak yer değiştirildiği KYB'ler hazırlanmıştır. Atık lastiklerin, iri agregalarla %5, %10 ve %15 oranlarında hacimce yer değiştirilmesiyle elde edilen betonlarda birim ağırlık, akış, J-halkası, su emme, 28 günlük basınç dayanımı, ultrason darbe hızı ve kırılma enerjisi testleri uygulanmıştır. Ayrıca, numuneler Taramalı Elektronik Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS) analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada, atık lastiğin iri agregalarla yer değiştirilmesinin taze betonun birim ağırlığını azalttığı belirlenmiştir. Atık lastik uzunluğu arttıkça, betonun donatı çubukları arasından geçmesi zorlaşmış; %10 atık lastik ilavesi basınç dayanımı değerlerini arttırmıştır. 50 mm kauçuk uzunluğu ve hacimsel kauçuk içeriği %5 ve %10 olan numunelerde kırılma enerjisi değerleri artmıştır. Hacimsel kauçuk içeriğinin %10'undan sonra kırılma enerjisinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen betonlara 25 mm uzunluğunda %10 oranında agregalar yerine kullanılan atık lastiğin optimum sonuçlar verebileceği belirlenmiştir.

Ghasemi *et al.* (2017) çalışmalarında, kendiliğinden yerleşen betonda kullanılan maksimum agregalar boyutu ile çelik liflerin hacimsel oranlarını değiştirerek beton karışımlarında kırılma ve kırılabilirlik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Laboratuvar programı uygulanmış ve lif ve agregalar yüzdesi değişken olarak belirlenmiştir. Buna göre, %0,1, %0,3 ve %0,5 çelik lif içeren 3 seri halinde 9 karışım tasarımı hazırlanmış ve her bir lif serisinde üç agregalar ebadı (9,5, 12,5 ve 19 mm.) kullanılmıştır.

Toplam 108 adet farklı boyutta çentikli kiriş hazırlanmış ve kırılma parametreleri, Kırılma İşi Yöntemi (KİY) ve Boyut Etki Yöntemi (BEY) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, kırılma işi yönteminde daha belirgin olmasına rağmen her iki yöntemde de, 12,5 mm'lik en büyük agrega boyutunun, kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton için uygun olabileceğini göstermiştir. Agrega büyüklüğünün 19 mm'ye çıkmasıyla kırılma işi yönteminde G_F ve L_{ch} değerlerinde azalma belirlenmiştir. Bununla birlikte, boyut etkisi yönteminde, lif oranı arttıkça betonun daha sünek, d_{max} arttıkça ise daha gevrek olacağı gözlenmiştir. Boyut etkisi yöntemiyle karşılaştırıldığında, kırılma işi yöntemi hem agrega boyutu hem de çelik lif yüzdesi arttıkça enerji emiliminde daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu tür betonlarda farklı lif yüzdeleri kullanılması durumunda G_F / G_f oranı 8,89 olarak tespit edilmiştir.

Farklı karbon lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemek üzere Safiuddin *et al.* (2018) tarafından çalışma yapılmıştır. Betonun hacimce %0-1 oranında 10 mm uzunluğunda karbon lifleri ilave edilerek 10 adet beton karışımı 0,35 ve 0,40'lık iki farklı su-bağlayıcı oranı ile hazırlanmıştır. Basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı ve karışımların tokluk veya kırılma enerjisi gibi önemli mekanik özellikler belirlenmiştir. Ayrıca, tüm karışımların mikro yapısı, kendiliğinden yerleşen betonda karbon liflerin dağılımı incelemek için kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikyografaları (TEM'ler) ile de gözlemlenmiştir. Karbon lifleri KYB'nin dolgu kabiliyetini ve geçirme yeteneğini azaltmış, ancak betonun akışkanlığını azaltarak segregasyon direncini arttırmıştır. Test sonuçları, karbon liflerin artan miktarının, su/çimento oranına ve kürlenmesi bağlı olarak %36,6-58,9 oranında karışımların basınç dayanımını azalttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, daha yüksek karbon lif miktarı, beton karışımlarının yarmada çekme dayanımını, farklı su/çimento oranlarında ve kür koşullarında %13,1-17,00 oranında arttırmıştır. Ayrıca, eğilme dayanımı ve tokluğu, %0,25 karbon lif ilavesi için sırasıyla %3,60 ve %41,40 oranında artmıştır. Yük-yerdeğiştirme davranış diyagramları, %0,25 karbon lifli karışımların, yükleme altında en iyi tepe sonrası tepkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, TEM'ler, 0,35 su/çimento oranına sahip karışımların, 0,50 su/çimento oranına sahip karışımlardan daha az gözenekli ve daha yoğun olduğunu göstermiştir.

Safari *et al.* (2018) çalışmalarında, pirinç kabuğu külü ve 3,8 cm. uzunluğunda makro sentetik liflerin (polietilen) kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Pirinç kabuğu külü (%0-8) ve lifin (%0-0,3), KYB karışımlarında işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, KYB karışımındaki pirinç kabuğu külünün akıcılık ve plastik viskozite üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Aksine, lif katkılı karışımlarda ise segregasyon meydana gelmiş ve özellikle yüksek oranlarda tıkanmaya yol açmıştır. Sonuçlara göre, lif, çimento hamurunun viskozitesi arttıkça daha az problem oluşturmuştur. Ayrıca, lif ilaveli betonların 28 günlük basınç dayanımı değerleri kontrol betonuna göre azalmıştır. Çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testi sonuçlarına göre, lif ve pirinç kabuğu külü, eğilme dayanımını doğrusal olarak etkilemiştir. Eğilme testinde köprüleme makro çatlaklarında pirinç kabuğu külü ile makro sentetik lif arasında sinerjik bir etkinin varlığı gözlemlenmiştir. Külün %5,1'i ve lifin %0,3'ü kombinasyonu en yüksek sinerjik etkiyi sağlamıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

1980'li yılların başında Japonya'da betonarme yapılardaki dayanıklılık sorunları incelenmiş ve bu sorunların en önemli nedenleri arasında, taze betonun yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin yeteri düzeyde olmadığı sonucuna varılmıştır. Özellikle taze betonun sıkıştırılması için gerekli vasıflı işçi sayısının kademeli azalması, betonun kalitesini olumsuz yönde etkilemekteydi (Topçu 2006). Bu sorun, bilim adamlarını dayanıklı beton üretimi için yeni araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Sonuç olarak, dayanıklı beton yapıların elde edilmesine yönelik bir çözüm olarak, kendi ağırlığı ile herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmadan, kalıbın her köşesine yayılabilen ve kendi kendini sıkıştırabilen beton olabileceği kanaatine varılmıştır. Bu tip betonun gerekliliği 1986 yılında Okamura tarafından önerilmiştir. KYB'nin kullanımı için yapılan araştırmaların temel nedenleri, inşaat süresini kısaltmak, ulaşılması zor olan sınırlı bölgeleri vibrasyonsuz ulaşmak ve titreşimden kaynaklanan gürültüyü ortadan kaldırmaktır (Okamura and Ouchi 2003). İlk prototip KYB, 1988 yılında, geleneksel vibrasyonlu betonda kullanılan malzemelerle hazırlanarak Tokyo Üniversitesi'nde yapılmıştır (Ozawa *et al.* 1989).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yerleştirme ve sıkıştırma için titreşim gerektirmeyen yenilikçi bir betondur. Sıkışık donatılı betonarme varlığında bile, kendi ağırlığı altında akabilir, kalıpları tamamen doldurur ve tam bir sıkıştırma gerçekleştirir. Sertleşmiş beton yoğun, homojen ve geleneksel betonlarla aynı mühendislik özelliklerine ve dayanıklılığa sahiptir. Kendiliğinden yerleşen beton, hızlı inşaat süreleri ve yoğun donatı durumunda kolay akış ile hızlı bir beton yerleştirme olanağı sunar. KYB'nin akışkanlık ve segregasyona karşı direnci, yüksek bir homojenlik seviyesi sağlar, minimum beton boşlukları ve üniform beton dayanımı ile yapıya üstün bir yüzey kalitesi ve dayanıklılık sağlar. KYB'nin genellikle erken dayanımı, erken kalıptan çıkarma olanağı ile elemanların ve yapıların daha hızlı kullanılması potansiyeline sahip düşük su çimento oranı ile üretilir (EFNARC 2005).

2.1.1. Kendiliğinden yerleşen beton tasarımı

KYB'yi karakterize eden genel özellikler yüksek akıcılık, yüksek stabilite ve düşük bloklanma riskidir (engeller arasından iyi geçiş yeteneği). Bu özelliklerin sağlanması için taze beton akıcı kıvama, optimum viskoziteye ve kohezyona sahip olmalıdır. Bunların sağlanması için karışım tasarımı iyi yapılmalı ve uygun malzemeler uygun oranlarda kullanılmalıdır. Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta geleneksel sıkıştırma işlemi uygulanacak şekilde tasarlanmış bir betonun sadece süperakışkanlaştırıcı ilavesi ile KYB haline getirilemeyeceğidir. Genel tasarım ilkeleri; yüksek hamur hacmi, düşük kaba agrega içeriği, düşük maksimum agrega çapı, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı ve viskozite arttırıcı inert veya puzolanik toz malzemeler ve/veya viskozite düzenleyici kimyasal katkıların kullanımıdır (Yardımcı 2007).

Taze beton yerine yerleşirken iri agregaların beton içinde çarpışma ve sürtünmesi iç gerilmeleri arttırmakta bu da betonun akış enerjisini önemli şekilde düşürmektedir. Özellikle yoğun donatılı bölgelerde ve dar kesitlerde iri agregaların sürtünme ve çarpışması artmakta ve bloklanma tehlikesi meydana gelmektedir. KYB üretiminde önemli etkenlerden bir tanesi de betondaki mikrofiller kullanımıdır. Mikrofiller malzemelerin kullanılması ile birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmaktadır. Silis unu, silis dumanı, uçucu kül gibi mikrofiller malzemeler iri taneler arası sürtünmeyi azaltarak akıcılığı arttırmakta, viskoziteyi belli değerlerde tutarak ayrışma tehlikesini düşürmekte aynı zamanda boşluk dolduruculuk etkileri ile yoğunluğu ve geçirimsizliliği arttırırken mukavemete de önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedirler (Dinç 2007).

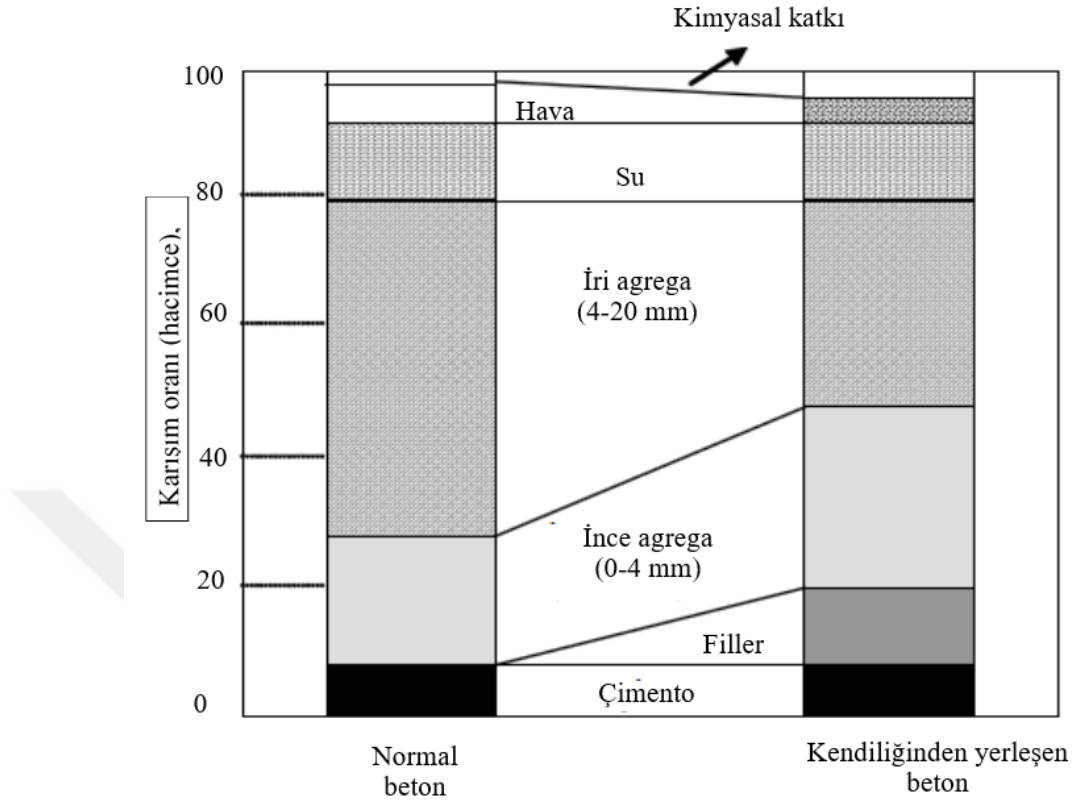
KYB'de hamur hacmi, genellikle beton hacminin %35-%40'ı arasındadır. Bu hamur hacmi parçacık boyutu 100–125 μ 'dan küçük toz malzemelerin 400–650 kg/m³ dozajında sağlanabilmektedir. Toz malzeme içeriğinin hepsi çimento olarak kullanılmayıp uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kırmataş tozu ve kuvars tozu gibi inert veya puzolanik mineral katkıları da toz malzeme olarak kullanılır.

Genel olarak çimento dozajı 200 – 400 kg/m³ arasında olmaktadır. Genellikle su/toz malzeme oranı ağırlıkça 0,25–0,40 arasında değişmektedir (Domone and Chai 1996; Skarendahl and Petersson 2000; Yardımcı 2007).

Hamur akışkanlığı ve viskozitesi, su/toz malzeme oranının sınırlandırılması, süperakışkanlaştırıcı ve isteğe bağlı olarak viskozite iyileştirici katkı maddesi ilave edilerek, çimento ve diğer malzemelerin dikkatli seçimi ve oranlanması ile ayarlanır ve dengelenir. KYB'nin bu bileşenlerini doğru bir şekilde kontrolü, uyumluluk ve etkileşimi, iyi doldurma kabiliyetine ulaşma, geçme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç elde etmenin anahtarıdır. Bu kapsamda, kendiliğinden yerleşen betonun, normal titreşimli betona kıyasla aşağıda belirtilen tasarım parametrelerini sağlaması gerekmektedir (EFNARC 2005)

- Düşük iri agrega içeriği
- Arttırılmış hamur hacmi
- Düşük su/toz malzeme oranı
- Arttırılmış süper akışkanlaştırıcı miktarı
- Gerektiğinde viskoziteyi modifiye eden katkı kullanımı

Yukarıda bahsedilen, kendiliğinden yerleşen betonun, normal titreşimli betona kıyasla tasarım parametrelerindeki farklılıkların grafiksel gösterimi Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Normal beton ile KYB'nin tasarım parametreleri açısından karşılaştırılması

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tipik bir KYB karışımında normal betona göre iri agrega miktarı azaltılmış ve ince agrega miktarı arttırılmıştır. Ayrıca şekilde filler olarak gösterilen, inert veya puzolanik toz malzemeler kullanılmaktadır. Karışımın toz malzeme miktarının arttırılması, karışımın viskozitesini artırır ve eşik kayma gerilmesini düşürür. Böylece KYB karışımının akıcılığı arttırılabilmektedir (Toyoharu *et al.* 1998; Yardımcı 2007).

Çizelge 2.1'de, KYB'deki kütlece ve hacimce tipik bileşen aralıkları gösterilmiştir. Bu oranlar hiçbir şekilde kısıtlayıcı değildir ve birçok KYB karışımı bir veya daha fazla bileşen için bu aralığın dışında kalabilir (EFNARC 2005).

Çizelge 2.1. KYB karışım bileşenlerinin tipik aralığı (EFNARC 2005)

Bileşen	Kütlece tipik aralık (kg/m ³)	Hacimce tipik aralık (lt/m ³)
Toz	380 - 600	
Hamur		300 - 380
Su	150 - 210	150 - 210
İri agreg	750 - 1000	270 - 360
İnce agreg		
Hacimce su/toz oranı		0,85 – 1,10

Yaklaşık son yirmi yılda, kendiliğinden yerleşen beton özelliklerini sağlamak için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda birçok dizayn yöntemi geliştirilmesine rağmen temelde 3 ana yöntem bulunmaktadır.

- Toz tipi yöntemi

Okamura and Ozawa (1995) çalışmalarında, KYB karışımı için basit bir karışım oranlama sistemi önermiştir. Yöntemin temelinde, beton içindeki iri agreg içeriği katı hacminin %50'sinde ve ince agreg içeriğinin ise harç hacminin %40'ında sabitlenmesi olarak belirlenmiştir. Harcın özelliklerine bağlı olarak, su ile toz oranı 0,90-1,00 aralığında olması önerilmiştir. KYB'nin su/toz oranına yüksek hassasiyeti nedeniyle dikkatlice seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Kendiliğinden yerleşebilirlik, süperakışkanlaştırıcı dozajı ve nihai su/toz oranının ayarlanmasıyla elde edileceği gözlenmiştir. Hazırlanan karışımlarda çakıl ve kumun bağımsız değerlendirmesi, nispeten karışımın yüksek bir hamur içeriği ile sonuçlanmasına neden olmuştur. Japon yöntemi olarak bilinen bu yöntem birçok Avrupa ülkesinde KYB'nin geliştirilmesi için bir başlangıç noktası olarak benimsenmiş ve kullanılmıştır (Brouwers and Radix 2005; Deep 2013).

- Stabilizatör Yöntemi

KYB'nin karışımına yüksek bir oranda viskozite arttırıcı katkı ilave edilmesiyle, viskozite kontrol altına alınabilmekte ve toz malzeme tipine bağlı olmakla birlikte, daha az toz malzeme kullanılarak arttırılabilmektedir. Bu yöntemde, istenilen akış kabiliyetine ulaşmak için, toz tipi yönteme kıyasla daha yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı veya daha yüksek su/toz oranı gereklidir.

- Kombinasyon tipi yöntemi

Bu yöntemde amaç, az miktarda viskozite arttırıcı katkı ekleyerek toz tipi KYB'nin dayanıklılığını geliştirmektir. Bu tür karışımlarda, viskozite arttırıcı katkı miktarı stabilizatör yöntemi ile hazırlanan KYB'den daha düşüktür ve toz içeriği ile su/toz oranı, toz tipi KYB'dekinden daha azdır. Viskozite, toz ile birlikte viskozite arttırıcı katkı tarafından sağlanır. Bu tip KYB'nin yüksek doldurma kabiliyeti, yüksek segregasyon direnci ve gelişmiş dayanıma sahip olduğu bilinmektedir (Roziere *et al.* 2007; Deep 2013).

2.1.2. Kendiliğinden yerleşen beton karışımını oluşturan malzeme özellikleri

Beton temelde, çimentonun bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı çimento, iri ve ince agrega ve su karışımıdır. Kendiliğinden yerleşen beton, normal beton ile aynı kurucu malzemelere sahiptir, ancak bunlar nispi oranlarda farklılık gösterir ve kesin olarak belirlenmesi gerekir. Bunun arkasındaki sebep, KYB'nin performansının büyük ölçüde bileşenlerinin özelliklerine bağlı olmasıdır. Bu nedenle, uygun kurucu malzemeler seçilmeli ve uygun KYB'yi üretmek için daha fazla uygulama yapılmalıdır.

KYB, çimento ve silis dumanı, yüksek fırın curufü, uçucu kül ve kalker tozu gibi çimento ile yerdeğiştiren mineral katkı malzemeleri, iri ve ince agregalar, süper akışkanlaştırıcı gibi kimyasal katkı maddeleri, viskozite değiştirici maddeler ve sudan oluşur. Aşağıda kısaca KYB'nin bileşen malzemelerinin özellikleri açıklanmaktadır.

- Mineral Katkılar

Mineral katkı malzemelerinin partikül büyüklüğü dağılımı, şekli ve su emmesi, su talebini ve dolayısıyla KYB üretiminde kullanım için uygunluğunu etkileyebilir. Kalsiyum karbonat esaslı mineral katkıları yaygın olarak kullanılır ve mükemmel reolojik özellikleri ile iyi bir sonuç verebilir. Parçacık büyüklüğü, portland çimentosu ile aynı veya daha küçüktür ve bunlar, çoğunlukla puzolanik davranış sergileyebildikleri için, hidrasyon reaksiyonlarına dahil olurlar. Mineral katkı malzemelerinin parçacık büyüklüğü için en uygunu, 0,125 mm'den daha küçük olması ve genel olarak %70'den daha fazlasının 0.063 mm'lik elekten geçmesidir (EFNARC 2005).

KYB karışımının viskozitesini artırarak, KYB karışımının taşınması ve yerleştirilmesi sırasında artan akışkanlıktan kaynaklanan segregasyon ve terlemelerin üstesinden gelinebilir. Bu, genellikle yüksek hacimli bir hamur kullanılarak, maksimum agrega büyüklüğünü sınırlandırarak veya viskozite değiştirici katkı maddeleri kullanarak sağlanır (Khayat 1999). Ancak, kimyasal katkı kullanımı beton maliyetini yükseltmektedir. Çimento içeriğinin arttırılmasıyla ise yüksek toz muhtevasının elde edilemeyeceği, ayrıca hidrasyon ve yüksek kuruma büzülme sırasındaki sıcaklık artışına bağlı olarak, beton özellikleri üzerinde bazı olumsuz etkilere yol açacağından, KYB karışımına mineral katkı malzemelerinin dahil edilmesi gerekmektedir. Çizelge 2.2'de mineral katkı malzemelerinin su ile reaksiyon kapasitelerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Mineral katkı malzemelerinin su ile reaksiyon kapasitelerinin sınıflandırılması (EFNARC 2005)

TİP I	İnert veya yarı inert	Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vs.) Pigmentler
TİP II	Puzolanik	Uçucu kül Silis dumanı
	Hidrolik	Yüksek fırın cürufu

Mineral katkı maddeleri kullanılan betonlarda, genellikle çimento ağırlığı belirli bir oranda azaltılır ve azaltılan bu kısım kadar mineral katkı maddesi ilave edilir. Bu maddelerin özgül ağırlığının çimentodan daha az olmasından dolayı; kullanılan bağlayıcı malzemelerin toplam hacmi artmaktadır. Bu hacim artışı, beton karışımının işlenebilirlik ve akıcılık özellikleri üzerinde olumlu etki sağlamaktadır. Ayrıca daha az miktarda çimento kullanılması hidrasyon ısısında azalmasına neden olmaktadır.

İnce taneli puzolanik katkıların çimento içerisinde dayanım kazanmaları, bu maddelerin çimentodaki kalsiyum silikatlı anabileşenlerin hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmeleri ile mümkün olmaktadır. Puzolanik malzemeler ile kalsiyum hidroksit ve su arasındaki reaksiyon, yeni C-S-H jellerinin oluşmasına ve dayanımın artmasına neden olmaktadır (Erdoğan 2013). Bu nedenden dolayı, mineral katkı ilaveli beton karışımlarının erken yaş dayanım değerleri, katkısız beton karışımlarından daha düşüktür. Kür süresi boyunca, katkılı beton karışımlarının dayanımları, katkısız karışımlarinkinden daha fazla artış gösterir. Uzun dönemde, katkılı beton karışımlarının dayanımı, eşdeğer bağlayıcı içeriğe sahip katkısız karışımlardan daha az olmamaktadır. Mineral katkılı beton karışımının dayanım kazanma hızı ve nihai dayanımı, kullanılan katkı tipi ve miktarı tarafından etkilenmektedir.

En yaygın olarak kullanılan mineral katkı malzemeleri yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül olup; bu minerakl katkı malzemeleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Yüksek fırın cürufü

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik tesislerinde demir üretimi sırasında yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması sonucu açığa çıkan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu aniden soğutularak granüle hale getirilir ve daha sonrasında öğütülür. Öğütülen bu malzeme çimento üretimi sırasında katılabildiği gibi, beton karışımı hazırlama esnasında da katkı olarak ilave edilebilmektedir.

Ülkemizde bulunan yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonunda en fazla yer alan oksitler %34-41 CaO, %34-36 SiO₂, %13-19 aralığında ise Al₂O₃'dir. Yaklaşık %30–40 oranlarında yer alan CaO'dan dolayı kendiliğinden bir miktar bağlayıcılık göstermesine yol açmaktadır (Erdoğan 1977). İnce taneli yüksek fırın cürufunun katkı maddesi olarak kullanılması durumunda taze betonun işlenebilirliği artmakta, bu nedenle de karışım suyu ihtiyacı azalmaktadır.

Yüksek fırın cürufu beton karışımlarda, en yüksek dayanım değerlerinin, çimento ağırlığının %50-55'lik oranında cüruf ile yerdeğiştirmiş karışımlarda elde edildiği yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır (Hogan and Meusel 1981; Hwang and Lin 1986; Öner ve Akyüz 2007).

- Silis dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın soğutularak yoğunlaştırılması neticesinde elde edilen amorf yapıya sahip malzeme silis dumanı olarak adlandırılmaktadır. Silis dumanının özgül ağırlığı 2,2–2,3 g/cm³, birim hacim ağırlığı ise 240–300 kg/m³ civarındadır. Silis dumanında SiO₂ miktarı %85'in üzerindedir. Silis dumanının özgül yüzeyi 130.000–280.000 cm²/g arasında değişmektedir. Silis dumanı, beton üretiminde genellikle, çimentonun ağırlıkça %7-%10 oranları arasında kullanılmaktadır (Erdoğan 2013).

Silis dumanı tane boyutlarının çok ince olması, KYB'de belirli bir yayılma çapı elde etmek için ihtiyacı olan su, katkısız betonlara kıyasla daha fazladır. Genel olarak, beton karışıma ilave edilen her 1 kg/m³ silis dumanı, taze betondaki su ihtiyacını m³'de 1 lt arttırdığı çalışmalarda belirtilmiştir (Malhatro and Caretta 1983; Malhatro *et al.* 1992; Erdoğan 2013). Tane boyutunun ince olması, su ihtiyacını arttırdığından dolayı beton karışımının işlenebilirliğini azaltmaktadır. Silis dumanı katkılı kendiliğinden yerleşen betonlarda, standartlara uygun beton elde etmek için süperakışkanlaştırıcı miktarının artırılması gerekmektedir.

Silis dumanının hem çok ince olması hem de puzolanik aktivitesinin çok yüksek olmasından dolayı, silis dumanı katkılı betonlarda çok yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir.

- Uçucu kül

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için kullanılan pulverize kömürün yanmasıyla atık malzeme olarak ortaya çıkan çok ince taneli küllerdir. Uçucu kül taneleri küresel şekilli olup; boyutları 1 – 150 μm , yoğunluğu ise 2,20–2,70 g/cm^3 arasındadır.

ASTM C 618 nolu standarda göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere 2 grupta değerlendirilmektedir. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70$; bitümlü kömürden elde edilmektedir. Puzolanik özelliğe sahiptir.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70$; linyit veya düşük bitümlü kömürden elde edilmektedir. Puzolanik özelliğin yanısıra kendiliğinde bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptir.

C tipi uçucu küllerde, kendiliğinde bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip olmasının nedeni içeriğinde bulunan CaO miktarının %10'dan fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Uçucu kül katkılı betonlarda, uçucu külün gerek yoğunluğunun portland çimentosundan az olmasından gerekse de küresel şeklinden dolayı betonun işlenebilirliğini ve akıcılığını arttırmaktadır. Uçucu külün kullanımı, reolojik özellikleri iyileştirir ve betonun hidrasyon ısisına bağlı olarak betonun çatlamasını azaltır (Kurita and Nomura 1998).

Betonda kullanılan uçucu küllerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin standartlara uygunluk kriterleri Çizelge 2.4 ve 2.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Uçucu küllerin kimyasal özelliklerinin uygunluk kriterleri

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F Sınıfı	C Sınıfı
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	70	---	70	50
SO ₃ , maks.(%)	5,0	3,0	5,0	5,0
Nemlilik, maks. (%)	3,0	---	3,0	3,0
Kızdırma kaybı, maks. (%)	10,0	5,0	6,0	6,0
MgO, maks. (%)	5,0	---	---	---
Na ₂ O alkaliler, maks. (%)	1,5	---	1,5	1,5
Cl ⁻ , maks. (%)	---	0,1	---	---

Çizelge 2.5. Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin uygunluk kriterleri

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F Sınıfı	C Sınıfı
İncelik: 45 µm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar, maks. (%)	---	40	34	34
Özgül yüzey, min. (cm ² /g)	3000	---	---	---
Dayanım aktivite indeksi: min. (%)	70	75	75	75
Su-ihtiyacı: 45 µm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar, maks. (%)	---	---	105	105

- **Agrega**

Donatı aralığı maksimum agrega boyutunun belirlenmesinde ana faktördür. KYB karışımının donatı boyunca akması ve L-kutusu testi gibi özellikler KYB karışımının geçiş kabiliyetinin bir göstergesi olduğundan, agrega blokajından kaçınılmalıdır. Büyük boyutlar kullanılmasına rağmen, maksimum agrega büyüklüğü genellikle 12-20 mm ile sınırlandırılmalıdır. Tane büyüklüğü dağılımı ve iri agreganın şekli, KYB'nin akışını ve geçme yeteneğini doğrudan etkiler. Agrega parçacıkları ne kadar küresel olursa, blokaja neden olma olasılıkları o kadar az olur ve iç sürtünme nedeniyle daha fazla akış meydana gelir.

İnce agregaların KYB'nin taze özellikleri üzerindeki etkisi, iri agregadan önemli ölçüde fazladır. 0,125 mm'den küçük partiküllerin boyut fraksiyonları, hamurun ince taneli içeriğini içermeli ve su/toz oranının hesaplanmasında dikkate alınmalıdır. KYB karışımlarındaki yüksek miktarda macun, kum parçacıkları arasındaki iç sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olur, ancak iyi bir tane boyutu dağılımı hala çok önemlidir. Birçok KYB karma tasarım metodu, optimize edilmiş agrega derecelenmesi ile uyumlu olarak harmanlanmış kumları kullanır.

- **Süper akışkanlaştırıcılar**

Yüksek oranda su azaltıcı katkıları olarak bilinen süper akışkanlaştırıcılar, akışkanlığı arttırarak ve çimento partiküllerinin daha fazla dağılmasını sağlayarak hidrasyonun iyileştirilmesini, betonda daha yoğun paketleme ve daha düşük gözenekliliğin elde edilmesine katkıda bulunur ve böylece yüksek mukavemet ve iyi dayanıklılığa sahip KYB karışımları üretilir. Süperakışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla iki amaç elde edilebilir: Birincisi, süper akışkanlaştırıcı kullanımı KYB tasarımı için büyük önem taşıyan akış özelliklerinin kontrol edilmesine izin verir ve ikincisi arzu edilen mukavemet ve dayanıklılığa ulaşmak için işlenebilirliği korurken, su/çimento oranının azaltılmasını sağlar. Süper akışkanlaştırıcı kullanımı, sıvılaştırıcı ve dağıtıcı etkileriyle KYB'nin akış yeteneğini arttırır (Hu and Larrard 1996; Yen *et al.* 1999; AL-Rubaye 2016). KYB

naftalin sülfonat formaldehit, melamin sülfonat formaldehit ve lignosülfonat bazlı akışkanlaştırıcılarla (Lachemi *et al.* 2003; Deeb 2013) yapılabilse de, en yaygın olarak polikarboksilat bazlı olanlardır. Polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcılar, farklı yapısı ve etki şekli ile diğer sülfonat bazlı akışkanlaştırıcılara göre KYB üretiminde gelişmeler sağlamıştır.

2.1.3. Kendiliğinden yerleşen taze beton reolojisi ve ölçüm yöntemleri

Reoloji bilimi, malzemelerin gerilme altında akış ve deformasyonu ile ilgili bir bilim dalıdır ve gerilme, birim deformasyon, birim deformasyon hızı ve zaman parametreleri arasında ilişkilerle ilgilenir (Tattersall and Banfill 1983; Yardımcı 2007). KYB'nin temel karakteri, taze durumdaki reolojik özellikleri olup; bu özellikler taşıma ve yerleştirme sırasında değişmemelidir. Bu özellikler doğru bir şekilde elde edildiğinde, dayanıklılık ve mukavemet gibi sertleşmiş KYB'nin özellikleri de gelişmektedir (Ouchi *et al.* 2003; EFNARC 2005). KYB'nin taze durumdaki ana özellikleri şunlardır:

- Doldurma yeteneği

Doldurma kabiliyeti, KYB'nin deforme olabilirliğini, yani taze betonun kendi ağırlığı altında homojenliğini korurken, yatay ve dikey olarak tüm kalıp parçalarını tamamen doldurma yeteneğini yansıtmaktadır (Khayat 1999; Okamura and Ozawa 1995). KYB'nin yüksek deformasyon kapasitesi, akma gerilmesi ile ilgilidir. Bu nedenle, KYB'nin engeller etrafında akmasını ve iyi doldurma kabiliyetine ulaşmasını sağlamak için akma gerilmesi azaltılmalıdır. Deformasyon kapasitesi hamur, kaba agrega ve ince agrega içeren katı parçacıklar arasındaki sürtünme azaltılarak artırılabilir (Khayat and Tangtermsirikul 2000; AL-Rubaye 2016).

- Geçme yeteneği

Geçme kabiliyeti, taze beton karışımın, tıkanmadan ve segregasyon olmadan sıkışık takviye alanları gibi dar açıklıklardan akmasını sağlar. Geçme yeteneğinin

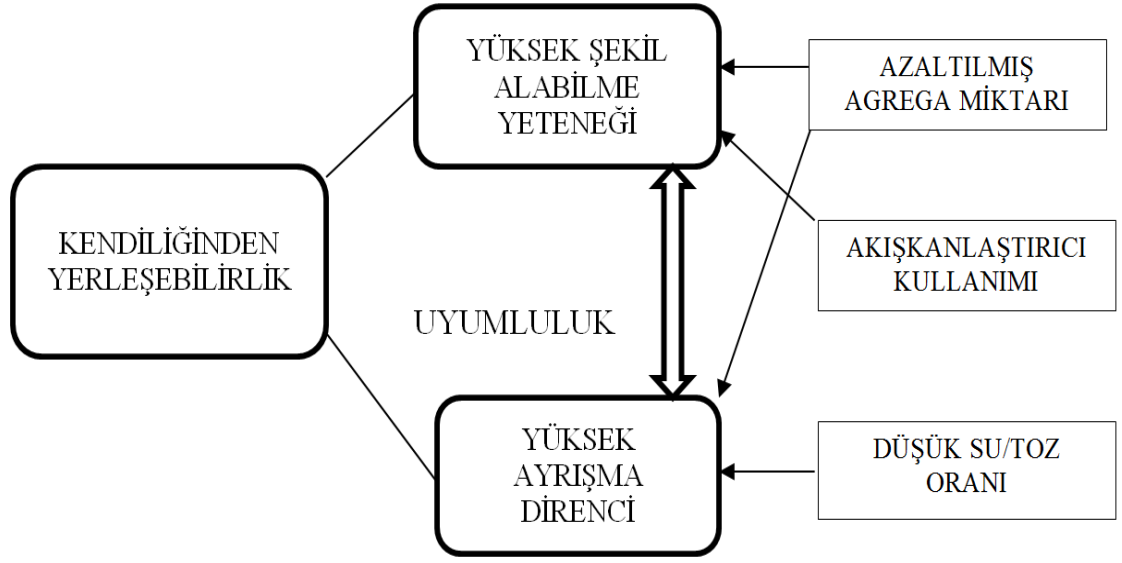
tanımlanmasında, donatının geometrisi ve yoğunluğu, doldurma kabiliyeti ve maksimum agrega büyüklüğünü dikkate almak gerekir (EFNARC 2005).

- **Ayrışmaya direnç yeteneği**

Ayrışma, betonun taşıma, döküm ve yerleştirme aşamalarında iri – ince malzeme ayrışması ya da terleme şeklinde olmaktadır. Ayrışma direnci, KYB'nin homojenliği ve kalitesi için ana temel özelliklerdendir. KYB yerleştirme sırasında ve yerleştirmeden sonra sertleşme öncesinde ayrışmaya maruz kalabilir. Yerleştirildikten sonra ortaya çıkan segregasyon, uzun elemanlarda çok zararlı olacaktır, ancak ince levhalarda bile, çatlama veya zayıf bir yüzey gibi kusurlara yol açabilir.

Ayrışma direnci büyük ölçüde viskozite tarafından kontrol edilir. Bu nedenle, yüksek bir viskozitenin sağlanması, beton karışımının segregasyon ve/veya terlemeyi önleyebilmesini sağlar. Terleme, suyun kılcal hareket ile yukarı doğru hareket ettiği ve karışımdan ayrıldığı özel bir segregasyon olgusudur. Bazı terlemeler beton için normaldir, ancak aşırı terleme, özellikle yüzeyde mukavemet, yüksek gözeneklilik ve zayıf dayanıklılığa neden olabilir (Douglas 2004). KYB'de segregasyonu azaltmak için; KYB karışımlarında süperakışkanlaştırıcı, düşük su/ çimento oranı, yüksek toz içeriği, viskozite azaltıcı katkı ve düşük agrega içeriği kullanılmalıdır.

Kendiğinde yerleşen beton karışımın şekil alabilme yeteneği ile ayrışma direnci arasında iyi bir dengenin kurulması önemlidir. Bu denge Şekil 2.2'de sistematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere kendiliğinden yerleşen betonda yüksek şekil alabilme yeteneğini geliştirmek için agrega miktarının azaltılması ve uygun süperakışkanlaştırıcı kullanılması gereklidir. Ayrıca KYB karışımlarının ayrışma olmadan şekil alabilme yeteneklerinin yüksek olması gerekmektedir.



Şekil 2.2. Kendiliğinden yerleşebilir beton için temel yöntem (Okamura and Ozawa 1995)

2.1.4. KYB'nin reolojik özelliklerinin ölçüm yöntemleri ve kabul kriterleri

Kendiliğinden yerleşen betonun doldurma, geçme ve şekil alabilme yeteneği ile segregasyon direnci gibi reolojik özellikler için gereklilikler yerine getirildikten sonra beton karışımı KYB olarak sınıflandırılabilir. Bu özelliklerin her biri, KYB kalitesini belirlemek için uygun bir test yöntemiyle bağımsız olarak değerlendirilmelidir.

Doldurma yeteneği, çökme akışı testi ve V-hunisi testi ile, geçme yeteneği J-halkası ve L-kutusu testleri ile değerlendirilmelidir. KYB'nin taze özelliklerini ölçmek ve değerlendirmek için çok çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir. Çizelge 2.6'da, değerlendirilen özelliklere göre gruplandırılmış en yaygın testler gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. KYB'yi değerlendirmek için test özellikleri ve yöntemleri

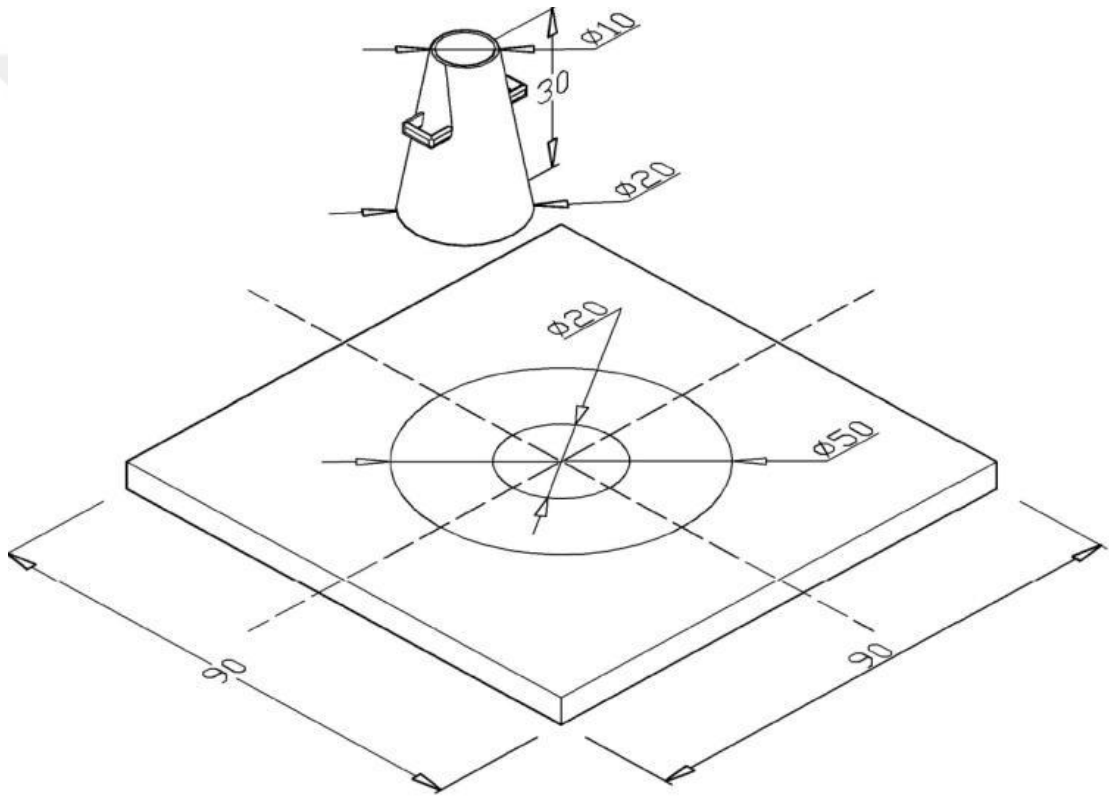
Özellik	Test yöntemi	Ölçülen değer
Akıcılık / doldurma yeteneği	Çökme – yayılma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite / akıcılık	T ₅₀₀	Akış süresi
	V - hunisi	Akış süresi
	O - hunisi	Akış süresi
	Orimet	Akış süresi
Geçiş yeteneği	L - kutusu	Geçiş oranı
	U - kutusu	Yükseklik farkı
	J - halkası	Yükseklik, toplam akış
	Kajima kutusu	Görsel geçiş oranı
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışması	Yüzde ayrışma
	Oturma kolonu	Ayrışma oranı

Çizelge 2.6'da belirtilen test yöntemlerinden, en yaygın olarak kullanılan çökme – yayılma, T₅₀₀, V-hunisi, L-kutusu, U-kutusu ve elek ayrışma testlerinin uygulamalarının nasıl yapıldığı ve kabul kriterleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.4.a. Çökme – yayılma ve T₅₀₀ süresinin belirlenmesi test yöntemi

Çökme-yayılma ve T₅₀₀ zamanı, engellerin yokluğunda kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığını ve akış hızını değerlendiren bir ölçüm yöntemidir. Sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen betonun doldurma kabiliyetinin bir göstergesidir. T₅₀₀ zamanı ise, akış hızının ve dolayısıyla kendiliğinden yerleşen betonun viskozitesinin de bir ölçüsüdür. Test prosedürü, ölçüleri Şekil 2.3'de verilen koninin, 20 cm ve 50 cm çaplı daireler çizili olan düz bir çelik plakanın ortasına yerleştirilmesini, sıkıştırılmadan

numune ile doldurulmasını ve daha sonra dikey olarak kaldırılmasını içerir. KYB, yer çekimi etkisi altında serbestçe akar. Numune akmayı bıraktıktan sonra, iki dikey yönde deforme olmuş numunenin en büyük çapları d_1 , d_2 (mm) olarak ölçülür. Son yayılma değeri, d_1 ve d_2 ölçüleri kullanılarak hesaplanan ortalama akış yayılma çapıdır. Ayrıca bu test yönteminde, koni yukarı doğru çekildikten sonra, beton karışımın 500 mm'lik bir çapa ulaştığı zaman ölçülür ve bu T_{500} süresi olarak kaydedilir. Bu test yöntemi maksimum agrega çapı 40 mm olan beton karışımlar için uygundur.

