

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİ KAZANILMIŞ AGREGA KULLANIMININ BETON
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hasan DİLBAS

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Doç. Dr. Özgür ÇAKIR

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ KAZANILMIŞ AGREGA KULLANIMININ BETON ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Hasan DİLBAS tarafından hazırlanan tez çalışması 20/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Özgür ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özgür ÇAKIR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir Y. PEKMEZCİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat KABAY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Özgür ÇAKIR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Geri Kazanılmış Agregâ Kullanımının Beton Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hasan DİLBAS

İmza



Biricik Eşime

ve

Biricik kızım Erva'ya

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması esnasında emeğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Özgür Çakır'a ve doktora tezimin olgunlaşmasına katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Nabi Yüzer'e ve Sayın Doç. Dr. Bekir Y. Pekmezci'ye sonsuz şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Çimento, mineral katkı ve agrega teminindeki yardımlarından dolayı Akçansa Çimento San. A.Ş.'ye ve özellikle personeli Sayın Hakan Ekim'e ve Sayın İsmail Gökalp'e ve kimyasal katkı teminindeki yardımlarından dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve Sayın Ömer Kaya'ya müteşekkirim. Malzemelerin taşınması esnasında lojistik destek sağlayan Güngören Belediyesi'ne de teşekkürlerimi sunmak isterim. Ayrıca, deneyler esnasında tecrübe ve yardımlarıyla katkıda bulunan Boğaziçi Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na, Sayın Prof. Dr. Nilüfer Özyurt Zihnioğlu'na, Sayın Hasan Yıldırım'a, YTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na, Sayın Halil Yavaşçı'ya ve meraklı bakışlarıyla ve emekleriyle teze katkıda bulunan Bitirme Öğrencileri'ne (isimleri aşağıdadır) teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım hazırlığı ve tezden çıkan makale çalışmaları esnasında fikirleri ile katkıda bulunan mesai arkadaşım Sayın Dr. Abdullah Huzeyfe Akça'ya ve ufuk açıcı fikirleri ile maddi-manevi destek olan meslektaşım Sayın Dr. Furkan Birdal'a teşekkürlerimi iletmeyi bir borç bilirim. Ayrıca, tezimin ağırlık katsayıları hesabı aşamasında fikir alışverişi yaptığım Sayın Prof. Dr. İsmail Şahin'e müteşekkirim. Tez süresince her daim yanımda olan, moral gücü veren ve olumlu nice katkılar sağlayan eşime, neşe kaynağım kızıma ve dualarını esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime, ayrıca isimlerini hatırlayamadığım dostlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bitirme Projesi Öğrencileri (Alfabetik Sıralama)

Azat Polat, Barış Umuç, Büşra Özçelik, Deniz Demirci, Enes Doğan, Eyüp Hüseyin Alkan, İlkcan Sertdemir, Görkem Öztürk, Mert Avcı, Mustafa Samet Dinç, Mushfıqullah Sapay, Nezir Altuğ, Ömer Faruk Bektaş, Ömer Bitikli, Selen Kılıçöte, Selman Deniz, Talat Can Talay, Uğur Burak Kaykı

Hasan DİLBAS

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	6
2 DENEYSEL ÇALIŞMA BÖLÜM 1: KARAKTERİZASYON VE OPTİMİZASYON 7	7
2.1 Deneysel Çalışma.....	7
2.1.1 Malzemeler ve Deneysel Metot	7
2.1.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	31
2.1.3 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	40
3 DENEYSEL ÇALIŞMA BÖLÜM 2: OPTİMİZASYON + İYİLEŞTİRME	42
3.1 Deneysel Çalışma	42
3.1.1 Malzemeler ve Deneysel Metot.....	42
3.1.2 Beton Üretimi.....	43
3.1.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	50
3.1.4 Fiziksel ve Mekanik Deneylere Ait Sonuçlar.....	55
3.1.5 Beton Kalıcılık Deneyleri ve Yaşam Döngüsü Analizi.....	59
4 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	69
4.1 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
4.2 Agregada Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
4.2.1 Mekanik İyileştirme Yöntemi Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	69
4.2.2 Agregada Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	73
4.3 Fiziksel Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi	76
4.3.1 Yoğunluk ve Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76
4.3.2 Ultra Ses Geçiş Hızı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	89
4.3.3 Fiziksel Özellikler Arasında Belirlenen İkili İlişkiler.....	98
4.4 Beton Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	101
4.4.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi..	110
4.4.3 Yarmada Çekme Dayanımı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki.....	123
4.4.4 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	128

4.4.5 Statik Elastisite Modülü Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	135
4.4.6 Kırılma Parametreleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	142
4.5 Kalıcılık Deneyleri ve Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	158
4.5.1 TOPSİS Yöntemi Sonuçları.....	159
4.5.2 Aşınma Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	159
4.5.3 Kılcallıkla Su Emme ve Basıncı Su İşleme Derinliği Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	161
4.5.4 Klorür İyon Geçirimsizliği Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	165
4.5.5 Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	168
4.5.6 Kalıcılık Deney Sonuçlarının Diğer Deney Sonuçlarıyla İlişkileri.....	171
4.5.7 Kalıcılık Deneylerine Ait Sonuçların ve Yaşam Döngüsü Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	175
4.6 Beton İyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi.....	176
4.7 Beton Özelliklerinin Tahminine Yönelik Çalışmalar.....	180
4.8 Beton Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi	182
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	184
KAYNAKÇA	187
A TOPSİS YÖNTEMİ	204
B TOPSİS YÖNTEMİ İÇİN BETON ÖZELLİKLERİNİN AĞIRLIK KATSAYILARININ BELİRLENMESİ	207
C YÜK-ÇATLAK AĞZI AÇIKLIĞI VERİLERİ	214
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	225

SİMGE LİSTESİ

D	Agreganın geçtiği en büyük elek göz açıklığı
d	Agreganın üzerine aktığı en küçük elek göz açıklığı
M_i	Ağırlık fonksiyonu
a_i, b_i	Ağırlık fonksiyonu sabitleri
AD	Aşınma değeri
f_c	Basınç dayanımı
BSD	Basıncılı su işleme derinliği
m_2	Belirtilen eleküsti kalan numunenin işlem sonu kalan kuru kütlesi
K	Beton tokluk değeri
ε	Birim boy değişimi
L	Boy
Δ	Boy değişimi değeri
a	Çatlak ağzı açıklığı değeri
a_0	Çentik yüksekliği
h_1	Çökeltinin üst seviyesinin tabana olan seviyesi
h_2	Çökeltinin koyu kısmının üst seviyesinin tabana olan seviyesi
tt	Deney süresi
m_1	Deney numunesi ilk kuru kütlesi
sM_1	Deney numunesi kısmının kütlesi
F	Donma çözünme değeri
f_e	Eğilme dayanımı
E.M.	Elastisite modülü
E	En
m_0	Etüv kurusu ağırlık
σ	Gerilme
V	Hacim
ΔV	Hacim kaybı
fM_1	Her tane büyüklüğü fraksiyonundaki tanelerin toplam kütlesi
fM_2	Her tane büyüklüğü fraksiyonundaki şablonda tespit edilen ve ilgili aralıktan geçen tanelerin kütlesi
K_{IC}^{ini}	İlk kırılma tokluğu
k_{ilk}	İlk kılcallık katsayısı
k_{iki}	İkincil kılcallık katsayısı
l_1	İlk boy ölçümü değeri (ıslak hal)
K_{IC}^{un}	Kararsız kırılma tokluğu
A	Kesit alanı
I	Kılcallıkla su emme değeri
D	Kiriş yüksekliği
B	Kiriş genişliği
D_{nssm}	Klorür taşıyım katsayısı
x_d	Klorür işleme derinliği
%Cl-	Klorür içeriği yüzde değeri
K_{IC}	Kohezif tokluk
S.Eq	Kum eşdeğerliği değeri
ε_r	Kuruma büzülmesi

l_3	Kuru uzunluk değeri
Δm	Kütle kaybı
sM_2	Kübik olmayan tanelerin kütlesi
%S	Kükürt içeriği yüzde değeri
σ_u	Ölçülen en büyük gerilme
P_u	Ölçülen en büyük yük
π	Pi sayısı
n	Proplar arası mesafe
δ	Sehim
t	Ses geçiş süresi
T	Sıcaklık
m_{sa}	Suda ölçülen ağırlık
SE	Su emme değeri
%SO ₃	Sülfat içeriği yüzde değeri
l_2	Son boy ölçümü değeri (kuru hal)
m_t	t anındaki kütlede oluşan değişim
U	Uygulanan voltaj
f_t	Yarmada çekme dayanımı
m_{ss}	Yüzey kuru suya doygun ağırlık
γ	Yoğunluk
ρ	Yığın yoğunluk
P	Yük değeri
h	Yükseklik

KISALTMA LİSTESİ

AOM	Yapışmış eski harç kalıntısı
ASR	Alkali silika reaksiyonu
ASTM	American Society for Testing and Materials
BF	Bazalt fiber
BMM	Bilyeli Öğütme İyileştirme Yöntemi
COD	Çatlak açılması değeri
CMOD	Çatlak ağzı açılması değeri
CTOD	Çatlak dibi açılması değeri
ÇKKM	Çift-K Kırılma Modeli
EN	European Norm
FI	Yassılık indeksi
ITZ	Ara geçiş fazı
KAi	Karbon ayak izi
LA	Los Angeles aşınma katsayısı
NA	Doğal agrega
oBMM	Optimize edilmiş Bilyeli Öğütme İyileştirme Yöntemi
R	Devir
RA	Geri kazanılmış agrega
RAC	Geri kazanılmış agregalı beton
RAi	İyileştirilmiş geri kazanılmış agrega
RAiC	İyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı beton
RA2	11,2-22,4mm geri kazanılmış agrega
RA2i	11,2-22,4mm iyileştirilmiş geri kazanılmış agrega
RA1i	4-11,2mm iyileştirilmiş geri kazanılmış agrega
RA1	4-11,2mm geri kazanılmış agrega
RA12	4-22,4mm geri kazanılmış agrega (RA1+RA2)
RA12i	4-22,4mm iyileştirilmiş geri kazanılmış agrega (RA1+RA2)
S	Demir bilye
SF	Silis dumanı
SI	Şekil indeksi
TOPSİS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TS	Türk Standardı
UGH	Ultra ses geçiş hızı
XRD	Kalitatif mineral analizi
YYA	Yapım-yıkıntı atığı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Los Angeles Cihazı (TS EN 1097-2)	10
Şekil 2.2 Verniyelli kumpas (TS EN 933-4).....	12
Şekil 2.3 Kum eşdeğerliği deneyi ölçümü (TS EN 933-8).....	14
Şekil 2.4 Elastisite modülü deney düzeneği	19
Şekil 2.5 Su emme-yoğunluk değerleri belirlenmek üzere suda bekletilen numuneler	20
Şekil 2.6 Karışım tane dağılımı grafiği.....	23
Şekil 2.7 NA, RA, RAI'nin beton performansı üzerine etkisi: (1) NA içeren beton, (2) RAI içeren beton, (3) RA içeren beton.....	32
Şekil 2.8 Beton basınç dayanımları.....	33
Şekil 2.9 Yarmada çekme dayanımı sonuçları	34
Şekil 2.10 Betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	37
Şekil 2.11 Bağlı elastisite modülü değerleri	38
Şekil 2.12 Eğilme dayanımı değerleri	39
Şekil 3.1 Taze beton deneyleri (a) hava içeriği tayini, (b) slump çökme deneyi.....	44
Şekil 3.2 Numunelerin kirece doygun suda kürü	44
Şekil 3.3 Sertleşmiş beton deneylerinden kesitler: (a) basınç deneyi, (b) yarmada-çekme deneyi, (c) elastisite modülü deneyi, (d)-(e) su emme ve yoğunluk deneyleri	51
Şekil 3.4 Çentikli kiriş eğilme deneyinden kesitler: (a) kirişe çentiğin açılması, (b) kiriş ağırlığının belirlenmesi, (c)-(d) deney düzeneği ve deneyde kullanılan cihazlar	52
Şekil 3.5 Çentikli kiriş eğilme deney düzeneği	53
Şekil 3.6 Basıncı su işleme derinliği deney düzeneği (TS EN 12390-8)	60
Şekil 3.7 Klorür iyon geçirimsizliği deney düzeneği (NT 492): (a) numunenin deney düzeneğine yerleştirilmiş hali (b) numunenin yerleştirildiği cihaz parçasından boy kesit ve en kesit	61
Şekil 3.8 Klorür işleme derinliği ölçümü (NT 492).....	62
Şekil 3.9 Aşınma deneyi düzeneği (TS EN 14157)	63
Şekil 3.10 Kılcal su emme deney düzeneği (ASTM C1585 - 13)	65
Şekil 4.1 RA1 ve RA2 su emme-devir-bilye değerlerinin Matlab'da görselleştirilmesi: (a) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (b) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü, (c) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (d) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü	70
Şekil 4.2 Geri kazanılmış agrega genel görünüşü	75
Şekil 4.3 İyileştirilmiş geri kazanılmış agrega genel görünüşü.....	75
Şekil 4.4 RA ve RAI içeren betonlarda su emme değerleri.....	77
Şekil 4.5 RA ve RAI içeren betonlarda yoğunluk değerleri	77
Şekil 4.6 SF ile RA ve RAI içeren betonlarda su emme değerleri.....	79
Şekil 4.7 SF ile RA ve RAI içeren betonlarda yoğunluk değerleri	80
Şekil 4.8 BF ile RA ve RAI içeren betonlarda su emme değerleri	81
Şekil 4.9 BF ile RA ve RAI içeren betonlarda yoğunluk değerleri	82

Şekil 4.10	%5 SF+BF ile RA içeren betonlarda su emme değerleri.....	83
Şekil 4.11	%10 SF+BF ile RA içeren betonlarda su emme değerleri	84
Şekil 4.12	%5 SF+BF ile RA içeren betonlarda yoğunluk değerleri	84
Şekil 4.13	%10 SF+BF ile RA içeren betonlarda yoğunluk değerleri	85
Şekil 4.14	Değişik oranlarda RA ve RAI içeren betonlarda UGH değerleri.....	90
Şekil 4.15	SF içeren betonlara hava içeriği-UGH ilişkisi.....	98
Şekil 4.16	BF içeren betonlara hava içeriği-UGH ilişkisi	99
Şekil 4.17	SF içeren betonlara yoğunluk-UGH ilişkisi	100
Şekil 4.18	BF içeren betonlara yoğunluk-UGH ilişkisi.....	100
Şekil 4.19	RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri	101
Şekil 4.20	SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri	103
Şekil 4.21	BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri.....	105
Şekil 4.22	%5 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri	107
Şekil 4.23	%10 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri	107
Şekil 4.24	RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri	117
Şekil 4.25	SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri	118
Şekil 4.26	BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri	120
Şekil 4.27	%5SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri.....	121
Şekil 4.28	%10 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri	121
Şekil 4.29	NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	124
Şekil 4.30	SF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki	125
Şekil 4.31	BF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki	126
Şekil 4.32	SF+BF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	126
Şekil 4.33	RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri.....	129
Şekil 4.34	SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri.....	130
Şekil 4.35	BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri	131
Şekil 4.36	%5 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri	132
Şekil 4.37	%10 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri	133
Şekil 4.38	RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri	136
Şekil 4.39	SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri	137
Şekil 4.40	BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri.....	138
Şekil 4.41	%5 SF ve BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri	139
Şekil 4.42	%10 SF ve BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri.....	140
Şekil 4.43	Kritik çatlak ağzı açıklığı değerleri	144
Şekil 4.44	İlk çatlama tokluğu değerleri	145

Şekil 4.45 Kararsız kırılma tokluğu değerleri.....	145
Şekil 4.46 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı	147
Şekil 4.47 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu.....	147
Şekil 4.48 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu.....	148
Şekil 4.49 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı	149
Şekil 4.50 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu	150
Şekil 4.51 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu	151
Şekil 4.52 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı.....	152
Şekil 4.53 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı.....	153
Şekil 4.54 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu	154
Şekil 4.55 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu.....	155
Şekil 4.56 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu.....	156
Şekil 4.57 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu.....	156
Şekil 4.58 TOPSİS ile belirlenmiş beton serileri	159
Şekil 4.59 Aşınma değerleri.....	161
Şekil 4.60 Betonların başlangıç kılcalık katsayısı değerleri.....	163
Şekil 4.61 Betonların ikincil kılcalık katsayısı değerleri.....	163
Şekil 4.62 Betonların basınçlı su işleme derinliği değerleri.....	164
Şekil 4.63 Betonların klorür taşınım katsayısı değerleri	167
Şekil 4.64 Betonların karbon ayakizi değerleri (sürekli kenar çizgisi: tesiste geri dönüşüm, kesikli kenar çizgisi: yerinde geri dönüşüm).....	170
Şekil 4.65 Klorür taşınım katsayısı ile kılcalık katsayısı ilişkisi.....	171
Şekil 4.66 Klorür taşınım katsayısı basınç dayanımı ilişkisi.....	172
Şekil 4.67 Aşınma değeri ile yoğunluk ilişkisi	173
Şekil 4.68 Aşınma değeri ile basınç dayanımı ilişkisi	173
Şekil 4.69 Kılcalık katsayısı su emme ilişkisi.....	174
Şekil 4.70 Basınçlı su işleme derinliği ultra ses geçiş hızı ilişkisi	174
Şekil 4.71 RA üzerinden alınan görüntü	177
Şekil 4.72 NA içeren betondan alınan görüntü	177
Şekil 4.73 RA içeren betondan alınan görüntü.....	178
Şekil 4.74 RAi içeren betondan alınan görüntü	178
Şekil 4.75 RA ve BF içeren betondan alınan görüntü	179
Şekil 4.76 RA ve SF içeren betondan alınan görüntü	179

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Çimentonun özellikleri.....	7
Tablo 2.2 Çok ince malzeme muhtevası kategorileri (TS 706 EN 12620).....	9
Tablo 2.3 Kavkı içeriği kategorileri (TS 706 EN 12620).....	9
Tablo 2.4 Agregalar aralıklarına göre kullanılan bilye sayıları (TS EN 1097-2).....	10
Tablo 2.5 Los Angeles katsayısı kategorileri (TS 709 EN 12620).....	10
Tablo 2.6 Şekil indeksi kategorileri (TS 706 EN 12620).....	12
Tablo 2.7 Tane büyüklüğü fraksiyonu (TS EN 933-3).....	13
Tablo 2.8 Yassılık indeksi kategorileri (TS 706 EN 12620).....	13
Tablo 2.9 Donma çözünme deneyi için gerekli agrega miktarları (TS EN 1367-1).....	15
Tablo 2.10 Donma çözünme direnç değerleri için kategoriler (TS 706 EN 12620).....	15
Tablo 2.11 Alkali silika reaksiyonu deneyi sonucu değerlendirme tablosu (ASTM C 1260-14).....	16
Tablo 2.12 Geri kazanılmış agrega bileşenleri için tanımlamalar (TS 706 EN 12620).....	17
Tablo 2.13 Geri kazanılmış iri agregalardaki bileşenler için kategoriler (TS 706 EN 12620).....	17
Tablo 2.14 Karot numunelerine ait fiziksel ve mekanik deney sonuçları.....	19
Tablo 2.15 RA' ya ait özellikler.....	20
Tablo 2.16 BMM uygulanmış RA1'den elde edilen 4-11mm malzemeye ait su emme-yoğunluk değerleri.....	21
Tablo 2.17 BMM uygulanmış RA2'den elde edilen 4-11mm ve 11,2-22,4mm malzemeye ait su emme-yoğunluk değerleri.....	21
Tablo 2.18 BMM uygulaması sonrası elde edilen işlem görmüş numunelere ait istatistiki parametreler.....	24
Tablo 2.19 Agregalar deneylerine ait sayısal sonuçlar.....	25
Tablo 2.20 Süper akışkanlaştırıcı özellikleri.....	26
Tablo 2.21 Beton serilerinin kodları.....	26
Tablo 2.22 Beton serilerine ait bileşenler.....	27
Tablo 2.23 28. günde yapılan beton deneyleri ve deneylere ait detaylar.....	28
Tablo 2.24 Deney sonuçları.....	31
Tablo 2.25 NAC'e ait sonuçlara göre bağlı değerler.....	32
Tablo 2.26 Betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı ve RA içeriği değerleri.....	35
Tablo 2.27 Beton dayanımlarının istatistiksel sonuçları.....	36
Tablo 3.1 Silis dumanının özellikleri.....	43
Tablo 3.2 Bazalt fiberin özellikleri.....	43
Tablo 3.3 Beton serilerine ait kodlamalar.....	45
Tablo 3.4 Beton serilerine ait bileşenler.....	48
Tablo 3.5 Numuneler üzerinde yapılan deneyler ve diğer detaylar.....	50
Tablo 3.6 Evrensel ağırlık fonksiyonu parametreleri.....	54
Tablo 3.7 Deney sonuçları.....	55
Tablo 3.8 Betonlara ait kırılma parametreleri.....	57
Tablo 3.9 TOPSİS için belirlenen ağırlık katsayıları.....	59
Tablo 3.10 TOPSİS ile belirlenen en iyi beton serileri.....	60
Tablo 3.11 Kılcal su emme deneyinde dikkate alınacak süreler.....	64

Tablo 3.12 Mahallere ait adres bilgisi (Kaynak: Google Haritalar).....	66
Tablo 3.13 Mevkiler arası mesafeler (Kaynak: Google Haritalar).....	66
Tablo 3.14 Malzemeler için harcanan enerji değerleri.....	67
Tablo 3.15 Taşıma için kullanılan araçlara ait bilgiler.....	67
Tablo 3.16 En iyi beton serilerine ait kalıcılık deney sonuçları ve karbon ayak izleri.....	68
Tablo 4.1 SF içeren beton serileri.....	87
Tablo 4.2 SF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri.....	92
Tablo 4.3 BF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri.....	93
Tablo 4.4 SF ile BF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri.....	95
Tablo 4.5 SF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri.....	111
Tablo 4.6 BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/ basınç dayanımı oranı değerleri.....	113
Tablo 4.7 %5 SF ile BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri.....	114
Tablo 4.8 %10 SF ile BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri.....	115
Tablo 4.9 Betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki doğrusal ilişkiler.....	128
Tablo 4.10 Yaşam Döngüsü Analizi sonuçları.....	170
Tablo 4.11 En iyi beton serilerine ait özellikler.....	183

Geri Kazanılmış Agrega Kullanımının Beton Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Hasan DİLBAS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Özgür ÇAKIR

Bu tez çalışmasında, geri kazanılmış agreganın (RA) betonda kullanılabilirliğini araştırmak üzere, mekanik iyileştirme yöntemi ile mineral katkı ve fiber katkının birlikte kullanımı incelenmiştir. İlk etapta, mekanik iyileştirme yöntemlerinden olan Bilyeli Öğütme İyileştirme Yöntemi (oBMM) optimize edilmiş ve RA üzerine uygulanmış, oBMM'in beton özellikleri üzerine etkisini incelemek üzere, doğal agregası (NA), %20-40-60 RA ve %20-40-60 iyileştirilmiş RA (RAi) içeren beton serileri üretilmiş ve betonların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. oBMM uygulanmasına rağmen RA'dan giderilememiş eski harç kalıntısının (AOM) betona olan olumsuz etkisini gidermek üzere, ikinci etapta, silis dumanı (SF) ve bazalt fiber (BF) beton karışımlarında kullanılmış ve etkinlikleri gözlemlenmiştir. NA, %20-40-60 RA ve RAi ile %5-10 SF ve %0,25-0,50-1,0 BF içeren toplamda 84 adet beton serisi ikinci etapta üretilmiş ve sertleşmiş betonlar üzerinde fiziksel, mekanik ve kırılma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak, beton serileri içerisinde her bir RA ve RAi kullanım oranı ve NA için en iyi beton serileri TOPSİS yöntemi ile belirlenmiştir. Toplamda 8 adet beton serisi üzerinde

kalıcılık deneyleri yapılmış ve ayrıca en iyi beton serilerine ait karbon ayak izi değerleri belirlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, RAI'nin beton performansını ihmal edilebilir seviyede düşürdüğü tespit edilmiştir. oBMM'in geri kazanılmış agregalı beton (RAC) fiziksel-mekanik-kırılma-kalıcılık performansına olumlu katkı sağladığı belirlenirken, RAI içeren betonların (RAiC) kontrol betonuna yakın beton performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Diğer yönden, betonda %60'a kadar RAI kullanımının optimum kullanım oranı olduğu yapılan deneyler sonucu belirlenmiş ve bu değer literatürde önerilen %30 optimum kullanım oranının iki katı olduğu tespit edilmiştir. Diğer yönden, objektif olarak TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ile belirlenen en iyi beton serilerinin hepsinin %10 SF içerdiği, bu serilerin kalıcılık performanslarının kontrol betonuna yakın olduğu ve ayrıca bu betonların kontrol betonuna kıyasla daha düşük karbon ayak izi (KAi) değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri kazanılmış agregası, mekanik iyileştirme, silis dumanı, bazalt lif, TOPSİS

Investigation of the Effect of Recycled Aggregate Use on the Concrete Properties

Hasan DİLBAS

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Özgür ÇAKIR

In this study, to investigate the usability of recycled aggregate (RA) in concrete, mechanical treatment method with/without silica fume (SF) and basalt fiber (BF) is considered. At first, Ball Mill Method (oBMM) is optimized and applied to treat RA. To observe the effect of oBMM on the physical and mechanical properties of concrete, concrete series included natural aggregate (NA), 20-40-60 RA% and treated RA (RAi) are produced. Then, at second, SF and BF are used together and separately at various proportions in mixes to enhance the negative effect of meaning attached old mortar on RAi after oBMM application. For comparison purposes, natural aggregate (NA), 20-40-60 RA% and 20-40-60% treated RA (RAi) are used in the concretes and hence, 84 concrete series are produced. The physical, mechanical and fracture tests are conducted on the concrete specimens. Then, the best concrete series for each replacement ratios according to their performances are determined by using TOPSİS objectively and are subjected to durability test. Also, the carbon footprint of the best concretes is found.

According to the test results, it is found that RAI decreases the performance of concrete marginally. oBMM causes an improvement in the physical, mechanical and fracture parameters of concretes. After the optimization process, the RA use in concrete increased up to 60%. The ratio of 30% is commonly recommended as the optimum RA proportion in concrete in the literature and 60% is two times of that. In addition, it is interesting that the best concretes for each replacement proportions selected objectively by TOPSIS include 10% SF and have similar durability properties with control concrete but lower carbon footprint than control concrete.

Keywords: Recycled aggregate, mechanical treatment, silica fume, basalt fiber, TOPSIS



1.1 Literatür Özeti

2. Dünya Savaşı, Afganistan Savaşı, Suriye Savaşı ve Irak Savaşı gibi dünyada yaşanan geniş toprakları –ülkeleri– etkileyen savaşlar, 7,5 şiddetindeki Gölçük Depremi, 7,2 şiddetindeki Van Depremi ve 8,4 şiddetindeki Peru Depremi gibi büyük yıkımlara neden olan depremler ve Katrina Kasırgası, Mitch Kasırgası ve Dorian Kasırgası gibi kasırgalar dâhil olmak üzere meydana gelen doğal afetler ile dünyada birçok ülkede yürütülen kentsel dönüşüm çalışmaları sonucunda kent merkezlerinde büyük hacimli yapı yıkıntı atıkları (YYA) meydana gelmiş, bu durum ülkeleri atık bertarafı için çözüm arayışı içine itmiştir [1]. Ülkemiz açısından konu ele alındığında, geçmişte yaşanan depremler sonrasında şehir merkezlerinde yüksek miktarlarda YYA olduğu ve etkili bertaraf mekanizmaları geliştirilemeyip çoğunun deniz dolgusu ve yol alt dolgusu gibi uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir [2]. Günümüzde devam etmekte olan kentsel dönüşüm çalışmaları neticesinde kentlerde -özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde- atık depolama sahalarında yüksek miktarlarda YYA biriktiği, yol alt malzemesi olmak üzere çeşitli taşıyıcı olmayan sistem elemanlarında bertaraf edildiği görülmektedir [3]. Yakın gelecekte ülkemizde YYA problemi oluşturan ana etmenlerin kentsel dönüşüm çalışmaları ve deprem, sel gibi doğal afetlerin olacağı tahmin edilebilir. Yakın gelecekte, ülke genelinde artan kentsel dönüşüm çalışmalarıyla YYA miktarının daha da artması ve yapılaşmanın yoğun olduğu Marmara Bölgesi gibi bölgelerde depremler sonucu YYA miktarının ciddi oranda artışı, YYA problemi çözüm önerilerinin hızla ve ivmelenerek devam etmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Dünya’da birçok ülkede yaşanan YYA problemi ve çözümüne yönelik yapılan çeşitli araştırmalarda YYA’nın betonda agrega olarak kullanımı ve böylelikle bertaraf edilmesi önerilmektedir [4]. Yapılan çalışmalar, YYA’nın betonda geri kazanılmış agrega (RA) olarak kullanılması durumunda, RA’nın beton özelliklerini olumsuz

etkilediğini göstermekte ve bu olumsuzluğun RA'nın sahip olduğu yapışmış eski harç kalıntısından (AOM) ileri geldiği rapor edilmektedir [5].

Geri kazanılmış agregalı beton (RAC) çalışmaları, RA'dan kaynaklı oluşan zayıf beton özelliklerinin iyileştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadırlar ve çalışmalarda önerilen RA iyileştirme metotlarının iki ana grupta toplandığı görölmektedir [6]: Eski harç kalıntısının giderilmesi ve eski harç kalıntısının güçlendirilmesi. Asitle RA'nın solüsyonda çözülmesi sonucu AOM fazının RA'dan giderilmesi ve mekanik aşındırma ile AOM katmanının RA'dan uzaklaştırılması gibi prosesler genellikle RA'dan AOM kalıntısı azaltma yöntemleri olarak literatürde çeşitli çalışmalarda kullanılırken, AOM güçlendirme çalışmalarının polimer emdirme ve puzolan çamuru emdirme gibi prosesleri dikkate aldığı görölmektedir [6].

Yöntemlerde kullanılan malzemelerin, ekipmanların cinsi ve uygulanan proseslerin şekli dikkate alındığında; iyileştirme işlemlerinin birbirinden ayrıldıkları ve ayrıca yöntemlerin avantajlara/dezavantajlara sahip oldukları görölmektedir. Bu noktada, yöntemlerin RA üzerindeki iyileştirme performansları büyük önem kazanmaktadır. Örneğin, iyileştirme işlemleri uygulanması sırasında oluşturdıkları çevre yükü miktarı, çevreye zararlı toksin açığa çıkartıp çıkartmadıkları, enerji tüketim değerlerinin seviyeleri, atmosfere saldıkları karbon miktarları gibi parametreler bakımından mekanik iyileştirme yöntemleri ile mekanik/mikro dalga iyileştirme yöntemleri en çevreci yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

Bu noktada, mekanik iyileştirme yöntemleri incelendiğinde, uygulanan prosesler bakımından mekanik iyileştirme yöntemlerinin üç alt dalda toplandığı görölmektedir: 1) Aşındırma ile iyileştirme yöntemi, 2) Ani etki ile iyileştirme yöntemi ve 3) Basınç ile iyileştirme yöntemi. Mekanik iyileştirme yöntemlerinden aşındırma ile iyileştirme yönteminin; ani etki ile ve basınç ile iyileştirme yönteminden daha başarılı olduğu, daha az enerji tükettiği ve daha az karbon salınımına neden olduğu rapor edilmektedir [7].

Literatür incelendiğinde, aşındırma ile iyileştirme yöntemlerinin çeşitli şekillerde uygulanılması sonucu iyi sonuçların alındığı rapor edilmekte [5], [8], [17], [18], [9]–[16] ve aşındırma ile iyileştirme yöntemlerinden Bilyeli Öğütme İyileştirme Yöntemi

(BMM) kullanılan deneysel çalışmalar dikkate alındığında, 3 ana temada BMM'in yapılan çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir:

- 1) BMM'nin ve/veya BMM ile diğer iyileştirme yöntemlerinin, RA'nın kaynak özellikleri dikkate alınmadan ve optimize edilmeden uygulanan BMM'nin RA'ya uygulandığı çalışmalar [5], [8]–[13].
- 2) BMM'nin ve/veya BMM ile diğer iyileştirme yöntemlerinin, RA'nın kaynak özellikleri dikkate alınarak ve optimize edilmeden uygulanan BMM'nin RA'ya uygulandığı çalışmalar [14]–[17].
- 3) BMM ile diğer iyileştirme yöntemlerinin birlikte, RA'nın kaynak özellikleri dikkate alınarak ve optimize edilerek uygulanan iyileştirme yönteminin RA'ya uygulandığı çalışmalar [18].

Özetle, BMM'in optimize edilerek RA kaynak özellikleri dikkate alınarak RA'ya uygulandığı çalışmaların literatürde çok az çalışıldığı görülmektedir. Bu noktada, optimize edilerek iyileştirme yönteminin uygulanmasının ve RA kaynağı özelliklerinin bilinmesinin uygulamada önemli faydaları olduğu belirtilmektedir. Aksi halde,

- 1) Yöntemin düşük seviyede uygulanmasıyla, istenmeyen seviyede zayıf RA özelliklerinin elde edilmesi [19],
- 2) Yöntemin fazla seviyede uygulanmasıyla, mekanik iyileştirmede fazla kuvvet uygulanması sonucu RA bünyesinde ek çatlakların, kırıkların ve fisürlerin oluşması [20], [21],
- 3) Yöntemin fazla seviyede RA'ya uygulanmasıyla, enerji sarfiyatının artması ve böylelikle atmosfere karbon salınımının artışı ve ayrıca zaman kaybının yaşanması [7]

mümkün olabilecektir.

Yukarıda bahsi geçen durumlara ek olarak, RA'ya uygulanacak optimize edilmiş BMM (oBMM) ile iyileştirilen RAi'nin beton özelliklerine etkisi, betonda RAi'nin oluşturabileceği muhtemel olumsuzluklar (bu olumsuzluklar tamamen temizlenememiş AOM'den ileri gelebilecektir), bu olumsuzlukları giderecek birincil iyileştirme proseslerine ek ikincil iyileştirme proseslerinin geliştirilmesi ve

uygulanması ile ilgili literatürde çalışmaların olmadığı da görülmektedir. Yapılan ikili iyileştirme yöntemlerinin genellikle polipropilen + silis dumanı [22], çelik fiber + silis dumanı [23], bazalt fiber + nano-silika [24], atık plastik parçası + uçucu kül [25], çelik fiber + uçucu kül [26], cam fiber + uçucu kül [27], bazalt fiber + asitle iyileştirme [28], kimyasalla iyileştirme + mekanik iyileştirme [13], ısıtma + mekanik iyileştirme [18] gibi iyileştirme kombinasyonlarını içerdiği ve yürütülen deneysel çalışmalarda başlıca fiziksel ve mekanik beton özelliklerinin incelendiği görülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Birçok araştırmacı, yeni beton üretiminde YYA'nın RA olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yürüterek, doğal yaşama zarar verilmeksizin veya en az zararla gelecek nesillere yaşanabilir bir çevre bırakmayı hedeflemiştir [29]–[31]. YYA'nın yeni betonda RA olarak kullanımı esnasında, araştırmacılar RA'nın farklı özellikteki fazları nedeniyle ciddi problemlerle karşı karşıya kalmışlardır. Bu fazlar, doğal agrega (NA) fazı, AOM fazı ve NA-AOM arasında bulunan ara geçiş fazıdır (ITZ) [32]. RA'da bulunan NA fazı, AOM'den daha iyi özelliklere sahiptir. AOM hem düşük yoğunluk, düşük elastisite modülü ve düşük basınç dayanımı özelliklerine sahip hem de yüzey çatlaklarından dolayı yüksek su emme özelliğine sahiptir [32]–[36]. Bu sebeple, RA'nın sahip olduğu zayıf özellikler, RA'nın beton üretiminde kullanımını kısıtlamaktadır. RAC ile ilgili yapılan çalışmaların genelinde, RA'nın sertleşmiş betonun mekanik performansını düşürdüğü, taze betonun işlenebilirlik sorunlarını oluşturduğu ve kalıcılıkta olumsuz etkilere neden olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir [37]–[41].

Bu tez kapsamında,

- 1) Düşük dayanımlı atık betondan üretilen RA için BMM optimizasyon işleminin yapılması,
- 2) oBMM ile AOM fazının büyük ölçüde giderilerek söz konusu RA olumsuz özelliklerinin iyileştirilmesi,
- 3) RAI üzerindeki AOM'nin tamamıyla temizlenememesi nedeniyle (teorikte mümkün ise de pratikte bu imkânsız gibi görünmektedir) RAI'nin betonda oluşturabileceği muhtemel olumsuzlukları/beton performans düşüşlerini

giderecek iyileştirme kombinasyonlarının uygulanması (oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF), beton parametreleri üzerine etkilerinin incelenmesi ve olumsuz etkilerin azaltılması,

- 4) Üretilen betonlar içinden en iyi beton serilerinin bir Karar Destek Sistemi olan TOPSİS ile *objektif olarak belirlenmesi* aşamasında kullanılacak ağırlık katsayılarının literatür verilerinden oluşturulacak veri tabanı yardımıyla fiziksel ve mekanik beton parametreleri için oluşturulması,
- 5) En iyi beton serilerinin oluşturulan ağırlık katsayıları da kullanılarak TOPSİS ile belirlenmesi, bu betonların kalıcılık özelliklerinin belirlenmesi ve karbon ayak izlerinin tespiti,
- 6) En iyi beton serileri içinden kontrol betonu özelliklerine yakın veya daha üstün özellikte *çevreci ve yeşil* geri kazanılmış agregalı betonların seçilmesi,

amaçlanmaktadır.

Böylelikle bu tez kapsamında üretilecek bilgilerin kullanılması ile aşağıda belirtilen durumlara katkı sağlanması öngörülmektedir:

- 1) *Düşük enerji tüketimli ve düşük karbon salımlı çevreci RA iyileştirme yöntemlerinden biri olan BMM'nin optimizasyon ile kullanımının RA üzerindeki olumlu etkisinin ortaya konulması.*
- 2) Deprem, sel, toprak kayması, kentsel dönüşüm, vb. sebeplerle Ülkemizde ve dünyada şu an oluşan ve de gelecekte oluşması beklenen yüksek miktardaki beton atıkların, bu tez çalışmasında belirlenecek, irdelenecek ve uygulanacak iyileştirme işlemiyle yüksek oranda betonda kullanımının sağlanması ve betonda kullanılacak *optimum RA kullanım oranının* artırılması.
- 3) YYA dönüşüm tesislerinde kullanılmak üzere geliştirilecek endüstriyel tipte bir mekanik öğütme-iyileştirme cihazı için *bilgi birikiminin* sağlanması.
- 4) Genellikle doğaya kontrolsüzce salınarak/doğada depolanarak bertaraf edilen beton atıkların, geri kazanılmış agrega olarak bir *yapı malzemesi* şeklinde kullanılabilirliğinin ortaya konulması.
- 5) Beton atıklarının bir yapı malzemesi olarak ekonomiye kazandırılmasıyla Ülkemiz ve dünyanın *sürdürülebilir büyümesine* katkı sağlaması, ilgili

süreçleri yöneten ve işleten yeni geri kazanım sektörlerinin/iş kollarının oluşması.

- 6) Beton atıkların bir yapı malzemesi olarak betonda kullanımıyla doğaya salınmaması/doğada depolanmaması ve böylelikle oluşacak yeraltı/yerüstü *kirliliklerinin önüne geçilmesi.*
- 7) Küçük ölçekte bölgemizde ve Ülkemizde, büyük ölçekte ise dünyada *refahın artışı*na katkı sağlanması.

1.3 Hipotez

BMM'in optimize edilmesi ile geri kazanılmış agregaların fiziksel özellikleri en ideal düzeyde iyileştirilebilir ve bu durum geri kazanılmış agregaların yeni betonda kullanım oranlarının daha yüksek tutulmasına ve dolayısıyla daha fazla yapı yıkıntı atığının geri dönüşümüne fayda sağlar. Ayrıca, iyileştirilmiş geri kazanılmış agregadan giderilemeyen ve kalan eski harç kalıntısının iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya içeren yeni betonun özellikleri üzerine olumsuz etkisi, betonda karışımlarda mineral katkı ve fiber kullanımı ile giderilebilir.

DENEYSEL ÇALIŞMA BÖLÜM 1: KARAKTERİZASYON VE OPTİMİZASYON

2.1 Deneysel Çalışma

Tez çalışmasının bu bölümünde, 4-11 mm ve 11,2-22,4 mm RA üzerine uygulanan BMM optimizasyon çalışması ve agregâ deneyleri hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca, BMM'in beton özellikleri üzerine etkisini incelemek üzere üretilen 3 ana grupta (doğal agregalı beton grubu, geri kazanılmış agregalı beton grubu ve iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı beton grubu) toplamda 7 beton serisi hakkında bilgi verilmektedir. Beton serileri laboratuvar ortamında üretilmiş, üretilen betonlar 28 gün $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de kür edilmiş ve 28. günde fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur.

2.1.1 Malzemeler ve Deneysel Metot

2.1.1.1 Çimento

Deneysel çalışmada CEM I 42,5R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ait özellikler Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1 Çimentonun özellikleri

Özellik	Değer
SiO ₂ (%)	21,9
CaO (%)	64,0
SO ₃ (%)	2,6
Al ₂ O ₃ (%)	6,0
Fe ₂ O ₃ (%)	3,5
MgO (%)	0,9
Yoğunluk (g/cm ³)	3,14
Klorür (%)	-
Spesifik yüzey alanı (m ² /kg)	3520
Isıtma kaybı (%)	1,1
(Na ₂ O) _{eşd}	<0,6

2.1.1.2 Agregalar

Agregalar üzerinde, TS 706 EN 12620'de belirtilen agregalar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada 3 çeşit agregalar kullanılmış olup bunlar doğal agregalar (NA) geri kazanılmış agregalar (RA), optimize edilmiş BMM (oBMM) ile iyileştirilmiş RA (RAi)'dir. Tüm beton serileri, ince agregalar olarak doğal agregalar içermekte olup, RA ve RAi hacimce iri NA ile yer değiştirilerek %20-40-60 oranlarında beton karışımlarında kullanılmışlardır. Detaylıca belirtmek gerekirse, betonda toplam agregalar hacminde

- 4-11,2 mm agregalar %20 oranında
- 11,2-22,4 mm agregalar %40 oranında
- 4-22,4 mm agregalar %60 oranında

hacim kaplamaktadır. Ayrıca, karışımlarda kullanılan NA ile RA ve RAi aynı tane dağılımına sahiptir ve her bir tane aralığındaki agregalar hacimce yer değiştirilerek kullanılmışlardır. Böylelikle karışımların tane dağılımı sabit tutulmuştur.

RA, İstanbul'da yıkılmış bir yapının beton elemanlarından elde edilmiştir. Atık betonlar; İSTAÇ atık tesisinde kırıcılarla kırılarak boyutları küçültülmüş, iri agregalar haline getirilmiş, çeneli kırıcı ile boyut ayarlaması yapılarak bu tez çalışmasında karışımlarda kullanılmıştır. RA kaynağı herhangi bir kirletici içermemektedir (örn., tuğla, mermer, seramik, strafor).

Çok ince malzeme içeriği deneyi, TS EN 933-1'ye uygun olarak agregalar 24 saat $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde kurutulması ardından ilk ağırlığı belirlenmiş ve ıslak eleme yapılarak 0,063 mm göz açıklıklı elekten numuneler geçirilmiş ve elekten geçen kütle değeri kaydedilmiştir. Sonuçlar Tablo 2.2'ye göre değerlendirilmiştir.

Kavkı içeriği deneyi, TS EN 933-7'ye uygun olarak agregalar üzerinde gözle muayene ile yapılmış, kavkılar ayrılmış ve sonuçlar Tablo 2.3'e göre değerlendirilmiştir.

Tablo 2.2 Çok ince malzeme muhtevası kategorileri (TS 706 EN 12620)

Agrega	0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen kütlece yüzde	Kategori
İri agregalar	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}
0/8mm olarak sınıflandırılmış doğal agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	> 16	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}
Karışık agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 11	f_{11}
	> 11	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}
İnce agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}
İnce agregalar	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	f_{beyan}
	Serbest	f_{NR}

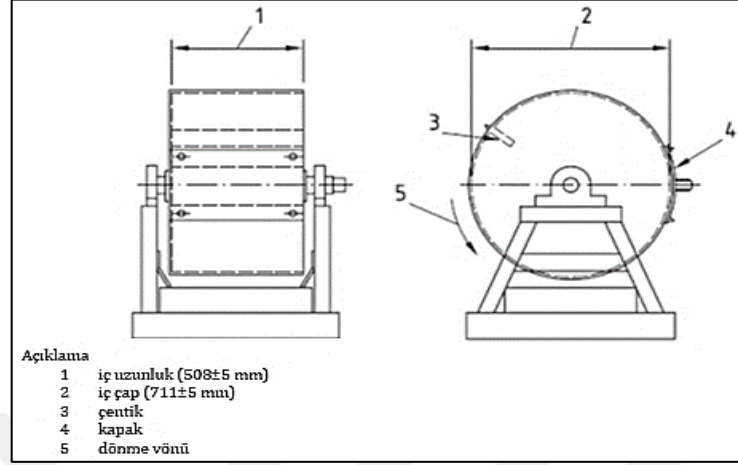
Tablo 2.3 Kavkı içeriği kategorileri (TS 706 EN 12620)

Kavkı muhtevası, %	Kategori, SC
≤ 10	SC ₁₀
> 10	SC _{beyan}
Serbest	SC _{NR}

Agregaların parçalanmaya karşı direnci, TS EN 1097-2'ye uygun olarak agregalar üzerinde Los Angeles Aşınma Cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.1). Agregalar, 24 saat $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulması ardından, deney için belirlenen uygun tane çapı aralığında 5 kg numune tambura bilyeler ile konulmuş (Tablo 2.4) ve 500 dönüş sonrası numune kaybı olmaksızın tamburdan çıkartılmıştır. Elde edilen öğütülmüş numune 1,6 mm göz açıklıklı elekten elenerek elek altı kalan miktar (2.1) ile belirlenmiştir (Tablo 2.5).

$$LA = \frac{(5000 - m)}{5000} \quad (2.1)$$

Burada LA Los Angeles katsayısı, m 1,6 mm elek altı kalan malzeme miktarıdır.



Şekil 2.1 Los Angeles Cihazı (TS EN 1097-2)

Tablo 2.4 Agrega aralıklarına göre kullanılan bilye sayıları (TS EN 1097-2)

Tane çapı aralığı, mm	Ortanca elek göz açıklığı, mm	Ortanca elekten geçen yüzde miktarı, %	Bilye sayısı	Bilye ağırlığı, gram
4 - 6,3mm	5	30 - 40	7	2930 - 3100
4 - 8mm	6,3	60 - 70	8	3410 - 3540
6,3 - 10mm	8	30 - 40	9	3840 - 3980
8 - 11,2mm	10	60 - 70	10	4250 - 4420
11,2 - 16mm	14	60 - 70	12	5120 - 5300

Tablo 2.5 Los Angeles katsayısı kategorileri (TS 709 EN 12620)

Los Angeles katsayısı	Kategori (LA)
≤15	LA ₁₅
≤20	LA ₂₀
≤25	LA ₂₅
≤30	LA ₃₀
≤35	LA ₃₅
≤40	LA ₄₀
≤45	LA ₄₅
≤50	LA ₅₀
>50	LA _{beyan}
Serbest	LA _{NR}

Su emme (SE) ve yoğunluk (γ) deneyleri, TS EN 1097-6'ya uygun olarak agregalar üzerinde yapılmıştır. Agregalar, 24 saat 110±5°C'de etüvde kurutulması ardından

ağırlıkları tartılmış (m_0) ve 24 saat laboratuvar ortamında suda bekletilmişlerdir. Yüzey kuru suya doymuş ağırlıkları (m_{ss}) ile sudaki ağırlıkları (m_{sa}) belirlenmiş ve (2.2) -(2.3) yardımıyla su emme ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir.

$$\gamma = \frac{m_0}{(m_{ss} - m_{sa})} \quad (2.2)$$

$$SE (\%) = \frac{(m_{ss} - m_0)}{(m_{ss} - m_{sa})} \quad (2.3)$$

Burada, γ (g/cm^3) yoğunluk, m_{ss} (g) suya doymuş yüzey kuru ağırlık, m_{sa} (g) suya doymuş sudaki ağırlık ve m_0 kuru değişmez ağırlıktır.

Birim ağırlık deneyi, TS EN 1097-3'e uygun olarak 24 saat $110 \pm 5^\circ C$ 'de etüvde kurutulmuş agregalar üzerinde yapılmıştır. İnce agregalar 1L ve iri agregalar 3L hacimli kap kullanılarak birim ağırlık deneyi yapılmış ve hacmi dolduran agrega miktarı (m_0) tartılarak (2.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m_0}{V} \quad (2.4)$$

Burada, ρ (g/cm^3) yığın yoğunluğu, m_0 kuru agrega ağırlığı ve V (cm^3) kullanılan kabın hacmidir.

Şekil indeksi deneyi, TS EN 933-4'e uygun olarak 24 saat $110 \pm 5^\circ C$ 'de etüvde kurutulmuş agregalar üzerinde Verniyelli kumpas yardımıyla alınan ölçümlerle yapılmıştır. Verniyeli kumpas, bir ölçüm noktası ölçüm noktasının 1/3'ü olacak şekilde ayarlanmış ağıza sahip kumpastır (Şekil 2.2) ve deneyde, boy (L) / en (E) oranı 3'ten büyük olan agregaların kütlelerinin toplam kuru kütledeki oranı ağırlıkça belirlenir. D agreganın geçtiği en büyük elek göz açıklığı ve d agreganın üzerine aktığı en küçük göz açıklığı olmak üzere; $D < 2d$ ve $D > 2d$ olan agregalar için agrega şekil indisleri (SI) (2.5) -(2.6) kullanılarak hesap edilmiştir. Bulunan SI değerleri, Tablo 2.6'ya uygun olarak kategorize edilmiştir.

$D < 2d$ için;

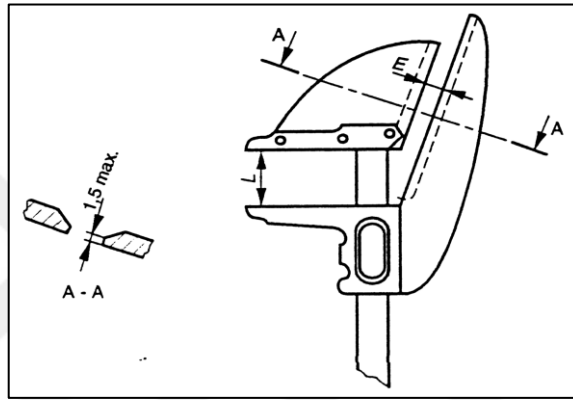
$$SI = (sM_2 - sM_1) \times 100 \quad (2.5)$$

Burada, SI şekil indisi, sM_1 (g) deney numunesi kısmının kütlesi ve sM_2 (g) kübik olmayan tanelerin kütlesidir.

$D > 2d$ için;

$$SI = \frac{\sum sM_{2i}}{\sum sM_{1i}} \times 100 \quad (2.6)$$

Burada, SI şekil indisi, sM_{1i} (g) deneye tabi tutulan tane büyüklük aralıklarındaki kütlelerin toplamı ve sM_{2i} (g) kübik olmayan deneye tabi tutulan tane büyüklük aralıklarındaki kübik olmayan tanelerin kütlesidir.



Şekil 2.2 Verniyelli kumpas (TS EN 933-4)

Tablo 2.6 Şekil indeksi kategorileri (TS 706 EN 12620)

Şekil indeksi	Kategori, SI
≤ 15	SI ₁₅
≤ 20	SI ₂₀
≤ 40	SI ₄₀
≤ 55	SI ₅₅
> 55	SI _{beyan}
Serbest	SI _{NR}

Yassılık indeksi (FI) deneyi, TS EN 933-3'e uygun olarak 24 saat $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulmuş agregalar üzerinde yassılık indeksi şablonu yardımıyla yapılmıştır. Agregalar öncelikle, tane büyüklük aralığına göre ayrılmış (Tablo 2.7), ardından şablon yardımıyla yassı agregaların miktarı (2.7) ile belirlenmiştir.

Tablo 2.7 Tane büyüklüğü fraksiyonu (TS EN 933-3)

Tane büyüklüğü fraksiyonu, mm
63/80
50/63
40/50
31,5/40
25/31,5
20/25
16/20
12,5/16
10/12,5
8/10
6,3/8
5/6,3
4/5

$$FI = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad (2.7)$$

Burada, FI yassılık indisi, fM_1 (g) her tane büyüklüğü fraksiyonundaki tanelerin toplam kütlesi ve fM_2 (g) her tane büyüklüğü fraksiyonundaki şablonda tespit edilen ve ilgili aralıktan geçen tanelerin kütleleri toplamıdır. Bulunan FI değerleri, Tablo 2.8'e göre kategorize edilmiştir.

Tablo 2.8 Yassılık indeksi kategorileri (TS 706 EN 12620)

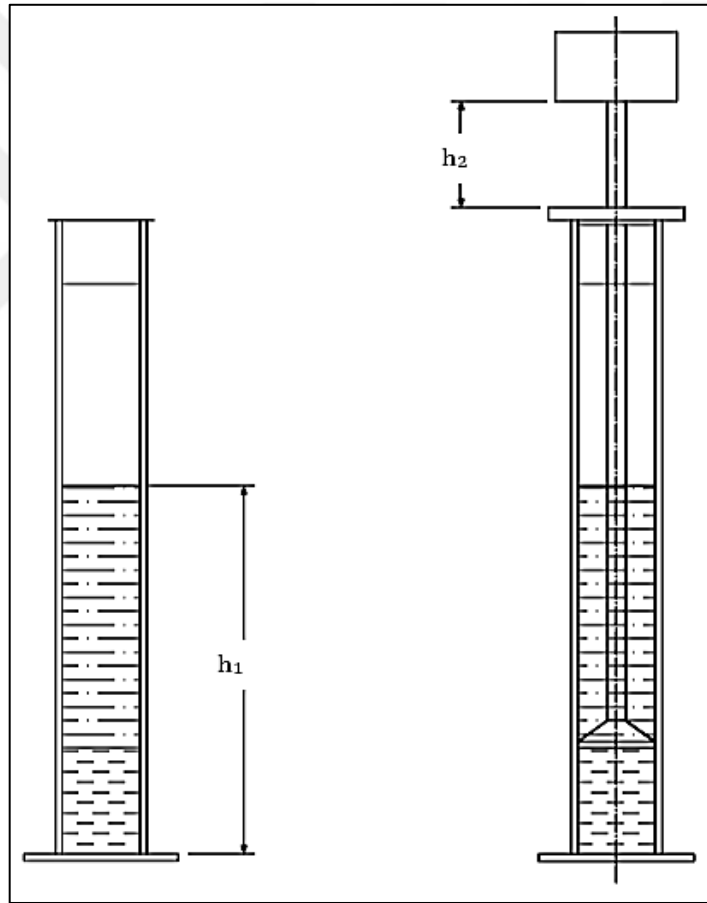
Yassılık indeksi	Kategori, FI
≤ 15	FI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀
≤ 35	FI ₃₅
≤ 50	FI ₅₀
> 50	FI _{beyan}
Serbest	FI _{NR}

Kum eşdeğerliği (S.Eq) deneyi, TS EN 933-8'e uygun olarak %2'den az kum içeren 0-2 mm tane büyüklüğündeki agregalar üzerinde az bir miktar flokülasyon çözeltisi

kullanılarak yapılmıştır. Kum ve çözelti ölçülü bir silindir kaba konulmuş ve taneler yüzeyindeki kil tabakasının yumuşatılması için karıştırılmıştır. Ardından, kum ek flokülasyon çözeltisi ile sulandırılarak işleme devam edilmiştir. Silindir kabın ağzı kapatılarak çalkalanmış ve 20 dk. sonra dibe çöken tortunun alt ve üst seviye yüksekliği ölçümü yapılmıştır (Şekil 2.3). (2.8) kullanılarak kum eşdeğerliği hesaplanmıştır.

$$S. Eq = \frac{h_1}{h_2} \quad (2.8)$$

Burada, S.Eq kum eşdeğerliği değeri, h_1 çökeltinin üst seviyesinin tabana olan seviyesi ve h_2 çökeltinin koyu kısmının üst seviyesinin tabana olan seviyesidir.



Şekil 2.3 Kum eşdeğerliği deneyi ölçümü (TS EN 933-8)

Donma çözünme (F) deneyi, TS EN 1367-1'e uygun olarak agregalar üzerinde yapılmıştır. Agregalar, donma çözünme öncesinde laboratuvar ortamında 24 saat süre suda bekletilmişler ve toplamda 10 döngü olacak şekilde ve her döngüde

-17,5°C sıcaklıkta suda donma ve 20°C sıcaklıkta suda çözünme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı agrega tane çapları için farklı miktarlarda agregalar ile işleme devam edilmiş ve detaylar Tablo 2.9'daki gibidir.

Tablo 2.9 Donma çözünme deneyi için gerekli agrega miktarları (TS EN 1367-1)

En büyük agrega tane büyüklüğü, mm	Gerekli agrega kütlesi veya hacmi
	Normal agrega, g
4 – 8	1000
8 – 16	2000
16 – 32	4000
32 – 63	6000

Donma çözünme işlemi sonrasında, oluşan kütle kaybı (2.9) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$F = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.9)$$

Burada, F donma çözünme kaybı, m_1 (g) deney numunesi ilk kuru kütlesi, m_2 (g) belirtilen elek üstü kalan numunenin işlem sonu kalan kuru kütlesidir.

Bulunan F değerleri, Tablo 2.10 'ya göre kategorize edilmiştir.

Tablo 2.10 Donma çözünme direnç değerleri için kategoriler (TS 706 EN 12620)

Donma çözünme (kütlece yüzde kaybı)	Kategori, F
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 3	F ₃
≤ 4	F ₄
> 4	F _{beyan}
Serbest	F _{NR}

Agrega kimyasal analizi, TS EN 1744-1'e uygun olarak agregalar üzerinde yapılmıştır. Asitte çözünebilen sülfat içeriği (%SO₃), toplam kükürt içeriği (%S) ve suda çözünebilen klorür tuzları (%Cl⁻) tespiti deneyleri toz haline getirilmiş agregalar üzerinde yapılmış ve ayrıca agrega mineralojisi kalitatif mineral analiz (XRD) ile belirlenmiştir.

Alkali silika reaksiyonu (ASR) deneyi, ASTM C 1260-14'e göre agregalar üzerinde yapılmıştır. Standartta belirtilen karışım detaylarına uygun olarak hazırlanan harç numuneleri 80°C'de sıcak su banyosunda kür edilmiş ve 0-3-7-14 gün harç çubuk boy değişimi okumaları alınarak boy değişimleri kaydedilmiştir. Deney sonrası alkali silika reaktiflikleri belirlenmiştir (Tablo 2.11).

Tablo 2.11 Alkali silika reaksiyonu deneyi sonucu değerlendirme tablosu (ASTM C 1260-14)

Durum	Ölçüm değeri aralığı ve açıklama
Tehlikesiz agreg	<%0,10 ortalama uzama oranı – agregalar alkali silika reaktifliği bakımından tehlikesizdir.
Potansiyel tehlikeli agreg	%0,10 ile %0,20 ortalama uzama oranı – agregalar alkali silika reaktifliği bakımından potansiyel tehlikelidir. Önlem alınmalıdır.
Tehlikeli agreg	>%0,20 ortalama uzama oranı – agregalar alkali silika reaktifliği bakımından tehlikelidir.

Agrega hacim kararlılığı deneyi, TS EN 1367-4' uygun olarak agregalar üzerinde yapılmıştır. Standartta belirtilen granülometriye ve karışım detaylarına uygun olarak hazırlanan numuneler, kalıptan çıkarma işlemi sonrası 20±2°C'de 120±2 saat kür edilmiş ve uygun şekilde ilk boy değişimi okuma değerleri kaydedilmiştir. Ardından numuneler, 110±5°C'de etüvde 72±2 saat bekletilmiş ve 24±2 saat desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler üzerinde son boy değişimi okuma değerleri alınmış ve boy değişim değerleri (2.10) yardımıyla hesap edilmiştir. Kuruma büzülmesi (ϵ_r) değerinin %0,075'i aşmaması gerekmektedir (TS 706 EN 12620).

$$\epsilon_r = \frac{l_2 - l_1}{l_3} \times 100 \quad (2.10)$$

Burada, ϵ_r kuruma boy değişimini, l_1 ilk ölçüm (ıslak) değerini, l_2 son ölçüm (kuru) değerini ve l_3 kuru uzunluk değerini (orijinal boy) ifade etmektedir.

Geri kazanılmış iri agreg bileşenleri, TS 706 EN 12620'ye uygun olarak yapılmıştır. Geri kazanılmış iri agreg bileşenleri ve içerikleri için kategoriler Tablo 2.12-2.13'te verilmektedir.

Tablo 2.12 Geri kazanılmış agrega bileşenleri için tanımlamalar (TS 706 EN 12620)

Bileşen	Muhteva (kütlece %)
R _c	Beton, beton mamulleri, harç, beton duvar birimleri
R _u	Serbest agrega, doğal taş, hidrolik bağlı agrega
R _b	Kil duvar birimleri (tuğlalar ve karolar gibi), kalsiyum silikat duvar birimleri, gaz beton (yüzmeyen)
R _a	Bitümlü malzemeler
FL	Hacimde yüzen malzemeler
X	Diğer: -Bağlayıcı (kil ve toprak gibi) -Muhtelif metaller (demir ve demir dışı), kereste (yüzmeyen), plastik ve lastik -Alçı sıva
R _g	Cam

Tablo 2.13 Geri kazanılmış iri agregalardaki bileşenler için kategoriler (TS 706 EN 12620)

Bileşen	Muhteva (Kütlece %)	Kategori
R _c	≥90	R _c 90
	≥80	R _c 80
	≥70	R _c 70
	≥50	R _c 50
	<50	R _c beyan
	Serbest	R _c NR
R _c + R _u	≥95	R _{cu} 95
	≥90	R _{cu} 90
	≥70	R _{cu} 70
	≥50	R _{cu} 50
	<50	R _{cu} beyan
	Serbest	R _{cu} NR
R _b	≤10	R _b 10-
	≤30	R _b 30-
	≤50	R _b 50-
	>50	R _b beyan
	Serbest	R _b NR
R _a	≤1	R _a 1-
	≤5	R _a 5-
	≤10	R _a 10
X + R _g	≤0,5	XR _g 0,5-
	≤1	XR _g 1-
	≤2	XR _g 2-
FL	≤0,2 *	FL0,2-
	≤2	FL2-
	≤5	FL5-

* ≤0,2 kategorisi, sadece yüksek kalitede yüzey bitirme işlemi gerektiren özel uygulamalar içindir.

RA iyileştirme çalışmaları 4 adımda yürütülmüştür. İyileştirme çalışmasında temel amaç, eski harç kalıntısını gidererek RA su emme değerini %1'e kadar indirmektir. Bu amacı sağlayan BMM kombinasyonu (devir-bilye sayısı) belirlenmeye yönelik aşağıdaki adımlar yürütülmüştür.

Birinci adımda, RA'nın elde edildiği atık betonun özelliklerini belirlemek üzere fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.14'te verilmiştir. Basınç dayanımı (TS EN 12390-3 (2010)), su emme ve yoğunluk (TS EN 12390-7 (2010)) testleri atık betondan alınan 100Φ100mm karot numunesinden ve elastisite modülü (ASTM C 469 (2002)) ile yarmada çekme testleri (TS EN 12390-6 (2010)) 100Φ200mm karot numunesinden elde edilmiştir (Şekil 2.4). Tablo 2.14'ten görüleceği üzere, atık beton kalitesinin bu çalışmada alt dayanım sınıflı olduğu görülmektedir (düşük <20 MPa, orta 20-40 MPa ve yüksek >60 MPa) [31], [42].

Beton atıklarının RA olarak betonda kullanımı durumunda; orta ve üst kalite beton atıkların yeni beton performansını çok az etkileyeceği fakat düşük dayanımlı beton atıkların ise yeni beton performansında ciddi düşüslere neden olacağı yapılan eski çalışmalarda belirtilmektedir [31]. Bu çalışmada kullanılan atığın düşük dayanımlı olduğu göz önüne alınırsa, iyileştirme uygulanmaksızın RA olarak betonda kullanımı sonucu beton performansının düşeceği kolaylıkla tahmin edilebilir.

RA'ya ait kaynak özellikleri belirlenmesi ardından, büyük beton parçaları laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile kırılmış ve istenen tane çapında gerekli miktarda RA üretilmiş ve depolanmıştır.

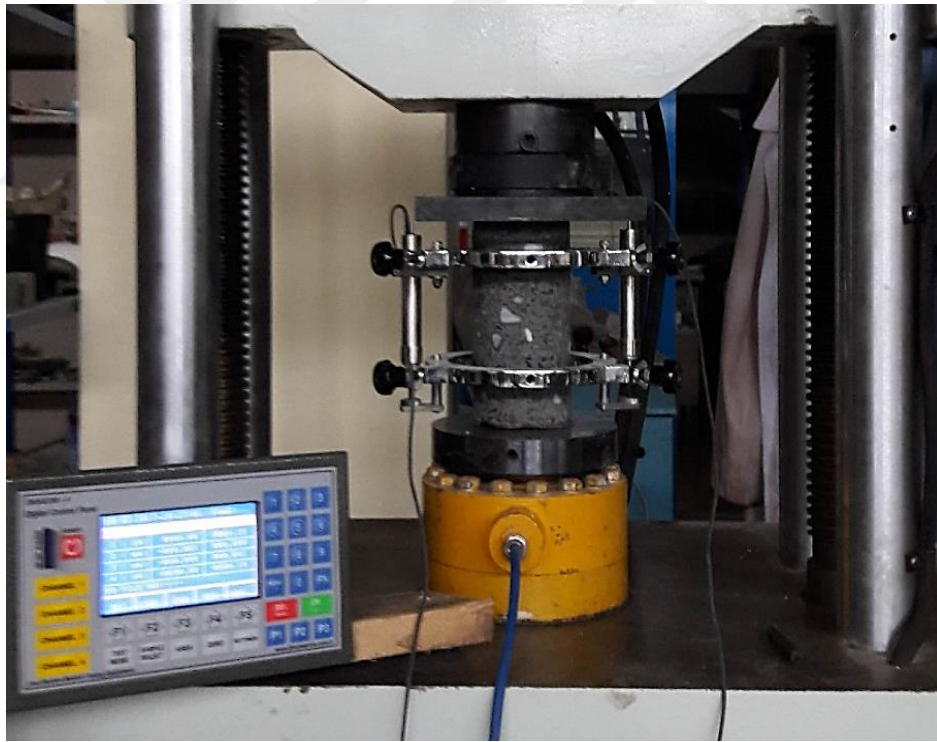
İkinci adımda, çeneli kırıcı ile üretilen RA yığınları 4-11,2mm (RA1) ve 11,2-22,4mm (RA2) olarak ayrılmış ve ayrı ayrı depolanmıştır. RA1 ve RA2'nin fiziksel ve mekanik özellikleri (yoğunluk, su emme ve Los Angeles (LA) aşınma kaybı) tespit edilmiştir (TS EN 1097-6/AC (2006) ve TS EN 1097-2 (2010)) (Tablo 2.15).

Üçüncü adımda, RA1 ve RA2 dikkate alınarak BMM optimizasyon çalışması standart Los Angeles (LA) aşındırma tamburu ve standart çelik bilyeler kullanılarak yapılmıştır (LA aşındırma tamburu ve çelik bilyeler için: TS EN 1097-2 (2010)). Tambur dönme sayısı (R) 100, 200, 300, 400, 500 devir ve çelik bilye sayısı (S) 2, 5,

7, 10, 12 bilye olarak belirlenmiş ve 5 kg malzeme her bir BMM uygulamasında kullanılmıştır. Farklı sayılarda R ve S içeren 30 adet BMM kombinasyonu RA1 ve RA2'ya ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir BMM kombinasyonu uygulanması ardından, RA malzeme kaybı olmaksızın tamburdan tamamen çıkartılmış, poşetlenmiş ve uygulanan R-S sayısına göre işlenmiş numune isimlendirilmiş ve ayrı ayrı poşetlerde stoklanmıştır.