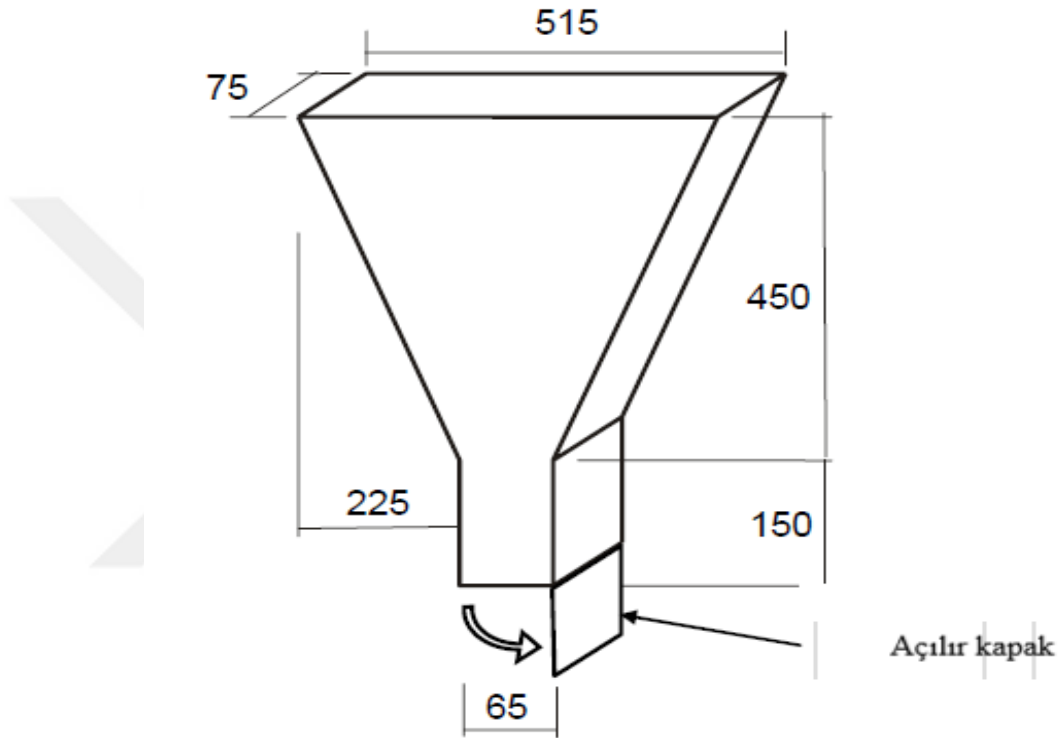


Şekil 2.3. Çökme – yayılma ve T_{500} deney düzeneği (Coşkun 2013)

2.1.4.b. V – hunisi test yöntemi

Şekil 2.4'de boyutları verilen (tolerans ± 1 mm) çelikten yapılmış V-hunisi, hızlı açılan, su geçirmez bir kapak ile kapatılmış ve huninin tepesi yatay olacak şekilde desteklenmiştir. Huni ve alt kapak temizlenir ve tüm iç yüzey nemlendirilir. Kapak kapatıldıktan ve beton karışımı herhangi bir çalkalama veya çubuklama olmadan huniye

dökülür, daha sonra betonun huninin tepesiyle aynı hizada olacak şekilde düzeltilir. Huni doldurulduktan 10 ± 2 sn bir gecikmeden sonra kapak açılır ve taze beton karışımının huniden dışarı akana kadarki geçen süre ölçülür ve V-hunisi akış süresi olarak kaydedilir. V – kutusu deneyi betonun akıcılığı ve viskozitesi hakkında fikir verir



Şekil 2.4. V – hunisi deney düzeneği

2.1.4.c. L – kutusu test yöntemi

L-kutusu testi, kendiliğinden yerleşen betonun, segregasyon veya bloklanma olmaksızın takviye donatıları ve diğer engeller arasındaki boşluklar dahil olmak üzere dar açıklıklardan geçiş yeteneğini değerlendirmek için kullanılır. İki farklı donatı düzeneği vardır; iki donatı ve üç donatılı düzeneklerdir. Üç donatı testi daha sıkışık donatıyı ifade eder. Deney düzeneği boyutları Şekil 2.5’de verilen L-kutusu düz bir yatay tabana konulur ve dikey ve yatay bölümler arasındaki kapak kapatılır. Beton karışımı L-kutusunun doldurma haznesine dökülür ve (60 ± 10) sn beklemeye bırakılır. Herhangi bir segregasyon olup olmadığı kaydedilir ve daha sonra kapak beton karışımının dikey

KYB'nin ayrışan kısmı $SR (\%) = (W_{ps} - W_p) / W_c \times 100$ ifadesi ile %1 hassasiyetinde hesaplanır (Yardımcı 2007).

Yukarıda bahsedilen deney sonuçlarında elde edilen değerler, Çizelge 2.7'de verilen sınırlara uygunsa, beton karışımın KYB özelliklerine uygunluğu onaylanır.

Çizelge 2.7. KYB sınıfları ve uygunluk kriterleri (EFNARC 2005)

Yayılma sınıfları	Yayılma çapı (mm)	
SF1	550 - 650	
SF2	660 - 750	
SF3	760 - 850	
Vizkozite sınıfları	T ₅₀₀ (sn)	V – hunisi akış süresi
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8
VS2 / VF2	> 2	9 - 25
Geçme yeteneği sınıfları	Bloklanma oranı	
PA1	≥ 0,80 (2 adet donatı ile)	
PA2	≥ 0,80 (3 adet donatı ile)	
Ayrışma direnci sınıfları	Ayrışma direnci (%)	
SR1	≤ 20	
SR2	≤ 15	

Çizelge 2.7'de da görüldüğü üzere, kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında hedeflenen reolojik özellikleri arasında önemli oranda farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar KYB karışımlarının kullanılacağı farklı türdeki yapısal uygulamalardan kaynaklanmaktadır. Çizelge 2.8'de çeşitli uygulama türleri için, KYB'nin reolojik özelliklerini belirlemek için başlangıç parametreleri ve sınıfları gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Çeşitli uygulama türleri için KYB'nin reolojik özellikleri (EFNARC 2005)

Vizkozite				Segregasyon direnci / geçiş yeteneği
VS 2 VF 2	Rampalar			SF 1 ve 2 için geçiş yeteneği belirtilmeli
VS 1 veya 2 VF 1 veya 2 veya hedef değer	Duvarlar ve kazıklar Uzun ve narin elemanlar			SF 3 için SR belirtilmeli
VS 1 VF 1	Zemin betonu ve döşemeler			SF 2 ve 3 için SR belirtilmeli
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Çökme - yayılma			

2.2. Lifli Beton

Lifli beton, çimento, su, agrega, süreksiz rastgele dağılmış kısa lifler ve ihtiyaç halinde kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile oluşturulan yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel beton, yüksek basınç dayanımı, düşük çekme dayanımı ve gerilme kapasitesine sahip kompozit bir malzemedir. Beton karışımına lif eklemek, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve enerji yutma ile süneklik, tokluk ve çatlama kapasitesi gibi mühendislik özelliklerini önemli ölçüde geliştirilebilir. Lif ilavesinin, betonun bazı mekanik özellikleri üzerinde olumlu etki oluşturmaya rağmen, taze betonun işlenebilirlik ve akıcılık gibi özelliklerini olumsuz etkilediği bilinmektedir.

Liflerin, yapı elemanlarında kullanılması kavramı yeni olmayıp, antik çağlardan beri takviye olarak kullanılmaktadır. Lifli betonun temelini oluşturan saman takviyeli kil harcı veya kerpiç, yaklaşık 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Türk mimarisinde kullanılan Horasan harcında da saman gibi doğal lifler içerdiği bilinmektedir (Baradan vd 2012). Yaklaşık olarak 3500 yıl önce, Bağdat yakınlarında inşa

edilmiş olan Aqar Quf kulesinin yapımında saman takviyeli güneşte pişirilmiş tuğlaların kullanıldığı tespit edilmiştir (Bentur and Mindness 1990; Yardımcı 2007).

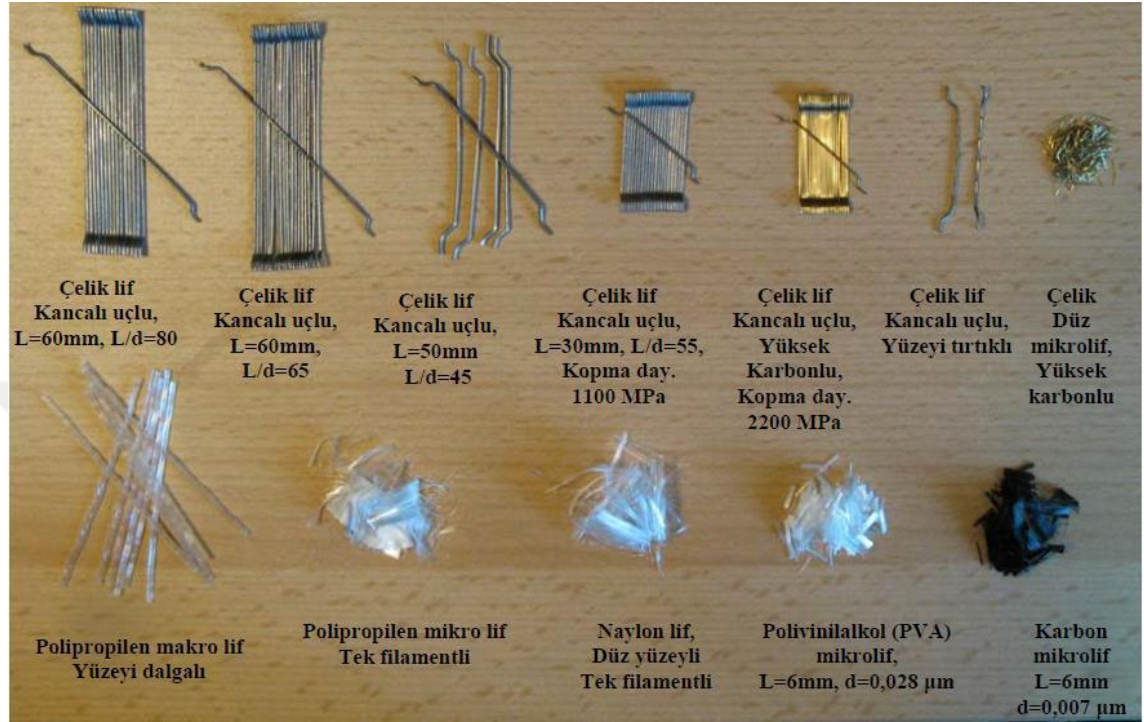
ABD’de Berard tarafından 1874 yılında lif donatılı betonun ilk patenti alınmıştır. Çimento hamuru matrisi içerisinde asbestli liflerin kullanılmaya başlaması 1898 yılında Hatschek yönteminin keşfi ile olmuştur. Asbestli liflerin sağlığa zararlı olduğunun anlaşılması sonrasında, farklı lif tipleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Günümüzdeki bilinen şekle sahip liflerin, 1927’de Martin, 1939’da Zitkeviç ve 1943’de Constantinesco tarafından patentleri alınmıştır (Beddar 2004; Yardımcı 2007).

1960’lı yıllardan sonra, lif takviyeli beton teknolojisi gelişmiş ve hem yeni uygulamalar hem de yeni lifler ortaya çıkmıştır. Çelik, polipropilen ve cam lif gibi farklı malzemeler, özellikle yapısal lif takviyeli betonun üretimi için giderek yaygınlaşmıştır. Çeşitli lif türleri ve karşılık gelen ana özellikler Çizelge 2.9’da listelenmiştir.

Çizelge 2.9. Çeşitli lif türlerinin özellikleri

Lif	Çap (μm)	Özgöl ağırlık	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)	Kopma uzaması (%)
Çelik	5 - 500	7,84	200	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Cam	9 - 15	2,60	70 - 80	2,0 - 4,0	2,0 - 3,5
Bazalt	20	2,65	93 - 110	4100 - 4800	3,1 - 3,2
Polipropilen	20 - 400	0,90 - 0,95	3,5 - 10,0	0,45 - 0,76	15,0 - 25,0
Aramid	10 - 12	1,44	63,0 - 120,0	2,3 - 3,5	2,0 - 4,5
Karbon	8 - 9	1,6 - 1,7	170 - 600	2,5 - 4,0	0,5 - 1,5
Naylon	23 - 400	1,14	4,1 - 5,2	0,75 - 1,0	16,0 - 20,0
Akrilik	18	1,18	14,0 - 19,5	0,4 - 1,0	3,0
Polietilen	25 - 1000	0,92 - 0,96	5,0	0,08 - 0,60	3,0 - 100,0

Çizelge 2.9’da ana özellikleri verilen bazı liflere ait görsel Şekil 2.6’da verilmiştir.

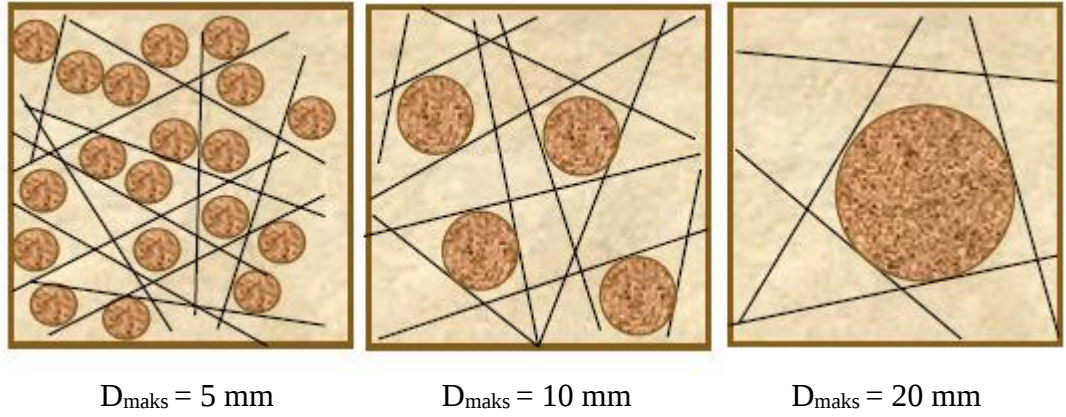


Şekil 2.6. Değişik lif tipleri (Yardımcı 2007)

Lif takviyeli betonun özellikleri ve performansı, beton ve liflerin özelliklerine bağlıdır. Genel olarak ilgi çeken liflerin özellikleri, lif hacim fraksiyonu V_f , lif geometrisi (lif uzunluğu L_f / lif çapı d_f), lif oryantasyonu ve lif dağılımıdır. Lif uzunluğu ve hacim fraksiyonu, kullanılan agreganın tür ve boyutuna göre seçilir.

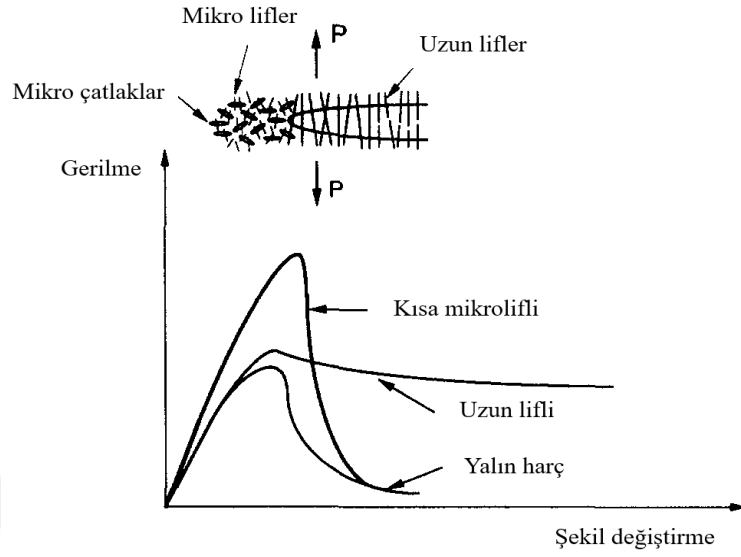
Lifli beton uygulamalarında genellikle en büyük agrega tane boyutu (D_{maks}) 4 – 32 mm arasında değişen agregalar kullanılır. Maksimum tane çapı 32 mm olan betonlarda 16 mm den büyük agrega miktarı toplam agreganın %15-20’si arasında sınırlandırılır. Yapılan uygulamalarda kaliteli kırmataşlı betonlar doğal çakıl kullanılarak yapılan betonlardan daha iyi sonuç göstermiştir (Baradan vd 2012).

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, lif takviyeli betonlarda agreganın maksimum boyutunun artması ile, lif dağılımının homojenitesi azalacak ve süreksizlik artacaktır.



Şekil 2.7. Agreganın maksimum boyutuna bağlı olarak liflerin dağılımı (Johnston 1996)

Lifli betonun özelliklerine etki eden en önemli parametrelerden biriside kullanılan lif boyunun uzunluğudur. Lif hacmi ve narinliği aynı olan çimentolu kompozitlerde, kısa mikro lif içeren kompozitlerin, gerilme dayanımında küçük bir gelişme gözlenmiş ancak daha az şekil değiştirme yapabilmıştır. Bunun aksine uzun lif içeren kompozitler ise, daha az gerilme dayanımı değerine ulaşmış olmasına rağmen, daha fazla şekil değiştirme yaparak tokluğu arttırmıştır (Şekil 2.8). Kısa lif kullanımının gerilme artışı sağlaması muhtemelen betonda meydana gelen çatlakların mikro düzeyde olmasından kaynaklanmaktadır. Betonda çatlak oluşumu makro boyuta ulaştıktan sonra mikro lifler çatlaklar arası köprülemede etki gösterememektedir. Mikro çatlaklar, makro boyuta ulaştıkça, uzun lifler devreye girmekte ve kompozitin tokluğunu önemli ölçüde geliştirebilmektedir (Betterman *et al.* 1995).



Şekil 2.8. Çatlak köprüleme üzerine farklı boyutlardaki liflerin etkisi

2.2.1. Lifli betonların mekanik davranışı

Liflerin betona eklenmesi sonucunda, betonun basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, süneklik ve tokluğunda değişimler gözlenir. Bu bölümde, liflerin, beton için önemli parametreler olan basınç ve çekme dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir.

2.2.1.a. Basınç dayanımı

Lifli betonlarda basınç yüklemesi altında, liflerin basınç dayanımını önemli oranda değiştirmede önceki çalışmalarda belirtilmektedir. Ayrıca, lifler betonda zayıf boşluk bölgeleri yaratır ve bunlardan dolayı da dayanımda azalmalar oluşabilir. Komlos *et al.* (1995), polipropilen liflerinin betonun basınç dayanımını üzerinde önemli bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir. High *et al.* (2015), betonda iki farklı tip kısa bazalt lif kullanımının basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Düşük su/çimento oranına sahip, uçucu kül ve mineral katkıları içeren beton karışımının, 28 günlük basınç dayanımında düşük oranlarda artış gözlemlenmiştir. Bazalt lif, cam lif ve polipropilen lif kullanılan beton karışımlarında, betonun basınç dayanımında önemli bir değişim

gözlenmemiştir (Li *et al.* 2004; Dias and Thaumotorga 2005; Mazaheripour *et al.* 2011; Jiang *et al.* 2014; Kızıllanat *et al.* 2015). Lif kullanımının beton basınç dayanımı üzerinde çok etkisi olmamakla beraber, betonun basınç yükleri altında sünek bir davranış sergilemesine neden olmaktadır.

2.2.1.b. Çekme dayanımı

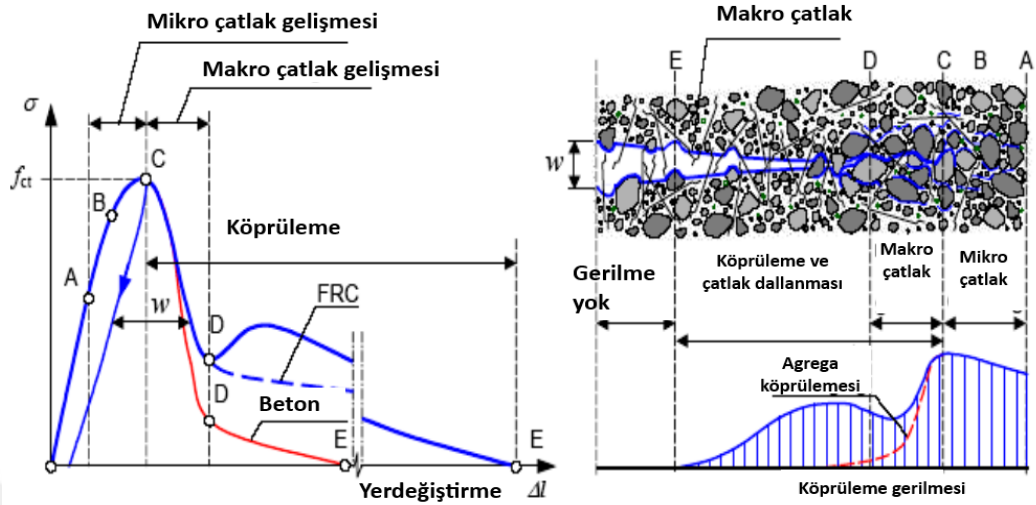
Lifli betonların çekme gerilmeleri altındaki mekanik performansı, basınç gerilmeleri altındaki performanslarına göre belirgin bir şekilde daha yüksektir. Betonda, belirli dozajda liflerin varlığı çekme gerilmeleri altında hem dayanım hem de enerji yutma kapasitesini geliştirir. Yükleme altında iken kısa süre sonra çatlamaya başlayan zemin betonlarında lifler çatlağın her iki yanını bir köprü gibi birleştirerek betonun daha büyük bir taşıma gücü değerine ve yüksek enerji yutma kapasitesine ulaşmasını sağlar.

Önceki çalışmalar, betona lif ilavesinin, betonun eğilmede çekme dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Song and Hwang (2004), beton karışımına çelik lifler eklendiğinde, betonun eğilme dayanımının önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. Sivakumar and Santhanam (2007), polipropilen, polyester ve cam lif takviyeli betonun eğilme dayanımlarının, 0,6 kg/m³ lif içeriğinde sırasıyla, %7,6, %21,3 ve %14,4 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Lifli betonun çekme dayanımı üzerinde etkili olan ana parametreleri arasında, lif türü, dozajı, boyu ve narinlik oranı gösterilebilir. Jiang vd (2014) çalışmalarında, %0,05, %0,1, %0,3 ve %0,5'lik oranlara sahip 12 mm'lik lif boyları için hazırlanan beton karışımlarda, 7 günlük eğilme dayanımının, %9,18 ile %21,10 arasında değiştiğini, 24 mm'lik lif kullanımında ise dayanımda %11,11 ile %25,28 arasında artış tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmada, 24 mm uzunluğunda lif kullanılan karışımların tokluğunun, 12 mm lif ilave edilen karışımlara göre daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Çelik liflerin betonda kullanılması durumunda, betonun yarmada çekme ve eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı Yazıcı vd (2007) tarafında bildirilmiştir. Lifli betonların yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımlarının, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla, yaklaşık %11-54 ve %3-81 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, lifli betonların eğilme dayanımındaki artışın, artan l/d

oranı ve lif hacmi ile önemli oranda etkilendiğini belirtmişlerdir. Önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere lif dozajının ve özelliklerinin, çekme dayanımı üzerinde önemli şekilde etkilidir. Lif miktarındaki sürekli artış, çekme dayanımı üzerinde devamlı olumlu etki yapmamakla birlikte, dayanımda düşüslere sebep olabilmektedir. Bu durum artan lif hacminin işlenebilirliği olumsuz etkilemesine ve betonda boşluklar oluşturmaları ile ilişkilendirilebilir.

2.2.2. Çatlak oluşumu sürecinde lif köprülemesi

Lifli betonlarda, lifler ve agregaların birlikte etkileşim içerisinde olduğu bir toklaşma mekanizması vardır. Lifli kompozitte çatlağın köprülenmesi, agregalar ve liflerin birleşik etkisi ile olur (Zhang and Li 2004; Yardımcı 2007). Şekil 2.9'da, tek eksenli çekme gerilmesi altındaki lifli betonda kırılma süreci üzerine liflerin etkisi görülmektedir. Şekil 2.12'nin incelenmesi neticesinde, gerilme – yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç kısmında henüz çatlaklar oluşmadığı için elastik bir davranış görülmektedir. Mikro çatlaklar gelişmeye başladıkça eğri doğrusallığını kaybetmektedir. Gerilme pik değerine ulaştıktan sonra makro çatlaklar gelişmeye başlar. Makro çatlakların oluşumunu takiben, lif ve agregalar üzerinden gerilmenin transfer edildiği bir köprüleme bölgesi meydana gelir. Son olarak makro çatlağın genişliğinin artması ile lifler tamamen sıyrılır ve çatlak yüzeyleri arasında hiç gerilme transferinin olmadığı bir bölge oluşur.



Şekil 2.9. Tek eksenli çekme gerilmesi altındaki lifli betonda kırılma süreci üzerine liflerin etkisi (Löfgren 2005; Yardımcı 2007)

İncelenen gerilme – yerdeğiştirme eğrisinin, pik yük sonrası davranışına, lif tür ve özelliklerinin çok önemli etkisi vardır. Mikro liflerin kullanılması durumunda, mikro çatlak oluşumundan sonra, makro çatlığa ulaşmadan sıyrılmalar meydana gelmekte ve köprüleme bölgesi etkin olarak gözlenememektedir. Mikro liflerin köprüleme özelliğinin yeterince olmamasına karşın, mikro çatlak gelişimini geciktirmelerinden dolayı eğilme dayanımını arttırmaktadırlar. Ancak bu durumun gerçekleşmesi içinde, mikro liflerin narinlik oranı, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yüksek olması gerekmektedir. Mikro ve makro lif kombinasyonunun kullanılması durumunda, hem dayanım hem de tokluk açısından faydalı olabileceği düşünülebilir.

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Lifli Beton

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), geleneksel betona kıyasla toplam agrega miktarının az olması, iri agrega miktarının ve çaplarının daha düşük olması, düşük su/bağlayıcı malzeme oranından dolayı daha gevrek bir yapıdadır (Baradan vd 2012). KYB’de lif kullanımının, geleneksel betonda olduğu gibi çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirerek, betonun enerji yutma kapasitesini arttıracak önceki çalışmalardan bilinmektedir. Ancak lif kullanımı KYB’nin akış özelliklerini olumsuz şekilde

etkilemektedir. KYB’de akıcılık daha ön planda olduğu için, geleneksel betona kıyasla yüksek miktarlarda lifin kullanımı zorlaşmaktadır. Lifli betonlarda etkili sıkıştırma ve homojen lif dağılımının sağlanması ile hapsolmuş hava boşlukları riskinin azaltılması için, yerleştirmeyi kolaylaştıracak ve vibrasyon ihtiyacını azaltacak şekilde yeterince akıcı olarak tasarlanmalıdır (Khayat and Roussel 2000; Yardımcı 2007).

Lif kullanımının geleneksel betonda da fazlaca işlenebilirlik kaybına yol açtığı bilinmektedir. Geleneksel ve KYB’de ki bu işlenebilirlik kaybında, kullanılan lifin türü, miktarı ve görünüm oranı fazlaca etkilidir. Polipropilen ve cam lif gibi sentetik liflerin, ince ve yüzey alanlarının daha fazla olmasından dolayı, çelik liflere oranla daha az yayılma çapı oranları elde edilmektedir. Mazaheripour *et al.* (2011) çalışmasında, polipropilen lifli KYB’ler üretmiş ve lif oranının artışı ile beraber akışkanlıştırmacı miktarında da artış yaparak kendiliğinden yerleşen beton özelliklerini elde etmeye çalışmıştır.

Haist *et al.* (2002) tarafından yapılan çalışmada, polipropilen ve cam lifin hacimce %0,20 oranında kullanıldığı karışımlarda, sırasıyla, 50 cm ve 60 cm yayılma çapı değerleri elde ederken, aynı oranda çelik lifli karışımlarda ise yayılma çapını 70 cm olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca lifler, betonun akışı esnasında engeller önünde bloklaşarak, akışın tıkanmasına neden olabilirler. Bu nedenle, lifli KYB kullanılan kesitlerde donatı aralıkları ile kalıp düzenine dikkat edilmelidir.

Aynı lif dozajında daha iyi işlenebilirlik elde edebilmek için narinlik oranı düşük lifler tercih edilmelidir. Ancak, lifli betonlarda beklenen mekanik performansın gerçekleşmesi içinde, kullanılan liflerin narinlik oranının yüksek olması gerektiği bilinmektedir (ACI 544 2002). Bu çelişkili durumu ortadan kaldırmak için, liflerin karışımda homojen dağılımı sağlanmalı ve liflerin engeller arasından geçiş kabiliyetinde aşırı azalmalar meydana gelmemelidir. Bu durumda ancak uygun miktar ve türde lifler kullanılarak sağlanabilmektedir (Yardımcı 2007; Baradan vd 2012).

Kendiliğinden yerleşen lifli betonlar üzerine yapılan çalışmalarda, geleneksel sıkıştırma uygulanmış lifli betonlara kıyasla mekanik özelliklerinin az da olsa iyileşme olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmalarda, geleneksel sıkıştırma işlemi uygulanan lifli betonlarda, sıkıştırma işleminin liflerin dağılımı ve yönelimi açısından olumsuz etkisinin olduğunu ve bu durumda eğilme performansında azalmalar meydana getirdiğini bildirmektedirler (Grünwald and Walvaren 2002; Baradan vd 2012).

2.4. Kırılma Mekanîği

Klasik mukavemet yaklaşımında, yükleme sonucu parçada ortaya çıkan maksimum gerilme, malzemenin akma ve kopma gerilmesine göre kıyaslanmaktadır. Ancak tasarımda gerilmelerle beraber parça içindeki çatlaklar, süreksizlikler ve mikro çatlakların da gözönüne alınması gereklidir. Kırılma mekanîği yaklaşımında, yükleme sonucu elemanda oluşan gerilme ile birlikte parça içinde bulunan çatlaklar ve süreksizlikler de gözönüne alınarak hesaplanan büyüklük, malzemenin akma mukavemeti yerine kırılma tokluğu ile kıyaslanır. 1920’lerde Griffith teorik ile deneysel mukavemet değerleri arasındaki farkı açıklamaya çalıştı. Bu teoriye göre, malzeme üretim aşaması ne kadar kontrollü ve dikkatli olursa olsun, üretilen her malzemede değişik doğrultu ve boyutlarda mikro çatlaklar içereceğidir. Gerilme altında bu mikro çatlaklar ilerler ve sonuçta birleşerek malzemenin hasara uğramasına neden olurlar. Kırılma mekanîği alanında ilk önce lineer elastik malzemelerin davranışı incelenirken sonraları farklı malzemelerin davranışı da ele alınmıştır (Yayla 2007).

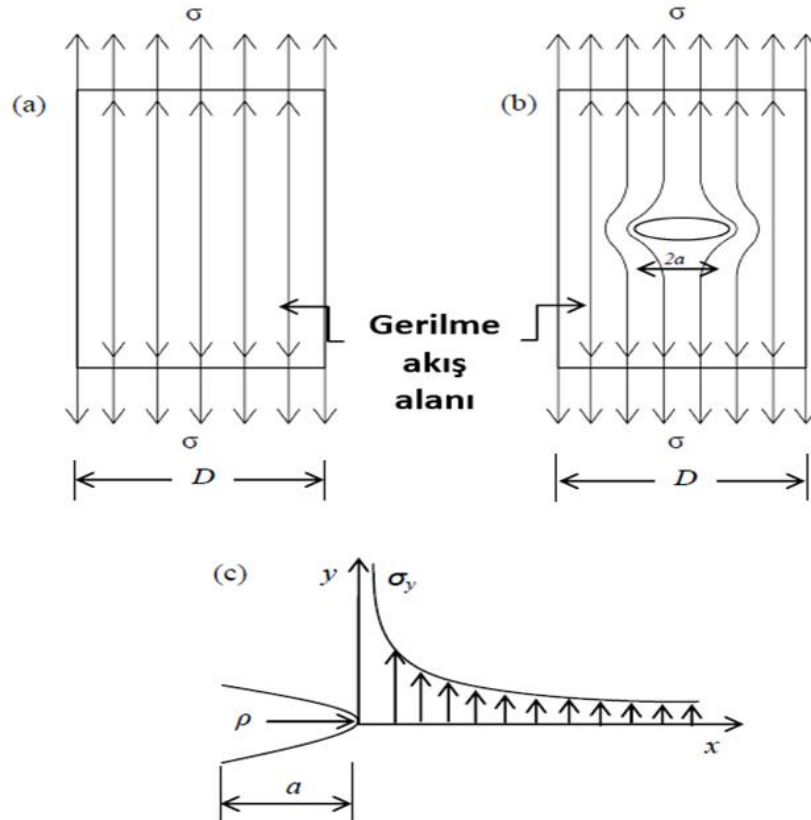
2.4.1. Lineer elastik kırılma mekanîği (LEKM)

Malzeme içinde mikro çatlak ve benzeri kusurlar doğal olarak mevcuttur. Lineer elastik kırılma mekanîği kavramı, malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içinde kalması fikrinden hareketle geliştirilmiştir. Lineer elastik kırılma mekanîği genelde gevrek malzemelere uygulanır. Bu teori; cam, gevrek çelik ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında kullanılabilir. Çatlak ucunda oluşan gerilmenin sonsuza gittiği kabul

edilmektedir. LEKM, gerilme bölgesinin büyüklüğünü, gerilmenin çatlak ucundaki dağılımını, çatlağın şeklini ve malzeme özelliklerini inceler.

2.4.1.a. Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı

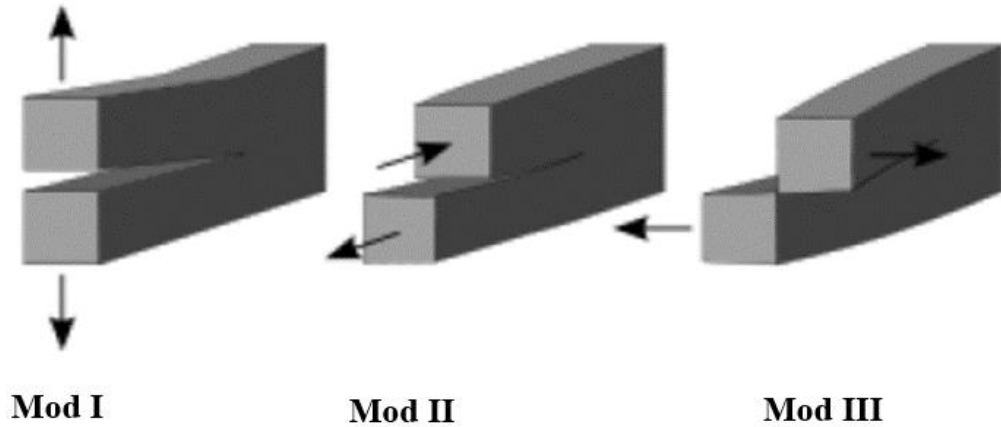
Malzeme gerilmeye maruz kaldığında, gerilme mevcut kusurların veya çatlakların çevresinde yoğunlaşır ve malzemenin kritik bir gerilme değerini aştığında çatlakların yayılmasına neden olur. Bir çatlağın yayılması için gereken enerji miktarı, bir malzemenin kırılma tokluğunu göstermenin bir yoludur (Elfgren 1989). Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği'nde (LEKM), gerilme şiddet faktörü (K) olarak adlandırılan bir kırılma parametresi kullanılır.



Şekil 2.10. Yük altında bulunan ve içinde boşluk içeren bir malzemede gerilme yığılması (Siregar 2016)

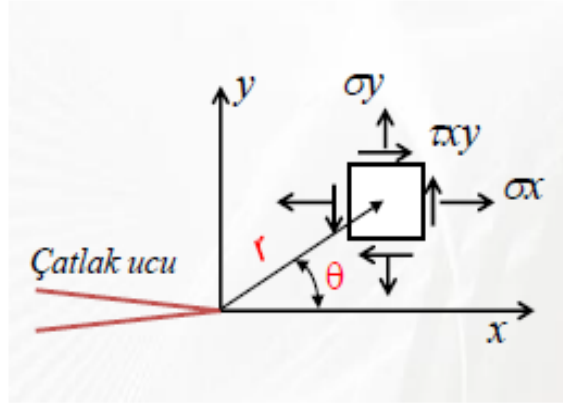
Yük altında bulunan ve içinde boşluk içeren bir malzemede, süreksizlik nedeniyle boşluk ucunda gerilme yığılması meydana gelir (Şekil 2.10). Yükleme nedeniyle meydana gelen gerilme akımı çatlağın etrafını dolanmak zorunda kaldığından çatlağın ucunda gerilme yığılmasının artmasına, çatlağın alt ve üst yüzlerinde ise gerilme gevşemesine neden olmaktadır. LEKM'ne göre, çatlak ucunda meydana gelen bu gerilme yığılması çatlak keskinleştikçe sonsuza gitmektedir (Akkaya vd. 2003).

Irwin (1957), gerilme alanını 3 farklı kırılma modunda ifade eden, matematiksel bir çatlak modeli önermiştir (Carpinteri 1986). Bunlar, Şekil 2.11'de gösterildiği üzere, Mod I veya Açılma Modu, Mod II veya Düzlem İçi Kayma Modu ve Mod III veya Düzlem Dışı Kayma Modu olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bu kırılmalarda Mod I ile ilgili gerilme şiddet faktörüne K_I , Mod II olanına K_{II} ve Mod III ile ilgili olanına da K_{III} denmektedir.(Yayla 2007).



Şekil 2.11. Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu (Brook 1984)

Çatlak ilerlemesi tek bir modla ifade edilebileceği gibi, modların bir bileşimi şeklinde de olabilir. Burada Mod I, çekme altında oluşan çatlak ilerlemesi olup; en çok görülen ve en ağır hasara neden olan çatlak ilerleme modudur (Brook 1984; Yayla 2007).



Şekil 2.12. Bir levhada oluşan çatlak

Sonsuz keskinlikte bir çatlağın ucunda oluşan elastik gerilme alanı Şekil 2.12’de ki gibi meydana gelecek olup, bu gerilmeler aşağıdaki bağıntılarla verilir (Yayla 2007).

Mod I için çatlak ucunda oluşan gerilme alanı;

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.3)$$

Mod II için çatlak ucunda oluşan gerilme alanı;

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.6)$$

Burada, r ve θ yerel kutupsal koordinatları, K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörlerini ifade etmektedir (Carpinteri 1986).

Klasik gerilme analizinde, gerilme şiddet faktörü, K , farklı geometri ve yükleme durumları için aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Yayla 2007).

Mod I durumu için;

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.7)$$

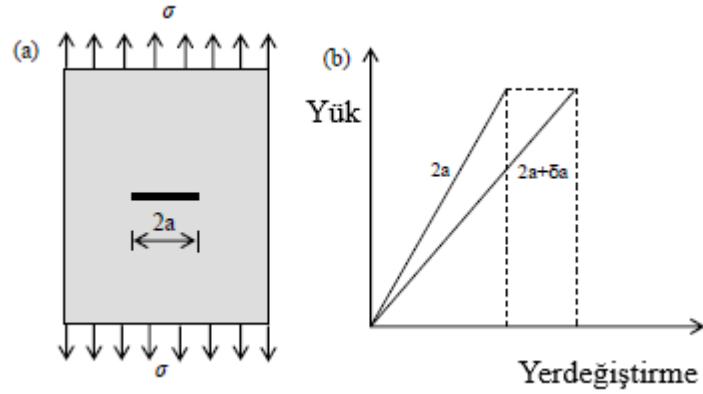
Griffith, çatlak ucundaki gerilmenin $\sqrt{\pi a}$ ile orantılı değiştiğini ifade etmiştir. Böylece bağıntı;

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir. Burada, Y , parçanın geometrisine bağlı sabir bir katsayı, σ , parçaya uygulanan gerilme, a , çatlak uzunluğu, K , gerilme şiddet faktörüdür.

2.4.1.b. Enerji dengesi yaklaşımı

Bir malzemenin kırılması, enerji prensipleri ile tanımlanabilir. Griffith (1920), bir malzemenin kırılmasını öngörmek için bir enerji dengesi yaklaşımı önermiştir. Uzunluğu $2a$ olan bir çatlığa sahip, sabit bir çekme gerilmesine (σ) maruz bırakılmış sonsuz bir birim plaka Şekil 2.13'de gösterilmiştir (Shah *et al.* 1995).



Şekil 2.13. Sabit bir çekme gerilmesine (σ) maruz bırakılmış sonsuz bir birim plaka (Shah 1995)

Çatlağın varlığından dolayı enerjideki değişim;

$$U - U_0 = -U_a + U_s \quad (2.9)$$

Burada, U ve U_0 , sırasıyla çatlak içeren ve içermeyen plakanın elastik enerjilerini, U_a , plakada çatlak oluşumundan dolayı şekil değiştirme enerjisindeki değişimi, U_s , çatlak yüzeylerinin oluşmasından dolayı elastik yüzey enerjisindeki değişimi ifade etmektedir (Shah *et al.* 1995).

U_a ve U_s ise aşağıda belirtilen şekillerde hesaplanmaktadır.

$$U_a = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} \quad (2.10)$$

$$U_s = 4a\gamma_s \quad (2.11)$$

eşitliklerinde, E , malzemenin elastisite modülünü, γ_s , malzemenin elastik yüzey enerjisini temsil etmektedir. Denklem 2.11 yeniden yazılırsa;

$$U - U_0 = -\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_s \quad (2.12)$$

$$U = U_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_s \quad (2.13)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada U_0 sabit olduğundan, $dU_0/da = 0$ 'dır. Böylece çatlak ilerlemesi için denge durumu dU/da sıfıra eşitlenerek;

$$\frac{d}{da} \left(-\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma \right) = 0 \quad (2.14)$$

$$\sigma\sqrt{a} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi}} \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 2.15 eşitliği;

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 4a\gamma \quad (2.16)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Bu eşitliğin sol tarafı, enerji yayılım hızı (G) olarak tanımlanır. G , çok küçük bir çatlak uzaması için gerekli birim çatlak alanı başına elastik enerjiyi temsil eder (Uğuz 1996).

G ile K arasındaki ilişkide şu şekilde belirlenir. Gerilme şiddet faktörü yaklaşımından;

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.17)$$

bağıntısı elde edilmişti. Enerji dengesi yaklaşımından ise;

$$G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (2.18)$$

şeklinde belirtilmişti. Denklem 2.17 ve 2.18 kullanılarak düzlem gerilme durumu için;

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (2.19)$$

bağıntısı elde edilir.

K ve G arasındaki bu ilişki şunu göstermektedir ki, ister gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı isterse de enerji dengesi yaklaşımı kullanılsın, her iki durumda da çatlak ilerleme kriteri aynı olmaktadır (Yayla 2007).

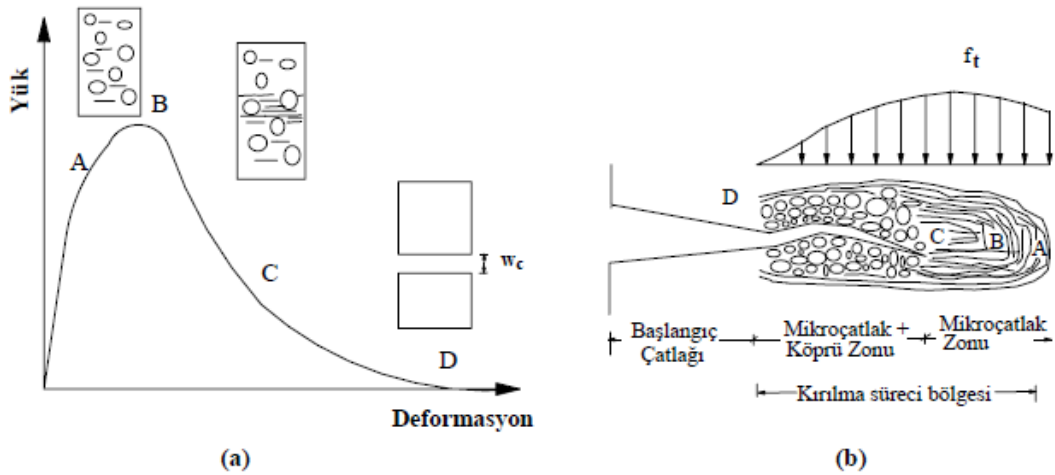
Lineer elastik kırılma mekaniği, gevrek malzemelerde uygulanabilirliği olsa da, beton gibi malzemelerde, çatlak ucunda önemli şekil değiştirmeler meydana gelir ve bu durum gerilmeyi azaltarak sonsuza gitmesini engeller. Bu nedenle, beton için non-linear elastik kırılma mekaniği teorisinin uygulanması daha gerçekçidir (Shah *et al.* 1995)

2.4.2. Non -linear elastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniğine göre, çatlak ucunda meydana gelen gerilme yığılması teorik olarak çatlak keskinleştikçe sonsuza gitmektedir. Bu, çatlak ucundaki elastik çatlağın gerilme tekilliği olarak bilinir (Bazant and Keer 1974). Gerçek malzemelerde sonsuz gerilme bulunmaz ve çatlak ucunun önünde plastik bir bölge oluşur (Shah *et al.* 1995). Betonun kırılma sürecinde birçok mekanizma etkili olabilir. Beton karışımındaki su içeriğinin neden olduğu boşluklar, döküm sırasındaki boşluklar ve kırılma işlemi sırasında çatlak ucunda yüksek gerilime neden olan büzülme çatlakları nedeniyle betonda kusurlar meydana gelmektedir. Betonda mikro çatlak ilerlemesi, betonun en zayıf kısmını takip eder. Kaba ve ince agrega gibi parçacıklar etrafındaki arayüz bölgesi, yüksek gözenekli olması nedeniyle betonun en zayıf kısmıdır (GjØrv 1994). Bu nedenle, ilerleyen çatlak, arayüzey bölgesi matrisinden daha sert olan agregalarla karşılaştığında, agregaların arasından geçmek yerine çevrelerini dolanarak çatlak sapması gerçekleştirir.

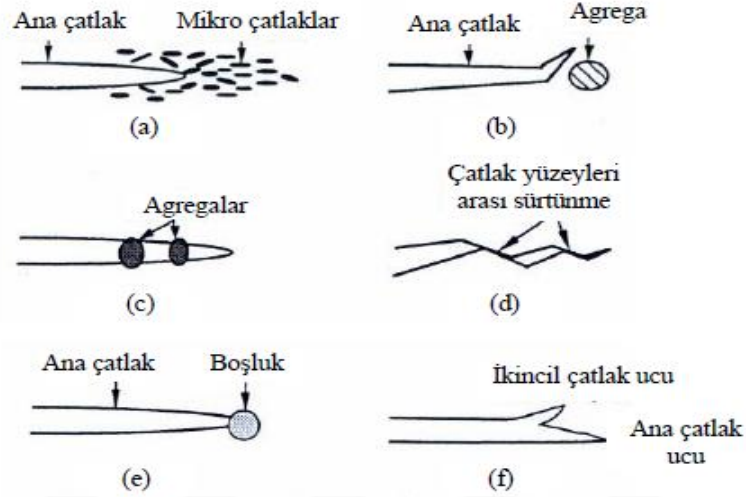
Diğer bir önemli mekanizma, agrega köprülemesidir. Uygulanan gerilmeyi çatlaktan geçirmek için agrega önemli bir rol oynar. Uygulanan gerilmeyi iletme işlemi, agreganın büyüklük, şekil ve kalitesi gibi özelliklere bağlıdır. Bu faktörler betonun kırılma direncini etkiler ve son olarak kırılma davranışını karakterize eder (Zang and Xu 2007; Siregar 2016). Çatlak köprüleme işlemi sırasında, agreganın varlığı, çatlak yüzünde bir dereceye kadar sürtünmeye katkıda bulunur; bu, karşılıklı hizalamanın korunmasına yardımcı olur ve bu nedenle çatlağın ilerlemesine direnç sağlar.

Irwin tarafından tanımlanan, betondaki kırılma süreci bölgesi betonun lineer olmayan davranışının açıklanmasında önemli bir terimdir. Şekil 2.14 'de de çentikli bir numunenin çekme durumundaki gerilme - şekil değiştirme eğrisi görülmektedir (Karihaloo 1995; Alyamaç 2008). Burada AB pik yük öncesi lineer olmayan bölgeyi, BC mikro çatlakların meydana gelmesi sonucunda oluşan yumuşama bölgesini temsil etmektedir. CD kısmı ise eğrinin pik yük sonrası kuyruk kısmı olup agrega kilitlenmesi ve yüzeyler arası sürtünmeden dolayı oluşan bölge olarak tanımlanmaktadır. Irwin, metalik ve seramik malzemeler için ifade ettiği kırılma süreci bölgesi beton için eğrinin BCD kısmında gelişir (Alyamaç 2008).



Şekil 2.14. Çentikli bir numunenin çekme durumundaki gerilme - şekil değiştirme eğrisi (Alyamaç 2008)

Betonda, çatlak ucu plastik bölgesi, çatlak koruma, çatlak sapması, agrega köprülemesi ve çatlak dallanması gibi çatlak önleme mekanizmaları Şekil 2.15’de sunulmuştur. Bu durum, beton gibi farklı fazlara sahip malzemeler için kırılma süreci bölgesi olarak bilinir (Yardımcı 2007).



Şekil 2.15. Betonda kırılma bölgesindeki mekanizmalar (Shah et al. 1995; Yardımcı 2007)

Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM), çatlak ucundan önce gelişmekte olan mekanizmalarının doğrusal olmayan bir davranışla sonuçlanmasından dolayı, beton gibi yarı gevrek malzemelere doğrudan uygulanamaz. Sonuç olarak, doğrusal olmayan kırılma mekaniği yöntemiyle, betonun kırılma özelliklerini tanımlamak daha gerçekçidir. Araştırmacılar tarafından, betonun doğrusal olmayan davranışını belirlemek için yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımlar arasında en sık kullanılanlar, Hillerborg *et al.* (1976) tarafından geliştirilen Fiktif Çatlak Modeli, Bazant (1984) tarafından geliştirilen Boyut Etkisi Modeli, Jeng and Shah (1985) tarafından geliştirilen İki Parametrel Model’dir.

2.4.2.a. Fiktif çatlak modeli (FCM)

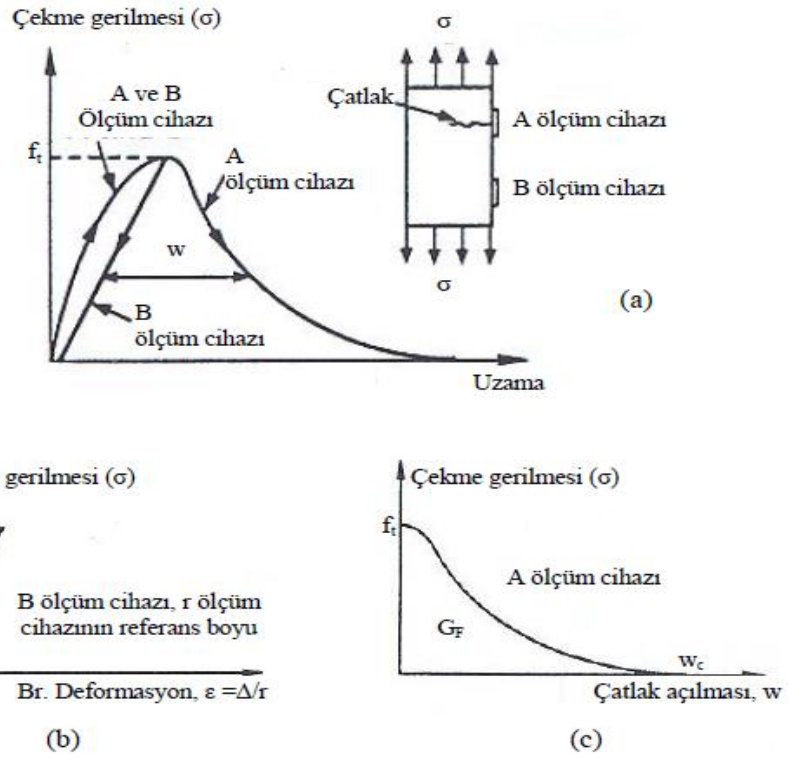
Hillerborg *et al.* (1976), beton kırılması için hayali bir çatlak modeli önermiştir. Tek eksenli gerilmeye maruz kalan bir beton plaka için tipik bir gerilme uzama eğrisi, Şekil

2.16'da gösterilmiştir. Beton plakanın uzaması, A ve B olarak adlandırılan 2 adet yerdeğiştirme ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. A cihazı çatlak bölgesi dahil uzamayı ölçerken, B cihazı çatlak bölgesi dışındaki uzamayı ölçmüştür. Sonuç olarak, ölçüm cihazlarının her ikisinde de maksimum gerilmeye kadar aynı uzama elde edilmiştir. Maksimum yükten sonra, A ölçüm cihazının bulunduğu bölgede uzama sürekli olarak artarken, birim deformasyonların çatlak bölgesinde yerleşmesinden dolayı B ölçüm cihazının bulunduğu çatlamaş kesitte yük boşalması gözlenmiştir. Betonun pik yük öncesi gerilme tepkisinin, Şekil 2.16b'de gösterildiği gibi bir eğri ile tanımlanabileceği, pik yükten sonraki kırılma davranışı veya yumuşamanın, Şekil 2.16c'de gösterildiği üzere bir gerilme-uzama eğrisi ile karakterize edilebileceği önerilmiştir (Yardımcı 2007).

Fiktif çatlak modelinde, çekme gerilmesi – çatlak açılması eğrisinin altında kalan alan, malzemenin kırılma enerjisi olarak kabul edilir ve denklem 2.1 kullanılarak hesaplanır (Shah *et al.* 1995).

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w)dw \quad (2.20)$$

Burada, σ , gerilmeyi, w_c ise yumuşama gerilmesi değerinin sıfıra ulaştığında elde edilen kritik çatlak açılmasıdır.

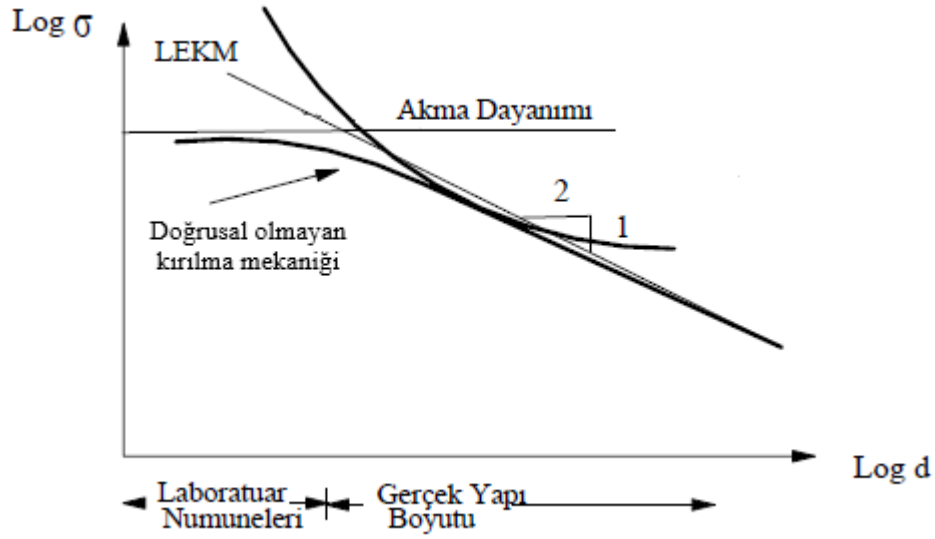


Şekil 2.16. Fiktif çatlak yaklaşımının temel prensibi (Shah *et al.* 1995; Yardımcı 2007)

Malzemenin kırılma tokluğu G_F , birim çatlak alanında sönmölen enerji olarak gösterilir ve malzemenin bir kırılma parametresidir. FCM'de yumuşama gerilmesi – çatlak açılması $\sigma(w)$ eğrisi, geometri ve boyuttan bağımsız bir malzeme özelliği olarak kabul edilir (Sluys 1999; Yardımcı 2007).

2.4.2.b. Boyut etkisi modeli

Bazant and Kazemi (1990), pik yükte numunede serbest kalan enerji ve boyut analizi kavramlarından yararlanarak, nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki ilişkiyi Denklem gibi ifade etmişlerdir (Alyamaç 2008).



Şekil 2.17. Bazant'ın boyut etkisi teorisi (Shah *et al.* 1995)

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (2.21)$$

Burada, B ve d_0 sabit terimler, f_t ise bir malzemede boyuttan bağımsız çekme dayanımı değeridir. Şekil 2.17 'de görüldüğü gibi, boyut etkisi teorisi küçük boyutlarda, akma dayanımı, büyük boyutlu elemanlarda ise LEKM eğrisine asimptot olmakta ve böylece sınırlı bir boyut aralığında geçerli olmaktadır (Alyamaç 2008).

Bazant and Kazemi (1990) tarafından önerilen bu model için en az üç farklı boyutta geometrik olarak benzer ve orantılı çentik boyutlarına sahip kirişlerde üç noktalı eğilme deneyi uygulanır (RILEM TC 89-FMT; Akkaya 2003). Bu deneyler sonucunda tepe yükü elde edilerek iki adet kırılma parametresi bulunur. Bunlar, kritik enerji salıverilme hızı, G_f (kırılma tokluğu), diğeri de kırılma süreci bölgesi uzunluğu, c_f 'tir. Bu parametreler, boyut etkisi - tepe yükü ilişkisini ifade eden denklemlerin deney sonuçları ile regresyonu yapılarak bulunan ampirik katsayılar yardımıyla hesaplanır (Akkaya 2003).

2.4.2.c. İki parametrelili model

Jeng and Shah (1985), yapıların elastik kırılma tepkisini baz alan iki parametrelili bir kırılma modeli önermiştir. Bu modelde kırılma parametreleri, kapalı devre deney sistemi kullanılarak, çentikli numunelerin üç noktalı eğilme deneyine tabi tutmak suretiyle, yük - çatlak ağzı açılımı ilişkisi baz alınarak hesaplanır. Yük - çatlak ağzı açıklığı eğrisinin tepe yükü noktasında yükleme – boşaltma işlemi yapılır. Başlangıçtaki yük - çatlak ağzı açıklığı ilişkisini ifade eden eğiminin yükleme - boşaltma ile nasıl azaldığı belirlenir. Buradan etkin çatlak uzunluğu kullanılarak 2 adet kırılma parametresi hesaplanır (RILEM TC 89-FMT 1990; Akkaya 2003). Bu parametreler, gerilme şiddet çarpanının kritik değeri K_{IC} ve çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri $CTOD_c$ 'dir.

Sonuç olarak, Boyut Etkisi Modelinde, pik yük değeri baz alınarak kırılma parametreleri hesaplanabilmektedir. İki Parametrelili Modelde ise hem pik yük öncesi davranış ele alınmakta hem de çok detaylı ve hassas bir deney düzeneği gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ise lifli KYB numuneleri kullanılmıştır. Lifli betonlarda, pik yükten ziyade, pik yük sonrası davranış önem arz etmektedir. Bu nedenlerden dolayı, çalışma kapsamında kırılma enerjilerini belirlemek için, Hillerborg (1976) tarafından önerilen Fiktif Çatlak Modeli kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Bu çalışma kapsamında, Aşkale çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Üretici firmadan alınan bilgiler doğrultusunda, çimentonun kimyasal ve fiziksel - mekanik özellikleri ile TS EN 197-1'e göre belirtilen sınır değerler, sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler	CEM I 42.5 R	TS EN 197-1
SiO ₂ (%)	18,10	
Al ₂ O ₃ (%)	4,48	
Fe ₂ O ₃ (%)	3,09	
CaO (%)	63,65	
MgO (%)	2,58	
SO ₃ (%)	2,84	Maks. %4
Na ₂ O (%)	0,21	
K ₂ O (%)	0,62	
Cl ⁻ (%)	0,015	Maks. %0,1
Kızdırma kaybı (%)	3,90	Maks. %5
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,55	Maks. %5

Çizelge 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel - mekanik özellikleri

Fiziksel ve mekanik özellikler	CEM I 42.5 R	TS EN 197-1
İncelik 45 µm elek üstü (%)	7,15	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,12	
Özgül yüzey (cm ² /g)	3.698	
Priz başı (saat-dk)	2sa-31dk	Min. 60dk
Priz sonu (saat-dk)	3sa-11dk	
Hacim genleşmesi (mm)	1,00	Maks. 10 mm
Basınç dayanımı (MPa)		
2. gün	27,90	Min. 20 MPa
28. gün	58,00	Min. 42,50 MPa
Maks.		62,50 MPa

3.1.2. Uçucu kül

Kendiliğinden yerleşen betonun taze özellik gereklilikleri nedeniyle, inert ve puzolanik / hidrolik toz malzemeler, kohezyon ve segregasyon direncini geliştirmek ve korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışma kapsamında, Çatalağzı termik santralinde elde edilmiş F – sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küle ait görüntü Şekil 3.1’de sunulmuştur.

**Şekil 3.1.** Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül

Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikler ile fiziksel ve mekanik özelliklerine ait bilgiler üretici firmadan alınarak, sırasıyla Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. Uçucu küle ait aktivite indeksleri, %75 CEM I 42.5 R + %25 uçucu küle hazırlanan karışım değerleridir.

Çizelge 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler	Uçucu kül	TS EN 450-1
SiO ₂ (%)	60,61	
Al ₂ O ₃ (%)	20,81	
Fe ₂ O ₃ (%)	7,36	
CaO (%)	2,44	
MgO (%)	1,64	≤ 4,0
SO ₃ (%)	0,51	
Na ₂ O (%)	0,56	
K ₂ O (%)	1,91	
Cl ⁻ (%)	0,0067	≤ 0,10
Kızdırma kaybı (%)	2,71	≤ 5,0
Çözünmeyen kalıntı (%)	89,19	
Reaktif SiO ₂ (%)	40,90	≥ 25,0
Reaktif CaO (%)	0,00	≤ 10,0
Serbest CaO (%)	0,14	≤ 1,0
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	88,80	≥ 70,0

Çizelge 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün fiziksel - mekanik özellikleri

Fiziksel ve mekanik özellikler	Uçucu kül	TS EN 450-1
45 µm elekte kalıntı (%)	29,30	≤ 40,0
200 µm elekte kalıntı (%)	0,80	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,33	
Özgül yüzey (cm ² /g)	2.475	
Aktivite indeksi (28 gün) (%)	88,00	≥ 75,0
Aktivite indeksi (90 gün) (%)	91,00	≥ 85,0

3.1.3. Kimyasal katkı

Çalışmada, BASF firmasına ait polikarboksilik eter esaslı, ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi olan MasterGlenium RMC 303 kullanılmıştır. Bu kimyasal katkıya ait üretici firmadan alınan özellikleri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri

Özellikler	Master Glenium RMC – 303
Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Yeşil - sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de) (kg/l)	1,05
pH değeri	5,00
Alkali içeriği (%)	≤ 3 (Kütlece)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,10 (Kütlece)

3.1.4. Lifler

Çalışma programı kapsamında, 12 mm uzunluğa sahip bazalt, cam ve polipropilen lifler kullanılmıştır. Kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firmalardan alınmış ve Çizelge 3.6’da verilmiştir. 12 mm boylarında kırılmış liflere ait görsel ise Şekil 3.2’de sunulmuştur. Farklı boyutta lif kullanımının, karışımların hem taze beton hem de sertleşmiş beton özellikleri üzerinde boyut etkisine neden olacağından, kullanılan liflerin tamamı aynı boyutta seçilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	Bazalt	Cam	Polipropilen
Uzunluk (mm)	12	12	12
Çap (µm)	13-20	13-15	18-20
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,70	2,60	0,91
Çekme Dayanımı (MPa)	4000-4500	3000-3600	350-700
Elastisite Modülü (GPa)	88	77	3,50
Uzama (%)	3,15	2,65	25



Şekil 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan lifler

3.1.5. Agregat

Çalışmada, hazır beton santralinden temin edilen, 5-12 mm arası kırmataş ve 0-5 mm arası dere agregası kullanılmıştır. Agregalar kullanılmadan önce uygun tane sınıflarına ayrılmış, yıkanmış ve kurutulmuştur. Agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzemelerin çeşitli özellikleri elde edilmiştir.

3.1.6. Karışım suyu

Çalışmada karışım suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.2.1. Elekler

Agrega deneylerinde TS EN 933 – 2'ye uygun ve TS 1227 ISO 3310 – 1 ve TS 1226 ISO 3310 – 2'de belirtilen özelliklere sahip 0,25 mm, 0,50 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

3.2.2. Betonyer

Karışımların hazırlanmasında, ELE firmasına ait 135° açılık manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır.

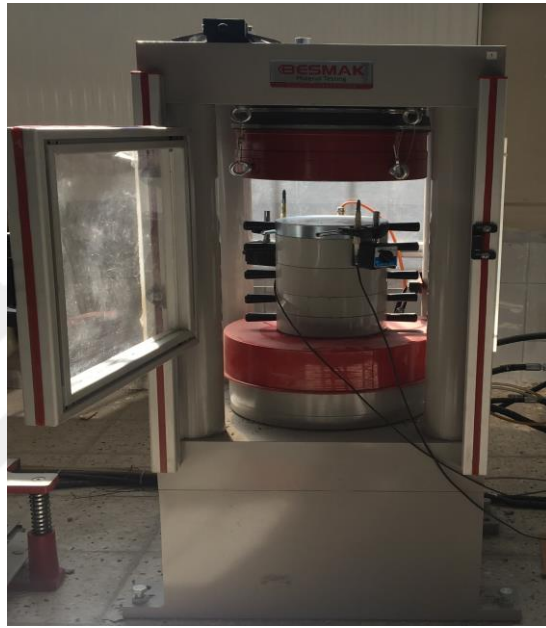
3.2.3. Kalıplar

Deneyssel çalışma kapsamında, basınç dayanımlarının belirlenmesinde 150x150x150 mm boyutlarında plastik küp kalıplar ve yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesinde ise 100x200 mm boyutlarında plastik silindir kalıplar kullanılmıştır.

Beton karışımların eğilme dayanımı ile darbe dayanımının tespiti için sırasıyla 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik ve 100x300 mm boyutlarında silindir kalıplar, lif ilaveli beton karışımların kırılma enerjilerini belirlemek için ise 100x100x350 mm boyutlarında, orta noktasında 30 mm derinliğinde çentik bulunan ahşap kalıplar kullanılmıştır.

3.2.4. Beton presi

Beton karışım numunelerinin, basınç dayanımlarının belirlenmesinde, Besmak marka 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen servo - hidrolik beton presi kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Basınç dayanımı ve elastisite modülü ölçümü deney aleti

3.2.5. Yarmada çekme ve darbe dayanımı ölçüm aletleri

Sertleşmiş beton numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme deneyi için, ELE marka Autotest 3000 kN kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen test makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.4).

Deney sırasında presin yük artım hızı, TS EN 12390-6 standardı baz alınarak 90 kgf/s olarak ayarlanmıştır. Her bir karışım bileşimi için belirlenen yarmada çekme dayanımı değerleri, 3 adet silindir numunesinin ortalamasını temsil etmektedir



Şekil 3.4. Yarmada çekme dayanımı ölçümü deney aleti

Numunelerin darbe dayanımının belirlenmesinde ise ACI 544.2R'nin önerisi temel alınarak, Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, 4.45 kg ağırlığındaki yükün, 457 mm yükseklikten, 64x150 mm boyutlarındaki disk numunenin üzerine yerleştirilen, 64 mm çapında çelik bilye üzerine düşürülmesini sağlayan deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Darbe dayanımı ölçümü deney aleti

3.2.6. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi ölçüm aleti

Çalışma kapsamında, deney numunelerinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerinin belirlenmesinde, maksimum çalışma basıncı 192 bar, yükleme hızı 0,01 KN/s ile 100 KN/s arasında ayarlanabilen Besmak marka servo – hidrolik eğilme test makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi ölçümü deney aleti

3.2.7. Kendiliğinden yerleşen taze beton deneylerinde kullanılan aletler

Kendiliğinden yerleşen taze beton karışımları, çökme – yayılma, V – hunisi ve L – kutusu deneylerine tabi tutulmuş olup; bu deneylerde kullanılan aletler aşağıda açıklanmıştır.

Çökme – yayılma deney aleti:

Deney düzeneği, boyutu 900x900 mm olan plywood plaka ile üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik koniden oluşmaktadır.

V – hunisi deney aleti:

Cihaz ayakları üzerine dikey olarak yerleştirilmiş, 4 mm kalınlığında paslanmaz çelik huniden oluşmaktadır. Huninin iç yüzeyi pürüzsüzdür. Paslanmaz çelik V hunisi, düşey bir destek standına monte edilmiştir. Boşaltma ağzı, anlık açılabilen kapak ile donatılmıştır.

L – kutusu deney aleti:

L Kutusu kendiliğinden yerleşen taze beton karışımlarında geçiş yeteneğinin ölçümünde kullanılır. L kutusu, 2 mm kalınlığında, 700x200x600 mm boyutlarında paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Deney düzeneğinde, 12 mm çapında çelik çubuklar arası mesafe, 41 mm (3 çelik çubuk) ve ya 59 mm (2 çelik çubuk) olacak şekilde ayarlanabilmektedir. Doldurma haznesi yıkanabilmesi için kolay sökülüp takılabilir özelliktedir. Bu çalışma kapsamında 3 adet çelik çubuklu L-kutusu deney düzeneği kullanılmıştır.

3.3. Yöntem

Bu bölümde, kendiliğinden yerleşen lifli beton karışımlarında kullanılan agrega ile taze ve sertleşmiş beton numunelerin özelliklerini belirlemek için uygulanan deney yöntemleri anlatılmıştır.

3.3.1. Agregada deney yöntemleri

KYB karışımlarında kullanılan agregaların tane büyüklüğü dağılımını belirlemek için, TS EN 933-1 standardı uygulanmıştır. Agregaların özgül ağırlık ve su emme deneyleri ise TS EN 1097-6/A1 standardına göre yapılmıştır. Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agregada deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır.

3.3.2. Lifli KYB karışımlarının hazırlanması

Lifli KYB karışımları, ELE firmasının ürettiği 135° açılık manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli betonyerde hazırlanmıştır. Beton karışımların hazırlanması esnasında, malzemelerin konulma sırası ve karıştırma süreleri yapılan ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Çimento, ucucu kül, ince ve iri agregada mikserde kuru olarak 1 dk. karıştırılmış, sonrasında karışım suyu ve süper akışkanlaştırıcı katkının eklenmesinden sonra tüm karışım 3 dk boyunca karıştırılmıştır. Lif kullanılan karışımlarda, akıcı kıvamdaki beton karışımı meydana geldikten sonra, lif eklenmiş ve homojen bir karışım oluşması için ilave 5 dk karışım süresi uygulanmıştır.

3.3.3. Taze beton deney yöntemleri

3.3.3.a. Çökme – yayılma deneyi

Deney kendiliğinden yerleşen betonlarda çökme yayılma değerini belirlemek üzere TS EN 12350-8'e uygun olarak yapılmıştır. Deneyde kesik koni ve düzgün bir yüzeye sahip 90x90 cm boyutlarında plywood kalıp malzemesi kullanılmıştır. Deney aparatları, deney yapılmadan önce nemlendirilmiştir. Taze KYB karışımı koninin içerisine herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmadan doldurulmuş ve koni dik bir ekseninde kaldırılarak numunenin serbest bir şekilde yayılması sağlanmıştır (Şekil 3.7). KYB karışımlarının, yayılma çapı birbirine dik iki ekseninde ölçülmüş olup; bu iki değer aritmetik ortalaması yayılma çapı olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.7. Kendiliğinden yerleşen betonda çökme yayılma deneyi uygulaması

3.3.3.b. V – hunisi deneyi

KYB karışımlarının viskozitesini ve doldurma yeteneğini belirlemek amacı ile TS EN 12350-9'a uygun olarak V hunisi deneyi yapılmıştır. V hunisi, deneyden önce temizlenmiş ve huninin beton ile temas edecek iç yüzeyi ve sürgülü kapak nemlendirilmiştir. Taze KYB karışımı sıkıştırma işlemi yapılmadan huniye doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra alt kapak açılmıştır (Şekil 3.8). Taze beton karışımının huniden boşalma süresi ölçülmüş ve V - hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.8. Kendiliğinden yerleşen betonda V - hunisi deneyi uygulaması

3.3.3.c. L – kutusu deneyi

TS EN 12350 – 10 standardına uygun olarak yapılan deneyde, L - kutusunun dikey ve yatay eksenini ayıran kayıcı kapak kapatılmış ve KYB numunesi sıkıştırma işlemi yapılmadan kutuya doldurulmuştur (Şekil 3.9). L – kutusuna doldurulan beton karışımın üzeri düzeltildikten sonra kapak açılmıştır. Beton karışımın, engeller arasındaki akışı tamamlandıktan sonra, L kutusu ucundaki beton yüksekliği (H_2) ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği (H_1) ölçülmüş, L kutusu bloklanma oranı (H_2/H_1) hesaplanarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.9. Kendiliğinden yerleşen betonda L - kutusu deneyi uygulaması

3.3.4. Sertleşmiş beton deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri için, herbir karışım serisinden 3'er adet 150x150x150 mm boyutlarında küp ve 100x200 mm boyutlarında silindir deney numuneleri alınmıştır. Küp numuneler basınç dayanımı, silindir numuneler ise yarmada çekme dayanımı tespitinde kullanılmıştır. Her bir seri için eğilme dayanımını ve tokluğunu belirlemek için 3'er adet 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik numuneler, kırılma enerjisini belirlemek için ise 100x100x350 mm boyutlarında, 30 mm derinliğinde çentikli prizmatik numuneler kullanılmıştır. Ayrıca, karışımların darbe dayanımını belirlemek için ise 150 mm çapında 64 mm yüksekliğinde disk numuneler hazırlanmıştır.

3.3.4.a. Basınç dayanımı

Farklı karışım bileşimlerinin basınç dayanımını değerlendirmek için, 150x150x150 mm boyutlarında TS EN 12390-1 ve TS EN 12390-2 standartlarına göre hazırlanan küp

numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Karışım numuneleri TS EN 12390-3 standartlarına göre, 3000 kN basınç yükü uygulayabilen Besmak marka yükleme cihazında deneye tabi tutulmuştur. Basınç dayanımını belirlemek için yükleme hızı 0.30 MPa/s olarak belirlenmiştir. Her bir karışım bileşimi için, basınç dayanımı 3 adet küp numunesinin ortalamasını temsil etmektedir.

3.3.4.b. Yarmada çekme dayanımı

Beton karışım numunelerinin yarmada çekme dayanımını belirlemek için, 100 mm çapında 200 mm uzunluğunda hazırlanan silindir numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Karışım numunelerinin yarmada çekme dayanımı, TS EN 12390-6 standardına göre, ELE marka Autotest 3000 kN kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen test makinesi kullanılarak belirlenmiştir. Deney sırasında presin yük artım hızı 90 kgf/s olarak ayarlanmıştır. Her bir karışım bileşimi için belirlenen yarmada çekme dayanımı değerleri, 3 adet silindir numunesinin ortalamasını temsil etmektedir. Yarmada çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (3.1)$$

eşitliğinde, en büyük yük F ile, numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu L ile ve numunenin seçilen en kesit boyutu ise d ile temsil edilmektedir.

3.3.4.c. Eğilme dayanımı

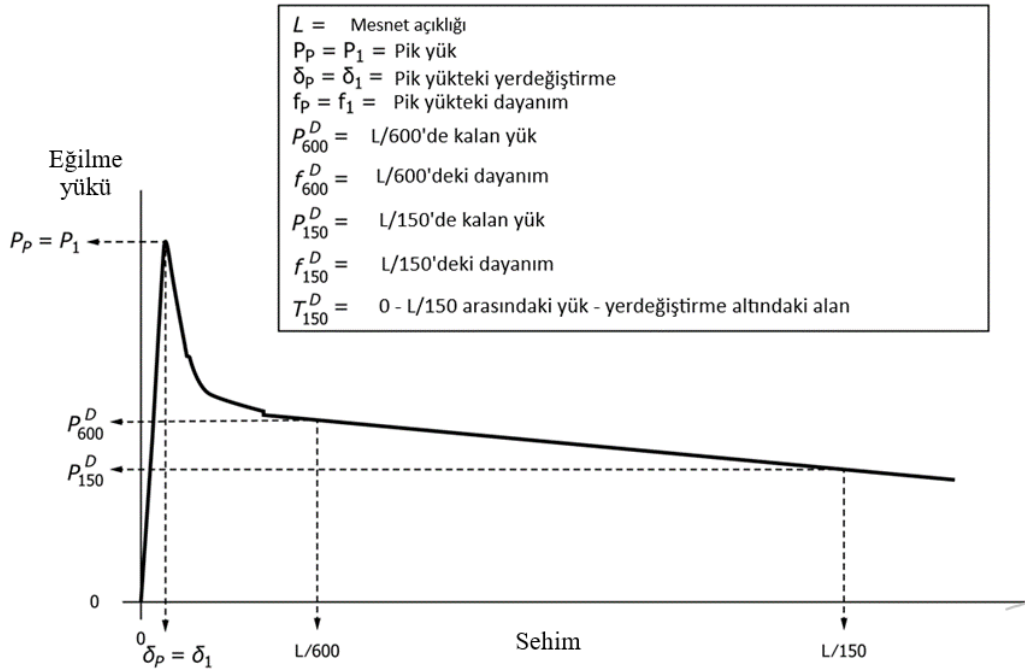
Farklı karışım bileşenlerinin, eğilme dayanımını belirlemek için 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmış ve 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Karışım numuneleri TS EN 12390-5 standardına göre, Besmak marka, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen test makinesi kullanılarak belirlenmiştir. Yükleme hızı, 0,06 MPa/s sabit gerilme hızı sağlanacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca,

prizmatik numunelerin orta noktasındaki yerdeğiştirmeleri 10 mm stroklu bir doğrusal değişken yer değiştirme sensörü (LVDT) kullanılarak kaydedilmiştir.

Eğilme dayanımının belirlenmesinde kullanılan

$$f_{cf} = \frac{3FL}{2d_1d_2^2} \quad (3.2)$$

eşitliğinde, en büyük yük F ile, mesnet silindirleri arasındaki açıklık L ile ve numunenin en kesit boyutları ise d_1 ve d_2 (numune yüksekliği) ile temsil edilmektedir.



şekil 3.10. ASTM C 1609'a göre eğilme tokluk indisleri

Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında lif ilaveli betonların eğilme tokluğu da hesaplanmıştır. Lif takviyeli betonun eğilme tokluğunu hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasından, tokluk indislerini elde etmek için mevcut çalışmada ASTM C 1609'un önerisi kullanılmıştır. Bu çalışmada, ASTM C 1609'un önerisine dayanarak, lifli betonların tokluk davranışını değerlendirmek için, pik yük (P_p),

pik yükte net sapma (δ_p), L/600'de kalan yük ($P_{L/600}$), L/150'de kalan yük ($P_{L/150}$), L/600'e kadar yük sapma eğrisi altındaki alan ($T_{L/600}$) ve L/150'ye kadar yük sapma eğrisi altındaki alan ($T_{L/150}$) hesaplanmıştır. Bu indisler Şekil 3.10'da tanımlanmıştır.