Tablo 2.14 Karot numunelerine ait fiziksel ve mekanik deney sonuçları

Özellik	Değer	Standart sapma
Basınç dayanımı (MPa)	8,05	2,54
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	1,07	-
Elastisite modülü (MPa)	9 997	-
Su emme (%)	10,11	1,80
Yoğunluk (g/cm ³)	2,00	0,11



Şekil 2.4 Elastisite modülü deney düzeneği

Tablo 2.15 RA' ya ait özellikler

Agrega	Su emme (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	LA aşınma kaybı, %
RA1	8,80	2,06	-
RA2	8,95	2,00	55
RA'da bulunan doğal agrega	0,56	2,78	-

Dördüncü adımda, işlem görmüş RA numuneleri dane çaplarına göre 0-4 mm, 4-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm olarak üç gruba ayrılmıştır. Yoğunluk ve su emme testleri 4-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm işlem görmüş RA üzerinde yapılmıştır (Şekil 2.5), 0-4 mm çaplı işlem görmüş numuneler bu kısımda dikkate alınmamıştır (Tablo 2.16-2.17). Oluşan 0-4 mm boyutlu RA bu tez çalışmasında beton üretimlerinde dikkate alınmamış, fakat taşıyıcı olmayan bir yapı elemanı (terrazo karo) üzerinde kullanılabilirliği ayrıca farklı bir deneysel çalışmada detaylıca incelenmiştir [43].



Şekil 2.5 Su emme-yoğunluk değerleri belirlenmek üzere suda bekletilen numuneler

Tablo 2.16 BMM uygulanmış RA1'den elde edilen 4-11mm malzemeye ait su emme-yoğunluk değerleri

BMM sonrası elde edilen RA (4-11,2mm) yoğunluk değerleri, g/cm ³						
	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S
100 R	2,34	2,24	2,30	2,35	2,35	2,39
200 R	2,31	2,34	2,41	2,49	2,44	2,47
300 R	2,39	2,42	2,44	2,51	2,63	<u>2,58</u>
400 R	2,33	2,38	2,48	2,33	2,40	2,58
500 R	2,37	2,47	2,52	2,52	2,32	2,48
BMM sonrası elde edilen RA (4-11,2mm) su emme değerleri, %						
	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S
100 R	5,85	5,67	5,94	3,46	5,07	4,05
200 R	5,74	5,14	3,39	3,39	3,75	3,50
300 R	4,07	4,30	3,55	3,42	2,18	<u>1,40</u>
400 R	5,71	5,18	3,24	2,96	2,33	1,76
500 R	4,87	3,56	2,82	2,36	2,60	2,57

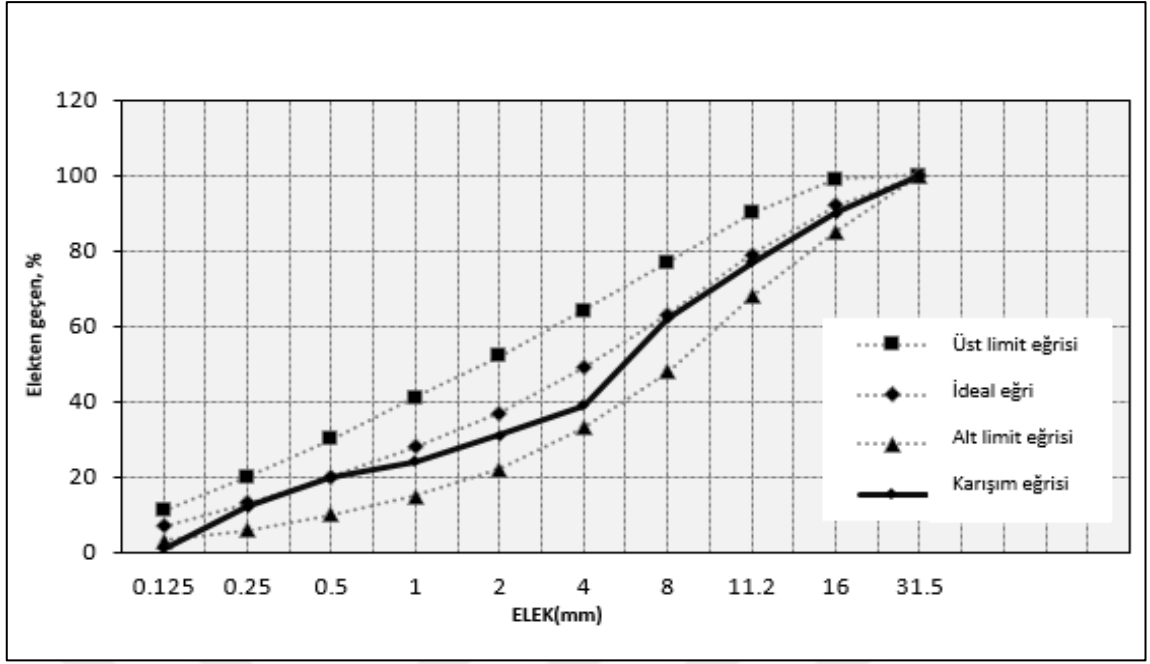
Tablo 2.17 BMM uygulanmış RA2'den elde edilen 4-11mm ve 11,2-22,4mm malzemeye ait su emme-yoğunluk değerleri

BMM sonrası elde edilen RA (4-11,2mm) su emme değerleri, %							BMM sonrası elde edilen RA (11,2-22,4 mm) su emme değerleri, %					
	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S
100 R	8,43	9,97	7,81	6,28	5,62	7,67	9,34	8,19	6,16	6,17	4,73	3,77
200 R	6,38	7,53	7,57	7,25	4,36	4,03	7,14	6,52	2,71	3,37	3,50	1,63
300 R	6,48	6,58	5,26	5,93	3,99	3,46	4,48	5,34	4,29	3,14	3,08	3,48
400 R	7,14	6,41	6,36	6,00	2,66	2,05	5,71	6,77	4,08	2,96	1,45	1,24
500 R	4,24	6,31	5,68	2,56	2,00	2,14	2,82	1,98	2,03	1,14	<u>0,84</u>	0,96
BMM sonrası elde edilen RA (4-11,2mm) yoğunluk değerleri, g/cm ³							BMM sonrası elde edilen RA (11,2-22,4 mm) yoğunluk değerleri, g/cm ³					
	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S	0 S	2 S	5 S	7 S	10 S	12 S
100 R	2,00	1,96	1,68	1,85	2,43	2,26	2,04	1,78	1,77	2,16	2,32	2,34
200 R	2,19	2,15	2,13	2,10	2,32	2,37	1,75	2,24	2,32	2,32	2,51	2,41
300 R	2,15	2,03	2,27	2,22	2,29	2,28	2,32	2,28	2,23	2,37	2,32	2,36
400 R	2,03	2,03	1,82	2,31	2,44	2,34	2,08	2,09	2,22	2,18	2,43	2,73
500 R	2,29	2,19	2,20	2,45	2,49	2,40	2,38	2,41	2,38	2,42	<u>2,47</u>	2,47

Deney sonuçları incelendiğinde, R ve S sayısı arttığında RA su emme değerlerinin azaldığı ve yoğunluk değerlerinin arttığı görülmektedir. Minimum su emme değerlerinin RA2-500R-10S ve RA1-300R-12S numunelerinde elde edildiği ve bu değerlerin sırasıyla %0,84 ve %1,4 olduğu bulunmuştur. Hedeflenen %1 RA su emme değerine en yakın değerler RA1 için 300R ile 12S içeren BMM uygulanmasıyla ve RA2 için 500R ile 10S içeren BMM uygulanmasıyla elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, BMM uygulamasında R ve S sayılarının artışının RA'ya kazandırdığı minimum su emme değeri sonrasında, artan R ve S sayılarının çatlak oluşumunu etkileyip su emme değerini artırabileceği öngörüsü ile RA2 üzerinde 500R-14S uygulanmış ve RA su emme değeri %2,74 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde RA1 üzerinde 300R-14S uygulanmış ve RA su emme değeri %2,20 olarak belirlenmiştir. 300R-12S RA1 için ve 500R-10S RA2 için optimum dönüş-devir değerleri olarak kabul edilmiş, 300R-12S BMM uygulanmış RA1 "RA1i" ve 500R-10S BMM uygulanmış RA2 "RA2i" olarak isimlendirilmiştir (*kariştirilmemesi gereken önemli bir husus: 500R-10S ve 300R-12S uygulanması sonucu farklı özellikli 4-11,2 mm RA oluşmasıdır*). RA1 ve RA2'nin aynı anda kullanıldığı ve RA1 ile RA2'yi birlikte gösteren ifade RA12 şeklinde ve RA1i ve RA2i'nin aynı anda kullanıldığı ve RA1i ile RA2i'yi birlikte gösteren ifade RA12i şeklinde kullanılacaktır.

Ayrıca, optimum BMM R-S kombinasyonu değerleri üzerinde istatistiki analiz yapılmış ve analizde su emme değerleri dikkate alınmıştır. Analiz sonucu, RA su emme değerlerine ait standart sapma ve %95 güven aralığı değerleri elde edilmiş (Tablo 2.18).

Agregaların dane dağılımları TS 706 EN 12620 (2015)'e uygun olarak belirlenmiştir. $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de agregaların kurutulması ardından, elek analizi deneyi yapılmış ve analiz sonucu karışım tane dağılımı oluşturulmuştur (Şekil 2.6). Agregalar üzerinde gerçekleştirilen tüm deneylere ait sayısal sonuçlar Tablo 2.19'de verilmektedir.



Şekil 2.6 Karışım tane dağılımı grafiği

Tablo 2.18 BMM uygulaması sonrası elde edilen işlem görmüş numunelere ait istatistiki parametreler

Agrega boyutu	Dönüş sayısı	Çelik bilye sayısı																	
		0 S			2 S			5 S			7 S			10 S			12 S		
		Std. sap.	95% Güven aralığı		Std. sap.	95% Güven aralığı		Std. sap.	95% Güven aralığı		Std. sap.	95% Güven aralığı		Std. sap.	95% Güven aralığı		Std. sap.	95% Güven aralığı	
			Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit
4-11,2 mm	100 R	0,16	5,44	6,26	0,20	5,18	6,16	0,16	5,54	6,34	0,13	5,14	5,78	0,15	4,70	5,44	0,11	3,79	4,31
	200 R	0,19	5,27	6,21	0,16	4,74	5,54	0,11	3,12	3,66	0,10	3,14	3,64	0,13	3,42	4,08	0,10	3,26	3,75
	300 R	0,18	3,62	4,52	0,12	4,01	4,59	0,12	3,24	3,86	0,14	3,08	3,76	0,10	1,93	2,43	0,06	1,26	1,54
	400 R	0,14	5,36	6,06	0,18	4,72	5,64	0,11	2,96	3,52	0,12	2,66	3,27	0,09	2,10	2,56	0,08	1,56	1,96
	500 R	0,13	4,56	5,18	0,11	3,29	3,83	0,10	2,57	3,07	0,11	2,08	2,64	0,09	2,39	2,81	0,11	2,29	2,85
11,2-22,4 mm	100 R	0,24	12,74	13,94	0,23	7,63	8,75	0,16	5,76	6,56	0,22	5,62	6,72	0,10	4,48	4,98	0,05	3,66	3,88
	200 R	0,20	6,64	7,64	0,23	5,95	7,09	0,14	2,36	3,06	0,22	2,82	3,92	0,11	3,23	3,77	0,07	1,46	1,80
	300 R	0,24	3,88	5,08	0,10	5,09	5,59	0,11	4,03	4,55	0,18	2,69	3,59	0,06	2,93	3,23	0,06	3,32	3,64
	400 R	0,20	5,21	6,21	0,13	6,45	7,09	0,11	3,82	4,34	0,15	2,59	3,33	0,15	1,10	1,84	0,01	1,22	1,26
	500 R	0,21	2,30	3,34	0,10	1,73	2,23	0,10	1,79	2,27	0,08	0,94	1,34	0,03	0,78	0,90	0,02	0,92	1,00

Tablo 2.19 Agrega deneylerine ait sayısal sonuçlar

Özellikler	Agrega tipleri											
	NA			RA			300R-12S BMM ile elde edilen RA			500R-10S BMM ile elde edilen RA		
	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm
Çok ince malzeme içeriği, %	1,2	0,9	2,6	2,2	0	0	0	0	0	0	0	0
Kavkı içeriği, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Los Angeles aşınma direnci, %	-	21	-	55	-	-	-	-	-	-	-	28
Su emme kapasitesi, %	0,78	0,67	8,80	8,95	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	0,84
Yoğunluk, g/cm ³	2,62	2,67	2,06	2,00	2,58	2,49	2,58	2,49	2,58	2,49	2,58	2,47
Yığın yoğunluğu, g/cm ³	1,44	1,35	1,23	1,15	1,39	1,33	1,39	1,33	1,39	1,33	1,39	1,27
Yapışmış eski harç kalıntısı, %	-	-	39,2	52,5	6,0	6,7	6,0	6,7	6,0	6,7	6,0	9,6
Şekil indeksi, %	10,6	5,5	13,5	10,4	2,0	2,3	2,0	2,3	2,0	2,3	2,0	3,2
	Ort.=8,0			Ort.=11,9			-			Ort.=2,7		
Yassılık indeksi, %	1,10	0,95	3,20	2,85	1,0	1,10	1,0	1,10	1,0	1,10	1,0	0,90
	Ort.=1,03			Ort.=3,03			-			Ort.=1,00		
Kum eşdeğerliği, %	73	76	68	70	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ort.=74,5			Ort.=69			-			-		
Donma-çözünmeye karşı direnç, %	4 mm	8 mm	16 mm	4 mm	8 mm	16 mm	4 mm	8 mm	16 mm	4 mm	8 mm	16 mm
	1,5	1,6	1,1	19,1	25,8	35,4	4,1	3,6	-	4,5	3,9	2,4
	Ortalama=1,4			Ortalama=26,8			Ort.=3,9			Ortalama=3,6		
Agrega cinsi	Kalker			Kalker			Kalker			Kalker		
ASR	%0,09			%0,11			%0,11			%0,11		
Agrega hacim kararlılığı, %	0,0737			0,0947			0,0840			0,0842		
Asitte çözünebilen sülfat içeriği, %SO ₃	0,50						0,69					
Toplam kükürt içeriği, %S	<0,01						<0,01					
Suda çözünebilen klorür tuzları, %Cl ⁻	0,04						0,06					

2.1.1.3 Kimyasal Katkı

Beton karışımlarının düşük işlenebilirliğini iyileştirmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkıya ait değerler Tablo 2.20’de verilmektedir.

Tablo 2.20 Süper akışkanlaştırıcı özellikleri

İçerik	Değer
Kimyasal yapı	Polikarboksilik eter
Renk	Amber
Yoğunluk (kg/l)	1,08-1,14
Alkalin oranı (%)	<3
Klorür oranı (%)	<0,1

2.1.1.4 Beton İçerikleri

Tez çalışmasının bu bölümünde, oBMM’in beton özelliklerine etkisini belirlemek üzere, RA2 üzerine uygulanan oBMM sonucu elde edilen iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalar ile betonlar üretilmiştir. Karışımlarda NA, %20-40-60 RA ve iyileştirilmiş RA (RAi) kullanılmış ve beton karışım tasarımı, mutlak hacim yöntemine göre yapılmıştır. Serilere ait kodlar Tablo 2.21’de ve karışım bileşenleri Tablo 2.22’de verilmektedir.

Tablo 2.21 Beton serilerinin kodları

Seri	Açıklama
NAC	NA içeren geleneksel beton
RA1C	RA (4-11,2mm) ve NA (11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton
RA2C	NA (4-11,2mm) ve RA (11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton
RA12C	RA (4-11,2mm ve 11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton
RA1C-i	İyileştirilmiş RA (4-11,2mm) ve NA (11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton
RA2C-i	NA (4-11,2mm) ve iyileştirilmiş RA (11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton
RA12C-i	İyileştirilmiş RA (4-11,2mm ve 11,2-22,4mm) içeren geri kazanılmış agregalı beton

Tablo 2.22 Beton serilerine ait bileşenler

Seri	Çim., kg/m ³	Kim. katkı, %	Su, kg/m ³	NA (4-11,2 mm), kg/m ³	NA (11,2-22,4 mm), kg/m ³	Kırma kum, kg/m ³	Doğal kum, kg/m ³	Geri kazanılmış agrega	
								(4-11,2 mm), kg/m ³	(4-11,2 mm), kg/m ³
NAC	350	0,60	175	375	764	280	467	-	-
RA1C	350	0,60	175	-	764	280	467	295	-
RA2C	350	0,55	175	375	-	280	467	-	572
RA12C	350	0,65	175	-	-	280	467	295	572
RA1C-i	350	0,60	175	-	764	280	467	369	-
RA2C-i	350	0,55	175	375	-	280	467	-	706
RA12C-i	350	0,55	175	-	-	280	467	369	706

2.1.1.5 Taze Beton Üretimi ve Taze Beton Özelliklerinin Belirlenmesi

Taze betonlar, laboratuvar ortamında yatay ve tek eksenli betonyer kullanılarak üretilmişlerdir. Taze halde çökme deneyi deneyleri yapılmıştır (TS EN 12350-2 (2010)) ile hava içeriği (TS EN 12350-7 (2010)). Taze betonlar, üretim sonrasında kalıplara yerleştirilmiş, sarsma işlemi uygulanmış ve yüzeyler mala yardımıyla düzeltilmiştir.

2.1.1.6 Beton Kür İşlemi

Üretimi izleyen 24 saatlik bekleme süresi sonrası betonlar sertleşmiş, numuneler kalıptan çıkartılmışlar ve kür havuzu içinde kirece doymun $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta suda 28. güne kadar kür edilmişlerdir (TS EN 12390-2 (2010)).

2.1.1.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş betonlar üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır (Tablo 2.23). Yoğunluk, su emme ve yarmada çekme deneyleri $100\Phi 200\text{mm}$ silindirik numuneler üzerinde ve basınç ve elastisite modülü deneyleri $150\Phi 300\text{mm}$ silindirik numuneler üzerinde, eğilme deneyleri $100\times 100\times 500\text{mm}$ prizmatik numuneler üzerinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.23 28. günde yapılan beton deneyleri ve deneylere ait detaylar

Test	Referans	Numune boyutları (mm)
Basınç dayanımı	TS EN 12390-3 (2010)	$150\Phi 300$ silindirik
Eğilme dayanımı	TS EN 12390-5 (2010)	$100\times 100\times 500$ prizmatik
Yarmada çekme dayanımı	TS EN 12390-6 (2010)	$100\Phi 200$ silindirik
Elastisite modülü	ASTM C 469 (2002)	$150\Phi 300$ silindirik
Yoğunluk	TS 12390-7 (2010)	$100\Phi 200$ silindirik
Su emme	TS 12390-7 (2010)	$100\Phi 200$ silindirik

Sertleşmiş beton yoğunluk ve su emme deneyleri TS 12390-7 (2010)'a uygun olarak 28 gün kür edilmiş numuneler üzerinde belirlenmiştir. Numuneler 24 saat 105°C'de etüvde kurutularak etüv kurusu hale getirilmiş, ağırlıkları tartılmış ve ardından 24 saat laboratuvar ortamında 22±2°C'de suda bekletilmişlerdir. Suyu doyurulmuş numunelerin sudaki ağırlıkları Arşimet terazisi ile tartılmış ve ardından numunelerin yüzeyinde bulunan serbest haldeki su kurularak suya doymun yüzey kuru haldeki numunelerin ağırlığı belirlenmiştir. Deney sonuçları (2.11) ve (2.12) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\gamma = \frac{m_0}{(m_{ss} - m_{sa})} \quad (2.11)$$

$$SE (\%) = \frac{(m_{ss} - m_0)}{m_0} \quad (2.12)$$

Burada, γ yoğunluk (g/cm³), m_0 kuru ağırlık (g) ve V (cm³) hacimdir. Ayrıca, SE su emme (%), m_{ss} suya doymun yüzey kuru ağırlık (g) ve m_0 kuru değişmez ağırlıktır (g).

Basınç dayanımı deneyi, TS EN 12390-3 (2010)'e uygun olarak silindirik numuneler üzerinde 3000 kN kapasiteli cihaz kullanılarak 0,6 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deney sonucu kırılma yükü (P , Newton) elde edilmiş ve basınç dayanımı (f_c , MPa) (2.13) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (2.13)$$

Burada, f_c basınç dayanımı, P (Newton) numunenin taşıyabileceği en büyük basınç yükü ve A (mm²) basınç yükünün uygulandığı kesit alanıdır.

Yarmada çekme dayanımı deneyi, TS EN 12390-6 (2010)'e uygun olarak silindirik numuneler üzerinde 3000 kN kapasiteli cihaz kullanılarak 0,05 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deney sonucu kırılma yükü (P , Newton) elde edilmiş ve yarmada çekme dayanımı (f_t , MPa) (2.14) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_t = \frac{2P}{\pi EL} \quad (2.14)$$

Burada, P (Newton) numunenin taşıyabileceği en büyük yarmada çekme yükü, π pi sayısı, E numunenin eni (mm), L numunenin boyu (mm) dur.

Eğilme deneyi, TS EN 12390-5 (2010)'e uygun olarak prizmatik numuneler üzerinde 3000 kN kapasiteli cihaz kullanılarak 0,05 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deney sonucu kırılma yükü (P) elde edilmiş ve eğilme dayanımı (f_e , MPa) (2.15) ile hesaplanmıştır.

$$f_e = \frac{3PL}{2Eh} \quad (2.15)$$

Burada, P (Newton) numunenin taşıyabileceği en büyük eğilme yükü, L (mm) mesnetler arası mesafe, E (mm) numunenin eni ve h (mm) numunenin yüksekliğidir.

Elastisite modülü deneyi, ASTM C 469 (2002))'e uygun olarak 28 gün kür edilmiş, silindirik numune üzerine boy kısalması ölçen çerçeve monte edilmiş ve 3000kN kapasiteli makina kullanılarak 0,6 MPa/s yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Yüklemeye pik yükün %50'sine kadar devam edilmiş ve uygulanan yük (P, Newton) ve boy değişimi değeri (Δ , mm) deney esnasında anlık olarak kaydedilmiştir. (2.16) -(2.17) kullanılarak gerilme (σ , MPa) ve birim şekil değiştirme (ϵ , mm/mm) değerleri hesaplanmıştır. Gerilme-şekil değiştirme verileri kullanılarak kiriş elastisite modülü değeri hesaplanmıştır. Kiriş elastisite modülü, orijinden ve en büyük gerilmenin %40'ına karşı gelen gerilmenin bulunduğu noktadan geçen doğrunun eğimidir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.16)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (2.17)$$

Burada, P (Newton) numunenin taşıyabileceği en büyük basınç yükü, A (mm²) basınç yükünün uygulandığı kesit alanı, Δl (mm) ölçülen boy değişimi (kısalma) değeri ve L (mm) numunenin boy kısalma değerinin ölçüldüğü uzunluk değeridir.

2.1.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

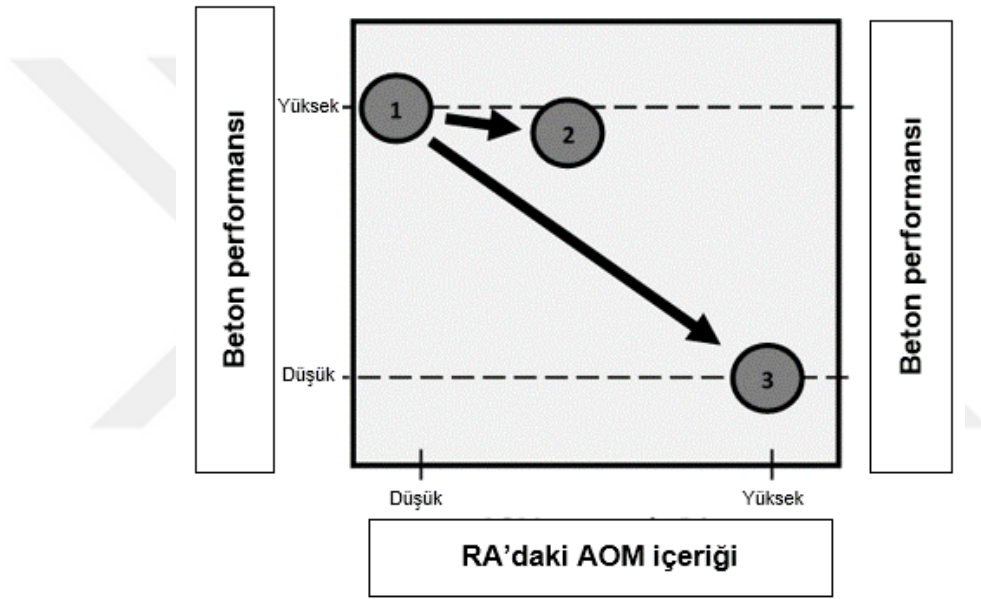
Testler sertleşmiş beton numuneleri üzerinde 28. günde yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.24-2.25'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, oBMM uygulaması sonucu RAI özelliklerinin iyileştirilmesiyle beton performansında artışlar görülmüştür. Burada esas etken RAI'deki AOM'nin oBMM uygulamasıyla yüksek oranda giderilmiş olmasıdır (Şekil 2.7). Taze halde ölçülen hava içeriği değerleri, artan oranda RA içeren betonlarda artış gösterirken, RAI içeren betonlarda da artışlar göstermiş fakat artış oranı daha az olmuştur. Örneğin, %60 RA RA12C içeren ve %60 RAI içeren RA12C-i için hava içeriği sırasıyla %3,0 ve %1,6 olarak ölçülürken, şahit betonda (NAC) hava içeriği %1,0 olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalarda, şahit betonla yaklaşık aynı dayanım özelliklerini elde etmek için RAC karışımında ek %5-10 çimento kullanımı önerilmektedir [44][45]. Bu deneysel çalışmada, RAI içerikli betonlarda ek çimento kullanılmaksızın oBMM dikkate alınarak kontrol betonu ile yaklaşık aynı dayanımlara erişilmiştir. Bu durum, özellikle CO₂ emisyonu ile enerji tüketimi bakımından düşük çevre yükü oluşmasına katkı sağlamaktadır. Çünkü çimento endüstrisinde yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmakta ve klinker üretiminde kullanılan yüksek enerji, yüksek CO₂ salınımına neden olmaktadır [46].

Tablo 2.24 Deney sonuçları

Beton Serileri	RA, %	Hava içeriği, (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Su emme (%)	Basınç dayanımı, (MPa)	Yarmada çekme dayanımı, (MPa)	Elastisite modülü, (MPa)	Eğilme dayanımı, (MPa)
NAC	0	1,0	2,37	3,93	39,1	2,71	30490	5,52
RA1C	20	1,5	2,28	5,00	32,9	2,89	26658	5,68
RA2C	40	2,5	2,20	6,92	27,9	2,14	22070	4,53
RA12C	60	3,0	2,09	8,49	24,8	1,90	18492	4,17
RA1C-i	20	1,0	2,34	3,77	39,5	2,64	29413	5,33
RA2C-i	40	1,1	2,31	4,03	38,3	2,45	25012	4,44
RA12C-i	60	1,6	2,28	4,35	38,2	2,59	25636	5,03

Tablo 2.25 NAC'e ait sonuçlara göre bağıl değerler

Beton serileri	Yoğunluk	Su emme	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
NAC	-	-	-	-	-
RA1C	%-4	%+27	%-16	%+7	%+3
RA2C	%-7	%+76	%-29	%-21	%-18
RA12C	%-12	%+116	%-37	%-30	%-25
RA1C-i	%-1	%-4	%+1	%-3	%-3
RA2C-i	%-3	%+3	%-2	%-9	%-20
RA12C-i	%-4	+11	%-2	%-4	%-9



Şekil 2.7 NA, RA, RAI'nin beton performansı üzerine etkisi: (1) NA içeren beton, (2) RAI içeren beton, (3) RA içeren beton

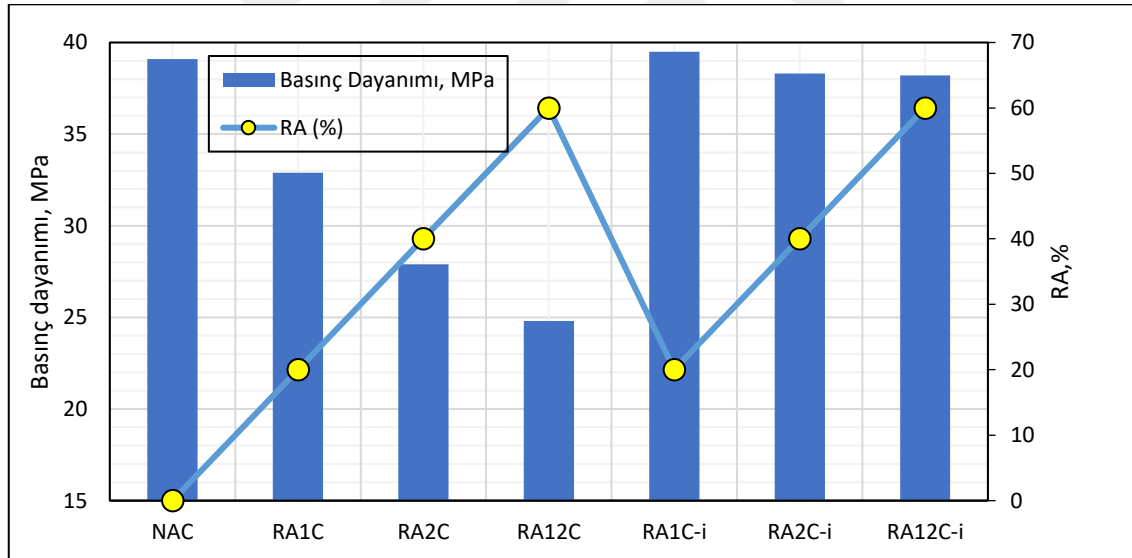
2.1.2.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı test sonuçları Şekil 2.8'de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, RA1C, RA2C ve RA12C basınç dayanımı değişimleri NAC'e göre bağıl olarak sırasıyla %-16, % -29 ve %-37'dir. Diğer yönden, RA1C-i, RA2C-i ve RA12C-i basınç dayanımı değişimleri NAC' e göre bağıl olarak sırasıyla %+1, %-2 ve %-2'dir. Betonlarda RA içeriği arttıkça basınç dayanımı düşmüştür. Fakat betonda artan oranda RAI kullanımı sonucu, basınç dayanımı düşüşü ihmal edilebilir seviyelerde kalmıştır.

Ayrıca, düşük dayanımlı (<20MPa) molozdan elde edilen RAI'nın %60'a kadar oranda kullanımı ile orta dayanımlı (20-40 MPa) betonlar elde edilmiştir.

Ayrıca, iyileştirilmiş geri kazanılmış agreganın %60 oranında kullanılmasına rağmen, basınç dayanımı değişiminin göz ardı edilebilecek düzeyde kaldığı görülmektedir. Literatür incelendiğinde, araştırmalarda genel olarak önerilen %30 RA kullanımının optimum olduğu ve bu oranda RA kullanımı durumunda beton özelliklerinde küçük değişikliklerin olduğu belirtilmektedir (örn., Ref. [32]).

Bilindiği üzere, betonun dayanım parametreleri çimento ve agrega dayanımları ile bunlar arasındaki bağ (ara geçiş yüzeyi-ITZ) ile ilişkilidir. RA yapı itibariyle birçok türden süreksizlikleri içermekte ve RA'nın sahip olduğu yüksek porozite zayıf özellikli eski harç kalıntısından kaynaklanmaktadır [14], [21]. Testler sonrası kırılan numuneler incelendiğinde, betonda en zayıf halkanın RA olduğu ve kırılma çizgisinin RA'dan geçtiği fakat RAI içeren betonlarda kırılma çizgisinin ara yüzeyden geçtiği gözlemlenmiştir.

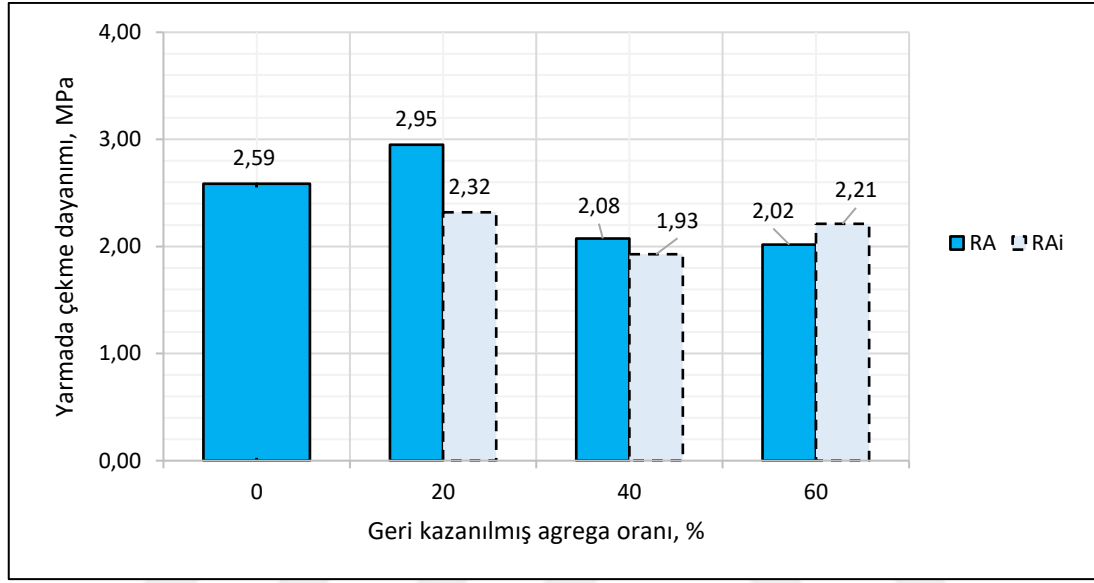


Şekil 2.8 Beton basınç dayanımları

2.1.2.2 Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı test sonuçları Şekil 2.9'da verilmektedir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile RA ve RAI oranı betonda arttıkça yarmada çekme dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Fakat RAI kullanımı durumunda yarmada çekme dayanımında ihmal edilebilir düşüşlerin olduğu görülmektedir.

Literatür incelendiğinde, iki ana yaklaşımla betonların yarmada çekme dayanım sonuçlarının irdelendiği görülmektedir [38], [47], [48]: (1) Yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranının incelendiği yaklaşım, (2) Yarmada çekme dayanımının tekil olarak incelendiği yaklaşım. Sonuçların değerlendirilmesi, bu yaklaşımlarla yapılacak olup ve ayrıca yarmada çekme dayanımı-basınç dayanımı ilişkisi regresyon analizi ile incelenecektir.



Şekil 2.9 Yarmada çekme dayanımı sonuçları

Betonun yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı, mühendislikte önemli bir parametre olarak bilinmektedir. Yapılan çalışmalara göre (örn., [48]), yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı aşağıda belirtilen şu sebeplerle bilinmelidir:

İçsel sürtünme açısı: Bu açı, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranının bir fonksiyonudur ve tek eksenli basınç gerilmesi yüklemesi durumunda bir parametredir.

Kohezyon, iç sürtünme açısı ve kırılma açısı: Bu parametreler, çok eksenli basınç yüklemesi altında yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı ile ilişkilidir. Ayrıca, çok eksenli yükleme altında basınç dayanımındaki artış yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı oranına bağlıdır.

Gevreklik: Gevrek ve sünük malzemelerin davranış tespitinde, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranına bakılır ve gevrek malzemelerin yarmada

çekme dayanımının basınç dayanımına oranı sünek malzemelere göre oldukça düşüktür.

RA ve RAi'nin, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranına etkisini gösteren veriler incelendiğinde (Tablo 2.26); söz konusu oranın RA içeren betonlarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, RAi içeren betonlar için belirlenen değerler NAC'ye ait değer ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 2.26 Betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı ve RA içeriği değerleri

Beton Serileri	RA, %	Yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı
NAC	0	0,069
RA1C	20	0,088
RA2C	40	0,077
RA12C	60	0,077
RA1C-i	20	0,067
RA2C-i	40	0,064
RA12C-i	60	0,068

Yukarıda bahsedildiği üzere, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı malzeme gevrekliğini gösteren bir parametredir ve bu oran arttığı zaman gevreklik azalmaktadır [48]. RA ve RAi kullanımı beton gevrekliğini etkilemişlerdir ve RAi kullanımı durumunda beton gevrekliği NAC'ye yaklaşmakta ve RA kullanımı durumunda ise gevreklik azalıp süneklik artmaktadır.

Literatür incelendiğinde, iyileştirme uygulanmamış RA kullanılan betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranlarının NA içeren betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranlarından büyük olduğu belirtilmektedir [32], [49]. Bu çalışmada, RA ve NA içeren betonlar için literatürle paralel sonuçlar bulunmuştur. RAi içeren betonlar için hesaplanan oranlar ile NA içeren betonlar için hesaplanan oran benzerlik göstermiştir. Sonuç olarak, oBMM uygulanmasıyla RA'da AOM içeriği değişimi sonucu betonda davranış değişimi oluşmuştur.

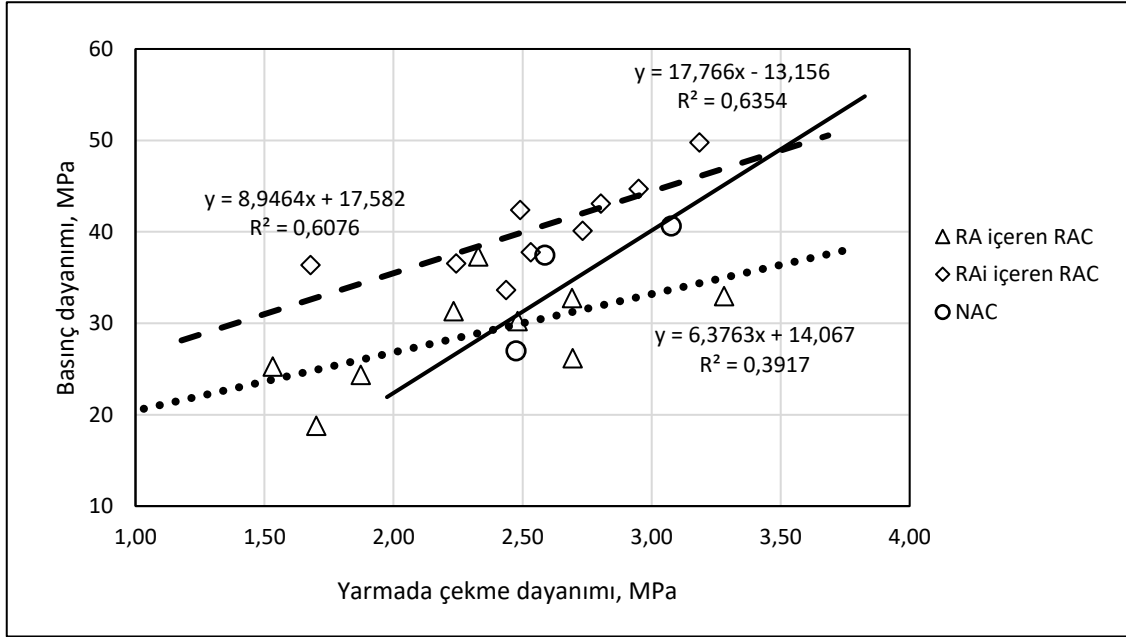
Yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, RA1C, RA2C ve RA12C yarmada çekme dayanımı değeri NAC'e göre sırasıyla $\%+7$, $\%-21\%$ ve $\%-30$ değişim göstermiştir. Fakat RA1C-i, RA2C-i ve RA12C-i'ye ait yarmada çekme dayanımı değerleri NAC'e göre sırasıyla $\%-3$, $\%-9\%$ ve $\%-4$ değişim göstermiştir. $\%20$ RA kullanımı durumunda yarmada çekme dayanımı değerinin arttığı görülmektedir. Benzer çalışmalar incelendiğinde, $\%40$ 'a kadar RA kullanımı sonucu yarmada çekme dayanımının arttığı ve sonrasında azaldığı rapor edilmektedir [32]. Söz konusu artışta, RA'nın pürüzlü yapısının etkili olduğu ve betonda yük altında içsel sürtünmeyi artırarak kısmi de olsa dayanımları artırdığı düşünülmektedir [50]. Ayrıca, $\%60$ 'a kadar RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımı değerlerinin NAC'e göre değişim oranları kısıtlı kalmış ve $\%60$ RAI kullanımının yarmada çekme dayanımını çok az etkilediği tespit edilmiştir.

Betonların basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 2.10'da verilmektedir. NA, RA ve RAI içeren betonların korelasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0,6354, 0,6076 ve 0,3917 olarak hesaplanmıştır. Yüksek korelasyon katsayısı değeri doğal agregalı betonlar için bulunurken ve düşük korelasyon katsayısı değeri geri kazanılmış agregalı betonlarda bulunmuştur [32], [38][32], [38][32], [38]. Korelasyon katsayısının RA tarafından etkilendiği ve RA'nın yarmada çekme dayanımını basınç dayanımından daha fazla etkilemesinden dolayı iki dayanım arasındaki korelasyonun bozulduğu rapor edilmektedir [32], [38]. Diğer yönden, oBMM kullanılarak RA'daki AOM'nin giderilmesi RA'dan NA'ya doğru RA'da bir davranış değişikliğine neden olduğu agregalar üzerinde yapılan deneylerde görülmüştü. Betonda RA yerine RAI kullanımı sonucu beton davranışında gözlemlenen değişim, korelasyon katsayısı değerlerinde de belirlenmiştir.

İstatistiki açıdan sonuçlar irdelendiğinde, yüksek standart sapma değerleri RA ve RAI içeren betonlarda tespit edilmiştir (Tablo 2.27) [51].

Tablo 2.27 Beton dayanımlarının istatistiksel sonuçları

Test	İstatistiksel değer	Beton serileri						
		NA	RA1	RA2	RA12	RA1-i	RA2-i	RA12-i
Basınç dayanımı (MPa)	Standart sapma	3,15	5,83	5,29	4,69	5,42	3,41	3,86
	Ortalama değer	39,1	32,9	27,9	24,8	39,5	38,3	38,2
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Standart sapma	0,06	0,28	0,20	0,41	0,40	0,56	0,16
	Ortalama değer	2,71	2,89	2,14	1,90	2,64	2,45	2,59

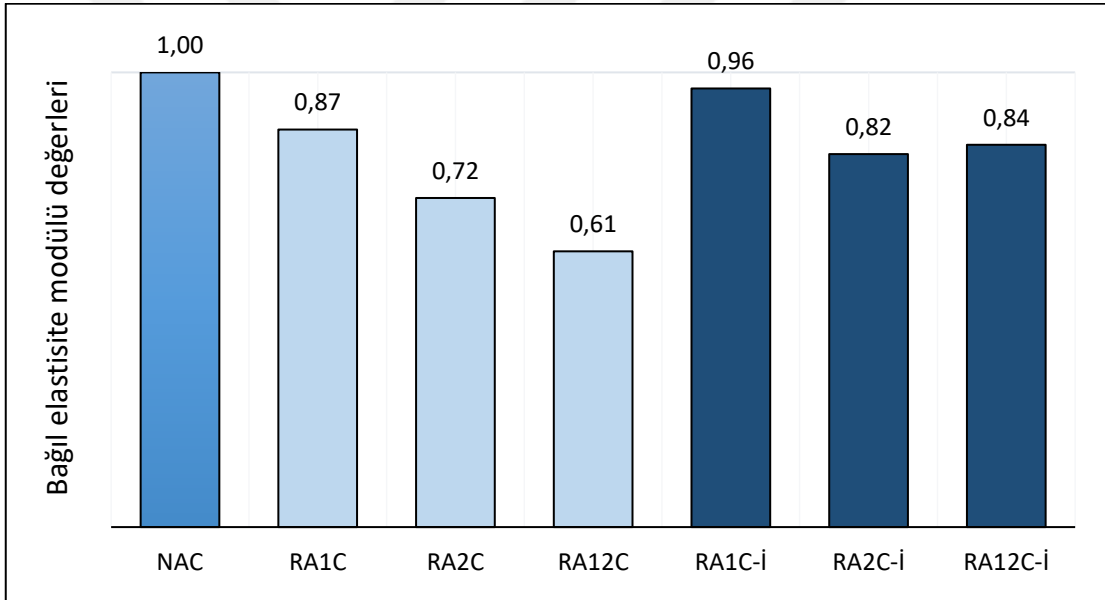
**Şekil 2.10** Betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

2.1.2.3 Statik Elastisite Modülü

Betonlara ait bağıl elastisite modülü sonuçları Şekil 2.11'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, RA ve RAi içeren betonların kontrol betonundan daha düşük elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. RA ile RAi'nin beton elastisite modülü değerlerine etkileri karşılaştırıldığında ise, RAi içeren betonların elastisite modülü değerinin RA içeren betonların elastisite modülü değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Ayrıca, detaylı bir inceleme yapıldığında, RA1C-i, RA2C-i ve RA12C-i bağıl elastisite modülü değerlerinin 0,96, 0,82 ve 0,84 şeklinde olduğu görülmektedir. Literatür incelendiğinde, Eurocode 2 (EC2)'de doğal agregası içeren şahit betonlara göre

elastisite modülünde %30 düşüğe neden olan kumtaşının ve %10 düşüğe neden olan kireçtaşının kullanımına izin verildiği görülmektedir [52]. RAI kullanımı dikkate alındığında, EC2'nin belirtmiş olduğu elastisite modülü limitlerinin RAI için kabul edilebilir olduğu ve bu durumun RA için de geçerli olduğu söylenebilir. Fakat, Paine ve Dhir [52] tarafından yapılan ve herhangi bir iyileştirme işlemi dikkate alınmadan yürütülen bir çalışmada, EC2 limitlerinin RA'ya uygulanmasının uygun olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca, doğal agregalı betonla yaklaşık aynı dayanım değerine ve doğal agregalı betondan %15 daha düşük elastisite modülü değerine geri kazanılmış agregalı betonlarda su/çimento oranı ayarlaması yapılarak ulaşmanın mümkün olabileceğinden bahsedilmektedir [52]. Fakat, su/çimento ayarlaması yapılmaksızın optimize edilmiş BMM kullanımı ile yaklaşık aynı dayanımlar ve bir miktar düşük elastisite modülü değerleri bu çalışmada elde edilmiştir.

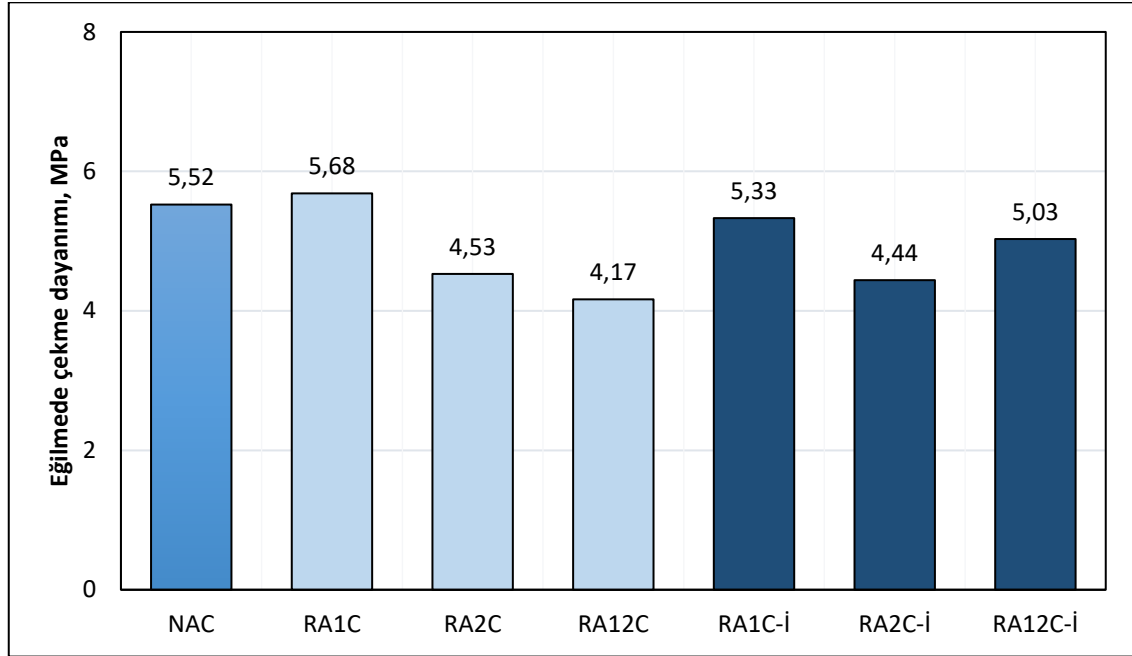


Şekil 2.11 Bağıl elastisite modülü değerleri

2.1.2.4 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı sonuçları Şekil 2.12'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, hem RA'nın hem de RAI'nin betonda kullanımının eğilme dayanımını düşürdüğü görülmektedir (RA1C hariç) [34], [41]. RA1C, RA2C ve RA12C eğilme dayanımları NAC'a ait eğilme dayanımına göre görecel olarak sırasıyla +%3, %-18 ve %-25 iken RA1C-i, RA2C-i ve RA12C-i için %-3, %-20 ve %-9 olarak belirlenmiştir. %20 RA içeren RA1C en yüksek eğilme dayanımı değerine sahiptir ve eğilme dayanımı

değerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer bir durum RA1C yarmada çekme dayanımları için de gözlemlenmiş ve yarmada çekme dayanımı NAC'a göre %7 artış göstermiştir. Betonda RAI kullanımı durumunda ise eğilme dayanım kayıpları, RA içeren betonlara kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır.



Şekil 2.12 Eğilme dayanımı değerleri

2.1.2.5 Yoğunluk ve Su Emme

Yoğunluk ve su emme deney sonuçları Tablo 2.24-2.25'te verilmektedir. RA, NA'ya kıyasla yüksek su emme kapasitesine sahiptir. AOM, RA'nın yüksek miktarda su emmesine neden olan birincil etkindir. Bundan dolayı, RA içeriği betonda daha poroz bir yapıya neden olmuş ve beton su emme değerini artırırken beton yoğunluk değerini düşürmüştür [21], [32], [53], [54]. Fakat, AOM içeriği yüksek miktarda giderilmiş RAI, betonun su emme ve yoğunluk değerlerini RA'ya kıyasla görecel olarak daha az etkilemiştir. Sayısal verilerle ifade etmek gerekirse, NAC'e göre RA1C-i, RA2C-i ve RA12C-i bağıl su emme değişimleri sırasıyla %-4, %+3 ve %+11 olduğu; NAC'e göre RA1C, RA2C ve RA12C için bağıl su emme değişimlerinin ise sırasıyla %+27, %+76 ve % +116 olduğu görülmektedir. Ayrıca, RAI içeren betonlar (2,34, 2,31 ve 2,28 g/cm³) için yoğunluk değerlerinin NAC'e (2,37 g/cm³) çok yakın olduğu görülmektedir.

2.1.3 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Betonlar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel ve mekanik deneylere ait sonuçlar irdelenerek aşağıdaki çıkarımlarda bulunulmuştur:

- **AOM Etkisi:** RA; bünyesindeki AOM içeriğinden dolayı NA'dan daha düşük özelliklere sahiptir. AOM yüksek su emme ve düşük yoğunluklu olup, RA'nın betonda kullanımı öncesinde/esnasında dikkate alınması gereken önemli özellikler arasındadır denilebilir.
- **İyileştirme Yöntemi Kullanımı:** Mekanik iyileştirme işleminin RA üzerine uygulanması sonucu, su emme ve yoğunluk değerleri olumlu şekilde etkilenmiştir. Tambur dönüş sayısı ile işlemde kullanılan bilye sayısı arttıkça, RA'nın AOM içeriği miktarı azalmış ve su emme değerinde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir.
- **İyileştirme Yönteminin Optimizasyonu:** Etkili bir iyileştirme işlemi sonucunda; 1) RA'nın minimum düzeyde AOM içermesinin sağlanması, 2) RA fiziksel-mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve 3) İyileştirme sürecinde RA bünyesindeki doğal agreganın sıhhatinin de korunması gerekmektedir. Bu hedeflerin, kaynak özellikleri tanımlanmış RA'ya uygun olarak optimize edilmiş BMM uygulanmasıyla gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Çünkü iyileştirme işlemi uygulanmasında iyileştirmenin yetersiz düzeyde uygulanması yetersiz sonuçlar doğurabilecekken, aşırı şekilde uygulanması ise hem ekonomik kayba hem zaman kaybına ve hem de RA bünyesindeki NA'ya zarar verebilecektir. Optimum değerlerden daha yüksek artan sayıda R-S uygulanması sonrası RA1 ve RA2'de gözlemlenen su emme değerlerindeki artış, bu durumu kanıtlamaktadır.
- **oBMM'in Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi:** RA kullanımı betonların su emme değerlerini artırmış ve yoğunluk değerlerini azaltmıştır. Fakat betonda RAI kullanımının su emme ve yoğunluk değerlerinde tetiklediği değişim ihmal edilebilecek seviyelerde kalmıştır.
- **oBMM'in Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi:** NA'nın, RA ve RAI ile yer değiştirilerek betonda kullanımı sonucu, basınç dayanımları düşüş göstermiş

basınç dayanımındaki azalma R_{Ai} kullanımı durumunda ihmal edilebilir seviyelerde kalmıştır. Bu durum, betonların yarmada çekme dayanımı ile eğilme dayanımı değerleri ve elastisite modülü değerleri için de geçerlidir.

oBMM'in RA üzerine uygulanması sonrası iyileşme gözlemlense de bir miktar daha AOM'nin RA üzerinde kaldığı ve fiziksel ve mekanik beton sonuçlarına -kısıtlı sevide de olsa- tespit edilmiştir. Bu etkinin en aza indirilebilmesi için ek önlemlerin alınması faydalı ve yerinde olabilecektir.

Bu açıdan bakıldığında, söz konusu olumsuz etkiyi en aza indirebilmek amacıyla bu tez çalışmasında mineral katkı ve fiber beton karışımlarında kullanılmış ve etkileri araştırılmıştır. İlerleyen bölümlerde, iyileştirme kombinasyonları (oBMM+SF, oBMM+BF ve oBMM+SF+BF) uygulamasının beton parametreleri üzerindeki etkinlikleri incelenecektir.

DENEYSEL ÇALIŞMA BÖLÜM 2: OPTİMİZASYON + İYİLEŞTİRME

3.1 Deneysel Çalışma

Tez çalışmasının bu bölümünde, NA, RA, RAi ile ayrı ayrı ve birlikte SF ve BF içeren 7 ana grupta toplamda 84 adet beton serisine ait ilgili detaylar verilmektedir. 7 ana grup; NA içeren kontrol betonu grubu, %20-40-60 oranlarında RA içeren 3 adet geri kazanılmış agregalı beton grubu ve %20-40-60 oranlarında RAi içeren 3 adet iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı beton grubu şeklinde olup ayrıca her grup, alt dallarda farklı oranlarda birlikte ve ayrı ayrı %0-5-10 SF ve %0-0,25-0,50-1,0 BF içeren 12 adet beton serisini içermektedir.

Beton serileri, laboratuvar ortamında betonyer kullanılarak üretilmiş, üretilen betonlar 28 gün $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de kür edilmiş ve 28. günde beton numuneler fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları TOPSİS yöntemi¹ ile incelenmiş, 84 adet beton serisi içinden -yukarıda bahsedilen her gruptan birer tane olmak üzere- 7 adet en iyi beton serisi objektif olarak seçilmiş ve kontrol betonu da dahil toplamda 8 adet beton serisi üzerinde kalıcılık deneyleri yapılmış ve bu betonların yaşam döngüsü analizleri çıkarılmıştır.

3.1.1 Malzemeler ve Deneysel Metot

Önceki bölümde detayları verilen malzemeler ile SF ve BF deneysel çalışmanın bu bölümünde kullanılmış, 84 adet beton serisi üretilmiştir. SF ve BF'e ait bilgiler Tablo 3.1-3.2'de verilmekte ve üretici tarafından sağlanan verilerdir. Sadece BF'in su

¹ TOPSİS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) yöntemi objektif olarak en iyi olanı seçmeye yönelik bir karar destek sistemidir ve tek sübjektif olan kısmı ağırlık katsayılarının belirlendiği ve yönetime girildiği kısımdır. Literatürden elde edilen veriler ile bu tez çalışmasında söz konusu ağırlık katsayıları belirlenmiş olup böylelikle TOPSİS yöntemi tamamıyla objektif olarak kullanılmış ve objektif olarak en iyi beton serileri oluşturulmuştur. TOPSİS ve ağırlık katsayısı hakkında detaylı bilgi için EK A ve EK B'ye bakınız.

emme değeri üretici tarafından sağlanmamış olup, Ref. [55]'da belirtildiği şekilde prosedür uygulanarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1 Silis dumanının özellikleri

Özellik	Nicelik
SiO ₂ (%)	91.4
CaO (%)	0.5
SO ₃ (%)	0.4
Al ₂ O ₃ (%)	0.7
Fe ₂ O ₃ (%)	1.7
MgO (%)	0.9
H ₂ O (%)	0.4
Isıtma kaybı (%)	1.7
Klorür oranı (%)	0.04
Yoğunluk (g/cm ³)	0.64
Aktivite indeksi (%)	118
İncelik (cm ² /g)	21290

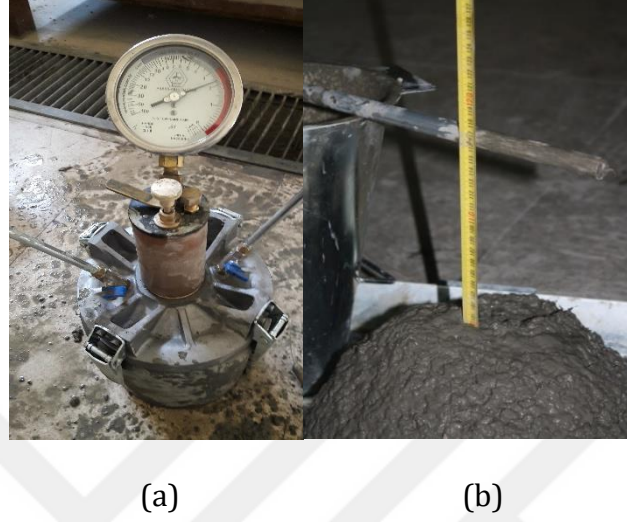
Tablo 3.2 Bazalt fiberin özellikleri

Özellik	Nicelik
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70
Çapı (μm)	10-23
Lif boyu (mm)	24
Çekme dayanımı (MPa)	3200-4800
Elastisite modülü (GPa)	90
Kopma uzaması (%)	3,5
Su emme değeri (%)	3,60

3.1.2 Beton Üretimi

Laboratuvar ortamında, 7 ana grupta 84 adet beton serisi yatay ve tek eksenli betonyer kullanılarak üretilmiştir. Her üretimde, taze betonun hava içeriği ve çökme değeri belirlenmiştir (Şekil 3.1). S4 işlenebilirlik sınıfı, polikarboksilik eter esaslı kimyasal katkı kullanılarak sağlanmıştır. Taze beton, numune kalıplarına özenli şekilde yerleştirilmiş ve yerleştirilme işleminde sarsma tablası da kullanılmıştır.

Üretimi izleyen 24 saatlik süre boyunca beton numuneler kalıplarda kalmış, sonrasında numuneler kalıplardan dikkatli şekilde çıkartılmış ve $20\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de kirece doymun suda kür edilmiştir (Şekil 3.2). Beton serilerine ait kodlamalar, karışım içerikleri ve karışımlara ait diğer parametreler Tablo 3.3-3.4'teki gibidir.



Şekil 3.1 Taze beton deneyleri (a) hava içeriği tayini, (b) slump çökme deneyi



Şekil 3.2 Numunelerin kirece doymun suda kürü

Tablo 3.3 Beton serilerine ait kodlamalar

Kod	Açıklaması
N	Doğal agregalı beton
NS5	%5SF içeren doğal agregalı beton
NS10	%10SF içeren doğal agregalı beton
NB25	%0,25BF içeren doğal agregalı beton
NB50	%0,50BF içeren doğal agregalı beton
NB100	%1,00BF içeren doğal agregalı beton
NS5B25	%5SF ve %0,25BF içeren doğal agregalı beton
NS5B50	%5SF ve %0,50BF içeren doğal agregalı beton
NS5B100	%5SF ve %1,00BF içeren doğal agregalı beton
NS10B25	%10SF ve %0,25BF içeren doğal agregalı beton
NS10B50	%10SF ve %0,50BF içeren doğal agregalı beton
NS10B100	%10SF ve %1,00BF içeren doğal agregalı beton
R1	RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S5	%5SF ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S10	%10SF ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1B25	%0,25BF ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1B50	%0,50BF ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1B100	%1,00BF ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve R1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1S10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA1 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2	RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S5	%5SF ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S10	%10SF ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2B25	%0,25BF ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2B50	%0,50BF ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2B100	%1,00BF ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2S10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA2 içeren geri kazanılmış agregalı beton

Tablo 3.3 Beton serilerine ait kodlamalar (devamı)

Kod	Açıklaması
R12	RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S5	%5SF ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S10	%10SF ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12B25	%0,25BF ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12B50	%0,50BF ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12B100	%1,00BF ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12S10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA12 içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1i	RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS5	%5SF ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS10	%10SF ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iB25	%0,25BF ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iB50	%0,50BF ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iB100	%1,00BF ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R1iS10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA1i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2i	RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS5	%5SF ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS10	%10SF ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iB25	%0,25BF ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iB50	%0,50BF ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iB100	%1,00BF ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R2iS10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA2i içeren geri kazanılmış agregalı beton

Tablo 3.3 Beton serilerine ait kodlamalar (devamı)

Kod	Açıklaması
R12i	RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS5	%5SF ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS10	%10SF ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iB25	%0,25BF ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iB50	%0,50BF ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iB100	%1,00BF ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS5B25	%5SF ve %0,25BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS5B50	%5SF ve %0,50BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS5B100	%5SF ve %1,00BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS10B25	%10SF ve %0,25BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS10B50	%10SF ve %0,50BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton
R12iS10B100	%10SF ve %1,00BF içeren ve RA12i içeren geri kazanılmış agregalı beton

Tablo 3.4 Beton serilerine ait bileşenler

Numune	Çim., kg/m ³	SF, kg/m ³	BF, %	Su, kg/m ³	NA (4- 11,2mm), kg/m ³	NA (11,2- 22,4mm), kg/m ³	Kırma kum, kg/m ³	Dere kumu, kg/m ³	Geri kazanılmış agrega, kg/m ³	
									4-11,2 mm	11,2-22,4 mm
N	350	0	0	175	375	764	280	467	-	-
NS5	332,5	17,5	0	175	375	764	280	467	-	-
NS10	315	35	0	175	375	764	280	467	-	-
NB25	350	0	2,5	175	375	764	280	467	-	-
NB50	350	0	5	175	375	764	280	467	-	-
NB100	350	0	10	175	375	764	280	467	-	-
NS5B25	332,5	17,5	2,5	175	375	764	280	467	-	-
NS5B50	332,5	17,5	5	175	375	764	280	467	-	-
NS5B100	332,5	17,5	10	175	375	764	280	467	-	-
NS10B25	315	35	2,5	175	375	764	280	467	-	-
NS10B50	315	35	5	175	375	764	280	467	-	-
NS10B100	315	35	10	175	375	764	280	467	-	-
R1	350	0	0	175	-	764	280	467	295	-
R1S5	332,5	17,5	0	175	-	764	280	467	295	-
R1S10	315	35	0	175	-	764	280	467	295	-
R1B25	350	0	2,5	175	-	764	280	467	295	-
R1B50	350	0	5	175	-	764	280	467	295	-
R1B100	350	0	10	175	-	764	280	467	295	-
R1S5B25	332,5	17,5	2,5	175	-	764	280	467	295	-
R1S5B50	332,5	17,5	5	175	-	764	280	467	295	-
R1S5B100	332,5	17,5	10	175	-	764	280	467	295	-
R1S10B25	315	35	2,5	175	-	764	280	467	295	-
R1S10B50	315	35	5	175	-	764	280	467	295	-
R1S10B100	315	35	10	175	-	764	280	467	295	-
R2	350	0	0	175	375	-	280	467	-	572
R2S5	332,5	17,5	0	175	375	-	280	467	-	572
R2S10	315	35	0	175	375	-	280	467	-	572
R2B25	350	0	2,5	175	375	-	280	467	-	572
R2B50	350	0	5	175	375	-	280	467	-	572
R2B100	350	0	10	175	375	-	280	467	-	572
R2S5B25	332,5	17,5	2,5	175	375	-	280	467	-	572
R2S5B50	332,5	17,5	5	175	375	-	280	467	-	572
R2S5B100	332,5	17,5	10	175	375	-	280	467	-	572
R2S10B25	315	35	2,5	175	375	-	280	467	-	572
R2S10B50	315	35	5	175	375	-	280	467	-	572
R2S10B100	315	35	10	175	375	-	280	467	-	572
R12	350	0	0	175	-	-	280	467	295	572
R12S5	332,5	17,5	0	175	-	-	280	467	295	572
R12S10	315	35	0	175	-	-	280	467	295	572
R12B25	350	0	2,5	175	-	-	280	467	295	572
R12B50	350	0	5	175	-	-	280	467	295	572
R12B100	350	0	10	175	-	-	280	467	295	572
R12S5B25	332,5	17,5	2,5	175	-	-	280	467	295	572
R12S5B50	332,5	17,5	5	175	-	-	280	467	295	572
R12S5B100	332,5	17,5	10	175	-	-	280	467	295	572
R12S10B25	315	35	2,5	175	-	-	280	467	295	572
R12S10B50	315	35	5	175	-	-	280	467	295	572
R12S10B100	315	35	10	175	-	-	280	467	295	572

Tablo 3.4 Beton serilerine ait bileşenler (devamı)

Numune	Çim., kg/m ³	SF, kg/m ³	BF, lt/m ³	Su, kg/m ³	NA (4- 11,2mm), kg/m ³	NA (11,2- 22,4mm), kg/m ³	Kırma kum, kg/m ³	Dere kumu, kg/m ³	Geri kazanılmış agrega, kg/m ³	
									4-11,2 mm	11,2-22,4 mm
R1i	350	0	0	175	-	764	280	467	369	-
R1iS5	332,5	17,5	0	175	-	764	280	467	369	-
R1iS10	315	35	0	175	-	764	280	467	369	-
R1iB25	350	0	2,5	175	-	764	280	467	369	-
R1iB50	350	0	5	175	-	764	280	467	369	-
R1iB100	350	0	10	175	-	764	280	467	369	-
R1iS5B25	332,5	17,5	2,5	175	-	764	280	467	369	-
R1iS5B50	332,5	17,5	5	175	-	764	280	467	369	-
R1iS5B100	332,5	17,5	10	175	-	764	280	467	369	-
R1iS10B25	315	35	2,5	175	-	764	280	467	369	-
R1iS10B50	315	35	5	175	-	764	280	467	369	-
R1iS10B100	315	35	10	175	-	764	280	467	369	-
R2i	350	0	0	175	375	-	280	467	-	706
R2iS5	332,5	17,5	0	175	375	-	280	467	-	706
R2iS10	315	35	0	175	375	-	280	467	-	706
R2iB25	350	0	2,5	175	375	-	280	467	-	706
R2iB50	350	0	5	175	375	-	280	467	-	706
R2iB100	350	0	10	175	375	-	280	467	-	706
R2iS5B25	332,5	17,5	2,5	175	375	-	280	467	-	706
R2iS5B50	332,5	17,5	5	175	375	-	280	467	-	706
R2iS5B100	332,5	17,5	10	175	375	-	280	467	-	706
R2iS10B25	315	35	2,5	175	375	-	280	467	-	706
R2iS10B50	315	35	5	175	375	-	280	467	-	706
R2iS10B100	315	35	10	175	375	-	280	467	-	706
R12i	350	0	0	175	-	-	280	467	369	706
R12iS5	332,5	17,5	0	175	-	-	280	467	369	706
R12iS10	315	35	0	175	-	-	280	467	369	706
R12iB25	350	0	2,5	175	-	-	280	467	369	706
R12iB50	350	0	5	175	-	-	280	467	369	706
R12iB100	350	0	10	175	-	-	280	467	369	706
R12iS5B25	332,5	17,5	2,5	175	-	-	280	467	369	706
R12iS5B50	332,5	17,5	5	175	-	-	280	467	369	706
R12iS5B100	332,5	17,5	10	175	-	-	280	467	369	706
R12iS10B25	315	35	2,5	175	-	-	280	467	369	706
R12iS10B50	315	35	5	175	-	-	280	467	369	706
R12iS10B100	315	35	10	175	-	-	280	467	369	706

3.1.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri, beton kürünü izleyen 28. günde yapılmıştır (Şekil 3.3-3.4). Deneylere ait detaylar Tablo 3.5'te verilmekte olup, deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 3.5 Numuneler üzerinde yapılan deneyler ve diğer detaylar

	Deney adı	Standart	Numune boyutları (mm)
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk	TS 12390-7 (2010)	100Φ200
	Su emme	TS 12390-7 (2010)	100Φ200
	Ultra ses geçiş hızı	TS EN 12504-4	100Φ200
Mekanik Özellikleri	Basınç dayanımı	TS EN 12390-3 (2010)	150Φ300
	Eğilme dayanımı	TS EN 12390-5 (2010)	100x100x500
	Yarmada çekme dayanımı	TS EN 12390-6 (2010)	100Φ200
	Elastisite modülü	ASTM C 469 (2002)	150Φ300
	Kırılma parametreleri	JCI-S-002 (2003)	100x100x500
Kalıcılık Özellikleri	Basınçlı su geçirimsliliği	TS EN 12390-8 (2010)	150x150x150
	Aşınma dayanımı	TS 2824 EN 1338 (2005)	70x70x70
	Kılcal su emme	ASTM C1585-13 (2013)	100Φ50
	Klorür geçirimsliliği	NT BUILD 443 (1995)	100Φ50



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.3 Sertleşmiş beton deneylerinden kesitler: (a) basınç deneyi, (b) yarmada-çekme deneyi, (c) elastisite modülü deneyi, (d)-(e) su emme ve yoğunluk deneyleri



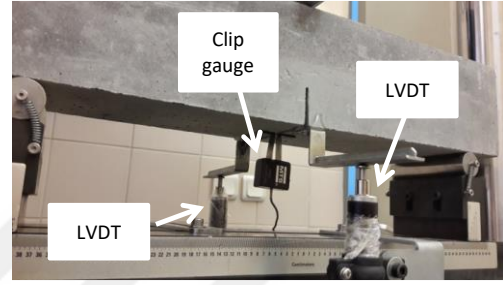
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.4 Çentikli kiriş eğilme deneyinden kesitler: (a) kiriş çentiğinin açılması, (b) kiriş ağırlığının belirlenmesi, (c)-(d) deney düzeneği ve deneyde kullanılan cihazlar

3.1.3.1 Beton Fiziksel ve Mekanik Özellikleri için Deneyler

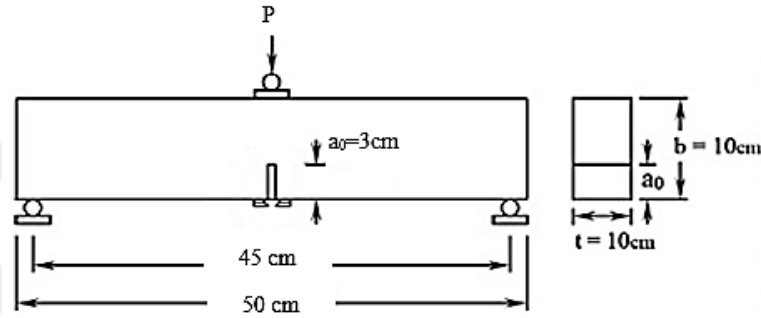
Beton numuneler üzerinde yürütülen su emme ve yoğunluk deneyleri, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü deneylerine ait detaylar Bölüm 2 Deneyisel Çalışma başlığı altında verilmektedir. Bunlara ek olarak bu bölümde yapılan diğer deneylere ait bilgiler ise aşağıda verilmektedir.

Sertleşmiş beton numuneler üzerinde ultra ses geçiş hızı (UGH) deneyi TS EN 12504-4 (2012)'ye uygun olarak 100Φ200 mm boyutlu numuneler üzerinde belirlenmiş ve deney sonuçları (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$UGH = \frac{n}{t} \quad (3.1)$$

Burada, UGH ultra ses geçiş hızını (km/s), n cihaz başlıkları arasında kalan uzaklık (km) ve t geçiş süresidir (saniye).

Kırılma parametreleri deneyi, JCI-S-002 (2003)'e uygun olarak 30 mm çentikli 100x100x500mm boyutlu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Deney düzeneği, 3 noktadan yüklemeli eğilme deney düzeneği olup yükleme cihazı deplasman kontrollü eğilme cihazı ve yükleme hızı 0,05mm/dk'dır. Deney esnasında, cihazın uyguladığı yük (P, Newton), çentik ağzı açılması (COD, mm) genişlemesi ölçer (clip-gauge) ile ve kiriş sehim değeri (δ , mm) uzama ölçer (Linear Variable Differential Transformer (LVDT)) ile anlık olarak bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 3.5 Çentikli kiriş eğilme deney düzeneği

Betonların kırılma parametreleri, çentikli kiriş eğilme deneyinden elde edilen datalar dikkate alınarak Çift-K Kırılma Parametreleri Yöntemi ile hesaplanmıştır [56]. Yöntemde, ilk kırılma tokluğu (K_{IC}^{ini} , MPa.mm^{0,5}) ve kararsız kırılma tokluğu (K_{IC}^{un} , MPa.mm^{0,5}) kırılma parametreleri olarak hesaplanmakta ve tokluklar arasındaki ilişki (3.2)'de verilmektedir. K_{IC}^C (MPa.mm^{0,5}) değeri kohezif tokluk olup kararsız kırılma tokluğu öncesi, ilk çatlak oluşumu anında ilk kırılma tokluğu (K_{IC}^{ini}) değerine eşittir. Yöntemde ilk çatlama tokluğu ters analitik yöntemle (3.2) yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$K_{IC}^{ini} = K_{IC}^{un} - K_{IC}^C \quad (3.2)$$

(3.2)'de K_{IC}^C betonun kohezif tokluk değeri (3.3) ile hesaplanır:

$$K_{IC}^C = \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} \left\{ A_1 a \left[2s^{0.5} + M_1 s + \frac{2}{3} M_2 s^{1.5} + \frac{M_3}{2} s^2 + \frac{2}{5} M_4 s^{2.5} \right] + A_2 a^2 \left[\frac{4}{3} s^{1.5} + \frac{M_1}{s} s^2 + \frac{4}{15} M_2 s^{2.5} + \frac{4}{15} M_4 s^{3.5} + \frac{M_3}{6} \left\{ 1 - \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 - 3s \frac{a_0}{a} \right\} \right] \right\} \quad (3.3)$$

(3.3)'de $s = (1 - a_0/a)$, $A_1 = \sigma_u (CTOD_c)$, ve $A_2 = (f_t - \sigma_u (CTOD_c)) / (a - a_0)$ şeklindedir. A_2 değeri tanımlanırken kullanılan σ_u ifadesi en büyük yük altında kirişte oluşan eğilme

gerilmesidir. (3.3)'da a çatlak ağzı açıklığı değeri, en büyük eğilme yükü (P_u , kN) altında a_c (mm) kritik çatlak ağzı açılmasına denk gelmektedir. A_1 ve A_2 hesaplanırken kullanılan $CTOD_c$ (mm) değeri çatlak dibi kritik açılma değeri olup pik yük etkisi altında oluşmakta ve (3.4) ile hesaplanmaktadır:

$$CTOD_c = CMOD_c \left\{ \left(1 - \frac{a_0}{a_c} \right)^2 + \left(1,081 - 1,149 \frac{a_c}{D} \right) \left[\frac{a_0}{a_c} - \left(\frac{a_0}{a_c} \right)^2 \right] \right\}^{0,5} \quad (3.4)$$

(3.4)'de $CMOD_c$ (mm) kritik çatlak ağzı açıklığı değeri olup pik yük etkisi altında oluşmaktadır. (3.3)'da kullanılan 4 terimli evrensel ağırlık fonksiyonu parametreleri $i=2$ ve 4 için (3.5) ve $i=1$ ve 3 için (3.6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_i = \left[a_i + b_i \frac{a}{D} \right] \quad (3.5)$$

$$M_i = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{a}{D} \right) \right)^{1,5}} \left[a_i + b_i \left(\frac{a}{D} \right)^1 + c_i \left(\frac{a}{D} \right)^2 + d_i \left(\frac{a}{D} \right)^3 + e_i \left(\frac{a}{D} \right)^4 + f_i \left(\frac{a}{D} \right)^5 \right] \quad (3.6)$$

(3.5)-(3.6)'daki $a_i, b_i, c_i, \dots, f_i$ değerleri Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.6 Evrensel ağırlık fonksiyonu parametreleri

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	-0.000824975	0.6878602	0.4942668	-3.25418434	3.4426983	-1.3689673
2	0.782308	-3.0488836				
3	-0.3049218	13.4186519	-23.31662697	35.51066606	-34.440981408	14.10339412
4	0.28347699	-7.378355423				

3.1.4 Fiziksel ve Mekanik Deneylere Ait Sonuçlar

Beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Tablo 3.7-3.8'de verilmektedir.

Tablo 3.7 Deney sonuçları

Numune	Hava, %	Yoğunluk, g/cm ³	Su emme, %	UGH, km/s	Basınç day., MPa	Y. çekme day., MPa	Eğilme day., MPa	E-modülü, MPa
N	1,1	2,41	3,98	4,02	35,9	2,6	9,9	25171
NS5	1,1	2,37	2,96	4,11	40,0	3,0	10,8	27790
NS10	1,2	2,34	2,82	4,22	46,5	3,2	10,1	32780
NB25	1,3	2,39	4,36	3,99	39,4	2,7	9,4	28619
NB50	1,8	2,36	4,83	3,95	37,4	2,6	10,6	27902
NB100	2,5	2,35	5,12	3,90	38,7	2,9	10,9	32073
NS5B25	2,5	2,35	3,34	4,09	40,6	2,4	9,5	31166
NS5B50	2,6	2,34	3,41	4,06	41,5	2,4	9,8	32003
NS5B100	2,8	2,33	4,65	4,04	35,4	2,7	9,6	32544
NS10B25	2,6	2,34	3,43	4,08	45,8	2,8	10,5	26834
NS10B50	2,7	2,35	3,61	4,01	39,0	2,5	11,7	31613
NS10B100	2,5	2,36	4,25	3,98	35,7	2,6	12,0	31085
R1	1,6	2,37	7,95	3,86	29,6	2,6	8,7	22632
R1S5	1,4	2,34	6,21	3,95	34,8	2,8	10,0	27328
R1S10	1,4	2,32	5,32	4,06	46,9	3,1	9,1	25099
R1B25	1,9	2,36	8,66	3,83	29,6	2,4	11,1	28276
R1B50	2,0	2,29	9,18	3,80	37,0	2,8	9,9	30540
R1B100	2,2	2,28	9,37	3,74	36,2	3,7	9,4	29018
R1S5B25	2,1	2,30	6,81	3,93	29,2	2,5	9,0	31917
R1S5B50	2,5	2,28	7,15	3,91	32,8	2,0	9,8	30893
R1S5B100	2,8	2,24	7,51	3,88	37,7	1,9	8,6	27241
R1S10B25	2,2	2,31	6,40	3,92	39,5	2,5	9,6	23275
R1S10B50	2,6	2,30	6,86	3,86	33,5	2,5	8,7	24251
R1S10B100	3,0	2,29	7,53	3,82	36,1	2,3	10,0	24950
R2	2,6	2,35	8,92	3,81	28,1	2,1	8,8	21123
R2S5	2,4	2,32	7,23	3,90	35,0	2,9	9,2	29108
R2S10	2,3	2,30	6,13	4,01	29,7	3,2	9,6	26060
R2B25	2,5	2,33	8,97	3,78	29,9	3,3	9,6	25600
R2B50	2,7	2,29	9,12	3,75	32,6	2,9	8,5	24305
R2B100	2,8	2,27	9,68	3,69	30,0	3,2	11,1	26056
R2S5B25	2,5	2,27	8,61	3,88	27,8	2,1	7,3	28796
R2S5B50	2,8	2,25	8,82	3,86	29,0	2,1	7,9	29969
R2S5B100	3,3	2,24	9,27	3,83	28,2	1,9	9,2	27599
R2S10B25	2,8	2,28	7,22	3,87	28,7	2,3	8,0	32854
R2S10B50	2,8	2,26	7,61	3,81	26,6	2,0	9,9	31289
R2S10B100	3,5	2,25	8,27	3,77	29,7	2,2	9,3	30260
R12	3,2	2,32	9,64	3,66	23,4	2,0	8,4	20454
R12S5	3,0	2,28	8,04	3,75	28,8	2,6	8,9	21842
R12S10	2,8	2,25	7,52	3,85	28,8	2,5	9,3	24645
R12B25	3,1	2,29	10,79	3,63	28,7	2,6	9,3	23762
R12B50	3,3	2,28	10,98	3,60	29,1	2,3	9,1	21594
R12B100	3,4	2,25	11,90	3,55	24,0	2,4	11,8	16434
R12S5B25	3,0	2,26	9,01	3,73	25,1	1,9	7,5	33449
R12S5B50	3,1	2,25	9,41	3,70	28,0	1,8	7,4	29240
R12S5B100	3,5	2,23	9,78	3,67	26,8	1,9	7,2	27391
R12S10B25	3,1	2,25	8,79	3,72	29,0	1,9	7,0	25925
R12S10B50	3,3	2,24	9,56	3,65	28,1	1,9	7,5	25284
R12S10B100	3,5	2,22	10,11	3,62	29,3	1,9	8,8	22192

Tablo 3.7 Deney sonuçları (devamı)

Numune	Hava, %	Yoğunluk, g/cm ³	Su emme, %	UGH, km/s	Basınç day., MPa	Y.çekme day., MPa	Eğilme day., MPa	E-modülü, MPa
R1i	1,1	2,40	4,77	4,04	35,2	2,3	10,1	24824
R1iS5	1,0	2,39	3,98	4,14	40,2	3,0	10,9	30644
R1iS10	1,1	2,37	3,30	4,26	43,5	2,9	10,5	34708
R1iB25	1,3	2,39	5,00	4,01	42,1	2,4	11,3	30060
R1iB50	1,7	2,38	5,52	3,98	42,2	3,1	10,6	32034
R1iB100	2,6	2,35	6,13	3,92	39,7	2,8	10,3	30698
R1iS5B25	2,3	2,35	4,50	4,12	39,3	2,3	8,4	35698
R1iS5B50	2,5	2,33	4,68	4,09	41,6	1,9	9,0	34390
R1iS5B100	3,0	2,32	5,07	4,06	38,0	2,3	8,2	33506
R1iS10B25	2,1	2,33	4,12	4,11	37,9	1,9	9,5	31129
R1iS10B50	2,4	2,32	4,65	4,04	34,4	2,3	10,1	31022
R1iS10B100	2,8	2,32	4,79	4,01	29,5	2,4	10,9	31029
R2i	1,2	2,40	5,72	3,96	35,1	2,2	9,6	23674
R2iS5	1,1	2,38	4,80	4,06	41,1	2,7	10,1	31842
R2iS10	1,1	2,36	3,95	4,17	50,4	3,9	9,8	37787
R2iB25	1,3	2,38	6,31	3,93	37,7	3,0	11,0	28792
R2iB50	1,6	2,37	6,64	3,90	40,0	2,7	10,2	23793
R2iB100	2,5	2,35	6,92	3,85	42,0	3,1	10,4	31855
R2iS5B25	2,1	2,36	5,23	4,04	32,9	2,4	9,1	30691
R2iS5B50	2,4	2,37	5,56	4,01	30,3	2,4	10,2	32010
R2iS5B100	2,5	2,35	5,86	3,98	30,2	2,5	9,4	29954
R2iS10B25	2,4	2,35	5,11	4,03	29,3	2,5	9,3	30394
R2iS10B50	2,5	2,35	5,27	3,96	31,6	2,1	10,2	29960
R2iS10B100	3,0	2,31	6,16	3,93	31,7	2,7	12,5	27002
R12i	1,6	2,40	5,80	3,94	32,3	2,3	9,6	22619
R12iS5	1,4	2,38	5,72	4,04	40,6	2,6	10,1	24320
R12iS10	1,3	2,36	4,76	4,15	49,2	3,4	9,8	24646
R12iB25	1,8	2,39	6,30	3,91	33,7	2,6	11,0	29957
R12iB50	1,9	2,38	6,34	3,88	36,4	2,6	10,2	26676
R12iB100	2,1	2,36	6,92	3,82	37,2	2,5	10,4	23968
R12iS5B25	2,3	2,37	5,32	4,02	34,3	2,2	8,2	31239
R12iS5B50	2,4	2,36	5,70	3,99	35,1	2,5	9,2	31487
R12iS5B100	2,6	2,34	6,90	3,96	32,3	2,3	8,1	25742
R12iS10B25	2,2	2,35	5,74	4,01	41,3	2,2	8,9	29489
R12iS10B50	2,5	2,33	6,44	3,94	43,8	2,6	8,7	29262
R12iS10B100	2,5	2,32	6,63	3,91	39,0	2,5	9,9	30824

Tablo 3.8 Betonlara ait kırılma parametreleri

Numune	CMOD _c , mm	K _{ic} ⁱⁿⁱ , MPa.mm ^{0.5}	K _{ic} ^{un} , MPa.mm ^{0.5}
N	0,024	41,94	122,32
NS5	0,025	41,07	133,66
NS10	0,024	25,31	125,11
NB25	0,031	32,91	116,45
NB50	0,026	46,34	131,53
NB100	0,032	44,77	134,68
NS5B25	0,031	46,27	118,20
NS5B50	0,040	44,98	120,85
NS5B100	0,026	33,35	118,70
NS10B25	0,036	45,84	129,88
NS10B50	0,031	68,03	145,24
NS10B100	0,029	70,00	148,33
R1	0,030	41,26	107,97
R1S5	0,040	35,18	124,16
R1S10	0,035	15,30	112,74
R1B25	0,033	52,95	137,57
R1B50	0,032	32,98	122,40
R1B100	0,041	13,12	116,34
R1S5B25	0,039	33,12	111,47
R1S5B50	0,031	64,16	121,68
R1S5B100	0,028	50,12	106,76
R1S10B25	0,035	38,79	119,03
R1S10B50	0,026	41,22	121,71
R1S10B100	0,036	43,86	124,45
R2	0,037	44,62	108,97
R2S5	0,039	15,20	113,66
R2S10	0,043	13,34	118,35
R2B25	0,048	12,18	118,36
R2B50	0,034	12,18	104,91
R2B100	0,036	34,50	137,47
R2S5B25	0,030	27,32	90,86
R2S5B50	0,031	37,85	97,59
R2S5B100	0,031	52,15	113,98
R2S10B25	0,047	24,05	109,52
R2S10B50	0,032	61,17	122,65
R2S10B100	0,031	47,02	115,54
R12	0,037	41,82	104,32
R12S5	0,030	27,57	109,94
R12S10	0,055	34,03	115,55
R12B25	0,039	28,54	114,92
R12B50	0,030	30,32	112,25
R12B100	0,041	66,46	146,47
R12S5B25	0,038	29,94	92,75
R12S5B50	0,035	39,48	92,24
R12S5B100	0,031	29,56	89,17
R12S10B25	0,030	26,27	87,08
R12S10B50	0,032	33,92	93,42
R12S10B100	0,044	49,82	109,42

Tablo 3.8 Betonlara ait kırılma parametreleri (devamı)

Numune	CMOD _c , mm	K _{ic} ⁱⁿⁱ , MPa.mm ^{0.5}	K _{ic} ^{un} , MPa.mm ^{0.5}
R1i	0,029	53,74	125,11
R1iS5	0,037	41,82	135,17
R1iS10	0,032	37,86	129,89
R1iB25	0,040	64,79	140,29
R1iB50	0,034	40,51	131,68
R1iB100	0,025	30,04	127,25
R1iS5B25	0,030	46,16	104,14
R1iS5B50	0,030	54,61	111,48
R1iS5B100	0,035	39,67	101,37
R1iS10B25	0,034	61,31	117,36
R1iS10B50	0,031	53,86	125,40
R1iS10B100	0,035	52,83	134,56
R2i	0,032	59,94	118,49
R2iS5	0,046	9,89	125,19
R2iS10	0,029	36,07	121,43
R2iB25	0,029	41,53	135,98
R2iB50	0,032	36,51	126,47
R2iB100	0,037	38,98	129,03
R2iS5B25	0,048	38,08	112,98
R2iS5B50	0,033	41,43	126,42
R2iS5B100	0,026	37,14	116,52
R2iS10B25	0,034	63,11	115,23
R2iS10B50	0,031	59,11	125,99
R2iS10B100	0,054	51,54	155,26
R12i	0,032	50,29	123,61
R12iS5	0,040	56,81	135,23
R12iS10	0,036	18,05	129,01
R12iB25	0,041	40,37	123,64
R12iB50	0,031	54,30	133,25
R12iB100	0,026	23,80	107,41
R12iS5B25	0,027	31,48	101,01
R12iS5B50	0,037	31,79	102,90
R12iS5B100	0,042	26,45	100,88
R12iS10B25	0,029	42,44	110,80
R12iS10B50	0,034	44,15	118,00
R12iS10B100	0,032	51,73	122,42

3.1.5 Beton Kalıcılık Deneyleri ve Yaşam Döngüsü Analizi

Kalıcılık deneyleri TOPSİS ile belirlenen en iyi beton serileri üzerinde gerçekleştirilmiş, ayrıca, bu betonların yaşam döngü analizleri yapılarak karbon ayak izi değerleri hesaplanmıştır. En iyi betonların seçimine, kalıcılık deneylerine ve yaşam döngüsü analizine ait detaylar ilerleyen bölümlerde verilmektedir.

3.1.5.1 TOPSİS ile En İyi Beton Serilerinin Seçimi

TOPSİS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), mühendislikte ve birçok alanda karar verme aşamasında kullanılan çok kriterli Karar Destek Sistemidir. TOPSİS'te giriş verileri ile en uygun durumun belirlenmesi yapılmakta olup işlem adımlarında ağırlıklandırma da bulunmaktadır. Böylelikle, öncelik verilen parametreler diğer parametrelerden öne çıkartılabilmektedir (Bknz. EK A).

Bu tez çalışmasında elde edilen betonlara ait fiziksel ve mekanik deney sonuçları, TOPSİS kullanılarak irdelenmiştir. TOPSİS kullanılarak en iyi beton serileri belirlenmiş ve belirlenen betonlar üzerinde kalıcılık deneyleri yapılmıştır. Objektif olarak işleyen TOPSİS yönteminde ağırlık katsayıları tek sübjektif kısımdır ve TOPSİS için gerekli ağırlık katsayıları, literatürden derlenen veriler ile oluşturulan veri tabanı ile objektif olarak belirlenmiştir (Tablo 3.9) (Bknz. EK 2). Böylelikle, en iyi beton serileri TOPSİS yöntemi yardımıyla objektif olarak belirlenebilmiştir (Tablo 3.10).

Tablo 3.9 TOPSİS için belirlenen ağırlık katsayıları

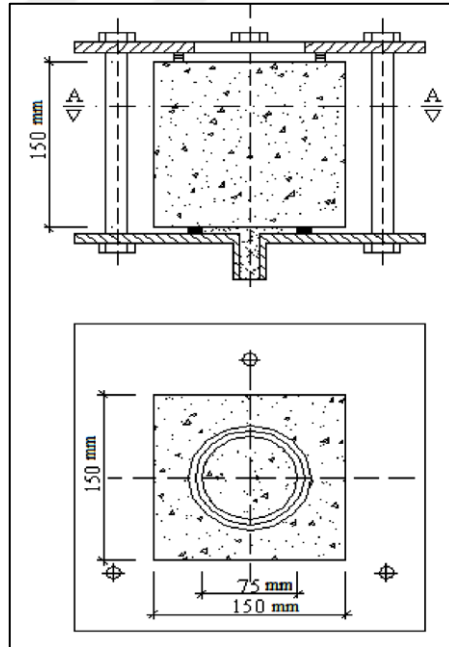
Beton özelliği	Yoğunluk	Su emme	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Elastisite modülü
Ağırlık katsayısı	3	9	9	3	7

Tablo 3.10 TOPSİS ile belirlenen en iyi beton serileri

Numune	İdeal çözüm değeri olan 1'e görelilik
N	0,677
NS10	0,885
R1S10	0,696
R2S10	0,525
R12S10	0,411
R1iS10	0,849
R2iS10	0,903
R12iS10	0,739

3.1.5.2 Basınçlı Su İşleme Derinliği

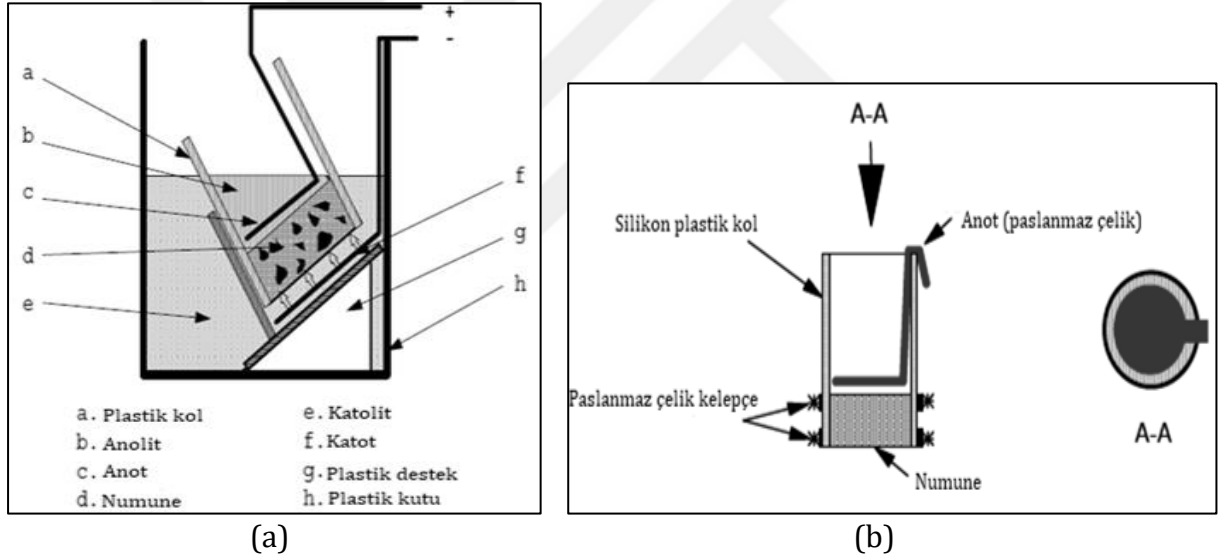
Basınçlı su geçirimsizliği deneyi, TS EN 12390-8'e uygun olarak 150x150x150 mm boyutlu küp numuneler üzerinde yapılmıştır (Şekil 3.6). Numuneler 500 kPa basınçlı suya 72 saat maruz kalmış ve numuneler suya maruz kalan yüzeyine dik şekilde ortadan ikiye yarılarak su işleme derinliği kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Deney esnasında 0,01 mm hassasiyetli kumpas kullanılmıştır.



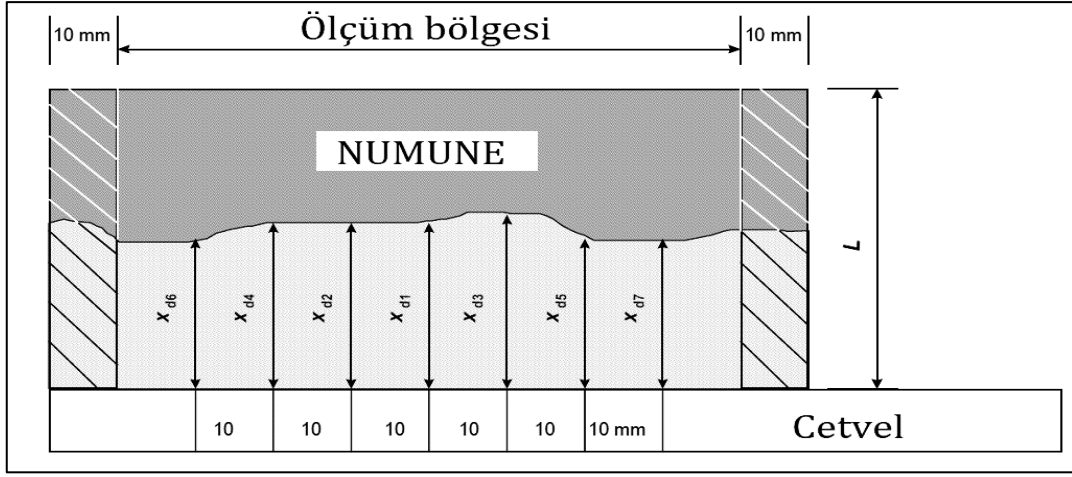
Şekil 3.6 Basınçlı su işleme derinliği deney düzeneği (TS EN 12390-8)

3.1.5.3 Klorür İyon Geçirirliiği

Klorür iyon geçirirliiği deneyi, NT 492'e uygun olarak 100 mm çaplı 50 mm yükseklikli silindirik numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler öncelikle 3 saatlik 1-5 kPa basınç altında vakum edilmiş ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonu ile numuneler 18 saat doyurulmuştur. Ardından, numuneler 2N NaCl anolit ve 0.3N NaCl katolit solüsyonlarına maruz bırakılmış (şekil 3.7) ve numunelere 20-25°C'de belli bir süre sabit voltaj uygulanarak deney tamamlanmıştır. Uygulanan voltaj değeri ve deney süresi, deney başlangıcında ilk uygulanan 30V'a karşı ölçülen akım değerine göre NT 492'de verilen akım-voltaj-süre tablosundan seçilmektedir. Deney süresi sonrasında, silindirik numuneler ortadan ikiye ayrılmış ve üzerlerine 0,1M AgNO_3 çözeltisi püskürtölmüştür. Oluşan renk değişimi ile siyaha dönen kısımların derinlikleri, 0,01 mm hassasiyetli kumpas ile yanlardan 10 mm içerde olacak şekilde NT 492'de belirtilen mesafelerden ölçölmüştür (şekil 3.8).



şekil 3.7 Klorür iyon geçirirliiği deney düzeneği (NT 492): (a) numunenin deney düzeneğine yerleştirilmiş hali (b) numunenin yerleştirildiği cihaz parçasından boy kesit ve en kesit



Şekil 3.8 Klorür işleme derinliği ölçümü (NT 492)

Deneyler sonrasında numunelere ait Klorür Taşınım Katsayısı, (3.7) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2) tt} (x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}}) \quad (3.7)$$

Burada, D_{ssm} klorür taşınım katsayısı ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), U uygulanan voltaj (Volt), T sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), L numune kalınlığı (mm), x_d ortalama klorür işleme derinliği (mm), tt deney süresidir (saat).

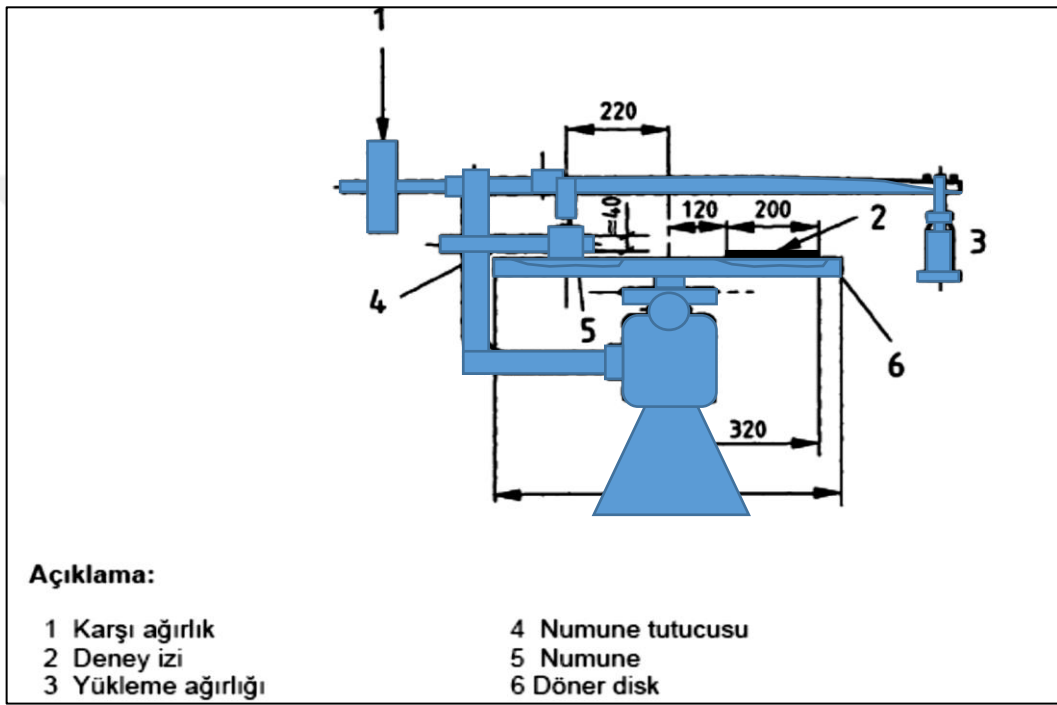
3.1.5.4 Aşınma Dayanımı

Aşınma dayanımı deneyi, TS EN 14157 (2017)'ye uygun olarak 70 mm boyutlu küp numuneler üzerinde yapılmıştır (Şekil 3.9). Deney öncesi, 24 saat $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ' de etüv kurusu hale getirilmiş numunelerin ağırlıkları 0,1g hassasiyetinde çalışan terazi ile ve boyutları 0,01 mm hassasiyetinde çalışan kumpas ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ardından numuneler cihaza yerleştirilerek $0,06 \text{ N/mm}^2$ ($294 \pm 3 \text{ N}$ yük) basınç altında 22 dönüş 1 çevrim olacak şekilde 16 çevrim boyunca aşınmaya maruz bırakılmıştır. Aşınma esnasında tabla ile numune arasında korundum tozu bulunmaktadır ve bu toz deney öncesi tablaya konulmakta olup her bir çevrimde eski aşındırıcı toz tabladan alınıp yenisi konularak yenilenmiştir. Korundum tozu, alüminyum oksit içerikli, elmaşta sonra en yüksek sertlik değerine sahip (10 üzerinden 9 Mohs sertliği), yüzey parlatılması işlemlerinde sıklıkla kullanılan metamorfik bir malzemedir [1], [57].

Deney sonrası numunelerde oluşan hacim kaybı ve ağırlık kaybı 0,1g hassasiyetli tartı ve 0,01mm hassasiyetli kumpas kullanılarak belirlenmiş ve numune hacmindeki azalma (3.8) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (3.8)$$

Burada, ΔV 16 çevrim sonrasında oluşan hacim kaybı (mm^3), Δm 16 çevrim sonrasında oluşan kütle kaybı (g) ve ρ numunenin yoğunluğudur (g/mm^3).



Şekil 3.9 Aşınma deneyi düzeneği (TS EN 14157)

3.1.5.5 Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi, ASTM C1585 – 13 (2013)'e uygun olarak 100 mm çaplı 50 mm yükseklikli silindirik numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney öncesi, 24 saat $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ' de etüv kurusu hale getirilmiş numunelerin ağırlıkları 0,01g hassasiyetinde çalışan terazi ile tartılarak ilk ağırlıkları belirlenmiş, yan yüzeyleri su geçirimsizliği sağlayacak malzeme (parafin) ile kaplanmış ve numunelerin su ile temasının sağlanacağı içinde su ile silikon çubuklar bulunan kap hazırlanmıştır (Şekil 3.10). Ardından numuneler kaba yerleştirilmiş, standart süreler boyunca su ile teması sağlanmış, süreler süreölçer ile belirlenmiş ve standardın talep ettiği

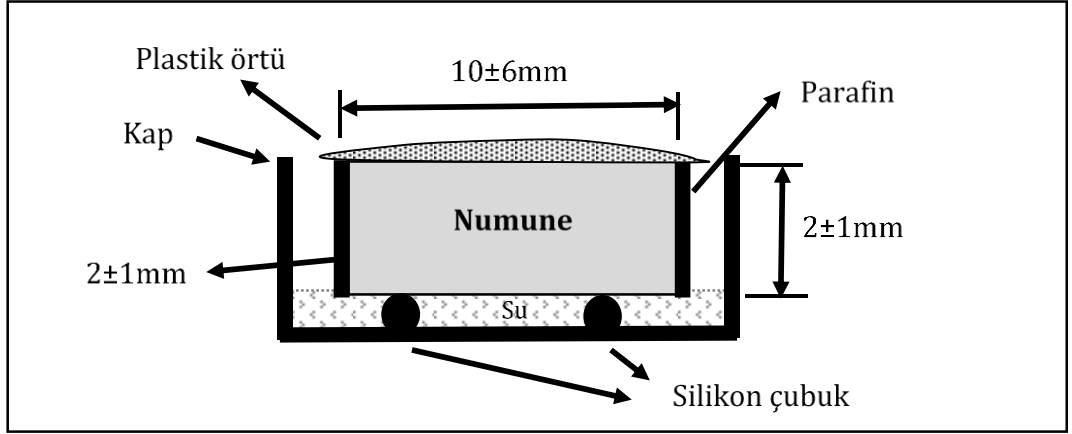
sürelerde numune ağırlıkları ölçülerek değerler not edilmiştir. Her bir süre aralığı için belirlenen su emme değerleri (3.9) yardımıyla hesaplanmıştır. Ağırlık ölçümlerinin yapıldığı süreler Tablo 3.11’de verilmektedir.

$$I = \frac{m_t}{A \times \rho} \quad (3.9)$$

Burada I kılcallıkla su emme değeri, m_t t anındaki kütlede oluşan değişim, A numunenin su ile temas ettiği kesit alanı (mm^2), ρ suyun yoğunluğudur (g/cm^3).

Tablo 3.11 Kılcal su emme deneyinde dikkate alınan süreler

Dikkate alındığı yer	Saniye
Başlangıç su emme oranı	0
	60
	300
	600
	1200
	1800
	3600
	7200
	10800
	14400
	18000
	21600
	92220
İkincil su emme oranı	193200
	268500
	432000
	527580
	622200
	691200



Şekil 3.10 Kılcal su emme deney düzeneği (ASTM C1585 – 13)

Başlangıç su emme oranı, birinci dakikadan altıncı saate kadar olan ölçümlerde elde edilen su emme-kök içinde süre (saniye) değerlerine uydurulan en yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır. İkincil su emme oranı, birinci günden yedinci güne kadar olan ölçümlerde elde edilen su emme-kök içinde süre (saniye) değerlerine uydurulan en yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu başlangıç ve ikincil su emme oranları her bir numune için elde edilen yüksek korelasyon katsayılı doğruların eğiminden belirlenmiştir.

3.1.5.6 Yaşam Döngüsü Analizi

Yaşam döngüsü analizi ile, beton serilerinin çevreye yapmış oldukları etkilerden karbon salınımı incelenecek ve böylelikle betonların karbon ayak izleri oluşturulacaktır. Bu amaçla literatür verilerinden faydalanılarak bir varsayım üzerinden betonların karbon ayak izleri hesaplanmıştır. Yapılan ilk varsayımda, Cebeci/Sultangazi/İstanbul agrega ocağı kullanılmakta, Yeni Bosna/İstanbul'daki BetonSA Hazır Beton Üretim Tesis'i'nde beton üretilerek Beşiktaş/İstanbul'da bulunan Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi binası inşası yapılmakta, servis süresi sonrasında okul binası yıkılmakta ve en nihayetinde molozlar Kemerburgaz/İstanbul'daki İSTAÇ Dönüşüm Tesis'i'nde geri kazanılmış agrega haline getirilerek tekrar beton santraline iletilmektedir. İlgili mahallerin adresleri ve konum bilgileri (enlem-boylam) aşağıda Tablo 3.12'de sunulmaktadır. Ayrıca, mahaller arasındaki karayolu mesafesi Tablo 3.13'te verilmektedir. Yapılan ikinci

varsayımda ise yıkımın ardından yerinde geri dönüşüm ve beton üretimi yapılması düşünülmüştür.

Tablo 3.12 Mahallere ait adres bilgisi (Kaynak: Google Haritalar)

Mahallin adı	Adresi	Haritadaki konumu
Cebeci taş ocağı	Cebeci Mahallesi, 2803. Sok. No:7, 34270 Sultangazi/İstanbul	41.120604, 28.875876
BetonSA Hazır Beton Tesisi	Yenibosna Merkez Mahallesi, 34197 Bahçelievler/İstanbul	41.023143, 28.809423
Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi	Yıldız Mahallesi, Yıldız Caddesi, No:73, 34349 Beşiktaş/İstanbul	41.050448, 29.008125
İSTAÇ Moloz Ve Hafriyat Döküm Sahası	İhsaniye Mahallesi, 34075 Eyüp/İstanbul	41.242821, 28.799878

Tablo 3.13 Mevkiler arası mesafeler (Kaynak: Google Haritalar)

Mevkiler	Mesafe
Agrega ocağı-hazır beton tesisi arası	20 km
Hazır beton tesis-okul binası arası	27 km
Okul binası-dönüşüm tesisi arası	34 km
Dönüşüm tesisi-hazır beton tesisi arası	30 km

Betonların yaşam döngüsü analizinde kullanılan agregâ çıkartma, kırma, eleme işlemlerine ait bilgiler ve ilgili işlemlerde salınan karbon miktarları, çimento üretimi ile salınan karbon miktarı gibi veriler ilgili literatürden elde edilmiştir (Tablo 3.14-3.15) [58]–[60]. MJ/ton olarak verilen enerji bilgileri kg CO₂/kWh dönüşüm katsayısı ile eşdeğer karbon salınımı değerine dönüştürülmüştür [61]. Böylelikle eşdeğer karbon salınımı değerleri bulunabilmiştir.

Tablo 3.14 Malzemeler için harcanan enerji değerleri

Malzeme ve İşlem	Detay	Gerekli enerji
Kum	Çıkarma	69 MJ/ton
Kırma kum	Çıkarma/Kırma/Eleme	27 MJ/ton
İri doğal agregası	Çıkarma/Kırma/Eleme	22 MJ/ton
İri geri kazanılmış agregası (sabit tesis)	Ayırma	35 MJ/ton
	Kırma/Eleme	4 MJ/ton
İri geri kazanılmış agregası (mobil tesis)	Ayırma	35 MJ/ton
	Kırma/Eleme	24,7 MJ/ton
Çimento	Üretim	720 kg CO ₂ /ton
Karıştırma işi	Sabit tesis	16 MJ/ton
	Mobil tesis	16 MJ/ton
Yıkım işi	--	324 MJ/ton

Tablo 3.15 Taşıma için kullanılan araçlara ait bilgiler

Araç	Tükettiği enerji
20 m ³ kapasiteli kamyon	0,88 MJ/ton/km
8 m ³ trans mikser	0,88 MJ/ton/km
37 m beton pompası	2,82 MJ/ton/h

3.1.5.7 Kalıcılık Deney Sonuçları ve Yaşam Döngü Analizi Sonuçları

Beton serileri üzerinde gerçekleştirilen kalıcılık deneylerine ait sonuçlar ile karbon ayak izi sonuçları Tablo 3.16’da verilmektedir.

Tablo 3.16 En iyi beton serilerine ait kalıcılık deney sonuçları ve karbon ayak izleri

Numune	Basınçlı su işleme derinliği, mm	Klorür taşınım katsayısı, $\times 10^{-12}$ m ² /s	Aşınma kaybı, g/cm ³	Birincil kılcallık katsayısı, mm $\sqrt{s}$	İkincil kılcallık katsayısı, mm $\sqrt{s}$	Karbon ayak izi, kgCO ₂ /m ³	
						Tesiste geri dön.	Yerinde geri dön.
N	27,8	0,0124	1,33	0,0009	0,00010	616,7	531,3
NS10	9,8	0,0009	1,18	0,0006	0,00002	605,5	520,1
R1S10	9,1	0,0038	1,21	0,0007	0,00005	589,2	506,4
R2S10	12,2	0,0049	1,35	0,0008	0,00006	588,5	505,5
R12S10	18,4	0,0053	1,41	0,0009	0,00008	557,1	504,3
R1iS10	8,6	0,0015	1,22	0,0006	0,00003	589,9	507,0
R2iS10	11,0	0,0022	1,26	0,0007	0,00004	590,5	507,5
R12iS10	11,6	0,0026	1,30	0,0008	0,00006	589,6	506,4

4.1 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışmasının bu bölümünde, bir önceki bölümde değinilen deneylere ve analizlere ait sonuçlar verilmektedir. Mekanik İyileştirme Yöntemi optimizasyon işlemine ait sonuçlar, agrega deneylerine ait sonuçlar, betonların taze ve sertleşmiş halleri üzerinde gerçekleştirilen fiziksel, mekanik, kırılma ve kalıcılık deneylerine ait sonuçlar ile betonların yaşam döngüsü analizlerine ait sonuçlar verilecek ve literatür verileri ile karşılaştırmalar da bulunularak elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir.

4.2 Agrega Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

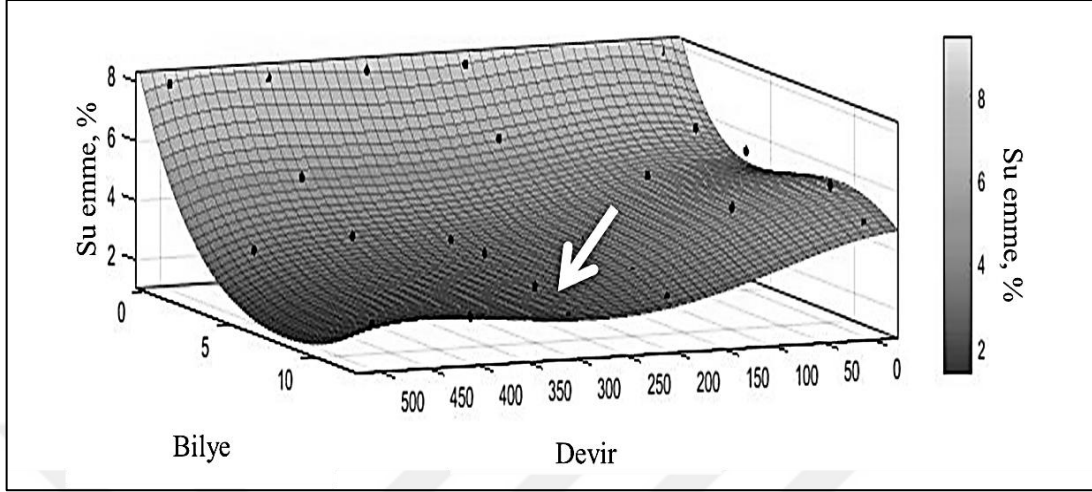
4.2.1 Mekanik İyileştirme Yöntemi Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Demir Bilyeli Öğütme-İyileştirme Yöntemi (BMM) optimizasyon çalışması, numune tane çapları dikkate alınarak RA1 ve RA2 üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve bulunan sonuçlar üç farklı aşamada değerlendirilmiştir:

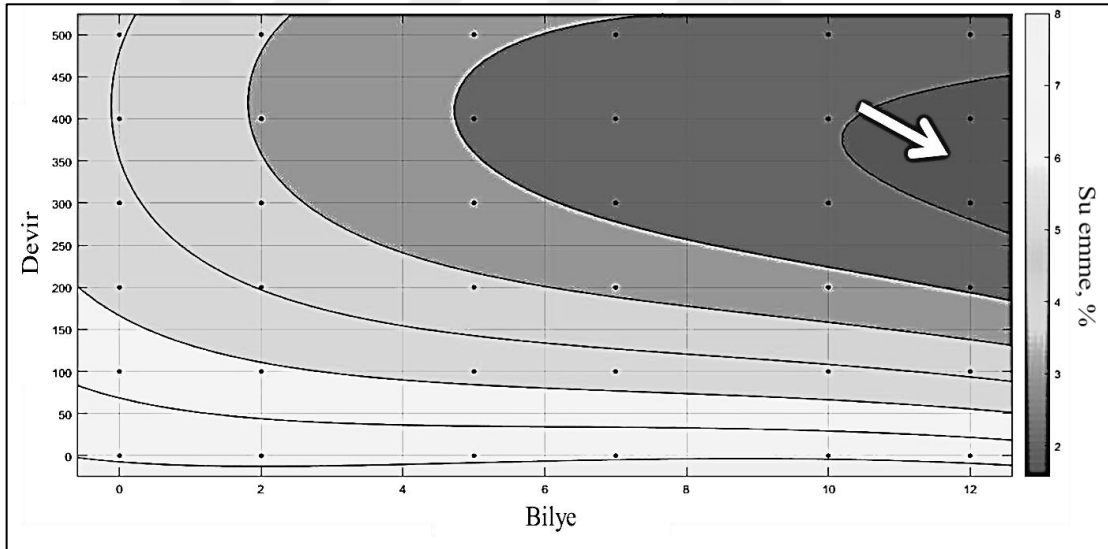
- 1) Tekil sonuçların incelenmesi
- 2) Tepki Yüzeyi Yöntemi ile sonuçların incelenmesi
- 3) İstatistiki olarak sonuçların incelenmesi

Birinci aşamada, BMM uygulanmış geri kazanılmış agregalara ait su emme deney sonuçları tekil olarak incelenmiş ve incelemede $\leq 1\%$ su emme değerine sahip değerler dikkate alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, artan R ve S değerleri ile su emme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Su emme değerinin en düşük olduğu R-S değeri RA1 ve RA2 için sırasıyla 300R-12S ve 500R-10S olduğu tespit edilmiştir.

İkinci aşamada, BMM uygulanması sonrasında elde edilen R-S-su emme verileri Tepki Yüzeyi Yöntemi ile incelenmiş [62] ve MATLAB Paket Programı yardımıyla veriler 3 boyutlu (3-B) olarak görselleştirilmiştir (Şekil 4.1).

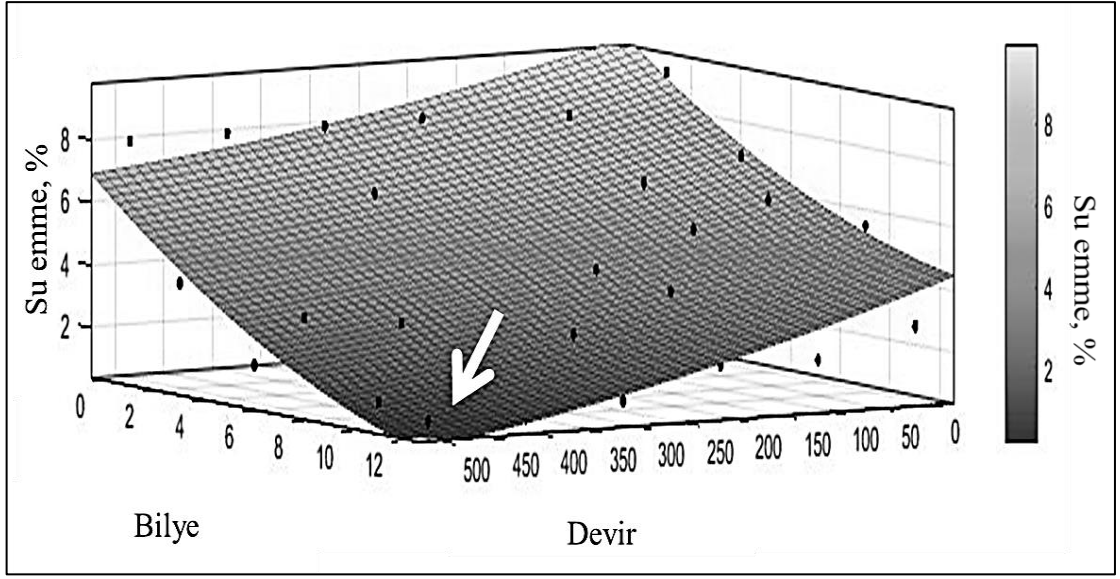


(a)

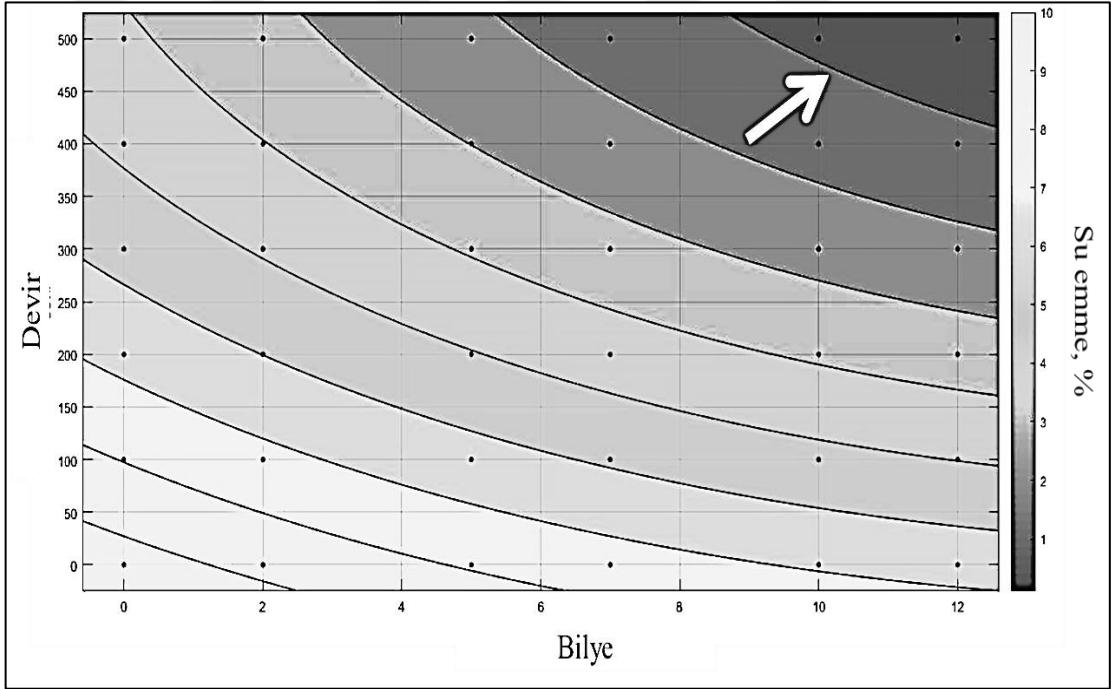


(b)

Şekil 4.1 RA1 ve RA2 su emme-devir-bilye değerlerinin Matlab'da görselleştirilmesi: (a) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (b) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü, (c) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (d) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü



(c)



(d)

Şekil 4.1 RA1 ve RA2 su emme-devir-bilye değerlerinin Matlab'da görselleştirilmesi: (a) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (b) RA1 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü, (c) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünüm, (d) RA2 su emme-devir-bilye 3 boyutlu görünümün devir-bilye düzlemine izdüşümü (devamı)

Şekil 4.1’de belirtilen görseller incelendiğinde, gri tonlama ile gösterilen su emme değerleri koyu griden açık griye doğru su emme değerinin arttığını ifade etmektedir. Renk koyuluğunun arttığı bölgeler incelendiğinde, en koyu bölgeler RA1 ve RA2 için 300R-12S ve 500R-10S koordinat noktaları civarında olduğu görülmektedir. Bu noktada, tekil değerlendirme sonucu elde edilen R-S verileri ile 3 boyutlu görselleştirme sonucu elde edilen optimum R-S verileri benzerlik göstermektedir.

Üçüncü aşamada, RA1 ve RA2 üzerine uygulanmış BMM kombinasyonları sonucu elde edilen işlem görmüş RA'lara ait su emme sonuçları üzerinde istatistiki analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu, RA su emme değerlerine ait standart sapma ve %95 güven aralığı alt ve üst limit değerleri incelenmiştir. RA ortalama su emme ve standart sapma değerleri; iyileştirme işlemi öncesi 4-11,2 ve 11,2-22,4 mm RA için sırasıyla %8,80 ve %8,95, %0,39 ve %0,26 olarak belirlenirken BMM uygulanması sonrası standart sapma değerleri R ve S’den bağımsız olarak düşmüştür. Burada, malzemede gözlemlenen heterojenliğin ve RA’da bulunan AOM’nin giderilmesi ile değerlerin azalmasının etkili olduğu düşünülebilir.

Diğer yönden, birinci ve ikinci aşamada belirlenen optimum R-S değerlerine ait su emme değerleri ile optimum R-S değerleri civarındaki R-S kombinasyonlarına ait su emme değerlerinin istatistiki sonuçları incelendiğinde, bu civardaki kombinasyonların su emme değerlerine ait %95 güven aralığı alt ve üst limit değerlerinin birbirleri ile kesişmedikleri görülmektedir. Örneğin, 500R-10S BMM uygulanması sonucu elde edilen 11,2-22,4 mm RAi su emme değerine ait %95 güven aralığı alt ve üst limit değerleri sırasıyla 0,78 ve 0,90 iken 500R-7S BMM ve 500R-12S uygulanması sonucu elde edilen 11,2-22,4 mm RA için su emme değerine ait %95 güven aralığı alt ve üst limit değerleri sırasıyla 0,94 ve 1,34, 0,92 ve 1,00’dır. Ayrıca, 400R-10S uygulanması sonucu elde edilen 11,2-22,4 mm RA için su emme değerine ait %95 güven aralığı alt ve üst limit değerleri sırasıyla 1,10 ve 1,84’tür.

Burada, %95 güven aralığı, su emiliminin gerçek değerinin 0,95 olasılığı ile “güven aralığı” aralığında olduğu anlamına gelmektedir. Yukarıda değerlendirilen ve üç aşamada da belirtilen sonuçların birbirlerini desteklediği ve RA1 ve RA2 için belirlenen R-S değerlerinin bu agregalar için optimum değerler olduğu görülmektedir.

Ayrıca, optimum R-S BMM değerleri RA1 ve RA2'ye uygulanması sonrası RA1 su emme değeri %1,40 ve RA2 su emme değeri %0,84 olarak elde edilmiştir. İyileştirme işleminin uygulanması öncesi ve sonrası RA1 ve RA2 eski harç kalıntısı miktarlarına bakıldığında, RA1'in %84,6 ve RA2'nin %81,7 daha az eski harç kalıntısı içeriği bulunmuştur. Eski harç kalıntısının kırıklı, poroz ve düşük yoğunluklu zayıf özelliklerinin geri kazanılmış agregaya su emme değerini etkileyerek artırdığı [32] ve gözlemlenen ciddi düşüşlere RA1 ve RA2'de bulunan eski harç kalıntısı miktarındaki azalmaların neden olduğu görülmektedir.

Optimize edilmiş iyileştirme işlemi uygulanması sonucu yüksek oranlarda eski harç kalıntısının geri kazanılmış agregadan giderilmesi ve su emme değerlerinde RA1 ve RA2 için ciddi iyileşme elde edilmesi, optimize edilmiş BMM'nin etkinliği ve başarısını göstermektedir.

4.2.2 Agregaya Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Doğal agregaya, iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregaya ve iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya üzerinde yapılan deney sonuçları incelendiğinde, doğal agreganın TS 706 EN 12620'de belirtilen şartları sağladığı, geri kazanılmış agreganın tüm şartları sağlamadığı fakat iyileştirilmiş geri kazanılmış agreganın 2 şartı sağlayamadığı diğerlerini sağladığı görülmektedir. İyileştirilmiş geri kazanılmış agreganın sağlanamadığı şartların ise agregaya hacim kararlılığı ve agregaya donma çözünme direnci olduğu görülmektedir. Agregaya hacim kararlılığı için TS 706 EN 12620'de %0,075 rötre değeri istenirken iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya için %0,0842 ve %0,0840 olarak gözlemlenmiş ve agregaya donma çözünme direnci için TS 706 EN 12620'de %2'den daha az donma-çözünme parçalanma değeri istenirken iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya için %3,9 ve %3,6 olarak donma-çözünmede parçalanma değeri elde edilmiştir. Geri kazanılmış agregaya iyileştirme çalışması esnasında agregada oluşan çatlakların ve/veya temizlenememiş eski harç kalıntısının sonuçlarda etkili olduğu düşünülmektedir ki bu durumun etkisi - ilerleyen bölümlerde anlatılacağı üzere- taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde de görülmüştür.

Diğer yönden, ASR tespiti için karışımlarda kullanılan agregalar ile hazırlanan standart harç numunelerine 80°C'de 14 günlük sıcak su banyosu uygulanmış, doğal

agregalı ve geri kazanılmış agregalı harç numuneleri boy uzama değerleri sırasıyla %0,09 ve %0,11 olarak elde edilmiştir (ASTM C 1260-14). Potansiyel tehlikeli agregalar için boy uzama değeri aralığı %0,10-0,20 olup ASR bakımından doğal agregaya tehlikesiz agregaya iken iyileştirilmiş/iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregaya potansiyel tehlikeli agregaya olarak belirlenmiştir.

İyileştirme işlemi uygulanması ile geri kazanılmış agregaların şekil ve yassılık indeksi değerleri etkilenmiş ve dış görünüşlerinde de belirgin değişimler gözlemlenmiştir. İyileştirme işlemi öncesi yüksek yassılık indeksi değeri, iyileştirme işlemi sonrasında azalmış ve doğal agregaya yaklaşmıştır. Diğer yönden, şekil indeksi değeri iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya için en küçük olarak elde edilirken, geri kazanılmış agregaya için en büyük olarak elde edilmiştir. Agregaya yüzeyinde ait gözle muayene işlemi yapıldığında, iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaların köşeli yapısı yerini daha yuvarlak bir yapıya, pürüzlü yüzeyi yerini daha pürüzsüz bir yüzeye ve uzun-şekilsiz geometrisi yerini daha kübik-yuvarlak şekle bırakmıştır (Şekil 4.2-4.3). Bilindiği üzere, agregaya geometrisinin taze beton işlenebilme özelliği üzerine etkisi bulunmaktadır [63]. Köşesiz yuvarlağa yakın geometride agregaya içeren karışımlar, köşeli geometride agregaya içeren karışımlara kıyasla daha yüksek işlenebilirliğe sahip olmakta ve bu durum daha az miktarda akışkanlaştırıcı ile daha akıcı bir kıvam elde edilebilmesini sağlamaktadır [63]. İyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya içeren beton üretiminde, geri kazanılmış agregaya içeren betonlara kıyasla daha az kimyasal katkı kullanılarak aynı işlenebilme sınıfında betonların üretimi yapılabilmektedir.



Şekil 4.2 Geri kazanılmış agrega genel görünüşü



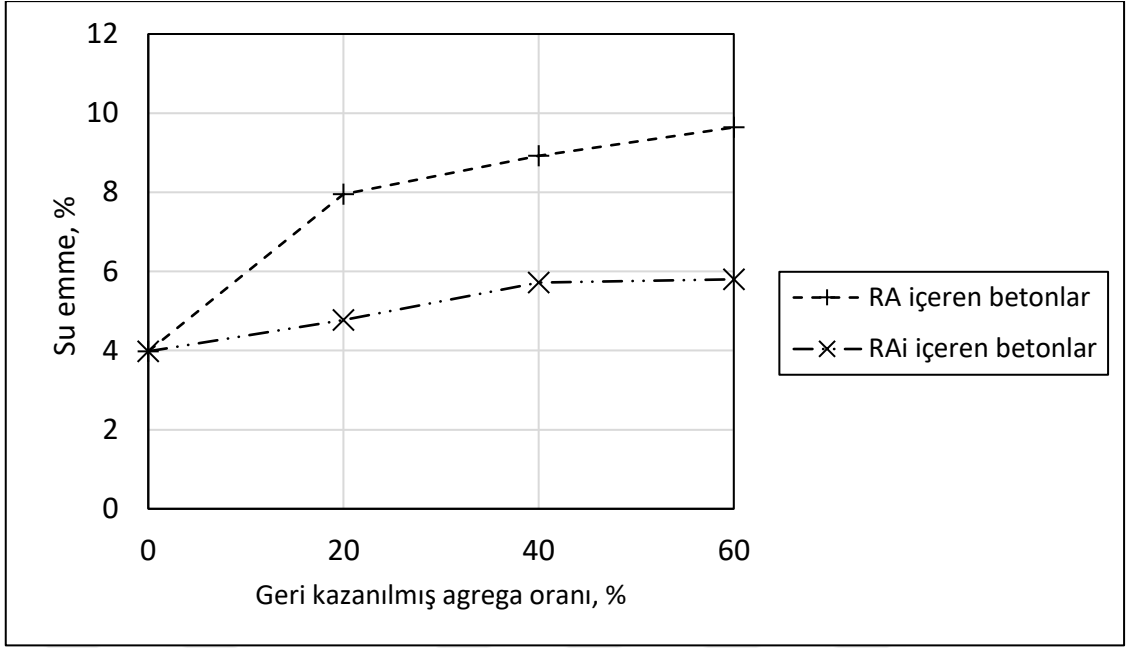
Şekil 4.3 İyileştirilmiş geri kazanılmış agrega genel görünüşü

4.3 Betonun Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi

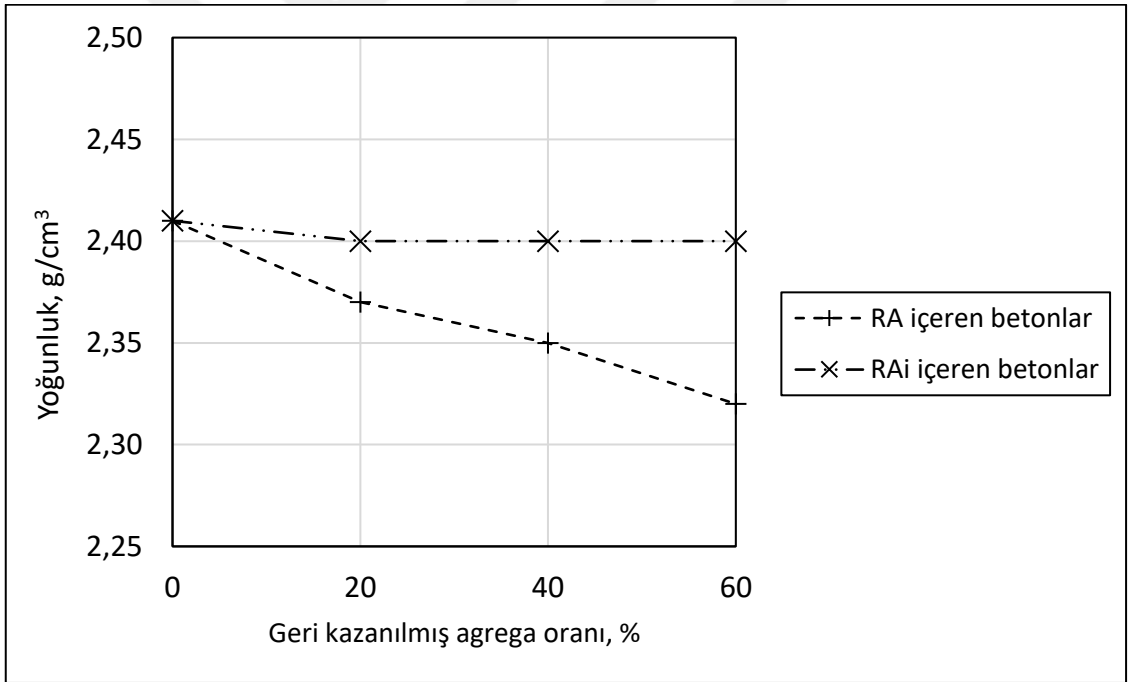
4.3.1 Yoğunluk ve Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.3.1.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı

Yoğunluk ve su emme deney sonuçları Şekil 4.4-4.5'te verilmektedir. NA ve RA içeren betonların yoğunlukları incelendiğinde N, R1, R2 ve R12 betonlarının sırasıyla 2,41, 2,37, 2,35 ve 2,32 g/cm³ yoğunluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yoğunluk değerleri betonda RA kullanımı ile azalmış ve artan oranda RA kullanımı ile yoğunluk değerlerindeki düşüş artmıştır. En fazla düşüş değeri R12 betonunda gözlemlenmiş ve N betonuna kıyasla yoğunluk değeri %3,7 azalmıştır. R_{Ai} içeren betonların yoğunluk değerleri incelendiğinde, R1, R2 ve R12 betonlarının 2,40 g/cm³ yoğunluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, yoğunlukların R_{Ai} kullanım oranından bağımsız olarak azaldığını ve yoğunlukların her bir yer değiştirme oranında yaklaşık aynı olduğunu göstermektedir. Diğer yönden RA ve R_{Ai} içeren betonların su emme değerleri kıyaslandığında, en yüksek kullanım oranında (%60) RA ve R_{Ai} içeren R12 ve R12i betonlarının sırasıyla %9,64 ve %5,80 su emme değerine sahip olduğu görülmektedir. Boşluklu ve kırıklı yapısıyla yüksek su emme özelliğine sahip AOM içeren RA, betonda kullanımı durumunda matrisin daha boşluklu bir yapıda olmasına neden olmuş ve beton su emme değerini artırırken yoğunluk değerini de düşürmüştür [21], [32], [53], [54]. Fakat oBMM uygulanması ile R_{Ai} üzerindeki AOM'nin büyük bir kısmı giderilmiş, R_{Ai} özellikleri iyileştirilmiş ve böylece R_{Ai} içeren betonların su emme ve yoğunluk değerlerinin RA içeren betonlardan daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 RA ve RAI içeren betonlarda su emme değerleri



Şekil 4.5 RA ve RAI içeren betonlarda yoğunluk değerleri

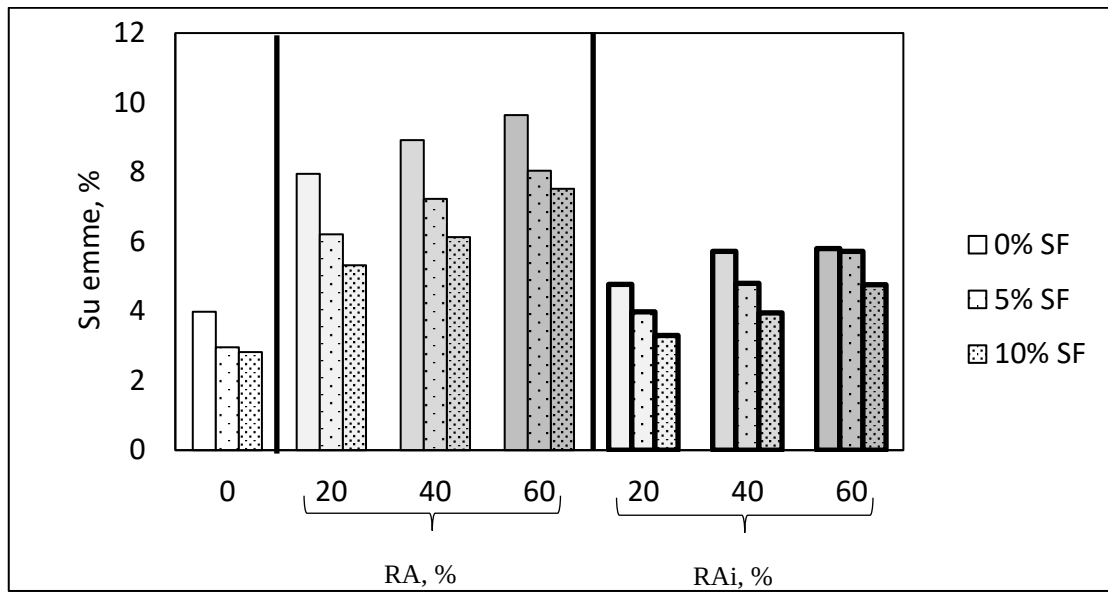
4.3.1.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait su emme ve yoğunluk değerleri Şekil 4.6-4.7’de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, NS5 ve NS10 betonlarının yoğunluk değerlerinin betonda SF kullanımı ile kontrol betonuna kıyasla %1,6 ve %2,9 azaldığı tespit edilmiştir. SF kullanımından dolayı gözlemlenen yoğunluk değerlerindeki azalış %10 SF kullanımı durumunda, %5 SF kullanım durumuna göre daha yüksektir. Diğer yönden, benzer durum RA içeren betonlarda da gözlemlenmiş ve R1S5 ve R1S10, R2S5 ve R2S10, R12S5 ve R12S10 betonlarının yoğunluk değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %2,9 ve %3,7, %3,7 ve %4,6, %5,4 ve %6,6 azalmıştır. RA içeren betonlarda gözlemlenen düşüş sadece artan RA kullanım oranından değil aynı zamanda SF kullanımından da kaynaklanmıştır. Bu nedenle, en düşük yoğunluk değeri en yüksek oranda RA ve SF içeren R12S10 betonunda 2,25 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, R1iS5, R2iS5, R12iS5 ve R1iS10, R2iS10, R12iS10 betonlarına ait yoğunluk değerleri kontrol betonuna kıyasla %2,9, %3,7, %5,4 ve %0,8, %1,2, %1,2 azalmıştır. RA içeren betonlarda gözlemlenen yoğunluk değerlerindeki düşüş, RAi içeren betonlarda da gözlemlenmiş fakat düşüşler kısıtlı olmuştur. Sonuç itibarıyla, SF’nin çimentoya göre daha hafif bir malzeme olması nedeniyle artan miktarda SF kullanımı sonucu beton yoğunluk değerlerinde azalmalar gözlemlenmiş [32] ve RA içeren betonlarda RA’nın NA ve RAi’ye kıyasla daha az yoğunlukta olması nedeniyle beton yoğunluklarındaki düşüşler daha belirgin şekilde oluşmuştur.