3.3.4.d. Darbe direnci

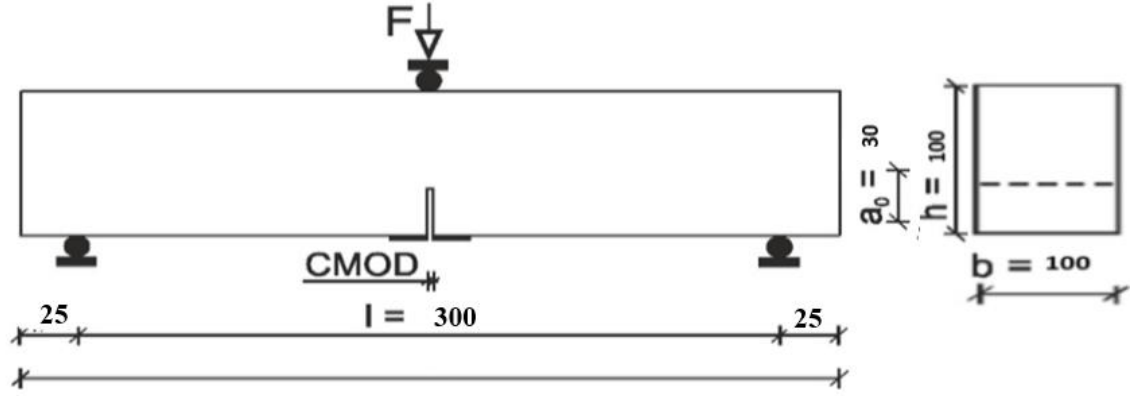
Farklı lif tipi ve oranı ile hazırlanan karışım numunelerinin darbe testi, ACI 544 standardına dayanılarak uygulanmıştır. Ağırlık düşürme testi olarak adlandırılan bu yöntemde, 64 mm yüksekliğinde, 150 mm çapında silindirik numunelerin merkezi yüzeyinde bulunan 64 mm çapındaki çelik bilye üzerine, 457 mm yüksekliğinden 4,45 kg kütleyle sahip çelik bir ağırlık düşürülerek uygulanmıştır. Darbe direnci deneyinde numunede gözle görülebilen ilk çatlak ve nihai kırılmaya neden olan düşüş sayıları kaydedildi. Her bir karışım bileşimi için darbe direnci, 3 adet disk numunenin ortalamasına temsil etmektedir. Karışım numunelerinin darbe enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E = Nmgh \quad (3.3)$$

Burada N, darbe sayısını, m, 4,45 kg kütleli çelik bir ağırlığı, g, yerçekimi ivmesini ve h, düşüş yüksekliğini temsil etmektedir.

3.3.4.e. Kırılma enerjisi ve eğilme parametrelerinin belirlenmesi

Kırılma enerjisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemin detayları, RILEM TC 50-FMC standardında belirtilmiştir. Tez çalışması kapsamında, kırılma enerjisini ve eğilme parametrelerini belirlemek üzere, 350x100x100 mm boyutlarında ve orta noktasında 30 mm yüksekliğinde çentik bulunan kiriş numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.11). Ayrıca deney esnasında çatlak ağzında meydana gelen açılmalar, yatay LVDT kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. Çentikli kiriş numunenin geometrisi ve boyutları



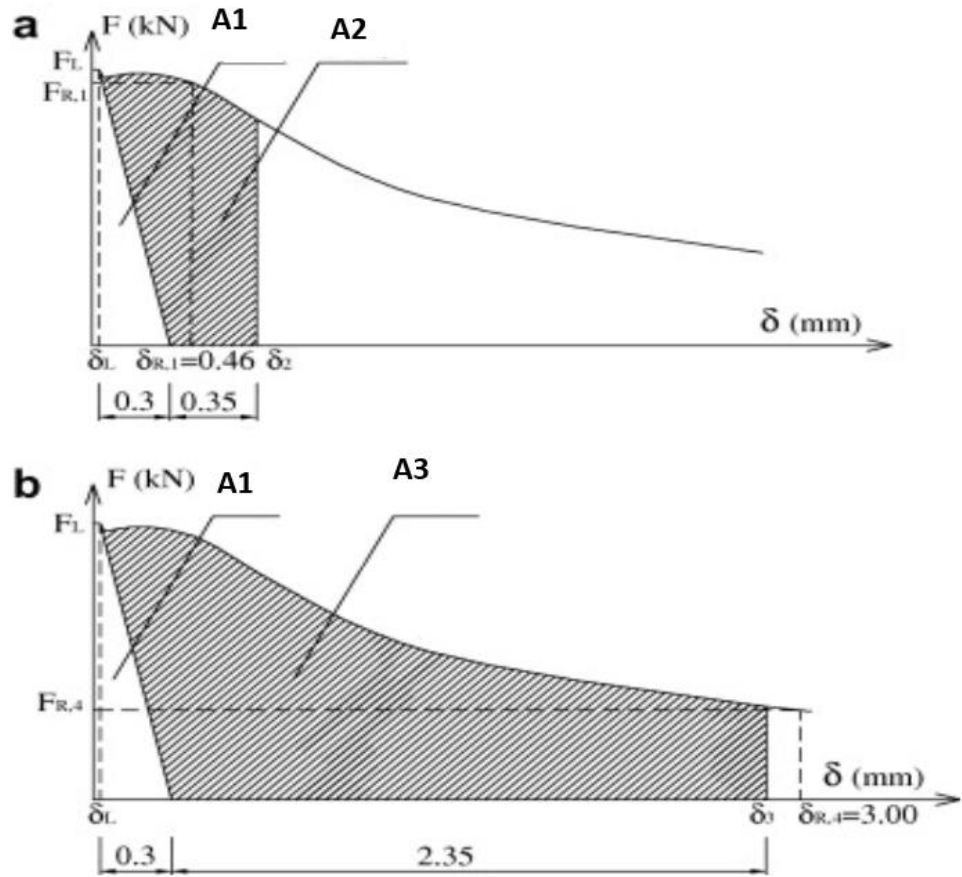
Şekil 3.12. Çentikli numunelerde üç noktalı eğilme deneyinin uygulaması

Kırılma enerjisinin belirlenmesinde kullanılan,

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta}{b(h - a_0)} \quad (3.4)$$

eşitliğinde, yük – çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrisi altındaki alan W_0 ile, δ azami CMOD değerini, mesnet açıklığı arasındaki ağırlık mg ile ve numunenin kırılma yüzey alanı ise $b(h-a_0)$ ile temsil edilmektedir.

Ayrıca tez çalışması kapsamında, yük – CMOD eğrileri kullanılarak lifli betonların, 0,05 mm’lik CMOD açıklığına karşılık gelen yük F_L ve bu yükteki eğilme dayanımı $f_{ct, L}$, hesaplanmıştır. 0,5 mm ve 3,5 mm’lik CMOD değerlerindeki eşdeğer eğilme dayanımları $f_{eq, 2}$ ve $f_{eq, 3}$ ve aynı deplasmanda ki artık eğilme dayanımları $f_{R, 1}$ ve $f_{R, 4}$ değerleri belirlenmiştir. Ayrıca lifli karışımların tokluk göstergesi olan A_1 , A_2 ve A_3 alanları, RILEM TC 162-TDF standardı baz alınarak tespit edilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. RILEM TC 162-TDF’ye göre eğilme dayanımı parametreleri

$f_{eq, 2}$, $f_{eq, 3}$ eşdeğer eğilme dayanımları ve $f_{R,i}$ artık eğilme dayanımı aşağıda belirtilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left(\frac{A_2}{0.50} \right) \frac{L}{b(h-a_0)^2} \quad (3.5)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left(\frac{A_3}{2.50} \right) \frac{L}{b(h-a_0)^2} \quad (3.6)$$

$$f_{R,i} = \frac{3}{2} \frac{F_{R,i} L}{b(h-a_0)^2} \quad (3.7)$$

Burada, L , mesnet açıklığını, b , numunenin genişliğini, h , numunenin yüksekliğini, a_0 , çentik yüksekliğini ve A_2 ile A_3 ise standartta belirtilen ve Şekil 3.13’de gösterilen alanları temsil etmektedir.

Ayrıca standartta, yük – CMOD eğrisinin kullanılması durumunda, artık ve eşdeğer eğilme dayanımlarının hesaplandığı δ değerlerinin aşağıdaki bağıntı kullanılarak CMOD değerlerine dönüştürülmesi önerilmektedir.

$$CMOD = 1.18 \delta - 0.0416 \quad (3.8)$$

Böylelikle, tez çalışması kapsamında yük – CMOD eğrileri kullanıldığı için, aşağıda belirtilen CMOD değerlerine göre hesaplamalar yapılmıştır.

$\delta_1 = 0,46 \text{ mm}$	$CMOD_1 = 0,50 \text{ mm}$
$\delta_2 = 0,70 \text{ mm}$	$CMOD_2 = 0,78 \text{ mm}$
$\delta_3 = 2,70 \text{ mm}$	$CMOD_3 = 3,14 \text{ mm}$
$\delta_4 = 3,00 \text{ mm}$	$CMOD_4 = 3,50 \text{ mm}$

3.3.5. Seçilen parametreler, seviyeleri ve beton karışım oranları

Çalışmanın ana parametreleri, lif türü ve oranlarıdır. Lif türü olarak 12 mm uzunluğunda, yaklaşık olarak aynı narinlik oranlarına sahip polipropilen, cam ve bazalt lif seçilmiştir. Lif oranlarının seviyeleri ise, betonun hacimce %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30'u olarak belirlenmiştir. Mineral katkı olarak, uçucu kül, çimentonun %15 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Tüm karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarı 500 kg/m^3 , su/bağlayıcı malzeme oranı ise 0,45 olarak belirlenmiştir. Ayrıca ön deneylerden hareketle, KYB'nin taze beton özelliklerini sağlayabilmesi için kullanılan kimyasal katkı, su/bağlayıcı malzeme oranında değişiklik yapmadan, farklı miktarlarda kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, toplam agrega miktarının %45'i iri agrega, %55'i ise ince agrega olacak şekilde beton karışımları hazırlanmıştır.

Yukarıda izah edilen parametre ve seviyeler kullanılarak, 13 farklı grupta KYB karışımları üretilmiştir.

Çalışmada polipropilen lif PPF, cam lif GF ve bazalt lif ise BF olarak kodlanmıştır. Lif oranları ise, lif kodlamalarından sonra, % işareti kullanılmadan gösterilmiştir. Örneğin %0,15 oranında polipropilen lif kullanılan serilerde, karışım PPF – 0.15 olarak kodlanmıştır. Çalışma kapsamında, deneysel programa tabi tutulacak, lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait malzeme karışım oranları Çizelge 3.7'de sunulmuştur

Bu tez çalışması, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünün laboratuvar alt yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.7. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları ve tasarım parametreleri

Karışım kodu	Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	İnce Agrega (kg/m ³)	İri Agrega (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kimyasal Katkı (%)	Cam Lif (%)	Bazalt Lif (%)	PP Lif (%)	Su / Çimento	Su / Bağlayıcı malzeme
Kontrol	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	1,80				0,53	0,45
GF – 0.15	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,25	0,15			0,53	0,45
GF – 0.20	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,50	0,20			0,53	0,45
GF – 0.25	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,75	0,25			0,53	0,45
GF – 0.30	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	3,00	0,30			0,53	0,45
BF – 0.15	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,00		0,15		0,53	0,45
BF – 0.20	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,125		0,20		0,53	0,45
BF – 0.25	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,25		0,25		0,53	0,45
BF – 0.30	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,375		0,30		0,53	0,45
PPF – 0.15	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,125			0,15	0,53	0,45
PPF – 0.20	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,50			0,20	0,53	0,45
PPF – 0.25	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,75			0,25	0,53	0,45
PPF – 0.30	425,00	75,00	846,72	705,99	225,00	2,875			0,30	0,53	0,45

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında, kontrol numunesi ve betona hacimce %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30 oranlarında, 12 mm uzunluğunda polipropilen, cam ve bazalt lif ilave edilerek hazırlanan toplamda 13 farklı tür kendiliğinden yerleşen beton karışım numuneleri hazırlanmıştır. Taze betonun işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için, KYB karışımları üzerinde çökme – yayılma, V-hunisi akış süresi ve L-kutusu geçiş yeteneği deneyleri yapılmıştır. KYB karışımlarında lif kullanım oranı arttıkça, betonun işlenebilirlik özelliklerinin olumsuz şekilde etkilendiği bilinmektedir. Lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarda, bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için süper akışkanlaştırıcı miktarı arttırılarak, 600 mm üzeri çökme – yayılma çapları elde edilmeye çalışılmıştır.

Sertleşmiş beton numuneler üzerinde ise basınç, yarmada çekme, eğilme, darbe direnci ve kırılma enerjisi deneyleri yapılmıştır. Eğilme deneyi verileri kullanılarak, ASTM C 1609 standardına göre, lifli KYB karışımlarının eğilme tokluk indis özellikleride belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca RILEM TC - 162 TDF standardına göre, yük – CMOD eğrileri elde edilmiş ve karışım numunelerinin eğilme parametreleri hesaplanmıştır.

4.1. Agregada Deneyleri

Kendiliğinden yerleşen lifli beton karışımlarında, kullanılan iri agregada 5–12 mm boyutlarında kırmataş agregasıdır. İnce agregada olarak ise 0–5 mm boyutlarında dere kumu kullanılmıştır. İnce ve iri agregalar üzerinde elek analizi, su emme ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elek analizi deney sonuçlarına göre, agregada tane boyutunun belirtilen standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, ince ve iri agregada su emme oranları ve özgül ağırlıkları sırasıyla %1,2 - %0,5 ve 2,62 – 2,67 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

4.2. Taze Beton Deney Sonuçları

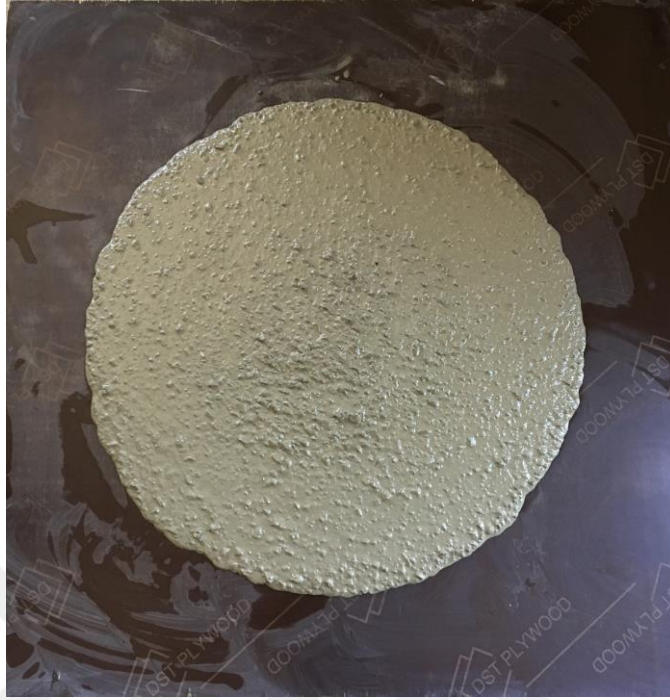
Lifsiz ve lifli kendiliğinden yerleşen beton karışım numunelerinin işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için, numuneler üzerinde çökme – yayılma, L – kutusu ve V – hunisi deneyleri yapılmıştır. Taze beton deneylerinde elde edilen sonuçlar, EFNARC (2005)'de belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Lifli ve lifsiz taze KYB karışımlarına ait çökme – yayılma çapı, V – hunisi akış süresi ve L – kutusu bloklanma oranı sonuçları toplu olarak Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kendiliğinden yerleşen taze beton özellikleri

Karışım kodu	Çökme – yayılma çapı (mm)	V – hunisi akış süresi (sn)	L – kutusu bloklanma oranı
Kontrol	700	4,98	0,94
GF – 0.15	670	5,58	0,88
GF – 0.20	630	5,89	0,86
GF – 0.25	610	7,70	0,83
GF – 0.30	600	7,90	0,80
BF – 0.15	680	6,40	0,90
BF – 0.20	670	6,70	0,86
BF – 0.25	640	8,25	0,84
BF – 0.30	620	8,70	0,81
PPF – 0.15	650	7,20	0,84
PPF – 0.20	670	6,80	0,83
PPF – 0.25	640	8,40	0,80
PPF – 0.30	600	9,20	0,77

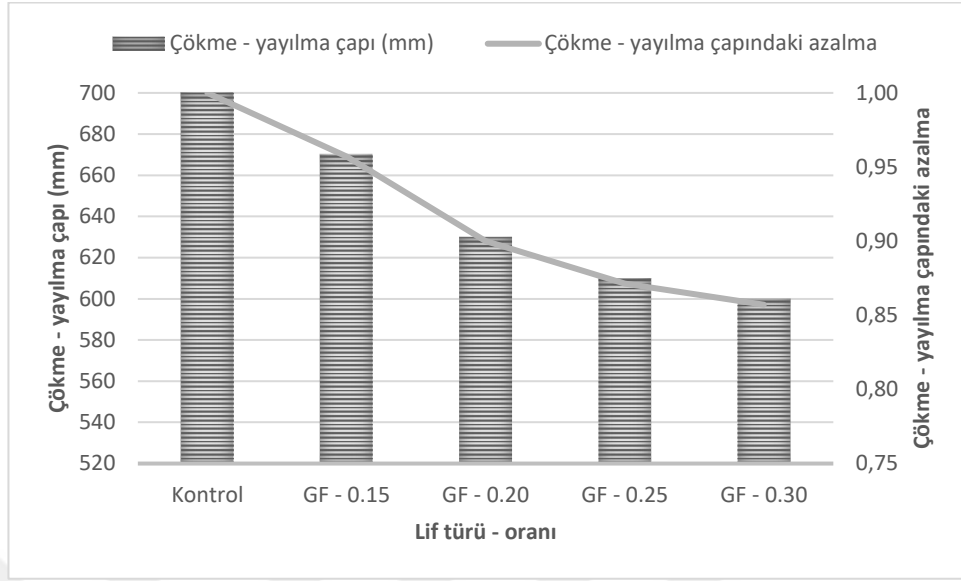
4.2.1. Çökme – yayılma deney sonuçları

Kontrol karışım numunesi haricinde, lif kullanılan karışımlarda, 600 mm – 700 mm arasında hedef yayılma çapını elde etmek için, karışımlardaki su/çimento oranı değiştirilmeden kullanılan kimyasal katkı miktarı, artan lif oranına paralel olarak artırılmıştır. Lifsiz kontrol karışım numunesinde, 700 mm çökme – yayılma çapı değeri elde edilmiştir. Bu karışım numunesine ait yayılma formu Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Lifsiz kontrol numunesinin yayılma formu

KYB karışımlarına lif eklenmesiyle birlikte, karışımların kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerinde düşüşler görülmüştür. Bu durumun nedeni, karışımdaki ayrışmayı ve akışı engelleyen ve beton içinde ağ yapısı oluşturan liflerden kaynaklanmaktadır. Liflerin yüksek içeriği ve geniş yüzey alanı nedeniyle, beton içinde etrafa bağlanmak için daha fazla çimento hamurunu emer ve sonuç olarak karışımın viskozitesindeki artış işlenebilirlik kaybına yol açar (Chen ve Liu 2005). Özellikle cam lif kullanılan karışım numunelerinde bu olumsuz etki daha fazla gözlenmiştir.. Lifsiz ve cam lifli KYB karışım serilerinin çökme – yayılma çapları karşılaştırılması Şekil 4.2’de sunulmuştur.

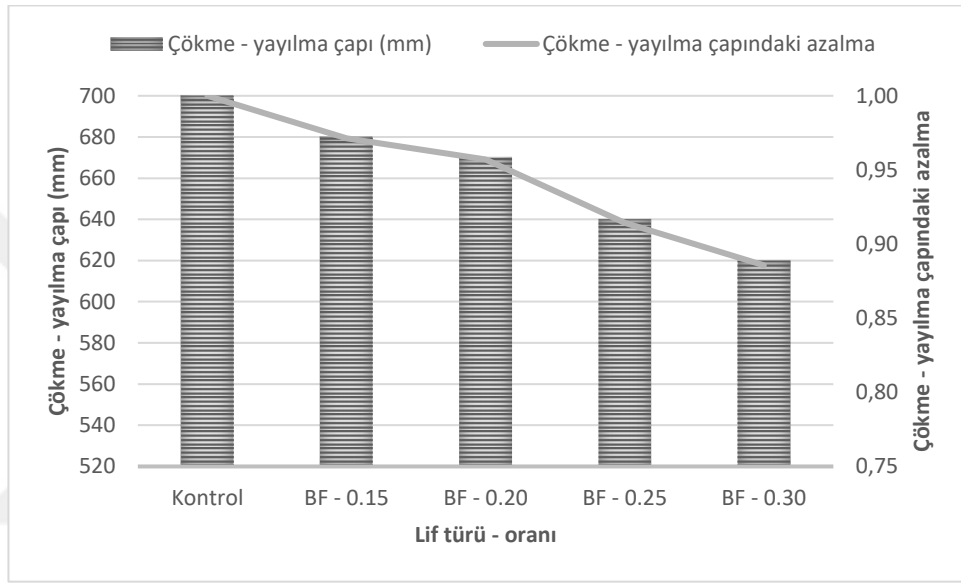


Şekil 4.2. Lifsiz ve cam lifli KYB karışımlarının çökme–yayılma çaplarının karşılaştırılması

Cam lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında, kontrol numunesine oranla en düşük çökme – yayılma çapı, %14'lük azalma ile GF – 0.30 serisinde kaydedilmiştir. Bu karışım serisinde, toplam bağlayıcı malzemenin %3 oranında kimyasal katkı kullanılmıştır. GF – 0.15, GF – 0.20 ve GF – 0.25 karışım serilerinin yayılma çapında ise sırasıyla %4, %10 ve %13'lük azalmalar meydana gelmiştir. Beigi *et al.* (2013) çalışmalarında, 12 mm boyutlarında cam lifleri, KYB karışımına %0,15, %0,20 ve %0,30 oranlarında eklemiş ve çökme – yayılma deneyine tabi tutmuşlardır. Çalışma kapsamında, kimyasal katkı oranı %1,70 olarak belirlenmiştir. Toz malzeme olarak sadece çimento kullanılan serilerde, %0,30 cam lif kullanımı, yayılma çapını kontrol numunesine kıyasla %24 oranında azaltmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak çimentoya ilaveten, %6 oranında nanosilika kullanılması ise karışımlarda yayılma çapını %27 oranında düşürmüş olup, 550 mm yayılma çapı değeri elde edilmiştir. Rohilla *et al.* (2016), 12 mm uzunluğunda cam lifli KYB karışımlarının davranışı üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada kimyasal katkı miktarı, tüm lifli serilerde %1,20 oranında kullanılmıştır. Sonuç olarak, %0,25 ve %0,30 cam lif kullanılan karışımlarda yayılma çaplarında sırasıyla %11 ve %26 oranlarında azalma gözlenmiştir. Deneysel verilerde elde edilen değerler, EFNARC

(2005) standardına göre değerlendirilmesi sonucunda, GF – 0.15 karışım serisi SF2, GF – 0.20, GF – 0.25 ve GF – 0.30 serili karışımlar ise SF1 sınıfını temsil etmektedir.

Bazalt lif kullanılan KYB karışımlarına ait çökme – yayılma değerlerinin, lifsiz beton ile karşılaştırılması Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

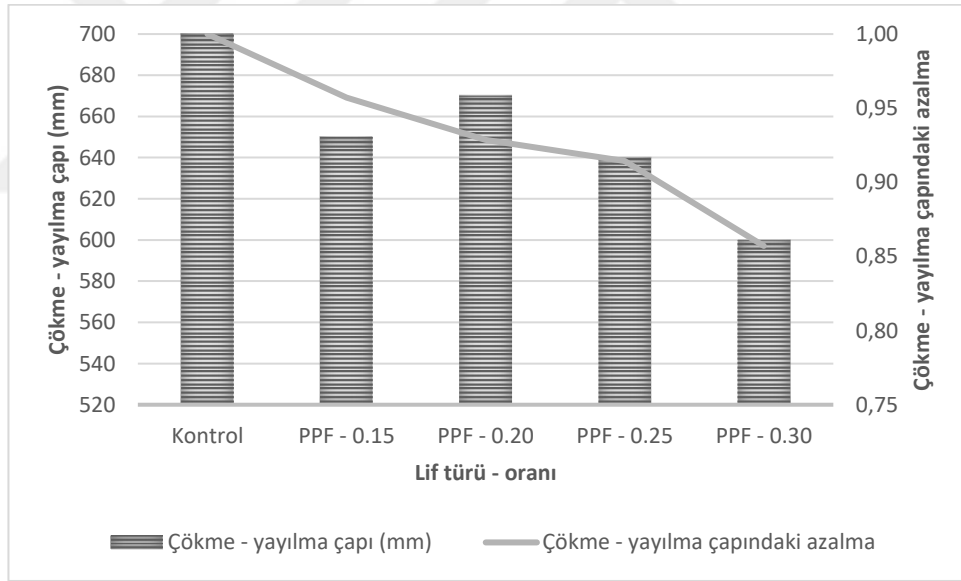


Şekil 4.3. Lifsiz ve bazalt lifli KYB karışımlarının çökme-yayılma çaplarının karşılaştırılması

Bazalt lifli KYB karışım serilerinde, çökme – yayılma çaplarındaki en fazla düşüş %11 oranı ile BF – 0.30 serisinde görülmüştür. BF – 0.15, BF – 0.20 ve BF – 0.25 serilerinin çökme yayılma çaplarında kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %3, %4 ve %9 oranlarında azalma tespit edilmiştir. Sonuçlar EFNARC (2005) standardına göre değerlendirilmesi neticesinde, BF – 0.15 ve BF – 0.20 karışım serileri SF2, BF – 0.25 ve BF – 0.30 serileri ise SF1 sınıfında olduğu görülmüştür. Jiang *et al.* (2014), bazalt lif kullanarak normal beton üzerinde yaptıkları çalışmalarında, %0,30 oranında bazalt lif kullanılması durumunda, betonun çökme değerinde %49 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Bazalt liflerin kendiliğinden yerleşen beton üzerinde etkileri Algın ve Özen (2018) tarafından araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, %0,20 ve %0,30 bazalt lif ilave

edilerek hazırlanan karışımlarda sırasıyla %5,50 ve %8 civarlarında yayılma çapında azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Polipropilen ilave karışım serilerine ait çökme – yayılma değerleri Şekil 4,4’de sunulmuştur. Şekil 4.4’ün incelenmesi neticesinde, bazı yayılma çapı değerleri, kullanılan lif oranının artmasına rağmen, süper akışkanlaştırıcı miktarındaki artıştan kaynaklı olarak artmıştır. Kontrol numunesine göre, PPF – 0.15, PPF – 0.20, PPF – 0.25 ve PPF – 0.30 serilerinin çökme yayılma çaplarında, sırasıyla, %7, %4, %9 ve %14 azalma gözlenmiştir. Sonuçlar EFNARC (2005) standardına göre değerlendirilmesi neticesinde, PPF – 0.20 karışım serisi SF2, PPF – 0.15, PPF – 0.25 ve PPF – 0.30 serileri ise SF1 sınıfını temsil ettiği görülmüştür.



Şekil 4.4. Lifsiz ve polipropilen lifli KYB karışımlarının çökme–yayılma çaplarının karşılaştırılması

Mazaheripour *et al.* (2011), kendiliğinden yerleşen lifli hafif beton özelliklerini belirlemek üzere yaptıkları çalışmalarında, hacimce %0,10, %0,20 ve %0,30 oranlarında polipropilen lif kullanmışlardır. Çalışma kapsamında kontrol ve %0,10 oranında lif kullanılan karışımlarda %2,30 oranında, %0,20 ve %0,30 oranlarında lif kullanılan karışımlarda ise %2,50 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. KYB’deki

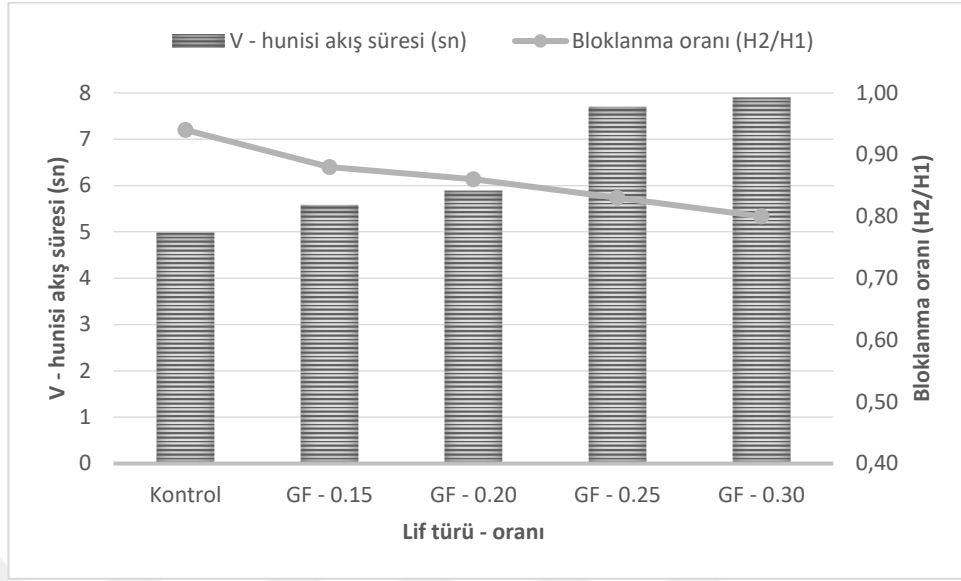
polipropilen liflerin varlığı, çökme – yayılma değerini çok büyük oranda etkilemiştir. Sonuç olarak, kontrol numunesi ile %0,10, %0,20 ve %0,30 oranında polipropilen lif kullanılan karışımlarda sırasıyla 720, 680, 560 ve 430 mm yayılma çapı değerleri elde etmişlerdir.

Çökme – yayılma deney sonuçlarına göre, %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30 oranlarında kullanılan cam, bazalt ve polipropilen lifli karışım serilerinin tümü EFNARC (2005) standardına göre kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini sağlamışlardır. Lifli KYB karışım serilerinde en yüksek çökme – yayılma çapı değerleri, en az kimyasal katkı kullanılan bazalt lifli serilerde elde edilmiştir. Cam ve polipropilen lifli karışımlarda ise, kimyasal katkı miktarının eşit kullanıldığı 0.20 ve 0.25 serilerinin çökme – yayılma çapı değerlerinin incelenmesi neticesinde, PPF serilerinin yayılma çaplarında, GF serilerine kıyasla, sırasıyla, %6 ve %5 oranlarında yükseklik tespit edilmiştir. Hedeflenen çökme - yayılma çapı değerlerine ulaşabilmek için, en yüksek kimyasal katkı miktarı cam lifli serilerde kullanılırken, en düşük katkı miktarı ise bazalt lifli serilerde kullanılmıştır. Çökme – yayılma deney incelemeleri sonucunda, karışım serilerinin hiçbirinde segregasyon olayı gözlemlenmemiştir.

4.2.2. V – hunisi ve L – kutusu deney sonuçları

Çalışma kapsamında, lifsiz ve lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların akış hızını ve donatılar arasından geçme yeteneğini belirlemek üzere V – hunisi ve L – kutusu deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, EFNARC (2005) standardı baz alınarak değerlendirilmiştir.

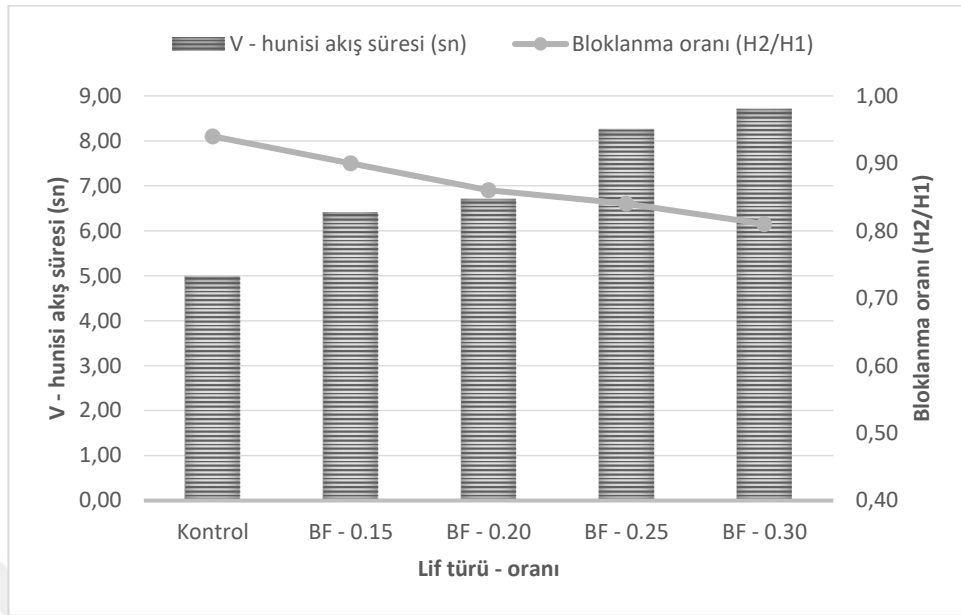
Cam lif kullanılan karışım serilerine ait V – hunisi ve L – kutusu deney sonuçları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Lifsiz ve cam lifli KYB karışımlarının V – hunisi ve bloklanma oranı sonuçları

Cam lif kullanılan karışımlarda, kontrol numunesine oranla V – hunisi akış süresinde artış gözlemlenmiştir. Lif miktarındaki artışa bağlı olarak, kimyasal katkı miktarının artırılması ile tüm cam lifli KYB karışım serileri EFNARC (2005)’de belirtilen VF1 sınıfına girmiştir. GF – 0.15, GF – 0.20, GF – 0.25 ve GF - 0.30 serilerinin V – hunisi akış süresinde, kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %12, %18, %54 ve %58 oranlarında artış tespit edilmiştir. Bloklanma oranı açısından ise, karışım serilerinin tamamı L – kutusu deney düzeneğindeki akışlarını tamamlamış olup tüm cam lifli KYB karışımları EFNARC standardında belirtilen PA2 sınıfını temsil etmişlerdir. Kontrol numunesine kıyasla, GF – 0.15, GF – 0.20, GF – 0.25 ve GF - 0.30 serilerinin bloklanma oranlarında, , sırasıyla, %6, %8, %12 ve %15 oranlarında azalma belirlenmiştir.

Bazalt lif kullanılan KYB karışımlarına ait V – hunisi ve bloklanma oranına ait sonuçlar Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

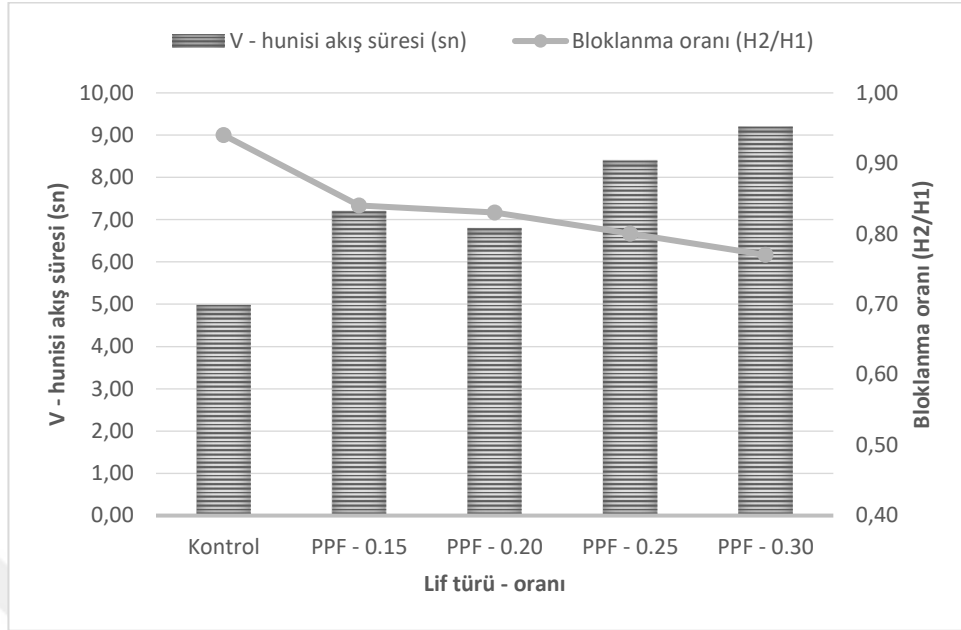


Şekil 4.6. Lifsiz ve bazalt lifli KYB karışımlarının V–hunisi ve bloklanma oranı sonuçları

Bazalt lifli KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerine ait sonuçları incelendiğinde, cam lifli KYB karışımlarına benzer şekilde V – hunisi deney sonuçları, süper akışkanlaştırıcı miktarındaki artışlardan kaynaklı olarak kontrol betonuna göre çok farklılık göstermemiştir. Bazalt lifli karışımların tümü, V – hunisi deney sonuçlarına göre standartta belirtilen VF1 sınıfını, bloklanma oranında ise PA2 sınıfını temsil etmişlerdir. Kontrol numunesine oranla, bazalt lifli serilerin V – hunisi akış süresinde %28 ile %75 oranları arasında artış, bloklanma oranlarında ise %4 ile %14 arasında azalma tespit edilmiştir.

Rohilla *et al.* (2016), bazalt ve cam lifli KYB karışım serilerinin taze beton özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, %0,25 ve %0,30 oranında cam lif ilaveli karışımların bloklanma oranlarını sırasıyla 0,82 ve 0,70, bazalt lifli karışımların ise 0,68 ve 0,59 olarak tespit etmişlerdir.

Polipropilen lif ilaveli karışımlara ait V – hunisi akış süresi ve bloklanma oranı sonuçları Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Lifsiz ve polipropilen lifli KYB karışımlarının V–hunisi ve bloklanma oranı sonuçları

Polipropilen lif ilaveli kendiliğinden yerleşen betona ait V – hunisi ve L – kutusu deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde ise, bazı lif oranlarında artış olmasına rağmen V – hunisi süresinde azalma olmuştur. Bu durum, kimyasal katkı miktarının sabit bir değerde kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. V – hunisi akış süresi bakımından, hacimce %0,15, %0,20 ve %0,25 oranında lif kullanılan seriler VF1 sınıfını, %0,30 oranında lif kullanılan seri ise VF2 sınıfını temsil etmiştir. Lifli karışım serilerinin bloklanma oranları incelendiği zaman ise, %0,15, %0,20 ve %0,25 lif oranlı karışımlar PA2 sınıfı olarak kaydedilmiştir. Ancak hacimce %0,30 oranında lif kullanılan seri EFNARC (2005)’de belirtilen sınır değerler dışında kaldığı tespit edilmiştir. PPF – 0.15, PPF – 0.20, PPF – 0.25 ve PPF - 0.30 serilerinin V – hunisi akış süresinde, kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %45, %37, %69 ve %85 oranlarında artış tespit edilirken, bloklanma oranlarında ise, sırasıyla, %11, %12, %15 ve %18 oranlarında azalma gözlenmiştir.

Beigi *et al.* (2013) çalışmalarında, hacimce %0,20 ve %0,30 oranında cam lif kullandıkları KYB karışım serilerinin bloklanma oranını sırasıyla 0,80 ve 0,77 olarak belirlemişlerdir. Aynı çalışmada hacimce %0,20 polipropilen lif kullanılan karışımlarda

ise bu oranın 0,70 olduğu sonucuna varılmıştır. Polipropilen lifli normal betonun, taze beton ve mekanik özelliklerinin araştıran Jiang *et al.* (2014), %0,30 oranında lif kullanılması durumunda betonun çökme değerinde %68 oranında azalma olduğu sonucuna varmışlardır.

Sonuç olarak, lifli KYB karışımlarının taze beton özelliklerinin incelenmesi neticesinde, PPF – 0.30 karışım kodlu serinin bloklanma oranı haricinde, tüm deneysel veriler EFNARC (2005)’de belirtilen sınır değerleri sağlamıştır. V – hunisi akış süreleri açısından en iyi sonuçlar cam lifli karışım serilerinde elde edilmiştir. Bu durum, GF serilerinde hedeflenen çökme – yayılma çapı değerlerini elde etmek için kullanılan kimyasal katkı miktarındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Lifli karışımlarda, en düşük akış süresi GF – 0.15 serisinde elde edilirken, en yüksek akış süresi PPF – 0.30 serisinde elde edilmiştir. Bloklanma oranı sonuçlarında ise, bazalt ve cam lifli serilerde yaklaşık aynı oranlar tespit edilirken, polipropilen lifli serilerde en düşük bloklanma oranları gözlemlenmiştir.

4.3. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Tez alışması kapsamında, hazırlanan lifli KYB karışım serilerinin mekanik özelliklerini belirlemek üzere basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe direnci ve kırılma enerjisi deneyleri yapılmıştır.