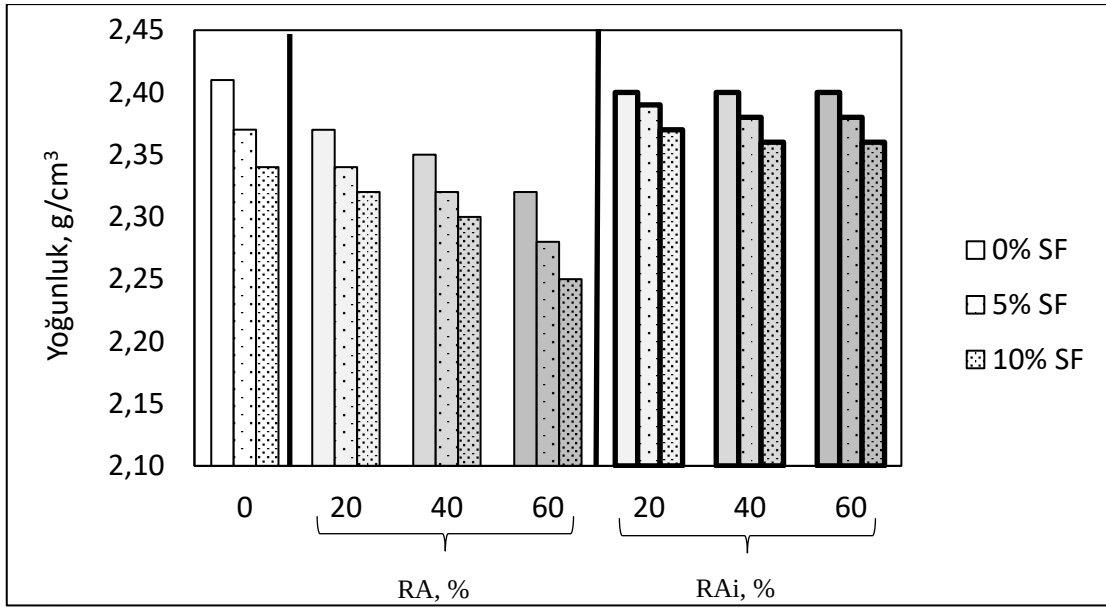
SF’nin betonların su emme özellikleri üzerine olan etkileri incelendiğinde, RA’nın en olumsuz etkiyi gösterdiği en yüksek oranda %60 RA ile %0-5-10 SF içeren R12, R12S5 ve R12S10 serilerinde su emme değerleri sırasıyla %9,64, %8,04 ve %7,52 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, N, R12, R12S5 ve R12S10 serilerinin hava içeriği değerlerinin sırasıyla %1,1, %3,2, %3,0 ve %2,8 olduğu artan oranda SF kullanımının RA’dan kaynaklı beton hava içeriği artışını azalttığı ve daha az boşluklu daha yoğun beton oluşturduğu görülmektedir [64]. Artan oranda RA kullanımı ile betonlarda gözlemlenen su emme değerlerindeki artış probleminin %5-10 SF kullanımı ile azaldığı ve %10 SF kullanımı durumunda en iyi sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Diğer yönden, RAi içeren betonlarda SF kullanımı durumunda su

emme değerlerinin azaldığı tespit edilmiş ve %60 R_{Ai} içeren betonlara ait su emme değerleri incelendiğinde R_{12i}, R_{12iS5} ve R_{12iS10} için su emme değerlerinin sırasıyla %5,80, %5,72 ve %4,76 olduğu görülmektedir. Artan oranda SF kullanımı sonucu R_{Ai} içeren betonların su emme değerlerinde düşüşler artmıştır.

İnce tanecik yapılı SF'nin boşlukları doldurma etkisi ve ek C-S-H jeli formasyonları oluşturma yeteneğinin sonucu [32] olarak daha az boşluklu bir betonun oluştuğu ve R_A ve R_{Ai} kaynaklı beton su emme değerlerindeki artışın azaldığı görülmektedir. Ayrıca, oBMM ile SF kullanımının su emme değerlerini ciddi anlamda düşürdüğü ve kontrol betonuna yakın su emme deney sonuçlarına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 SF ile R_A ve R_{Ai} içeren betonlarda su emme değerleri



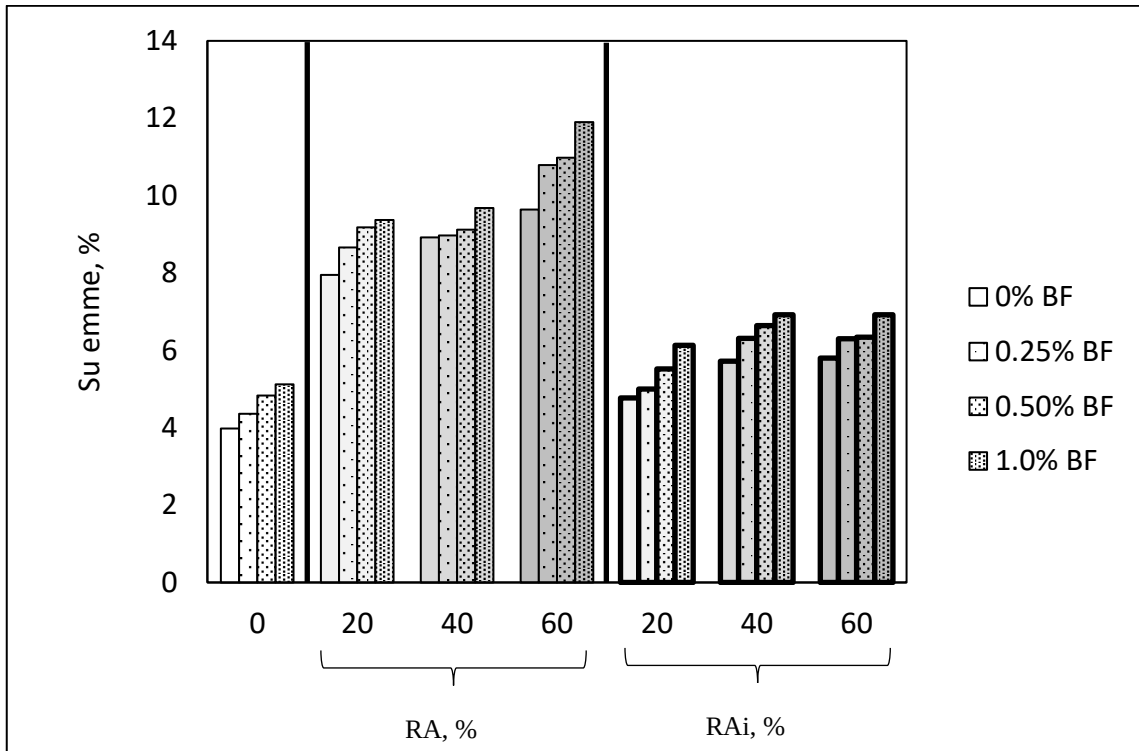
Şekil 4.7 SF ile RA ve RAI içeren betonlarda yoğunluk değerleri

4.3.1.3 Bazalt Fiber Kullanımı

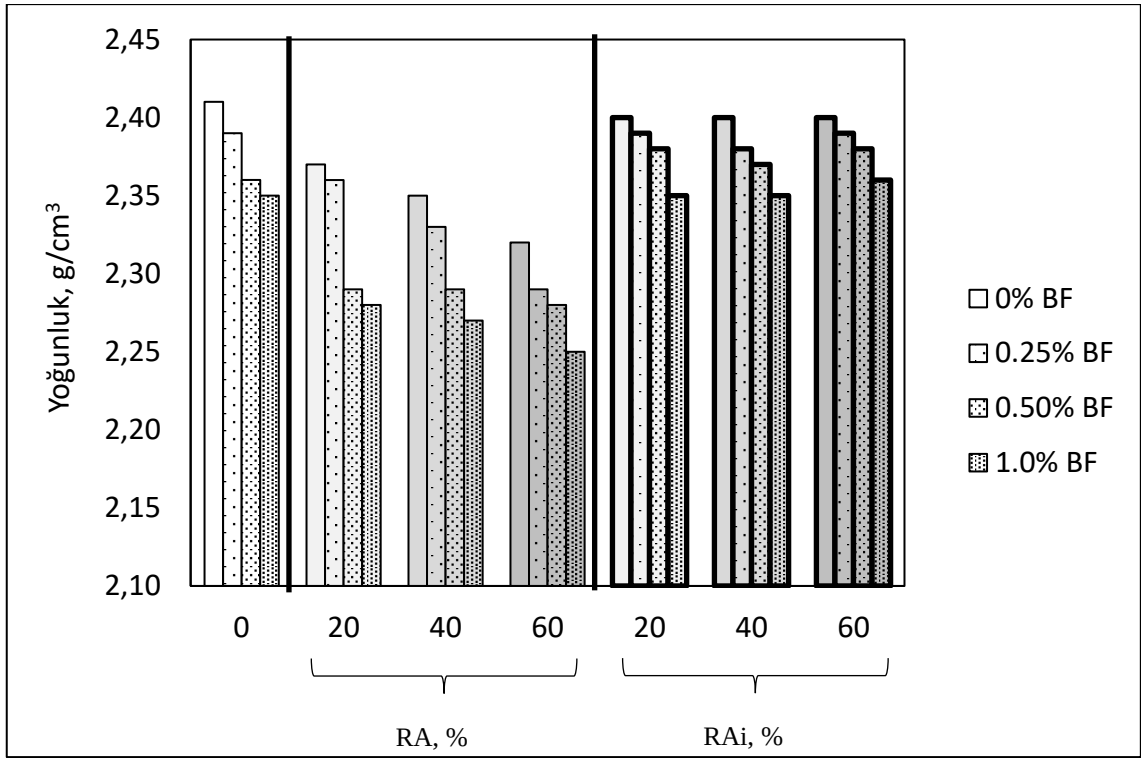
Bölüm 3'te belirtildiği üzere, betonda BF kullanımı sonucu betonlarda yerleşme sorunu oluşmuş, taze beton hava içeriği değerleri artmıştır. Bu durum nispeten daha boşluklu beton oluşmasına neden olurken beton yoğunluk değerlerini de düşürmüştür (Şekil 4.8-4.9) [34], [65]. Örneğin, %40 RA ile sırasıyla %0-0,25-0,50-1,0 BF içeren R2, R2B25, R2B50 ve R2B100 serilerinin taze beton hava içeriği değerleri incelendiğinde sırasıyla %2,6, %2,5, %2,7 ve %2,8 hava içeriğine sahip oldukları görülmektedir. R2, R2B25, R2B50 ve R2B100 serilerinin su emme ve yoğunluk değerlerinin ise sırasıyla %8,92, %8,97, %9,12 ve %9,68 ve 2,35 g/cm³, 2,33 g/cm³, 2,29 g/cm³, 2,27 g/cm³ olduğu görülmektedir.

Diğer yönden RAI içeren betonlarda BF kullanım durumu incelendiğinde, taze beton yerleşme problemlerinin RAI içeren betonlarda da olduğu gözlemlenmiştir. R12i, R12iB25, R12iB50 ve R12iB100 serilerinde hava içeriği değerleri %1,6, %1,8, %1,9 ve %2,1 olarak, su emme ve yoğunluk değerleri ise sırasıyla %5,80, %6,30, %6,34, %6,92 ve 2,40, 2,39, 2,38, 2,36 g/cm³ olarak belirlenmiştir. RA ve RAI içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, oluşan olumsuz durumun RAI içeren betonlarda daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Örneğin, %60 RA ile %1,0 BF içeren R12B100 serisi ile %60 RAI ile %1,0 BF içeren R12iB100 serisinin hava içeriği/su emme/yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında, R12B100 ve R12iB100

için sırasıyla hava içeriği %3,4 ve %2,1, su emme değeri %11,90 ve %6,92, yoğunluk değeri $2,25\text{g/cm}^3$ ve $2,36\text{g/cm}^3$ olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlarda gözlemlenen iyileşmelerde, BMM etkisinin olduğu açıkça görülmektedir. RAI'ye kıyasla yüksek miktarda AOM içeren RA'nın betonda BF ile kullanımı durumunda, RA içeren betonların daha düşük yoğunluklara ve daha yüksek su emme değerlerine sahip oldukları ve böylece en düşük yoğunluk değerinin ve en yüksek su emme değerinin R12B100 betonun sahip olduğu görülmektedir. oBMM ile BF uygulamasının iyi sonuçlar verdiği, fakat BF'nin taze halde yerleşme problemi oluşturarak fiziksel beton performansını azalttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.8 BF ile RA ve RAI içeren betonlarda su emme değerleri



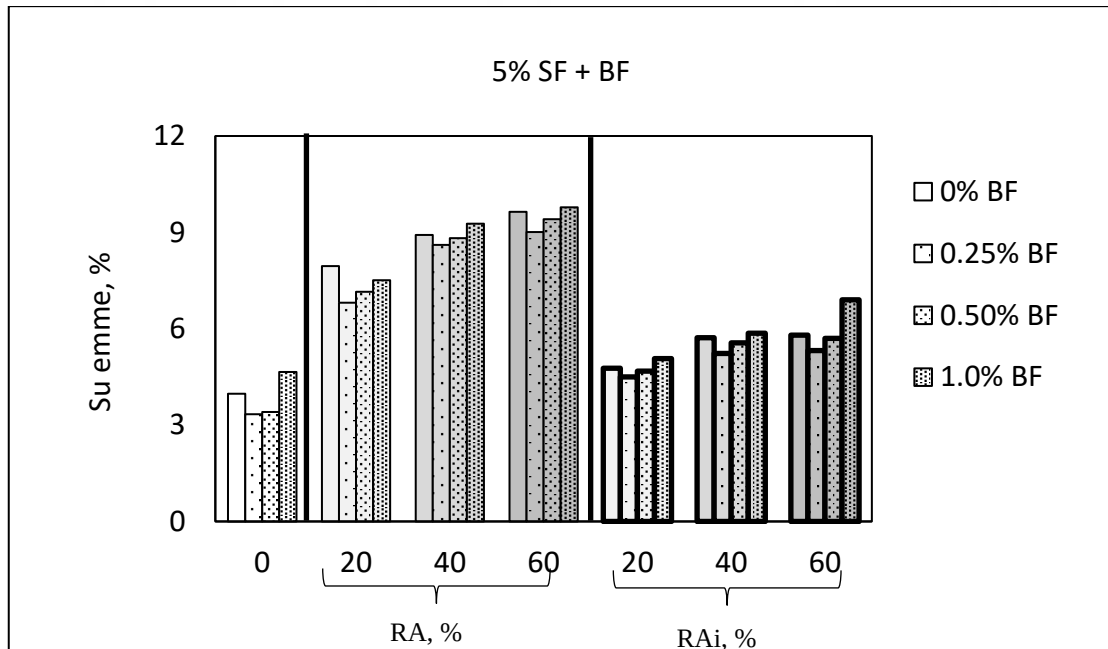
Şekil 4.9 BF ile RA ve RAi içeren betonlarda yoğunluk değerleri

4.3.1.4 Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı

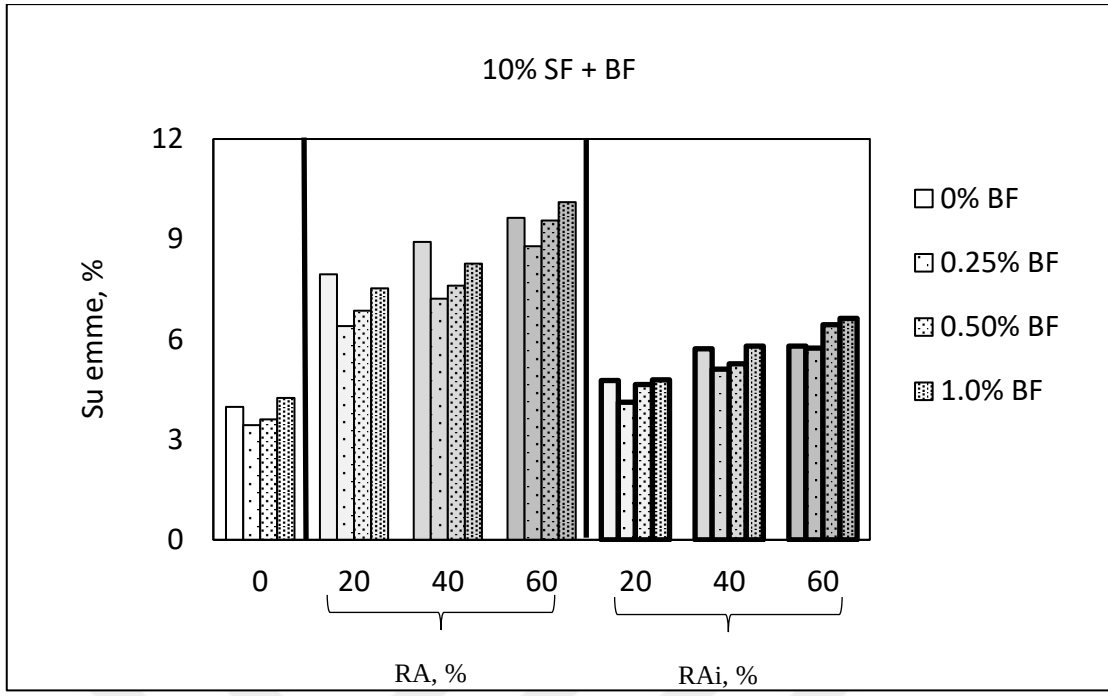
Betonlara ait yoğunluk ve su emme değerleri Şekil 4.10-4.13'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, betonda yalın SF kullanımı durumuna göre, artan oranda BF kullanımı taze beton hava içeriği değerlerini artırmış ve daha boşluklu, daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek su emme değerlerine sahip SF+BF içeren betonlar elde edilmiştir. Örneğin, betonlarda %20 RA kullanım durumu incelendiğinde, %5 SF katkılı R1S5 serisi %1,4 hava içeriğine sahiptir. 5% SF ile %0,25-0,50-1,0 BF içeren R1S5B25, R1S5B50 ve R1S5B100 serilerinin hava içeriği değerleri ise %2,1, %2,5 ve %2,8 olarak belirlenmiştir. Su emme değerleri incelendiğinde, R1'in %7,95, %5 SF katkılı R1S5'in %6,21 ve %5 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF içeren R1S5B25, R1S5B50 ve R1S5B100 serilerinin %6,81, %7,15 ve %7,51 su emme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, artan oranda RA kullanımı da su emme değerlerini artırmış ve yoğunluk değerlerini azaltmıştır. Diğer yünden, %5 SF ile %10 SF'nin betonda çeşitli oranlarda BF ile kullanımı karşılaştırıldığında, %10 SF kullanımının su emme değerlerini daha çok düşürdüğü görülmektedir. Örneğin

R1S5B50 ile R1S10B50 serilerinin su emme değerleri incelendiğinde sırasıyla %7,15 ve %6,86 su emme değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

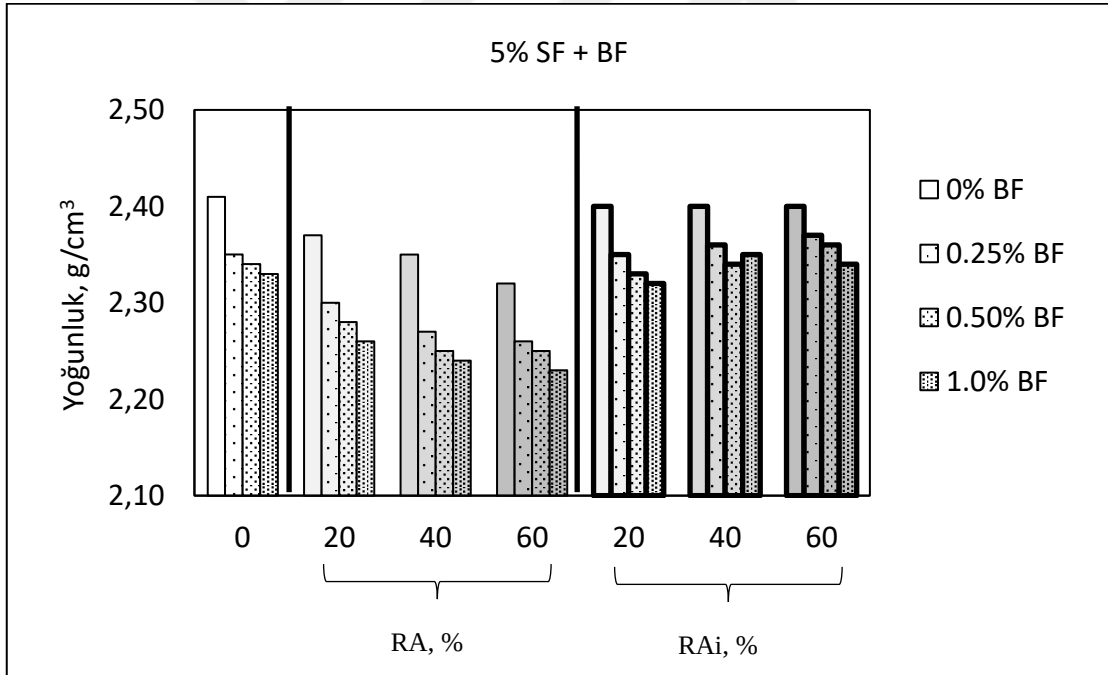
SF+BF'nin R_{Ai} içeren betonlarda kullanımı sonucu, BF betonlarda yerleşme problemi oluşturmıştır. Fakat RA içeren serilere kıyasla R_{Ai} içeren serilerde yerleşme problemi kısıtlı olarak gözlemlenmiş ve R_{Ai} içeren betonların RA içeren betonlardan daha az hava içerdikleri belirlenmiştir. Örneğin, %10 SF+%1,0 BF+%60 RA içeren R12S10B100 serisi ve %10 SF+%1,0 BF+%60 R_{Ai} içeren R12iS10B100 serisi sırasıyla %3,5 ve %2,5 hava içermektedirler. Ayrıca, BF'den kaynaklı yerleşme problemi R_{Ai} içeren betonların su emme ve yoğunluk değerlerini olumsuz etkilemiştir. Betonda sabit oranda SF ile artan oranda BF kullanımı sonucu su emme değerleri artmış ve yoğunluk değerleri azalmıştır. Çimentodan daha düşük yoğunluğa sahip SF, betonların yoğunluklarını düşüren ilk etmen BF'den sonra ikinci etmen olmuş ve artan oranda SF kullanımı ile beton yoğunlukları azalmıştır. Sonuç olarak, oBMM ile SF+BF uygulamasının SF içeren betonlara göre daha düşük fiziksel sonuçlar verdiği ve %5SF+BF'ye göre %10SF+BF'nin daha iyi fiziksel performans sergilediği görülmektedir. 10% SF'nin BF'den kaynaklı olarak betonda oluşan olumsuz etkileri, %5 SF'dan daha çok giderdiği tespit edilmiştir.



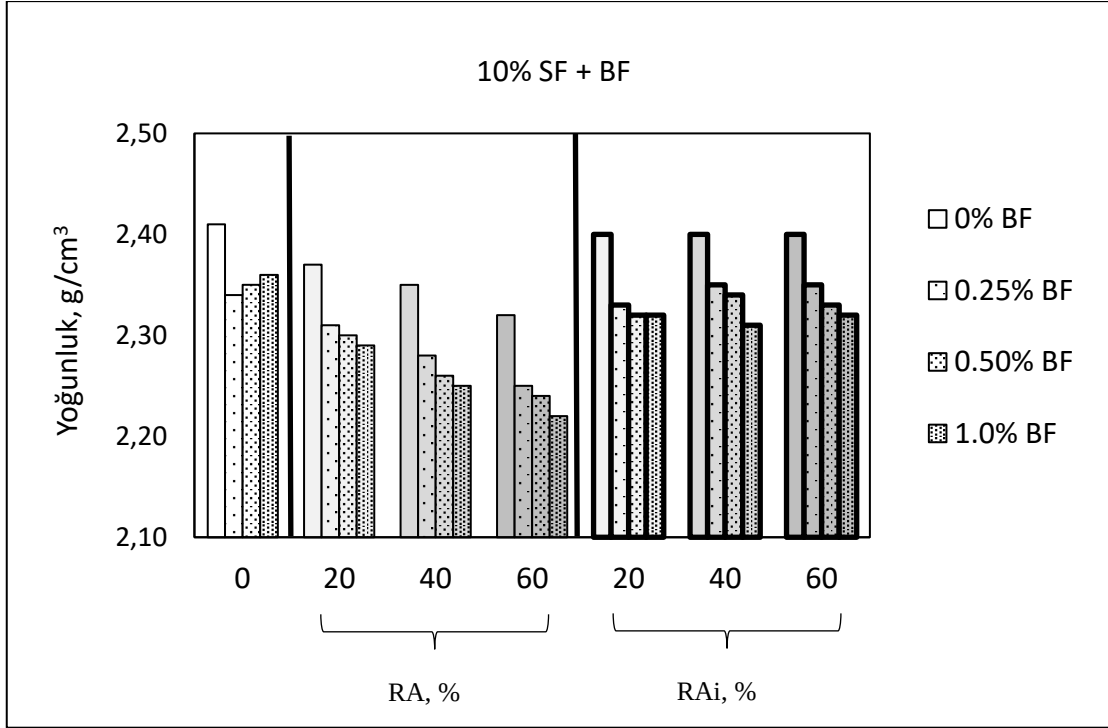
Şekil 4.10 %5 SF+BF ile RA içeren betonlarda su emme değerleri



Şekil 4.11 %10 SF+BF ile RA içeren betonlarda su emme değerleri



Şekil 4.12 %5 SF+BF ile RA içeren betonlarda yoğunluk değerleri



Şekil 4.13 %10 SF+BF ile RA içeren betonlarda yoğunluk değerleri

4.3.1.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlarda, oBMM ile veya hariç çeşitli oranlarda SF, BF ve SF+BF içeriklerinin kullanımının su emme üzerine etkinlikleri karşılaştırıldığında:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için su emme değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -21,9, -33,1 ile +8,9, +15,5, +17,9 ve -14,3, -10,1, -5,5, -19,5, -13,7, -5,3 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için su emme değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -18,9, -31,3 ile +0,6, +2,2, +8,5 ve -3,5, -1,1, +3,9, -19,1, -14,7, -7,3 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25,

R12S10B50, R12S10B100 için su emme değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -16,6, -22,0 ile +11,9, +13,9, +23,4 ve -6,5, -2,4, +1,5, -8,5, -0,8, +4,9 değişmiştir.

RA içeren betonlarda, tüm yer değiştirme oranları için, BF kullanımı ile su emme değerleri artış gösterirken SF ve SF+BF kullanımı ile düştüğü görülmektedir. En olumlu etki ise, SF kullanımı ile olmuş ve su emme değerleri belirgin şekilde düşmüştür.

RAi içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 RAi kullanımı durumunda R1i, R1iS5, R1iS10 ile R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R1iS5B25, R1iS5B50, R1iS5B100, R1iS10B25, R1iS10B50, R1iS10B100 için su emme değerleri R1 betonuna kıyasla % cinsinden -40,0, -49,9, -58,5 ile -37,1, -30,6, -22,9 ve -43,4, -41,1, -36,2, -48,2, -41,5, -39,7 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RAi kullanımı durumunda R2i, R2iS5, R2iS10 ile R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R2iS5B25, R2iS5B50, R2iS5B100, R2iS10B25, R2iS10B50, R2iS10B100 için su emme değerleri R2 betonuna kıyasla % cinsinden -35,9, -46,2, -55,7 ile -29,3, -25,6, -22,4 ve -41,4, -37,7, -34,3, -42,7, -40,9, -30,9 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RAi kullanımı durumunda R12i, R12iS5, R12iS10 ile R12iB25, R12iB50, R12iB100 ve R12iS5B25, R12iS5B50, R12iS5B100, R12iS10B25, R12iS10B50, R12iS10B100 için su emme değerleri R12 betonuna kıyasla % cinsinden -39,8, -40,7, -50,6 ile -34,6, -34,2, -28,2 ve -44,8, -40,9, -28,4, -40,5, -33,2, -31,2 değişmiştir.

RAi içeren betonlarda tüm yer değiştirme oranları için, BF kullanımı ile su emme değerleri artış gösterirken SF ve SF+BF kullanımı ile azalmıştır. Özellikle, SF kullanımı ile su emme değerleri ciddi şekilde düşüş göstermiştir. Ayrıca, agrega ve beton özelliklerini olumsuz etkileyen AOM'nin oBMM ile temizlenmesi ve yüksek miktardaki kısmının RAi'den giderilmesiyle su emme değerleri ciddi olarak düşmüştür. Aynı oranda RA içeren betonlara kıyasla, RAi içeren betonlarda su emme değerleri daha düşük olarak belirlenmiştir. Ayrıca, en düşük su emme değerleri %10

SF içeren betonlarda gözlemlenmiştir. BF'nin su emme değerlerini artırıcı etkisi olsa da RA içeren betonlara kıyasla bu etki RAI içeren betonlarda daha düşük seviyelerde kalmıştır. %10 SF ile artan oranda RA ve RAI içeren betonlar karşılaştırıldığında (Tablo 4.1), RAI içeren betonların daha yüksek yoğunluk değerlerine de sahip oldukları ve su emme değerlerinin kontrol betonuna yakın olduğu görülmektedir. Sonuç olarak oBMM+SF kullanımı (özellikle %10 SF ile), oBMM+BF, oBMM+SF+BF kullanımlarına kıyasla, en iyi fiziksel beton sonuçlarını vermiştir.

Tablo 4.1 SF içeren beton serileri

Beton serileri	Su emme değeri, %	Yoğunluk, g/cm ³
N	3,98	2,41
NS10	2,82	2,34
R1S10	5,35	2,32
R2S10	6,13	2,30
R12S10	7,52	2,25
R1iS10	3,30	2,37
R2iS10	3,95	2,36
R12iS10	4,76	2,36

Betonlarda, oBMM ile veya hariç çeşitli oranlarda SF, BF ve SF+BF içeriklerinin kullanımının yoğunluk üzerine etkinlikleri karşılaştırıldığında:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için yoğunluk değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -1,3, -2,1 ile -0,4, -3,4, -3,8 ve -3,0, -3,8, -4,6, -2,5, -3,0, -3,4 değişmiş ve SF kullanımı ile yoğunluk değerleri azalsa da yoğunluk değerleri BF ve SF+BF kullanımı ile daha çok azalma göstermiştir.
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için yoğunluk değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -1,3, -2,1 ile -0,9, -2,6, -3,4 ve -3,4, -4,3, -4,7, -3,0, -3,8, -4,3 değişmiş ve SF kullanımı ile yoğunluk değerleri azalsa da, yoğunluk değerleri BF ve özellikle SF+BF kullanımı ile daha çok azalmıştır.

- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için yoğunluk değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -1,7, -3,0 ile -1,3, -1,7, -3,0 ve -2,6, -3,0, -3,9, -3,0, -3,4, -4,3 değişmiştir. %60 kullanım oranında, SF, BF ve SF+BF yoğunluk değerlerini belirgin şekilde düşürmüştür.

RAi içeren betonlarda ise,

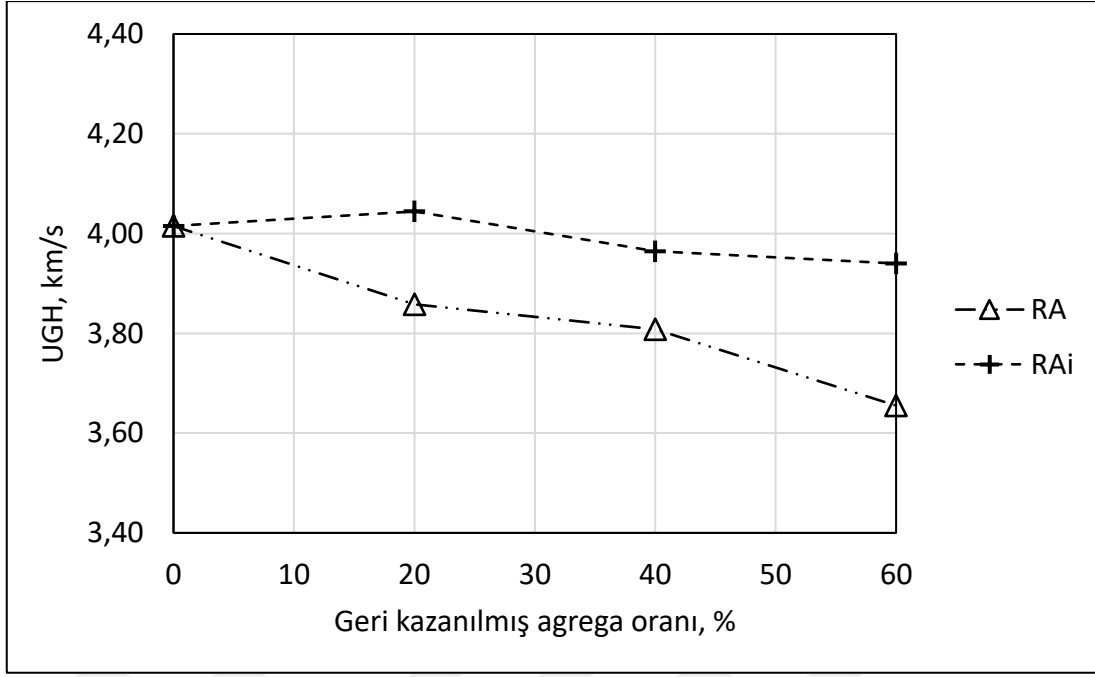
- Karışımlarda %20 RAi kullanımı durumunda R1i, R1iS5, R1iS10 ile R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R1iS5B25, R1iS5B50, R1iS5B100, R1iS10B25, R1iS10B50, R1iS10B100 için yoğunluk değerleri R1 betonuna kıyasla % cinsinden +1,3, +0,8, 0,0 ile +0,8, +0,4, -0,8 ve -0,8, -1,7, -2,1, -1,7, -2,1, -2,1 değişmiş ve oBMM ile yoğunluk değerleri iyileştirilmiştir. Ayrıca SF kullanımı yoğunluk değerlerini bir miktar artırsa da SF+BF kullanımı yoğunluk değerlerini düşürmüştür.
- Karışımlarda %40 RAi kullanımı durumunda R2i, R2iS5, R2iS10 ile R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R2iS5B25, R2iS5B50, R2iS5B100, R2iS10B25, R2iS10B50, R2iS10B100 için yoğunluk değerleri R2 betonuna kıyasla % cinsinden +2,1, +1,3, +0,4 ile +1,3, +0,9, 0,0 ve +0,4, -0,4, 0,0, 0,0, -0,4, -1,7 değişmiş ve ilginç sonuçlar gözlemlenmiştir. Yoğunluk değerleri SF ve BF kullanımı ile artmış, SF+BF kullanımı ile yoğunluk değerleri %5SF+%0,25BF kullanımı ile artsa da %10 SF+BF kullanımı ile azalmıştır. Ayrıca %5SF+%1,0BF ile %10SF+%0,25BF kullanımı yoğunlukları değiştirmemiştir.
- Karışımlarda %60 RAi kullanımı durumunda R12i, R12iS5, R12iS10 ile R12iB25, R12iB50, R12iB100 ve R12iS5B25, R12iS5B50, R12iS5B100, R12iS10B25, R12iS10B50, R12iS10B100 için yoğunluk değerleri R12 betonuna kıyasla % cinsinden +3,4, +2,6, +1,7 ile +3,0, +2,6, +1,7 ve +2,2, +1,7, +0,9, +1,3, +0,4, 0,0 değişmiştir. SF, BF, SF+BF kullanımı yoğunluk değerlerini artırmıştır (R12iS10B100 hariç)

RA ve R_{Ai} içeren betonlara ait sonuçlardan görüleceği üzere, R_{Ai} içeren betonlarda yoğunluk değerleri kıyas edilen beton serisine göre genellikle daha yüksek olarak belirlenmiştir.

4.3.2 Ultra Ses Geçiş Hızı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.3.2.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı

Ultra ses geçiş hızı (UGH) sonuçları Şekil 4.14 ve Tablo 4.2-4.4'te verilmektedir. RA içeren betonlara ait UGH değerleri incelendiğinde, R₁, R₂ ve R₁₂'ye ait UGH değerlerinin kontrol betonuna göre görecel olarak %4, %5,2 ve %9 azaldığı görülmektedir. Betonda RA oranı arttıkça UGH değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. UGH değeri karışım oranları, malzeme özellikleri, matris boşluk yapısı ve agrega-cimento matrisi ara geçiş yüzeyi (ITZ) özelliklerince etkilenmektedir [63]. Boşluklu ve çatlaklı yapıya sahip bir malzeme olan RA içeren betonların UGH değerlerinin RA kullanım oranı arttıkça düşmesi betonların daha boşluklu hale geldiklerini göstermektedir. R_{Ai} içeren betonlara ait UGH değerleri incelendiğinde, R_{1i}, R_{2i} ve R_{12i}'ye ait UGH değerlerinin 4,04, 3,96 ve 3,94 km/s olduğu görülmektedir. Artan oranda R_{Ai} kullanımının UGH değerlerini düşürmesine rağmen, %20 R_{Ai} içeren R_{1i}'nin UGH değeri düşmemiş ve kontrol betonu ile yaklaşık olarak aynı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, eski harç kalıntısı büyük oranda giderilmiş R_{Ai} içeren betonların UGH değerlerinin düşüş trendinin RA içeren betonlara kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Böylelikle, oBMM'in etkisi UGH değerlerine olumlu şekilde yansımıştır yorumu yapılabilir.



Şekil 4.14 Değişik oranlarda RA ve RAI içeren betonlarda UGH değerleri

4.3.2.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait UGH değerleri Tablo 4.2’de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1S5, R2S5, R12S5’e ve R1S10, R2S10, R12S10’a ait UGH değerlerinin 3,95, 3,90, 3,75 ve 4,06, 4,01, 3,85 km/s olduğu ve kontrol betonuna ait UGH değerinin 4,02 km/s olduğu görülmektedir. SF içeren betonların UGH değerlerinin, artan RA kullanım oranı ile azaldığı fakat SF oranı %10 için elde edilen sonuçların %5 için elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, en yüksek UGH değeri R1S10 için ortalama 4,06 km/s olarak bulunmuştur. Pozolanik malzemeler (incelikleri, aktivite indeksleri gibi özelliklerine bağlı olmak kaydıyla) ITZ bölgesinde ve matraste bulunan boşlukları iyileştirebilmektedirler [64]. Ferrokrom tesislerinde yan ürün olarak üretilen ve aktivite indeksi yüksek bir pozolan olan SF’ni içeren beton serilerine ait UGH değerlerinin artan oranda SF kullanımı ile iyileşmesi, beton boşluklarının SF ince taneleri ile dolması sonucudur. Ayrıca SF’nin matraste ek C-S-H jelleri oluşumuna katkı sağlaması sonucu daha kompakt bir yapıda matris oluşması da burada etkilidir. SF’nin olumlu etkisi taze haldeki betonda da tespit edilmiş ve hava içeriği değerlerinde düşüslere sebep olmuştur. Örneğin, %40 RA içeren beton serilerine ait sonuçlar incelendiğinde, %0-5-10 SF içeren R2, R2S5 ve R2S10 betonlarının taze halde %2,6, %2,4 ve %2,3 hava

içeriğine ve sertleşmiş halde 3,81 km/s, 3,90 km/s ve 4,01 km/s UGH değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Diğer yönden, R_{Ai} içeren betonlara ait UGH değerleri incelendiğinde, R_{1i}S₅, R_{2i}S₅, R_{12i}S₅'e ve R_{1i}S₁₀, R_{2i}S₁₀, R_{12i}S₁₀'a ait UGH değerlerinin 4,14, 4,06, 4,04 ve 4,26, 4,17 4,15 km/s olduğu görülmektedir. Artan R_{Ai} kullanımı ile UGH değerleri düşüş göstermiştir. Fakat, artan SF kullanımı ile UGH değerleri artmış ve en yüksek değerler %10 SF içeren beton serilerinde gözlemlenmiştir. En yüksek UGH değeri R_{1i}S₁₀ için 4,06 km/s olarak bulunmuştur. Ayrıca, R_{Ai} ile SF içeren betonlara ait tüm UGH değerlerinin kontrol betonundan daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda, herbir geri kazanılmış agreganın kullanım oranı için R_{Ai} içeren betonların R_A içeren betonlardan daha yüksek UGH değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Karışımlarda SF kullanımı sonucu, daha kompakt ve boşluksuz bir beton oluşmuştur [63], [66]. Uçucu kül, metakaolin ve silis dumanının kullanıldığı bir çalışmada beton ultra ses geçiş hızları, üretimi izleyen 7.-28.-90.-180.-300. günde incelenmiş, en iyi sonuçların sırasıyla silis dumanı, metakaolin ve uçucu kül içeren serilerde elde edildiği rapor edilmiştir [67]. Puzolanların içerisinde silis dumanının yüksek inceliğe ve yüksek aktivite indeksine sahip olması, bu noktada silis dumanını diğer puzolanlar arasında bir adım öne çıkartmaktadır.

Sonuç olarak, oBMM ile SF kullanımı sonucu R_{Ai} içeren betonlara ait UGH değerleri kontrol betonuna yakın olarak elde edilmiş ve tüm R_A içeren betonların UGH değerleri kontrol betonundan daha düşük iken (R₁S₁₀ hariç), R_{Ai} ile SF içeren/içermeyen tüm betonların UGH değerleri genellikle kontrol betonundan daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.2 SF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri

Numune	RA, %	SF, %	Taze beton hava içeriği, %	UGH, km/s
N	0	0	1,1	4,02
NS5	0	5	1,1	4,11
NS10	0	10	1,2	4,22
R1	20	0	1,6	3,86
R1S5	20	5	1,4	3,95
R1S10	20	10	1,4	4,06
R2	40	0	2,6	3,81
R2S5	40	5	2,4	3,90
R2S10	40	10	2,3	4,01
R12	60	0	3,2	3,66
R12S5	60	5	3,0	3,75
R12S10	60	10	2,8	3,85
R1i	20	0	1,1	4,04
R1iS5	20	5	1,0	4,14
R1iS10	20	10	1,1	4,26
R2i	40	0	1,2	3,96
R2iS5	40	5	1,1	4,06
R2iS10	40	10	1,1	4,17
R12i	60	0	1,6	3,94
R12iS5	60	5	1,4	4,04
R12iS10	60	10	1,3	4,15

4.3.2.3 Bazalt Fiber Kullanımı

BF içeren betonlara ait UGH değerleri Tablo 4.3'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, betonda artan oranda fiber katkı kullanımı sonucu UGH değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Oluşan düşüşlerde, BF'in beton matrisinde oluşturduğu ve yerleşme problemlerinden kaynaklı matris boşluklarının etkili olduğu düşünülmektedir [34]. Örneğin, %0-0,25-0,50-1,0 BF içeren R1, R1B25, R1B50 ve R1B100 betonlarının sırasıyla 3,86, 3,83, 3,80 ve 3,74 km/s UGH değerlerine sahip olduğu ve taze halde ise %1,6, 1,9, 2,0 ve 2,2 hava içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Diğer yönden, BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait UGH değerleri incelendiğinde, iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı betonlarda düşüşlerin daha kısıtlı olarak olduğu tespit edilmiştir. Betonda oluşan boşluklu yapının RA'da bulunan AOM içeriğinden de kaynaklı olduğu düşünüldüğünde [64], RA ile BF kullanımı sonucu betonlar daha boşluklu hale gelmiş ve UGH değerleri düşüş göstermiştir. Bunun neticesinde, en düşük UGH değeri en yüksek oranda RA ve BF kullanılan R12B100 betonunda gözlemlenmiş ve UGH değeri kontrol

betonuna kıyasla %11,7 azalmıştır. Fakat, RAI kullanılan betonlarda en yüksek oranda %60 RAI içeren R12iB100 serisinde söz konusu UGH değeri düşüşü kontrol betonuna kıyasla %5,0 olarak belirlenmiştir. Burada, RAI'ye oBMM uygulamasının ve neticesinde AOM içeriğinin yüksek oranda azalmasının payı büyüktür.

Tablo 4.3 BF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri

Numune	RA, %	BF, %	Taze beton hava içeriği , %	UGH, km/s
N	0	0,00	1,1	4,02
NB25	0	0,25	1,3	3,99
NB50	0	0,50	1,8	3,95
NB100	0	1,00	2,5	3,90
R1	20	0,00	1,6	3,86
R1B25	20	0,25	1,9	3,83
R1B50	20	0,50	2,0	3,80
R1B100	20	1,00	2,2	3,74
R2	40	0,00	2,6	3,81
R2B25	40	0,25	2,5	3,78
R2B50	40	0,50	2,7	3,75
R2B100	40	1,00	2,8	3,69
R12	60	0,00	3,2	3,66
R12B25	60	0,25	3,1	3,63
R12B50	60	0,50	3,3	3,60
R12B100	60	1,00	3,4	3,55
R1i	20	0,00	1,1	4,04
R1iB25	20	0,25	1,3	4,01
R1iB50	20	0,50	1,7	3,98
R1iB100	20	1,00	2,6	3,92
R2i	40	0,00	1,2	3,96
R2iB25	40	0,25	1,3	3,93
R2iB50	40	0,50	1,6	3,90
R2iB100	40	1,00	2,5	3,85
R12i	60	0,00	1,6	3,94
R12iB25	60	0,25	1,8	3,91
R12iB50	60	0,50	1,9	3,88
R12iB100	60	1,00	2,1	3,82

4.3.2.4 Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı

SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar Tablo 4.4'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, BF kullanımı sonucu oluşan UGH değerlerindeki düşüşün SF+BF kullanımı durumunda da olduğu fakat SF'nın söz konusu düşüşü azalttığı görülmektedir. Örneğin, %40 RA içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde R2, R2B25, R2S5B25 ve R2S10B25 betonlarına ait UGH değerleri sırasıyla 3,81 km/s, 3,78 km/s, 3,88 km/s ve 3,87 km/s olarak belirlenmiştir. Söz konusu durum RAI içeren betonlarda da gözlemlenmiş, fakat RAI içeren betonlarda nispeten daha

yüksek UGH değerleri elde edilmiştir. Örneğin, %40 R_{Ai} içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde R_{2i}, R_{2iB25}, R_{2iS5B25} ve R_{2iS10B25} betonlarına ait UGH değerleri sırasıyla 3,96 km/s, 3,93 km/s, 4,04 km/s ve 4,03 km/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sabit BF kullanım oranında, artan oranda betonda SF kullanımı UGH değerlerini artırmıştır. En yüksek oranlarda SF ve BF içeren RA12S10B100 ve RA12iS10B100 betonlarında UGH değerleri kontrol betonuna göre %10,0 ve %2,7 düşüş sergilemiştir.

Mineral katkı ve fiberin birlikte kullanımı durumunda, beton UGH değerlerinde oluşan olumsuz etkinin azaldığı yapılan benzer çalışmalarda rapor edilmektedir. Örneğin, silis dumanı+çelik fiber, silis dumanı+cam fiber ve silis dumanı+polipropilen kullanımı durumlarında tekil fiber kullanımı durumlarına göre daha yüksek UGH değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir [68].

Tablo 4.4 SF ile BF içeren betonlara ait hava içeriği ve UGH değerleri

Numune	RA, %	SF, %	BF, %	Taze beton hava içeriği, %	UGH, km/s
N	0	0	0,00	1,1	4,02
NS5B25	0	5	0,25	2,5	4,09
NS5B50	0	5	0,50	2,6	4,06
NS5B100	0	5	1,00	2,8	4,04
NS10B25	0	10	0,25	2,6	4,08
NS10B50	0	10	0,50	2,7	4,01
NS10B100	0	10	1,00	2,5	3,98
R1	20	0	0,00	1,6	3,86
R1S5B25	20	5	0,25	2,1	3,93
R1S5B50	20	5	0,50	2,5	3,91
R1S5B100	20	5	1,00	2,8	3,88
R1S10B25	20	10	0,25	2,2	3,92
R1S10B50	20	10	0,50	2,6	3,86
R1S10B100	20	10	1,00	3,0	3,82
R2	40	0	0,00	2,6	3,81
R2S5B25	40	5	0,25	2,5	3,88
R2S5B50	40	5	0,50	2,8	3,86
R2S5B100	40	5	1,00	3,3	3,83
R2S10B25	40	10	0,25	2,8	3,87
R2S10B50	40	10	0,50	2,8	3,81
R2S10B100	40	10	1,00	3,5	3,77
R12	60	0	0,00	3,2	3,66
R12S5B25	60	5	0,25	3,0	3,73
R12S5B50	60	5	0,50	3,1	3,70
R12S5B100	60	5	1,00	3,5	3,67
R12S10B25	60	10	0,25	3,1	3,72
R12S10B50	60	10	0,50	3,3	3,65
R12S10B100	60	10	1,00	3,5	3,62
R1i	20	0	0,00	1,1	4,04
R1iS5B25	20	5	0,25	2,3	4,12
R1iS5B50	20	5	0,50	2,5	4,09
R1iS5B100	20	5	1,00	3,0	4,06
R1iS10B25	20	10	0,25	2,1	4,11
R1iS10B50	20	10	0,50	2,4	4,04
R1iS10B100	20	10	1,00	2,8	4,01
R2i	40	0	0,00	1,2	3,96
R2iS5B25	40	5	0,25	2,1	4,04
R2iS5B50	40	5	0,50	2,4	4,01
R2iS5B100	40	5	1,00	2,5	3,98
R2iS10B25	40	10	0,25	2,4	4,03
R2iS10B50	40	10	0,50	2,5	3,96
R2iS10B100	40	10	1,00	3,0	3,93
R12i	60	0	0,00	1,6	3,94
R12iS5B25	60	5	0,25	2,3	4,02
R12iS5B50	60	5	0,50	2,4	3,99
R12iS5B100	60	5	1,00	2,6	3,96
R12iS10B25	60	10	0,25	2,2	4,01
R12iS10B50	60	10	0,50	2,5	3,94
R12iS10B100	60	10	1,00	2,5	3,91

4.3.2.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlarda SF, BF, SF+BF ile oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF iyileştirme yöntemi kombinasyonları kullanımının herbir RA ve R_{Ai} kullanım oranında UGH değerleri üzerine etkinlikleri incelendiğinde:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için UGH değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +2,3, +5,18 ile -0,78, -1,55, -3,11 ve +1,81, +1,30, +0,52, +1,55, 0,00, -1,04 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için UGH değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +2,36, +5,25 ile -0,79, -1,57, -3,15 ve +1,84, +1,31, +0,52, +1,57, 0,00, -1,05 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için UGH değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +2,46, +5,19 ile -0,82, -1,64, -3,01 ve +1,91, +1,09, +0,27, +1,64, -0,27, -1,09 değişmiştir.

RA içeren betonlara ait yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde, tüm yer değiştirme oranları için, BF kullanımı ile UGH değerleri azalmış ve SF kullanımı sonucu ise UGH değerleri artış sergilemiştir. Ayrıca, %5 SF+BF kullanımı sonucu BF'nin olumsuz etkisi giderilerek UGH değerleri artmış fakat %10SF+BF kullanımı ile UGH değerleri genellikle azalmıştır. En olumlu etki, herbir RA kullanım oranında, %10 SF kullanım durumunda elde edilmiştir.

RA_i içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 RA_i kullanımı durumunda R1_i, R1_iS5, R1_iS10 ile R1_iB25, R1_iB50, R1_iB100 ve R1_iS5B25, R1_iS5B50, R1_iS5B100, R1_iS10B25,

R1iS10B50, R1iS10B100 için UGH değerleri R1 betonuna kıyasla % cinsinden +1,7, +7,3, +10,4 ile +3,9, +3,1, +1,6 ve +6,7, +6,0, +5,2, +6,5, +4,7, +3,9 değişmiş,

- Karışımlarda %40 RAI kullanımı durumunda R2i, R2iS5, R2iS10 ile R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R2iS5B25, R2iS5B50, R2iS5B100, R2iS10B25, R2iS10B50, R2iS10B100 için UGH değerleri R2 betonuna kıyasla % cinsinden +3,9, +6,6, +9,4 ile +3,1, +2,4, +1,0 ve +6,0, +5,2, +4,5, +5,8, +3,9, +3,1 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RAI kullanımı durumunda R12i, R12iS5, R12iS10 ile R12iB25, R12iB50, R12iB100 ve R12iS5B25, R12iS5B50, R12iS5B100, R12iS10B25, R12iS10B50, R12iS10B100 için UGH değerleri R12 betonuna kıyasla % cinsinden +7,7, +10,4, +13,4 ile +6,8, +6,0, +4,4 ve +9,8, +9,0, +8,2, +9,6, +7,7, +6,8 değişmiştir.

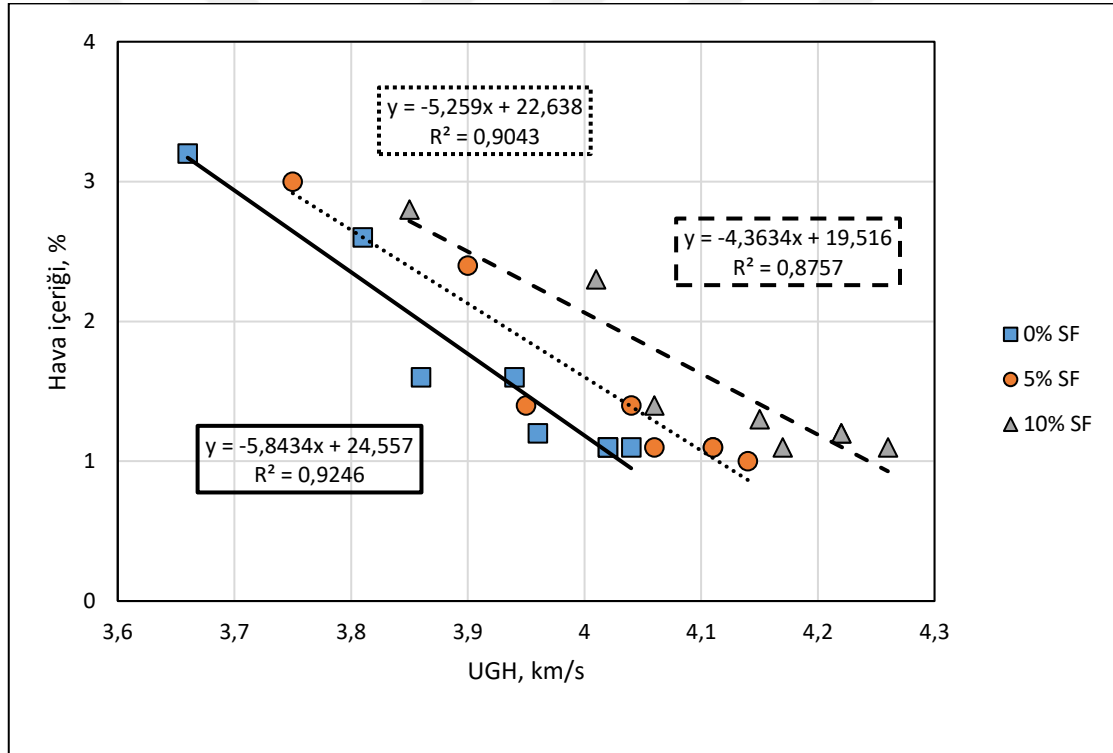
RAi içeren betonlara ait yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde, tüm yer değiştirme oranları için, SF kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği ve UGH değerlerini belirgin şekilde artırdığı görülmektedir. Ayrıca, tüm yer değiştirme oranlarında ve tüm SF, BF, SF+BF kullanım durumlarında sonuçlar şahit beton serisine kıyasla artış göstermiştir. oBMM uygulaması sonucu özellikleri iyileşen RAI'nin betonda kullanımı sonucu UGH değerleri tüm serilerde, kıyas yapılan betona göre daha yüksek olarak belirlenmiştir.

RA içeren betonlara kıyasla, RAI içeren betonların UGH değerleri daha yüksek olarak belirlenmiş ve en yüksek değerler %10 SF kullanımı ile sağlanmıştır. Sonuç olarak oBMM+SF iyileştirme kombinasyonu kullanımı, oBMM+BF ve oBMM+SF+BF iyileştirme kombinasyonu kullanımlarına kıyasla daha yüksek UGH değerleri oluşmasına sebebiyet vermiştir. Agregası ve beton özelliklerini olumsuz etkileyen boşluklu ve kırıklı yapıya sahip AOM'nin oBMM ile temizlenmesi ve SF'nın ince tanecik yapısı ve puzolanik özellikleri ile kompakt ve boşluksuz bir geri kazanılmış agregalı beton oluşturması, UGH değerlerini artıran temel etkenler şeklinde sıralanabilir.

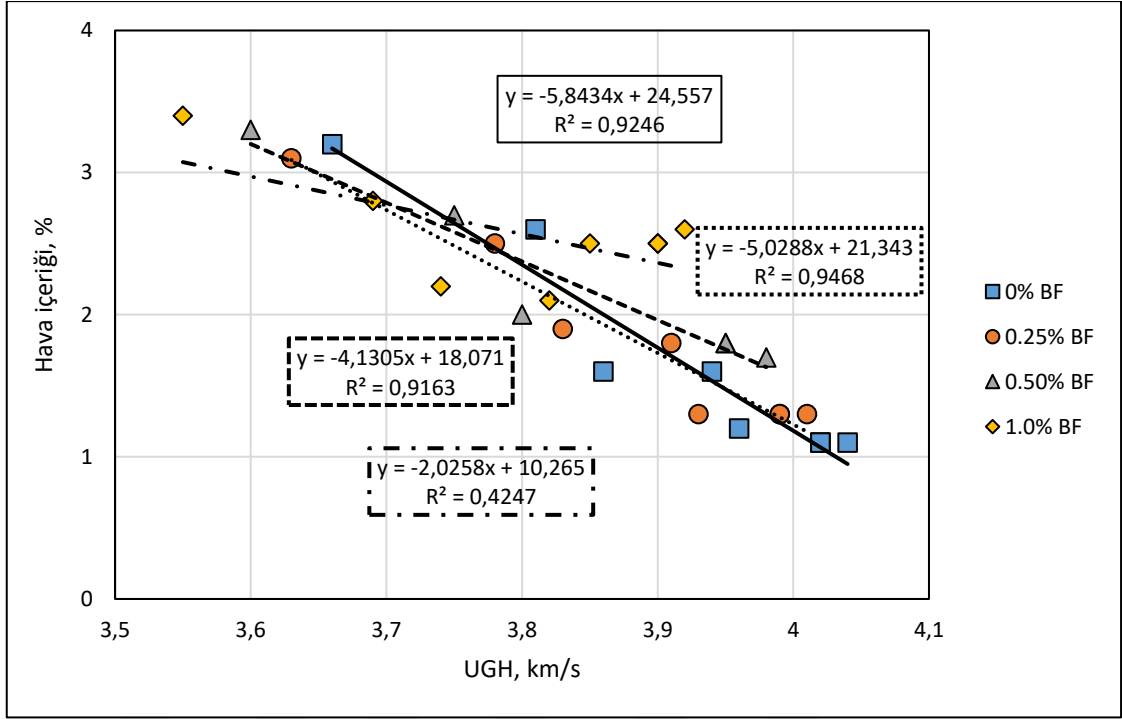
4.3.3 Fiziksel Özellikler Arasında Belirlenen İkili İlişkiler

Beton fiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek üzere korelasyon analizleri yapılmış ve Şekil 4.15-4.18'de sonuçlar verilmektedir.

Şekil 4.15-4.16'dan görüleceği üzere, hava içeriği ile UGH değerleri arasında doğrusal ters orantı olduğu ve betonlarda hava içeriği arttıkça UGH değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Söz konusu ilişki hem SF ve hem de BF içeren betonlar için de gözlemlenmiştir. BF içeren betonlardan farklı olarak SF içeren betonlarda SF oranı arttıkça; hava içeriği daha çok azalmakta ve UGH değeri daha çok artmaktadır. Bu durumun SF'nın etkisi ile oluştuğu, SF ince tanecik yapısının boşlukları doldurarak betonu daha kompakt hale getirdiği ve böylece artan SF kullanımı ile UGH değerlerinin daha çok arttığı söylenebilir.

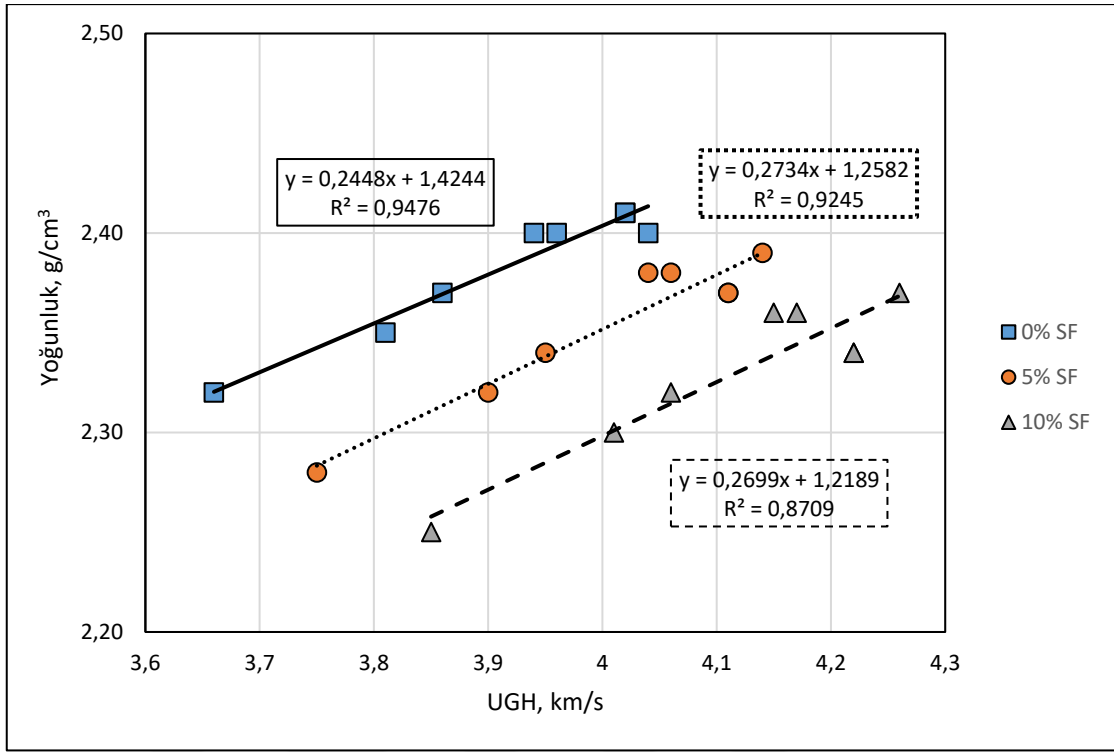


Şekil 4.15 SF içeren betonlara hava içeriği-UGH ilişkisi

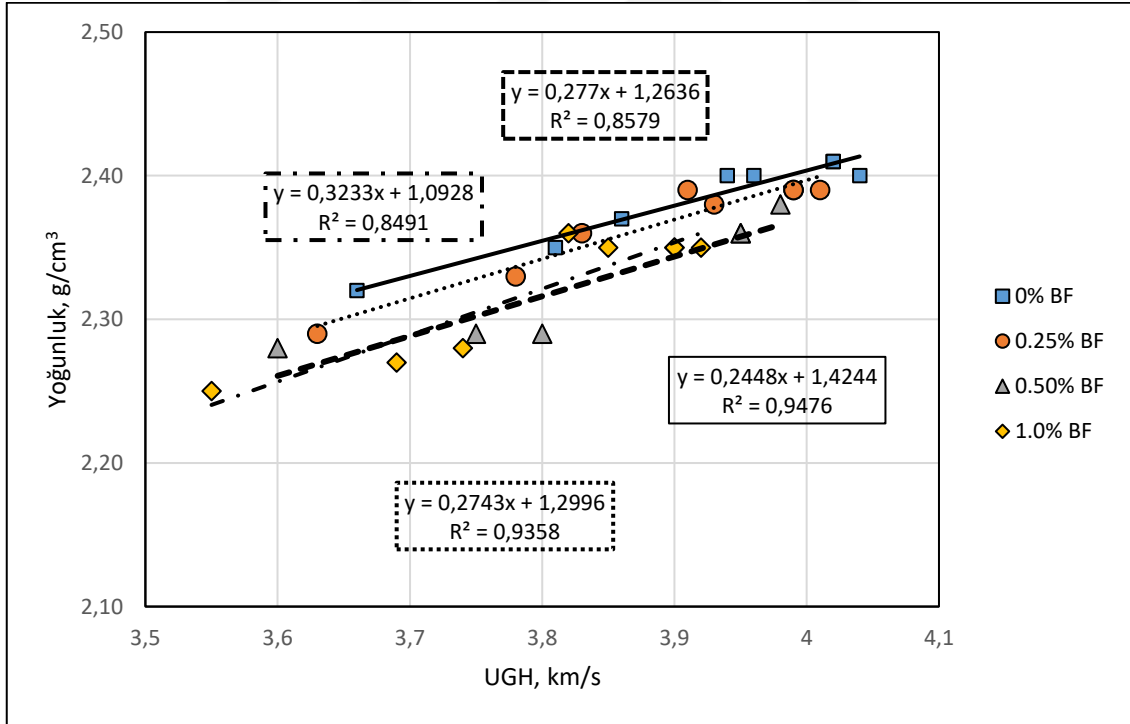


Şekil 4.16 BF içeren betonlara hava içeriği-UGH ilişkisi

Yoğunluk değerleri ile UGH değerleri arasında doğru orantı olduğu, artan yoğunluk sonucu UGH değerlerinin arttığı ve bu durumun hem SF ve hem de BF içeren betonlar için geçerli olduğu Şekil 4.17-4.18’de görülmektedir. BF içeren betonlardan farklı olarak SF içeren betonlarda SF oranı arttıkça; yoğunluk değerleri daha fazla düşerken UGH değerleri daha çok artmıştır. SF’nın çimentoya göre daha düşük yoğunluğa sahip olmasının yoğunluk değerlerinde etkili olduğu, SF ince tanecik yapısının boşlukları doldurarak yoğun bir matris oluşumu sağladığı ve böylelikle UGH değerlerini artırdığı söylenebilir.