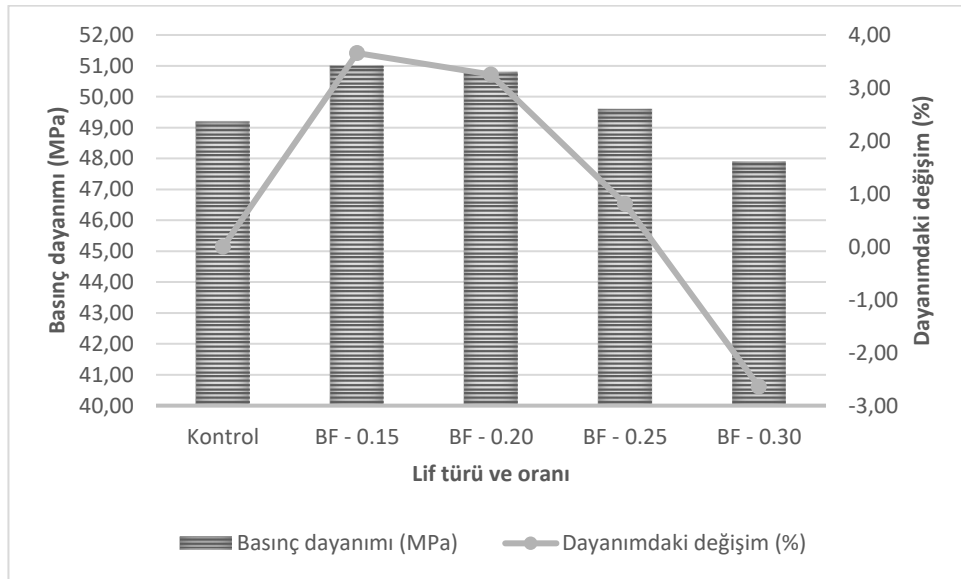
4.3.1. Basınç dayanımı sonuçları

Bazalt, cam ve polipropilen lifli karışım serilerinin basınç dayanımı değerleri toplu bir şekilde izelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. KYB karışımlarına ait basınç dayanımı deney sonuçları

Karışım kodu	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanımdaki değişim (%)
Kontrol	49,20	
BF – 0.15	51,00	3,66
BF – 0.20	50,80	3,25
BF – 0.25	49,60	0,81
BF – 0.30	47,90	-2,64
GF – 0.15	49,80	1,22
GF – 0.20	49,26	0,12
GF – 0.25	48,73	-0,96
GF – 0.30	47,79	-2,87
PPF – 0.15	51,10	3,86
PPF – 0.20	50,50	2,64
PPF – 0.25	49,80	1,22
PPF – 0.30	48,30	-1,83

Bazalt lif kullanılan karışımlara ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

**Şekil 4.8.** Bazalt lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri

Basınç dayanımındaki değişim incelendiğinde, bazalt lifli KYB karışımlarında kontrol karışımına oranla -%2,64 ile %3,66 oranlarında değişim gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 51,00 MPa'lık değerle %0,15 oranında bazalt lif kullanılan KYB karışımında tespit edilmiştir. Bazalt lif kullanım oranı %0,15 değerini geçtikten sonra basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Lif oranı %0,25 olan karışım, %0,15 bazalt lif kullanılan karışıma göre basınç dayanımında azalmalar olmasına rağmen yine de kontrol numunesine göre %0,81 oranında artış meydana gelmiştir. Bazalt lif oranı %0,30 değerine ulaştığında ise kontrol numunesine kıyasla %2,64 oranında basınç dayanımında azalma elde edilmiştir.

Jiang *et al.* (2014) çalışmalarında, %0,05, %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında bazalt lif kullanarak normal beton karışımlar hazırlamışlardır. Karışımları, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deneylerine tabi tutmuşlardır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri, %0,05, %0,1, %0,3 ve %0,5 oranları için kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %3,66, %4,68, %2,62 ve -%0,18 oranlarında değişimler elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri %0,1 oranında bazalt lif kullanılan karışımında elde edilirken, lif oranı %0,5 değerine ulaştığında ise kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Normal betonda bazalt lif ilavesinin, betonun mekanik özellikleri üzerine etkisi Arslan (2016) tarafından incelenmiştir. 0,5, 1, 2, 3 kg/m³ miktarlarında bazalt lif ilave edilen karışımların basınç dayanımları araştırılmıştır. Kontrol numunesine kıyasla 3 kg/m³ (yaklaşık olarak %0,1) lif kullanılan karışımların basınç dayanımında, kontrol numunesine oranla %7,25 oranında artış meydana gelmiştir.

Dias and Thaumaturgo (2005), bazalt lifinin %0,5'lik hacim oranında ilave edilmesinin, 28 günlük basınç dayanımında %3,9'luk bir azalmaya neden olduğunu bildirmişlerdir. Zhang vd (2018), hacim olarak %0,1, %0,2 ve %0,3 oranlarında bazalt lif kullanarak normal beton karışımları hazırlamışlardır. Kontrol karışımına oranla, en yüksek basınç dayanımı %4,7 artış ile %0,1 oranında lif kullanılan karışımında elde edilmiştir. Hacim olarak %0,30 oranında bazalt lif kullanılan karışımında ise %4,1 oranında azalma olmuştur. Jun and Ye (2010), geleneksel beton için %0,1'lik bazalt lif içeriğine sahip olan karışımlardan maksimum basınç dayanımı elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Bahsedilen çalışmaların aksine, Kabay (2014) çalışmasında betona 2 kg/m^3 ve 4 kg/m^3 bazalt lif ilavesinin, basınç dayanımını sırasıyla %9,90 ve %17,90 oranında azalmalar meydana getirdiği sonucuna varmıştır.

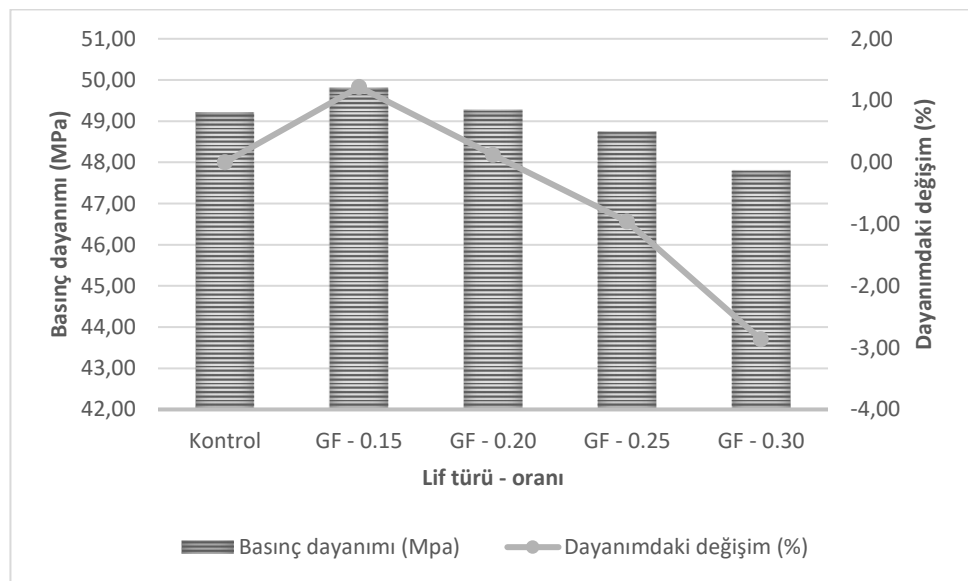
Hem bu tez çalışması kapsamında hem de geçmiş çalışmalara bakıldığı zaman bazalt lif kullanılan beton karışımlarının basınç dayanımlarında önemli bir değişim görülmemiştir. Sonuç olarak, kullanılan bazalt lif oranı %0,15’de en yüksek basınç dayanım değeri elde edilirken, lif oranı %0,15 değerinden sonra basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir. Lif oranı %0,30 oranına ulaştığında ise kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında azalma gözlenmiştir.

Lif oranı arttıkça dayanımdaki azalma, bazalt liflerin bazı sentetik liflere oranla daha sert olması ve lif oranı arttıkça karışımlarda daha fazla sayıda lif bulunmasının çimento matrisindeki gözeneklilikte artışa sebep olması ile liflerin zamanla çimento matrisinden sıyrılmasından kaynaklı olabileceği yargısına varılmıştır. Jiang *et al.* (2014) çalışmalarında, gözenekliliği tespit etmek için, %0,30 oranında bazalt lif kullanılan beton karışım numuneleri üzerinde civa porozimetresi deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, %0,30 oranında bazalt lif kullanılan 28 günlük karışımların, kontrol numunesine kıyasla, toplam boşluk hacminde %11,80 ve toplam porozitesinde ise %7,93 oranında artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, deney sonrası küp numunelerin incelenmesi neticesinde, numunelerde çok sayıda açık dikey çatlak olmadan, kırılmadan sonra bile iyi bir görünüm vermiştir (Şekil 4.9). Ayrıca, basınç işlemi sırasında lifler, betonun yanal genişlemesini kısıtlamış ve kırılmayı geciktirmiştir.



Şekil 4.9. Bazalt lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü

Cam lif kullanılan karışımlara ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.10'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Cam lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri

Cam lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımındaki değişim incelendiğinde, kontrol karışımına kıyasla -%2,87 ile %1,22 oranları arasında değişim gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 49,80 MPa'lık değerle %0,15 oranında cam lif kullanılan KYB karışımında olduğu tespit edilmiştir. Cam lif kullanım oranı %0,15 değerini geçtikten sonra basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Lif oranı %0,20 olan karışım, %0,15 cam lif kullanılan karışıma göre basınç dayanımında azalma olmasına rağmen, yinede kontrol numunesine göre %0,12 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Cam lif oranı %0,25 ve %0,30 değerine ulaştığında ise kontrol numunesine kıyasla %0,96 ve %2,97 oranında basınç dayanımında azalmalar elde edilmiştir.

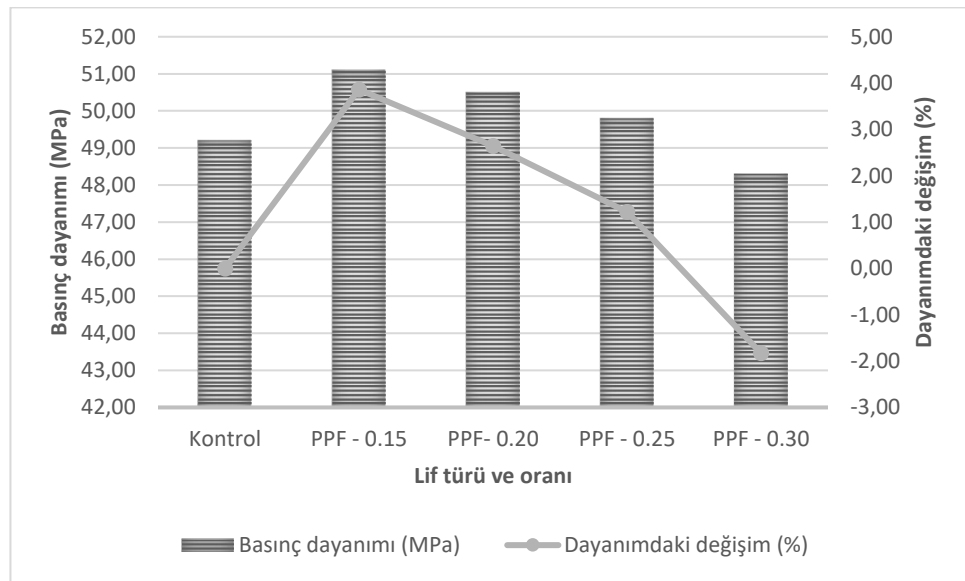
Arslan (2016) çalışmasında, 3 kg/m^3 (yaklaşık %0,1) cam lif ile hazırladığı normal beton karışımının basınç dayanımının, referans betonuna kıyasla %1,30 oranında azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca aynı çalışmada, lifli betonun SEM analizi yapılmış ve cam lifli beton karışımların topaklaşma eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Jena vd (2018)'nin KYB üzerinde cam lif etkisinin araştırıldığı çalışmalarında, betona hacimce %0,30 oranında cam lif ilavesinin basınç dayanımını %4,30 oranında azaldığı sonucuna varmışlardır.

Normal betonda bazalt ve cam lif kullanımının, betonun mekanik özellikleri üzerine etkisi Kızılkant vd (2015) tarafından incelenmiştir. %0,25 oranında lif ilavesinin basınç dayanımında önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %0,25'ten daha yüksek lif dozajının kullanılması halinde, basınç dayanımında hafif bir artışa neden olduğu bildirilmiştir. Cam lifli beton numunelerin deney sonrası görünümü Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Cam lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü

Polipropilen lifli KYB karışımlarının, basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ise, kontrol karışımına oranla -%1,83 ile %3,86 oranlarında değişim gözlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri

51,10 MPa'lık değerle, %0,15 oranında polipropilen lif kullanılan KYB karışımında en yüksek basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Polipropilen lif kullanım oranı %0,15 değerini geçtikten sonra basınç dayanımlarında azalmalar görölmüştür. Lif oranı %0,20 ve %0,25 olan karışımlar, %0,15 lif kullanılan karışıma göre basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Basınç dayanımında %0,15 oranında lif kullanılan karışıma göre azalma olsa da, kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %2,64 ve %1,22 oranlarında artış meydana gelmiştir. Polipropilen lif oranı %0,30 değerine ulaştığında ise kontrol numunesine kıyasla %1,83 oranında basınç dayanımında azalma elde edilmiştir.

Jiang *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada, hacimce %0,05, %0,10 ve %0,30 oranlarında polipropilen lif kullanılarak beton karışımlar hazırlanmıştır. Beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre, kontrol numunesine göre %4,48 oranında artışla en yüksek basınç dayanımı değeri %0,10 oranında lif kullanılan beton karışımında elde edilmiştir. Kullanılan lif oranı %0,30 değerine ulaştığında ise kontrol betonuna kıyasla dayanımda %1,64 oranında artış meydana gelmiştir. Aynı çalışmada hem bazalt lif hem de polipropilen lif kullanılan karışım betonlarında, lif oranının %0,05'i aşması ile 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde, kontrol numunesine oranla azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, lif kullanımının zamana bağlı olarak betonda boşluk oranını arttırdığı yargısına varılabilir. Li *et al.* (2004), normal betonun basınç dayanımının, 0.91 kg/m³ polipropilen lif içeriğinin mevcudiyetinde ortalama %2,10 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Kendiliğinden yerleşen hafif betonunun mekanik özellikleri üzerine polipropilen liflerin etkisi Mazaheripour *et al.* (2011) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada %0,10, %0,20 ve %0,30 oranında polipropilen lif kullanılmış olup, %0,30 lif kullanılan karışımın dayanımında, kontrol betonuna kıyasla %2,85 oranında azalma gözlenmiştir. Komlos *et al.* (1995) polipropilen liflerinin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir. Diğer yandan, Banthia and Soleimani (2005), polipropilen lif içeren beton karışımların basınç dayanımında, kontrol betonuna kıyasla %13 oranında bir azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Nili and Afrouhsabet (2010) incelemelerinde, 12 mm uzunluğunda ve hacimce %0,20, %0,30 ve %0,50 oranında polipropilen lif kullanarak beton karışımlar kazırlamışlardır. Karışımlar üzerinde basınç dayanımı deneyi tatbik edilmiş olup; lif oranlarına göre sırasıyla %2,50, %6,65 ve %11,60 oranlarında dayanımda artış elde etmişlerdir.

Polipropilen liflerin, bazalt ve cam liflere oranla daha elastik yapıda olması sayesinde, polipropilen lifler beton içinde agrega ile daha uyumlu bir şekilde yerleşebilmektedir. Bu sayede hem beton içindeki boşluk miktarı azalmakta, hem de beton – lif aderansı artmaktadır. Ayrıca polipropilen lifli KYB karışımlarının gözlemsel olarak incelenmesi neticesinde, liflerin daha homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı basınç altında, betonun yanal şekil değiştirmesi kısıtlanmış ve daha sünek bir kırılma gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, çok sayıda açık dikey çatlak olmadan, kırılmadan sonra bazalt ve cam lifli betonlara oranla daha iyi bir görünüm elde edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Polipropilen lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü

Bazalt, cam ve polipropilen lifli KYB karışımların basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, liflerin düşük oranlarda dayanım artışına, yüksek oranlarda ise dayanım kaybına yol açtığı tespit edilmiştir. Cam lif kullanılan karışımlara kıyasla, aynı lif hacim

oranlarının tümünde, bazalt ve polipropilen lif kullanılan KYB karışımlarının daha yüksek basınç dayanımı değerleri verdiği gözlenmiştir.

Bazalt ve polipropilen lif katkılı KYB karışımlarında, lif oranının hacimce %0,30 değerine ulaşmasından sonra basınç dayanımları, kontrol betonuna kıyasla düşüş görülmüştür. Bu durum, lif kullanımının artması ile beton içerisinde boşluk oranının artması, lif topaklaşması ve liflerin çimento hamurundan sıyrılması ile anlatılabilmektedir. Jiang *et al.* (2014) çalışmalarında, bazalt ve polipropilen lifli beton karışımların SEM görüntülerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, betonun erken yaşlarında lif ve çimento matrisi arasında iyi bir bağ olduğunu, ancak 28 günden sonra, lifler ve matris arasında boşluk oluştuğu ve çimento hamurunun arayüz tabakasının oldukça gevşediğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada anlaşılabileceği üzere, lif oranının artması ile çimento matrisi ve lifler arasında bir ayrışmanın meydana gelebilme olasılığının arttığı, bu durumda boşluk oranını arttırabileceği ve lif – matris arasında sıyrılmaya neden olabileceği yargısına varılabilir. Bu nedenle, betonun belli bir yaştan sonra basınç dayanımında azalmalar olabileceği düşünülebilir.

Bazalt ve cam lifli betonların basınç dayanımları karşılaştırıldığı zaman, bazalt lifin elastisite modulünün yüksek olması nedeniyle, cam life oranla daha yüksek basınç dayanım değerleri göstermesi olasıdır. Ancak polipropilen lifin, cam life oranla daha iyi basınç dayanımı değerleri vermesi kullanılan liflerin mekanik özellikleri ile tezat oluşturmaktadır. KYB karışımlarında kullanılan lif özelliklerinin ne olduğundan ziyade, ana temel malzeme olan betonla etkileşimine göre davranış göstermektedir. Kullanılan lifin çimento matrisi ile aderansı, homojen dağılımı, yükleme düzlemine olan lif yönelmesi ve boşluk oluşturma gibi nedenlerden kaynaklı olarak betonun davranış şekli değişmektedir. Arslan (2016) çalışmasında, 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ oranlarında cam lif kullanarak hazırladığı normal beton karışımlarının SEM görüntülerini incelemiştir. Sonuç olarak, cam lif kullanılan serilerde topaklaşma görülmüş, bu durumda boşluk oranını arttırmıştır. Ayrıca cam ve polipropilen lif ilavesinin, normal beton karışımlarının üzerine etkisi Simoes *et al.* (2018) tarafından incelenmiştir. Sonuç olarak, lif oranı arttıkça cam

lifli serilerde boşluk oranının arttığı, bunun aksine polipropilen lifli serilerde ise azaldığı tespit edilmiştir.

Polipropilen lif kullanılan karışımlarda lif içeriğinin artmasıyla boşluk oranının azalmasının muhtemel nedeni, polipropilen liflerin, daha sert olan cam liflere oranla yüksek esnekliğidir. KYB karışımlarının hazırlanması sırasında, polipropilen liflerin boşluklara kolayca yerleşmesi olasıdır. Bunun aksine cam lifin daha sert olması ve kolayca kıvrılamamasından dolayı boşluk oranı artar ve kendiliğinden yerleşen betonun özelliği gereği ek titreşime gerek olmamasından dolayı, KYB’lerde bu durum dahada belirginleşir.

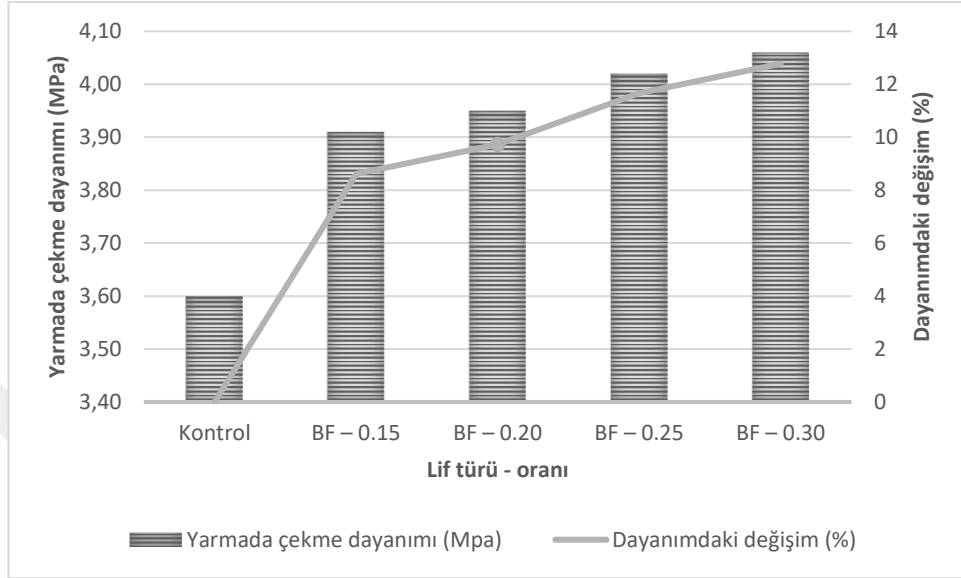
4.3.2. Yarmada çekme deneyi sonuçları

Karışım serilerine ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Karışım kodu	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Dayanımdaki değişim (%)
Kontrol	3,60	
BF – 0.15	3,91	8,61
BF – 0.20	3,95	9,72
BF – 0.25	4,02	11,67
BF – 0.30	4,06	12,78
GF – 0.15	3,86	7,22
GF – 0.20	3,93	9,17
GF – 0.25	3,99	10,83
GF – 0.30	3,91	8,61
PPF – 0.15	3,76	4,44
PPF – 0.20	3,82	6,11
PPF – 0.25	3,90	8,33
PPF – 0.30	4,02	11,66

Bazalt lif kullanılan karışımlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 4.14’de sunulmuştur.



Şekil 4.14. Bazalt lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri

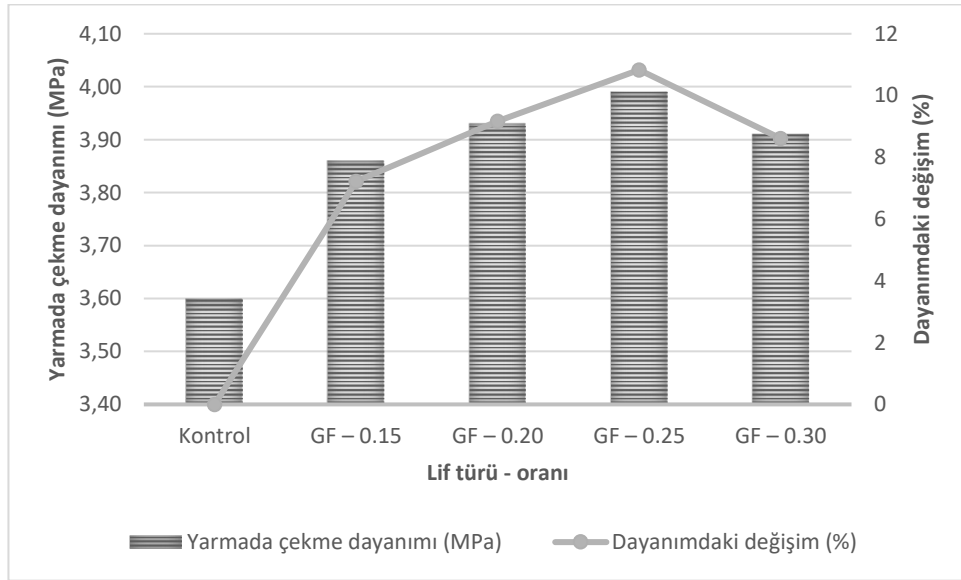
KYB karışımlarında kullanılan bazalt lif oranı arttıkça, yarmada çekme dayanımları da artmıştır. Kontrol numunesine kıyasla hacimce %0,15 oranında lif kullanılan karışımda yarmada çekme dayanımında belirgin oranda artış olurken, lif oranının artması ile bu artış oranı azalmıştır. Lif içeriği arttıkça, bazalt lif ilaveli KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımları yaklaşık %8,61–12,78 oranında artmıştır. En yüksek yarmada çekme dayanımı, kontrol numunesine kıyasla %12,78 oranında artış ile BF – 0.30 serisinde gözlenmiştir.

Önceki çalışmalar, liflerin betona ilave edilmesinin yarmada çekme dayanımında önemli bir artışa neden olduğunu bildirmiştir. Jiang *et al.* (2014) çalışmasında, bazalt lif içeriğinin artışı ile, yarmada çekme dayanımında %14,08–24,34 oranlarında artış olduğunu tespit etmişlerdir. Bazalt lif ilaveli KYB karışımların özellikleri üzerine inceleme yapan Algın ve Özen (2018), lif oranının hacimce %0,1 ile %0,5 arasında değişmesi durumunda, yarmada çekme dayanımlarının, referans betonuna kıyasla %6,02 – 8,76 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca aynı çalışmada lif boyunun artması

ile yarmada çekme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Arslan (2016) tarafından yapılan çalışmada, $0,5 \text{ kg/m}^3$ artışlarla, $0,5\text{--}3,0 \text{ kg/m}^3$ miktarlarında bazalt lif kullanmış ve %5,47–10,13 oranları arasında yarmada çekme dayanımının arttığını gözlemlemiştir. Kızılkant vd (2014), %0,25 oranında bazalt lif kullanımının, betonun yarmada çekme dayanımını yaklaşık olarak %10 oranında arttırdığını çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Bazalt lifin eklenmesi, mikro çatlakların yayılmasını kısıtlayacak bir şekilde lif köprülemesi sağlamış ve makro çatlakların gelişimini ertelemiştir. Bu durumda, yarmada çekme dayanımlarının artmasına neden olmuştur.

KYB karışımlarında cam lif oranı arttıkça, kontrol numunesine kıyasla yarmada çekme dayanımları artmıştır. Yarmada çekme dayanımlarında %7,22 ile %10,83 arasında artış meydana gelmiştir. Kullanılan cam lif oranı hacimce %0,30 değerine ulaştığında yarmada çekme dayanımında azalma gözlenmiş, ancak yine de kontrol karışımına oranla yarmada çekme dayanımında artış tespit edilmiştir (Şekil 4.15).

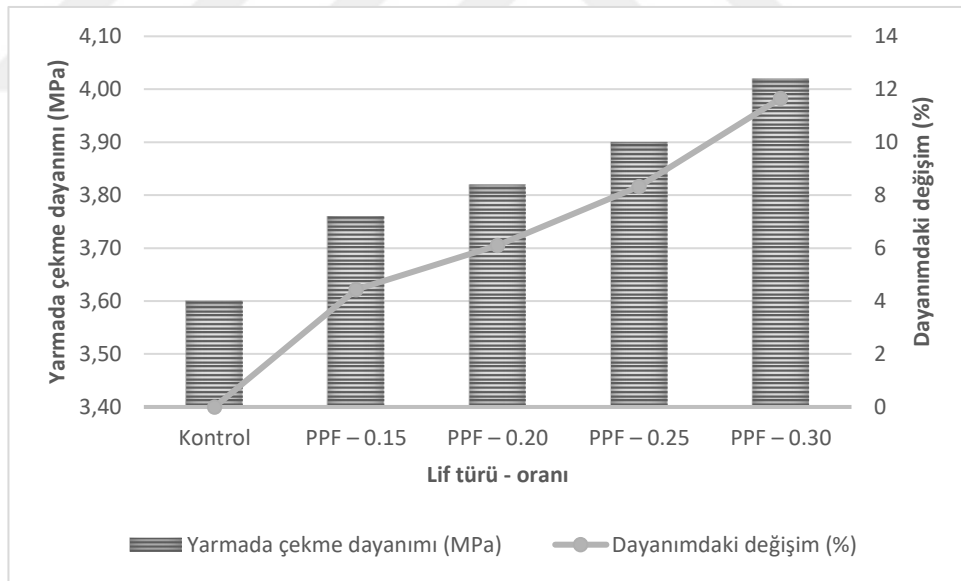


Şekil 4.15. Cam lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Arslan (2016), normal beton karışımları üzerinde cam lif kullanımının etkisini araştırdığı çalışmada, cam lif ilavesinin yarmada çekme dayanımını %9,30 oranında arttırdığını,

ancak 3 kg/m^3 miktarında cam lif kullanılan karışımlarda ise referans karışımına kıyasla dayanımda azalma olduğu belirtilmiştir. Kızılkant vd (2014) çalışmalarında, hacimce %0,25 oranında cam lif kullanımının, yarmada çekme dayanımını yaklaşık %15 civarında arttırdığını, bu orandan daha fazla miktarda lif kullanılan karışımlarda ise dayanımda belirgin bir artışın meydana gelmediği bildirilmiştir. Hacimce %0,20 oranında cam lif kullanımının KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımını %20,7 oranında arttırdığı, cam lif oranının hacimce %0,25 oranına ulaştığında ise kontrol numunesine oranla dayanımda %3,40 oranında azalma meydana geldiği Jena *et al.* (2018) tarafından rapor edilmiştir.

Polipropilen lifli KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Sonuçların incelenmesi neticesinde, polipropilen lif kullanılan karışımlarda %4,44 - %11,66 oranları arasında dayanımda değişim meydana gelmiştir. Polipropilen lifin hacimce %0, %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30 oranlarında kullanılması durumunda, sırasıyla 3,60, 3,76, 3,82, 3,90 ve 4,02 MPa yarmada çekme dayanımı değerleri elde

edilmiştir. Bazalt ve cam lif kullanılan karışımlara kıyasla, hacimce %0,15 oranında polipropilen lif kullanılan karışımlarda lifsiz karışıma kıyasla daha az bir oranda artış olmasına rağmen, lif oranının artması ile artış daha belirgin bir duruma gelmiştir. Bu durum, polipropilen lifin mekanik özelliklerinden ziyade, cam ve bazalt life oranla daha esnek olmasından dolayı, lif oranı arttıkça fazla oranda boşluk oluşturmaması ve beton ile aderansının daha kuvvetli olmasından kaynaklanmakta olduğu düşünülebilir.

Song *et al.* (2005) tarafından yapılan çalışmada, $0,6 \text{ kg/m}^3$ polipropilen ve naylon lif kullanılan karışımların yarmada çekme dayanımları, lifsiz betona kıyasla sırasıyla %9,7 ve %17,1 arttığı bildirilmiştir. Afroughsabet ve Özbakkaloğlu (2015) çalışmalarında, hacimce %0,15 ve %0,30 oranında polipropilen lif kullanılarak hazırlanan beton karışımların, referans betonuna göre, sırasıyla %13 ve %16 oranında yarmada çekme dayanımında artış gözlemlemişlerdir. Hacimce %0,5 oranında polipropilen lifli beton karışımların mekanik özellikleri Sivakumar and Santhanam (2007) tarafından incelenmiş olup; sonuç olarak yarmada çekme dayanımında %7,3 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Nili and Afroughsabet (2010), %0,20, %0,30 ve %0,50 oranında polipropilen lif kullandıkları beton numunelerde, %8, %14 ve %14 oranlarında artış rapor etmişlerdir.

Lifli KYB karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde, lif oranındaki artış ile birlikte tüm karışımlarda kontrol numunesine kıyasla dayanımında artış meydana gelmiş olup; en yüksek yarmada çekme dayanımı BF – 0.30 serisinde elde edilmiştir. Bazalt ve cam lifli karışım serilerinde, hacimce %0,15 oranında lif kullanılması durumunda kontrol numunesine kıyasla dayanımında belirgin bir artış elde edilmiş, fakat lif oranının %0,15 değerini aşmasından sonra bu artış oranı azalmıştır. Öyleki GF – 0.30 serili karışımın yarmada çekme dayanımında, GF – 0.25 serisine göre azalma olduğu tespit edilmiştir. Polipropilen lifli karışımlarda ise, hacimce %0,15 oranında kullanılması durumunda, bazalt ve cam lif kadar belirgin bir artış olmamasına rağmen, lif oranı arttıkça diğer lif türlerine kıyasla daha fazla artış meydana gelmiştir. Smarzewski (2019) çalışmasında, %1 oranında bazalt ve polipropilen lif kullanılarak hazırlanan normal beton karışımlarında, polipropilen lifli karışım serisinde çok daha yüksek yarmada çekme dayanımı elde etmiştir. Bu durumdaki, polipropilen liflerin daha

büyük çaplarına ve kullanılan lif sayısındaki fazlalıktan kaynaklı olarak, çok daha verimli bir şekilde mikro çatlakları köprülemesine bağlamıştır.

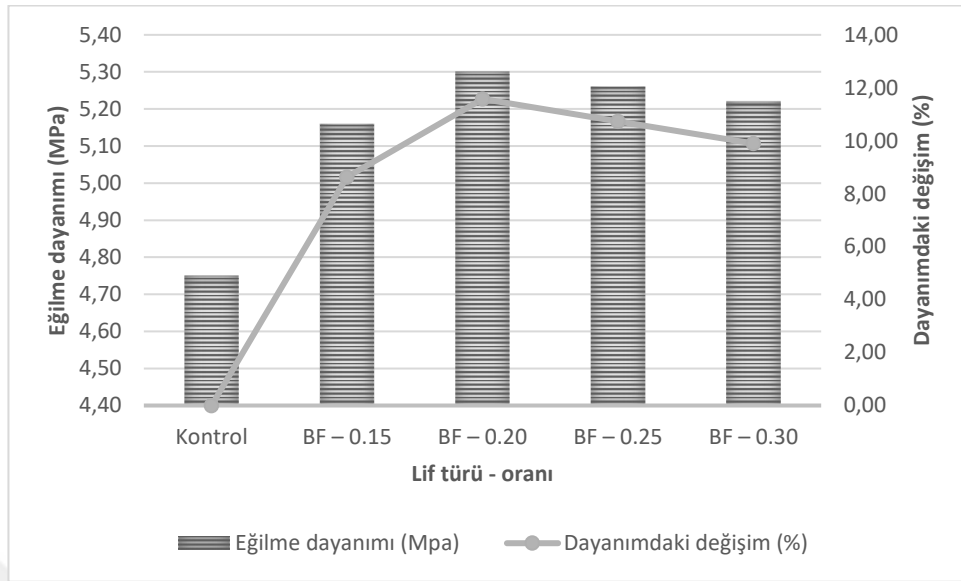
4.3.3. Eğilme dayanımı ve tokluk indislerinin belirlenmesi

Lifli KYB serilerinin eğilme dayanımı, 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik numuneler üzerinde yapılan deney ile belirlenmiştir. Deney sırasında kiriş numuneler orta noktasına deplasman ölçer yerleştirilmiş ve böylelikle numunelerin yük – yer değiştirme eğrileride elde edilmiştir. Yük – yer değiştirme eğrileri kullanılarak ASTM C 1609 standardına göre her bir serinin tokluk indisleri belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır. Karışım serilerine ait eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

Çizelge 4.4. KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı deney sonuçları

Karışım kodu	Eğilme dayanımı (MPa)	Dayanımdaki değişim (%)
Kontrol	4,75	
BF – 0.15	5,16	8,63
BF – 0.20	5,30	11,58
BF – 0.25	5,26	10,74
BF – 0.30	5,22	9,89
GF – 0.15	5,10	7,37
GF – 0.20	5,21	9,68
GF – 0.25	5,26	10,74
GF – 0.30	5,18	9,05
PPF – 0.15	5,08	6,95
PPF – 0.20	5,14	8,21
PPF – 0.25	5,23	10,11
PPF – 0.30	5,28	11,16

Bazalt lif kullanılan karışımlara ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.17’de sunulmuştur.



Şekil 4.17. Bazalt lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri

Çalışma kapsamında, bazalt lif kullanımının belli bir oranına kadar eğilme dayanımında artış meydana gelmiş olup; belli bir orandan sonra azalmaya başlamıştır. En yüksek eğilme dayanımı BF - 0.20 serisinde elde edilmiştir. BF - 0.25 ve BF - 0.30 serilerinde ise eğilme dayanımında azalmalar olmasına rağmen, kontrol numunesine kıyasla yinede daha yüksektir. Kontrol numunesine göre, bazalt lif kullanılan serilerde %8,63 - %11,58 oranları arasında artış tespit edilmiştir.

Branston *et al.* (2016) çalışmalarında 36 mm çaplarında 4, 8 ve 12 kg/m³ miktarında bazalt lif kullanarak beton karışımlar hazırlamışlar ve lif miktarına göre eğilme dayanımında sırasıyla %8,40 - %16,05 - %21,72 oranlarında artış elde etmişlerdir. Bazalt lif kullanımının betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi, Jun ve Ye (2010) tarafından, 30 mm uzunluğa ve %0,1-0,35 oranında lif içeriği kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, artan lif içeriği ile betonun eğilme dayanımının arttığını ve %0,3 oranında bazalt lif kullanılan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı değerinin elde edildiğini göstermektedir. Jiang *et al.* (2014), %0,05 - %0,10 - %0,3 ve %0,5 oranında, 12 mm uzunluğunda bazalt lif kullandıkları çalışmalarında, %0,30 oranında lif kullanılan karışımın eğilme dayanımının, kontrol karışımına kıyasla %9,58 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada, %0,5 oranında lif kullanımının ise dayanımda düşüşe neden

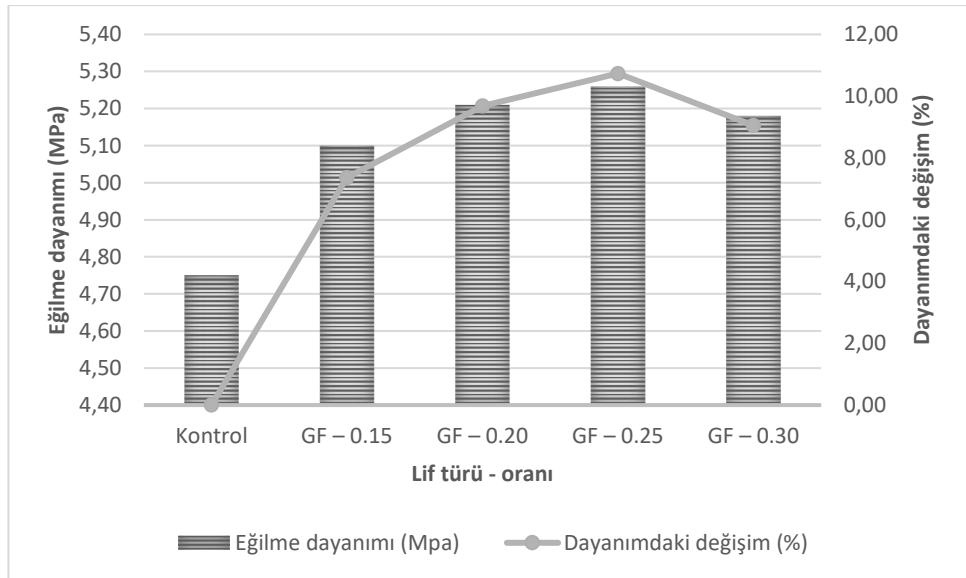
olduğu belirtilmiştir. Ancak, Algın ve Özen (2018) araştırmasında, %0,5 bazalt lif oranının betonun eğilme dayanımını azaltmadığını ve kontrol karışımına kıyasla %16 oranında arttırdığını tespit etmişlerdir. Kabay (2014) çalışmasında, normal beton karışımlarına 2 ve 4 kg/m³ (hacimce yaklaşık %0,07 ve %0,14) miktarlarında bazalt lif eklemiş ve %10,3 oranında eğilme dayanımında artış elde etmiştir. Belirtilen çalışmaların aksine, yüksek dayanımlı beton üzerinde bazalt lifin etkisi Zhang *et al.* (2018) tarafından incelenmiş, hacimce %0,1 oranında lif kullanılması durumunda en yüksek eğilme dayanımı değerinin elde edildiği, %0,2 ve %0,3 oranlarında ise dayanımda belirgin bir değişimin olmadığı belirtilmiştir. Arslan (2016) çalışmasında, 2 kg/m³ (yaklaşık hacimce %0,07) miktarında lif kullanılması durumunda en yüksek eğilme dayanımının elde edildiğini belirtmiş, lif miktarının 3 kg/m³ (yaklaşık hacimce %0,1) olması durumunda ise dayanımda azalmalar olduğunu tespit etmiştir.