Şekil 4.17 SF içeren betonlara yoğunluk-UGH ilişkisi



Şekil 4.18 BF içeren betonlara yoğunluk-UGH ilişkisi

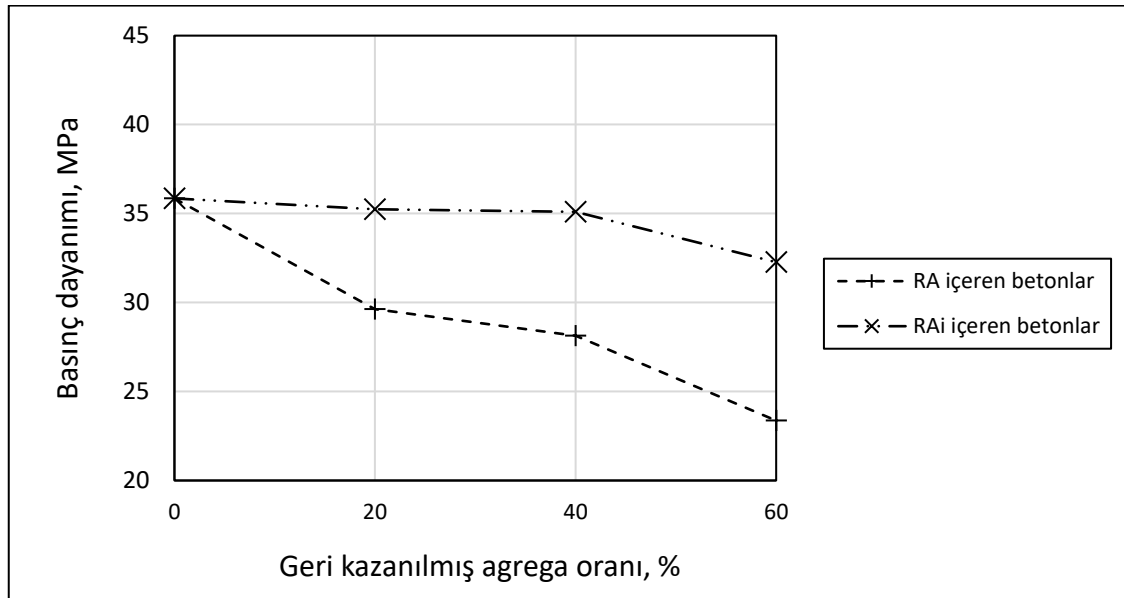
4.4 Betonun Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

4.4.1 Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.4.1.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı

Beton serilerine ait basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, artan oranda RA ve RAI kullanımı sonucu basınç dayanımlarında düşüşler görülmüştür (Şekil 4.19). RAI kullanımı durumunda basınç dayanımı düşüş eğilimi azalmış ve kontrol betonuna yakın basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Örneğin, R1, R2 ve R12 serilerinde basınç dayanımları kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %17,5, %21,7 ve %34,8 azalırken, %20-40-60 RAI içeren R1i, R2i ve R12i serilerinde basınç dayanımları ise sırasıyla %1,9, %2,2 ve %10,0 azalmıştır.

NA'ya göre daha zayıf özelliklere sahip RA'nın betonda kullanılması ile beton dayanımlarının düşmesi ve RAI kullanımı ile dayanımların RA'ya göre daha yüksek olarak elde edilmesi, betonların içerdikleri malzemelerin (özellikle agregaların) kalitesi bakımından değerlendirilerek açıklanabilirler. RA'ya oBMM uygulanması sonucu elde edilen RAI'nin mekanik ve fiziksel özelliklerinin (su emme, yoğunluk, Los Angeles aşınma dayanımı vb.) iyileştirilmiş olması böylece agreganın kalitesinin artması basınç dayanımı değerlerini olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.19 RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri

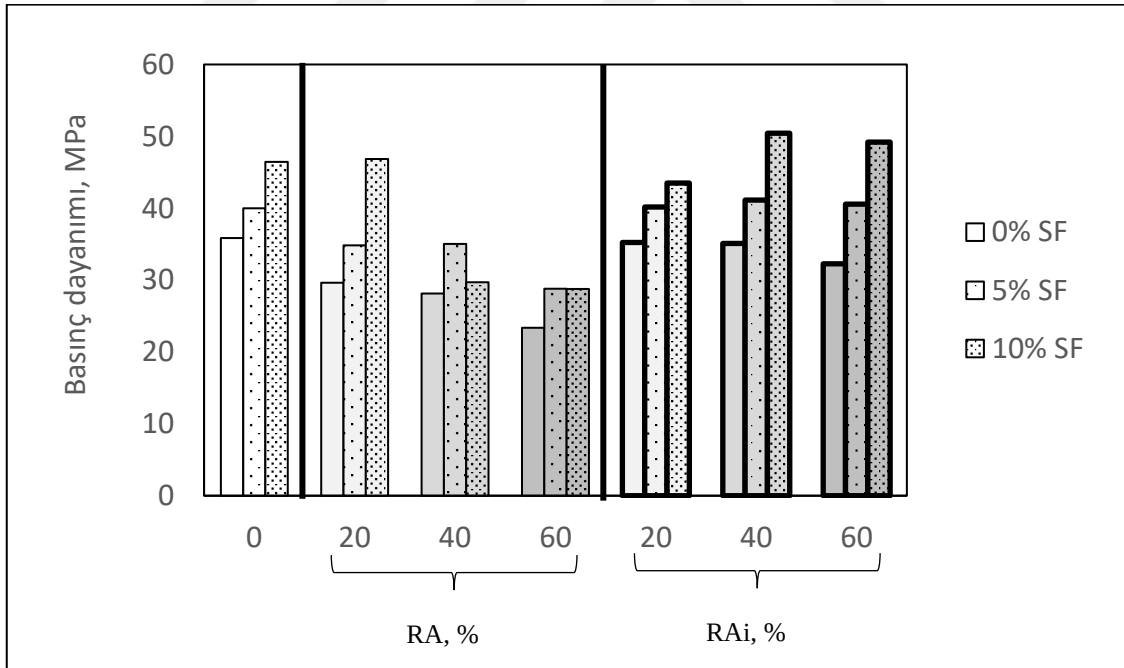
4.4.1.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.20’de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1S5, R1S10 ve R2, R2S5, R2S10 ile R12, R12S5, R12S10 betonlarının basınç dayanımı değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden -17,3, -2,8, +30,7 ve -21,5, -2,3, -17,2 ile -34,8, -19,7, -19,8 değişim göstermiştir. Ayrıca, RA kullanımı sonucu dayanımlar azalsa da RA içeren betonların basınç dayanımları artan SF kullanımı ile artış göstermiştir. Özellikle, %5-10 SF ile %20 RA içeren betonların dayanımları SF ile iyileştirilmiş ve kontrol betonuna göre sırasıyla %-2,8 ve %+30,7 değişim göstererek kontrol betonuna en yakın/yüksek sonuçları vermiştir. Fakat, kontrol betonuna kıyasla, %5-10 SF ile %40 RA ile içeren betonların basınç dayanımları sırasıyla %-2,3 ve %-17,2, %60 RA içeren betonların dayanımları sırasıyla %-19,7 ve %-19,8 değişmiş olarak belirlenmiş ve bu değerler kontrol betonundan daha düşüktür. Sonuç olarak, herbir RA kullanım oranı için SF farklı oranlarda iyileştirme etkisi oluşturmuş, SF kullanılmayan duruma göre genellikle %5 SF kullanımı basınç dayanımlarını en fazla artıran oran olmuştur. En yüksek basınç dayanımı değeri RA içeren serilerde 46,9 MPa olarak R1S10 betonunda belirlenmiştir. %5 ve üzeri oranlarda SF’nin yüksek oranda RA ile kullanımı sonucu, betonda boşlukların SF ile dolduğu fakat SF’nin kısa dönemde (28 günde) yeterli ek C-S-H oluşturmaması nedeniyle yüksek oranda RA içeren betonlarda basınç dayanımlarının düştüğü ve SF’nin aktifleşerek dayanımları artırması için uzun kür süresine ihtiyaç olabileceği düşünülmüş ve benzer yorumlar benzer çalışmalarda rapor edilmiştir [32].

Diğer yönden, R_{Ai} ile SF içeren beton serilerine ait sonuçlar incelendiğinde, R1iS5, R2iS5, R12iS5 ve R1iS10, R2iS10, R12iS10 betonlarının basınç dayanımı değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %12, %14,5, %13,1 ve %21,2, %40,4, %37,0 artmıştır. Artan oranda R_{Ai} kullanımı sonucu basınç dayanımları azalış gösterse de artan miktarda SF kullanımı sonucu basınç dayanım değerleri artmıştır. En belirgin artış R_{Ai} ve SF içeren betonlarda R2iS10 ve R12iS10 serilerinde gözlemlenmiş ve sırasıyla %40,3 ve %37,0 şeklindedir. Bu değerler birinci ve ikinci en yüksek basınç dayanımı değerleridir. Diğer yönden, tüm RA ve R_{Ai} yer değiştirme oranları için, aynı oranda SF kullanımı durumunda basınç dayanımları R_{Ai} içeren betonlarda

daha yüksek olarak gözlemlenmiştir (%20 RA + %10 SF hariç). %10 SF kullanımı durumunda, %20 RA içeren beton serisi %20 RAI içeren beton serisinden daha yüksek basınç dayanımı değerine sahiptir. Basınç dayanımının daha yüksek çıkmasında, RA'nın RAI'den daha pürüzlü olması böylece daha fazla yüzey alanına sahip olması ve SF kullanımı sonucu ara geçiş yüzeyi kalitesinin artmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Diğer yönden, %20 RA ve %20 RAI kullanımı sonucu elde edilecek daha çok sayıda (bu sayı istatistiki açıdan minimum 30'dur) betona ait basınç dayanımları istatistiki olarak incelenerek irdelemeler yapılabilir. Geri kazanılmış agrega, deney sonuçlarında standart sapmaları artırabilmektedir. Güven aralığı sınırları bu betonlar için belirlenerek, iki beton türü için detaylı incelemelerde bulunularak böylelikle sonuçların istatistiki olarak incelenmesi daha yararlı olacaktır.

%60'a kadar oranda RAI ile %10'a kadar oranda SF kullanımı dayanımlar üzerinde olumlu sonuçlar doğurmuştur. Böylelikle oBMM+SF kullanımı sonucu basınç dayanımları, yalın SF kullanımı durumuna göre daha çok artmıştır.

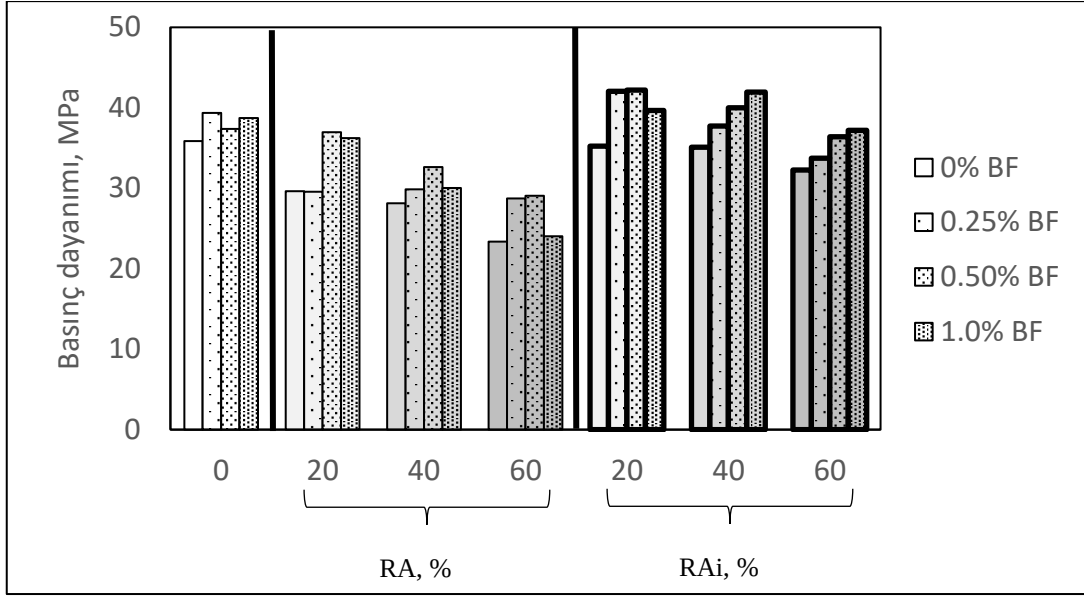


Şekil 4.20 SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri

4.4.1.3 Bazalt Fiber Kullanımı

BF içeren betonlara ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.21'te verilmektedir. RA içeren betonlarda artan oranlarda BF kullanımı, geri kazanılmış agregalı beton basınç dayanımlarını iyileştirmiştir. Tüm RA kullanım oranlarında, %0,50'ye kadar BF kullanımı basınç dayanımı değerlerini artırmış ve BF'in %0,50'den fazla kullanımı durumunda basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Örneğin, BF R12, R12B25, R12B50 ve R12B100 serilerine ait basınç dayanımı değerleri kontrol betonuna kıyasla %34,8, %20,0, %18,9 ve %33,1 artış göstermiştir. 35,9 MPa basınç dayanımına sahip kontrol betonuna en yakın basınç dayanımı sırasıyla R1B50 ve R1B100 serilerinde 37,0 MPa ve 36,2 MPa olarak elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı değeri ise R1B50 serisinde 37,0 MPa olarak elde edilmiştir. Geri kazanılmış agrega ve bazalt fiber üzerine yapılan bir çalışmada, basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı bakımından %0,50'e kadar BF kullanımının dayanımları iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı beton bakımından artırdığı ve iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı betonda ise %0,30'a kadar BF kullanımının aynı etkiyi gösterdiği rapor edilmektedir [28].

Betonda artan oranlarda BF kullanımı RAI içeren serilerde incelendiğinde, BF'in iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı beton basınç dayanım değerlerini artırdığı görülmektedir. Betonda herbir RAI kullanım oranı için farklı etki oluşturan BF; %20 RAI içeren serilerin basınç dayanımlarını %0,50'ye kadar kullanıldığında, %40-60 RAI içeren serilerde ise %1,0'e kadar kullanıldığında arttırdığı ve sonrasında düşürdüğü görülmektedir. Diğer yönden, RA+BF içeren betonlara kıyasla BF+RAI içeren betonların basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Gözlemlenen iyileşmede, RA'daki AOM miktarının azaltılmasıyla özelliklerinin iyileşmesinin etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.21 BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri

4.4.1.4 Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı

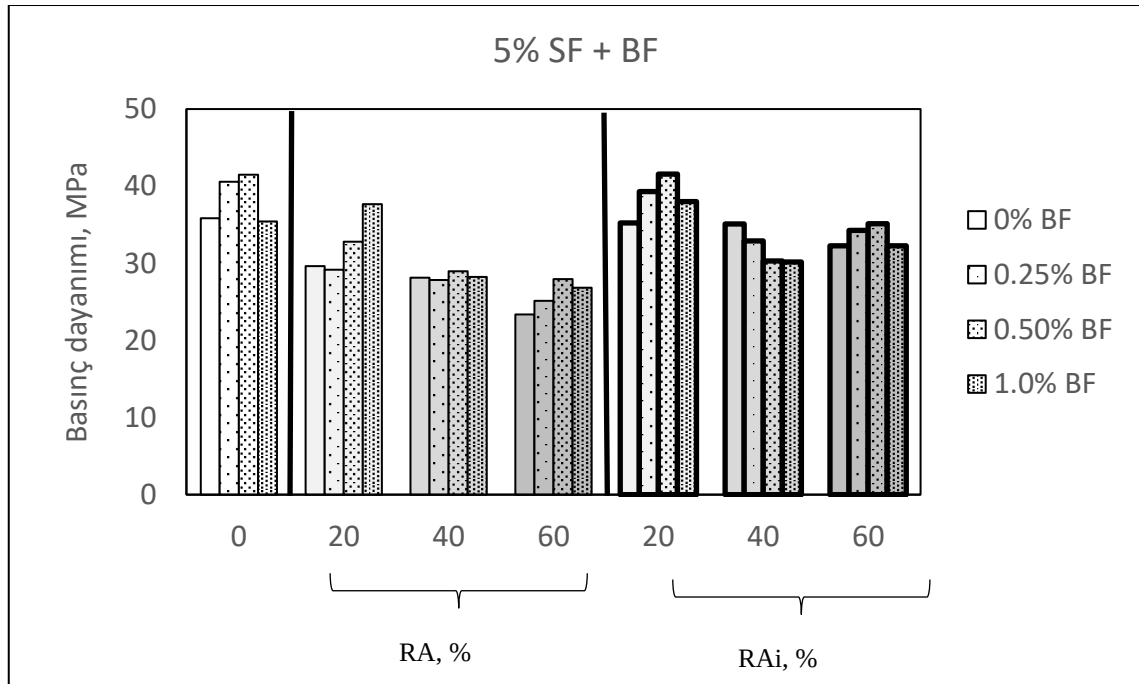
SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar Şekil 4.22-4.23'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, RA içeren betonlarda artan oranlarda SF+BF kullanımı ile basınç dayanımlarında artışlar olmuş ve %20 RA içeren betonlarda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. %20 RA içeren beton serilerine ait basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, %5 SF içeren R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100 serilerinin kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımı değişimleri sırasıyla %-18,6, %-8,6 ve %+5,0 olarak belirlenirken, %10 SF içeren R1S10B25, R1S10B50 ve R1S10B100 serilerinin kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımı değişimleri sırasıyla %+10,0, %-6,7 ve %-0,6 olarak belirlenmiştir. %20 RA içeren serilerde %10 SF ile BF kullanımı daha iyi sonuçlar verdiği ve en yüksek basınç dayanım değerinin R1S10B25 serisinde 39,5 MPa olduğu tespit edilmiştir.

SF+BF'nin RAi içeren betonlarda, farklı RAi içerik oranları için betonlarda farklı etkiler oluşturmıştır. Oluşan etkiler maddeler halinde belirtilecek olursa:

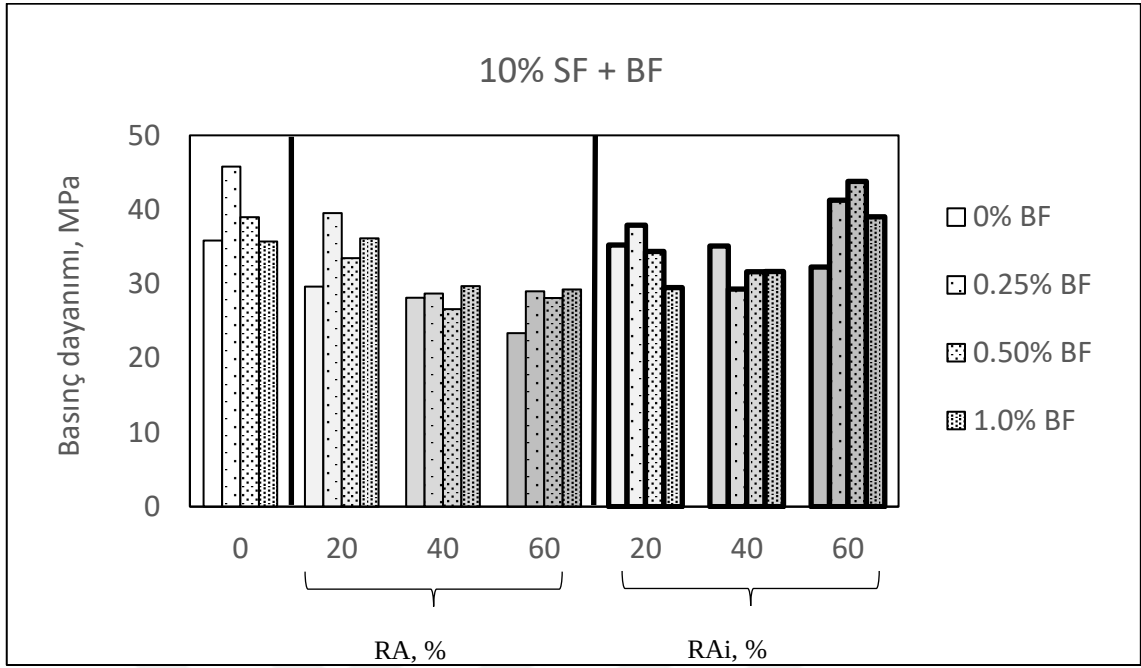
- %20 RAi ile %5SF içeren ve artan oranda BF bulunan beton serilerinde %0,50'ye kadar BF kullanımı basınç dayanımını artırmış sonrasında azaltmış ve %20 RAi ile %10 SF içeren ve artan oranda BF bulunan beton serilerinde %0,25'e kadar BF kullanımı basınç dayanımını artırmış ve sonrasında azaltmıştır.

- %40 RAI ile %5-10 SF içeren ve artan oranda BF bulunan beton serilerinde artan oranda BF kullanımı basınç dayanımını azaltmıştır.
- %60 RAI ile %5 SF içeren ve artan oranda BF bulunan beton serilerinde %0,50'ye kadar BF kullanımı basınç dayanımını artırmış ve sonrasında azaltmış, %60 RAI ile %10 SF içeren ve artan oranda BF bulunan beton serilerinde %0,50'ye kadar BF kullanımı basınç dayanımını artırmış ve sonrasında azaltmıştır.
- %20 RAI içeren yalın betona göre, %5 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF içeren serilere ait basınç dayanımları daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- %40 RAI içeren yalın betona göre, %5-10 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF içeren serilere ait basınç dayanımları daha düşük olarak belirlenmiştir.
- %60 RAI içeren yalın betona göre, %5-10 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF içeren serilere ait basınç dayanımları daha yüksek olarak belirlenmiştir (%60RAi%5SF+%1,0BF içeren R12iS5B100 ve %60RAi içeren R12i için basınç dayanımı değeri eşit olarak belirlenmiştir).

En yüksek basınç dayanımı değeri RAI içeren betonlarda R12iS10B50 serisinde 43,8 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.22 %5 SF+BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.23 %10 SF+BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait basınç dayanımı değerleri

4.4.1.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlarda SF, BF, SF+BF ile oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF iyileştirme yöntemleri kombinasyon kullanımının, her bir RA ve RAi kullanım oranındaki betonda basınç dayanımı üzerine etkinlikleri incelendiğinde:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +17,5, +58,1 ile -0,2, +24,7, +22,3 ve -1,6, +10,7, +27,1, +33,4, +12,9, +21,9 değişmiş ve SF, BF, SF+BF basınç dayanımı değerlerini belirgin şekilde artırmıştır (R1B25 ve R1S5B25 hariç). En yüksek artış %10 SF kullanımı ile olmuştur.
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +24,5, +5,6 ile +6,2, +16,0, +6,8 ve -1,1, +3,0, +0,4, +2,0, -5,5, +5,6 değişmiş ve SF kullanımı ile BF kullanımı daha belirgin artışlar oluşturmıştır. Özellikle %5 SF kullanımı daha etkili olmuştur.
- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +23,3, +23,1 ile +23,0, +24,4, +2,9 ve +7,9, +19,6, +14,8, +24,1, +20,3, +25,3 değişmiştir. Basınç dayanımları SF, BF, SF+BF kullanımı sonucu artmıştır. Üç kullanım durumunda da sonuçlar artarken artan oranda SF ve BF kullanımı (%1,0 BF hariç) yakın dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

RAi içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 RAi kullanımı durumunda R1i, R1iS5, R1iS10 ile R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R1iS5B25, R1iS5B50, R1iS5B100, R1iS10B25, R1iS10B50, R1iS10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R1

betonuna kıyasla % cinsinden +18,9, +35,5, +46,8 ile +41,9, +42,4, +33,9 ve +32,6, +40,3, +28,2, +27,9, +16,0, -0,4 değişmiş ve basınç dayanımları SF, BF, SF+BF kullanımı sonucu artmıştır (R12iS10B100 hariç). En belirgin iyileşme %10 SF ile sağlanmıştır.

- Karışımlarda %40 R_{Ai} kullanımı durumunda R2i, R2iS5, R2iS10 ile R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R2iS5B25, R2iS5B50, R2iS5B100, R2iS10B25, R2iS10B50, R2iS10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R2 betonuna kıyasla % cinsinden +24,8, +46,2, +79,3 ile +34,1, +42,2, +49,1 ve +16,9, +7,7, +7,2, +4,1, +12,4, +12,6 değişmiş, basınç dayanımları SF, BF, SF+BF kullanımı sonucu artmış ve en belirgin iyileşme SF kullanımı sonucu elde edilmiştir. Özellikle %10 SF kullanımı, oluşturduğu dayanım artırıcı etki ile göze çarpmaktadır.
- Karışımlarda %60 R_{Ai} kullanımı durumunda R12i, R12iS5, R12iS10 ile R12iB25, R12iB50, R12iB100 ve R12iS5B25, R12iS5B50, R12iS5B100, R12iS10B25, R12iS10B50, R12iS10B100 için betonda basınç dayanımı değerleri R12 betonuna kıyasla % cinsinden +38,1, +73,6, +110,6 ile +44,4, +55,8, +59,2 ve +46,6, +50,4, +38,1, +76,6, +87,4, +67,0 değişmiş, basınç dayanımları SF, BF, SF+BF kullanımı sonucu artmış ve en belirgin iyileşme SF kullanımı sonucu elde edilmiştir. Özellikle %10 SF kullanımı oluşturduğu dayanım artırıcı etki ile göze çarpmaktadır. Ayrıca, %10SF +BF kullanımı da ciddi artışlara neden olmuştur.

R_{Ai} içeren tüm beton serileri, kıyas yapılan R1, R2 ve R12 beton serilerine göre daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olarak belirlenmiştir. oBMM ile SF, BF ve SF+BF kullanımı basınç dayanımlarını artırmış, fakat en belirgin artış oBMM+SF (özellikle %10 SF) ile elde edilmiştir.

4.4.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yarmada çekme dayanımı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, iki ana yaklaşımla betonların dayanım sonuçlarının irdelendiği görülmektedir [38], [47], [48]: (1) Yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı şeklinde incelendiği yaklaşım (2) Tekil yarmada çekme dayanımının incelendiği yaklaşım.

Bu kapsamda, yarmada çekme dayanımı sonuçları bahsedilen yaklaşımlarla irdelenmiş ve elde edilen bulgular ilerleyen kısımlarda verilmektedir.

4.4.2.1 Yarmada Çekme Dayanımının Basınç Dayanımına Oranı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı: RA ve R_{Ai} içeren betonların yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranları incelendiğinde (Tablo 4.5), doğal agrega içeren N, %60 RA içeren R12 ve %60 R_{Ai} içeren R12i betonlarına ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranları sırasıyla 0,072, 0,086 ve 0,070 olarak belirlenmiştir. NA içeren betonlara ait sonuçların R_{Ai} içeren betonlara yakın olduğu fakat RA içeren betonların daha yüksek yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranına sahip olduğu görülmektedir. Geri kazanılmış agregalı betonların sünekliklerinin, oBMM nedeniyle azaldığı ve gevrekleştiği söylenebilir. Ayrıca, RA'nın R_{Ai}'den farkının RA'nın R_{Ai}'den daha yüksek mertebede AOM içerdiği düşünülürse, AOM miktarı söz konusu değerleri etkileyen bir faktördür denilebilir.

Silis Dumanı Kullanımı: SF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde (Tablo 4.5), RA içeren betonların R_{Ai} içeren betonlardan daha yüksek yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerine sahip oldukları ve süneklik açısından değerlendirildiğinde R_{Ai} içeren betonların RA içeren betonlardan daha gevrek oldukları görülmektedir. Örneğin, %40 RA ve R_{Ai} ile %5 SF içeren R2S5 ve R2iS5 betonlarına ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri sırasıyla 0,083 ve 0,065 şeklinde hesap edilmiştir.

%5 SF katkısının artan oranda (%20-40-60) RA ile kullanımı sonucu sünekliklerin arttığı ve %10 SF katkısının %40'a kadar artan oranda RA kullanımı ile yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının arttığı fakat sonrasında düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, %5 SF katkısının artan oranda R_{Ai} ile kullanımı sonucu yarmada

çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının azalarak betonların gevrekleştiği ve %10 SF katkısının %40'a kadar artan oranda R_{Ai} kullanımı ile yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının ve dolayısıyla sünekliklerin arttığı, fakat sonrasında azaldığı tespit edilmiştir. SF içeren betonlarda en yüksek yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı, R_A içeren betonlarda %40 R_A ve %10 SF içeren R2S10 serisinde 0,107 olarak ve R_{Ai} içeren betonlarda %40 R_{Ai} ve %10 SF içeren R2iS10 serisinde 0,078 olarak elde edilmiştir.

SF ile R_A içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin kontrol betonu N'den daha yüksek oldukları (R1S10 hariç) görülmektedir. Fakat R_{Ai} içeren betonların genellikle kontrol betonuna yakın veya daha düşük değerlere sahip oldukları görülmektedir.

Tablo 4.5 SF, R_A ve R_{Ai} içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri

<i>Numune</i>	<i>RA, %</i>	<i>SF, %</i>	<i>ft/fc</i>
<i>N</i>	0	0	0,072
<i>NS5</i>	0	5	0,074
<i>NS10</i>	0	10	0,069
<i>R1</i>	20	0	0,089
<i>R1S5</i>	20	5	0,081
<i>R1S10</i>	20	10	0,066
<i>R2</i>	40	0	0,075
<i>R2S5</i>	40	5	0,083
<i>R2S10</i>	40	10	0,107
<i>R12</i>	60	0	0,086
<i>R12S5</i>	60	5	0,090
<i>R12S10</i>	60	10	0,088
<i>R1i</i>	20	0	0,067
<i>R1iS5</i>	20	5	0,075
<i>R1iS10</i>	20	10	0,067
<i>R2i</i>	40	0	0,062
<i>R2iS5</i>	40	5	0,065
<i>R2iS10</i>	40	10	0,078
<i>R12i</i>	60	0	0,070
<i>R12iS5</i>	60	5	0,064
<i>R12iS10</i>	60	10	0,070

Bazalt Fiber Kullanımı: BF ile R_A içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde (Tablo 4.6), genel olarak BF'nin yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranını artırdığı görülmektedir. %20 R_A içeren N, R1, R1B25, R1B50 ve R1B100 için oranlar sırasıyla 0,072, 0,089, 0,080, 0,076 ve 0,101 şeklinde belirlenmiş ve en iyi sonuç

%20 RA ile %1,0 BF kullanımı sonucu elde edilmiştir. %40 RA içeren R2, R2B25, R2B50, R2B100 ve R12, R12B25, R12B50, R12B100 için söz konusu oranlar sırasıyla 0,075, 0,109, 0,089, 0,108 ve 0,086, 0,091, 0,078, 0,100 olarak elde edilmiştir. Görüleceği üzere, %40 ve %60 RA ile BF kullanılan serilerde en yüksek değerler sırasıyla R2B50 ve R12B100 betonlarında elde edilmiştir. RA içeren betonlarda ise en yüksek söz konusu oran R2B50 için 0,109 olarak elde edilmiştir. Artan oranda RA ile %1,0 BF kullanımı genellikle 0,100 üzeri yarmada çekme/basınç dayanımı oranı vermiştir ve bu değerler, kontrol betonundan yaklaşık %25 ve daha fazladır. Ayrıca, RA içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin kontrol betonu N'den daha yüksek oldukları görülmektedir.

Diğer yönden, BF ile R_{Ai} içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, BF kullanımının yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranını artırdığı görülmektedir. %20 R_{Ai} içeren R1i, R1B25i, R1B50i ve R1B100i için söz konusu oranlar sırasıyla 0,067, 0,057, 0,073 ve 0,071 şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca, %40 R_{Ai} içeren R2i, R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R12i, R12iB25, R12iB50, R12iB100 için oranlar sırasıyla 0,062, 0,081, 0,066, 0,075 ve 0,070, 0,077, 0,070, 0,067 şeklindedir. Belirlenen sonuçlardan görüleceği üzere, R_{Ai} içeren betonlara ait oranlar kontrol betonuna yakındır (0,072). En yüksek değer, R2iB25 betonu için 0,081 olarak bulunmuştur. Ayrıca, R_{Ai} içeren betonlar için belirlenen oranlar RA için belirlenen oranlardan genellikle daha düşüktürler.

Tablo 4.6 BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri

Numune	RA, %	BF,%	f_t/f_c
N	0	0	0,072
NB25	0	0,25	0,067
NB50	0	0,50	0,069
NB100	0	1,00	0,074
R1	20	0	0,089
R1B25	20	0,25	0,080
R1B50	20	0,50	0,076
R1B100	20	1,00	0,101
R2	40	0	0,075
R2B25	40	0,25	0,109
R2B50	40	0,50	0,089
R2B100	40	1,00	0,108
R12	60	0	0,086
R12B25	60	0,25	0,091
R12B50	60	0,50	0,078
R12B100	60	1,00	0,100
R1i	20	0	0,067
R1iB25	20	0,25	0,057
R1iB50	20	0,50	0,073
R1iB100	20	1,00	0,071
R2i	40	0	0,062
R2iB25	40	0,25	0,081
R2iB50	40	0,50	0,066
R2iB100	40	1,00	0,075
R12i	60	0	0,070
R12iB25	60	0,25	0,077
R12iB50	60	0,50	0,070
R12iB100	60	1,00	0,067

Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı Durumu: SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde (Tablo 4.7-4.8), %5 SF ile %0,25 ve %1,0 BF'nin %20-40-60 RA ile kullanımı durumunda yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranını arttırdığı belirlenmiştir. %5 SF ile %0,50 BF'nin %40'a kadar RA kullanımıyla yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin arttığı sonrasında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %5 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF'nin %40'a kadar RAI kullanımıyla yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin arttığı sonrasında azaldığı görülmektedir. Diğer yönden, %10 SF ile %0,25-0,50-1,0 BF'nin artan oranda RA ve RAI ile kullanımı durumunda %40'a kadar RA ve RAI kullanımıyla yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin arttığı sonrasında azaldığı görülmektedir. SF ile BF'nin aynı anda betonda kullanımı durumunda, en yüksek yarmada çekme dayanımı/basınç

dayanımı oranı, RA içeren betonlarda R1 serisinde 0,089 olarak ve RAI içeren betonlarda R2iS10B100 serisinde 0,085 olarak elde edilmiştir.

RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin genellikle kontrol betonu N'e göre farklılıklar gösteren değerlere sahip oldukları görülmektedir.

Tablo 4.7 %5 SF ile BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri

<i>Numune</i>	<i>RA, %</i>	<i>BF, %</i>	<i>SF, %</i>	<i>ft/fc</i>
<i>N</i>	0	0	0	0,072
<i>NS5B25</i>	0	0,25	5	0,059
<i>NS5B50</i>	0	0,50	5	0,059
<i>NS5B100</i>	0	1,00	5	0,077
<i>R1</i>	20	0	0	0,089
<i>R1S5B25</i>	20	0,25	5	0,087
<i>R1S5B50</i>	20	0,50	5	0,059
<i>R1S5B100</i>	20	1,00	5	0,051
<i>R2</i>	40	0	0	0,075
<i>R2S5B25</i>	40	0,25	5	0,076
<i>R2S5B50</i>	40	0,50	5	0,073
<i>R2S5B100</i>	40	1,00	5	0,069
<i>R12</i>	60	0	0	0,086
<i>R12S5B25</i>	60	0,25	5	0,077
<i>R12S5B50</i>	60	0,50	5	0,065
<i>R12S5B100</i>	60	1,00	5	0,071
<i>R1i</i>	20	0	0	0,067
<i>R1iS5B25</i>	20	0,25	5	0,058
<i>R1iS5B50</i>	20	0,50	5	0,046
<i>R1iS5B100</i>	20	1,00	5	0,061
<i>R2i</i>	40	0	0	0,062
<i>R2iS5B25</i>	40	0,25	5	0,072
<i>R2iS5B50</i>	40	0,50	5	0,080
<i>R2iS5B100</i>	40	1,00	5	0,083
<i>R12i</i>	60	0	0	0,070
<i>R12iS5B25</i>	60	0,25	5	0,065
<i>R12iS5B50</i>	60	0,50	5	0,072
<i>R12iS5B100</i>	60	1,00	5	0,072

Tablo 4.8 %10 SF ile BF, RA ve RAI içeren beton serilerine ait yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerleri

<i>Numune</i>	<i>RA, %</i>	<i>BF, %</i>	<i>SF, %</i>	<i>f_t/f_c</i>
<i>N</i>	0	0	0	0,072
<i>NS10B25</i>	0	0,25	10	0,060
<i>NS10B50</i>	0	0,50	10	0,064
<i>NS10B100</i>	0	1,00	10	0,073
<i>R1</i>	20	0	0	0,089
<i>R1S10B25</i>	20	0,25	10	0,064
<i>R1S10B50</i>	20	0,50	10	0,076
<i>R1S10B100</i>	20	1,00	10	0,064
<i>R2</i>	40	0	0	0,075
<i>R2S10B25</i>	40	0,25	10	0,080
<i>R2S10B50</i>	40	0,50	10	0,076
<i>R2S10B100</i>	40	1,00	10	0,073
<i>R12</i>	60	0	0	0,086
<i>R12S10B25</i>	60	0,25	10	0,067
<i>R12S10B50</i>	60	0,50	10	0,068
<i>R12S10B100</i>	60	1,00	10	0,066
<i>R1i</i>	20	0	0	0,067
<i>R1iS10B25</i>	20	0,25	10	0,050
<i>R1iS10B50</i>	20	0,50	10	0,065
<i>R1iS10B100</i>	20	1,00	10	0,081
<i>R2i</i>	40	0	0	0,062
<i>R2iS10B25</i>	40	0,25	10	0,084
<i>R2iS10B50</i>	40	0,50	10	0,067
<i>R2iS10B100</i>	40	1,00	10	0,085
<i>R12i</i>	60	0	0	0,070
<i>R12iS10B25</i>	60	0,25	10	0,053
<i>R12iS10B50</i>	60	0,50	10	0,060
<i>R12iS10B100</i>	60	1,00	10	0,063

Sonuçların Değerlendirilmesi: Malzeme gevrekliğini gösteren bir parametre olarak yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı arttığı zaman süneklik artmakta ve gevreklik azalmaktadır [48]. Bulunan sonuçlar bu bakımdan incelendiğinde, RA ve RAI kullanımının beton gevrekliğini etkilediği ve RA kullanımının RAI'ye göre yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranını ve sünekliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Farklı oranlarda geri kazanılmış agreganın kullanımı durumunda, RA kullanılan betonların yarmada çekme dayanımının basınç

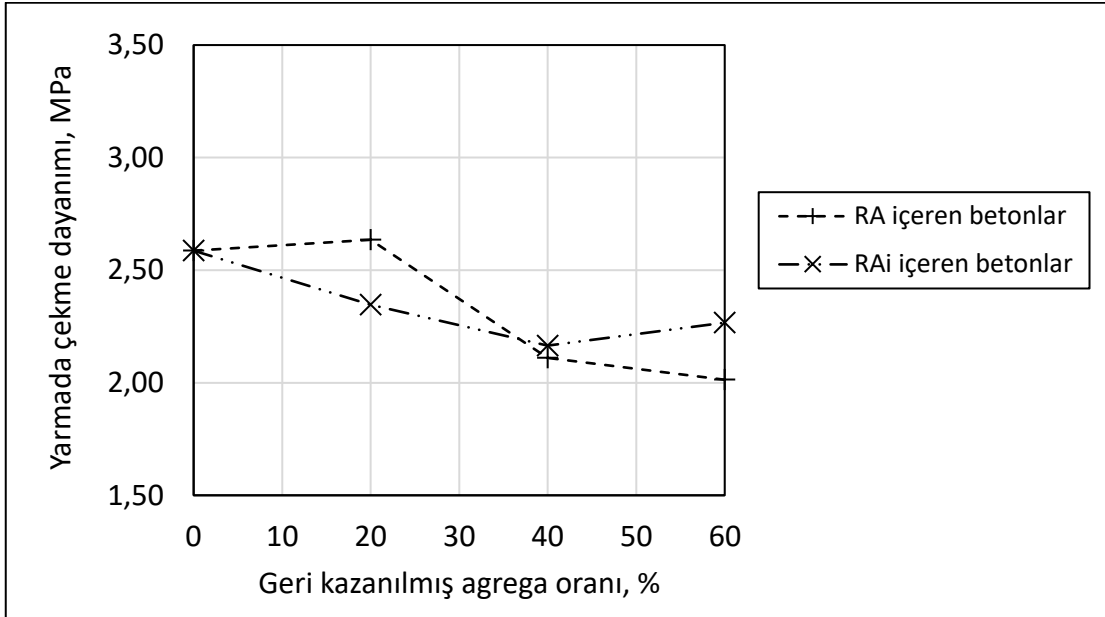
dayanımına oranının NA içeren betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranından daha büyük olduğu yapılan benzer çalışmalarda rapor edilmektedir [32], [49]. Fakat bu tez çalışmasında, iyileştirme uygulanmış geri kazanılmış agrega içeren betonların yarmada çekme/basınç dayanımı oranı, NA içeren betonların oranına yakın ve bazen daha düşük olarak tespit edilmiştir. Gözlemlenen söz konusu farklılıkta, özellik ve davranış olarak RAI'nin RA'dan uzaklaşarak NA'ya yaklaştığı ve öylece betonları etkilediği yorumu yapılabilir.

Ayrıca, SF, BF ve SF+BF'nin artan oranlarda %40'a kadar RA ile kullanımı sonucu yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı değerlerinin genellikle arttığı tespit edilmiştir. Süneklik artışı, SF içeren betonlarda ve özellikle BF içeren betonlarda sıklıkla gözlemlenirken bu artış SF+BF içeren serilerde pek oluşmamıştır. SF, BF ve SF+BF'nin betonda kullanımı sonucu yarmada çekme/basınç dayanımı oranlarında gözlemlenen farklı artış azalış etkileri için, sadece SF ve sadece BF içeren serilerde elde edilen sonuçlarda oluşan SF ve BF kaynaklı değişimler daha kararlı ve yorumlanabilir iken SF+BF içeren betonlarda malzeme artış/azalış oranlarıyla ilişkilendirilemeyen ve yorumlanamayan sonuçlar elde edilmiştir. Oluşan bu durumda, temel etkenin kullanılan malzemelerin (RA, RAI, SF+BF) yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı parametreleri üzerindeki etkilerinin aynı olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

4.4.2.2 Tekil Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı: Yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.24), R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i betonlarına ait yarmada çekme dayanımı sonuçlarının kontrol betonuna kıyasla % cinsinden sırasıyla +1,9, -18,4, -22,2 ve -9,3, -12,2, -16,1 değiştiği tespit edilmiştir. RA ve RAI kullanımının genel olarak yarmada çekme dayanımını azalttığı, fakat %20 RA kullanımının yarmada çekme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeye sahip iki agrega türü ile yapılan bir çalışmada, açılı kenarlara sahip pürüzlü yüzeyli agregaların camsı pürüzsüz yüzeye sahip agregalara göre daha yüksek yarmada çekme dayanımına sebebiyet verdikleri rapor edilmektedir [50]. %20 RA kullanımından kaynaklı olarak yarmada çekme dayanımında oluşan artışta RA'nın pürüzlü yapısının etkili olduğu ve yüksek oranda RA kullanımı durumunda

RA'nın zayıf özelliklerinin daha etkili olarak yarmada çekme dayanımını düşürdüğü yorumu yapılabilir.

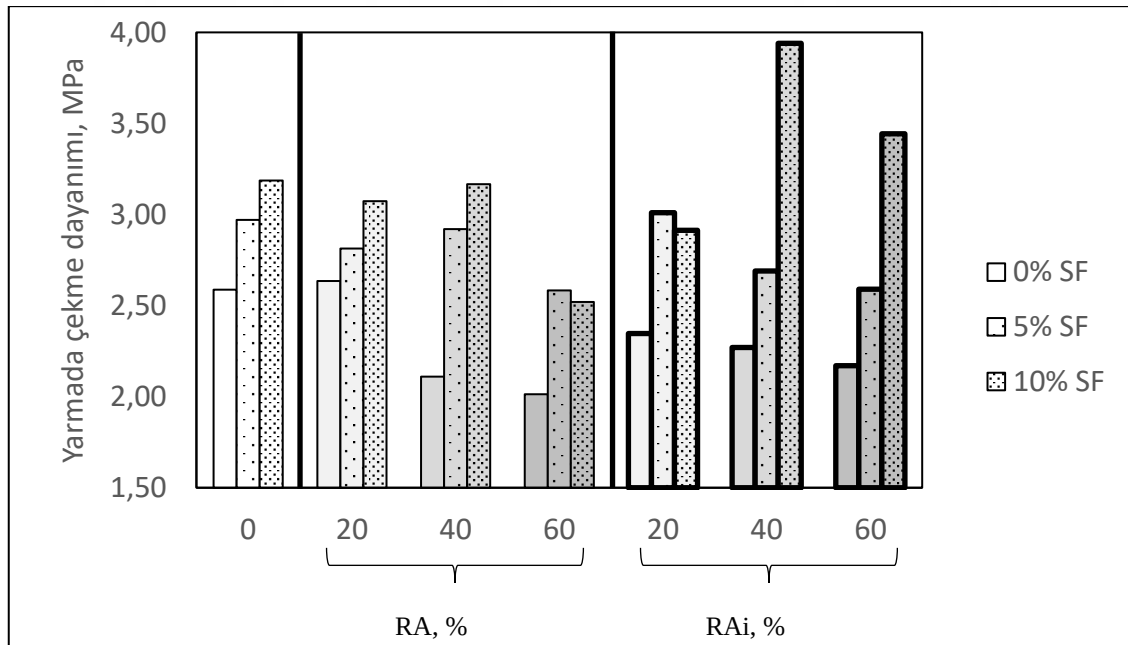


Şekil 4.24 RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Silis Dumanı Kullanımı: SF içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.25'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1S5, R1S10 ve R2, R2S5, R2S10 ile R12, R12S5, R12S10 betonlarına ait yarmada çekme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, +1,9, +8,8, +18,8 ve -18,4, +12,9, +22,4 ile -22,2, -0,1, -2,6 değişim göstermiştir. Artan oranda RA kullanımı söz konusu dayanımları düşürse de SF kullanımı ile beton yarmada çekme dayanımı değerlerinde artışlar gözlemlenmiş ve %5 SF'ye kıyasla %10 SF kullanımı dayanımları daha fazla iyileştirmiştir (R12S10 hariç). Ayrıca, en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri R2S10 betonunda 3,17 MPa olarak bulunmuştur. Basınç dayanımlarında gözlemlenen, yüksek RA oranları içeren serilerde %5 ve üzeri SF'nin kullanımı sonucu basınç dayanımlarında gözlemlenen artışın kısıtlı kalması durumu, yarmada çekme dayanımlarında da gözlemlenmiştir. Betonda boşlukların SF ile dolduğu fakat SF'nin kısa dönemde (28 günde) yeterli ek C-S-H oluşturamaması nedeniyle yüksek oranda RA içeren betonlarda dayanımları artıramayıp dayanımların düştüğü ve dayanımların artırması için daha uzun kür süresine ihtiyaç olabileceği yorumu yapılmıştır [32].

RAi içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, R1i, R1iS5, R1iS10 ve R2i, R2iS5, R2iS10 ile R12i, R12iS5, R12iS10 betonlarına ait yarmada çekme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, -9,3, +16,4, +12,6 ve -12,2, +4,0, +52,3 ile -16,1, +0,1, +33,1 değişim göstermiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, yarmada çekme dayanımı değerleri SF katkısı ile artmış ve en iyi sonuçlar %10 SF içeren betonlarda gözlemlenmiştir (R1S10 hariç). Ayrıca, en yüksek dayanım değeri R2iS10 içeren seride 3,94 MPa olarak belirlenmiştir.

RA ve RAi içeren betonlara ait sonuçlar karşılaştırıldığında, en iyi sonuçlar %40 geri kazanılmış agrega içeren serilerde gözlemlenirken, %40 geri kazanılmış agrega içeren serilerde SF RAi içeren betonların yarmada çekme dayanım değerlerini daha çok iyileştirmiştir. Ayrıca, bu etki, %60 RAi içeren beton serilerinde de gözlemlenmiş ve en yüksek ikinci yarmada çekme dayanımı değeri R12iS10 betonunda 3,44 MPa olarak belirlenmiştir. SF'nın ince tanecik yapısıyla boşlukları doldurucu etkisi ve ek C-S-H oluşuma sağladığı puzolanik etki [63], [64] bir arada düşünüldüğünde; SF, oBMM uygulanmış RAi içeren beton serilerinde iyi iş çıkarmış, beton matrisini güçlendirmiş ve oBMM+SF iyileştirme kombini beton yarmada çekme dayanımı değerlerini ciddi anlamda artırmıştır.



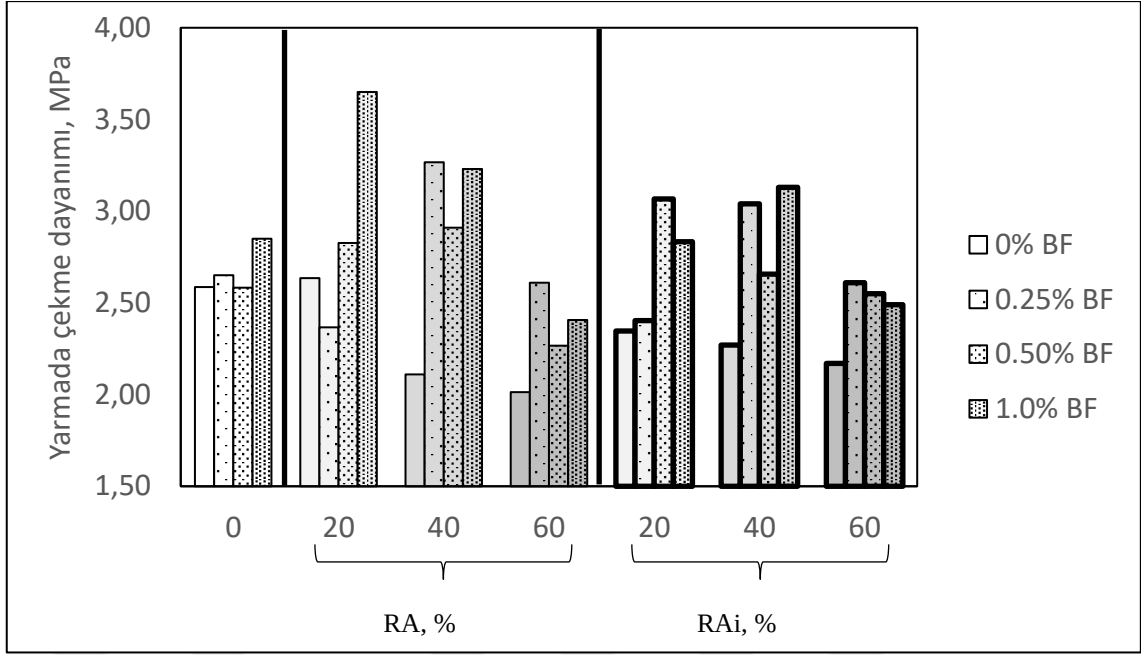
Şekil 4.25 SF ile RA ve RAi içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Bazalt Fiber Kullanımı: BF içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.26'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1B25, R1B50, R1B100 ve R2, R2B25, R2B50, R2B100 ile R12, R12B25, R12B50, R12B100 betonlarına ait yarmada çekme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, +1,9, -8,5, +9,3, +41,1 ve -18,4, +26,3, +12,5, +24,9 ile -22,2, +0,9, -12,4, -7,0 değişim göstermiştir. Artan oranda RA kullanımı söz konusu dayanımları düşürse de BF kullanımı ile yarmada çekme dayanımı değerleri artmıştır. %20 RA içeren serilerde %1,0 BF, %40-60 RA içeren serilerde %0,25 BF en yüksek sonuçlara neden olmuştur. Ayrıca, en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri R1B100 betonunda 3,65 MPa olarak belirlenmiştir.

Diğer yönden, R1i, R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R2i, R2iB25, R2iB50, R2iB100 ile R12i, R12iB25, R12iB50, R12iB100 betonlarına ait yarmada çekme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden -9,3, -7,1, +18,6, +9,5 ve -12,2, -8,5, -6,7, -3,2 ile -16,1, +0,9, -1,4, -3,7 değişim göstermiştir. RAI kullanım oranı betonda artarken yarmada çekme dayanımları düşse de BF kullanımı ile yarmada çekme dayanımı artmıştır. %20 RAI içeren serilerde %0,50 BF, %40 RAI içeren serilerde %1,0 BF ve %60 RAI içeren serilerde %0,25 en iyi sonuçları vermiştir. Ayrıca, en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri R2iB100 betonunda 3,13 MPa olarak bulunmuştur.

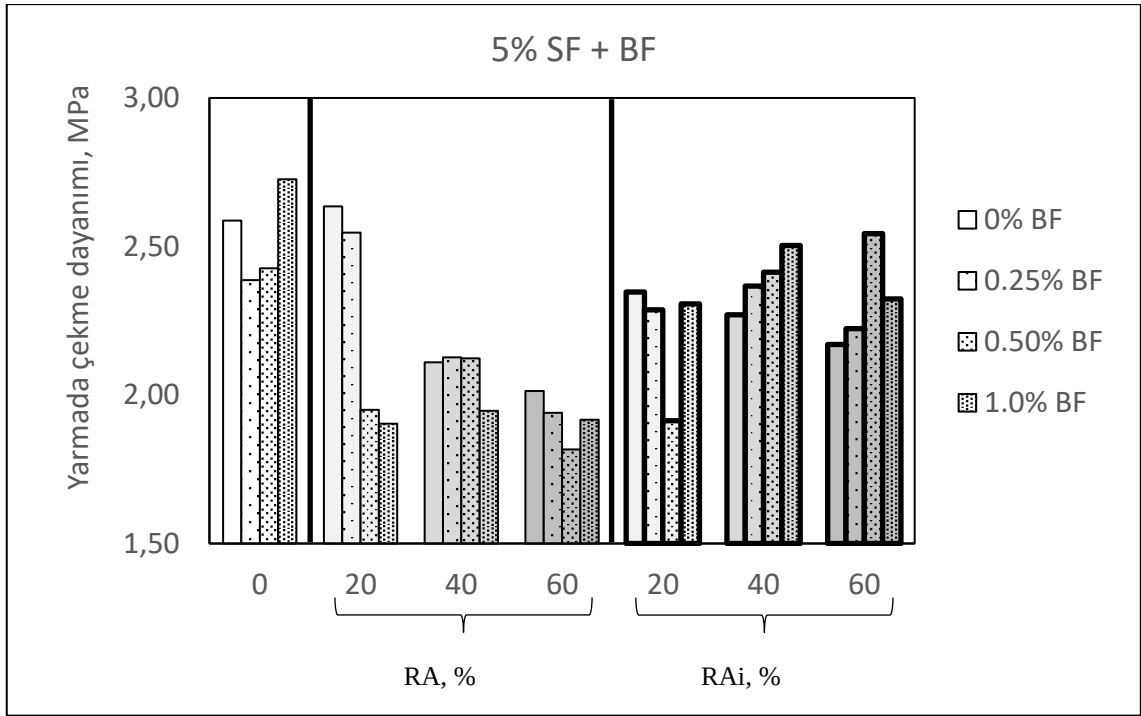
RA ve RAI içeren betonlara ait sonuçlar karşılaştırıldığında, BF ile %20-40 geri kazanılmış agrega kullanım oranlarında genellikle RA içeren betonların daha yüksek dayanımlara sahip olduğu ve %60 geri kazanılmış agrega kullanım oranlarında ise genellikle RAI içeren betonların daha yüksek dayanımlara sahip olduğu görülmektedir.

Beton matrisinde dağılmış halde bulunan fiberlerin dış yük etkisi altında çatlak oluşumu öncesinde etkin rol alarak matriste yük dağılımını sağladığı, çimento matrisini güçlendirdiği ve çatlak oluşmuş bölgelerde yük aktarımı (köprüleme) sağladığı bilinmektedir [28], [69], [70]. BF'nin betona söz konusu olumlu etkisinin yarmada çekme dayanımı sonuçlarına yansıdığı söylenebilir.

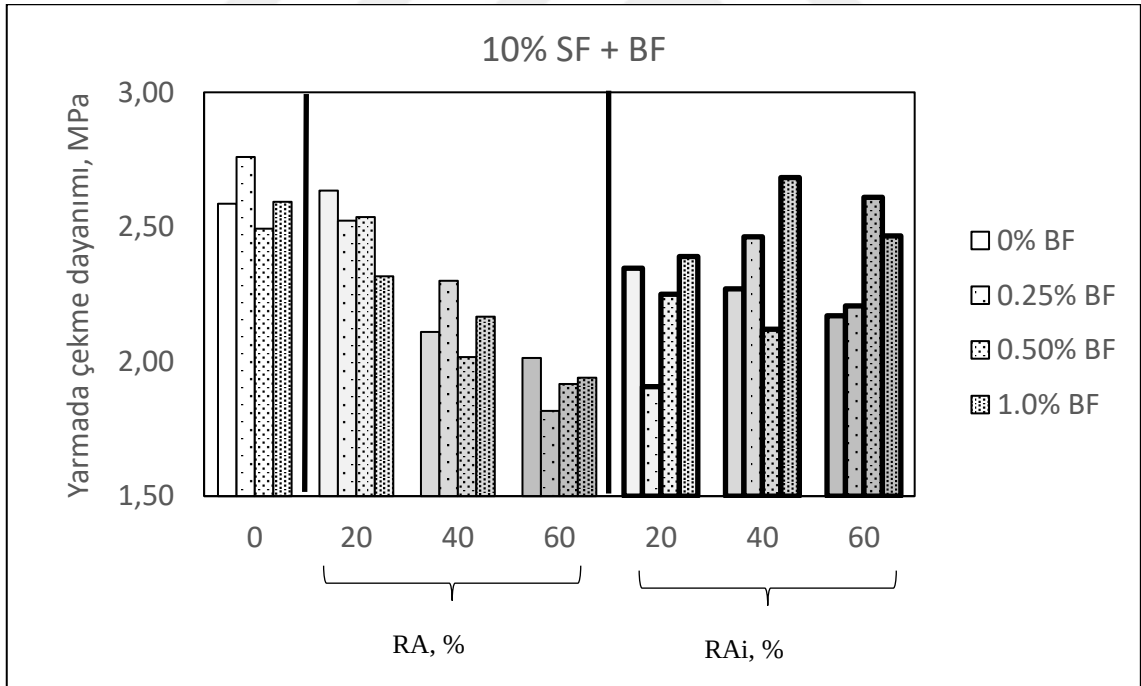


Şekil 4.26 BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Silis Dumanı ve Bazalt Fiberin Birlikte Kullanım Durumu: SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde (Şekil 4.27-4.28), artan oranda RA kullanımı sonucu yarmada çekme dayanımı değerlerinin azalması yanında, SF+BF içeriğinin de RA içeren betonların yarmada çekme dayanımı değerlerini azalttığı görülmektedir. Diğer yönden, artan oranda RAI kullanımı sonucu yarmada çekme dayanımı değerleri azalsa da SF+BF kullanımı sonucu genellikle RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. En belirgin artış %5SF+BF içeren geri kazanılmış agregalı betonlarda R12iS5B50 betonunda (2,54 MPa) ve %10SF+BF içeren geri kazanılmış agregalı betonlarda R2iS10B100 betonunda (2,68 MPa) belirlenmiştir. Kontrol betonu yarmada çekme dayanımı değeri ise 2,59 MPa şeklindedir.



Şekil 4.27 %5SF+BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.28 %10 SF+BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri

Sonuçların Değerlendirilmesi: Betonlarda SF, BF, SF+BF ile oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF iyileştirme yöntemleri kombinasyon kullanımının, herbir RA ve RAi kullanım oranındaki betonda yarmada çekme dayanımı üzerine etkinlikleri incelendiğinde:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +6,8, +16,6 ile -10,2, +7,3, +38,5 ve -3,4, -26,0, -27,8, -4,2, -3,7, -12,1 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +38,4, +50,1 ile +54,8, +37,9, +53,1 ve +0,8, +0,6, -7,7, +9,0, -4,4, +2,7 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +28,3, +25,2 ile +29,6, +12,6, +19,5 ve -3,6, -9,8, -4,8, -4,1, -4,8, -3,6 değişmiştir.

RA içeren beton serilerinde, tüm yer değiştirme oranları için, SF ve BF kullanımı ile yarmada çekme dayanımı değerleri artmış (R1B25 hariç) ve en yüksek dayanım değerleri BF içeren serilerde tespit edilmiştir (%20RA için R1B100, %40RA için R1B25, %60RA için R12B25). SF+BF kullanımı %20 ve %60 RA kullanım durumunda dayanımları düşürürken %40 RA kullanım durumunda dayanım oranlarını dalgalandırmıştır (artırıp azaltmıştır).

RAi içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 RAi kullanımı durumunda R1i, R1iS5, R1iS10 ile R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R1iS5B25, R1iS5B50, R1iS5B100, R1iS10B25, R1iS10B50, R1iS10B100 için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R1

betonuna kıyasla % cinsinden -10,9, +14,2, +10,6 ile -8,8, +16,4, +7,5 ve -13,2, -27,4, -12,5, -27,6, -14,6, -9,3 değişmiş, SF ve BF kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırırken SF+BF kullanımı dayanımları azaltmıştır.

- Karışımlarda %40 R_{Ai} kullanımı durumunda R_{2i}, R_{2iS5}, R_{2iS10} ile R_{2iB25}, R_{2iB50}, R_{2iB100} ve R_{2iS5B25}, R_{2iS5B50}, R_{2iS5B100}, R_{2iS10B25}, R_{2iS10B50}, R_{2iS10B100} için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R₂ betonuna kıyasla % cinsinden +7,6, +27,5, +86,7 ile +44,1, +25,9, +48,3 ve +12,2, +14,4, +18,6, +16,7, +0,5, +27,2 değişmiş, SF, BF ve SF+BF kullanımı dayanımları artırırken en belirgin dayanım artışı %10 SF içeren seride gözlenmiştir.
- Karışımlarda %60 R_{Ai} kullanımı durumunda R_{12i}, R_{12iS5}, R_{12iS10} ile R_{12iB25}, R_{12iB50}, R_{12iB100} ve R_{12iS5B25}, R_{12iS5B50}, R_{12iS5B100}, R_{12iS10B25}, R_{12iS10B50}, R_{12iS10B100} için betonda yarmada çekme dayanımı değerleri R₁₂ betonuna kıyasla % cinsinden +7,8, +28,6, +71,0 ile +29,6, +26,7, +23,7 ve +10,4, +26,3, +15,4, +9,6, +29,6, +22,5 değişmiştir. SF, BF ve SF+BF kullanımı dayanımları artırırken en belirgin dayanım artışı %10 SF içeren seride gözlenmiştir.

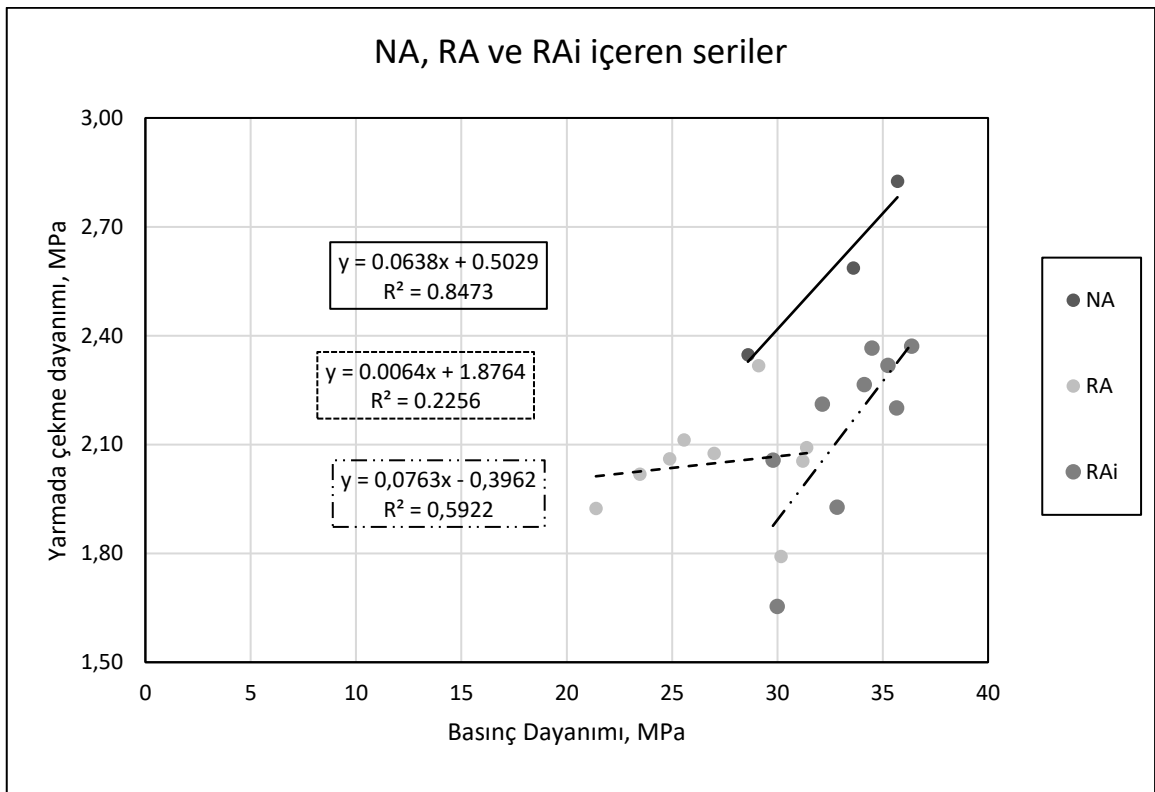
oBMM ile SF, BF ve SF+BF kullanımı dayanım değerlerini artırmış ve yarmada çekme dayanımı-RA ve yarmada çekme dayanımı-RA_i değişim trendlerini; RA içeren betonlarda en olumlu şekilde BF etkilerken, RA_i içeren betonlarda SF en olumlu şekilde etkilemiştir.

4.4.3 Yarmada Çekme Dayanımı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

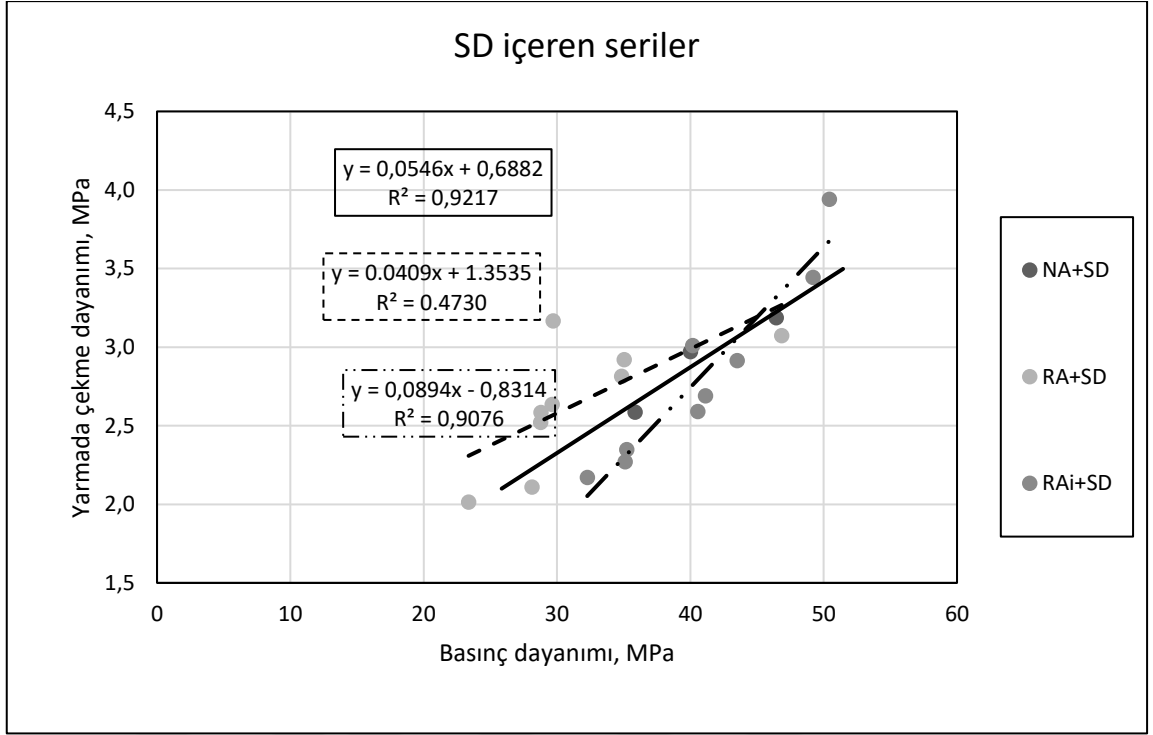
NA, RA ve RA_i içeren betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.29-4.32’te verilmektedir. NA içeren betonların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı doğrusal ilişkisi, RA içeren betonlarda gözlemlenememiş ve RA için daha düşük korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Betonda RA kullanımı sonucu yarmada çekme dayanımı değerleri ile basınç dayanımı değerleri aynı oranda etkilenmediği için dayanımlar arasındaki lineer ilişkinin bozulduğu söylenebilir. Doğal agregaya nispeten RA’nın NA’dan farklı olarak AOM içermesinin burada etkili olduğu düşünülmektedir. AOM içeriği oBMM ile azaltılmış RA_i içeren

betonlarda söz konusu ilişki RA içeren betonlara kıyasla daha yüksek korelasyon katsayısı ile belirlenmiştir. Belirlenen katsayının değeri NA içeren betonlara yakındır.

NA, RA ve RAI içeren betonların korelasyon katsayıları sırasıyla 0,8473, 0,2256 ve 0,5922 olarak hesaplanmış ve SF ile NA, RA ve RAI içeren betonlarda ise bu değerler katsayıları sırasıyla 0,9217, 0,4730 ve 0,9076 olarak hesaplanmıştır. SF katkılı ve katkısız betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki lineer ilişki benzerlik göstermektedir ve RA içeren betonların korelasyon katsayısı SF kullanımı ile 0,2256'den 0,4730'a yükselmiştir.

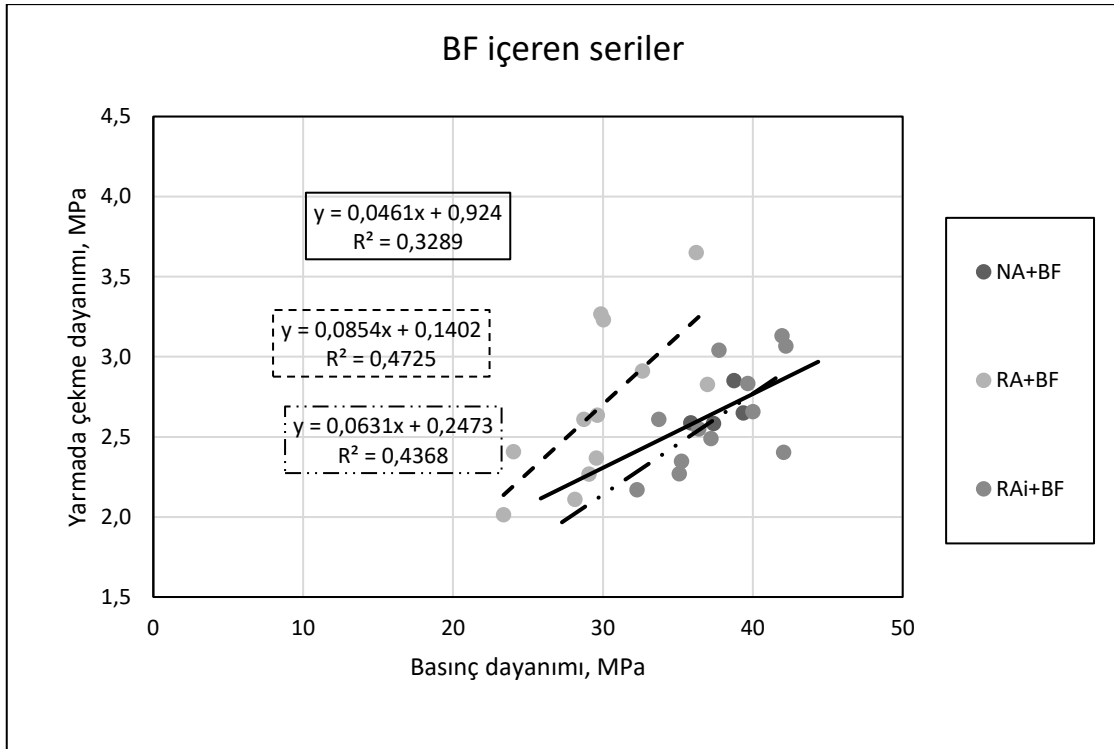


Şekil 4.29 NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

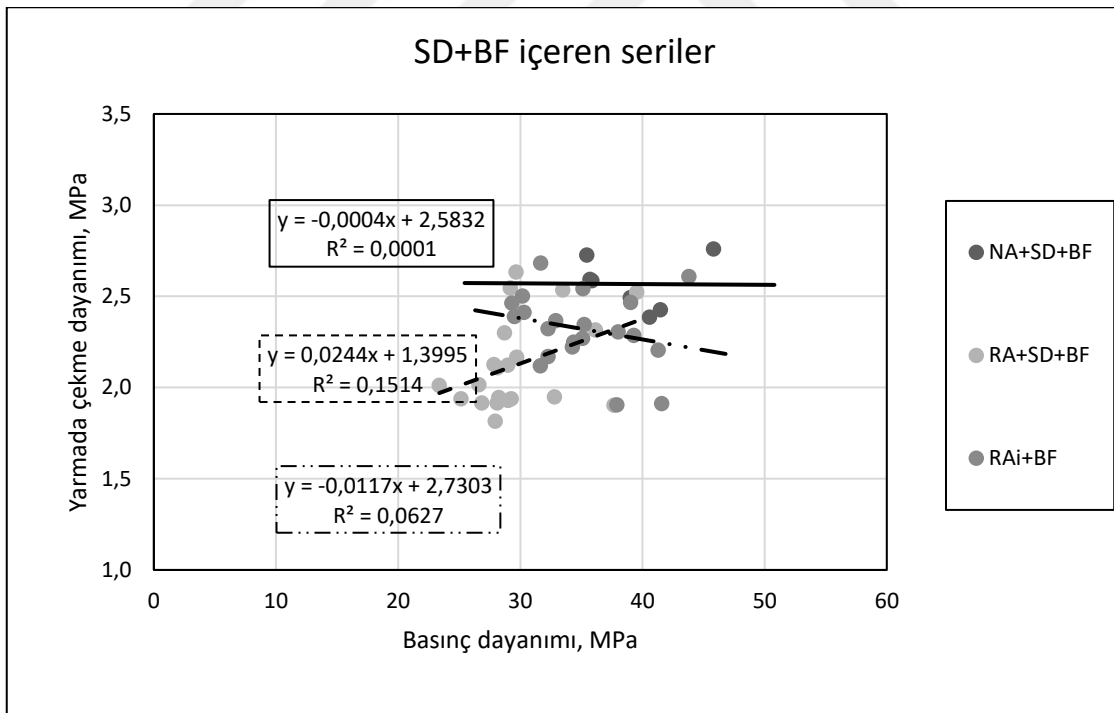


Şekil 4.30 SF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

Diğer yönden, BF ve SF+BF içeren betonların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4.31-4.32), BF ile NA, RAI ve RA içeren betonlar için sırasıyla korelasyon katsayıları 0,3289, 0,4368 ve 0,4725 olarak belirlenirken, SF+BF içeren betonlar için korelasyon katsayıları sırasıyla 0,9022, 0,1505 ve 0,1621 olarak belirlenmiştir. BF kullanımı sonucu NA içeren betonların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı arasındaki doğrusal ilişki bozulmuştur. Ayrıca, BF ve SF+BF kullanımı sonucu betonlarda basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki geri kazanılmış agregalı betonlarda da bozulmuştur.



Şekil 4.31 BF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 4.32 SF+BF ile NA, RA ve RAI içeren betonların yarmada çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

4.4.3.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

Doğal agregata içeren betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasında yüksek korelasyon katsayılı lineer bir ilişki olduğu bilinmektedir. Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki lineer ilişki için belirlenen korelasyon katsayısı, betonlarda kullanılan farklı tip agregalar (NA, RA ve RAI) sonucu etkilenmiştir. Agregalar arasındaki en önemli fark ise, bünyelerinde taşıdıkları AOM miktarlarıdır ve söz konusu ilişki üzerinde bu durum daha çok etkili olmuştur. Betonda RA kullanımı, yarmada çekme dayanımlarına ve basınç dayanımlarına farklı oranlarda etki ettiği için dayanımlar arasındaki bilinen lineer ilişki bozulmuştur [32], [38]. Diğer yönden, oBMM kullanılarak RA'daki AOM'nin büyük çoğunluğunun giderilmesi sonucu, malzeme boyutunda RAI'da önemli davranış değişimi gözlemlenmiş ve bu etki basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisinde de etki etmiştir.

Tablo 4.9'dan görüleceği üzere, RAI içeren betonların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisini gösteren korelasyon katsayısı NA içeren betonlarınkine yakın olarak tespit edilmiştir. Diğer yönden, SF kullanımı ile tüm betonların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı lineer ilişkisi için hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri katkısız duruma göre artmıştır. Fakat, katkısız duruma göre, BF kullanımı ile NA ve RAI içeren betonların basınç-yarmada çekme dayanımı lineer ilişkisi için hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri azalırken, RA içeren betonların korelasyon katsayısı değeri artmıştır. Ayrıca, SF+BF kullanımı RA ve RAI içeren betonların basınç-yarmada çekme dayanımı lineer ilişkisini bozmuş ve korelasyon katsayısı değerlerini azalmıştır.

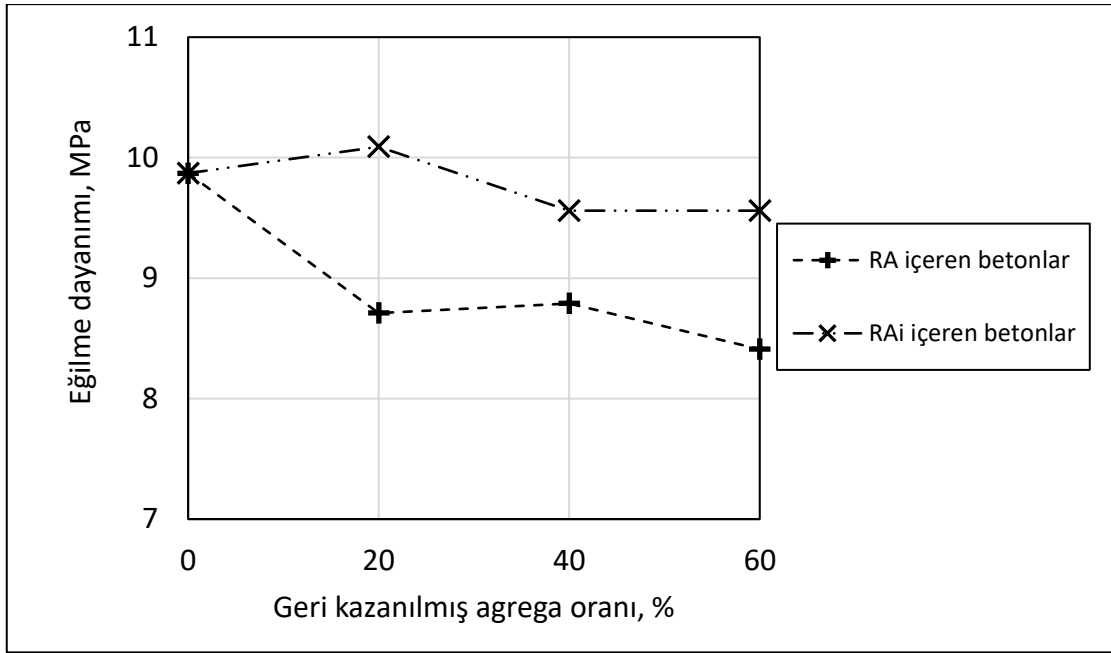
Tablo 4.9 Betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki doğrusal ilişkiler

İçerik	Agrega içeriği		
	NA	RA	RAi
Katkısız	$y = 0,0638x + 0,5029$ $R^2 = 0,8473$	$y = 0,0064x + 1,8764$ $R^2 = 0,2256$	$y = 0,0763x - 0,3962$ $R^2 = 0,5922$
SF	$y = 0,0546x + 0,6882$ $R^2 = 0,9217$	$y = 0,0409x + 1,3535$ $R^2 = 0,4730$	$y = 0,0894x - 0,8314$ $R^2 = 0,9076$
BF	$y = 0,0461x + 0,924$ $R^2 = 0,3289$	$y = 0,0854x + 0,1402$ $R^2 = 0,4725$	$y = 0,0631x + 0,2473$ $R^2 = 0,4368$
SF + BF	$y = 0,0108x^2 - 0,8664x + 19,838$ $R^2 = 0,9022$	$y = -0,0014x^2 + 0,1115x + 0,042$ $R^2 = 0,1621$	$y = 0,0034x^2 - 0,2588x + 7,1131$ $R^2 = 0,1505$
x: basınç dayanımı (MPa) ve y: yarmada çekme dayanımı (MPa)			

4.4.4 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.4.4.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agreganın Kullanımı

Betonlara ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.33'te verilmektedir. Eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i betonlarına ait eğilme dayanımı değerleri kontrol betonuna kıyasla % cinsinden sırasıyla -11,8, -10,9, -14,8 ve +2,2, -3,1, -3,1 değiştiği gözlenmiştir ve NA'nın RA ile ve RAi ile yer değiştirilmesiyle eğilme dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Oluşan düşüş eğilimleri incelendiğinde, artan oranda RAi kullanımı durumunda eğilme dayanımı düşüş eğilimi RA'ya göre daha kısıtlı olarak oluşmuştur.



Şekil 4.33 RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri

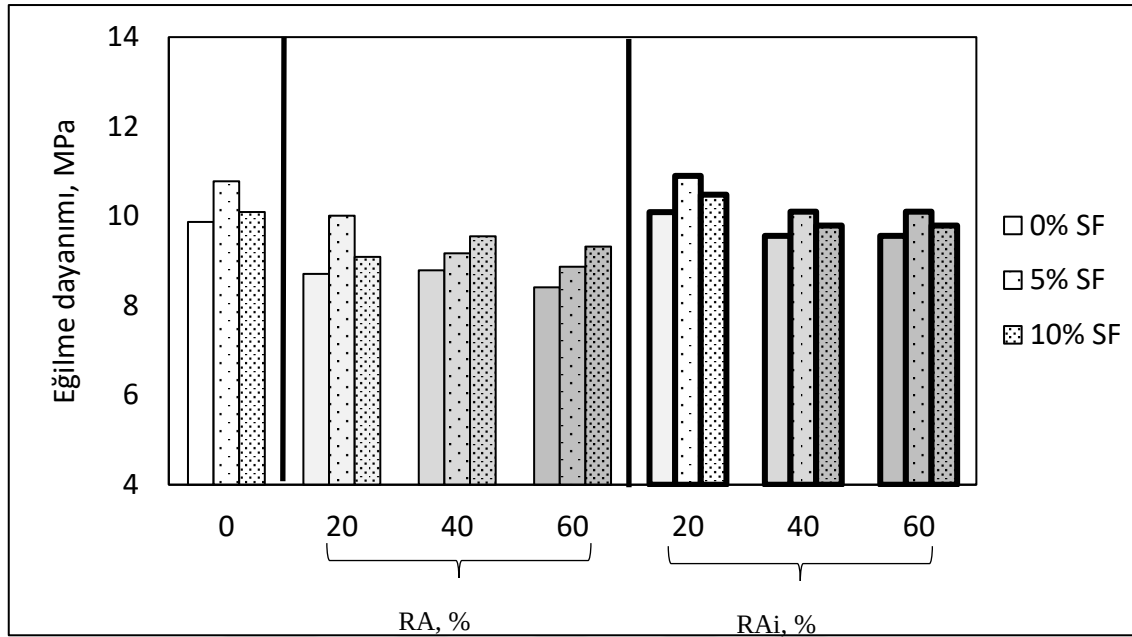
4.4.4.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.34'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1S5, R1S10 ve R2, R2S5, R2S10 ile R12, R12S5, R12S10 betonlarına ait eğilme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, -11,8, +1,4, -7,9 ve -10,9, -7,1, -3,2 ile -14,8, -10,1, -5,6 değişim göstermiştir. Artan oranda RA kullanımı, eğilme dayanımlarını düşürse de SF kullanımı ile eğilme dayanımı değerlerinde artışlar gözlemlenmiş ve %5 SF'ye kıyasla %10 SF kullanımı sonuçları daha fazla artırmıştır (R1S10 hariç). Ayrıca, en yüksek eğilme dayanımı değeri R1S5 betonunda belirlenmiştir.

RAi içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, R1i, R1iS5, R1iS10 ve R2i, R2iS5, R2iS10 ile R12i, R12iS5, R12iS10 betonlarına ait eğilme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, +2,2, +10,4, +6,2 ve -3,1, +2,3, -0,8 ile -3,1, +2,3, -0,8 değişim göstermiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, eğilme dayanımı değerleri SF katkısı ile artmış ve en iyi sonuçlar %5 SF içeren betonlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, en yüksek dayanım değeri R1iS5 içeren seride belirlenmiştir.

RA ve RAI içeren betonlara ait sonuçlar karşılaştırıldığında, en iyi sonuçlar %5 SF ile %20 RA ve RAI içeren serilerde tespit edilmiştir. SF ile RAI içeren betonların eğilme dayanımı değerleri, SF ile RA içeren betonlardan daha yüksek olarak elde edilmiştir.

SF'nın ince tanecik yapısıyla matris boşluklarını doldurması ve SF'nın serbest haldeki kalsiyum hidroksilleri bağlayarak ek C-S-H jeli oluşturmalarının [63], [64] dayanım artışlarında etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.34 SF ile RA ve RAi içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri

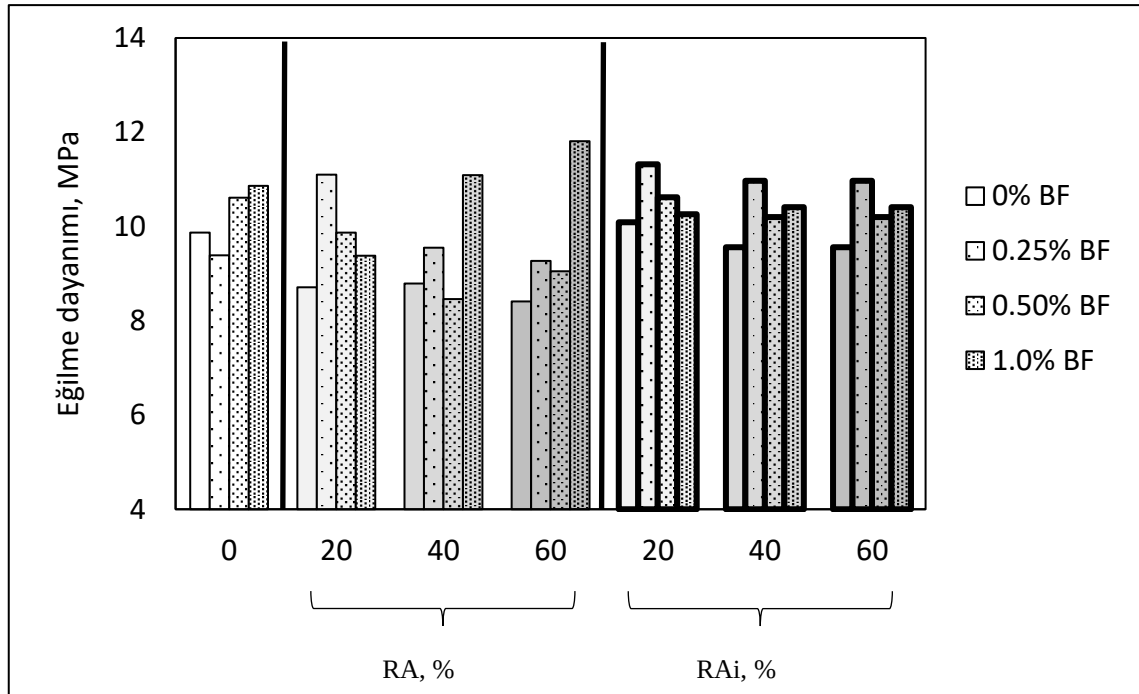
4.4.4.3 Bazalt Fiber Kullanımı

BF içeren betonlara ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.35'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1B25, R1B50, R1B100 ve R2, R2B25, R2B50, R2B100 ile R12, R12B25, R12B50, R12B100 betonlarına ait eğilme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, -11,8, +12,5, 0,0, -5,0 ve -10,9, -3,2, -14,3, +12,4 ile -14,8, -6,1, -8,3, +19,7 değişim göstermiştir. Artan oranda RA kullanımı dayanımları düşürse de BF kullanımı ile eğilme dayanımı değerleri artmıştır. %20 RA içeren serilerde %0,25 BF, %40-60 RA içeren serilerde %1,0 BF kullanımı en iyi sonuçları vermiştir. Ayrıca, en yüksek eğilme dayanımı değeri R12B100 betonunda 11,8 MPa olarak bulunmuştur.

Diğer yönden, R1i, R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R2i, R2iB25, R2iB50, R2iB100 ile R12i, R12iB25, R12iB50, R12iB100 betonlarına ait eğilme dayanımı sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, +2,2, +14,7, +7,6, +4,0 ve -3,1, +11,1, +3,3, +5,5 ile -3,1, +11,0, +3,2, +5,6 değişim göstermiştir. RAi kullanım oranı betonda artarken eğilme dayanımları düşse de BF kullanımı ile eğilme dayanımları artmıştır.

%20-40-60 RAI içeren serilerde %0,25 BF kullanımı en yüksek eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, en yüksek eğilme dayanımı değeri R1iB25 betonunda belirlenmiştir.

BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait sonuçlar karşılaştırıldığında, yüksek oranda RA ve BF içeren betonların BF ve RAI içeren betonlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Beton matrisinde dağılmış halde bulunan fiberlerin dış yük etkisi altında çatlak oluşumu öncesinde etkin rol alarak matriste yük dağılımını sağladığı, çimento matrisini güçlendirdiği ve çatlak oluşmuş bölgelerde yük aktarımı (köprüleme) sağladığı bilinmektedir [28], [69], [70]. BF'in söz konusu etki ile eğilme dayanımı değerlerini artırdığı söylenebilir.



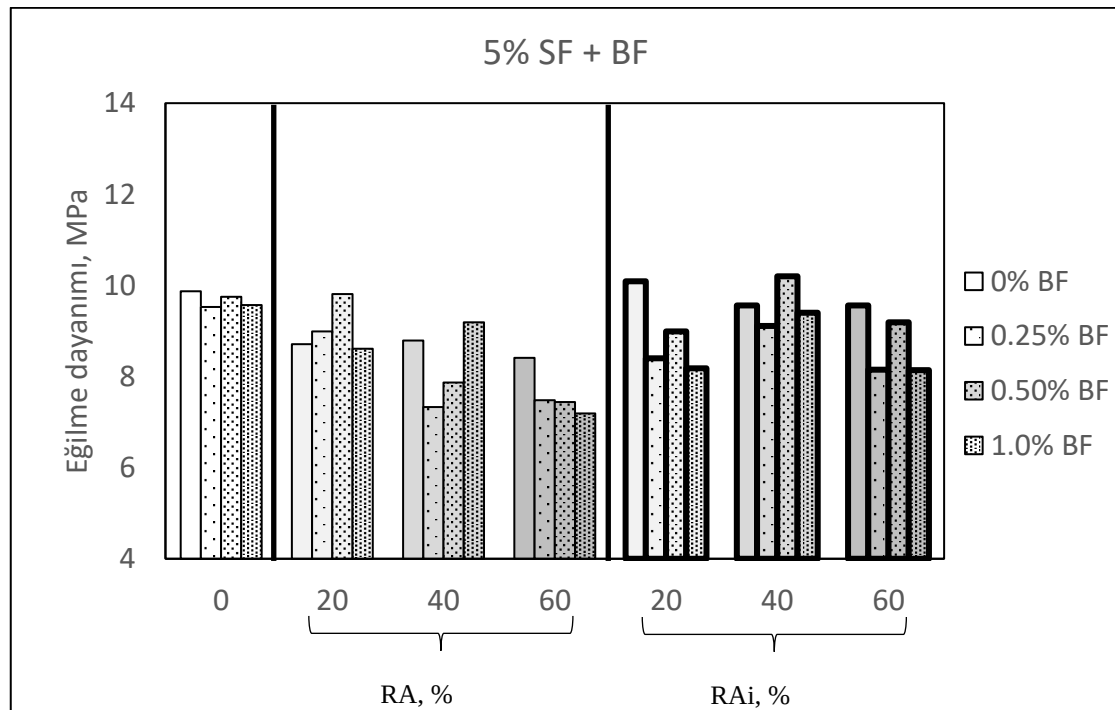
Şekil 4.35 BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri

4.4.4.4 Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı

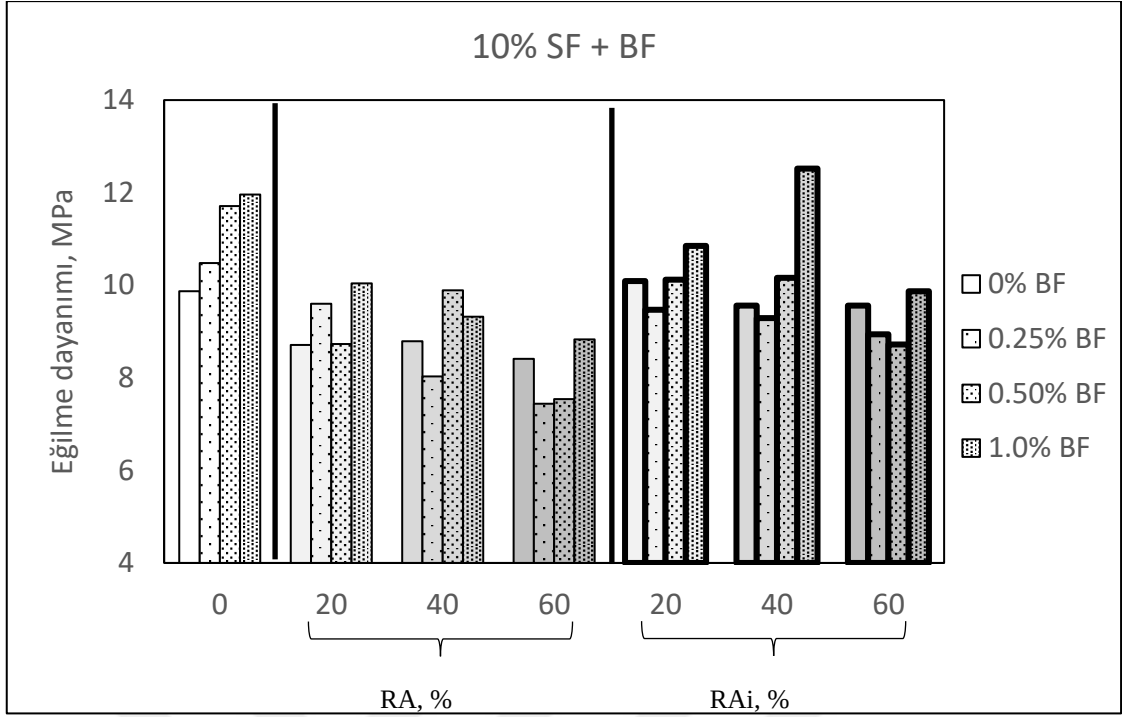
SF+BF içeren betonlara ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.36-4.37'de verilmektedir. %5 SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, %5 SF+BF içeriğinin %20 RA içeren betonların eğilme dayanımı değerlerini artırdığı ve %40-60 RA içeren betonların eğilme dayanımı değerlerini azalttığı görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı %5 SF + %0,50 BF ile %20 RA kullanımı sonucu elde edilmiştir. %10 SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde, %20-40-60 RA

içeren betonların eğilme dayanımlarının %1,0 BF kullanımı durumunda genellikle arttığı belirlenmiştir. Diğer kullanım durumlarında ise genellikle azaltmıştır. %10 SF+BF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde ise, %20-40-60 RAI içeren betonların eğilme dayanımlarının düşük oranlarda BF kullanımı sonucu düştüğü fakat yüksek oranda BF kullanımı sonucu arttığı belirlenmiştir. %10 SF ile %1,0 BF kullanımı en iyi eğilme dayanımı sonuçlarını vermiştir.

RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında, RAI içeren betonların eğilme dayanımlarının RA içeren betonlardan genellikle daha yüksek oldukları görülmektedir.



Şekil 4.36 %5 SF+BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri



Şekil 4.37 %10 SF+BF ile RA ve RAi içeren betonlara ait eğilme dayanımı değerleri

4.4.4.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlarda SF, BF, SF+BF ile oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF iyileştirme yöntemleri kombinasyon kullanımının, her bir RA ve RAi kullanım oranındaki betonda eğilme dayanımı üzerine etkinlikleri incelendiğinde:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +14,9, +4,4 ile +27,4, +13,3, +7,7 ve +3,2, +12,6, -1,1, +10,2, +0,2, +15,3 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +4,3, +8,6 ile +8,6, -3,8, +26,2 ve -16,6, -10,5, +4,6, -8,6, +12,5, +6,0 değişmiş,

- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +5,5, +10,8 ile +10,2, +7,6, +40,4 ve -11,1, -11,5, -14,5, -16,5, -10,3, +5,0 değişmiştir.

RA içeren beton serilerinde, tüm yer değiştirme oranları için, ilgili betona göre kıyasla SF ve BF kullanımı ile eğilme dayanımı oranları artmıştır (R1B50 hariç). En yüksek dayanım oranı değerleri tüm NA ile RA yer değiştirme oranlarında BF içeren serilerde bulunmuştur (%20RA için R1B25, %40RA için R2B100, %60RA için R12B100).

RAi içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 RAi kullanımı durumunda R1i, R1iS5, R1iS10 ile R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R1iS5B25, R1iS5B50, R1iS5B100, R1iS10B25, R1iS10B50, R1iS10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R1 betonuna kıyasla % cinsinden +15,8, +25,1, +20,3 ile +30,0, +21,9, +17,8 ve -3,6, +3,2, -6,1, +8,7, +16,2, +24,6 değişmiş, SF ve BF kullanımı eğilme dayanımlarını artırmıştır.
- Karışımlarda %40 RAi kullanımı durumunda R2i, R2iS5, R2iS10 ile R2iB25, R2iB50, R2iB100 ve R2iS5B25, R2iS5B50, R2iS5B100, R2iS10B25, R2iS10B50, R2iS10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R2 betonuna kıyasla % cinsinden +8,8, +14,9, +11,9 ile +24,8, +16,0, +18,4 ve +3,6, +16,0, +6,9, +5,7, +15,6, +42,4 değişmiş, SF, BF ve SF+BF kullanımı dayanımları artırırken en belirgin dayanım oranı artışı BF içeren serilerde gözlenmiştir.
- Karışımlarda %60 RAi kullanımı durumunda R12i, R12iS5, R12iS10 ile R12iB25, R12iB50, R12iB100 ve R12iS5B25, R12iS5B50, R12iS5B100, R12iS10B25, R12iS10B50, R12iS10B100 için betonda eğilme dayanımı değerleri R12 betonuna kıyasla % cinsinden +13,7, +20,1, +16,4 ile +30,4, +21,3, +23,8 ve -3,1, +9,3, -3,2, +6,3, +3,7, +17,4 değişmiştir. SF, BF ve SF+BF

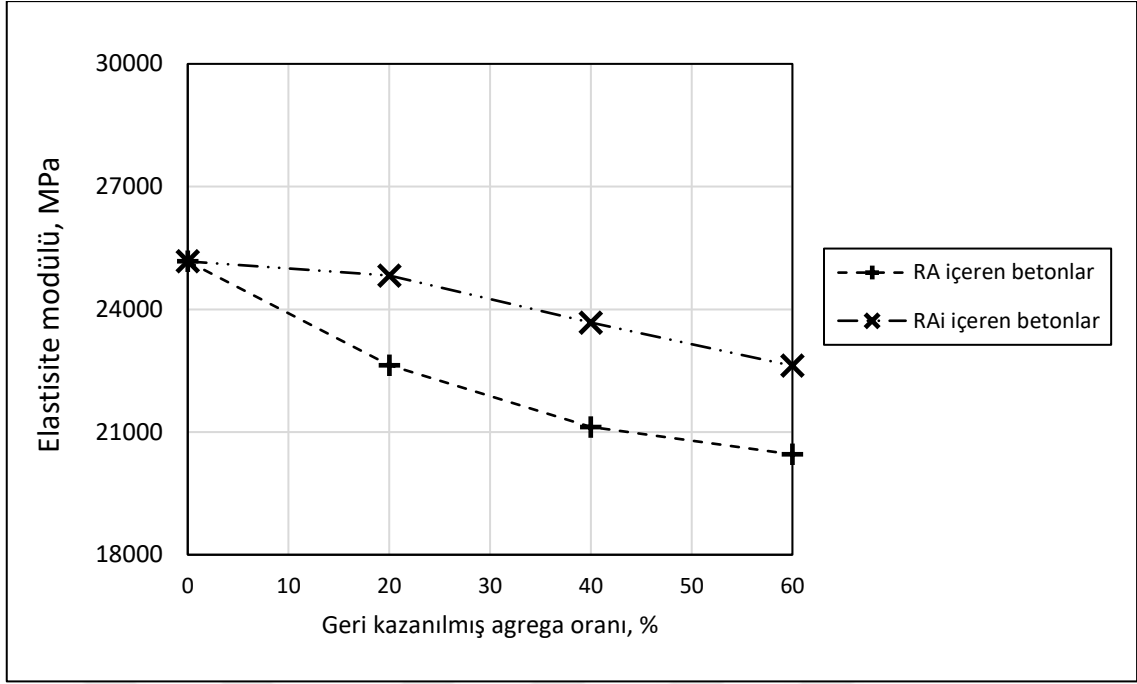
kullanımı dayanım oranlarını artırırken en belirgin dayanım oranı artışı BF içeren seride gözlenmiştir.

oBMM ile SF, BF ve SF+BF kullanımı betonların eğilme dayanımı oranını artırmıştır. Eğilme dayanımı-RA ve eğilme dayanımı-RAi değişim trendlerini en olumlu şekilde BF etkilemiştir.

4.4.5 Statik Elastisite Modülü Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.4.5.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı

Elastisite modülü deney sonuçları Şekil 4.38’de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i betonlarına ait elastisite modülü değerlerinin kontrol betonuna göre sırasıyla %10,1, %16,1, %18,1 ve %1,4, %5,9, %10,1 azaldığı görülmektedir. Beton karışımlarında RA ve RAI kullanımı sonucu elastisite modülü değerleri azalmış ve artan oranda RA ve RAI kullanımı sonucu elastisite modülü düşüşü hızlanmıştır. RA ile RAI’nin beton elastisite modülü değerlerine etkileri karşılaştırıldığında, RAI içeren betonların elastisite modülü değerlerinin RA içeren betonların elastisite modülü değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elastisite modülü, agrega-matris ara yüzeyinin (ITZ) kalitesi ile doğrudan ilintili bir parametredir [32], [42], [63] ve beton bileşenlerinin elastisite modülleri beton elastisite modülünü doğrudan etkilemektedir [71]. Beton içeriklerinin kalitesi bakımından beton elastisite modülü parametresi değerlendirildiğinde NA RA’ya kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahiptir (örneğin, Los Angeles aşınma direnci). Bu nedenle, NA içeren beton serileri, RA içeren beton serilerinden hem basınç dayanımı hem de elastisite modülü değerleri bakımından daha iyi mekanik performansa sahip olmaktadır. Diğer yönden, RA bünyesinde iki fazlı bir yapı bulundurmaktadır: 1) AOM 2) Eski NA [20], [21]. Bu iki faz arasında da zayıf eski bir ITZ bölgesi bulunmaktadır ve RA içeren betonların mekanik performanslarının düşük olmasının bir etkisi AOM’dan ileri gelirken bir etkisi de eski ITZ ileri gelmektedir [72]. Yeni çimento pastası ile RA arasında oluşan yeni ITZ, görecel olarak eski ITZ’den daha iyi özelliklere sahiptir [73], [74]. RAI içeren betonlarda RA içeren betonlara kıyasla daha az miktarda AOM bulunacağı için, elastisite modülü değerlerinin RAI içeren betonlarda daha yüksek çıkması doğaldır.



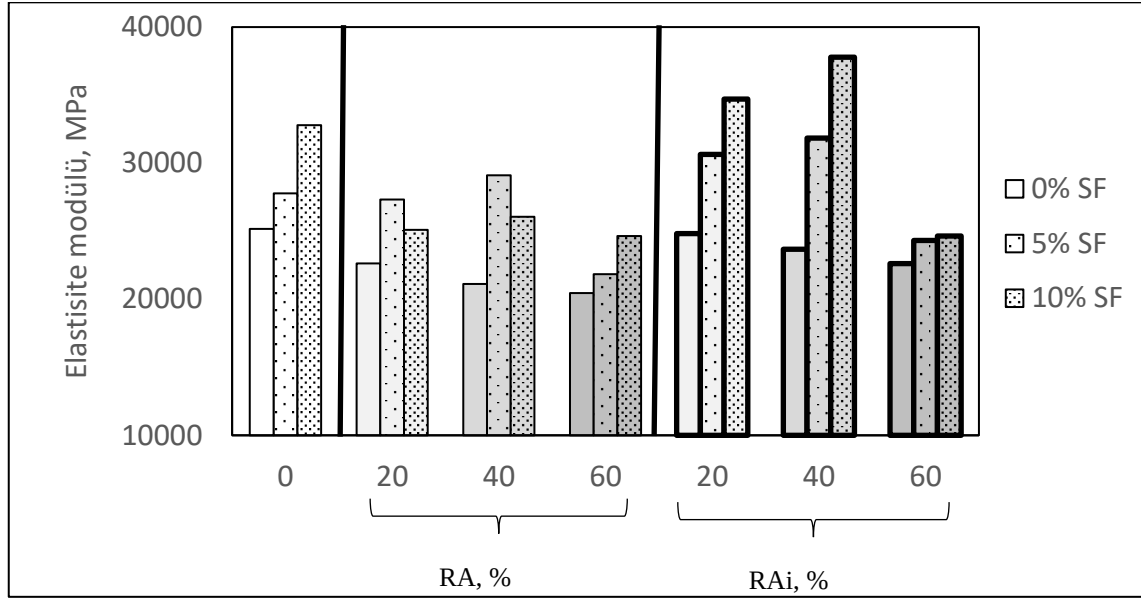
Şekil 4.38 RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri

4.4.5.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait elastisite modülü sonuçları Şekil 4.39’da verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1S5, R1S10 ve R2, R2S5, R2S10 ile R12, R12S5, R12S10 betonlarına ait elastisite modülü değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %-10,1, %+8,6, %-0,3 ve %-16,1, %+15,6, %+3,5 ile %-18,7, %-13,2, %-2,1 değişim göstermiştir. Artan oranda RA içeriği betonlarda elastisite modülü değerlerini düşürse de artan oranda SF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmıştır (R12S10 hariç). En yüksek elastisite modülü değeri R2S5 betonunda 29108 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %20-40 RA kullanımı için en yüksek elastisite modülü değerleri %5 SF içeren serilerde bulunmakta iken %60 RA kullanımı için %10 SF içeren seride bulunmaktadır.

Diğer yönden, R1i, R1iS5, R1iS10 ve R2i, R2iS5, R2iS10 ile R12i, R12iS5, R12iS10 betonlarına ait elastisite modülü değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %-1,4, %+21,7, %+37,9 ve %-5,9, %+26,5, %+50,1 ile %-10,1, %-3,4, %-2,1 değişim göstermiştir. Artan oranda RAI içeriği betonlarda elastisite modülü değerlerini düşürse de artan oranda SF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmıştır. En büyük elastisite modülü değeri, R2iS10 betonunda 37787 MPa olarak bulunmuştur.

Ayrıca, SF ile RA ve RAI içeren betonların elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında, RAI içeren betonların elastisite modülü değerlerinin daha yüksek olduğu, oluşan iyileşmede BMM'in etkisinin yanı sıra SF'nin puzolanik etkisinin de olduğu söylenebilir [32].



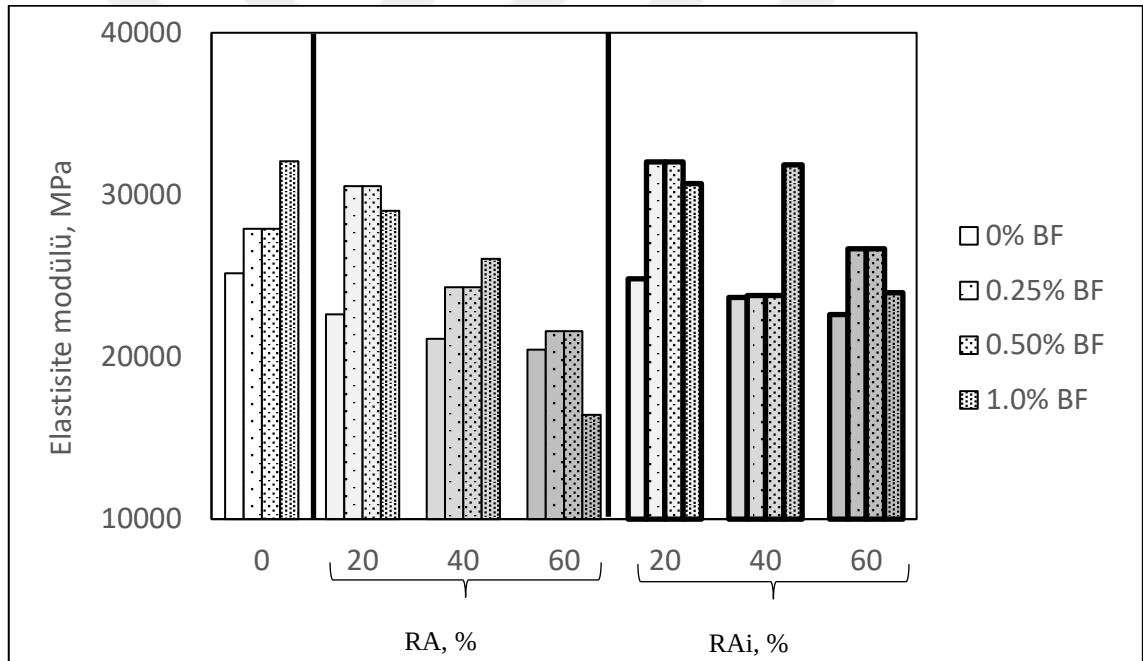
Şekil 4.39 SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri

4.4.5.3 Bazalt Fiber Kullanımı

BF içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri Şekil 4.40'ta verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R1, R1B25, R1B50, R1B100 ve R2, R2B25, R2B50, R2B100 ile R12, R12B25, R12B50, R12B100 betonlarına ait elastisite modülü değerleri kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, -10,1, +12,3, +21,3, +15,3 ve -16,1, +1,7, -3,4, +3,5 ile -18,7, -5,6, -14,2, -34,7 değişim göstermiştir. Artan oranda RA içeriği sonuçları düşürmüş ve BF farklı RA kullanım oranlarında farklı etkiler oluşturmuştur. %20 RA ile %0,50'ye kadar BF kullanımının elastisite modülü değerlerini artırdığı ve %0,50 üzeri kullanımda düşürdüğü, %40-60 RA ile %0,25'e kadar BF kullanımının genellikle elastisite modüllerini artırdığı ve %0,25 üzeri kullanımda düşürdüğü belirlenmiştir (R2B100 hariç). Diğer yönden, R1i, R1iB25, R1iB50, R1iB100 ve R2i, R2iB25, R2iB50, R2iB100 ile R12i, R12iB25, R12iB50, R12iB100 betonlarına ait elastisite modülü sonuçları kontrol betonuna kıyasla % cinsinden, -1,4, +19,4, +27,3, +22,0 ve -5,9, +14,4, -5,5, +26,6 ile -10,1, +19,0, +6,0, -4,8 değişim göstermiştir. %20 RAI ile %0,50'ye kadar BF kullanımının elastisite

modüllerini artırdığı ve %0,50 sonrasında düşürdüğü, %40-60 R_{Ai} ile %0,25'e kadar BF kullanımının elastisite modüllerini artırdığı ve %0,25 üzeri kullanımda (R_{2i}B100 hariç) düşürdüğü belirlenmiştir. Diğer yönden, en yüksek elastisite modülü değerleri, RA içeren serilerde R1B50 serisinde 30540 MPa olarak ve R_{Ai} içeren serilerde R1iB50 serisinde 32034 MPa olarak elde edilmiştir.

BF, mekanik özellikleri yüksek, yüksek çekme dayanımlı ve yüksek elastisite modüllü bir malzemedir ve betonların dayanım değerlerini artırırken elastisite modülü değerlerini artırmıştır [69]. NA'ya göre daha düşük mekanik özelliklere sahip RA ve R_{Ai} ise betonda kullanımı sonucu elastisite modülü değerleri azalmıştır [19]. Ayrıca, BF ile RA ve R_{Ai} içeren betonların elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında, R_{Ai} içeren betonların elastisite modülü değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40 BF ile RA ve R_{Ai} içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri

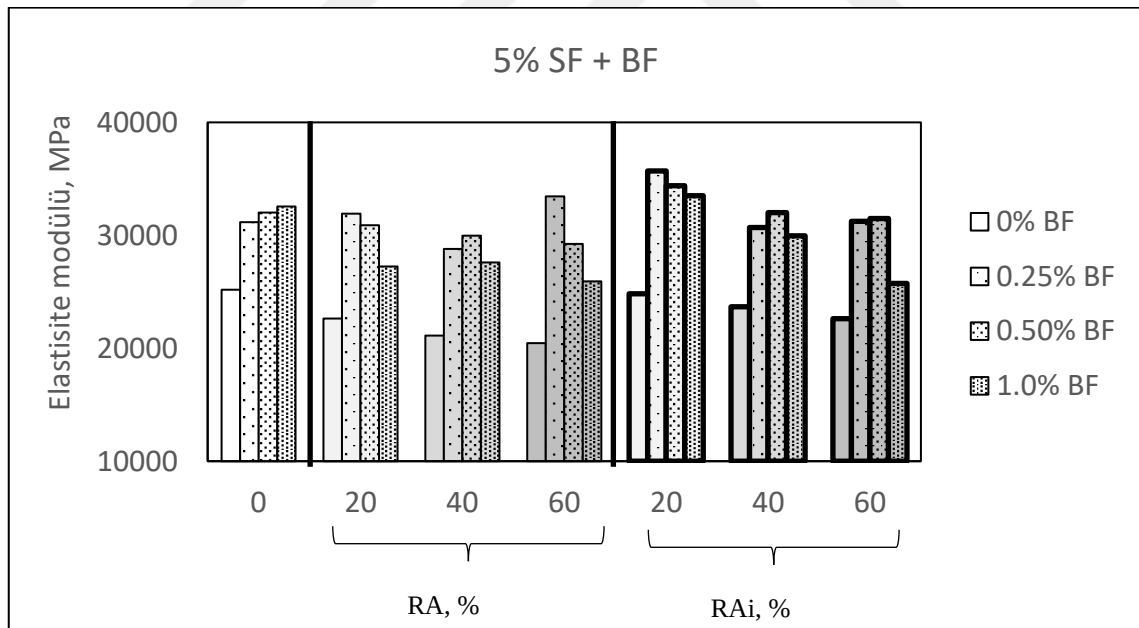
4.4.5.4 Silis Dumanı ile Bazalt Fiberin Birlikte Kullanımı

SF+BF içeren betonlara ait elastisite modülü sonuçları Şekil 4.41-4.42'de verilmektedir. %5 SF ile BF içeren betonlara ait elastisite modülü sonuçları incelendiğinde, %20 ve %60 RA içeren beton serilerinde %0,25 BF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmış ve %0,25 üzeri kullanımda BF elastisite

modülü değerlerini düşürmüştür. %40 RA içeren beton serilerinde %0,50'ye kadar BF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmış ve %0,50 üzeri kullanımda BF elastisite modülü değerlerini düşürmüştür.

Diğer yönden, %20 RAI içeren beton serilerinde %0,25 BF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmış ve %0,25 üzeri kullanımda BF elastisite modülü değerlerini düşürmüştür. %40-60 RAI içeren beton serilerinde %0,50'ye kadar BF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmış ve %0,50 üzeri kullanımda BF elastisite modülü değerlerini düşürmüştür.

%5 SF ile BF içeren RA ve RAI içeren betonların elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında, RAI içeren betonların elastisite modülü değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, R12S5B100 ve R12iS5B100 serilerine ait elastisite modülü değerleri sırasıyla 27241 MPa ve 33506 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %5 SF ile BF içeren betonlarda en yüksek elastisite modülü değerleri RA içeren serilerde R12S5B25 serisinde 33449 MPa olarak ve RAI içeren serilerde R1iS5B25 serisinde 35698 MPa olarak elde edilmiştir.

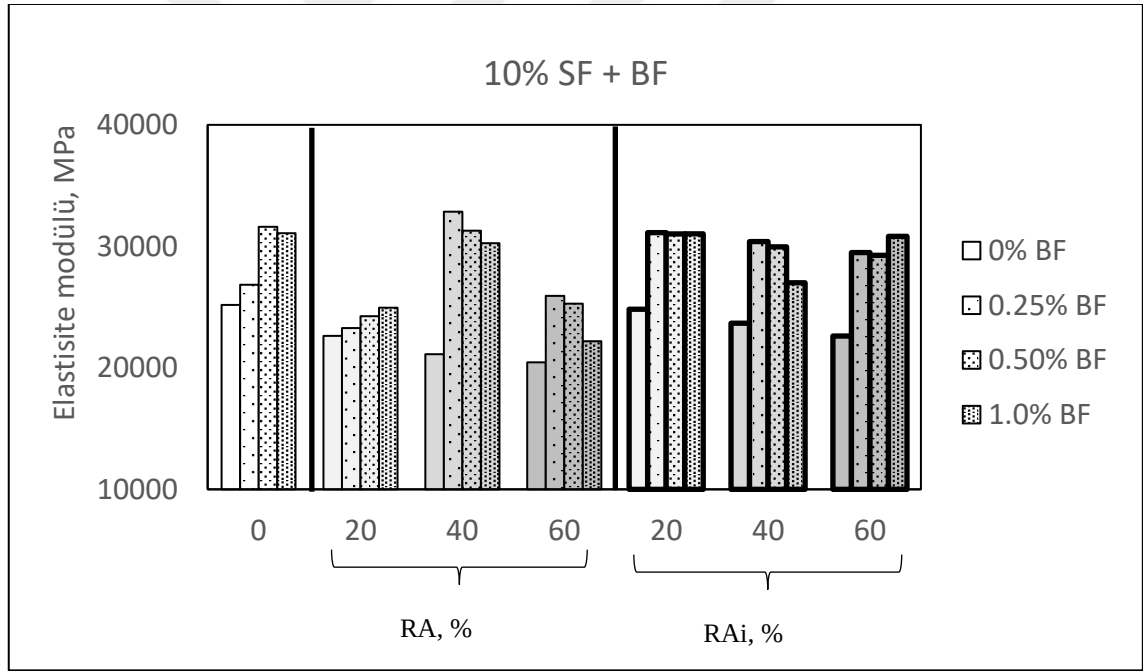


Şekil 4.41 %5 SF ve BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri

%10 SF ile BF içeren betonlara ait elastisite modülü sonuçları incelendiğinde, %20 RA kullanımı durumunda artan BF oranı ile elastisite modülü değerlerinin arttığı,

%40-60 RA ile %0,25'e kadar BF kullanımı durumunda elastisite modülü değerlerinin arttığı ve %0,25 üzeri BF kullanımında elastisite modülü değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Diğer yönden, %20 ve %60 RAI içeren betonlarda elastisite modülü değerleri artan oranlarda BF kullanımı sonucu arttığı tespit edilmiş, %40 RAI içeren betonlarda elastisite modülü değerinin %0,25 BF kullanımına kadar arttığı ve %0,25 üzeri BF kullanımı durumunda elastisite modülü değerlerinin düştüğü görülmektedir. %10 SF ile BF içeren betonlarda en yüksek elastisite modülü değerleri, RA içeren serilerde R2S10B25 serisinde 32854 MPa olarak ve RAI içeren serilerde R1iS10B25 serisinde 31129 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ve %10 SF ile artan oranlarda BF içeren beton serileri karşılaştırıldığında, %5 SF ile artan oranlarda BF içeren beton serilerinin genellikle daha yüksek elastisite modülü değerlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.42 %10 SF ve BF ile RA ve RAI içeren betonlara ait elastisite modülü değerleri

4.4.5.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlarda SF, BF, SF+BF ile oBMM+SF, oBMM+BF, oBMM+SF+BF iyileştirme yöntemleri kombinasyon kullanımının, her bir RA ve R_{Ai} kullanım oranındaki betonda elastisite modülü üzerine etkinlikleri incelendiğinde:

RA içeren betonlarda,

- Karışımlarda %20 RA kullanımı durumunda R1S5, R1S10 ile R1B25, R1B50, R1B100 ve R1S5B25, R1S5B50, R1S5B100, R1S10B25, R1S10B50, R1S10B100 için betonda elastisite modülü değerleri R1 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +20,7, +10,9 ile +24,9, +34,9, +28,2 ve +41,0, +36,5, +20,4, +2,8, +7,2, +10,2 değişmiş,
- Karışımlarda %40 RA kullanımı durumunda R2S5, R2S10 ile R2B25, R2B50, R2B100 ve R2S5B25, R2S5B50, R2S5B100, R2S10B25, R2S10B50, R2S10B100 için betonda elastisite modülü değerleri R2 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +37,8, +23,4 ile +21,2, +15,1, +23,4 ve +36,3, +41,9, +30,7, +55,5, +48,1, +43,3 değişmiş,
- Karışımlarda %60 RA kullanımı durumunda R12S5, R12S10 ile R12B25, R12B50, R12B100 ve R12S5B25, R12S5B50, R12S5B100, R12S10B25, R12S10B50, R12S10B100 için betonda elastisite modülü değerleri R12 betonuna kıyasla sırasıyla % cinsinden +6,8, +20,5 ile +16,2, +5,6, -19,7 ve +63,5, +43,0, +33,9, +26,7, +23,6, +8,5 değişmiştir.

RA içeren betonlarda tüm ye değiştirme oranlarında SF, BF ve SF+BF kullanımı ile elastisite modülü değerleri artmıştır (R12B100 hariç).

R_{Ai} içeren betonlarda ise,

- Karışımlarda %20 R_{Ai} kullanımı durumunda R1_i, R1_iS5, R1_iS10 ile R1_iB25, R1_iB50, R1_iB100 ve R1_iS5B25, R1_iS5B50, R1_iS5B100, R1_iS10B25, R1_iS10B50, R1_iS10B100 için betonda elastisite modülü değerleri R1 betonuna kıyasla % cinsinden +9,1, +35,4, +53,4 ile +32,8, +41,5, +35,6 ve +57,7, +52,0, +48,0, +37,5, +37,1, +37,1 değişmiş,

- Karışımlarda %40 R_{Ai} kullanımı durumunda R_{2i}, R_{2iS5}, R_{2iS10} ile R_{2iB25}, R_{2iB50}, R_{2iB100} ve R_{2iS5B25}, R_{2iS5B50}, R_{2iS5B100}, R_{2iS10B25}, R_{2iS10B50}, R_{2iS10B100} için betonda elastisite modülü değerleri R₂ betonuna kıyasla % cinsinden +12,1, +50,7, +78,9 ile +36,3, +12,6, +50,8 ve +45,3, +51,5, +41,8, +43,9, +41,8, +27,8 değişmiş,
- Karışımlarda %60 R_{Ai} kullanımı durumunda R_{12i}, R_{12iS5}, R_{12iS10} ile R_{12iB25}, R_{12iB50}, R_{12iB100} ve R_{12iS5B25}, R_{12iS5B50}, R_{12iS5B100}, R_{12iS10B25}, R_{12iS10B50}, R_{12iS10B100} için betonda elastisite modülü değerleri R₁₂ betonuna kıyasla % cinsinden +10,6, +18,9, +20,5 ile +46,5, +30,4, +17,2 ve +52,7, +53,9, +25,9, +44,2, +43,1, +50,7 değişmiştir.

Tüm yer değiştirme oranlarında, R_{Ai} içeren tüm beton serileri, kıyas yapılan R₁, R₂ ve R₁₂ beton serilerine göre daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olarak belirlenmiş ve SF, BF, SF+BF kullanımı elastisite modülü değerlerini artırmıştır.

Eurocode2 (EC2)'de, doğal agregaya içeren kontrol betonuna göre elastisite modülünde %30 düşüşe neden olan kumtaşının ve %10 düşüşe neden olan kireçtaşının kullanımına izin verildiği görülmektedir [52]. Bu bağlamda, R_{Ai} içeren betonların EC2'nin verdiği limitlerin içinde kaldığı ve bu durumun R_A için de geçerli olduğu söylenebilir. Paine ve Dhir [52] yaptıkları çalışmada doğal agregalı betonla yaklaşık aynı dayanım değerine ve doğal agregalı betondan %15 daha düşük elastisite modülü değerine geri kazanılmış agregalı betonlarda su/çimento oranı ayarlaması yapılarak ulaşmanın mümkün olabileceğinden bahsetmektedir. Bu tez çalışmasında, su/çimento ayarlaması yapılmaksızın optimize edilmiş BMM kullanımı ile kontrol betonuna yakın dayanımlar ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir.

4.4.6 Kırılma Parametreleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kırılma tokluğu, birçok mühendislik alanında kullanılan ve çatlamaya çatlağın ilerlemesine karşı gösterilen direnç olarak tanımlanmaktadır [75]. Malzemede oluşan çatlak civarında çatlağın başlamasını, çatlağın ilerlemesini (kararlı veya kararsız şekilde ilerleyeceğini) kırılma tokluğunun doğrudan şekillendirdiği bilinmektedir [76]. Genellikle gevrek malzemelerde çatlağın oluşumu için kullanılan

tek parametrelili kırılma modellerinin iyi sonuçlar verdiği gözlemlenirken, beton gibi yarı gevrek malzemelerde çatlağın oluşumunu ve seyrini incelemede tek parametrelili kırılma modellerinin yetersiz kaldığı ve bu nedenle birden fazla parametre ile çatlağın incelenmesinin gerekli olduğu zamanla anlaşılmıştır [56], [77], [78].

Bu tez çalışmasında, yarı gevrek bir malzeme olan beton üzerinde iyi sonuç veren Çift-K Kırılma Modeli (ÇKKM) ile çatlakların durumları irdelenmiş olup, hesaplamalar neticesinde her bir beton için ilk çatlama tokluğu (K_{Ic}^{ini}) ve kararsız kırılma tokluğu (K_{Ic}^{un}) değerleri oluşturulmuştur.

ÇKKM'ne bakıldığında, K beton için hesaplanan tokluk değeri olmak üzere [76];

- i. $K < K_{Ic}^{ini}$ ise malzemede elastik deformasyonlar oluşur,
- ii. $K = K_{Ic}^{ini}$ ise malzemede çatlak başlar,
- iii. $K_{Ic}^{un} > K > K_{Ic}^{ini}$ ise malzemede oluşan çatlak kararlı şekilde ilerler,
- iv. $K = K_{Ic}^{un}$ ise kararsız çatlak ilerlemesi başlar,
- v. $K > K_{Ic}^{un}$ ise çatlak kararsızca ilerler.

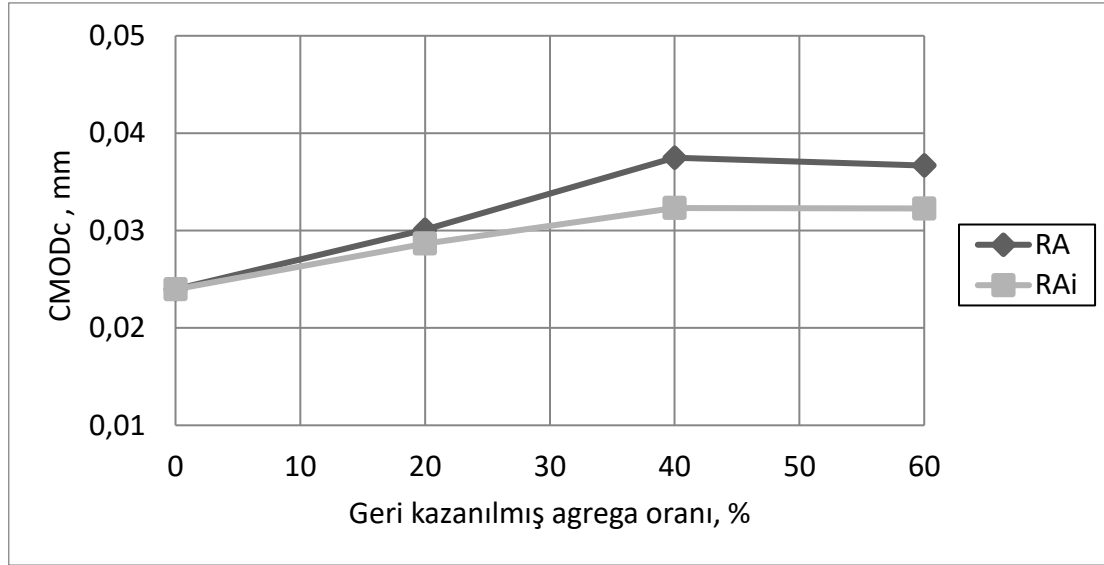
Bu durumlar dikkate alınarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.4.6.1 İyileştirilmiş Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı

Betonların kritik çatlak ağzı açıklığı ($CMOD_c$) değerleri incelendiğinde (Şekil 4.43), N, R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i $CMOD_c$ değerlerinin 0,024mm, 0,030mm, 0,037mm, 0,037mm ve 0,029mm, 0,032mm, 0,032mm olduğu tespit edilmiştir. RA içeren betonların $CMOD_c$ değerlerinin NA ve R1i içeren betonlardan daha büyük olduğu ve RA içeren betonların daha geniş çatlaklar oluşturarak kırıldıkları görülmektedir. Ayrıca, RA ve R1i'nin artan oranlarda betonda kullanımı $CMOD_c$ değerini artırmış ve artışın RA içeren betonlarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek geri kazanılmış agrega kullanımı durumunda, R12 ve R12i serilerinde $CMOD_c$ değerlerindeki artış kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %54,1 ve %33,3 olarak belirlenmiştir.

Betonlara ait elastisite modülü sonuçları incelendiğinde, RA içeren betonların elastisite modülü değerlerinin R1i ve NA içeren betonların elastisite modülü

değerlerinden daha küçük olduğu görülmektedir. Doğal agregaya kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahip bir malzeme olan geri kazanılmış agregaya ile oluşturulan geri kazanılmış agregalı betonların daha büyük yer değiştirme yaparak kırıldıkları yapılan benzer çalışmalarda rapor edilmektedir [75]. oBMM sonucu RAI'nin özelliklerinde gözlemlenen iyileşmeler sonucu, beton mekanik özellikleri ve kırılma parametreleri olumlu şekilde etkilenmiştir.

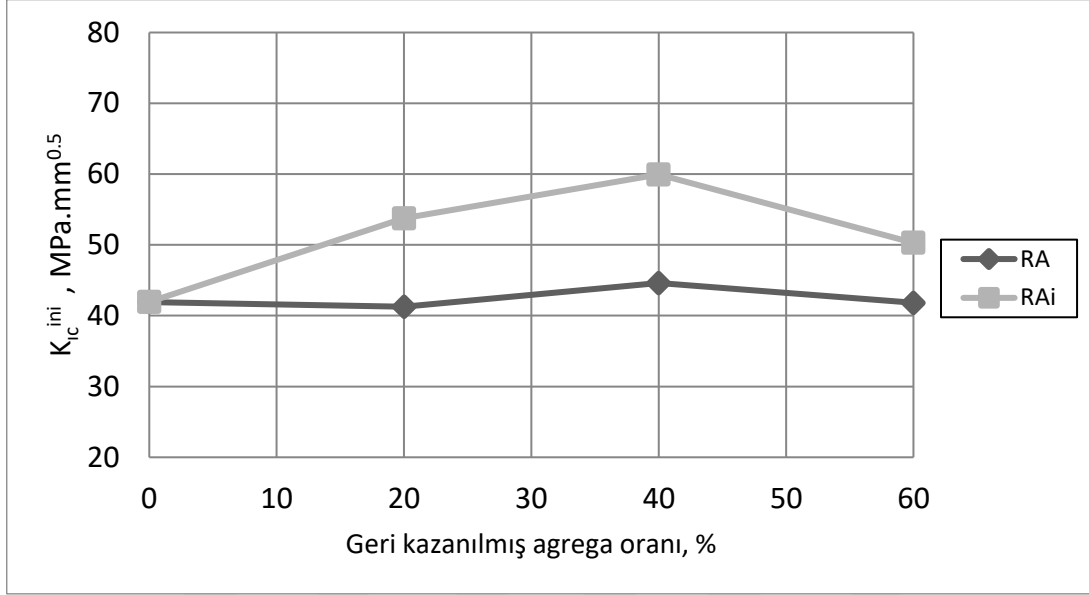


Şekil 4.43 Kritik çatlak ağız açıklığı değerleri

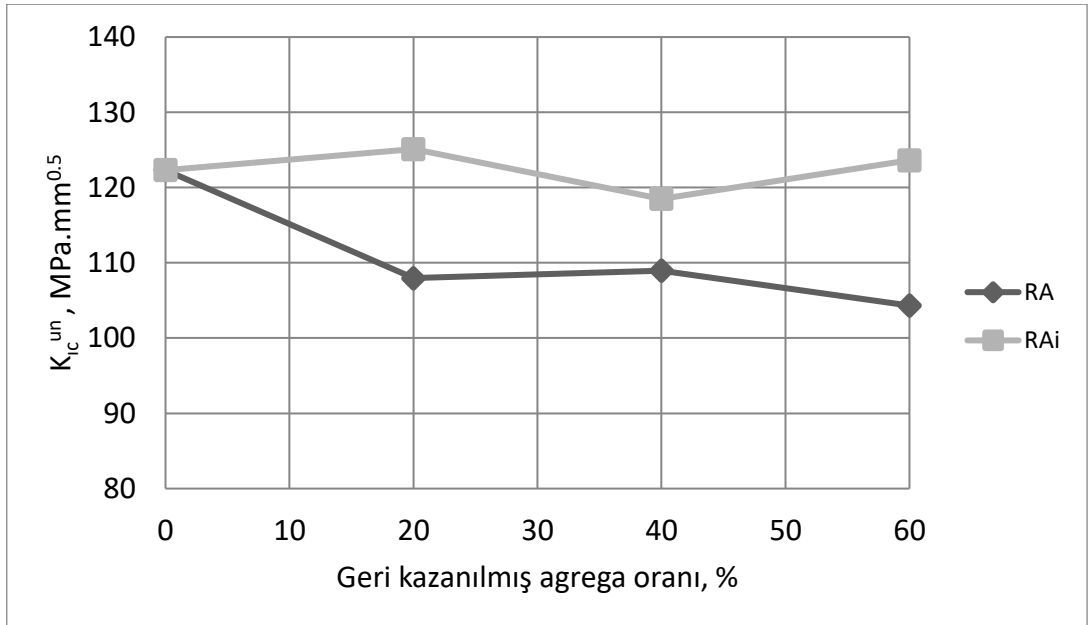
RA ve RAI içeren betonların ilk çatlama toklukları (K_{Ic}^{ini}) incelendiğinde (Şekil 4.44), R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i betonlarına ait K_{Ic}^{ini} değerlerinin kontrol betonuna göre sırasıyla %-1,6, %+6,4, %-0,3 ve %+28,1, %+42,9, %+19,9 değiştiği tespit edilmiştir. Artan oranda RA kullanımı ile betonların K_{Ic}^{ini} değerlerinin şahit betona yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Diğer taraftan, RAI içeren betonların K_{Ic}^{ini} değerlerinin RA içeren serilerden daha yüksek olduğu, %40'a kadar RAI kullanımı ile K_{Ic}^{ini} değerinin arttığı ve %40 sonrasında K_{Ic}^{ini} değerlerinin düşüşe geçtiği görülmektedir. En yüksek değer, R2i betonu için 59,94 MP.mm^{0,5} olarak bulunmuştur.