Önceki çalışmalar ile bu tez çalışması sonuçlarının incelenmesi neticesinde, belli bir orana kadar lif kullanımı, betonun eğilme dayanımında artış sağlamaktadır. Ancak lif kullanım oranındaki artışlar dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Bu durum önceki çalışmalarda, bazalt lif kullanımındaki artış neticesinde betonda boşluk oranının artmasına ve bazalt lifin az da olsa çimento hamurundan sıyrılmasına bağlanmıştır. Ayrıca kullanılan lif çaplarının çok ince olmasında (yaklaşık 13 – 20 µm), eğilme dayanımında çok önemli farklılığın olmamasındaki etkisi gözardı edilemez. Bazalt lifli serilerin eğilme dayanım deneyi sonrası görüntüleri Şekil 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.18. Bazalt lifli serilerin deney sonrası görünüşleri

Cam lif kullanılarak hazırlanan KYB karışım serilerine ait eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.19. Cam lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri

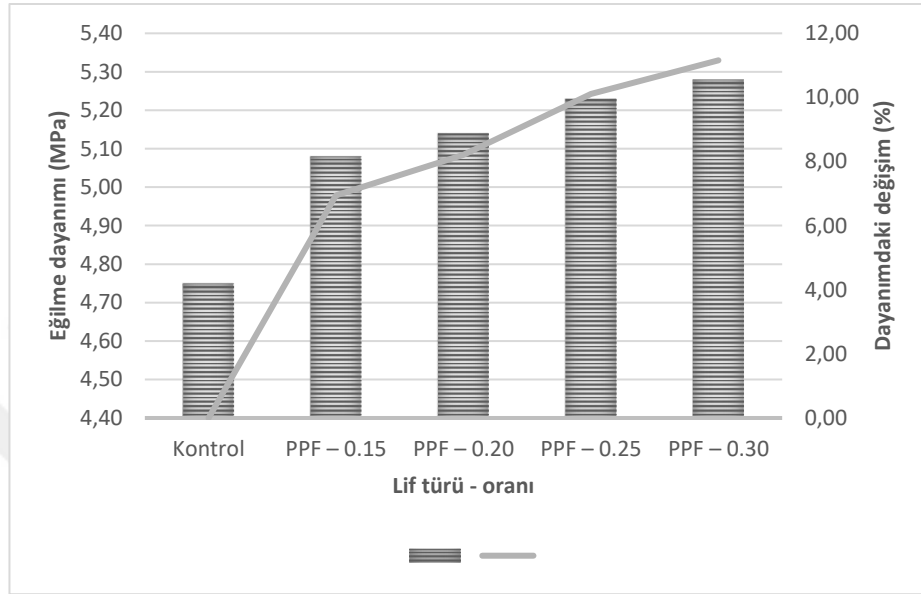
Cam lif kullanılan KYB karışım serilerinde en yüksek eğilme dayanımı GF – 0.25 serisinde elde edilmiştir. GF – 0.30 serisinde ise eğilme dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bütün serilerde eğilme dayanımı kontrol numunesine kıyasla daha yüksektir. Kontrol numunesine göre, cam lif kullanılan serilerde %7,37 - %10,74 oranları arasında artış tespit edilmiştir.

Arslan (2016) çalışmasında, 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ cam lif kullanarak hazırladığı normal beton karışımlarda en yüksek eğilme dayanımını 1 kg/m³'lük seride elde etmiştir. Cam lif miktarı 3 kg/m³ (yaklaşık %0,11) lük seride eğilme dayanımında kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %6 oranında azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Çalışmalarında cam lif kullanarak hazırladıkları karışım betonlarının eğilme dayanımını inceleyen Kızılkant vd (2014), %0,25 oranında cam lif kullandıkları serilerde, yaklaşık olarak %30 oranında dayanımında artış tespit etmişlerdir. Jena *et al.* (2018), %0,10, %0,15, %0,20, %0,25 ve %0,30 oranlarında cam lif kullanarak hazırladıkları KYB karışımlarının eğilme dayanımı sonuçlarının incelenmesi neticesinde; en yüksek eğilme dayanımı %0,20 oranında cam lif kullanılan serilerde elde edilmiştir. Aynı çalışmada %0,25 ve %0,30 cam lif kullanılan serilerde, eğilme dayanımları, kontrol numunesine oranla yüksek olmasına rağmen dayanımında düşüş tespit edilmiştir. Cam lifli serilerin eğilme dayanım deneyi sonrası görüntüleri Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.20. Cam lifli serilerin deney sonrası görüntüleri

Polipropilen lifli KYB serilerinin tümünde, cam ve bazalt lif kullanılan karışım serilerinin aksine, eğilme dayanımı değerlerinde sürekli bir artış gözlenmiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Polipropilen lifli KYB karışımlarına ait eğilme dayanımı değerleri

Kontrol numunesine oranla, polipropilen lif kullanılan karışım serilerinde %6,95 - %11,16 oranları arasında artış gözlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı değeri PPF - 0.30 serisinde elde edilirken, en düşük dayanım değeri ise PPF - 0.15 serisinde tespit edilmiştir.

Jiang *et al.* (2014) çalışmalarında, %0,1, %0,2 ve %0,3 oranlarında polipropilen lif kullanarak normal beton karışımlar hazırlamışlardır. Lifli karışımları eğilme deneyine tabi tutmuşlar ve %3,94 - %6,96 oranlarında dayanımda artış elde etmişlerdir. Nili ve Afroughsabet (2010), %0,30 oranında polipropilen lif kullandıkları beton karışımlarında %11,60 oranında artış olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Kendiliğinden yerleşen polipropilen lifli hafif beton karışımların mekanik özellikleri Mazaheripour *et al.* (2011) tarafından incelenmiş ve %0,1, %0,2 ve %0,3 oranlarında lif kullanımı ile sırasıyla %4,93, %8,64 ve %10,70 oranlarında eğilme dayanımında artış tespit etmişlerdir.

Polipropilen lifli KYB karışımlarının deney sonrası görünümü Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

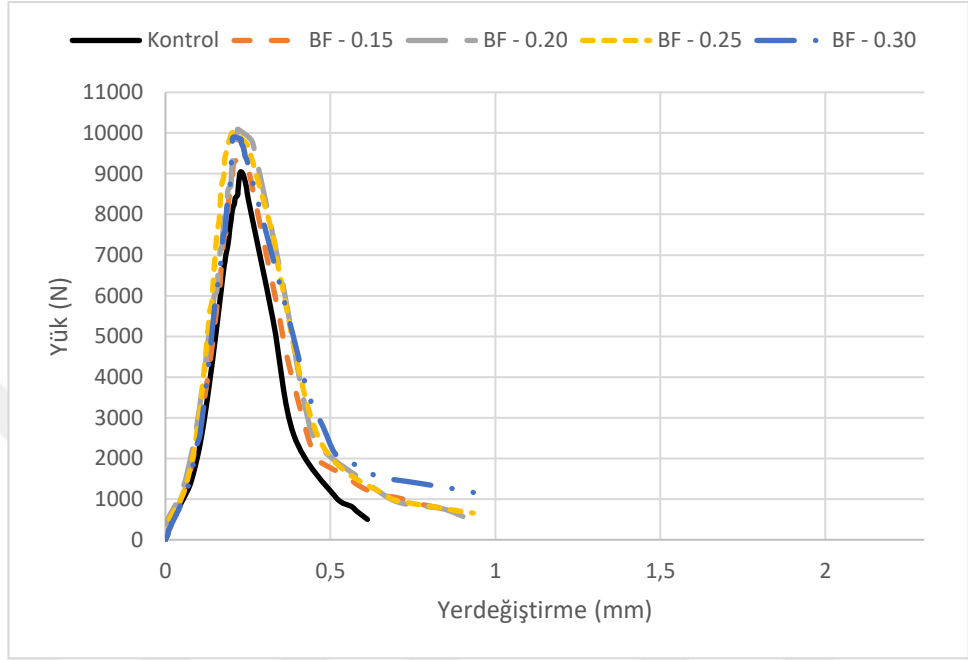


Şekil 4.22. Polipropilen lifli serilerin deney sonrası görünümleri

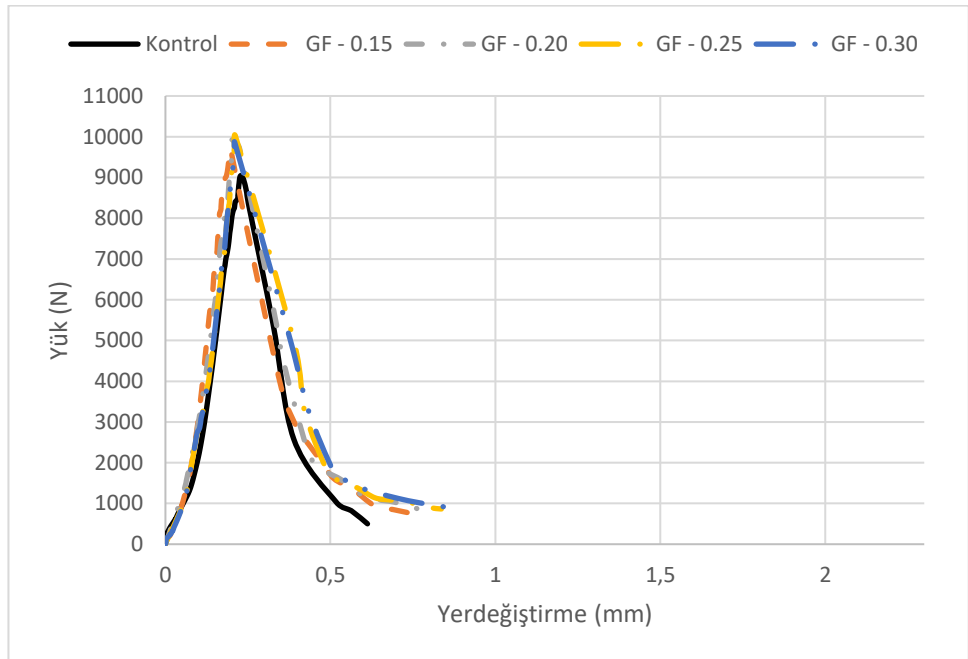
Tüm lifli KYB karışımların, eğilme dayanımı deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde, en yüksek dayanım BF – 0.20 serisinde elde edilmiştir. Lifli KYB karışım serilerinin tamamının eğilme dayanımlarında, kontrol numunesine kıyasla artış gözlenmiştir. Bazalt lifli serilerde %0,20, cam lifli serilerde ise %0,25 oranından sonra dayanımda azalmalar tespit edilmiştir. Ancak bunların aksine, polipropilen lifli serilerde sürekli bir artış elde edilmiştir. Bu durum, polipropilen lifin, cam ve bazalt life oranla daha esnek olmasından kaynaklı olarak betonda daha az boşluk oluşturması ve çimento hamuru ile daha iyi bir aderansa sahip olabileceği durumuyla ilişkilendirilebilir.

Lifsiz ve lifli KYB karışımlarının eğilme dayanımının yanında, yük – yerdeğiştirme eğrileri elde edilerek, karışımların ASTM C 1609’a göre tokluk indisleri belirlenmiştir. Test, L/150 (2,30 mm) toplam yerdeğiştirme gerçekleşene veya uygulanan yükleme işlemi sonucunda numuneler kırılana kadar devam ettirilmiştir. Bazalt ve cam lifli karışımların yük-yerdeğiştirme eğrisi incelendiğinde, pik yük sonrası eğilme yükünde

hızlı bir şekilde azalma olduğu (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24) ve numunelerin gevrek bir davranış göstererek iki parçaya ayrıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.23. Bazalt lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri



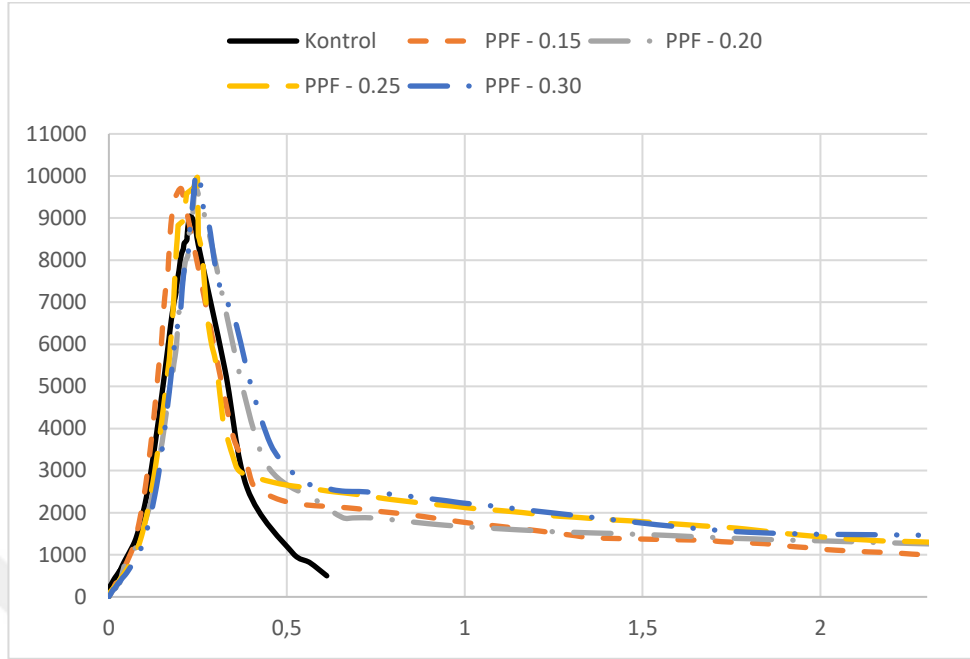
Şekil 4.24. Cam lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri

Test edilen BF ve GF serilerinin hiçbirisi amaçlanan azami yerdeğiştirmeye ulaşamamıştır. Kırılma sonrası incelenen bazalt ve cam lifli deney numunelerinde, kullanılan lif dozajlarının tümünde lifler belirgin bir uzama yapmadan kopmuştur. Bu durum, numune enkesitlerinde görünür liflerin olmamasının nedeni olarak açıklanabilir. Sonuç olarak, pik yük sonrası davranışın başarısız olmasının kanıtı olarak da düşünülebilir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. BF- 0.30 serisinin eğilme dayanım deneyi sonrası görünümü

Polipropilen lif kullanılan karışım serilerine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.26. Polipropilen lifli serilerin yük – yerdeğiştirme eğrileri

Polipropilen lifli seriler, BF ve GF serilerine göre farklı bir pik yük sonrası davranış göstermişlerdir. PPF serilerinde, ASTM C 1609'a göre amaçlanan yerdeğiştirmeye ulaşılmıştır. Yük-yerdeğiştirme eğrisi, pik yüke kadar yaklaşık olarak doğrusaldı, ardından yaklaşık 2 kN'luk bir yüke stabilize olan yük taşıma kapasitesinde, başlangıçta hızlı bir düşüş olmuştur. Bu yük seviyesi daha sonra yaklaşık 1,0 mm'lik bir yerdeğiştirmeden, testin tamamlandığı 2,30 mm'lik bir yerdeğiştirmeye kadar küçük bir azalma ile sürdürülmüştür. BF ve GF serilerinin aksine, PPF serilerinde kırılma sonrası görülebilir lifler gözlenmiş (Şekil 4.27) ve daha sünek bir kırılma meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. PPF- 0.30 serisinin eğilme dayanım deneyi sonrası görünümü

ASTM C 1609'a göre, eğilme yükü ve enerji emilimi iki ana değerlendirme indeksidir. İlk tepe yük, pik yük, artık yük ve bunlara karşılık gelen dayanımlar ve $L/150$ (L , mesnet açıklığı) gibi belirli bir yerdeğiştirmeye kadar, yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alan tokluk indeksinin tahmini için tavsiye edilir. Bu çalışmada, lifli karışımların tokluk davranışını değerlendirmede, pik yük (P_p), pik yükte net yerdeğiştirme (δ_p), $L/600$ 'de kalan yük ($P_{L/600}$), $L/150$ 'de kalan yük ($P_{L/150}$), $L/600$ 'e kadar yük-yerdeğiştirme eğrisi altındaki alan ($T_{L/600}$) ve $L/150$ 'ye kadar yük-yerdeğiştirme eğrisi altındaki alan ($T_{L/150}$) indeksleri belirlenmiştir.

Tüm karışımlara ait tokluk indisi değerleri Çizelge 4.5'de sunulmuştur. Çizelge 4.5'in incelenmesi sonucunda, BF ve GF serilerinin hiçbirisinde amaçlanan yerdeğiştirmeye ($L/150$) ulaşılammıştır. Her iki lif türündede pik yük sonrası yükte hızlıca bir düşüş gözlenmiş ve numuneler gevrek bir kırılma göstermiştir. BF ve GF serilerinin $T_{L/150}$ değerlerinde sırasıyla, kontrol numunesine kıyasla %29 - %54 ve %17 - %36 arasındaki oranlarda artış gözlenmiştir. BF ve GF serilerinin tümünde, pik yükteki yerdeğiştirmenin kontrol numunesine kıyasla düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, bazalt ve cam lif kullanımının, eğilme dayanımı ve elastisite modülü üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu kanıtlamıştır.

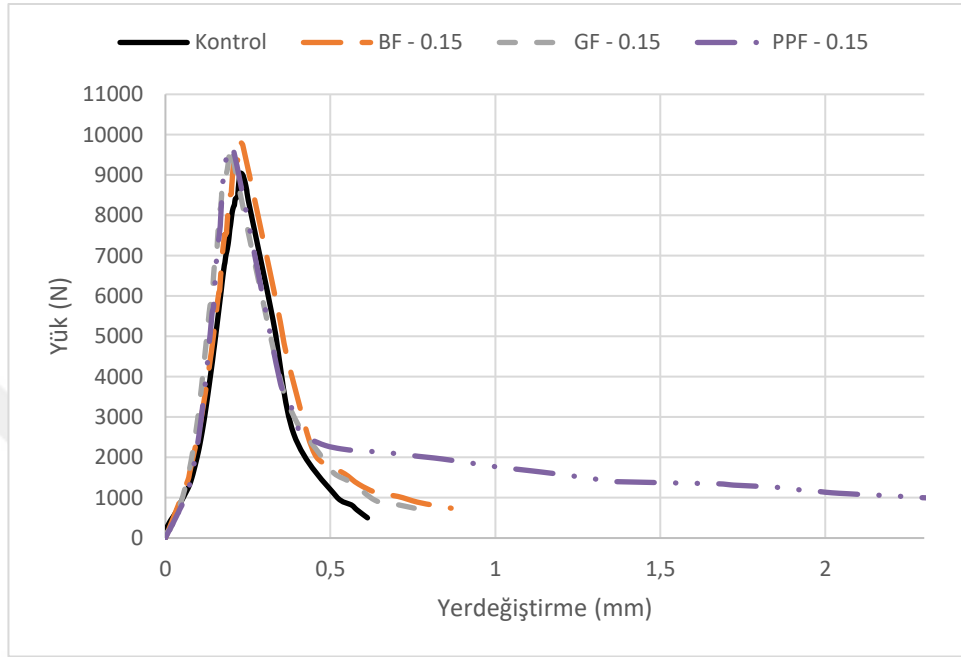
Çizelge 4.5. Lifli karışımlara ait tokluk indisleri

Karışım Kodu	P_p (kN)	δ_p (mm)	$P_{L/600}$ (kN)	$P_{L/150}$ (kN)	$T_{L/600}$ (kN mm)	$T_{L/150}$ (kN mm)
Kontrol	9,05	0,228	0,70	0	2,08	2,11
BF – 0.15	9,83	0,223	1,33	0	2,44	2,72
BF – 0.20	10,09	0,219	1,54	0	2,77	3,08
BF – 0.25	10,02	0,203	1,76	0	2,87	3,21
BF – 0.30	9,90	0,208	1,78	0	2,70	3,25
GF – 0.15	9,71	0,197	1,27	0	2,30	2,48
GF – 0.20	9,92	0,202	1,29	0	2,42	2,66
GF – 0.25	10,02	0,212	1,38	0	2,50	2,82
GF – 0.30	9,86	0,209	1,42	0	2,58	2,87
PPF – 0.15	9,67	0,205	2,17	0,99	2,34	4,92
PPF – 0.20	9,79	0,243	2,31	1,26	2,50	5,14
PPF – 0.25	9,96	0,249	2,56	1,30	2,20	5,38
PPF – 0.30	10,05	0,253	2,64	1,46	2,60	5,76

PPF serilerinde ise, BF ve GF serilerinin aksine amaçlanan yerdeğiştirme değerine ulaşılmıştır. Kontrol numunesine kıyasla $T_{L/150}$ değerinde, %133 ile %172 arasında artış tespit edilmiştir. PPF serileri çatlama sonrası sünek bir davranış sergiledi ve 2,30 mm'lik ($L/150$) yerdeğiştirmede pik yükün %10,24 -%14,52 arasında artık yük kapasitesine sahip olmuştur.

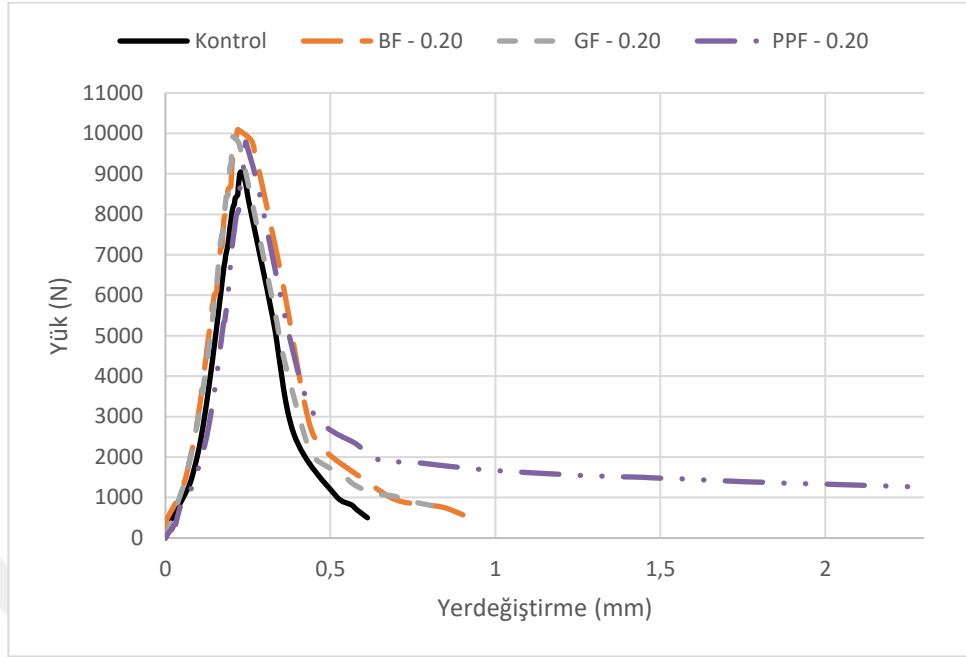
Kontrol, BF-0.15, GF-0.15 ve PPF-0.15 serilerine ait yük – yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.28'de sunulmuştur. Bu karışım serilerinin $P_{L/600}$ ve $T_{L/150}$ değerlerinde sırasıyla, %90 ve %29, %81 ve %18, %210 ve %133 oranlarında kontrol numunesine kıyasla artış

gözlenmiştir. PPF-0.15 serisinin $T_{L/150}$ değerinde, BF-0.15 ve GF-0.15 serilerine göre, sırasıyla %80,88 ve %98,38 oranlarında artış belirlenmiştir.

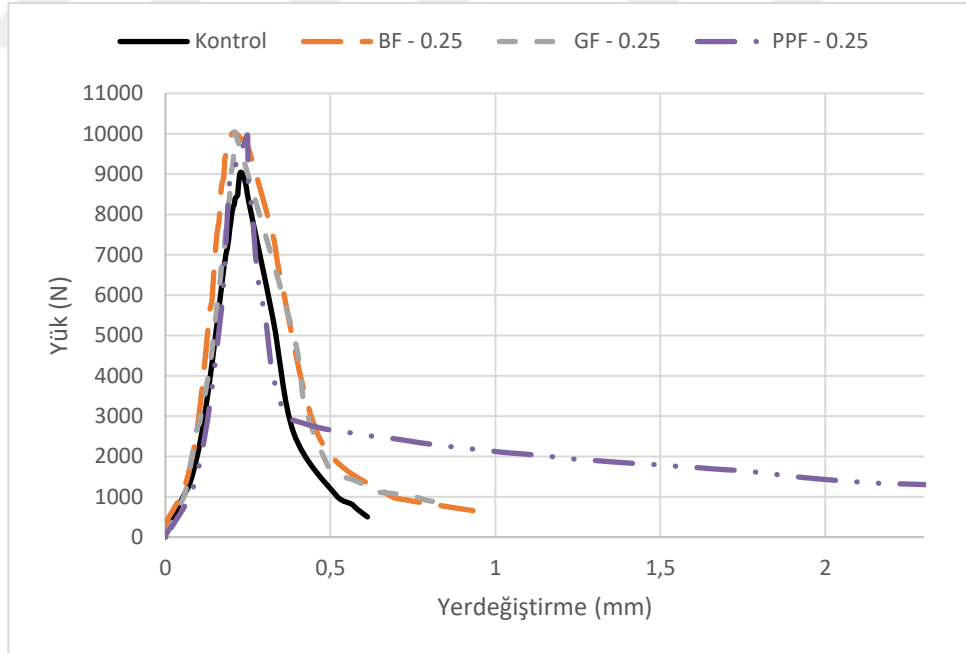


Şekil 4.28. Kontrol, BF-0.15, GF-0.15 ve PPF-0.15 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri

BF-0.20, GF-0.20 ve PPF-0.20 serilerinde $P_{L/600}$ ve $T_{L/150}$ değerlerinde sırasıyla, %120 ve %46, %84 ve %26, %230 ve %144, BF-0.25, GF-0.25 ve PPF-0.25 serilerinin $P_{L/600}$ ve $T_{L/150}$ değerlerinde ise sırasıyla, %151 ve %52, %97 ve %34, %266 ve %155 oranlarında kontrol numunesine kıyasla artış tespit edilmiştir (Şekil 4.29 ve Şekil 4.30). PPF-0.20 serisinin $T_{L/150}$ değerinde, BF-0.20 ve GF-0.20 serilerine göre sırasıyla %67 ve %93, PPF-0.25 serisinin $T_{L/150}$ değerinde ise, BF-0.25 ve GF-0.25 serilerine göre sırasıyla %68 ve %91 oranlarında artış gözlenmiştir.



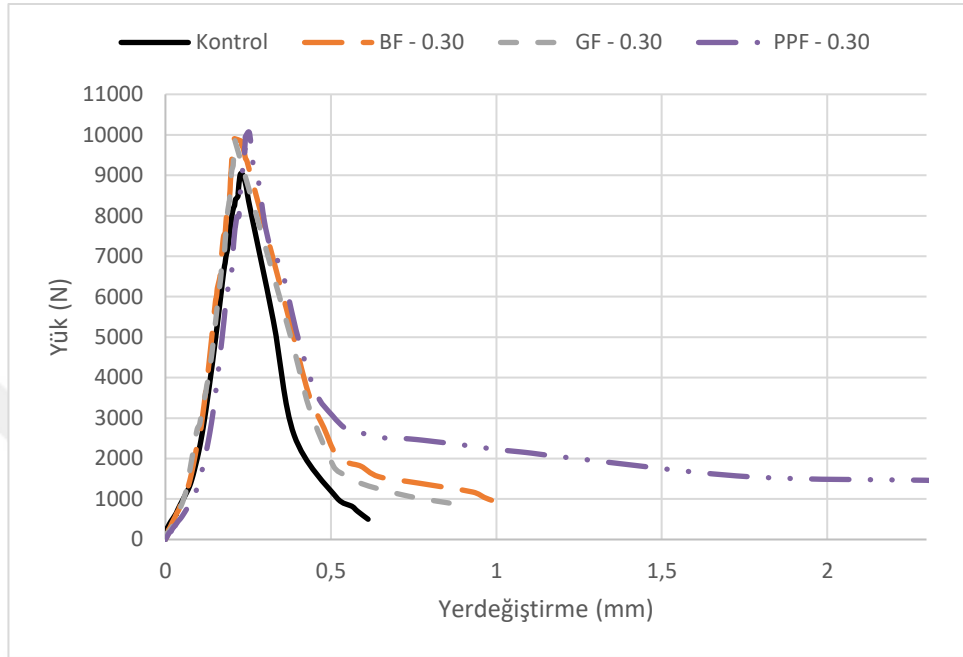
Şekil 4.29. Kontrol, BF-0.20, GF-0.20 ve PPF-0.20 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 4.30. Kontrol, BF-0.25, GF-0.25 ve PPF-0.25 serilerinin yük– yerdeğiştirme eğrileri

BF-0.30, GF-0.30 ve PPF-0.30 serilerinde $P_{L/600}$ ve $T_{L/150}$ değerlerinde sırasıyla, %154 ve %54, %103 ve %36, %277 ve %172 oranlarında kontrol numunesine kıyasla artış

meydana gelmiştir (Şekil 4.31). PPF-0.30 serisinin $T_{L/150}$ değerinde, BF-0.30 ve GF-0.30 serilerine göre sırasıyla %77,23 ve %100,70 oranlarında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.31. Kontrol, BF-0.30, GF-0.30 ve PPF-0.30 serilerinin yük–yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de de görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan lif türlerinin hiçbiri çatlama sonrası yükü arttıramamıştır. Tüm lif türleri, bir makro çatlak oluşumunu takiben yük taşıma kapasitesinde bir azalma göstermiştir. Çatlama sonrası pik yükü devam ettirme, çatlama sonrası uygulanan yükü sertleştirme veya arttırma yeteneği kullanılan lifin türüne, boyutlarına ve miktarına bağlıdır. Lifli betonların çoğunda, yüksek performanslı beton olarak adlandırılan lifli betonlar dışında, önemli bir çatlama sonrası gerilme sertleşmesi gözlenmez.

Bu tez kapsamında kullanılan liflerin sentetik ve mikro boyutta olması, lifli beton numunelerin sınırlı derecede çatlama sonrası dayanım ve tokluk kazanmasına sebep olmuşlardır. Ancak bazalt ve cam lifli karışımların, pik yük sonrası davranışlarının polipropilen liflere göre daha başarısız olması, lif özellikleri ile birlikte liflerin kopma uzamalarının düşük olmasından dolayı köprüleme yeteneklerini sağlayamadan, lif

kopmasıyla deneyin sonuçlandığı tespit edilmiştir. Bu durum, deney sonrası numunelerinin enkesitlerinde görünür lif olmaması ile ilişkilendirilebilir.

Branston *et al.* (2016) çalışmalarında, bazalt lifli karışımların gevrek davranışını, lifler arasındaki hidrasyon ürünlerinin büyümesinin, lif-matris bağlanma kuvvetini, liflerin gerilme kuvvetinin ötesine yükselterek, lifin yırtılmasıyla sonuçlanan başarısızlığa neden olduğu yargısına varmışlardır.

Pickel *et al.* (2018) araştırmalarında, bazalt, polipropilen ve çelik lif kullanarak hazırladıkları normal beton karışım numunelerinin tokluk indislerini incelemişlerdir. Bazalt lifli karışımların yük-yerdeğiştirme eğrilerinin, bir makro çatlakının oluşumuna karşılık gelen pik yüke kadar yaklaşık olarak doğrusal olduğu, çatlamadan sonra çok az bir kapasite sağladıklarını gözlemlemişlerdir. Tepe yük sonrası çok hızlı bir şekilde düşüş meydana geldiğini ve örneklerin hemen hemen başarısız olduğunu (yani iki parçaya ayrıldığı) tespit etmişlerdir. Test edilen örneklerin hiçbirisi 2,0 mm'lik hedef yerdeğiştirmeye ulaşamamıştır. Polipropilen ve çelik lifli karışımlarda ise hedeflenen yerdeğiştirmeye ulaşılarak deneyin tamamlandığını bildirmişlerdir. Polipropilen ve çelik lifli numunelerin $T_{L/150}$ değerlerinin bazalt life kıyasla sırasıyla %218 ve %408 oranlarında artış elde etmişlerdir. Branston *et al.* (2016) bazalt lifli normal betonun mekanik davranışını inceledikleri çalışmalarında, lif kullanımının eğilme dayanımını arttırdığını ancak buna karşın zayıf bir pik yük sonrası davranış sergilediklerini tespit etmişlerdir. Bu çalışmaların aksine Jiang *et al.* (2014) çalışmalarında, bazalt lif kullanılan betonların, kontrol betonuna kıyasla çok iyi tokluk sağladıkları sonucuna varmışlardır. Bazalt ve polipropilen lif kullanılan beton karışımların $T_{L/150}$ değerlerinde kontrol betonuna göre, sırasıyla %135,63 ve %69,5 oranlarında artış tespit etmişlerdir.

4.3.4. Darbe enerjisinin belirlenmesi

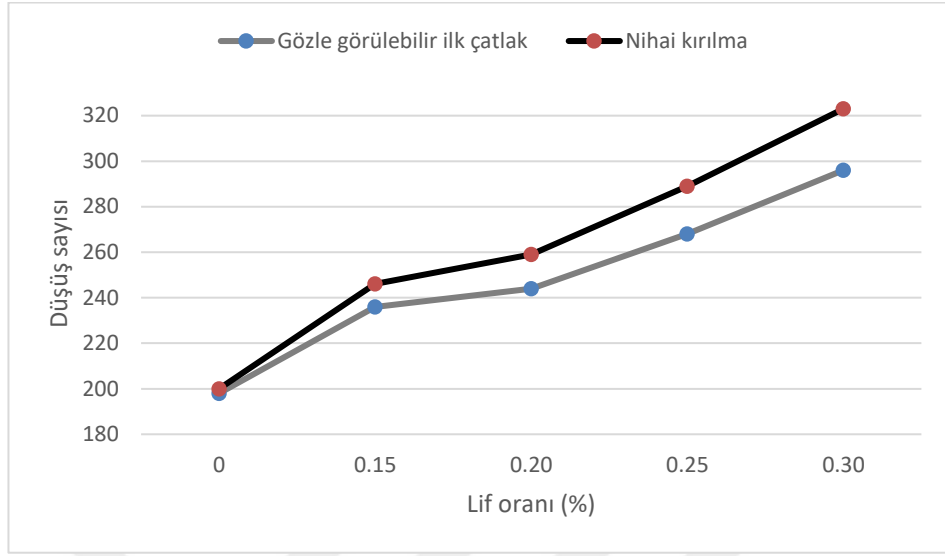
Tez çalışması kapsamında bazalt, cam ve polipropilen lifli KYB karışımlarının darbe enerjileri araştırılmıştır. Kontrol, BF, GF ve PPF serilerine ait darbe dayanımı performansları Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Çizelge 4.6'da gösterildiği üzere, N1, gözle

görülebilir ilk çatlağın oluştuğu düşüş sayısını, N2, kırılmanın meydana geldiği düşüş sayısını belirtmektedir. İlk çatlak ile kırılmanın meydana geldiği andaki darbe sayısındaki farkın yüzde olarak oranı ise N3 olarak gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. KYB karışım serilerine ait darbe dayanımı deney sonuçları

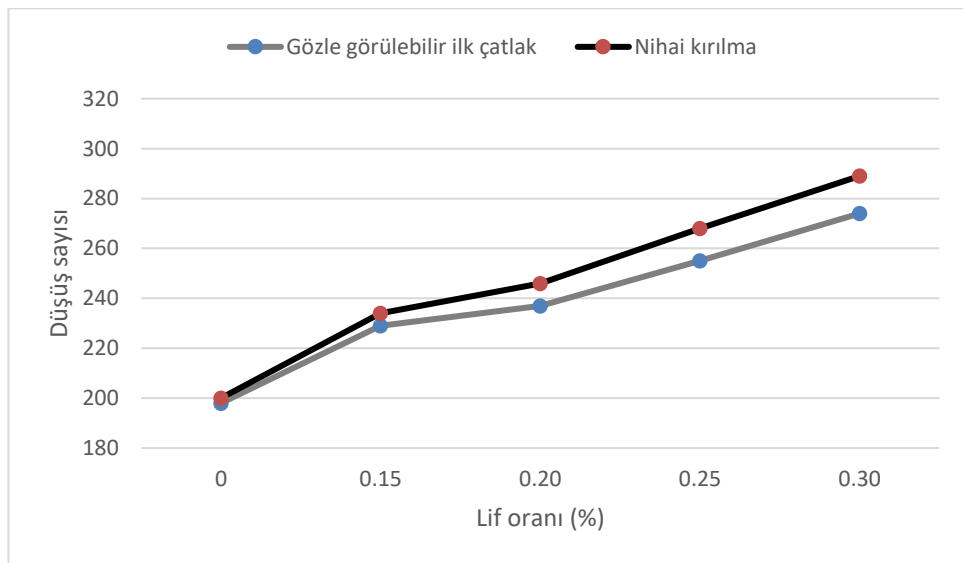
Karışım K.	Darbe sayısı		Darbe enerjisi (kN mm)		N3 (%)
	İlk çatlak (N1)	Kırılma (N2)	İlk çatlak	Kırılma	
Kontrol	198	200	3950,1	3990,0	1,01
BF-0.15	229	234	4568,6	4668,3	2,18
BF-0.20	237	246	4728,2	4907,7	3,80
BF-0.25	255	268	5087,3	5346,6	5,10
BF-0.30	274	289	5466,3	5765,6	5,47
GF-0.15	221	225	4409,0	4488,8	1,81
GF-0.20	235	242	4688,3	4827,9	2,98
GF-0.25	248	257	4947,6	5127,2	3,63
GF-0.30	272	282	5426,4	5625,9	3,68
PPF-0.15	236	246	4708,2	4907,7	4,24
PPF-0.20	244	259	4867,8	5167,1	6,15
PPF-0.25	268	289	5346,6	5765,6	7,84
PPF-0.30	296	323	5905,2	6443,9	9,12

Polipropilen lifli karışımların sonuçlarının incelenmesi neticesinde, PPF-0.15, PPF-0.20, PPF-0.25 ve PPF-0.30 serilerinde, kontrol numunesine kıyasla görünebilir ilk çatlağın meydana geldiği darbe sayılarında sırasıyla %19,2, %23,2, %35,4 ve %49,5, nihai kırılmada ise %23, %29,5, %44,5 ve %64,5 oranlarında artış tespit edilmiştir (Şekil 4.32). PPF serilerinde, gözle görülebilir ilk çatlak ile nihai kırılmanın gözlemlendiği darbe sayıları arasında %4,24 ile %9,12 arasında artış kaydedilmiştir. Lif oranı arttıkça ilk çatlaktan sonraki kırılma davranışı daha da süneleşmiştir.



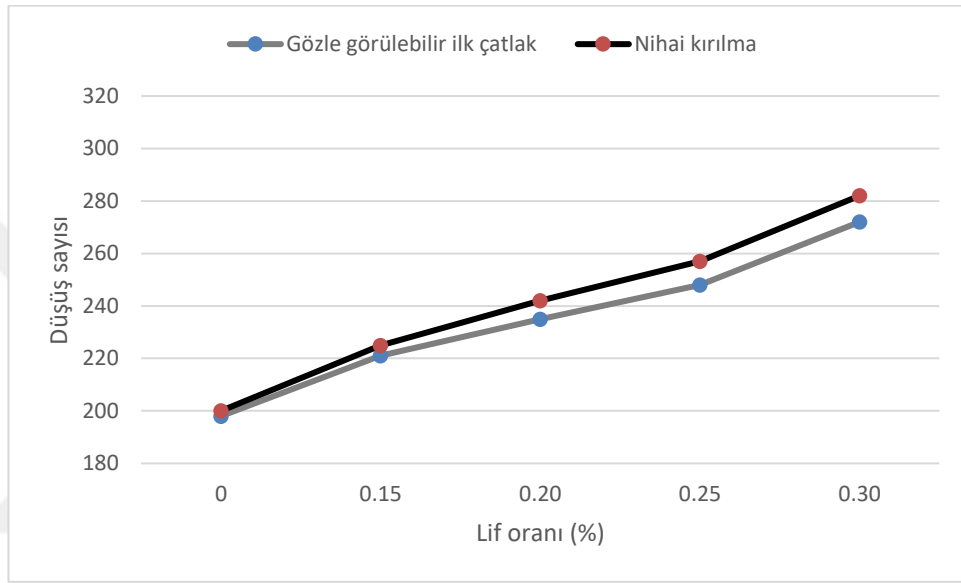
Şekil 4.32. Polipropilen lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları

Bazalt lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları Şekil 4.33’de sunulmuştur. Kontrol numunesine kıyasla, BF-0.15, BF-0.20, BF-0.25 ve BF-0.30 serilerinde, ilk çatlak ve nihai kırılmanın olduğu darbe sayılarında sırasıyla, %15,6 ve %17, %19,6 ve %23, %28,8 ve %34 ile %38,4 ve %44,5 oranlarında artış gözlenmiştir. BF serilerinde, gözle görülebilir ilk çatlak ile nihai kırılmanın gözlemlendiği darbe sayıları arasında %2,18 ile %5,47 arasında artış tespit edilmiştir.



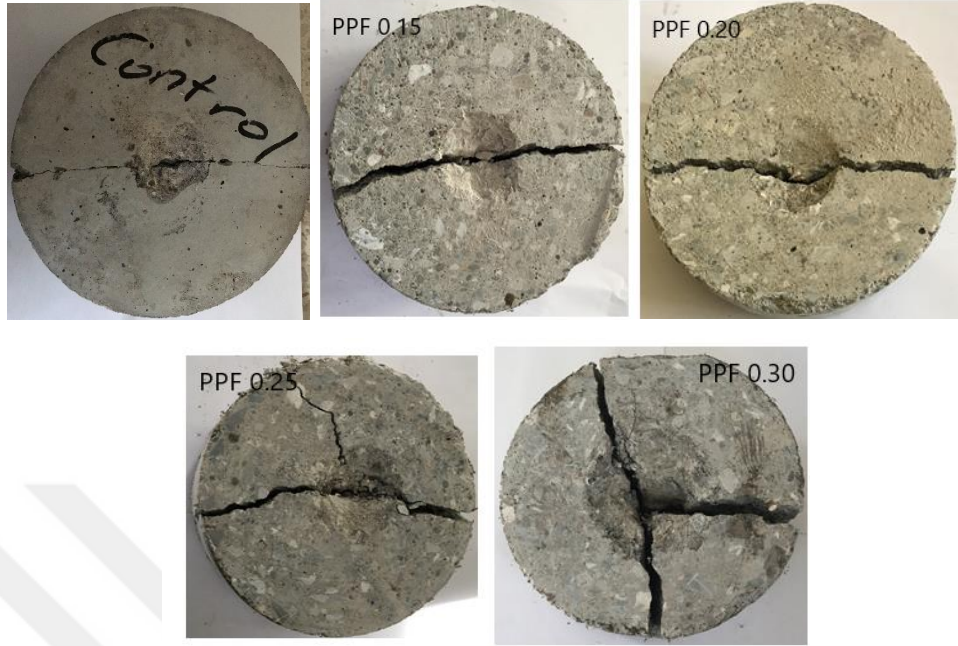
Şekil 4.33. Bazalt lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları

Cam lifli KYB karışım serilerinde, kontrol numunesine göre, ilk çatlak ve nihai kırılmanın olduğu darbe sayılarında sırasıyla %11,6 - %37,4 ile %12,5 - %41 arasında artış gözlenmiştir. GF serilerinde, gözle görülebilir ilk çatlak ile nihai kırılmanın gözlemlendiği darbe sayıları arasında %1,81 ile %3,68 arasında artış tespit edilmiştir. Cam lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları Şekil 4.34’de sunulmuştur.