RA ve RAI içeren betonların kararsız kırılma toklukları (K_{Ic}^{un}) incelendiğinde (Şekil 4.45), R1, R2, R12 ve R1i, R2i, R12i betonlarına ait K_{Ic}^{un} değerlerinin kontrol betonuna göre sırasıyla %-11,7, %-10,9, %-14,7 ve %+2,2, %-3,1, %+1,1 değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Artan oranda RA kullanımı ile K_{Ic}^{un} değerlerinin azaldığı

ve artan oranda RAI kullanımı ile K_{Ic}^{un} değerlerinin küçük sevilerde değiştiği görülmektedir. RAI içeren betonların kararsız kırılma toklukları, RAI kullanım oranından bağımsız olarak etkilememiş ve ayrıca kontrol betonu ile yaklaşık aynı değerdedir. Yapılan benzer çalışmalarda, %30'a kadar RA kullanımı durumunda kırılma parametrelerinin değişmediği rapor edilmektedir [79].



Şekil 4.44 İlk çatlama tokluğu değerleri



Şekil 4.45 Kararsız kırılma tokluğu değerleri

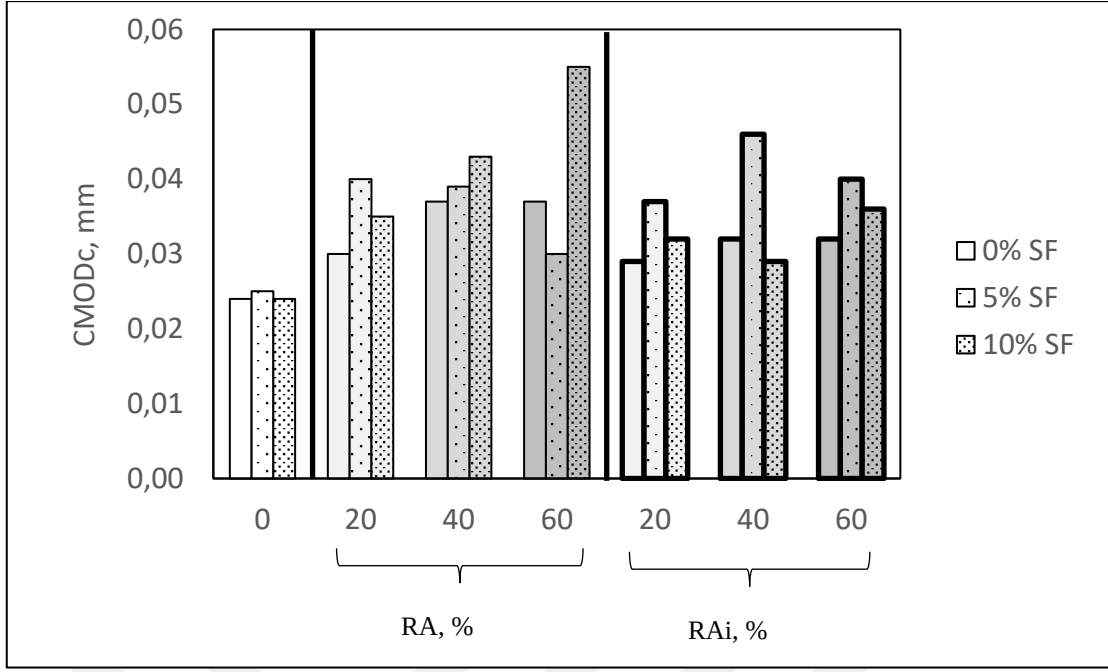
Betonların kırılma parametrelerine ait sonuçlar incelendiğinde, RAI içeren betonların ilk çatlama tokluklarının yüksek olduğu ve şahit betona kıyasla daha geç çatladıkları, geri kazanılmış agregalı betonların düşük elastisite modülleri nedeniyle daha geniş çatlaklar oluşturdıkları görülmektedir.

Ayrıca RA içeren betonların karasız kırılma tokluklarının düşük olması, bu betonlarda çatlağın kararlı ilerlemesi ardından diğer betonlara kıyasla daha erken göçeceklerini ifade etmektedir. RA ve RAI içeren betonların kararsız kırılma toklukları karşılaştırıldığında, oBMM etkisi ile RAI içeren betonların RA içeren betonlara kıyasla daha çok enerji yutarak göçtükleri görülmektedir.

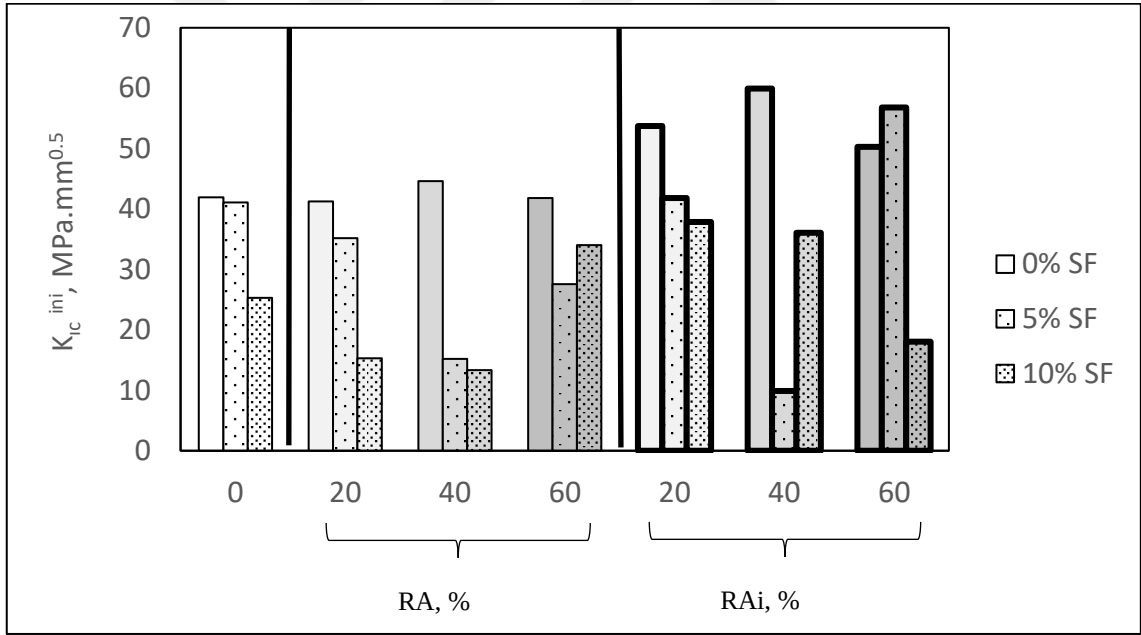
4.4.6.2 Silis Dumanı Kullanımı

SF içeren betonlara ait sonuçlar incelendiğinde (Şekil 4.46), RA ve RAI içeren betonların kritik çatlak ağzı açıklık değerlerinin artan oranda RA ve RAI kullanımı ile genellikle arttığı tespit edilmiştir. RA içeren betonlar incelendiğinde, betonda %5 SF ile %20 RA kullanımının ve %10'a kadar SF ile %40-60 RA kullanımının $CMOD_c$ değerlerini artırdığı gözlenmiştir. RAI içeren betonlar göz önüne alındığında ise, betonda %5 SF ile RAI kullanımının $CMOD_c$ değerlerini artırdığı ve %5 sonrası SF kullanımının $CMOD_c$ değerlerini azalttığı görülmektedir. SF en olumlu etkisini; RA içeren serilerde R12S10 serisinde ve RAI içeren serilerde R2iS5 serisinde göstermiş ve kontrol betonuna kıyasla $CMOD_c$ artış değerleri sırasıyla %129,1 ve %91,6 şeklinde hesap edilmiştir.

SF ile RA ve RAI içeren betonlara ait ilk çatlama toklukları (K_{ic}^{ini}) incelendiğinde, SF kullanımının K_{ic}^{ini} değerlerini genellikle azalttığı görülmektedir (Şekil 4.47). Örneğin, %20 RA içeren R1S5 ve R1S10 betonlarına ait K_{ic}^{ini} değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %16,1 ve %63,5 azalış göstermiştir. İstisnai olarak, %5 SF katkılı %60 RAI içeren R12iS5 betonu K_{ic}^{ini} değeri %35,4 artış göstermiştir.



Şekil 4.46 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı

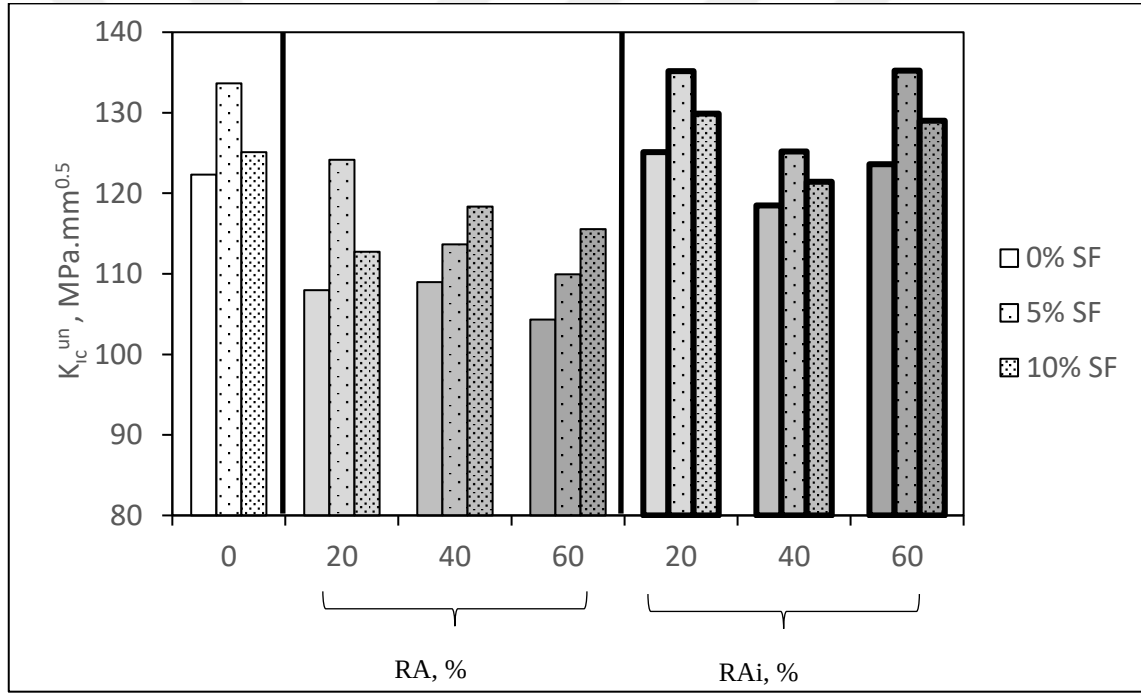


Şekil 4.47 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu

SF ile RA ve RA_i içeren betonlara ait karasız kırılma tokluk (K_{Ic}^{un}) değerleri incelendiğinde (Şekil 4.48), SF katkısının K_{Ic}^{un} değerlerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. SF ile RA ve RA_i içeren betonların K_{Ic}^{un} değerleri karşılaştırıldığında RA_i içeren betonların daha yüksek K_{Ic}^{un} değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. RA içeren betonlar incelendiğinde, %10'a SF kullanımının K_{Ic}^{un} değerlerini artırdığı

belirlenmiştir (R1S10 hariç). RAI içeren betonlarda ise, %5 SF kullanımının RAI içeren betonların K_{Ic}^{un} değerlerini artırdığı ve %5 sonrası SF kullanımının K_{Ic}^{un} değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %60 RAI içeren R2iS5 ve R2iS10 serileri için K_{Ic}^{un} değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %10,5 ve %5,4 artış göstermiştir.

SF'nın iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların kararsız kırılma tokluklarına olumlu etkisi olduğu fakat ilk çatlama tokluklarına olumsuz etki yaparak azalttığı görülmektedir. Diğer bir deyişle; SF betonda çatlağın daha erken oluşmasına ve oluşan çatlağın kararlı şekilde ilerleyip daha geç kararsızlaşarak betonun göçmesine neden olmuştur. Bu etki, RAI içeren betonlarda daha belirgin şekilde görülmüştür.

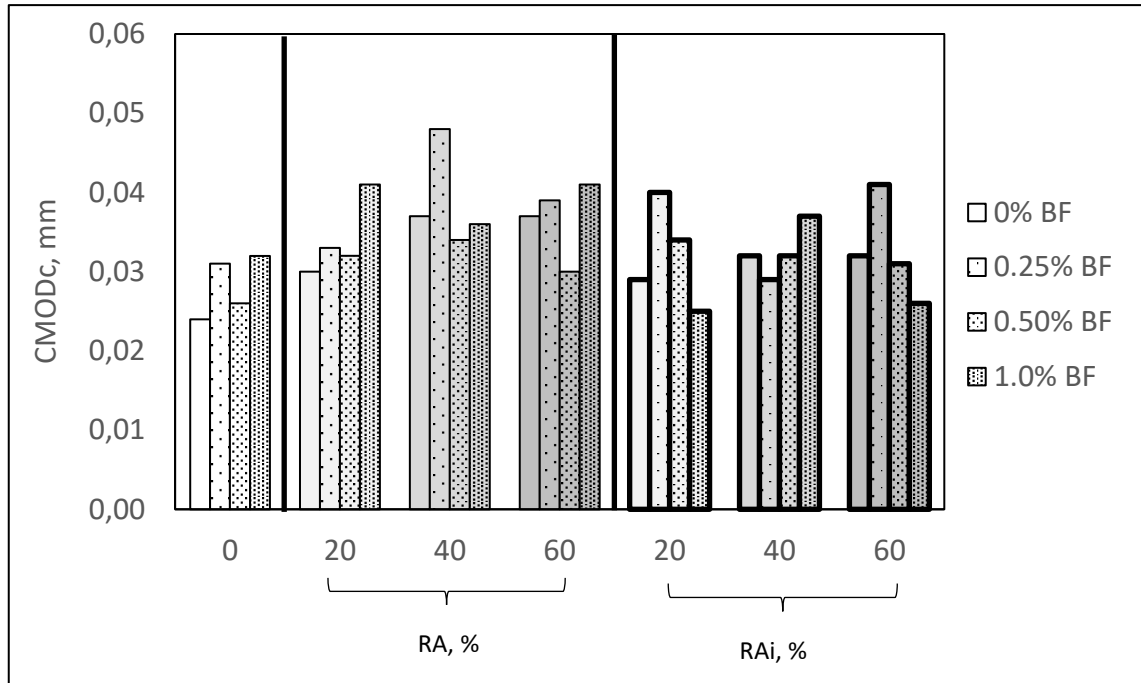


Şekil 4.48 SF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu

4.4.6.3 Bazalt Fiber Kullanımı

BF içeren betonlara ait $CMOD_c$ değerleri incelendiğinde, BF'nin $CMOD_c$ değerlerini artırdığı ve geri kazanılmış agregalı betonlara ait tüm sonuçların kontrol betonundan yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.49). Karışım esnasında fiberin beton matrisine yayılması, fiberin yüksek çekme dayanımı katkısıyla beton matrisini güçlendirmesi ve böylelikle betonda çatlama karşı direnç oluşumu

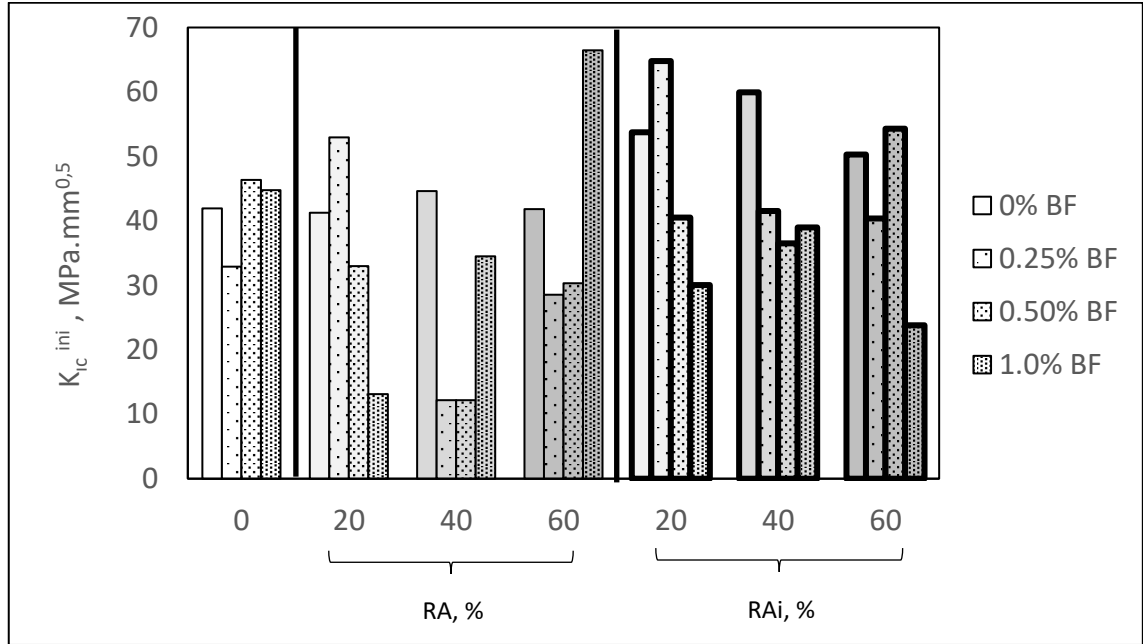
burada etkili olmuştur [76]. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarına bakıldığında, BF'nin yarmada çekme dayanımı değerlerini artırdığı ve betonların daha yüksek çekme mukavemetine neden olduğu önceki bölümlerde incelenmişti (Bknz. Bölüm 4.3.2). BF ile RA içeren betonlar incelendiğinde, %20 ve %60 RA ile %1,0'e kadar artan oranda BF kullanımının ve %40 RA ile %0,25 BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Diğer yönden, %20 ve %60 RAi ile %0,25 BF kullanımının, %40 RAi ile %1,0 BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, BF en olumlu etkisini RA içeren serilerde R2B25 serisinde ve RAi içeren serilerde R12iB25 serisinde göstermiş ve $CMOD_c$ değerleri bu seriler için kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %100 ve %70,8 artış göstermiştir.



Şekil 4.49 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı

BF içeren betonlara ait K_{Ic}^{ini} değerleri incelendiğinde, %20 RA ile %0,25 BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini artırdığı, %40 RA ile %1,0'e kadar BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini azalttığı, %60 RA ile %0,50'e kadar BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini azalttığı belirlenmiştir (Şekil 4.50). RAi içeren betonlar incelendiğinde, %20 RAi ile %0,25 BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini artırdığı, %40 RAi ile %1,0'e kadar BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini azalttığı, %60 RAi ile %0,50'ye kadar BF kullanımının K_{Ic}^{ini} değerlerini artırdığı belirlenmiştir. Betonlarda BF'nin oluşturduğu en olumlu etki, RA içeren serilerde R12B100 serisinde ve RAi içeren serilerde R1iB25 serisinde

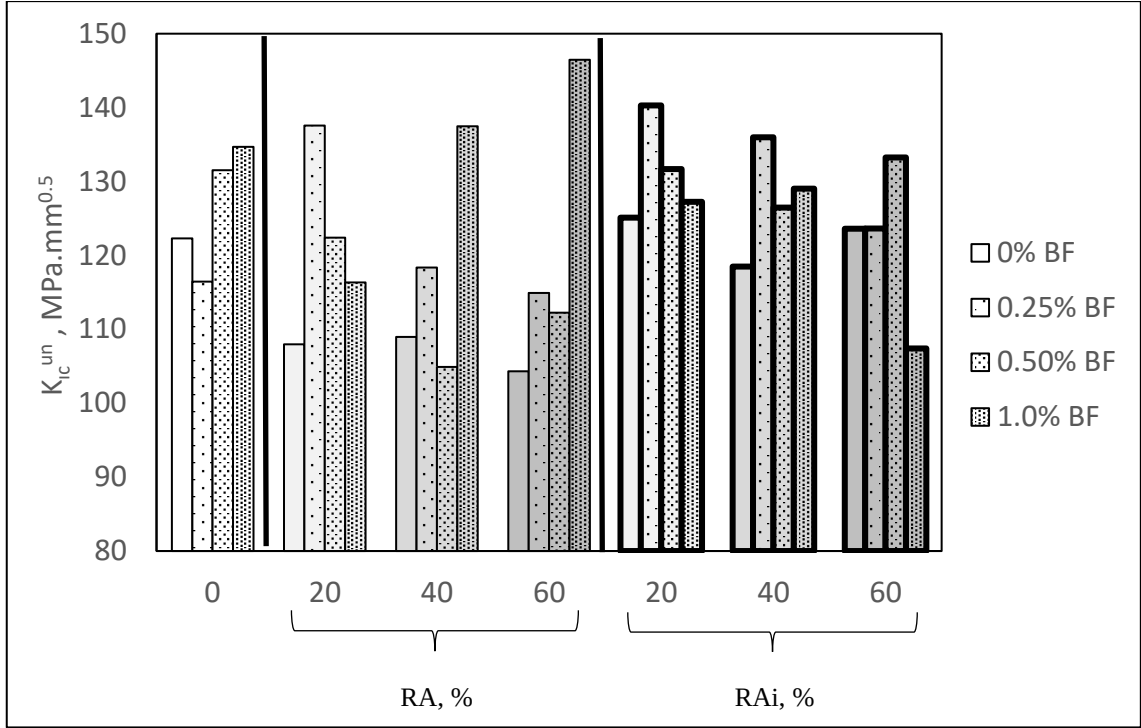
gözlenmiştir. R12B100 ve R1iB25 serileri için K_{ic}^{ini} değerlerinde gözlemlenen artış değeri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %58,9 ve %54,4 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.50 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu

BF içeren betonlara ait K_{ic}^{un} değerleri incelendiğinde, %20 RA ve %20-40 RAi içeren betonlarda %0,25 BF kullanımı K_{ic}^{un} değerleri artırmıştır. %40-60 RA içeren betonlarda %1,0'e kadar BF kullanımı K_{ic}^{un} değerleri artırmış ve %60 RAi içeren betonlarda ise %0,50 BF kullanımı K_{ic}^{un} değerlerini artırmıştır (Şekil 4.51). Ayrıca, BF kullanımının betonlarda en olumlu etkisi, RA içeren serilerde R12B100 serisinde ve RAi içeren serilerde R1iB25 serisinde gözlenmiş ve bu seriler için K_{ic}^{un} değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %19,7 ve %14,6 artış göstermiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların çatlak oluşumu öncesi ve sonrası davranışına BF'nin olumlu etkisi olmuştur. BF katkısı, betonların yük altında daha geç çatlamasına ve daha kararlı çatlak ilerlemelerini sağladığı söylenebilir. Bu etki, RAi içeren betonlarda daha belirgin şekilde görülmüştür.



Şekil 4.51 BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu

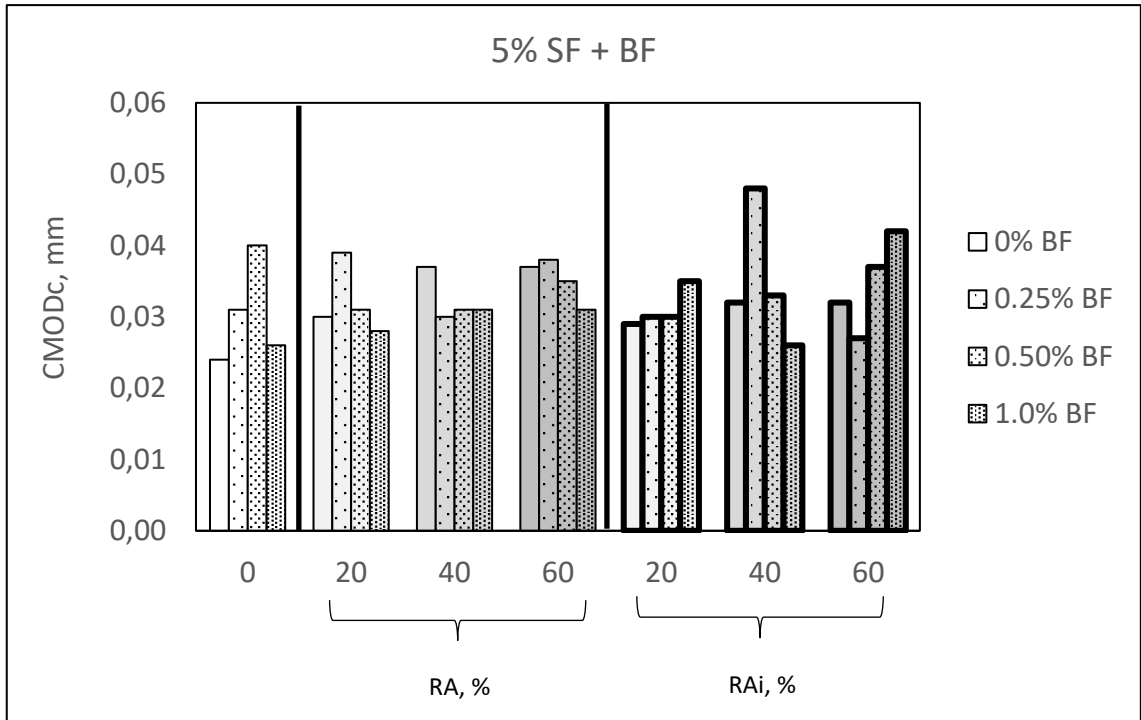
4.4.6.4 Silis Dumanı ve Bazalt Fiber Kullanımı

SF ile BF içeren betonlara ait $CMOD_c$ değerleri incelendiğinde, BF'nin $CMOD_c$ değerlerini genellikle artırdığı ve geri kazanılmış agregalı betonlara ait tüm sonuçların kontrol betonundan yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.52-4.53).

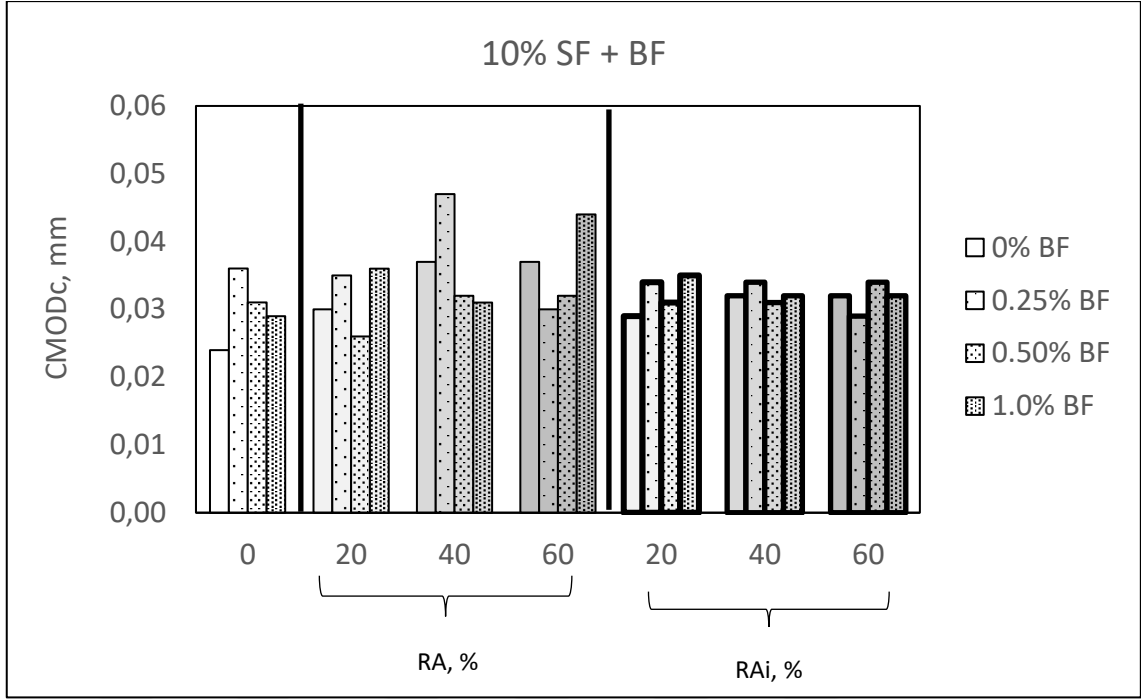
%5 SF + BF katkılı RA içeren betonlar incelendiğinde (Şekil 4.52), %20 ve %60 RA ile %0,25'e kadar artan oranda BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı ve %0,25 üzeri BF kullanımının $CMOD_c$ değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. %40 RA ile %1,0'e kadar BF kullanımının ise $CMOD_c$ değerini azalttığı belirlenmiştir. Diğer yandan, betonda %20 ve %60 RAI kullanımı durumunda %1,0'e kadar BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Betonda %40 RAI ve %0,25 BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı ve %0,25 üzeri BF kullanımında $CMOD_c$ değerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

%10 SF + BF katkılı RA içeren betonlar incelendiğinde (Şekil 4.53), %20 ve %60 RA ile %1,0'e kadar artan oranda BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı ve %40 RA ile %0,25'e kadar BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı belirlenmiştir. Diğer yönden, betonda %20 ve %40 RAi kullanımı durumunda %1,0'e kadar BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Betonda %60 RAi ve %0,50'e kadar BF kullanımının $CMOD_c$ değerini artırdığı tespit edilmiştir.

Ayrıca, SF+BF kullanımı serilerde en olumlu etkisini RA içeren serilerde R2S10B25 serisinde ve RAi içeren serilerde R2iS10B100 serisinde göstermiş ve R2S10B25 ve R2iS10B100 serileri için $CMOD_c$ değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %95,8 ve %125 mm artış göstermiştir.



Şekil 4.52 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağız açıklığı



Şekil 4.53 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kritik çatlak ağzı açıklığı

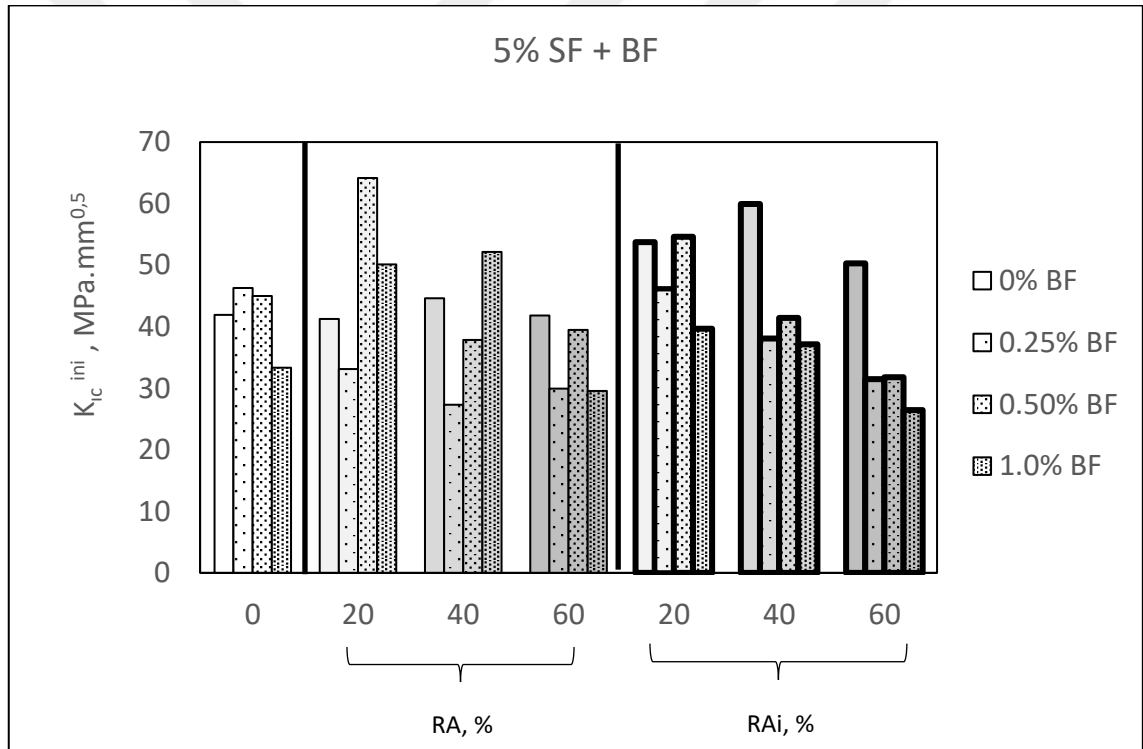
%5-10 SF ile BF içeren betonların ilk çatlama tokluğu değerleri incelendiğinde, BF'nin iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların ilk çatlama tokluğu değerlerini genellikle artırdığı ve özellikle %10 SF'li geri kazanılmış agregalı betonlara ait sonuçların daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.54-4.55). Ayrıca, iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı SF+BF içeren betonlarda %0,25 BF kullanımının ilk çatlama tokluğu değerlerini azalttığı görülmektedir.

%5 SF ile BF katkılı RA içeren betonlar incelendiğinde, %20 RA ile %0,50'ye kadar artan oranda BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı, %40 RA ile %1,0'e kadar BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı ve %60 RA ile artan oranda BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini azalttığı belirlenmiştir. Diğer yönden, betonda %5 SF ile %20 RAi kullanımı durumunda %0,50'ye kadar BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı, %5 SF ile %40-60 RAi içeren serilerde artan oranda BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini azalttığı görülmektedir.

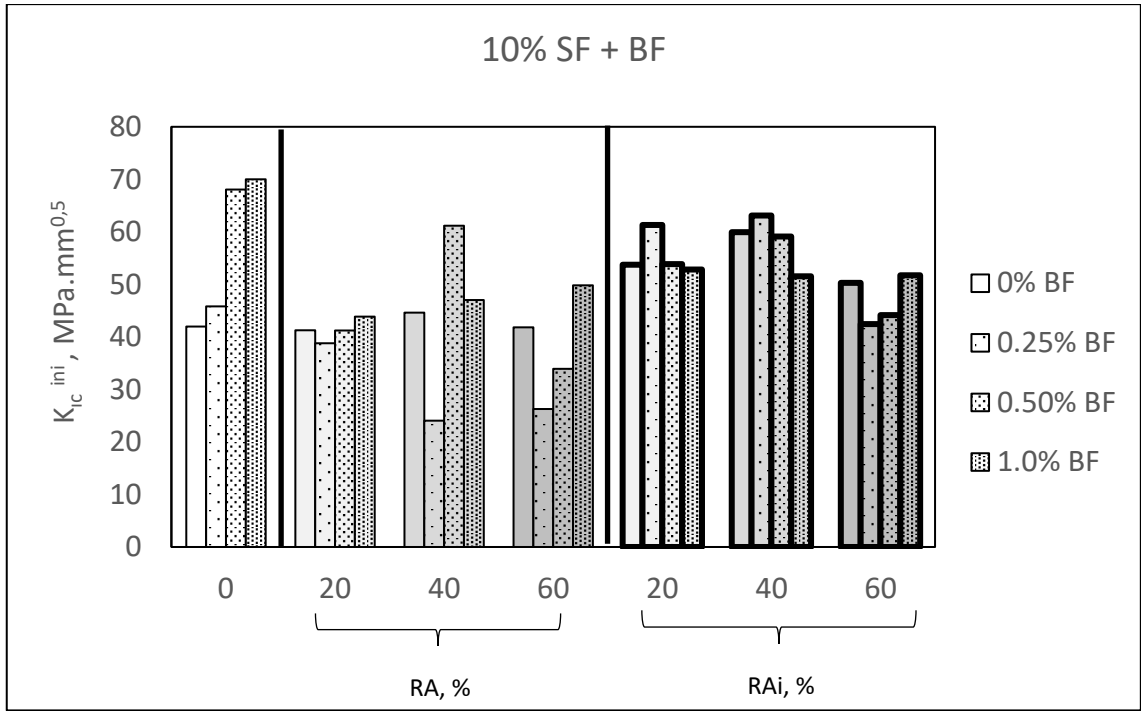
%10 SF ile BF katkılı RA içeren betonlar incelendiğinde, %20-60 RA ile %1,0'e kadar artan oranda BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı, %40

RA ile %0,50'e kadar BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı belirlenmiştir. Diğer yönden, betonda %10 SF ile %20-40 R_{Ai} kullanımı durumunda %0,25'e kadar BF kullanımının betonların ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı ve %60 R_{Ai} içeren serilerde %1,0 'e kadar BF kullanımının ilk çatlama tokluğu değerini artırdığı görülmektedir.

Ayrıca, RA ve R_{Ai} içeren betonların ilk çatlama tokluğu değerlerinin artmasına neden olan SF+BF serilerde en olumlu etkisini; RA içeren serilerde %20 RA ve %5 SF ile %0,50 BF içeren R1S5B50 serisinde ve R_{Ai} içeren serilerde %40 R_{Ai} ve %10 SF ile %0,25 BF içeren R2iS10B25 serisinde göstermiştir. R1S5B50 ve R2iS10B25 serileri için ilk çatlama tokluğu değerleri kontrol betonuna göre sırasıyla %45,8 ve %50,4 artmıştır.

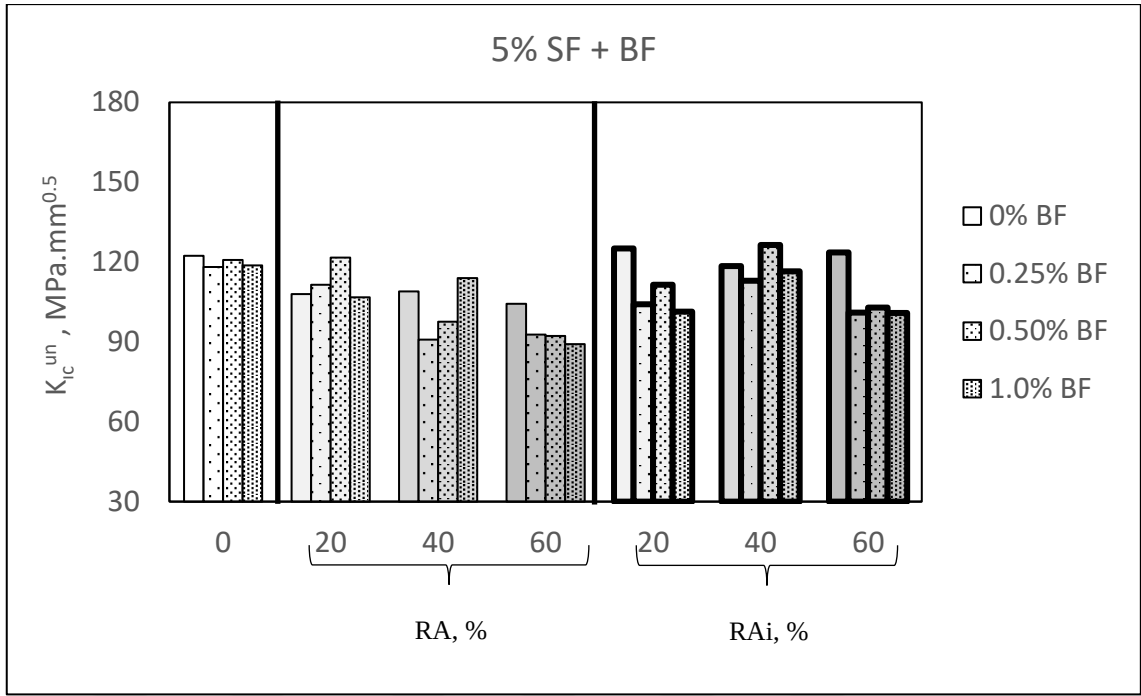


Şekil 4.54 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu

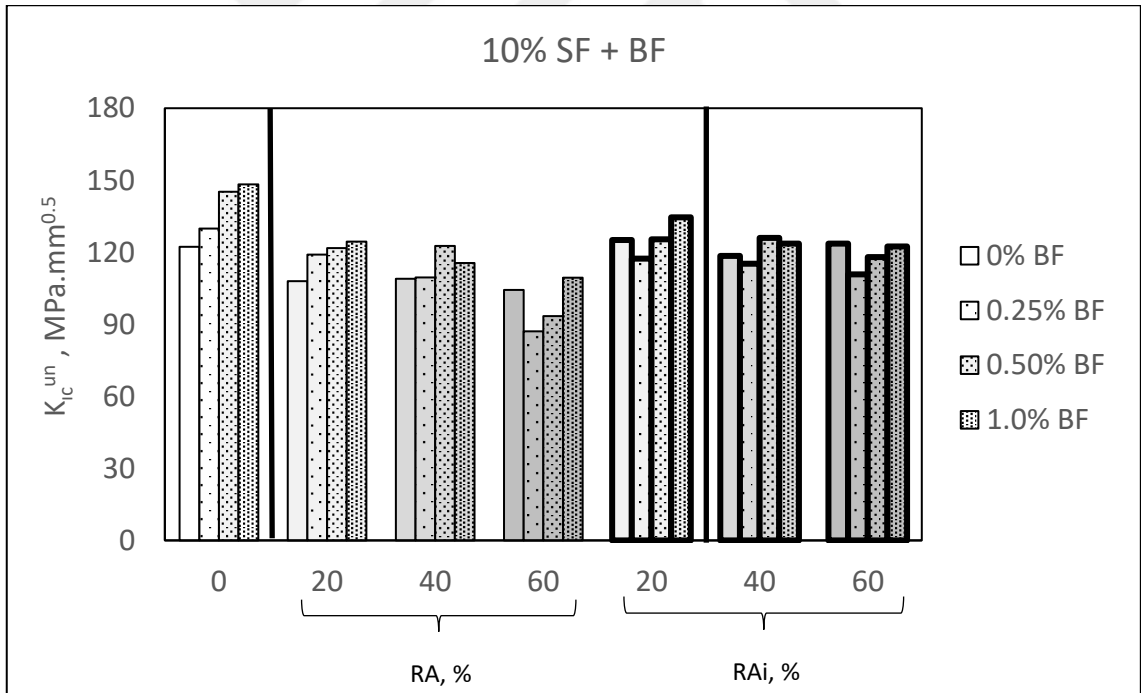


Şekil 4.55 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen ilk çatlama tokluğu

%5-10 SF ile BF içeren betonların kararsız kırılma tokluğu değerleri incelendiğinde, BF'nin iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların kararsız kırılma tokluğu değerlerini genellikle artırdığı görülmektedir (Şekil 4.56-4.57). Özellikle %10 SF içeren serilerin daha yüksek kararsız kırılma tokluğu değerlerine sahip oldukları görülmüştür. %10 SF kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. %5SF+BF ile RA içeren seriler incelendiğinde, %20-40 RA ile artan oranda BF kullanımı kararsız kırılma tokluğu değerlerini artırmış ve %60 RA ile artan oranda BF kullanımıyla bu değer düşüş göstermiştir. Diğer yönden, %5 SF+BF ile RAi içeren seriler incelendiğinde, %20-60 RAi içeren serilerde artan oranda BF kullanımı kararsız kırılma tokluğu değerini azaltmış ve %40 RAi kullanımı durumunda bu değer %0,50'ye kadar BF kullanımı durumunda artmıştır. %10 SF+BF ile RA içeren seriler incelendiğinde, artan oranda BF kullanımı RA ve RAi içeren serilerin kararsız kırılma tokluk değerlerini genellikle artırmıştır. Ayrıca, SF+BF en olumlu etkisini RA içeren serilerde R1S10B100 serisinde ve RAi içeren serilerde R2iS10B100 serisinde göstermiş ve bu serilere ait serileri için tokluk değerleri kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %1,7 ve %26,9 artmıştır.



Şekil 4.56 %5 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu



Şekil 4.57 %10 SF ile BF içeren betonların pik yük altında ölçülen kararsız kırılma tokluğu

4.4.6.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların ilk çatlama tokluklarının şahit betona kıyasla daha yüksek olduğu ve daha geç atladıkları görölmektedir. Ayrıca, bu betonların kontrol betonuna göre daha geniş çatlaklar oluşturarak kırıldıkları belirlenmiştir. RA içeren betonların kararsız kırılma tokluklarının daha düşük olması, çatlak oluşumu ardından diğer betonlara göre daha önce göçeceklerini göstermektedir. Ayrıca, RA'nın yüksek miktarda AOM içermesinin -özellikle çatlağın kararsız ilerlemesi davranışında- olumsuz etki oluşturduğu düşünölmektedir.

İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların özellikle kararlı ve kararsız çatlak ilerlemesi davranışına SF'nin olumlu etkisi olmuş ve tokluk değerleri yükselmiştir. SF betonların yük altında erken atlamalarına neden olsa da daha kararlı çatlak ilerlemelerini sağlayıp, daha geç göçmelerine neden olmaktadır. Diğer yönden, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geri kazanılmış agregalı betonların çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve çatlak sonrası davranışına BF'nin pozitif katkısı olmuştur. BF, yük altında betonların daha geç çatlayarak daha kararlı çatlak ilerlemelerini sağlayıp daha geç göçmelerine neden olmuştur.

SF, BF ve SF+BF içeren betonların kırılma parametreleri sonuçları karşılaştırıldığında;

- RA içeren betonlarda, en yüksek ilk çatlama tokluğu değeri ve en yüksek kararsız kırılma tokluğu değeri R12B100 betonunda,
- RAI içeren betonlarda, en yüksek ilk çatlama tokluğu değeri R1iB25 betonunda ve en yüksek kararsız kırılma tokluğu değeri R2iS10B100 betonunda

elde edilmiştir. Göröleceği üzere, en yüksek değerler genellikle BF katkılı betonlarda gözlemlenmiştir.

4.5 Kalıcılık Deneyleri ve Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

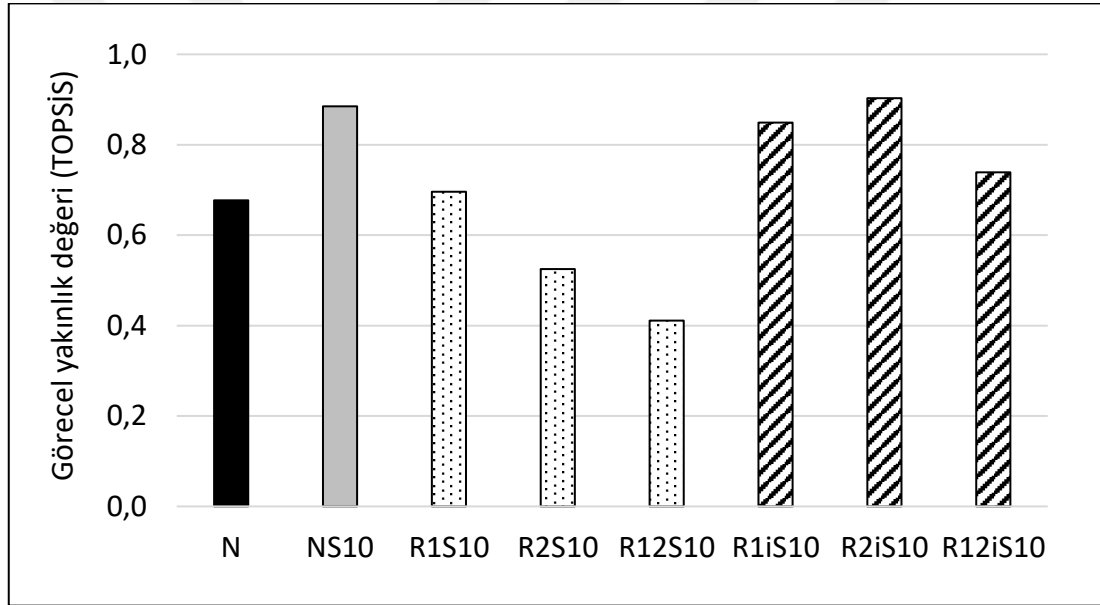
Kalıcılık, malzemenin servis süresi boyunca maruz kaldığı kimyasal atak, aşınma, hava olayları, donma-çözünme gibi çeşitli dış etkilere göstereceği direnç olarak tanımlanmaktadır [80]. Tasarım aşamasında malzemenin maruz kalabileceği durumlar tahmin edilerek her bir kalıcılık problemi için çözüm önerilerinin tasarım aşamasında dikkate alınması ve çözüme uygun, ekonomik, en iyi performansı gösterecek, uzun servis ömürlü malzeme türü seçimi beton için önem arz etmektedir [81]. Beton kalıcılığı, temel olarak betonun içerdiği malzemelerin özelliklerine ve beton bileşenlerinin oranlarına, beton karışım yöntemlerine ve karışımda kullanılan katkılara bağlıdır [38], [63], [73], [81]. Beton kalıcılığı göz önüne alındığında; betona ait karbonatlaşma, klorür geçirimsizliği direnci, basınçlı su geçirimsizliği, donma çözünmeye karşı direnç, hava/oksijen geçirimsizliği gibi kalıcılık özellikleri göze çarpmaktadır [82].

Kalıcılık özelliklerinin betonda sağlanması ve servis süresince betonun aynı performansı gösterebilmesi bakımından geri kazanılmış agreganın beton agregası olarak beton üretiminde kullanımı, beton performansını ve kalıcılığını olumsuz olarak etkileyeceği fikrini akıllarda uyandırmaktadır. Geri kazanılmış agreganın doğal agregaya kıyasla daha zayıf özelliklere sahip olması, bu fikrin akıllarda uyanmasında etkili olmaktadır. Yüksek oranlarda geri kazanılmış agreganın betonda kullanılabilirliğini araştırmayı amaçlayan bu tez çalışması, akıllarda oluşan/oluşacak şüpheleri giderecek çözüm yollarını bulmayı hedeflemektedir. Bu noktada, oBMM+SF, oBMM+BF ve oBMM+SF+BF kombinasyonları kullanımı hedefe ulaşmada kullanılan araçlardır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, en iyi beton serileri ile çalışmalara devam etmek üzere; betonlar arasından en iyi beton serileri TOPSİS yöntemi ile seçilmiştir. Belirlenen seriler üzerinde kalıcılık deneyleri ve yaşam döngü analizleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.5.1 TOPSİS Yöntemi Sonuçları

84 adet beton serisine ait fiziksel ve mekanik deney sonuçları dikkate alınarak TOPSİS yöntemiyle incelenmesi sonucu doğal agregalı grup, geri kazanılmış agregalı grup ve iyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı grup olmak üzere 3 ana grupta ve kontrol betonu dâhil 8 adet beton serisi seçilmiş ve bu betonlar üzerinde kalıcılık deneyleri ve yaşam döngü analizleri yapılmıştır (Bknz. Ek A-B). TOPSİS yöntemine ait sonuçlar incelendiğinde, RAi içeren betonların RA içeren betonlardan daha iyi kalıcılık performansı gösterecekleri yorumu yapılabilir. Sonuçların 0'dan 1'e yaklaşması, mutlak en kötüden mutlak en iyiye yaklaşımdır (Şekil 4.58). Ayrıca, kontrol betonu hariç, TOPSİS ile belirlenen tüm betonların %10 SF içeren seriler olduğu görülmektedir.



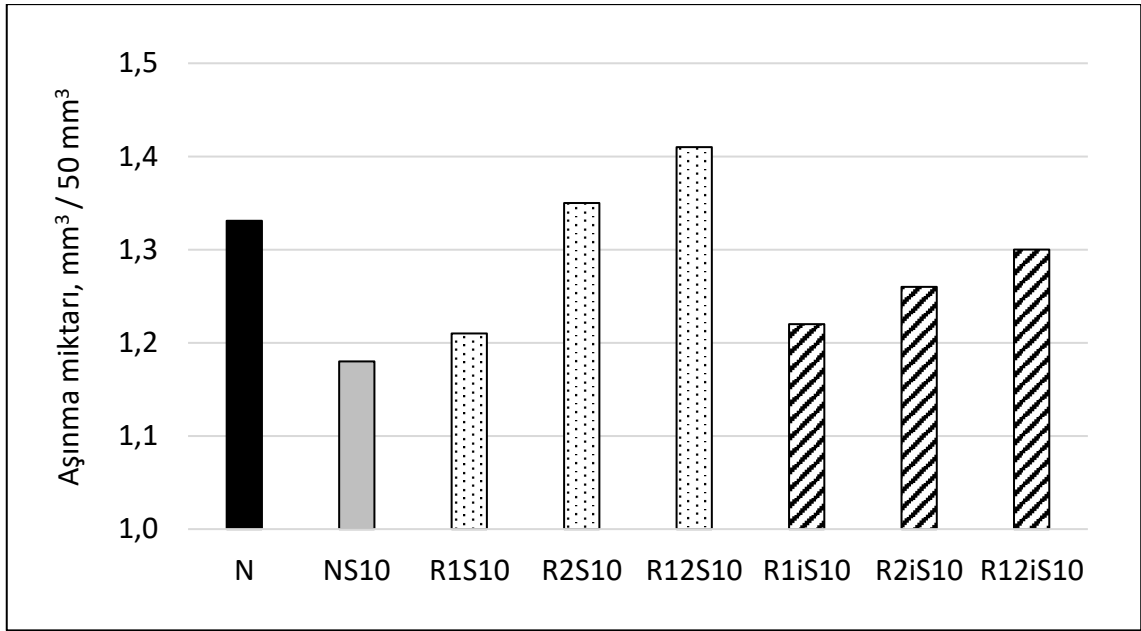
Şekil 4.58 TOPSİS ile belirlenmiş beton serileri

4.5.2 Aşınma Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Beton serilerine ait aşınma dayanımı deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.59), N, NS10 ile R1S10, R2S10, R12S10 ve R1iS10, R2iS10, R12iS10 için aşınma değerleri 1,33, 1,18 ile 1,21, 1,35, 1,41 ve 1,22, 1,26, 1,30 mm³/50 mm³ olarak belirlenmiştir. RA ve RAi oranı arttıkça beton aşınma değerlerinin arttığı ve aşınma dirençlerinin azaldığı görülmektedir.

RA içeren betonlar incelendiğinde, R1S10 hariç aşınma değerlerinin kontrol betonundan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, kontrol betonuna kıyasla R2S10 için %1,5 ve R12S10 için %6,0 daha yüksektir. Ayrıca, R1S10 betonu kontrol betonuna yakın aşınma değerine sahiptir. RA içeren betonların aşınma değerleri NS10 betonu ile karşılaştırıldığında, RA içeren betonların aşınma değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Gözlemlenen yüksek aşınma değeri oluşumunda; NA'ya kıyasla RA'nın farklı olarak AOM içermesi ve AOM'nin düşük mekanik ve fiziksel özelliklere sahip oluşunun etkili olduğu söylenebilir [64].

RAi içeren en iyi betonlar incelendiğinde, artan oranda RAi kullanımının aşınma değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. En yüksek aşınma değeri R12iS10 betonunda $1,30 \text{ mm}^3$ olarak belirlenmiş ve söz konusu bu değer aynı yer değiştirme oranına (%60) sahip R12S10 betonunda $1,41 \text{ mm}^3$ olarak bulunmuştur. İyileştirilmiş geri kazanılmış agregalı betonların aşınma değerleri, kontrol betonundan ve RA içeren betonlara ait aşınma değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. RAi içeren betonların aşınma değerlerinin NS10 betonuna kıyasla daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir. İyileştirme yöntemi uygulanması sonucu, RA'nın AOM miktarının büyük ölçüde giderilmesi ile agrega özelliklerinin iyileşmesinin ve SF katkısının beton aşınma direnci değerleri üzerinde etkili olduğu ve RA içeren betonlara kıyasla daha düşük aşınma değerlerinin elde edildiği savunulabilir. RAi içeren betonlar için aşınma deneyi sonuçların NS10 betonundan daha yüksek olarak belirlenmesinde, RAi üzerinde giderilemeyen AOM içeriğinin (<%10) neden olduğu söylenebilir. Ayrıca, aşınma direnci üzerinde; matris fazı ve matrisin iri agrega ile oluşturduğu bağın etkili olduğu görülmektedir [63], [64], [82]. Bu bakımdan matris fazını ve matrisin iri agrega ile oluşturduğu bağı SF'nin da güçlendirdiği, böylelikle aşınma direncinin arttığı söylenebilir [64], [83].



Şekil 4.59 Aşınma değerleri

4.5.3 Kılcallıkla Su Emme ve Basınçlı Su İşleme Derinliği Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

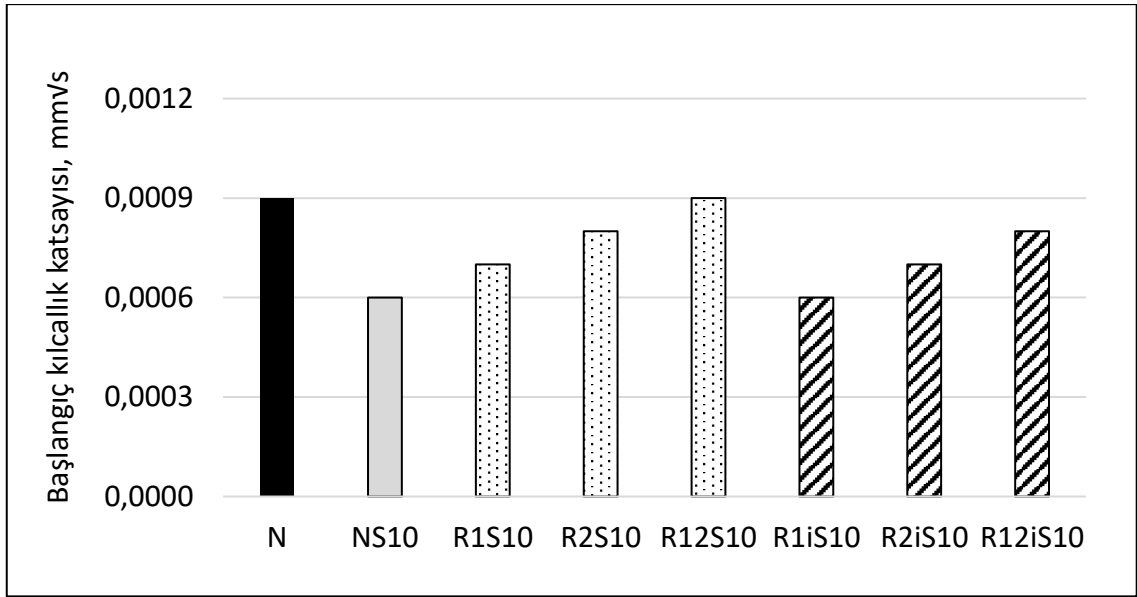
Geçirimlilik; genellikle su geçirimsizliği, hava/oksijen geçirimsizliği ve klorür taşınımı gibi beton kalıcılık özelliklerini tanımlamak için kullanılan bir ifadedir ve dışa açık-birbiri ile bağlantılı boşlukların varlığı ve miktarı ile söz konusu kalıcılık özellikleri arasında yüksek korelasyonlu ilişkiler mevcuttur [66], [81]. Çatlaklı ve birbiri ile bağlantılı boşluk yapısı içeren eski harç kalıntısına sahip olması nedeniyle geri kazanılmış agrega, betonda boşluk miktarını artırmakta ve betonun daha geçirgen olmasını sağlamaktadır. Bu durum, dış ortamdan gelen/gelebilecek zararlı bileşenlere karşı açık kapı bırakmaktadır [21] ve betonun servis ömrünü de azaltmaktadır [64], [81]. Bu noktada, betonun kalıcılığını sağlamak ve servis süresini korumak; daha az boşluklu daha geçirimsiz bir beton oluşturularak sağlanabilir. Tasarım aşamasında dışa açık boşlukların miktarının tahmini ve sonrasında dışa açık boşlukların miktarının belirlenmesi, ileriki aşamalarda karşılaşılabilecek muhtemel sorunlar açısından önemli olacaktır. Bu bakımdan, malzemenin toplam hacmindeki dışa açık boşluk miktarı ve boşluk karakteri bu aşamada incelenebilecek bazı beton özelliklerindendir. Örneğin, betonun toplam dışa açık boşluk hacmi, su emme deneyinde belirlenen suyun nüfuz ettiği boşlukların toplam hacmi ile yaklaşık olarak tahmin edilebilirken ve suyun zamanla

malzeme boşluklarına nüfuz davranışı kılcallıkla su emme deneyinde başlangıç kılcallık katsayısı ve ikincil kılcallık katsayısı ile tanımlanabilir. Betonun daha az boşluklu ve daha kompakt yapıda olmasını sağlamak amacıyla, mineral katkıların kullanımı ve çeşitli karışım yöntemlerinin uygulanması bu noktada tercih edilebilmektedir [73], [81], [84].

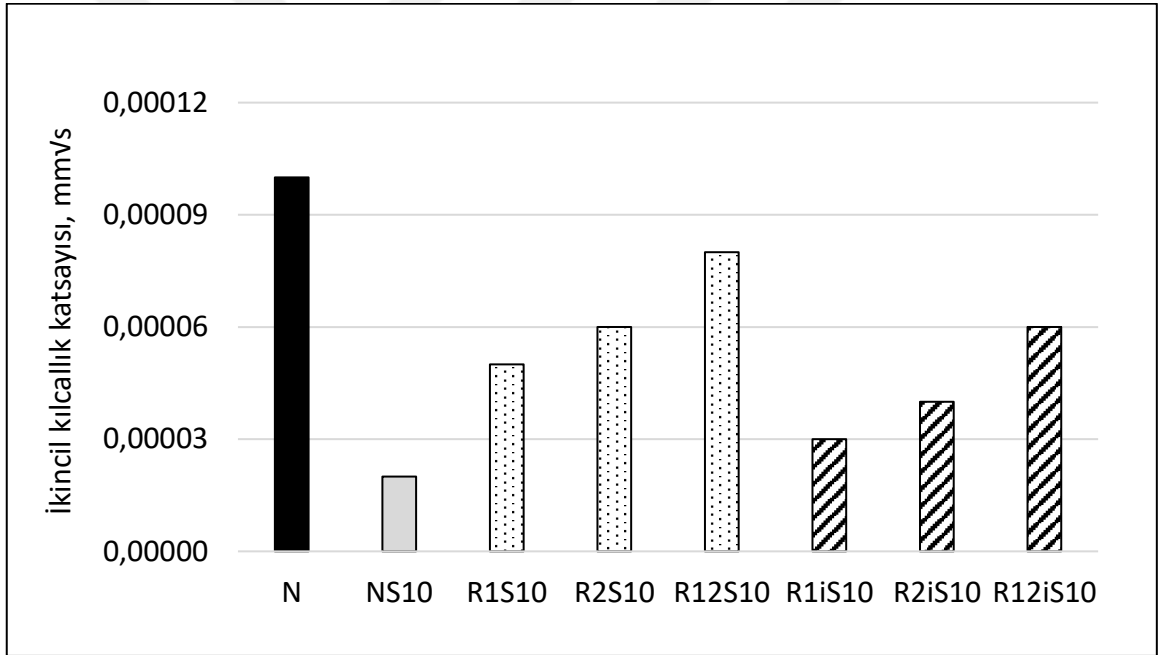
Bu tez kapsamında kullanılan geri kazanılmış agregası ve silis dumanı betonun kılcallıkla su emme özelliği üzerinde etkili olabilecek bileşenlerdir. Geri kazanılmış agreganın beton su emme miktarını artırması, silis dumanının söz konusu olumsuzluğu ince tanecik yapısıyla boşlukları doldurarak ve ek C-S-H jelleri oluşturarak gidermesi, betonun kılcallıkla su emme özelliğini ve basınçlı su işleme derinliği değerini kabiliyetleri ölçüsünde etkileyecektir [64], [85]. Ayrıca, kullanılan optimize edilmiş iyileştirme işlemi de buraya dâhil edilebilir.

Şekil 4.60-4.61'den görüleceği üzere, RA ve RAI içeren betonların başlangıç ve ikincil kılcallık katsayısı değerleri kontrol betonuna ait değerlerden daha küçük olarak belirlenmiştir. Örneğin, kontrol betonuna ait ikincil kılcallık katsayısı değeri $0,00010 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$ iken sırasıyla %20-40-60 RA içeren R1S10, R2S10 ve R12S10 betonlarına ait ikincil kılcallık katsayısı değerleri $0,00005 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$, $0,00006 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$ ve $0,00008 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$ olarak hesap edilmiştir.

Diğer yönden, RA ve RAI kullanım oranı betonda arttıkça kılcallık katsayısı değerleri artış göstermiş, fakat RA içeren betonlarda söz konusu artış kısıtlı olarak gerçekleşmiştir. Örneğin, sırasıyla %60 RA ve RAI içeren R12S10 ve R12iS10 betonlarına ait ikincil kılcallık katsayısı değerleri sırasıyla $0,00008 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$ ve $0,00006 \text{ mm}\sqrt{\text{s}}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, SF içeren doğal agregalı NS10 serisi incelendiğinde, bu serinin betonlar içinde en düşük kılcallık katsayısı değerine sahip olduğu, RA ile RAI içeren betonların NS10'dan daha yüksek kılcallık katsayısına sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.60 Betonların başlangıç kılcalık katsayısı değerleri



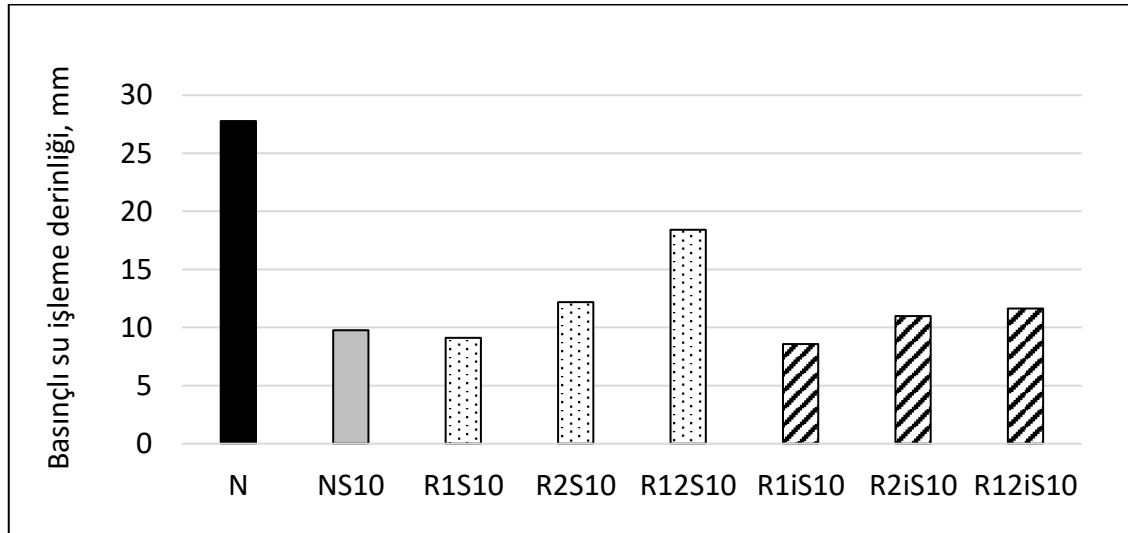
Şekil 4.61 Betonların ikincil kılcalık katsayısı değerleri

Basıncı su işleme derinliğine ait sonuçlar incelendiğinde (Şekil 4.62), RA ve RAI içeren betonların basınçlı su işleme derinliği değerlerinin kontrol betonuna kıyasla daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, kontrol betonuna ait basınçlı su işleme derinliği değeri 27,8 mm iken sırasıyla %20-40-60 RAI içeren R1iS10, R2iS10 ve R12iS10 betonlarına ait basınçlı su işleme derinliği değerleri 8,6 mm, 11,0 mm ve 11,6 mm olarak belirlenmiştir. Diğer yönden, RA ve RAI kullanım oranı betonda

arttıkça basınçlı su işleme derinliği değerleri artmış, fakat RAI içeren betonlarda söz konusu artış kısıtlı olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca, %10 SF içeren doğal agregalı NS10 serisi incelendiğinde, basınçlı su işleme derinliği değerinin kontrol betonu N'ye göre yaklaşık 3 kat daha düşük olduğu ve yakın değerlerin %20 RA içeren R1S10 ve R1iS10 serilerinde de elde edildiği görülmektedir.

Agrega kalitesi ve kaynağının beton geçirimsizlik özelliği üzerinde etkili olduğu yapılan benzer çalışmalarda rapor edilmektedir [86]. Ayrıca, 50 mm altındaki basınçlı su işleme derinliği değerleri, kalıcılık özellikli betonda en yüksek su işleme derinliği olarak çeşitli çalışmalarda ve standartlarda belirtilmektedir [81], [87]. Bu bakımdan, TOPSİS ile seçilen tüm beton serilerinin kalıcı beton özelliği taşıdığı görülmektedir. oBMM ile RA'nın yüzeyinde bulunan AOM kalıntısının büyük ölçüde giderilmesi agrega su emme değerlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, betonda SF'nin kullanılmasıyla ince tanecik yapıları SF'nin boşlukları doldurması ve betonda puzolanik etki oluşturması beton boşluklarını azaltmış ve netice itibarıyla basınçlı su işleme derinliği değerleri azalma göstermiştir.