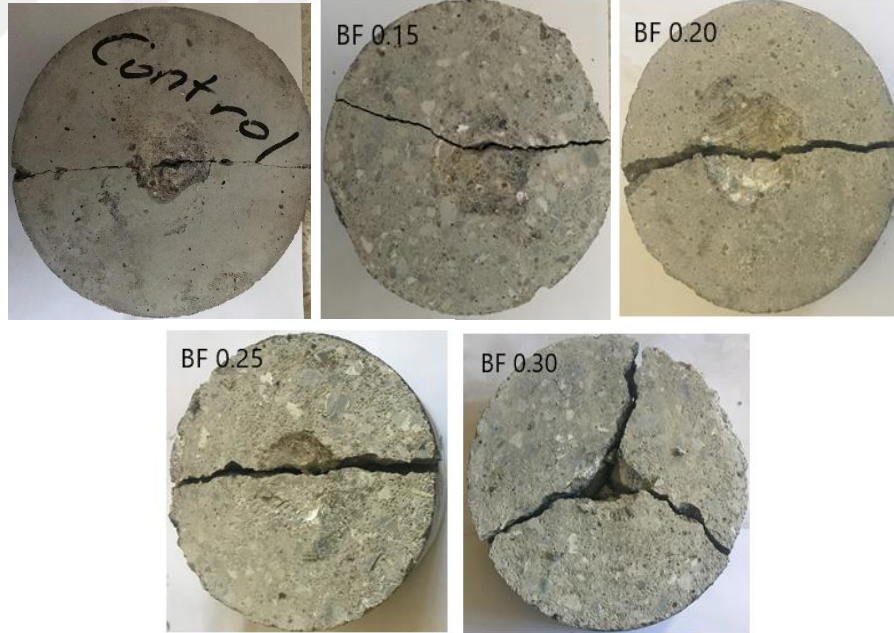


Şekil 4.34. Cam lifli serilere ait darbe direnci deney sonuçları

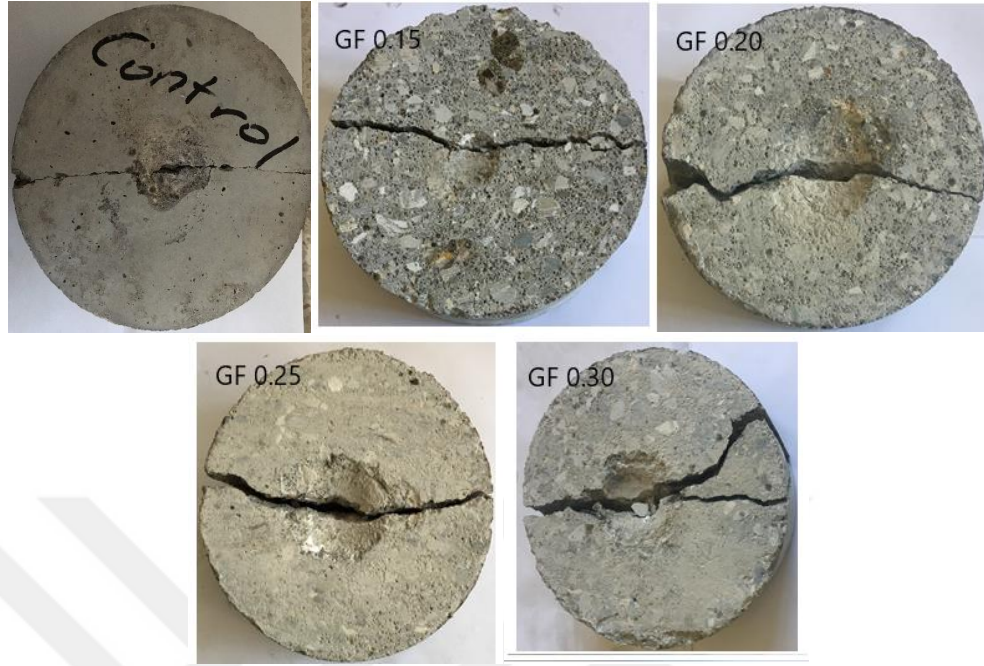
PPF, BF ve GF serilerine ait, darbe deneyi sonrası disk numuneler üzerinde oluşan çatlak düzenleri sırasıyla Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Lif oranının arttırılmasıyla daha düzgün ve daha fazla sayıda çatlak oluşmuştur. Bu durum da darbeli yüke maruz kalan KYB karışımlarında, lif kullanımının faydalı etkiler gösterdiği sonucuna varılabilir. Lifli örneklerde, darbe yükü altında sünek bir kırılma gözlenmiştir.



Şekil 4.35. PPF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri



Şekil 4.36. BF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri



Şekil 4.37. GF serilerine ait darbe direnci deneyi sonrası çatlak düzenleri

Çizelge 4.6’da gösterildiği üzere, kullanılan lif hacim oranlarının arttırılması, ilk çatlak sonrası kırılma darbelerinin sayısını sürekli olarak arttırdığı, kaydedilen azami sayının 27 darbe ile PPF-0.30 serisinde görülmüştür. Gözle görülebilir ilk çatlak ve nihai çatlak durumları için darbe enerjisi hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, nihai çatlak durumundaki darbe enerjisi 3990 kN.mm ile 6443,9 kN.mm arasında değişmiştir. En az ve en yüksek darbe enerjisi değerleri sırasıyla, kontrol ve PPF-0.30 serilerinde elde edilmiştir.

Nili ve Afroughsabet (2010) çalışmalarında, 12 mm uzunluğunda, %0,2, %0,3 ve %0,5 oranlarında polipropilen lif kullanarak normal beton karışımlar hazırlamışlardır. %0,3 ve %0,5 oranında polipropilen lif kullanılan karışımların nihai kırılmadaki darbe sayısı, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %28 ve %50,8 oranlarında artış göstermiştir. Aynı lif oranlarında, ilk çatlak sonrası kırılma darbelerinde ise sırasıyla, %5 ve %12,1 civarında artış tespit edilmiştir. Geri dönüştürülmüş karbon lifli beton karışımların darbe enerjisi üzerine Mastali *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada 30 mm uzunluğunda, %2 oranında lif kullanılması durumunda, darbe enerjisinin %429 oranında arttığını belirtmişlerdir.

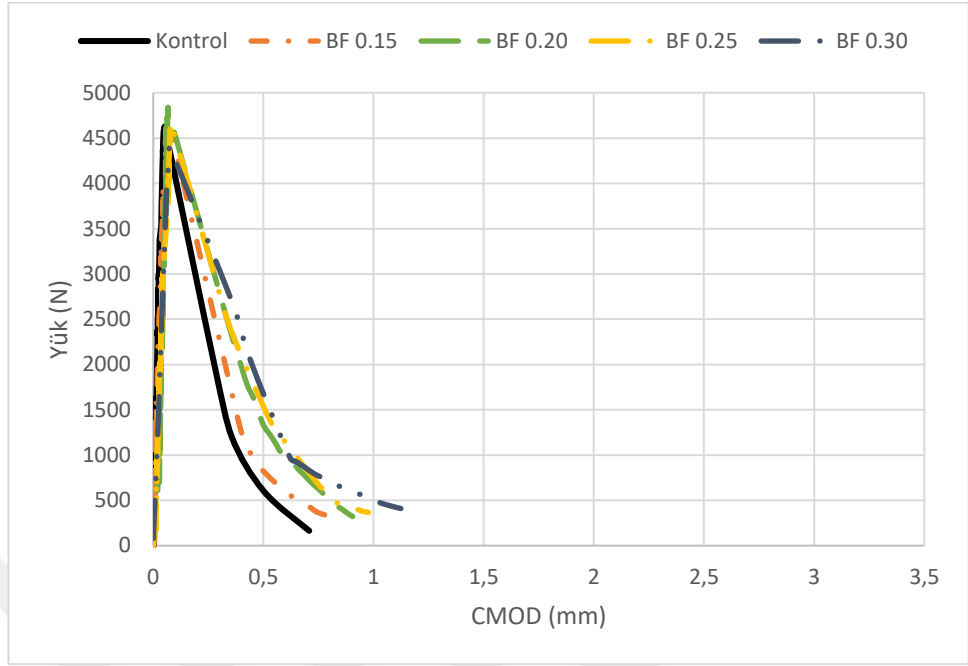
4.3.5. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı parametrelerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında, KYB karışımlarının kırılma enerjileri ve özellikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışma için, 100x100x350 mm ebatlarında, orta noktasında 30 mm derinliğinde, 3 mm genişliğinde çentik bulunan beton kirişler hazırlanmıştır. Beton kirişler 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Uygulanan yüke karşılık gelen çatlak ağzı açıklığı deplasman (CMOD) değerleri ölçülerek, her bir karışım serisi için yük – çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri elde edilmiştir. Tüm karışım serilerine ait eğilme deneyi sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

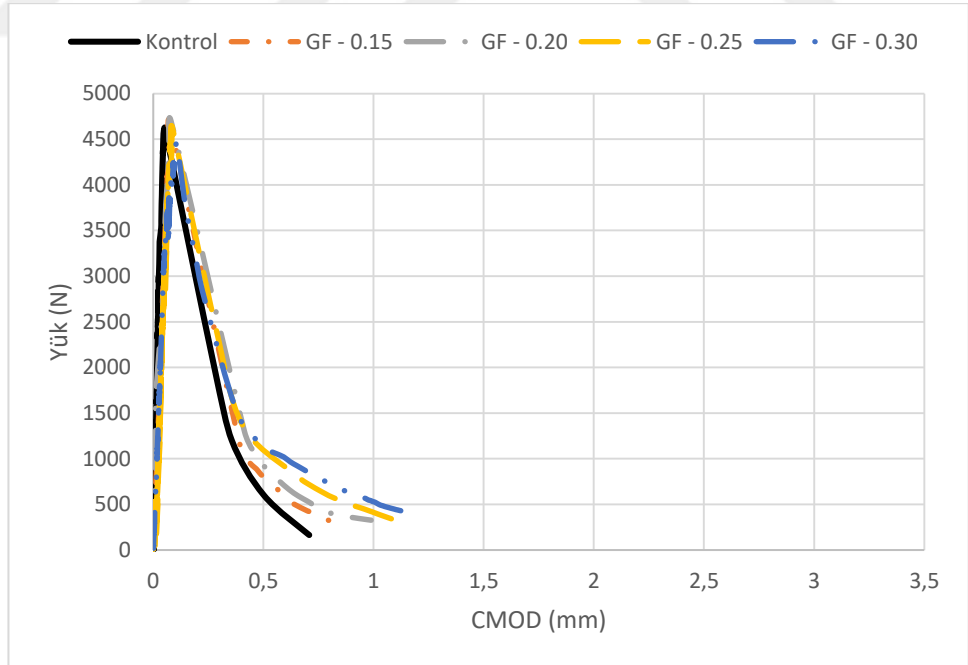
Çizelge 4.7. Üç noktalı eğilme deneyinde elde edilen veriler

Karışım kodu	Pik yük (kN)	Pik yükteki CMOD değeri (mm)	Nihai yükteki CMOD değeri (mm)	3,5 mm CMOD değerindeki yük (kN)
Kontrol	4,62	0,051	0,71	0,00
BF - 0.15	4,67	0,056	0,80	0,00
BF - 0.20	4,84	0,067	0,90	0,00
BF - 0.25	4,68	0,079	0,97	0,00
BF - 0.30	4,40	0,075	1,12	0,00
GF - 0.15	4,67	0,075	0,85	0,00
GF - 0.20	4,70	0,080	0,98	0,00
GF - 0.25	4,64	0,086	1,09	0,00
GF - 0.30	4,46	0,107	1,21	0,00
PPF - 0.15	4,65	0,061	3,58	0,32
PPF - 0.20	4,78	0,063	3,62	0,43
PPF - 0.25	4,74	0,059	3,72	0,64
PPF - 0.30	4,84	0,067	3,68	0,72

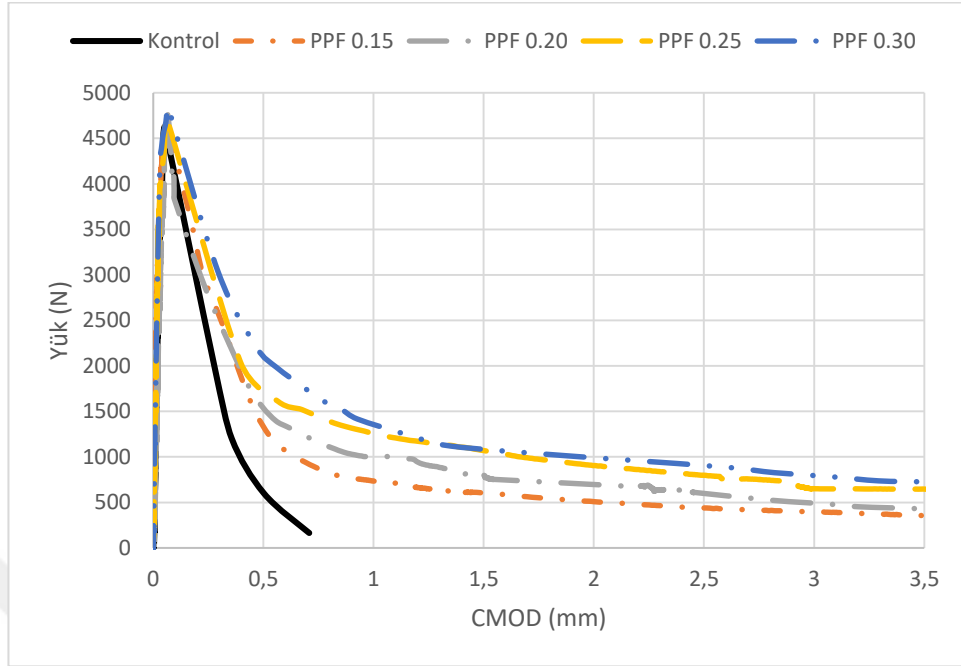
Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen yük – CMOD eğrileri, bazalt, cam ve polipropilen lif kullanılan KYB karışımları için sırasıyla Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40’da sunulmuştur.



Şekil 4.38. Bazalt lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri



Şekil 4.39. Cam lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri



Şekil 4.40. Polipropilen lifli karışımlara ait yük – CMOD eğrileri

KYB karışımlarının 3 noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük – CMOD eğrilerinin incelenmesi neticesinde, eğilme deneyinde belirtilen yük – yerdeğiştirme eğrilerine benzer şekilde, tüm karışımlarda pik yük sonrası, uygulanan yükte ani düşüş meydana gelmiştir. Lifli KYB karışımlarının hiçbirisinde, pik yük sonrası yükü devam ettirme, uygulanan yükü sertleştirme veya arttırma yeteneği gözlenmemiştir. Pik yüke ulaşıldıktan sonra, yük azalmaya başlamış, kullanılan liflerin etkisiyle kırılma gerçekleşmeden, çatlak ağzı açılmaya devam etmiştir.

Polipropilen lif kullanılan serilerde, uygulanan yükte ani bir düşüş olsada, belirli bir yük değerinde numunede kırılma olmadan, belirgin bir çatlak ağzı açıklığı değerine ulaşmış ve daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bazalt ve cam lifli KYB serilerinde ise, PPF serilerinin aksine daha az çatlama sonrası kapasite sağlamış ve böylelikle gevrek bir kırılma gerçekleşmiştir. Deney sonrası numunelerin incelenmesi sonucunda, bazalt ve cam lif ilaveli karışım numunelerinin kırılma yüzeyinde görünür liflere rastlanmamış olup; bu durum bazalt ve cam liflerin belirgin bir kopma yapmadan kırıldığını göstermiştir. Buna karşılık, polipropilen liflerin kırılma yüzeyinde görüldüğü, bu durumun polipropilen liflerin çatlağı köprüleme yeteneğinin bir göstergesi olduğu

yargısına ulaştırmıştır. Daha yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip bazalt ve cam liflerin aynı lif içeriğindeki daha düşük mekanik özelliklere sahip polipropilen life göre daha iyi bir davranış sergileyemedikleri tespit edilmiştir.

Kontrol betonu ile karşılaştırıldığında, BF-0.30 ve GF-0.30 serilerinin pik yük değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Buna benzer durum, Smarzewski (2019) tarafından yapılan çalışmada gözlenmiş ve %1 - %2 bazalt/polipropilen lif içeriğine sahip karışımlarda %19 ile %63 arasında pik yükte azalma tespit edilmiştir. Bu durum çatlağı birleştiren etkili lifin rastgeleliğine bağlanmıştır. Ayrıca, cam lifli beton karışımların kırılma enerėilerini inceleyen Arslan (2016) alışmasında, 3 kg/m³ cam lif kullanılan serinin pik yük değerinde, kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %4,5 oranında azalma gözlenlemiştir. Hedeflenen 3,5 mm'lik CMOD değerine sadece polipropilen lifli karışım serisi ulaşabilmiş, bazalt ve cam lifli seriler hedeflenen CMOD değerini sağlayamamışlardır.

3,5 mm'lik CMOD değerinde en yüksek artık yük değeri 0,72 kN ile PPF-0.30 serisinde elde edilmiştir. Lifli karışımların, pik yükteki ve nihai yükteki CMOD değerlerinin incelenmesi sonucunda ise, pik yükte en düşük CMOD değerleri polipropilen lifli serilerde gözlenmiştir. PPF-0.30 serisinde nihai yükteki CMOD değeri, pik yükteki CMOD değerinden yaklaşık olarak 55 kat daha yüksektir. Bazalt ve cam lifli serilerde ise pik ve nihai yükteki en yüksek CMOD değerleri oranı sırasıyla, 15 ve 12 kat olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, polipropilen lifli serilerin çatlakları köprüleme yeteneğinin, bazalt ve cam life oranla daha iyi olduğunu göstermektedir.

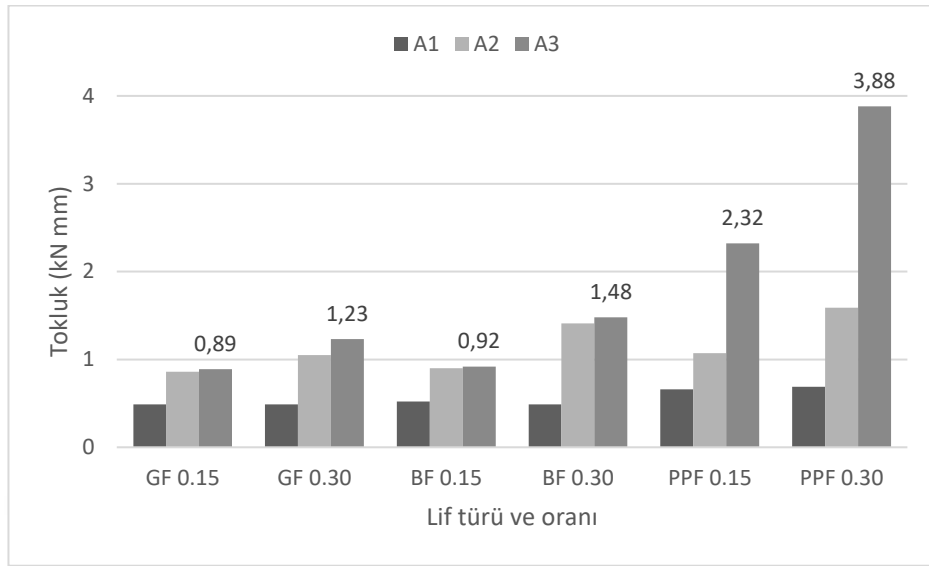
Tez kapsamında Bölüm 3'de Yöntem kısmında detaylıca anlatılan RILEM TC 162-TDF standardında belirtildiği üzere, karışım numuneleri üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deney sonuçlarına ait parametreler ve RILEM TC 50-FMC standartı baz alınarak hesaplanan kırılma enerėisi değerleri izelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Üç noktalı eğilme deneyinde elde edilen eğilme dayanımı parametrelerinin ve kırılma enerjisi değerler

Karışım kodu	F_L (kN)	A_1 (kN x mm)	A_2 (kN x mm)	A_3 (kN x mm)	$f_{fct,L}$ (MPa)	$f_{eq, 2}$ (MPa)	$f_{eq, 3}$ (MPa)	$f_{R, 1}$ (MPa)	$f_{R, 4}$ (MPa)	G_F (N/m)
Kontrol	4,60	0,69	0,53	0,53	4,22	0,97	0,19	0,55	0,0	0,18
BF-0.15	3,47	0,52	0,90	0,92	3,19	1,65	0,34	0,76	0,0	0,21
BF-0.20	3,38	0,51	1,16	1,22	3,10	2,13	0,45	1,23	0,0	0,26
BF-0.25	3,25	0,49	1,26	1,33	2,98	2,31	0,49	1,46	0,0	0,27
BF-0.30	3,26	0,49	1,41	1,48	2,99	2,59	0,54	1,55	0,0	0,29
GF-0.15	3,25	0,49	0,86	0,89	2,98	1,58	0,33	0,74	0,0	0,20
GF-0.20	3,20	0,48	1,02	1,09	2,94	1,87	0,40	0,85	0,0	0,23
GF-0.25	3,36	0,50	0,99	1,14	3,09	1,82	0,42	1,07	0,0	0,25
GF-0.30	3,25	0,49	1,05	1,23	2,98	1,84	0,45	1,10	0,0	0,26
PPF-0.15	4,42	0,66	1,07	2,32	4,06	1,97	0,85	1,24	0,32	0,48
PPF-0.20	4,39	0,66	1,08	2,85	4,03	1,98	1,05	1,42	0,43	0,56
PPF-0.25	4,40	0,66	1,44	3,55	4,04	2,64	1,30	1,66	0,64	0,69
PPF-0.30	4,59	0,69	1,59	3,88	4,22	2,92	1,43	1,95	0,72	0,75

Lif türü ve miktarının enerji yutma kapasitesi veya tokluk üzerindeki etkisi, Şekil 4.41'de sunulmuş olup; önerilen yerdeğiştirmeye kadar yük- CMOD eğrisi altındaki alan kullanılarak hesaplanmıştır. BF ve GF serileri, standartta önerilen CMOD₂ değerinden sonra çok az çatlak ağzı açılması yaparak kırılmış ve CMOD₃ değerine ulaşamamıştır. Bazalt, cam ve polipropilen liflerle takviye edilmiş numunelerin CMOD₁ oranına kadar tokluk değerleri neredeyse tüm serilerde aynıdır. Farklı lif tür ve oranları arasındaki bariz farklar artan yük direncine bağlı olarak CMOD₃ noktasında ortaya çıkmaya başlamıştır. Kontrol, PPF-0.30, BF-0.30 ve GF-0.30 serilerinde, önerilen CMOD değeri olan ve liflerin etkinliğini arttırmaya başlayıp, yumuşama bölgesi olarak adlandırılan CMOD₃'e kadar hesaplanan A₃ değerlerinde, sırasıyla 0,53 kN mm, 3,88 kN mm, 1,48 kN mm ve 1,23 kN mm verileri elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen değer CMOD₂'e kadar hesaplanan A₂'de ise, sırasıyla 0,53 kN mm, 1,59 kN mm, 1,41 kN mm ve 1,05 kN mm değerleri tespit edilmiştir.

Lifli karışımlarda, en yüksek tokluk değeri PPF-0.30 serisinde elde edilirken, en düşük değer ise GF-0.15 serisinde gözlenmiştir. Polipropilen lifli serilerde lif kullanım oranının artmasıyla, tokluğu belirleyen A₃ değerinde önemli artış olmuştur. Örneğin, PPF-0.30 serisinin A₃ tokluk değerinde, PPF-0.15 serisine oranla yaklaşık %67 oranında artış tespit edilmiştir. Bu değer, aynı lif oranlarına sahip bazalt ve cam lifli karışımlarda sırasıyla %60 ve %38 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca PPF-0.30 serisinin tokluk değerinde, BF-0.30 ve GF-0.30 serilerine oranla, sırasıyla, %162 ve %215 oranlarında artış meydana gelmiştir. Sonuç olarak, polipropilen lif muhtevasına sahip karışımlar CMOD₃ değerine kadar, eğilmede çekme dayanımı için sert tepki vererek en yüksek tokluğu sağlarken, cam lifli karışımlarda ise en düşük tokluk değeri elde edilmiştir. Smarzewski (2019), %1 ve %2 oranlarında bazalt ve polipropilen lifli karışım serileri üzerinde yaptığı çalışmada, polipropilen lifli karışımların A₃ değerinde, bazalt lifli karışımlara kıyasla, sırasıyla, %117 ve %169 oranlarında artış tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmada, %2 oranında polipropilen lif kullanılan serilerin A₃ değerinde, %1'lik polipropilen lifli serilere göre %37 oranında artış elde edilmiştir. Aynı durum bazalt lifli serilerde ise %10 olarak gözlemlenmiştir.

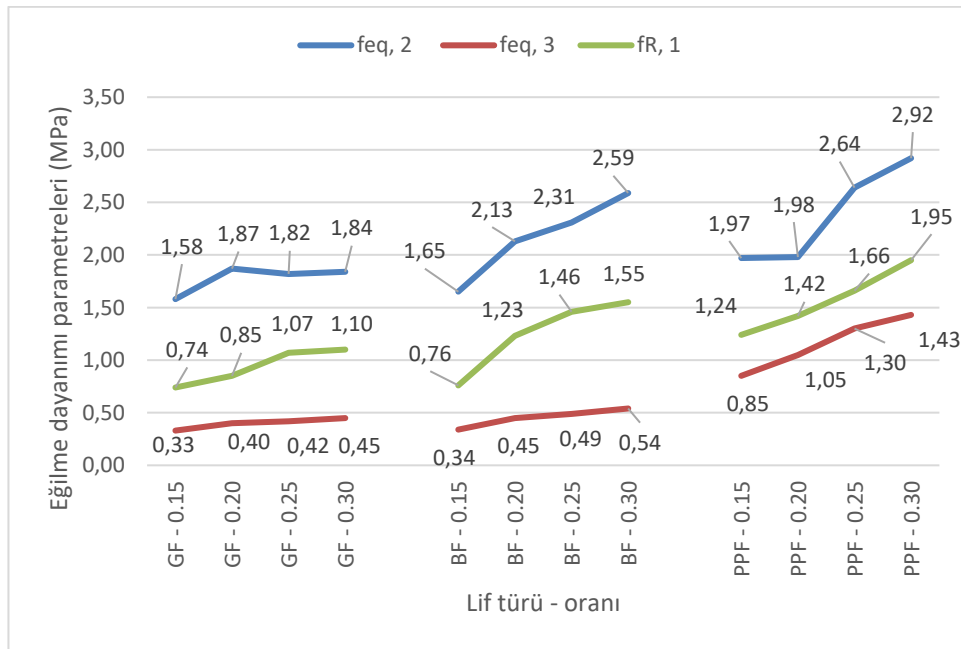


Şekil 4.41. Lifli karışımların tokluk değerleri

Çalışma kapsamında karışım serilerinin artık eğilme ve eşdeğer eğilme dayanımları RILEM TC 162-TDF standardına uygun olarak, farklı CMOD değerlerindeki eğilme yükleri kullanılarak hesaplanmıştır. Standartta belirtilen 0,5 mm’lik CMOD değerinde hesaplanan artık eğilme dayanımı ($f_{R,1}$) değerlerinde en yüksek sonuçlar PPF serilerinde elde edilmiştir. PPF serilerinin $f_{R,1}$ değerlerinde 1,24 MPa – 1,95 MPa arasında sonuçlar elde edilmiştir. En düşük artık eğilme dayanımı sonuçları ise 0,74 MPa – 1,10 MPa arasında değerler elde edilen, GF serilerinde tespit edilmiştir. Bazalt lifli karışım serilerinde ise 0,76 MPa – 1,55 MPa değerleri arasında artık eğilme dayanımı sonuçları belirlenmiştir. Ayrıca, 3,5 mm’lik CMOD değerine karşılık gelen $f_{R,4}$ sonuçlarının incelenmesi neticesinde bazalt ve cam lifli karışımlar, hiçbir artık eğilme dayanımı gösterememiştir. PPF serilerinin $f_{R,4}$ değerleri, PPF 0.15, 0.20, 0.25 ve 0.30 serileri için sırasıyla 0,32 MPa, 0,43 MPa, 0,64 MPa ve 0,72 MPa olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, PPF serilerinde bir yumuşama bölgesi elde edilirken, BF ve GF serilerinde bu durum gözlenmemiştir. Ayrıca, çalışmada standartta belirtilen orantılılık sınırı olan 0,05 mm’lik CMOD değerine karşılık gelen en yüksek yük olan F_L ve bu değerdeki eğilme dayanımı değeri $f_{fct,L}$ hesaplanmıştır. Bazalt ve cam lifli karışım serilerinin $f_{fct,L}$ değerlerinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Bazalt lifli serilerde 2,98 – 3,19 MPa arasında iken, cam lifli serilerde 2,94 – 3,09 MPa arasında değerler elde edilmiştir.

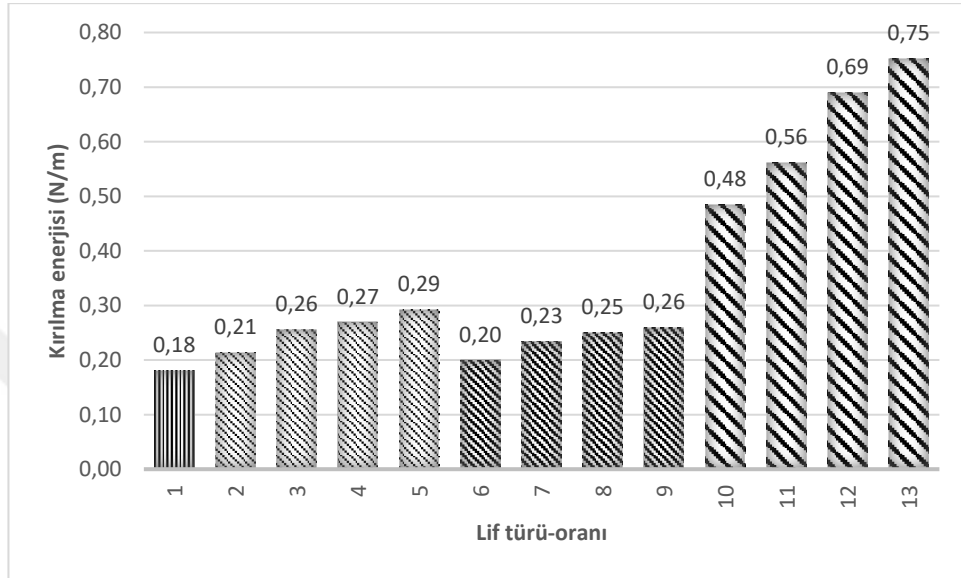
Polipropilen lifli karışım serilerinde orantılılık sınırındaki eğilme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiş olup; 4,03 – 4,22 MPa arasında hesaplanmıştır.

Eşdeğer eğilme dayanımını ifade eden $f_{eq,2}$ ve $f_{eq,3}$ değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Lifli karışım serilerinde, en yüksek $f_{eq,2}$ ve $f_{eq,3}$ değerleri PPF 0.30, en düşük $f_{eq,2}$ ve $f_{eq,3}$ değerleri ise GF 0.15 serilerinde elde edilmiştir. Polipropilen lif kullanılan serilerde $f_{eq,2}$ değerleri 1,97 – 2,92 MPa değerleri arasında belirlenmiştir. BF ve GF serilerinin $f_{eq,2}$ değerleri ise sırasıyla, 1,65 – 2,59 MPa ve 1,58 – 1,87 MPa olarak elde edilmiştir. Yük – yerdeğiştirme eğrisinde yumuşama bölgesini temsil eden $f_{eq,3}$ değerlerinde ise, PPF, BF ve GF serilerinde sırasıyla 0,85 – 1,43 MPa, 0,34 – 0,54 MPa ve 0,33 – 0,45 MPa arasında değerler elde edilmiştir. PPF-0.30 serisinin, $f_{eq,2}$ değerinde BF-0.30 ve GF-0.30 serilerine oranla, %12,7 ve %58,6, $f_{eq,3}$ değerinde ise %164,8 ve %217,7 oranlarında artış tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere, lif türünün köprüleme yeteneğini arttırdığı ve yumuşama bölgesi olarak nitelendirilen alanda elde edilen, $f_{eq,3}$ değerlerinde, bazalt ve cam lifli serilere göre polipropilen serilerde daha fazla artış tespit edilmiştir. Lifli karışımlara ait eşdeğer eğilme dayanımı ve artık eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.42’de sunulmuştur.



Şekil 4.42. Lif türü ve oranının eğilme dayanımı parametrelerine etkisi

Lifsiz ve lifli KYB karışımlarına ait kırılma enerjisi sonuçları Şekil 4.43’de sunulmuştur. Kırılma enerjisi değerleri, RILEM TC 50-FMC standardına uygun olarak, yük – CMOD eğrisi altındaki alan baz alınarak hesaplanmıştır.

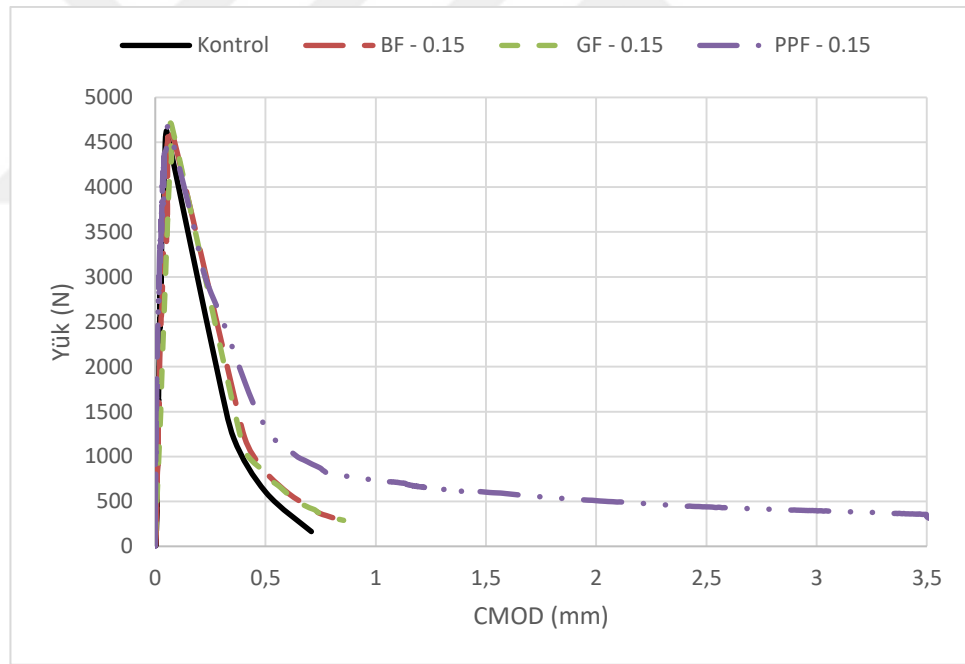


Şekil 4.43. Karışım numunelerine ait kırılma enerjisi değerleri

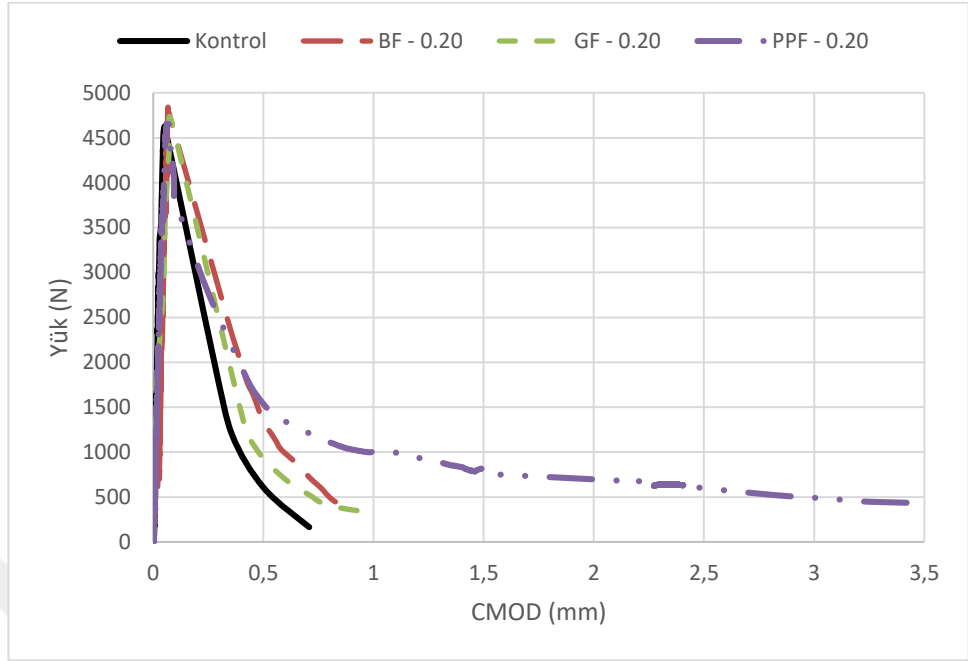
Kırılma enerjisi sonuçlarının incelenmesi neticesinde, en yüksek kırılma enerjisi değerleri PPF serilerinde elde edilmiştir. PPF serilerinin kırılma enerjilerinde, 0,48 N/mm – 0,75 N/mm arasında değerler elde edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla, polipropilen lifli karışımların kırılma enerjisi değerlerinde %166 ile %316 arasında artış tespit edilmiştir. En düşük kırılma enerjisi değerleri ise, kontrol numunesine kıyasla %11 ile %44 oranında artış elde edilen GF serilerinde gözlenmiştir. GF serileride lif oranının artmasıyla, kırılma enerjisinde belirgin bir artış tespit edilememiştir. Bazalt lif kullanılan serilerin kırılma enerjisi değerlerinde ise, 0,21 N/mm – 0,29 N/mm arasında sonuçlar hesaplanmıştır. BF serilerinde kontrol numunesine göre, kırılma enerjilerinde %17 ile %61 oranları arasında artış meydana gelmiştir.

Kontrol karışımı ve BF, GF ve PPF serilerinin aynı lif oranlarına ait yük – CMOD eğrileri Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Bahse konu şekillerin incelenmesi sonucunda, BF ve GF serilerinde, pik yük sonrası yükte ani bir düşüş

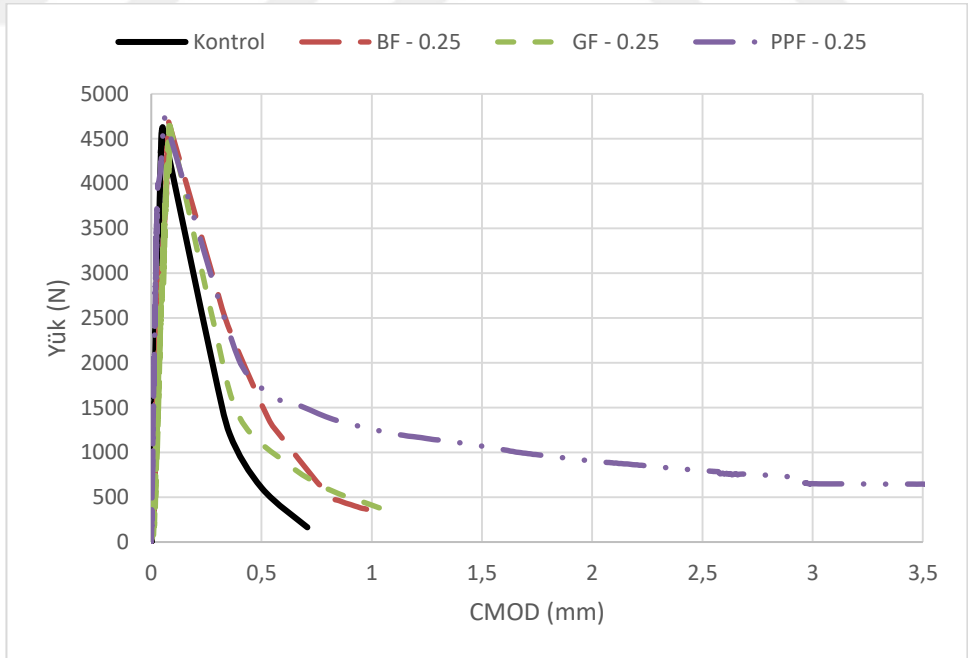
meydana gelmiş ve sonucunda fazla bir çatlak ağzı açıklığı deplasmanı yapmadan gevrek bir kırılma göstermişlerdir. Bunun aksine, PPF serilerinde de pik yük sonrası, yükte ani bir düşüş tespit edilse de, tüm PPF’lerde yük belli bir değerden sonra sabitlenerek daha fazla bir çatlak ağzı açılması yaparak, BF ve GF serilerine kıyasla daha sünek bir davranış sergilemişlerdir. PPF serilerinde, lif oranı arttıkça, pik yük sonrası meydana gelen yükteki ani düşüşün, daha yüksek yük değerlerinde sonlandığı gözlenmiştir. Ancak, BF ve GF serilerinde lif oranı arttıkça pik yük sonrası davranışta çok fazla bir farklılık belirlenememiştir. Bu durum, yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere, bazalt ve cam lifin, çatlak ağzında fazla uzama yapmadan koparak gevrek, polipropilen lifin ise belirgin bir uzama göstermesinden kaynaklı olarak daha sünek bir davranış sergilemesine neden olmuştur.



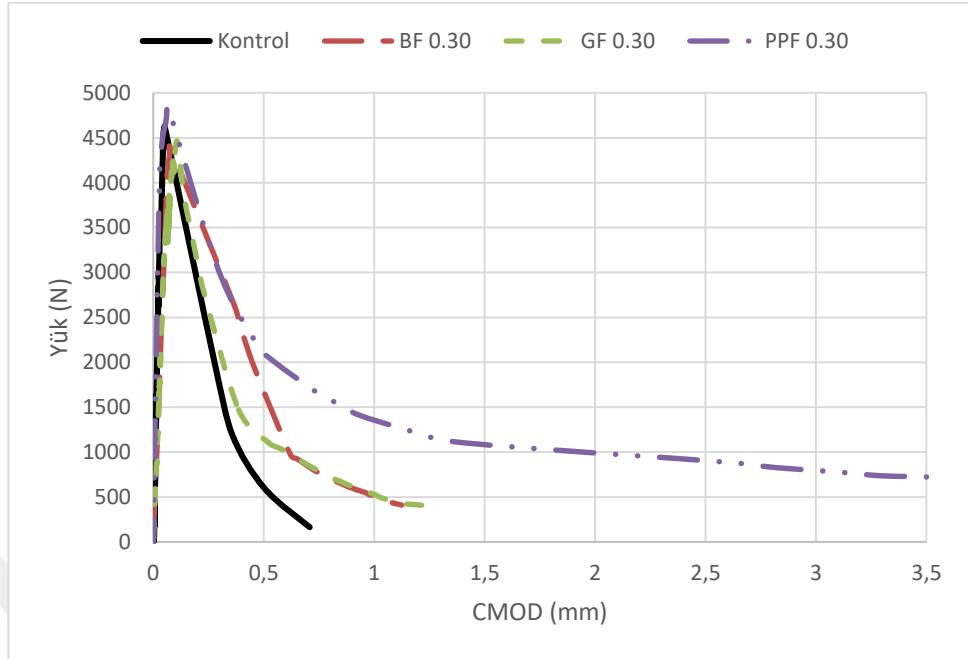
Şekil 4.44. BF – 0.15, GF – 0.15 ve PPF – 0.15 serilerine ait yük – CMOD eğrileri



Şekil 4.45. BF – 0.20, GF – 0.20 ve PPF – 0.20 serilerine ait yük – CMOD eğrileri



Şekil 4.46. BF – 0.25, GF – 0.25 ve PPF – 0.25 serilerine ait yük – CMOD eğrileri



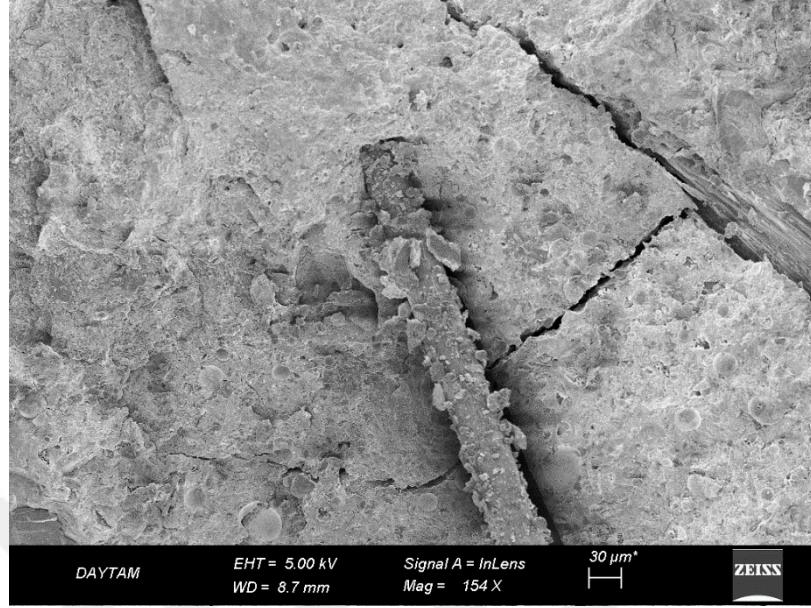
Şekil 4.47. BF – 0.30, GF – 0.30 ve PPF – 0.30 serilerine ait yük – CMOD eğrileri

Arslan (2016) çalışmasında, bazalt ve cam lifli normal beton karışımların kırılma enerjisi değerlerini incelemiştir. Beton karışımlara bazalt ve cam lifin 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ miktarında ilave edilmesiyle kırılma enerjisi değerlerinde, sırasıyla, %6,88-28,5 ve %7,72-40,7 oranları arasında artış tespit etmiştir. Ayrıca çalışmada, bazalt lif kullanımının 3 kg/m³, cam lifin ise 1 kg/m³ miktarına ulaşması durumunda kırılma enerjisinde, daha az miktarda lif kullanılan karışımlara oranla azalmalar gözlenmiştir. 12 mm uzunluğunda, 2 ve 4 kg/m³ miktarlarında bazalt lif ilavesinin, normal beton karışımların kırılma enerjileri üzerine etkisi Kabay (2014) tarafından incelenmiştir. Çalışmada 2 ve 4 kg/m³ bazalt lif kullanılması durumunda, kırılma enerjilerinde sırasıyla, %54,6 ve %89,3 oranlarında artış elde edilmiştir. Bencardino *et al.* (2010) çalışmasında, %1 ve %2 oranlarında polipropilen lif kullanarak hazırladıkları karışımlarında, lif kullanım oranının %1'den %2'ye çıkması halinde kırılma enerjisinde %10 artış elde etmiştir. Smarzewski (2019) tarafından yapılan incelemede, %1 oranında polipropilen lif

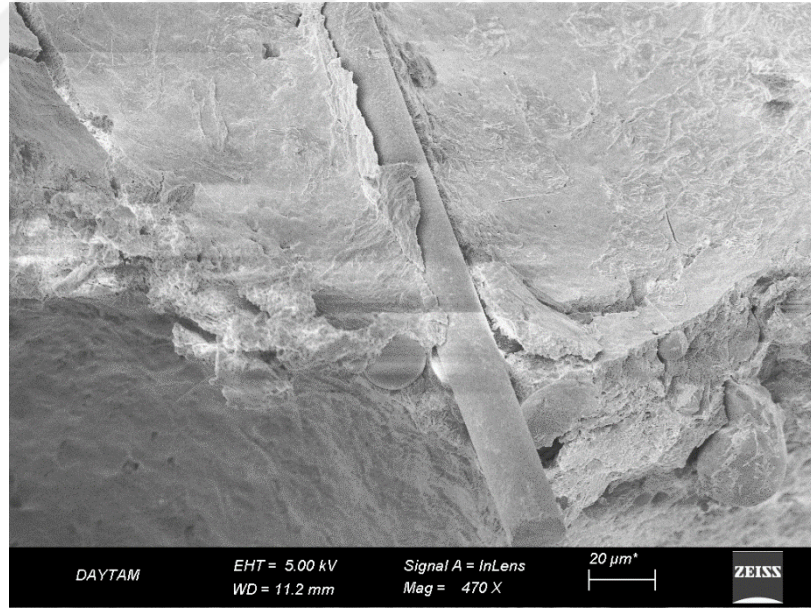
kullanımının, aynı oranda bazalt lif kullanılan seriye kıyasla, kırılma enerjisini %165 oranında arttırdığını tespit etmiştir.

Sonuç olarak, çalışmada düşük elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklere sahip polipropilen liflerin, yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımı özelliklerine sahip bazalt ve cam liflerden daha fazla çatlak ağzı açılma deplasmanı ve kırılma enerjisi sağlayabileceği gözlenmiştir. Bu durum, yukarıdaki bölümlerde görsel olarak sunulduğu üzere, bazalt ve cam lifli serilerde hem eğilme dayanımı hem de kırılma enerjisi deneylerinde, numunelerin kırılma yüzeyinde görülebilir liflere rastlanılmaması ile açıklanabilir. Polipropilen lifli serilerde ise, kırılma yüzeyinde görülebilir lifler gözlenmiştir. Bazalt ve cam lifin, belirgin bir uzama yapmadan koparak kırılmaları bu durumun nedeni olarak gösterilebilir. Ayrıca lifli karışımlara ait SEM görüntüleri PPF, BF ve GF serileri için sırasıyla, Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Polipropilen lif yüzeyinin hidratlanmış çimento matrise ile kaplandığını, ancak bazalt ve cam lifler ile matris arasında boşluk oluştuğu, bu durumda lif ile hidratlaşmış çimento arasında zayıf bir bağ oluşması anlamına gelmektedir. Bahse konu bu durumda bazalt ve cam lifli karışımların kırılma davranışını olumsuz etkilediği söylenebilir. Kırılma enerjisi üzerine, kullanılan lif miktarının etkisi kaçınılmaz olmakla birlikte, en önemli etkinin lif türü olduğu çalışmada gözlenmiştir. PPF’lerin, diğer lif türlerine göre, olumlu etkisinin nedenlerinden birinin de birim hacimdeki lif sayısının fazlalığı olarak değerlendirilebilir. Ancak, tez çalışması kapsamında, kullanılan lif miktarları hacimsel olarak kullanıldığından dolayı, yaklaşık olarak lif sayıları eşittir.

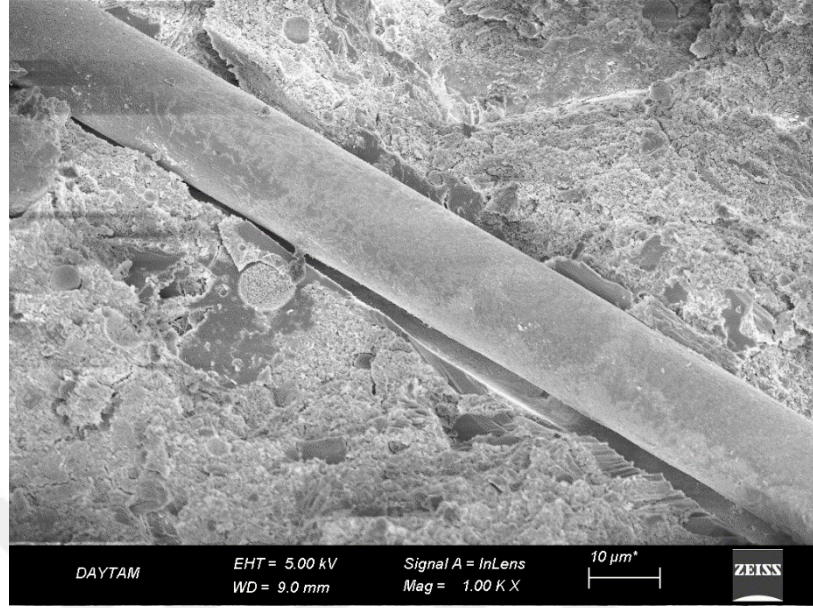
Bu çalışmada incelenen bazalt ve cam lifleri, pik yük sonrası davranışı az da olsa iyileştirsede, sünek davranışın gerekli olduğu uygulamalar için uygun görünmemektedir; bununla birlikte, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını arttırmaları avantajları arasında gösterilebilir.



Şekil 4.48. PPF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü



Şekil 4.49. BF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü



Şekil 4.50. GF 0.30 serisine ait SEM görüntüsü

5. SONUÇ

Bazalt, cam ve polipropilen lif kullanarak hazırlanan lifli KYB karışımlarının, işlenebilirlik ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- KYB karışımlarına ilave edilen lif oranlarındaki artış ile birlikte, karışımların işlenebilirliğinde önemli azalmalar meydana gelmiştir. En yüksek oranda lif kullanılan, BF-0.30, GF-0.30 ve PPF-0.30 serilerinin çökme-yayılma çaplarında kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla %11, %14 ve %14 oranlarında azalma meydana gelmiştir.
- Lifli KYB karışımlarının V-hunisi akış süresi ve bloklanma oranı sonuçlarının incelenmesi neticesinde, BF, GF ve PPF serilerinin, V-hunisi akış sürelerinde sırasıyla, 5,58-7,90 sn, 6,40-8,70 sn ve 7,20-9,20 sn aralığında değerler elde edilmiştir. PPF 0.30 serisi VF2, diğer tüm seriler ise VF1 sınıfı değerlerini sağlamışlardır.
- Lifli KYB karışımlarının, basınç dayanımı değerlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. GF serilerinin basınç dayanımlarında, kontrol numunesine kıyasla - %2,87 - %1,22 oranları arasında değişim tespit edilmiştir. BF ve PPF serilerinin basınç dayanımlarında ise kontrol numunesine göre, sırasıyla, -%2,64 - %3,66 ve -%1,83 – 3,86 oranları arasında değişim tespit edilmiştir. Tüm KYB karışımlarında en yüksek basınç dayanımı değeri PPF-0.15 serisinden elde edilmiştir.
- Lifli KYB karışımlarının tümünde, kullanılan lif oranı arttıkça basınç dayanımında düşüşler gözlenmiştir. Lif miktarı arttıkça, betonda işlenebilirliğin azalması, boşluk oranının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, lif topaklaşması ve liflerin matristen sıyrılması gibi nedenlerinde etkisi gözardı edilemez.
- Basınç dayanımının elde edildiği nihai yükte, belirgin bir değişim olmamasına karşın, lifli KYB karışımlarının basınç yüklemesi altında daha sünek davrandıkları tespit edilmiştir. Deneyden sonra incelenen lifli serilerde, betonun yanal şekil değiştirmesi kısıtlanmış ve bununla birlikte, çok sayıda açık dikey çatlak olmadan, kırılmadan sonra kontrol numunesine oranla daha iyi bir görünüm elde edilmiştir.

- Yarmada çekme deney sonuçlarına göre, lif oranındaki artış ile birlikte tüm karışımlarda kontrol numunesine kıyasla dayanımda önemli oranda artış meydana gelmiş olup; en yüksek yarmada çekme dayanımı, %12,78 artış ile BF-0.30 serisinde elde edilmiştir. Ayrıca, GF ve PPF serilerinin yarmada çekme dayanımında ise, sırasıyla, %7,22 - %10,83 ve %4,44 - %11,66 oranları arasında artış tespit edilmiştir.
- Bazalt ve cam lifli karışım serilerinde, hacimce %0,15 oranında lif kullanılması durumunda kontrol numunesine oranla dayanımda belirgin bir artış elde edilmiş, fakat lif oranının %0,15 değerini aşmasından sonra bu artış oranı azalmıştır. Öyleki GF-0.30 serili karışımda yarmada çekme dayanımında, GF-0.25 serisine göre azalma olduğu tespit edilmiştir. Polipropilen lifli karışımlarda ise, lifin hacimce %0,15 oranında kullanılması durumunda, bazalt ve cam lif kadar belirgin bir artış olmamasına rağmen, lif oranı arttıkça diğer lif türlerine kıyasla daha fazla artış meydana gelmiştir.
- Kontrol numunesinden elde edilen eğilme dayanımına kıyasla, bazalt, cam ve polipropilen lif ilaveli karışım serilerinde, sırasıyla, %8,63 - %11,58, %7,37 - 10,74 ve %6,95 - %11,16 oranları arasında artış tespit edilmiştir. Bazalt lifli serilerde %0,20, cam lifli serilerde ise %0,25 oranından sonra dayanımda azalmalar tespit edilmiştir. Ancak bunların aksine, polipropilen lifli serilerde dayanımda sürekli bir artış elde edilmiştir.
- Hem deneysel veriler hem de gözlemsel incelemelerde, pik yük sonrası polipropilen lifli karışım serilerinde sünek, bazalt ve cam lifli serilerde ise gevrek bir kırılma gözlenmiştir. Öyleki, kırılma sonrası incelenen numunelerde, bazalt ve cam lifli serilerde kırılma düzleminde gözle görülebilir life rastlanamamıştır. Bu durum, polipropilen lifli serilerde kırılmanın çekme, diğer lifli karışımlarda ise kopma şeklinde gerçekleştiği ile açıklanabilir.
- ASTM C 1609'a göre, BF ve GF serilerinin hiçbirisinde amaçlanan yerdeğiştirmeye ($L/150$) ulaşılammıştır. Her iki lif türündede pik yük sonrası yükte hızlıca bir düşüş gözlenmiş ve numuneler gevrek bir kırılma göstermiştir. BF ve GF serilerinin $T_{L/150}$ değerlerinde sırasıyla, kontrol numunesine kıyasla %29 - %54 ve %17 - %36 arasındaki oranlarda artış gözlenmiştir. Kontrol numunesine kıyasla PPF serilerinin $T_{L/150}$ değerinde, %133 ile %172 arasında artış tespit edilmiştir. PPF serileri çatlama sonrası sünek bir davranış sergiledi ve 2,30 mm'lik ($L/150$) yerdeğiştirmede pik yükün %10,24 - %14,52 arasında artık yük kapasitesine sahip olmuştur.

- Çatlama sonrası pik yükü devam ettirme, çatlama sonrası uygulanan yükü sertleştirme veya arttırma yeteneği kullanılan lifin türüne, boyutlarına ve miktarına bağlıdır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan liflerin mikro boyutta ve sentetik lif olmasından dolayı yukarıda belirtilen pik yük sonrası davranış şekillerini sağlayamamıştır.
- Polipropilen lifli karışımların darbe dayanımı sonuçlarının incelenmesinde, kontrol numunesine kıyasla görünebilir ilk çatlağın meydana geldiği darbe sayılarında sırasıyla %19,2 - %49,5, nihai kırılmada ise %23 - %64,5 oranlarında artış tespit edilmiştir. BF ve GF serilerinde ise, görünebilir ilk çatlak ve nihai kırılmanın gerçekleştiği darbe sayısında, sırasıyla, %15,6 - %38,4 ve %17 - %44,5 ile %11,6 - %37,4 ve %12,5 - %41 oranları arasında artış elde edilmiştir.
- PPF, BF ve GF serilerinde, gözle görünebilir ilk çatlak ile nihai kırılmanın gözlemlendiği darbe sayıları arasında, sırasıyla, %4,24 - %9,12, %2,18 - %5,47 ve %1,81 - %3,68 oranlarında arasında artış kaydedilmiştir. En yüksek darbe enerjisi, 6443,90 kN mm ile PPF-0.30 serisinde elde edilmiştir. Lif oranının arttırılmasıyla daha düzgün ve daha fazla sayıda çatlak oluşmuştur.
- PPF-0.30 serisinde nihai yükteki CMOD değeri, pik yükteki CMOD değerinden yaklaşık olarak 55 kat, bazalt ve cam lifli serilerde ise, sırasıyla, 15 ve 12 kat olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, polipropilen lifli serilerin çatlakları köprüleme yeteneğinin, bazalt ve cam life oranla daha iyi olduğunu göstermektedir.
- Lifli karışımların tokluğunun ifade eden A_3 değerleri, BF, GF ve PPF serilerinde, 0,92 – 1,48 kN mm, 0,89 – 1,23 kN mm ve 2,32 – 3,88 kN mm arasında değişim göstermiştir. Ayrıca PPF-0.30 serisinin A_3 değerinde, BF-0.30 ve GF-0.30 serilerine oranla, sırasıyla, %162 ve %215 oranlarında artış meydana gelmiştir.
- Ayrıca, 3,5 mm'lik CMOD değerine karşılık gelen $f_{R,4}$ sonuçlarının incelenmesi neticesinde bazalt ve cam lifli karışımlar, hiçbir artık eğilme dayanımı göstermemiştir. PPF serilerinin $f_{R,4}$ değerleri, 0,32 MPa - 0,72 MPa oranları arasında tespit edilmiştir. Sonuç olarak, PPF serilerinde bir yumuşama bölgesi elde edilirken, BF ve GF serilerinde bu durum gözlenmemiştir.
- En yüksek kırılma enerjisi değeri, kontrol numunesine oranla %316 oranında artış elde edilen PPF-0.30 serisinde meydana gelmiştir. En düşük kırılma enerjisi değerleri ise,

kontrol numunesine kıyasla, %11 ile %44 oranları arasında artış elde edilen GF serilerinde gözlenmiştir. GF serilerinde lif oranının artmasıyla, kırılma enerjisinde belirgin bir artış tespit edilememiştir. BF serilerinde ise, kırılma enerjilerinde %17 ile %61 oranları arasında artış meydana gelmiştir.

- Bazalt ve cam lifli seriler çok fazla çatlak ağzı açılma deplasmanı yapmadan kırılmıştır. Bu durumda, yük – CMOD eğrisi altındaki alanı temsil eden kırılma enerjisi değerlerinde fazla bir iyileşmeye olanak vermemiştir. Sonuç olarak, eğilme ve kırılma özelliklerinin incelenmesi neticesinde, pik yük sonrası davranışı az da olsa iyileştirse, sünek davranışın gerekli olduğu uygulamalar için bazalt ve cam lifli karışımların kullanılması uygun görünmemektedir; bununla birlikte, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını arttırmaları avantajları arasında gösterilebilir.
- Ayrıca, lifli karışım serilerinin SEM görüntüleri incelenmiştir. Polipropilen lif kullanılan serilerde, lif yüzeyinin hidratlanmış çimento matrise ile kaplanarak lif ile matris arasındaki aderansı arttırdığı söylenebilir. Ancak SEM görüntülerinde, bazalt ve cam lifler ile matris arasında boşluk oluştuğu, bu durumda lif ile hidratlaşmış çimento arasında zayıf bir bağ oluştuğu anlamına geldiği yargısına varılabilir.
- Son olarak bundan sonraki çalışmalar için önemli bir konu ise, lif türlerinin ayrı ayrı kullanılması yerine liflerin kombinasyonun, tek bir lifin kullanılmasına kıyasla mekanik özelliklerin artırılmasında daha etkili bir şekilde katkı sağlayabileceğidir.

KAYNAKLAR

- Afroughsabet, V., Ozbakkaloglu, T., 2015. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73-82.
- Akçay, B., Ozbek, A.S., Bayramov, F., Atahan, H.N., Sengul, C., Tasdemir, M.A., 2012. Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 437-443.
- Akkaya, Y., Bayramov, F., Taşdemir, M.A., 2003. Betonun Kırılma Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri Arasındaki Bağlılıklar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 70-75.
- Algin, Z., Ozen, M., 2018. The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 678-685.
- Alhozaimy, A.M., Soroushiad, P., Mirza, F., 1996. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 18 (2), 85-92.
- AL-Rubaye, M. M. K., 2016. Self-Compacting Concrete: Design, Properties and Simulation of The Flow Characteristics in the L-Box. PHD Thesis, School of Engineering Cardiff University, UK.
- Alyamaç, K.E., 2008. Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekanik prensipleriyle incelenmesi. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Amparano, F.E., Xi Y., Roh, Y.S., 2000. Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behaviour of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 67, 65-84.
- Arslan, M.E., 2016. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement. *Construction and Building Materials*, 114, 383-391.
- Aslani, F., Nejadi, S., 2013. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B – Engineering*, 53, 121-133.
- ASTMC 1609, 2006. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (using Beam with Third-point Loading). West Conshohocken, Pennsylvania.
- Ayub, T., Shafiq, N., Nuruddin, M. F., 2014. Effect of Chopped Basalt Fibers on the Mechanical Properties and Microstructure of High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-14.
- Banthia, N., Soleimani S.M., 2005. Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 102, 382–389.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K.T., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A. U., 2012. Özel Betonlar. *Beton*. İzmir, Türkiye, 655-766.

- Barr, B.I.G., Hasso, E.B.D., Weiss, V.J., 1986. Effect of specimen and aggregate sizes up on the fracture characteristics of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8, 109-119.
- Bazant, Z. P., Keer, L. M., 1974. Singularity of elastic stresses and of harmonic functions at conical notches or inclusions. *International Journal of Solids and Structures*, 10, 957-964.
- Bažant, Z.P., Becq-Giraudon, E., 2002. Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. *Cement and Concrete Research*, 32 (4), 529-556.
- Beddar, M., 2004. Fibre-reinforced concrete – Past, present and future, *Concrete. ABI/INFORM Trade and Industry*, 47-49.
- Beigi, M.H., Berenjian, J., Omran, O.L., Nik, A.S., Nikbin, I.M., 2013. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials and Design*, 50, 1019-1029.
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R.N., 2010. Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. *Composites Part B Engineering*, 41 (1), 17-24.
- Bentur, A., Mindess, S., 1990. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London and Newyork.
- Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P. 1995. Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61.
- Beycioğlu, A., Aruntaş, H.Y., 2014. Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. *Construction and Building Materials*, 73, 626-635.
- Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J. V., Nikbin, I.M., 2014a. The effect of aging on the fracture characteristics and ductility of self-compacting concrete. *Material and Design*, 55, 937-948.
- Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J. V., Nikbin, I.M., Rabbanifar, S., Rahmani, E., 2014b. Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 202-211.
- Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Nikbin, I.M., Amiri, J.V., 2013. The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete. *Materials and Design*, 50, 267-276.
- Bideci, A., Öztürk H., Bideci, Ö.S., Emiroğlu, M., 2017. Fracture energy and mechanical characteristics of self-compacting concretes including waste bladder tyre. *Construction and Building Materials*, 149, 669-678.
- Bingöl, A.F., Tohumcu, İ., 2013. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials and Design*, 51, 12-18.
- Boukendakdji, O., Kadri, E-H., Kenai, S., 2012. Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34 (4), 583-590.
- Bouzoubaâ, N., Lachemi, M., 2001. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: preliminary results. *Cement and Concrete Research*, 31 (3), 413-420.

- Branston J., Das S., Kenno S.Y., Taylor C., 2016. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878-886.
- Brook, D., 1984. "Elementry Engineering Facture Mechanics." Martinus Nijhoff Publishers, Hague, Nederland.
- Brouwers, H. J. H., Radix, H. J., (2005). Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 35, 2116–2136.
- Carpinteri, A., 1986. *Mechanical Damage and Crack Growth in Concrete*. Martinus Nijhoff Publishers, 234 p, Boston, USA.
- Carpinteri, A., Brighenti, R., 2010. Fracture behavior of plain and fiber-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading. *Materials and Design*, 31, 2032-2042.
- Chen, B., Liu, J., 2004. Effect of aggregate on the fracture behaviour of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 18, 585-590.
- Chen, B., Liu, J., 2005. Contribution of hybrid fibres on the properties of the high strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35, 913-917.
- Cifuentes, H., García, F., Maeso, O., Medina, F., 2013. Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC *Construction and Building Materials*, 45, 130-137.
- Çoşkun, A., 2013. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri Ve Aderans Dayanımı Üzerine Agregatın Tipinin Etkisi. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Deep, R., 2013. *Flow of Self-Compacting Concrete*. PHD Thesis, School of Engineering Cardiff University, UK.
- Dias D.P., Thaumaturgo, C., 2005. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), 49-54.
- Dinakar, P., Babu, K., Santhanam, M., 2008. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement and Concrete Composites*, 30, (10), 880-886.
- Domone, P. L., (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28, 197–208.
- Douglas, R. P., 2004. *Properties of Self-Consolidating Concrete Containing Type F Fly Ash*, M.Sc. Thesis, Northwestern University, Evanston.
- EFNARC, 2005. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete-Specification, Production and use*, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- Einsfeld, R.A., Velasco, M.S.L., 2006. Fracture parameters for high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 576-583.
- Erdoğan, T.Y., 1977. *Admixtures for Concrete*. Middle East Technical University Press, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2013. *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, 757 s, Ankara.
- Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B., 2007. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42, 1795-1802.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu O., Etli, S., Alhassan, M., 2017. Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different

- percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562-569.
- Ghasemi, M., Ghasemi, M.R., Mousavi, S.R., 2017. Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters. *Construction and Building Materials*, 162, 674-682.
- Gjørv, O. E., 1994. "Durability." in Shah, S.P. and Ahmad, S. H., "High Performance Concrete: Properties and Applications.", McGraw-Hill, Inc., UK, 139-156.
- Griffith, A. A., 1920. The Phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A221, 163-198.
- Grünewald, S., Walraven, J.C., 2002. High strength self-compacting fibre reinforced concrete: Behavior in the fresh and hardened state. 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 977 – 989.
- Guinea, G.V., El-Sayed, K., Rocco, C.G., Elices, M., Planas, J., 2002. The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete. *Cement and Concrete Research*, 32 (12), 1961-1970.
- Haist, M., Mechtcherine, V., Müller, H.S. (2002). High performance self compacting Ligh-weight aggregate concrete with and without fibre-reinforcement, 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete, 16-20 June 2002, Leipzig, Germany, 1005 – 1016.
- Hillerborg, A.A., 1976. Analysis of crack formation and crack growth by means of fracture mechanics and finite element. *Cement and Concrete Research*, 6(6), 773-782.
- Hogan, F.J., Meusel J.W., 1981. Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast furnace slag. *Cement Concrete Aggregates*, 3, 40-52.
- Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Sammour, M., Sonebi, M., 2013. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. *Construction and Building Materials*, 45, 20-29.
- Hu, C., Larrard, F., 1996. The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 283–294.
- Hwang, C.L., Lin, C.Y., 1986. Strength development of blended blast-furnace slag cement mortars. 1323–1340
- İnce, R., Alyamaç, K.E., 2008. Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio. *Indian Journal Engineering Material Science*, 15, 14-22.
- Irwin, G. R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364.
- Jena, B., Sahoo, K., Mohanty, B.B., 2018. Comparative study on self-compacting concrete reinforced with different chopped fibers. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 171 (2), 72-84.
- Jeng, Y. S., Shah, S. P., 1985. Two parameter fracture model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics* 111(4), 1227-1241.
- Jiang C., Fan, K., Wu, F., Chen, D., 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials and Design*, 58, 187-193.
- Johnston, C.D., 1996. Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, *Production Methods and Workability of Concrete*, Edited by Bartos, Marrs and Cleland, E&FN Spon, London, 155-179.

- Jun, W., Ye, Z., 2010. Experimental research on mechanical and working properties of non-dipping chopped basalt fiber reinforced concrete, 3rd International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, China, 635–637.
- Kabay, N., 2014. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 50, 95-101.
- Kakooe, S., Akil, H.M., Jamshidi, M., Rouhi, J., 2012. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27, 73-77.
- Kamal, M.M., Safan, M.A., Etman, Z.A., Kasem, B.M., 2014. Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes. *HBRC Journal*, 10, 1, 25-34.
- Karahan, O., Atiş, C.D., 2011. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design*, 32 (2), 1044-1049.
- Karamloo, M., Mazloom, M., Payganeh, G., 2016a. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 123, 508-515.
- Karamloo, M., Mazloom, M., Payganeh, G., 2016b. Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 168 (Part A), 227-241.
- Karihaloo, B. L., 1995. *Fracture mechanics and structural concrete*, Longman Scientific & Technical Press, London.
- Kazemi, M.T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M.H.A., Gholamitabar, M., 2017. Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. *Construction and Building Materials*, 142, 482-489.
- Khayat, K.H., 1999. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 96, 346–353.
- Kızılkant, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., Akça, A. H., 2015. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218-224.
- Kızılkant, A.B., 2016. Experimental evaluation of mechanical properties and fracture behavior of carbon fibre reinforced high strength concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60, 289-296.
- Komlos, K., Babal, B., Nurnbergerova, T., 1995. Hybrid fibre reinforced concrete under repeated loading. *Nuclear Engineering Design*, 156, 195–200.
- Kou, S.C., Poon, C.S., 2009. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31, 622-627.
- Kurita, M., Nomura, T., 1998. Highly-flowable steel fiber-reinforced concrete containing fly ash. *American Concrete Institute*, 178, 159-175.
- Lachemi, M., Hossain, K., Lambros, V., Bouzoubaa, N., 2003. Development of Cost Effective Self-Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement, or Viscosity-Modifying Admixtures. *ACI Materials Journal*, 100(5), 419-425.
- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., Ryle, R., 2003. *Advanced Concrete Technology- Constituent Materials, Cementitious additions*. Newman, J. and Choo, B.S. (Eds). Oxford, 96-159.

- Li, B.X., Chen, M.X., Cheng, F., Liu, L.P., 2004. The mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Wuhan University of Technology*, 11 (19), 68-71.
- Li, J.J., Niu, J.G., Wan, C.J., Jin, B., Yin, Y.L., 2016. Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 27-35.
- Malhatro, V. M., Carette, G.G., 1983. Silica fume concrete properties, applications and limitations. *ACI*, 40-46.
- Malhatro, V. M., Carette, G.G., Sivasundaram, V., 1992. Role of Silica Fume in Concrete. *Advances in Concrete Technology*, Canada, 925-991.
- Mastali, M., Dalvand, A., 2016. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, 125, 196-209.
- Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A., 2017. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B Engineering*, 112, 74-92.
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H., Hosseinpour, I., 2011. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 351-358.
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J. V., Rabbanifar, S., Rahmani, E., Rahimi, S., 2014. A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 57, 69-80.
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J. V., Rahmani, E., Rabbanifar, S., Eslami, M., 2014. Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 137-145.
- Nikbin, I.M., Davoodi, M.R., Fallahnejad, H., Rahimi, S., Farahbod, F., 2016. Influence of mineral powder content on the fracture behaviors and ductility of self-compacting concrete. *Journal Materials Civil Engineering*, 28, 04015147.
- Nili, M., Afroughsabet, V., 2010. The effects of silica fume and polypropylene fibres on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 927-933.
- Noaman, A.T., Abu Bakar, B.H., Akil, H.M., Alani, A.H., 2017. Fracture characteristics of plain and steel fibre reinforced rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 152, 414-423.
- Okamura, H., Ouchi, M., 1999. Self Compacting Concrete: development, present use and future. *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 3-14.
- Okamura, H., Ouchi, M., 2003. Self Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, 5-15.
- Okamura, H., Ozawa, K., 1995. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*, 25, 107-120.
- Öner, A., Akyüz, S., 2007. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29, 505-514.
- Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, T., Hallberg, S.E., Lwin, M., 2003. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States. *ISHPC*, 1-20.

- Persson, B., 2001. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 193-198.
- Pickel, D.J., West, J.F., Alaskar, A., 2019. Use of basalt fibers in fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 115-M79, 867-876.
- Prokopsi, G., Langier, B., 2000. Effect of w/c ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. *Cement and Concrete Research*, 30, 1427-1433.
- Rao, T.M., Rao, T.G., 2009. Fracture parameters of high strength concrete an experimental study. *Journal Structure Engineering*, 35 (6), 397-403.
- RILEM TC 162-TDF, 2002. Test and design method for steel fibre reinforced concrete. Bending test. Final recommendation. *Materials and Structures*, 35, 579-582.
- RILEM TC 50-FMC, 1985. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18, 285-290.
- Rocco, C.G., Elices, M., 2009. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 76, 286-298.
- Rohilla, C., Sharma, K., Kuldeep, 2016. A study on behavior of chopped fiber reinforced self-compacting concrete. *Engineering Technology Journal*, 1, 33-38.
- Roziere, E., Granger, S., Turcry, P., Loukili, A., (2007). Influence of Paste Volume on Shrinkage Cracking and Fracture Properties of Self Compacting Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 626-636.
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., Saradar, A., 2018. Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Construction and Building Materials*, 162, 321-333.
- Safari, J., Mirzaei, M., Rooholamini, H., Hassani, A., 2018. Effect of rice husk ash and macro-synthetic fibre on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 371-380.
- Safiuddin, Md., Yakhlaif, M., Soudki, K.A., 2018. Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 164, 477-488.
- Şahin, Y., Köksal, F., 2011. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 1801-1806.
- Şahmaran, M., Christianto, H.A., Yaman, İ.Ö., 2006. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement Concrete Composites*, 28, 432-440.
- Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö., 2007. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21, (1), 150-156.
- Siddique, R., (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials and Design*, 32, 1501-1507.
- Siddique, R., Kaur, G., Kunal, G., 2016. Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres. *Construction and Building Materials*, 103, 15-22.

- Simões, T., Costa, H., Dias-da-Costa, D., Júlio, E., 2018. Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes. *Construction and Building Materials*, 187, 1277-1285.
- Siregar, A.P.N., 2016. The Effect of Aggregate Size Distribution on Fracture Energy of Concrete. PhD Thesis. University of Surrey, Guildford.
- Siregar, A.P.N., Rafiq, M. I., Mulheron, M., 2017. Experimental investigation of the effects of aggregate size distribution on the fracture behaviour of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 252-259.
- Sivakumar, A., Santhanam, M., 2007. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, 29, 603-608.
- Sivakumar, V.R., Kavitha, O.R., Arulraj, G.P., Srisanthi, V.G., 2017. An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete. *Applied Clay Science*, 147, 123-127.
- Sluys, L. J., 1999. Experimental and numerical determination of the dynamic fracture energy of concrete. *Journal De Physique III* 4, 501-506.
- Smarzewski, P., 2019. Influence of basalt-polypropylene fibres on fracture properties of high performance concrete. *Composite Structures*, 209, 23-33.
- Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C., 2005. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546-1550.
- Subhan, A., Arshad, U., 2018. Rheological and mechanical properties of self compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres. *Journal of Building engineering*, 17, 65-74.
- Subhan, A., Arshad, U., Masood, A., 2018. Properties of normal concrete, self-compacting concrete and glass fibre-reinforced self-compacting concrete: an experimental study. *Procedia Engineering*, 173, 807-813.
- Sukumar, B., Nagamani, K., Srinivasa, R., 2008. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 22, 1394-1401.
- Sun, Z.Z., Xu, Q.W., 2009. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527, 198-204.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A. Joshaghani, A., Hajibandeh, E., 2017. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. *Construction and Building Materials*, 147, 497-509.
- Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G., 1983. *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman Books Limited, London.
- Topçu, İ. B., 2006. *Beton Teknolojisi*. Uğur Ofset A.Ş., 570 s, Bursa.
- Toyoharu, N., Tatsuo, I., & Yoshinobu, E., (1998). State of the art report on materials and design of self compacting concrete, *International Workshop on Self Compacting Concrete*, Japan, 160 – 189.
- TS EN 1097-6/A1, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.

- TS EN 12350-10, 2011. Beton – Taze Beton Deneyleri – Bölüm – 10: Kendiliğinden yerleşen beton – L - kutusu deneyi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-8, 2011. Beton – Taze Beton Deneyleri – Bölüm – 8: Kendiliğinden yerleşen beton - Çökme yayılma deneyi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-9, 2011. Beton – Taze Beton Deneyleri – Bölüm – 9: Kendiliğinden yerleşen beton – V - hunisi deneyi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-1, 2013. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-2, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-6, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 933-1, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi deneyi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Uğuz, A., 1996. Kırılma Mekaniğine Giriş. Uludağ Üniversitesi Basımevi, 160 s, Bursa.
- Uysal, M., Sümer, M., 2011. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25, 4112-4120.
- Wolinski, S., Hordjik, D.A., Reinhardt, H.W., Cornelissen, H.A.W., 1987. Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9 (3), 95-103.
- Xiao, J., Schneider, H., Donneck, C., König, G., 2004. Wedge splitting test on fracture behaviour of ultra-high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 18 (6), 359-365.
- Yakhlaf, M., Safiuddin, Md., Soudki, K.A., 2013. Properties of freshly mixed carbon fibre reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 46, 224-231.
- Yayla, P., 2007. Kırılma Mekaniği. Çağlayan Basımevi, 229 s, İstanbul.
- 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.
- Yazıcı, H., 2008. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22 (4), 456-462.

- Yazıcı, Ş., İnan, G., Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1250-1253.
- Yen, T., Tang, C., Chang, C. and Chen, K., 1999. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 21, 413–424.
- Zhang, J., Zhao, Y., Li, H., 2018. Effect of basalt fibers on mechanical properties of high-performance concrete containing supplementary cementitious materials. *RILEM Bookseries*, 15, 181-187.
- Zhang, X., Xu, S., 2007. Fracture resistance on aggregate bridging crack in concrete. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 1 (1), 63-70.
- Zhang, X.X., Ruiz, G., Yu, R.C., Tarifa, M., 2009. Fracture behaviour of high strength concrete at wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, 36 (10–11), 1204-1209.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., Gao, B., 2015. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66-74.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X.M., Gao, B., 2012. The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete. *Materials and Design*, 40, 109-116.
- Zhou, F.P., Barr, B.I.G., Lydon, F.D., 1995. Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates. *Cement and Concrete Research*, 25, 543-552.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2001 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı’nda yaptığı yüksek lisans öğrenimini 2010 yılında tamamladı. 2014-2015 öğretim döneminde Yapı Malzemeleri Bilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı.

Atatürk Üniversitesi Pasinler Meslek Yüksekokulu’nda Öğretim Görevlisi olarak çalışma hayatını sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.