Sonuç olarak, oBMM+SF kullanımının olumlu etkisi sonucu betonun dışa açık boşluklarında azalma oluşmuş, beton su emme değerleri azalmış, kılcallık ve basınçlı su işleme derinliği özelliklerinde iyileşmeler oluşmuştur.



Şekil 4.62 Betonların basınçlı su işleme derinliği değerleri

4.5.4 Klorür İyon Geçirirliiği Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Betonarme elemanlarda klorür taşınımı en ciddi beton kalıcılık durumlarından birisidir ve donatı korozyonu açısından büyük öneme sahiptir. Betonda klorür iyonlarının derinlere kadar taşınarak pas payının etkisiz kalması; donatı korozyonu oluşumunu başlatıp, betonarme eleman göçmesine ve yapıda hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, beton geçirirliiğini ve klorür taşınımını engelleyici önlemler/adımlar tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu noktada, betonda mineral katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranının azaltılması ve akışkanlaştırıcı (özellikle polikarboksilik eter esaslı katkıları) kullanımı geçirirlilik direnci artırıcı ve etkili beton tasarım parametrelerindendir [64], [73]. Diğer yönden, beton geçirirliiğini artıran ve klorür iyonu taşıyan malzemelerin betonda kullanımı da dikkatle yapılmalıdır. Geri kazanılmış agreganın poroz yapısının geçirirliiği artırıcı etkisi ve geri kazanılmış agrega kaynağı kaynaklı klorür tuzlarının geri kazanılmış agrega bünyesinde olma olasılığı, geri kazanılmış agreganın beton/betonarme elemanlarda dikkatle kullanımını gerektirmektedir [73]. Bu açıdan, boşluklu ve çatlaklı yapıdaki eski harç kalıntısının geri kazanılmış agregadan iyileştirme yöntemi ile giderilmesi, beton karışımlarında geçirirliiği azaltmak için çeşitli mineral katkıların kullanımı veya geri kazanılmış agreganın eski harç kalıntısının mineraller ile güçlendirilmesi önem kazanmaktadır.

Şekil 4.63'tan görüleceğı üzere, belirlenen en iyi beton serilerinin kontrol betonuna göre daha düşük klorür taşınımı katsayıları değerine sahip olduğı ve %10 silis dumanının RA içeren betonlarda iyi sonuçlar verdiğı görölmektedir. Örneğın, kontrol betonu klorür taşınım katsayısı değeri $12,42 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ olarak belirlenirken, %20-40-60 oranlarında RA içeren R1S10, R2S10 ve R12S10 serileri için klorür taşınım katsayıları sırasıyla $3,84 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $4,88 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ve $5,33 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir.

Diğer yönden oBMM ile iyileştirilen RAI'nin kullanıldığı serilere ait sonuçlar incelendiğinde; %20-40-60 oranlarında RAI içeren R1iS10, R2iS10 ve R12iS10 serileri için klorür taşınım katsayıları sırasıyla $1,48 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $2,20 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ve $2,60 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir. Artan RA ve RAI kullanım oranı sonucu

betonların klorür taşınımı katsayısı değerleri artmış, fakat RAI içeren betonların klorür taşınımına karşı daha dirençli oldukları tespit edilmiştir.

Ayrıca, RA ve RAI içeren betonlara ait değerler kontrol betonuna göre daha küçük olsalar da NS10 betonuna göre daha yüksektir ve geri kazanılmış agreganın betonda oluşturduğu geçirimsizlik artırıcı etki yanında geri kazanılmış agreganın bünyesinde taşınarak gelen ve matrise nüfuz eden klorür iyonlarının da sonuçları olumsuz etkilediği söylenebilir (Bknz. Agregada Deney Sonuçları).

Yapılan benzer çalışmalarda klorür iyon geçirimsizliği test sonuçları için değerlendirme kriterleri önerilmiştir. Betonların klorür iyon taşınımına karşı gösterdiği direnci ifade etmek bakımından, literatürde önerilen aşağıdaki limitler bu çalışmadaki betonların durumu hakkında bir fikir vermektedir [88]. Bu kriterlere göre:

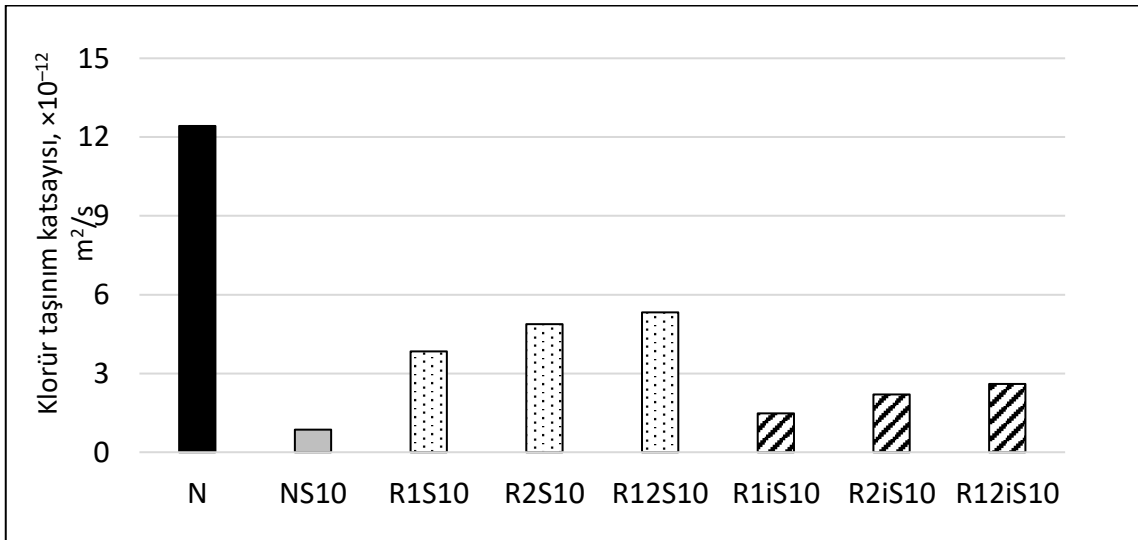
- i. Klorür taşınım katsayısı $<2,5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ise beton klorür iyonu girişine karşı çok iyi derecede dirençlidir.
- ii. Klorür taşınım katsayısı $2,5-5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ aralığında ise beton klorür iyonu girişine karşı iyi derecede dirençlidir.
- iii. Klorür taşınım katsayısı $5-10 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ aralığında ise beton klorür iyonu girişine karşı orta derecede dirençlidir.
- iv. Klorür taşınım katsayısı $10-15 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ aralığında ise beton klorür iyonu girişine karşı düşük derecede dirençlidir.
- v. Klorür taşınım katsayısı $>15 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ise beton klorür iyonu girişine karşı çok düşük derecede dirençlidir.

Bu kriterlere göre betonların klorür iyonu girişine karşı sahip oldukları dirençler şöyledir:

- i. Kontrol betonu, klorür iyon girişine karşı düşük derecede dirençlidir.
- ii. NS10 ile neredeyse tüm RAI içeren betonlar klorür iyon girişine karşı çok iyi derecede dirençlidir.

- iii. RAI içeren betonlardan R12iS10 betonu sınır değeri olan $2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 'a çok yakın olarak $2,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ taşıma katsayısına sahiptir ve R12iS10 iyi derecede dirençlidir.
- iv. Neredeyse tüm RA içeren betonlar klorür iyon girişine karşı iyi derecede dirençlidir.
- v. RA içeren betonlardan R12S10 betonu sınır değeri olan $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 'a çok yakın olarak $5,33 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ taşıma katsayısına sahiptir ve R12S10 orta derecede dirençlidir.
- vi. oBMM+SF kullanımı ile betonların klorür iyonu girişine karşı dirençleri artmıştır.

Klorür iyon taşıma özelliği incelenen ve 4 farklı mineral katkı (silis dumanı, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin) kullanılarak yapılan benzer bir çalışmada; geri kazanılmış agrega içeren betonlarda en etkili klorür iyon taşıma azaltıcı mineral katkının silis dumanı olduğu ve %10 oranında silis dumanı kullanımının en olumlu etkiyi gösterdiği rapor edilmektedir [89]. Bu tez çalışmasında belirlenen en iyi beton serileri %10 silis dumanı içermekte olup, sonuçlar paralellik göstermektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında, oBMM+SF kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği de tespit edilmiştir.



Şekil 4.63 Betonların klorür taşıma katsayısı değerleri

4.5.5 Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Geri kazanılmış agregalı betonların yaşam döngüsü çevresel etki faktörleri arasında bulunan harcanan enerji miktarı ve karbon ayak izi değerleri, sıklıkla incelenmeyen parametreler arasındadır, fakat uygulamalarda dikkate alınması gerekli parametrelerdir [59]. Betonların muhtemel çevresel etkilerini görmek bakımından döngüde harcanan enerji miktarı ve beton karbon ayak izi parametreleri göz önüne alındığında; karbon salınımı kaynaklı küresel ısınma problemiyle beton sektörünün doğrudan ilişkili olduğu ve çimento üretim tesislerinin yüksek karbon salınımına sahip oldukları görülmektedir [46]. Bu açıdan; yaşam döngüsü boyunca görecel olarak düşük karbon ayak izine sahip betonların sektörde belirlenmesi ve uygulamada kullanılması, küresel ısınmanın engellenmesi bakımından önemli hale gelmiştir.

Bu tez kapsamında, TOPSİS yöntemiyle belirlenen betonlar üzerinde yaşam döngüsü analizleri yapılmış ve betonların karbon ayak izi değerleri belirlenmiştir. Karbon ayakizi değeri hesaplanırken iki senaryo kurgulanmıştır. Birinci senaryoda, beton atığın tesiste geri dönüştürüldüğü ve taze betonun santralde üretildiği varsayılırken, ikinci senaryoda yerinde geri dönüşüm ve şantiyede mobil tesiste beton üretimi yapıldığı varsayılmıştır.

Analizler sonrası elde edilen betonlara ait karbon ayak izi değerleri incelendiğinde (Tablo 4.10 ve Şekil 4.64); yaşam döngüsü boyunca NS10 ile R1S10, R2S10, R12S10 ve R1iS10, R2iS10, R12iS10'a ait karbon ayak izinin kontrol betonuna kıyasla % cinsinden Senaryo 1'de -1,8 ile -4,5, -4,6, -9,7 ve -4,4, -4,3, -4,4 ve Senaryo 2'de -2,1 ile -4,7, -4,9, -5,1 ve -4,6, -4,5, -4,7 azaldığı tespit edilmiştir. Beton üretiminde SF kullanımı sonucu daha az çimento kullanılması ve kullanılmayan çimento miktarınca "çimento üretiminde ve taşınmasında atmosfere salınan karbonun" atmosfere salınmaması yaşam döngüsündeki salınan karbon miktarını azaltmıştır. Ayrıca, betonda RA ve RAi'nin NA ile yer değiştirilerek kullanımı sonucu betonda daha az miktarda NA'nın kullanımı ve kullanılmayan NA miktarınca "agrega üretiminde ve taşınmasında atmosfere salınan karbonun" atmosfere salınmaması yaşam döngüsündeki salınan karbon miktarını azaltmıştır.

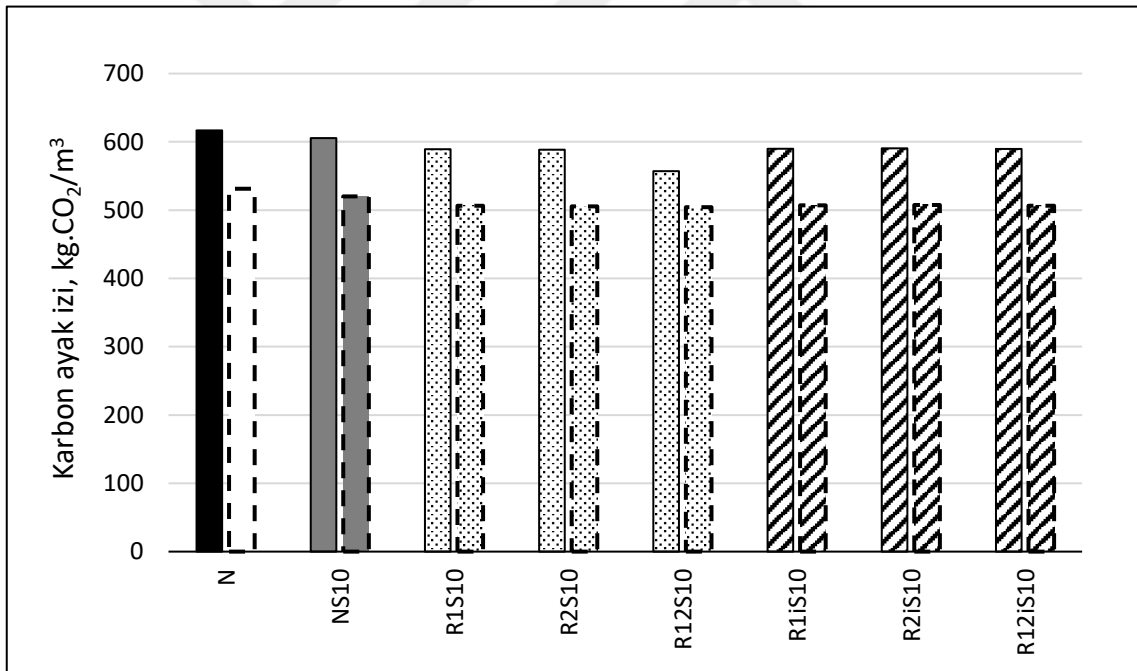
Diğer yönden, artan oranda RA kullanımı sonucu karbon ayak izi değerleri azalmış fakat artan oranda RAI kullanımı sonucu karbon ayak izi değerleri pek değişmemiştir. RA kullanımı sonucu oluşan düşüş miktarı, oBMM iyileştirme işlemi ile salınan karbon miktarı ile yaklaşık aynı olduğu için RAI içeren betonların karbon ayak izi yaklaşık aynı olmuştur. Ayrıca, oBMM sebebiyle oluşan karbon emisyonu artışı her bir RAI kullanım oranı için farklı olarak belirlenmiştir. Bunun temel sebebi, 4-11,2mm ve 11,2-22,4mm RA için oBMM iyileştirme işleminin farklı olması ve RA'lar için farklı devirlerde iyileştirme uygulanırken (4-11,2mm RA için 300R-12S ve 11,2-22,4mm RA için 500R-10S uygulanır) harcanan enerjinin farklı olmasıdır. Ayrıca, oBMM uygulamasının farklı enerji tüketimleri yanında, hem RAI'nin farklı oranlarda betonda kullanımı ve hem de betonlarda kullanılan farklı miktarlardaki RAI'nin geri kazanım tesisinden beton tesisine taşınması için gereken enerji miktarlarının farklı olması döngüdeki karbon salınımı değerlerini farklı kılmıştır.

Diğer yönden, beton atığın tesiste dönüştürülmesi yerine şantiyede yerinde dönüştürülmesinin bazı avantajlar sağladığı da tespit edilmiştir. Senaryo 2'ye ait karbon ayak izi değerlerinin Senaryo 1'e ait karbon ayak izi değerlerinden daha az olması oluşan avantajı göstermektedir. Yerinde geri kazanım ile daha düşük emisyon değerlerinin elde edilmesinde, beton bileşenlerinin ve taze betonun taşınması esnasında oluşan emisyonun 1. Senaryoya göre daha düşük olması ve atık betonun yerinde dönüşüm ile geri kazanılmış agregaya dönüştürülüyor olması dolayısıyla agreganın taşınmaması temel etkenlerdir. Agreganın nakliyesi ile global ısınmaya olan etkinin yüksek olduğu, benzer çalışmalarda da rapor edilmektedir [90].

Ayrıca, sonuçlar incelendiğinde, Senaryo 1'de iyileşmiş geri kazanılmış agregalı betonların karbon ayak izi değerleri iyileşmemiş geri kazanılmış agregalı betonların karbon ayak izi değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiş ve benzer durum Senaryo 2'de de gözlemlenmiştir. Fakat, betonlar için elde edilen fark değerler Senaryo 2'de daha küçüktür.

Tablo 4.10 Yaşam Döngüsü Analizi sonuçları

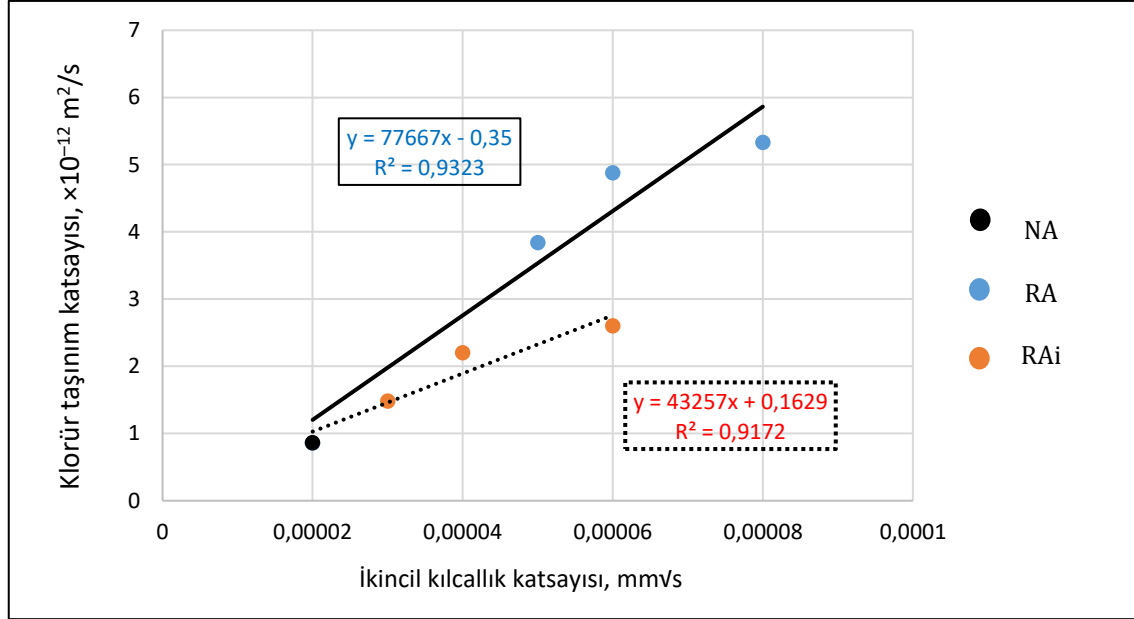
Numune adı	Salınan karbon miktarı, kg.CO ₂ /m ³		Değişim, %		Değişime RA veya RAi etkisi, %		Değişime oBMM etkisi, %	
	Tesiste	Yerinde	Tesiste	Yerinde	Tesiste	Yerinde	Tesiste	Yerinde
N	616,7	531,3	-	-	-	-	-	-
NS10	605,5	520,1	-1,8	-2,1	-	-	-	-
R1S10	589,2	506,4	-4,5	-4,7	-2,6	-2,9	-	-
R2S10	588,5	505,5	-4,6	-4,9	-2,8	-3,0	-	-
R12S10	557,1	504,3	-9,7	-5,1	-7,9	-3,3	-	-
R1iS10	589,9	507,0	-4,4	-4,6	-2,5	-2,8	+0,1	+0,1
R2iS10	590,5	507,5	-4,3	-4,5	-2,4	-2,7	+0,3	+0,4
R12iS10	589,6	506,4	-4,4	-4,7	-2,6	-2,9	+5,3	+0,4



Şekil 4.64 Betonların karbon ayakizi değerleri (sürekli kenar çizgisi: tesiste geri dönüşüm, kesikli kenar çizgisi: yerinde geri dönüşüm)

4.5.6 Kalıcılık Deney Sonuçlarının Diğer Deney Sonuçlarıyla İlişkileri

Şekil 4.65 incelendiğinde, beton kılcallık katsayısı ve klorür taşınım katsayısı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu, kılcallık katsayısı arttıkça klorür taşınım katsayısının arttığı görülmektedir. RA içeren betonların RAI içeren betonlara kıyasla daha yüksek kılcallık katsayısına sahip olduğu ve klorür taşınım katsayılarının da daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



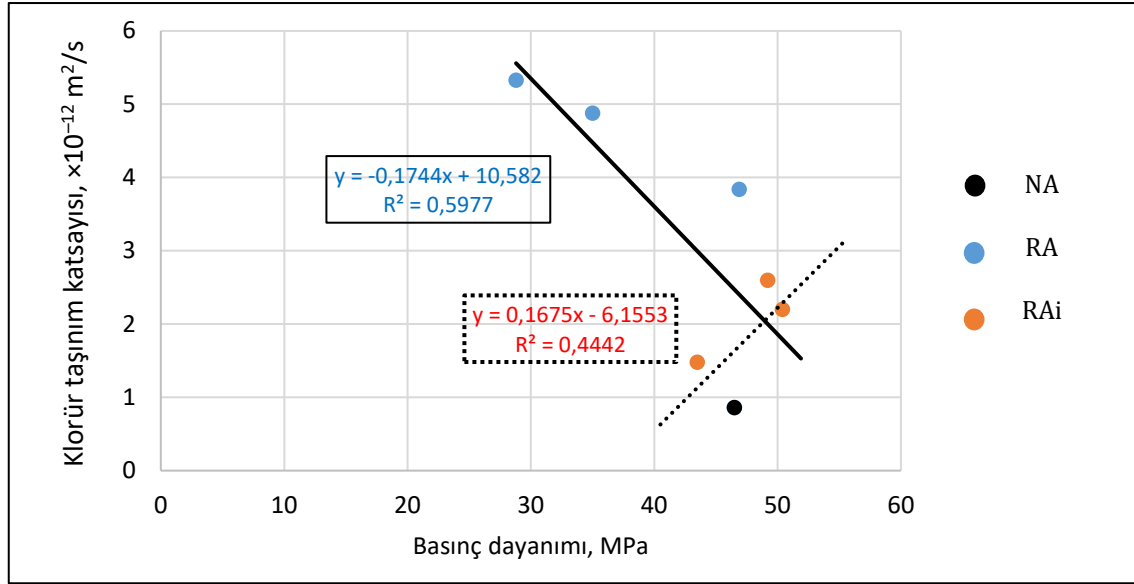
Şekil 4.65 Klorür taşınım katsayısı ile kılcallık katsayısı ilişkisi

Bilindiği üzere, beton dayanımları ile sertleşmiş betonun içerdiği boşluk miktarı arasında ters orantı bulunmaktadır ve yüksek dayanımlı betonlar daha az boşluk içeriğine sahiptirler [63]. Bu bakımdan, basınç dayanımı arttıkça betonun daha az boşluk içerdiği ve beton boşluk değerinin azalması ile boşlukla bağlantılı diğer durumların da dolaylı olarak etkilendiği söylenebilir. Şekil 4.66’da görüleceği üzere, RA içeren geri kazanılmış agregalı betonların basınç dayanımının artışı ile klorür iyon katsayılarının azaldığı görülmektedir.

RAi içeren geri kazanılmış agregalı betonların basınç dayanımı ile klorür taşınım katsayısı ilişkisi incelendiğinde ilişkinin düşük korelasyon katsayısına sahip zayıf bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

RAi içeren betonların basınç dayanımları ve klorür taşınım katsayısı tekil değerleri incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu, beton karışımında artan RAI

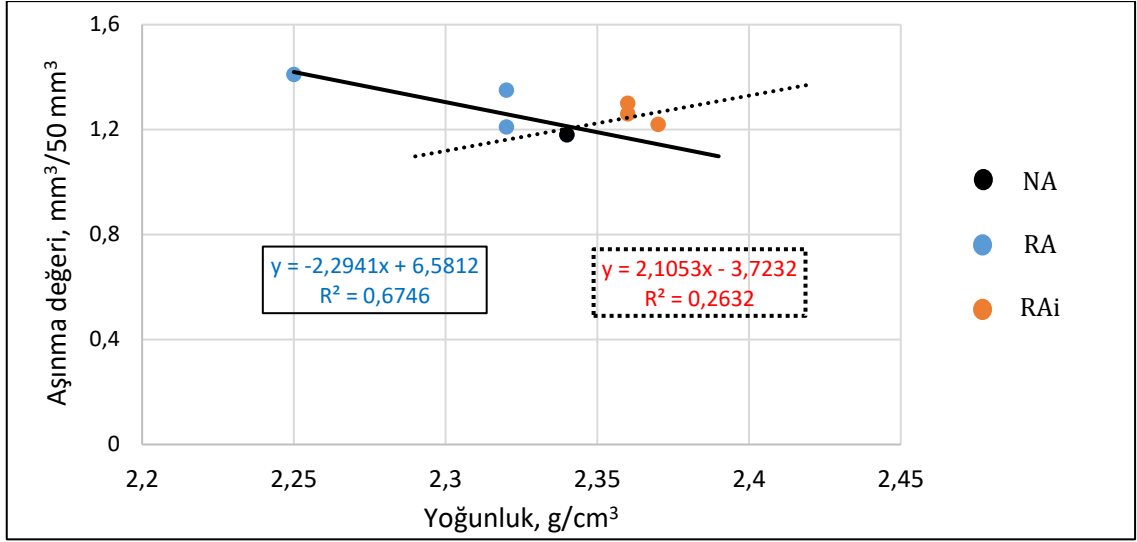
kullanımı sonucu beton özelliklerinin aynı oranda değişim göstermediği görülmektedir. Bu durumun, düşük korelasyon katsayısı elde edilmesine neden olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 4.66 Klorür taşıma katsayısı basınç dayanımı ilişkisi

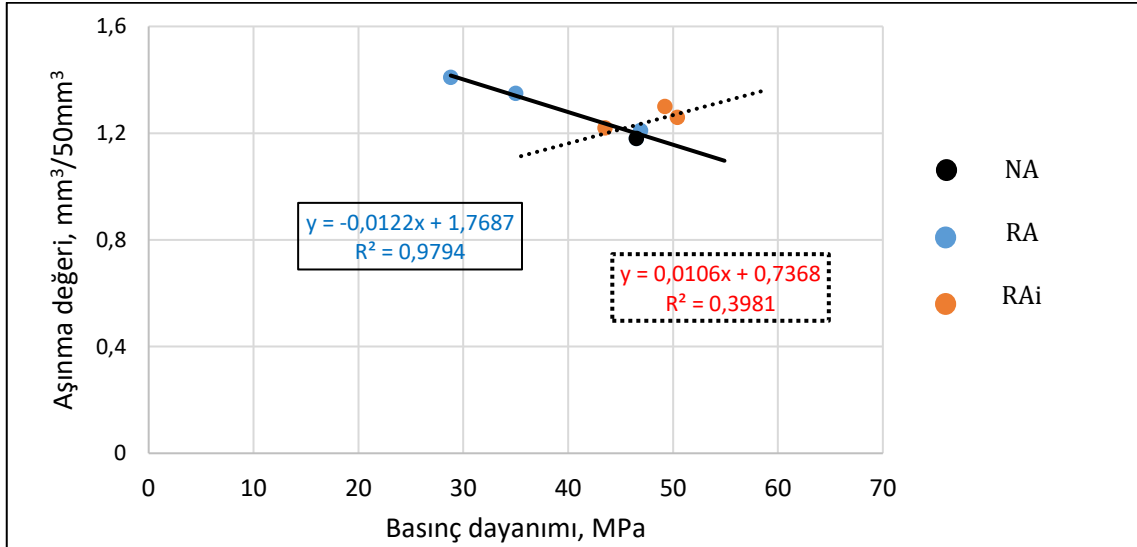
Betonlara ait aşınma değeri-yoğunluk ilişkisi Şekil 4.67’de verilmektedir. Şekil 4.67 incelendiğinde, RA içeren betonların yoğunluk ve aşınma değerleri arasında ters orantı olduğu ve yoğunlukların azalmasıyla aşınma değerlerinin arttığı, fakat RAi içeren betonlarda yoğunluk ile aşınma değerleri arasında doğru orantı olduğu belirlenmişse de bu ilişkinin düşük korelasyon katsayılı bir ilişki olduğu görülmektedir.

Tekil değerler incelendiğinde, RAi içeren betonların yoğunluk ve aşınma değerlerinin birbirine yakın olmasının ve betonda artan RAi kullanımı sonucu beton özelliklerinde orantılı belirgin bir değişimin oluşmamasının burada etkili olduğu söylenebilir.



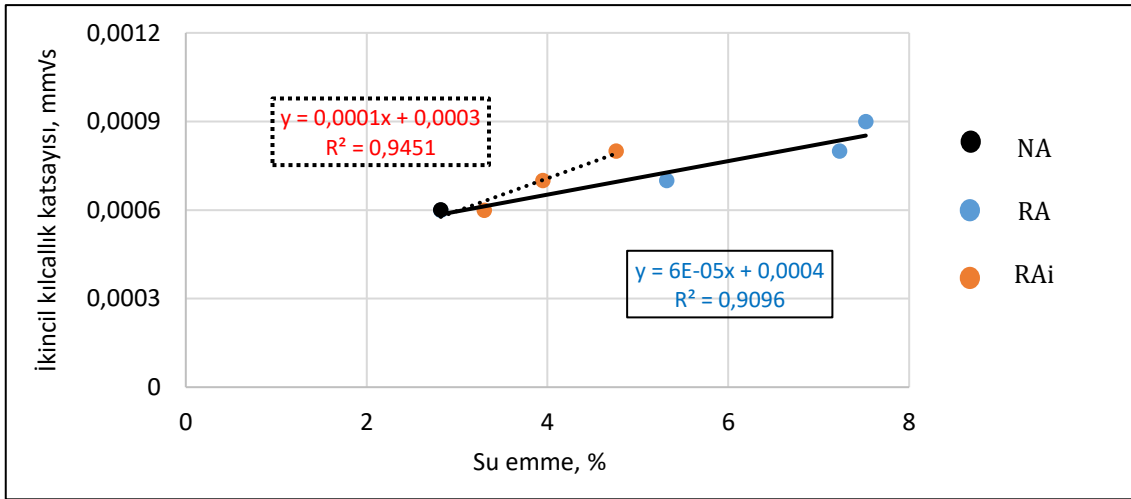
Şekil 4.67 Aşınma değeri ile yoğunluk ilişkisi

Aşınma değeri ile basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, RA içeren betonlarda basınç dayanımı arttıkça aşınma değerleri düşüş göstermiştir (Şekil 4.68). RAi içeren betonlara ait ilişki incelendiğinde, ilişkinin düşük korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.66-4.67'e ait veriler üzerinde RAi betonları için yapılan değerlendirmelere paralel olarak Şekil 4.68'te benzer sonuçlar gözlemlenmiş ve artan RAi kullanımı ile beton özellikleri orantılı olarak değişiklik göstermemiştir.

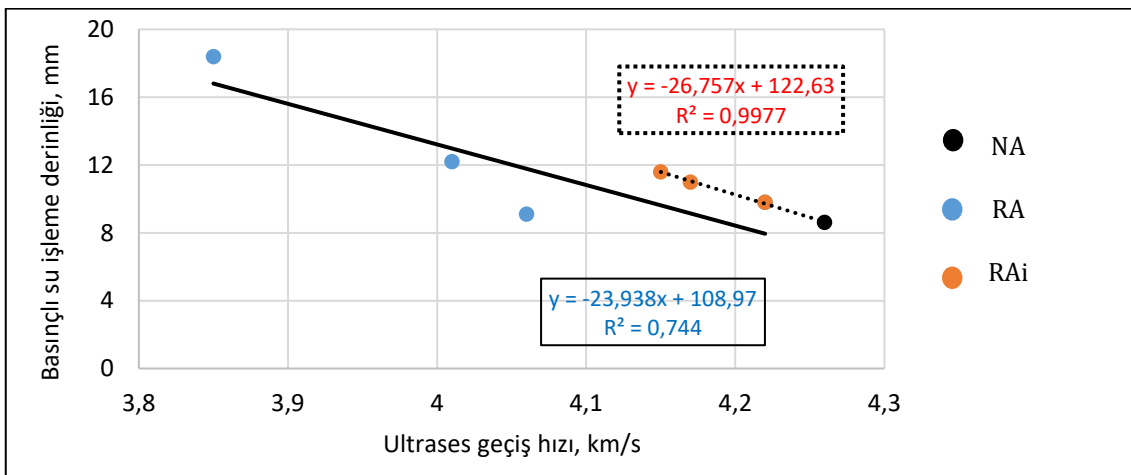


Şekil 4.68 Aşınma değeri ile basınç dayanımı ilişkisi

Dışa açık boşlukların etkili olduğu beton özelliklerinden olan beton kılcallık katsayısı ve beton su emme değeri arasındaki ilişki incelendiğinde, bu iki özellik arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğu görülmektedir (Şekil 4.69). Kılcallık katsayısının artmasıyla su emme değerinin de arttığı ve betonların daha fazla miktarda suyu bünyesine alabildiği yorumu yapılabilir. Betonlara ait basınçlı su işleme derinliği ultrases geçiş hızı ilişkisi incelendiğinde, aralarında ters orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.70). Ultrases geçiş hızı betonun doluluğu (sıklığı) hakkında bilgi vermekte olup betonların boşlukları azaldıkça ultrases geçiş hızı artış göstermektedir. Ultrases geçiş hızı artarken basınçla su işleme derinliğinin ise azaldığı ve beton bünyesine basınçlı suyun giriş yapmakta zorlandığı savunulabilir.



Şekil 4.69 Kılcallık katsayısı su emme ilişkisi



Şekil 4.70 Basınçlı su işleme derinliği ultra ses geçiş hızı ilişkisi

4.5.7 Kalıcılık Deneylerine Ait Sonuçların ve Yaşam Döngüsü Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında, birçok beton serisi üretilmiş ve en iyi beton serileri doğal agregalı, RA ve RAI içeren betonlar arasından seçilerek objektif olarak belirlenmiştir. Belirlenen betonların kalıcılık özellikleri ve karbon ayak izi değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan değerlendirmeler sonucu, aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- **Aşınma özelliği:** Geri kazanılmış agregalı betonların aşınma dirençleri kontrol betonuna göre daha düşüktür (R1S10 hariç). RA ve RAI oranı arttıkça beton aşınma değerlerinin arttığı görülmektedir. RAI içeren betonların aşınma değerlerinin RA içeren betonlara göre daha düşüktür ve aşınma miktarı iyileştirme yöntemi etkisiyle azalmıştır.
- **Kılcallıkla su emme ve basınçla su işleme derinliği özelliği:** Optimize edilmiş mekanik iyileştirme yöntemi ile RA'nın yüzeyinde bulunan AOM'nin büyük ölçüde giderilmesi agrega su emme değerlerini azaltmıştır. Ayrıca, SF ince tanecik yapısıyla boşlukları doldurarak ve puzolanik etkisiyle matrisi iyileştirerek geçirimsizlik değerlerini düşürmüştür. Böylelikle, oBMM+SF etkisi ile kılcallık katsayısı ve basınçlı su işleme derinliği değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir.
- **Klorür iyon geçirimsizliği özelliği:** SF kullanımı etkisi ile betonların klorür iyon girişine karşı direnci artmış, RAI içeren betonlarda söz konusu direnç daha belirgin şekilde gözlemlenmiştir.
- **Karbon ayak izi değerleri:** Betonların karbon ayak izi değerleri RA ve RAI kullanımı ve SF kullanımı sonucu azalmıştır. Fakat iyileştirme işlemi uygulanması ek enerji gerektirdiği için betonların karbon ayak izi değerini artırmıştır. Ayrıca, yerinde geri dönüşüm işlemi, tesiste geri dönüşüm işlemine göre daha düşük karbon salınımına sebebiyet vermektedir.

Beton mekanik ve fiziksel performansı dikkate alınarak yapılan birçok çalışmada [64], [71], [91]; beton kalıcılık özellikleri gibi parametreler göz önüne alınmadan ve incelenen mekanik-fiziksel özellikler bakımından %30 geri kazanılmış agrega ile %5 silis dumanı kullanımının en uygun kullanım oranları olduğu literatürde

belirtilmişse de, beton fiziksel-mekanik özellikleri yanında kalıcılık özelliklerinin de dikkate alındığı geri kazanılmış agregalı beton çalışmalarında [64], [89]; optimum geri kazanılmış agregata ve mineral katkı oranları önerilerinin söz konusu çalışmalardan farklı olduğu tespit edilmiş, betonda %100'e kadar geri kazanılmış agregata ile %10 SF kullanımının hem beton fiziksel-mekanik özellikleri hem de beton kalıcılık özellikleri bakımından kontrol betonuna yakın/daha iyi performans verdiği rapor edilmiştir. Bu bakımdan, birçok beton parametresi incelenmesi sonucu en uygun kullanım oranının yapılan çalışmalarda önerilmesi daha yerinde bir yaklaşım olacaktır.

Yürütülen benzer çalışmalarda, beton fiziksel-mekanik-kalıcılık özellikleri incelenerek önerilen beton malzemesi kullanım oranlarının (örneğin, %100'e kadar RA+ %10 SF) [64], [89] bu tez kapsamında birçok beton serisi içinden objektif olarak tespit edilen en iyi beton serilerinin içerdiği beton malzemeleri ile benzer olması dikkat çekici bir sonuçtur.

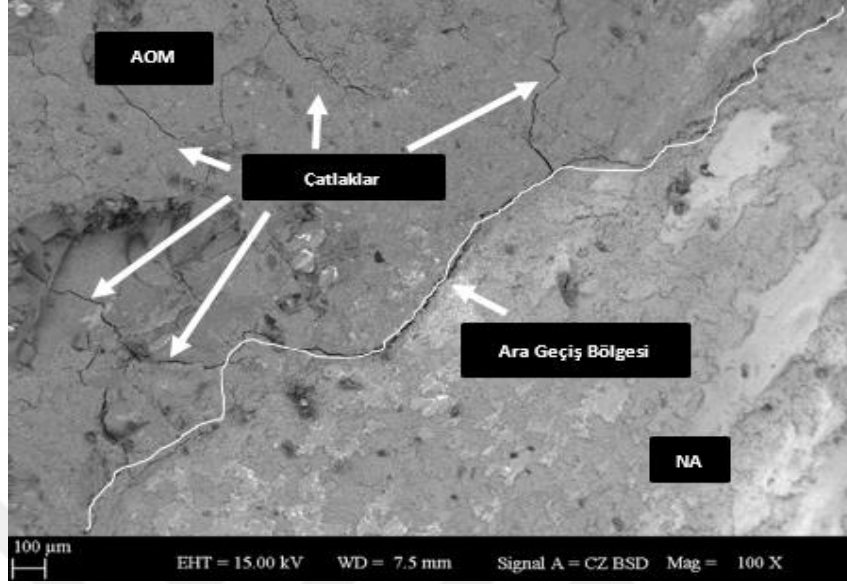
Bu tez kapsamında belirlenen RA içeren en iyi betonlar kontrol betonuna yakın performans özellikleri sergilemişlerdir. Ayrıca, tespit edilen diğer en iyi beton serileri %60'a kadar RAI ile %10 SF içermekte olup, %60'a kadar RA ile %10 SF içeren en iyi beton serilerinden genellikle daha iyi sonuçlar vermiştir ve bu da dikkat çekici diğer bir sonuçtur.

4.6 Beton İçyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi

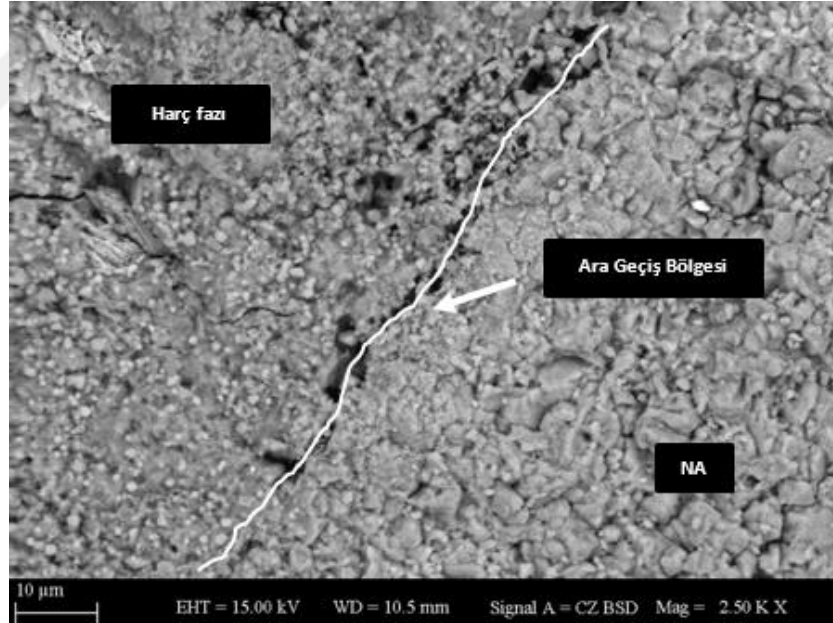
Beton numunelerden alınan kesitler üzerinde taramalı elektron mikroskobu ile içyapı görüntüleme çalışmaları yapılmış, 1) RA, 2) NA içeren beton, 3) RA içeren beton ve 4) RAI içeren beton olmak üzere dört farklı betondan görüntüler alınmıştır.

RA üzerinden alınan görüntülerde; AOM'nin çatlaklı bir yapıya sahip olduğu, RA bünyesinde bulunan doğal agreganın çatlaksız olduğu, AOM ile doğal agregata arasında bulunan ara geçiş bölgesinin ise çatlaklı ve boşluklu bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.71). Agregalar üzerinde yapılan fiziksel deneylerde RA'nın NA'ya kıyasla yüksek su emme değerine ($\sim$ %8-9) ve düşük yoğunluğa ($\sim$ 2,2 g/cm³) sahip olduğu daha önceki bölümlerde belirlenmiş olup, RA'da yapılan içyapı gözlemlerinde belirlenen kusurların fiziksel özellikler üzerinde etkili olduğu

söylenbilir. NA içeren beton incelendiğinde, harç fazı ile NA arasında bulunan bölgenin çatlaksız olduğu, agrega ile harcın iyi aderans gösterdiği ve bölgenin kompakt yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.72).



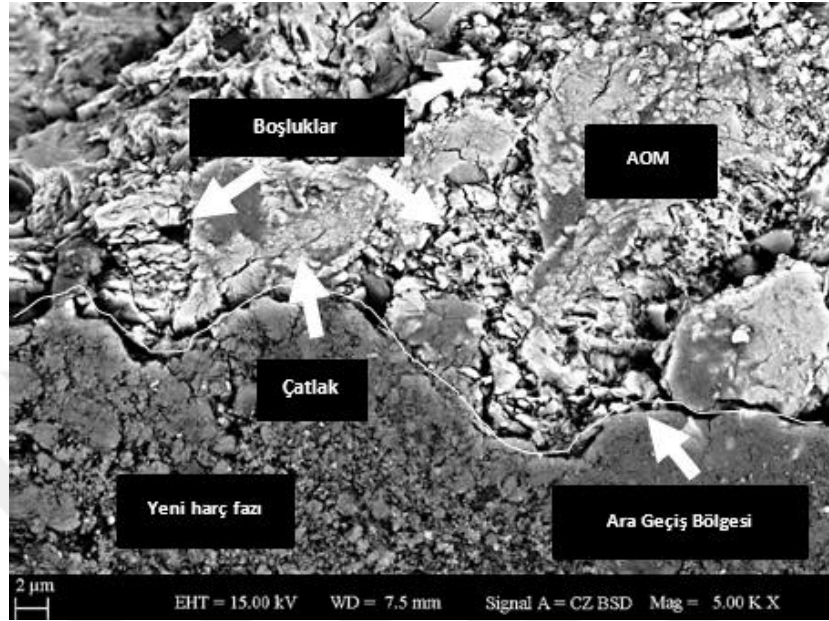
Şekil 4.71 RA üzerinden alınan görüntü



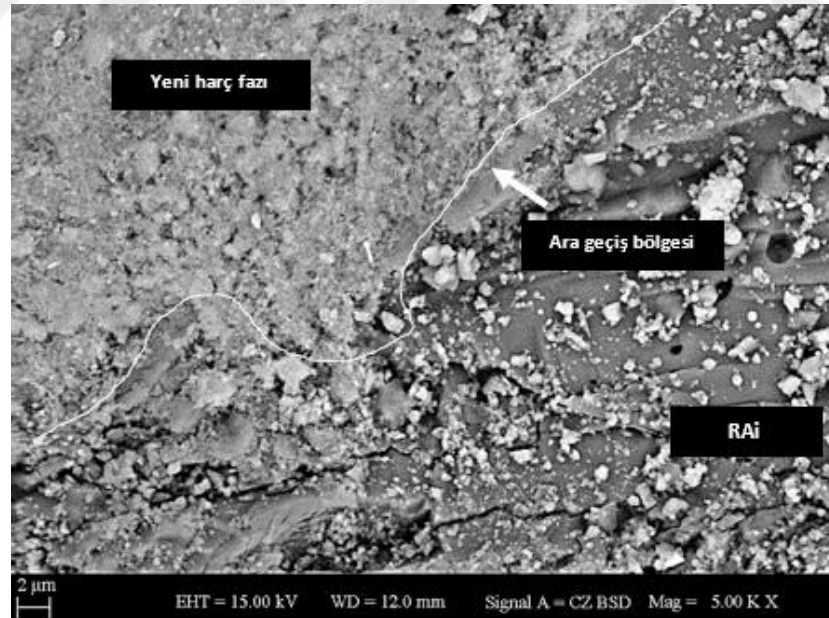
Şekil 4.72 NA içeren betondan alınan görüntü

RA ve RAi içeren betonlar incelendiğinde, RA kullanımı durumunda betonda AOM'nin kusurlu yapılar (boşluk, çatlak, vs) içerdiği ve ara geçiş bölgelerinde aderans kayıplarının da olduğu fakat RAi içeren betonlarda harç fazının RAi'ye iyi

yapışmış olduğu görülmektedir (Şekil 4.73-4.74). Etkili bir iyileştirme işlemi sonucunda geri kazanılmış agreganın minimum düzeyde AOM içermesinin sağlandığı ve etkili şekilde iyileştirme işleminin tamamlandığı, böylelikle beton içyapı özelliklerinin bu durumdan olumlu etkilendiği söylenebilir.

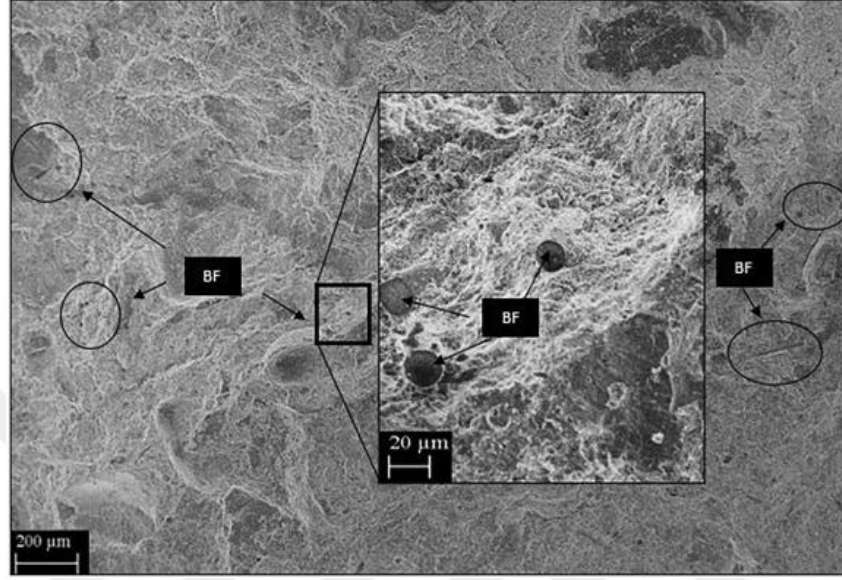


Şekil 4.73 RA içeren betondan alınan görüntü

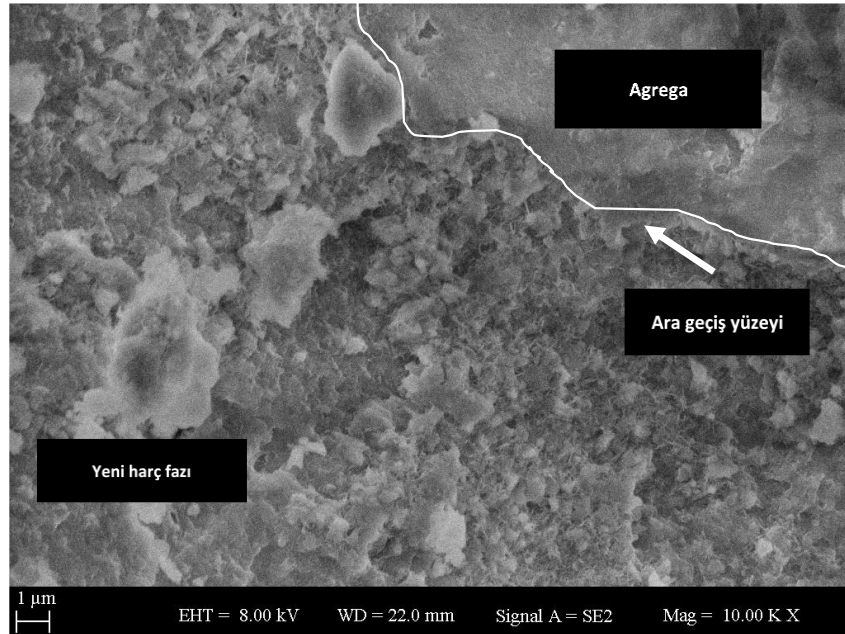


Şekil 4.74 RAI içeren betondan alınan görüntü

BF içeren betonlar incelendiğinde, BF'nin homojen olarak çimento matrisinde dağıldığı topaklanmanın oluşmadığı görülmektedir (Şekil 4.75). BF'in çimento matrisi ile yapışarak çoğunluğunun yük altında koptuğu gözlemlenmiştir. SF içeren betonlar incelendiğinde, harç fazının ve ara geçiş bölgesinin kompakt bir yapıda olduğu ve agregaya ile harç fazının iyi kenetlendiği görülmektedir (Şekil 4.76).



Şekil 4.75 RA ve BF içeren betondan alınan görüntü



Şekil 4.76 RA ve SF içeren betondan alınan görüntü

Yapılan içyapı görüntüleme ve inceleme işlemleri sonucu;

- RA'da yer alan AOM fazının kusurlar içerdiği,
- RAI içeren betonlarda harç fazında ve ara geçiş bölgesinde, RA içeren betonlara kıyasla daha az kusur olduğu,
- BF'nin çimento matrisine gömüldüğü, çoğunluğunun yük altında sıyrılmadan koptuğu,
- SF kullanımıyla kompakt bir matris ve ara geçiş yüzeyi oluştuğu,

belirlenmiştir.

4.7 Beton Özelliklerinin Tahminine Yönelik Çalışmalar

Sertleşmiş beton özelliklerinin tahmin edilmesini sağlayacak yüksek korelasyon katsayılı bağıntılar, beton karışımlarında kullanılan malzeme oranları ve deney sonuçları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Bağıntıların türetilmesinde; malzeme oranları bağımsız değişken ve deney sonuçları bağımlı değişken olarak dikkate alınmış ve ilgili detaylar aşağıda verilmektedir.

a) Beton karışımındaki iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş geri kazanılmış agrega oranları (RA ve RAI, %), silis dumanı oranı (SF, %) kullanılarak beton su emme (SE, %) değerinin tahmini (4.10) -(4.11) ile verilmektedir.

$$SE = 5,025 - 0,218 SF + 0,082 RA \quad R=0,945 \quad (4.10)$$

$$SE = 3,961 - 0,136 SF + 0,037 RAI \quad R=0,981 \quad (4.11)$$

(4.10)-(4.11) incelendiğinde, beton su emme değeri ile beton üretiminde kullanılan RA ve RAI oranının arasında doğru orantı ve SF ile ters orantı olduğu görülmektedir. Bu durum, su emme deney sonuçlarının değerlendirildiği bölümde elde edilen sonuçlarla, beklendiği üzere, paralellik göstermektedir.

b) Basınç dayanımı (f_c , MPa) tahmini için, beton üretiminde kullanılan RA (%), RAI (%), SF (%) ve BF (%) oranlarına bağlı olarak (4.12)-(4.15) geliştirilmiştir.

$$f_c = 36,731 + 0,872 SF - 0,238 RA \quad R=0,903 \quad (4.12)$$

$$f_c = 34,106 + 1,278 SF - 0,011 RAI \quad R=0,948 \quad (4.13)$$

$$f_c = 36,310 + 2,697 \text{ BF} - 0,188 \text{ RA} \quad R=0,888 \quad (4.14)$$

$$f_c = 37,477 + 4,177 \text{ BF} - 0,050 \text{ RAi} \quad R=0,656 \quad (4.15)$$

(4.12)-(4.15) incelendiğinde; basınç dayanımı ile RA ve RAi kullanım oranı arasında ters orantı olduğu ve RA ve RAi kullanım oranının artmasıyla basınç dayanımın azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalarda beton karışımlarında SF ve BF, geri kazanılmış agregalı beton performansını artırmak amacıyla kullanılmıştı. Bağıntılarda, beklediği üzere, SF ve BF'in beton basınç dayanımı ile doğru orantılı olduğu ve SF ve BF kullanım oranları arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir.

c) Beton üretiminde kullanılan RA (%), RAi (%), SF (%) ve BF (%) oranlarına bağlı olarak elastisite modülü (E, MPa) tahmini (4.16)-(4.19) ile verilmektedir.

$$E = 25693 + 480,1 \text{ SF} - 91,947 \text{ RA} \quad R=0,826 \quad (4.16)$$

$$E = 26163 + 840,825 \text{ SF} - 65,568 \text{ RAi} \quad R=0,781 \quad (4.17)$$

$$E = 28118 + 2632,543 \text{ BF} - 134,931 \text{ RA} \quad R=0,789 \quad (4.18)$$

$$E = 27319 + 4327,171 \text{ BF} - 51,421 \text{ RAi} \quad R=0,616 \quad (4.19)$$

(4.16)-(4.19) incelendiğinde, elastisite modülü ile beton üretiminde kullanılan RA ve RAi oranları arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Diğer yönden, elastisite modülü ile SF ve BF oranları arasında doğru orantı olduğu belirlenmiş ve SF ve BF'nin betonun elastisite modülü değerlerini artırdığı deneysel olarak tespit edilmişti.

d) Kalıcılık deneyleri TOPSİS yöntemi ile belirlenen en iyi beton serileri üzerinde gerçekleştirilmiş olup bu seriler çeşitli oranlarda RA ile RAi ve %10 SF içermekte olup BF ve SF+BF içermemektedirler. Bu nedenle, kalıcılık özellikleri için türetilen bağıntılarda; bağımsız değişkenler RA (%) ve RAi (%) olarak belirlenmiştir. (4.20)-(4.27)'de bağımlı değişken $D_{nssm} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ klorür taşınım katsayısını, BSD (mm) basınçlı su işleme derinliğini, k (mm $\sqrt{\text{s}}$) ikincil kılcallık katsayısını, AD (mm $^3/50\text{mm}^3$) aşınma değerini ifade etmektedir.

$$D_{nssm} = 1,560 + 0,0723 \text{ RA} \quad R=0,927 \quad (4.20)$$

$$D_{nssm} = 0,894 + 0,0297 \text{ RAi} \quad R=0,994 \quad (4.21)$$

$$BSD = 8,040 + 1,445 \text{ RA} \quad R=0,882 \quad (4.22)$$

$$BSD = 9,080 + 0,039 \text{ RAi} \quad R=0,756 \quad (4.23)$$

$$k = 2E-05 + 10E-7 \text{ RA} \quad R=0,981 \quad (4.24)$$

$$k = 2E-05 + 6E-7 \text{ RAi} \quad R=0,983 \quad (4.25)$$

$$AD = 1,163 + 0,0042 \text{ RA} \quad R=0,972 \quad (4.26)$$

$$AD = 1,181 + 0,0020 \text{ RAi} \quad R=0,994 \quad (4.27)$$

Kalıcılık özellikleri için geliştirilen (4.20)-(4.27) incelendiğinde, kalıcılık özellikleri ile RA ve RAi arasında doğru orantı olduğu ve beton üretiminde artan oranda RA ve RAi kullanımı ile beton klorür taşınım katsayısının, basınçlı su işleme derinliğinin, kılcallık katsayısının ve aşınma değerinin arttığı görülmektedir.

4.8 Beton Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında belirlenen tüm beton özellikleri bir araya getirilerek incelendiğinde; oBMM'in RA'ya uygulanması ile elde edilen RAi'nin betonda kullanımı sonucu, RAi içeren betonların performanslarının RA içeren betonların performansına kıyasla daha yüksek olduğu ve NA içeren betonların performansına yakın olduğu görülmektedir. oBMM ile SF, BF, SF+BF'nin betonda kullanımı sonucu, beton performansları artış gösterse de en belirgin beton performans artışı oBMM+SF kullanımı sonucu oluşmuştur.

Belirlenen en iyi betonların fiziksel, mekanik, kalıcılık ve karbon ayakizi değerleri Tablo 4.11'de bir arada verilmiştir. Verilerin incelendiğinde, en iyi beton serilerinin kontrol betonu ile aynı veya daha iyi olan beton özellikleri sayısının **NS10** için 12, **R1S10** için 8, **R2S10** için 7, **R12S10** için 5, **R1iS10** için 13, **R2S10** için 10 ve **R12S10** için 8 olduğu görülmektedir. Bu değerlendirme ışığında, en iyi beton serileri arasında RAi içeren beton serilerinin RA içeren beton serilerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, %10 SF ile %60'a kadar RA ve RAi kullanılan betonların karbon ayak izi değerlerinin kontrol betonuna kıyasla daha düşük olması, bu betonların çevreci olduklarını da göstermektedir.

Tablo 4.11 En iyi beton serilerine ait özellikler

Numune	RA (%)	SE (%)	ρ (g/cm ³)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_e (MPa)	E.M. (MPa)	K_{ic}^{ini} (MPa.mm ^{0.5})	K_{ic}^{un} (MPa.mm ^{0.5})	AD (mm ³ /50mm ³)	k_{ilk} (mm√s)	k_{iki} (mm√s)	D_{nssm} (×10 ⁻¹² m ² /s)	BSD (mm)	KAl Tesiste geri dönüşüm (kg CO ₂ /m ³)	KAl Yerde geri dönüşüm (kg CO ₂ /m ³)
N	0	3,98	2,41	35,9	2,6	9,9	25171	41,94	122,32	1,33	0,00090	0,00010	12,42	27,8	616,7	531,3
NS10	0	2,82	2,34	46,5	3,2	10,1	32780	25,31	125,11	1,18	0,00060	0,00002	0,86	9,8	605,5	520,1
R1S10	20	5,32	2,32	46,9	3,1	9,1	25099	15,30	112,74	1,21	0,00070	0,00005	3,84	9,1	589,2	506,4
R2S10	40	7,23	2,32	35,0	2,9	9,2	29108	12,18	118,36	1,35	0,00080	0,00006	4,88	12,2	588,5	505,5
R12S10	60	7,52	2,25	28,8	2,5	9,3	24645	34,03	115,55	1,41	0,00090	0,00008	5,33	18,4	557,1	504,3
R1iS10	20	3,30	2,37	43,5	2,9	10,5	34708	53,74	125,11	1,22	0,00060	0,00003	1,48	8,6	589,9	507,0
R2iS10	40	3,95	2,36	50,4	3,9	9,8	37787	36,07	121,43	1,26	0,00070	0,00004	2,20	11,0	590,5	507,5
R12iS10	60	4,76	2,36	49,2	3,4	9,8	24646	18,05	129,01	1,30	0,00080	0,00006	2,60	11,6	589,6	506,4

RA: geri kazanılmış agrega kullanım oranı, **SE:** su emme, **ρ :** yoğunluk, **f_c :** basınç dayanımı, **f_t :** yarmada çekme dayanımı, **f_e :** eğilme dayanımı, **E.M.:** elastisite modülü,

K_{ic}^{ini} : ilk kırılma tokluğu, **K_{ic}^{un} :** kararsız kırılma tokluğu, **AD:** aşınma değeri, **k_{ilk} :** birincil kılcallık katsayısı, **k_{iki} :** ikincil kılcallık katsayısı,

D_{nssm} : klorür taşınım katsayısı, **BSD:** basınçlı su işleme derinliği, **KAl:** karbon ayak izi

5.1 Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında; mekanik iyileştirme yöntemlerinden Demir Bilyeli Öğütme Yöntemi (BMM) optimizasyonu çalışması yapılmış, geri kazanılmış agregaya (RA) optimize edilmiş BMM (oBMM) uygulanması ile iyileştirilmiş geri kazanılmış agregaya (RAi) elde edilmiş, doğal agregaya (NA), RA ve RAi beton karışımlarında kullanılarak beton parametreleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, karışımlarda silis dumanı (SF) ve bazalt fiber (BF) de kullanılmış ve beton özelliklerine etkileri incelenmiş ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Yapılan kapsamlı deneyler sonucu, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- BMM’de farklı sayılarda devir ve bilye uygulanması, RA üzerindeki eski harç kalıntısını (AOM) farklı düzeylerde aşındırılmasına ve yüzeyden giderilmesine neden olmaktadır. Böylece, BMM uygulamasında devir ve bilye sayısının değiştirilmesi, RA özelliklerini farklı şekilde etkilemekte ve istenen ölçüde iyileştirme basamağının ayarlanması sağlanabilmektedir.
- En uygun devir-bilye değeri içeren BMM’in RA’ya uygulanması sonucu %1 civarında su emme değerine sahip RAi elde edilmiştir. Fakat optimum seviyede BMM RA’ya uygulansa da AOM tamamen temizlenememiş, %10 civarında AOM RAi’de kalmıştır.
- Etkili bir mekanik iyileştirme işlemi sonucunda; RA’nın minimum düzeyde AOM içermesinin sağlanması, RA’nın fiziksel-mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve iyileştirme sürecinde RA bünyesindeki doğal agreganın sıhhatinin de korunması gerekmektedir. Bu hedeflerin, özellikleri tanımlanmış RA’ya en uygun seviyede BMM uygulanarak gerçekleştirilebileceği bu tez çalışmasında görülmektedir. Etkisiz bir iyileştirme işleminde ise iyileştirmenin yetersiz sevide uygulanması etkisiz

sonuçlar doğurabilecekken, aşırı seviyede iyileştirme uygulanması hem ekonomik kayba zaman israfına hem de RA bünyesindeki NA'ya zarar verebilecektir. Bu bakımdan, yeterli seviyede iyileştirilme işleminin RA'ya uygulanması gerekmektedir.

- Betonda RA ve RAI kullanımı sonucu beton fiziksel ve mekanik özellikleri genellikle olumsuz etkilense de RAI kullanımı sonucu gözlemlenen performans kayıpları, RA içeren beton serilerinde gözlemlenen performans kayıplarından daha düşük seviyelerde oluşmuştur.
- Fiziksel özellikler bakımından, BF ve SF+BF kullanımı yerleşme problemleri oluşturmuş ve bu nedenle fiziksel özellikleri olumsuz etkilemiştir. Fakat BF, mekanik özellikleri ve kırılma parametrelerini olumlu şekilde etkilemiş ve artırmıştır. Diğer yönden, SF kullanımı beton fiziksel özelliklerini iyileştirmiş ve mekanik özellikler ile kırılma parametrelerini artırmıştır (ilk kırılma tokluğu hariç). Fiziksel ve mekanik sonuçlar incelendiğinde, oBMM+SF kullanımı oBMM+BF ve oBMM+SF+BF kullanımına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. oBMM+SF'de, özellikle %10 SF kullanımı mekanik ve fiziksel beton özelliklerinde dikkate değer ölçüde iyileşme sağlamıştır.
- %60'a kadar oranda *iyileştirilmiş geri kazanılmış agrega* kullanımı ile beton özelliklerinin ihmal edilebilir seviyede etkilendiği ve optimum kullanım oranı olarak önerilebileceği görülmektedir. Yaygın olarak önerilen optimum kullanım oranı olan %30 *geri kazanılmış agrega* kullanım oranı, yapılan bu çalışmadaki değerin yarısı kadardır.
- TOPSİS ile tespit edilen en iyi beton serilerine ait sonuçlar dikkate alındığında; bu betonların %10 SF ile %60'a kadar RA ve RAI içerdikleri görülmektedir. En iyi beton serileri üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve analizler göstermektedir ki; en iyi beton serileri kontrol betonuna yakın/daha iyi kalıcılık özelliklerine sahip olmakla birlikte daha düşük karbon ayak izine de sahiptirler. Bu durum, TOPSİS ile belirlenen en iyi betonların, çevreci yeşil betonlar olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; RA kaynak özellikleri belirlenerek ve bu özellikler dikkate alınarak mekanik iyileştirme yönteminin RA'ya uygulanması ve yöntemin optimize edilerek kullanılmasının faydalı ve yerinde olacağı önerilmektedir. Ayrıca, ikinci bir iyileştirme yönteminin oBMM ile uygulanmasının RAI'den kaynaklı olarak oluşabilecek muhtemel performans düşüşlerini engelleyebilecek ve beton performansını iyileştirecektir.

5.2 Araştırma Olanakları ve İleriki Çalışmalar

Bu tez çalışması, BMM'in optimizasyonu, oBMM ile iyileştirilmiş geri kazanılmış agreganın beton özelliklerine etkisi ile oBMM+SF, oBMM+BF ve oBMM+SF+BF kullanımının beton özelliklerine etkisini içermekte olup; oBMM+diğer fiber katkıların (çelik lif, polipropilen, vs.) ve oBMM+diğer mineral katkıların (metakaolin, uçucu kül, vs.) beton özelliklerine etkisi literatürde çalışılmamış bulunmaktadır.

BMM'in düşük kalite sınıfındaki RA'ya uygulanması sonucu optimum devir bilye değerleri bu deneysel çalışmada belirlenmiş olup; orta ve yüksek kalitedeki RA için optimum BMM devir bilye değerleri henüz bilinmemektedir. Bu noktanın da çalışılarak doldurulması gerekmektedir. Optimum BMM uygulanmış orta ve yüksek kalitedeki RA ile mineral katkıların ve fiber katkıların kullanımı diğer çalışma sahasıdır.

Düşük, orta ve yüksek kalite sınıfındaki geri kazanılmış agregaların optimum devir bilye değerleri belirlenmesi ardından, bu değerlerin bir yapay zekâ, bulanık mantık, vb. uygulama sahasında işlenerek kullanılması da mümkün olabilecektir. Böylelikle, başlangıç özellikleri bilinen RA için uygun BMM devir bilye sayısı tahmin edilebilecektir.

Yukarıda bahsedilen durumlar bu konunun araştırma olanaklarıdır ve ileriki çalışmalar daha da genişletilebilir.

- [1] Wikipedia, "Wikipedia," 2019. [Online]. Available: <https://www.wikipedia.org/>.
- [2] H. Dilbas, "An Examination on Mechanical Behaviour of A Cantilever Beam Produced With Recycled Aggregate Concrete," *Graduate School of Natural and Applied Science, Yildiz Technical University*, 2014.
- [3] S. ve T. B. T.C. Bilim, "Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2014-2017," 2014.
- [4] J. Xiao, W. Li, and C. Poon, "Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China-A review," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, no. 6, pp. 1463–1480, 2012.
- [5] V. S. Babu, A. K. Mullick, K. K. Jain, and P. K. Singh, "Mechanical properties of high strength concrete with recycled aggregate – Influence of processing," *Indian Concr. J.*, vol. 88, no. 5, pp. 10–26, 2014.
- [6] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, and Z. Xie, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 466–472, 2016.
- [7] M. Quattrone, S. C. Angulo, and V. M. John, "Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 90, pp. 21–33, 2014.
- [8] K. H. Kim, M. W. Mun, H. C. Cho, and J. W. Ahn, "Development of Complete Processing Circuit for Waste Concrete Recycling," in *Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate*, 2009, pp. 486–491.
- [9] B. Y. Min, W. K. Choi, W. Z. Oh, C. H. Jung, and J. W. Park, "Assessment of the Characteristic Aggregates during a Decontamination of Contaminated Concrete Waste," in *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, 2008, pp. 183–184.
- [10] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. B. Koenders, and E. Martinelli, "Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 69, pp. 124–132, 2014.
- [11] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam, and T. W. J. Foo, "Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 8, pp. 3469–3479, 2011.
- [12] H. K. A. Al-bayati, P. K. Das, S. L. Tighe, and H. Baaj, "Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 284–298, 2016.

- [13] R. Purushothaman, R. R. Amirthavalli, and L. Karan, "Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete," *Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 5, pp. 1–7, 2015.
- [14] H. Ogawa, T. Nawa, A. B. Ajdukiewicz, A. T. Kliszczewicz, H. Ogawa, and T. Nawa, "Improving the Quality of Recycled Fine Aggregates by Selective Removal of Brittleness Defects Improving the Quality of Recycled Fine Aggregate by Selective Removal of Brittle Defects," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, pp. 395–410, 2012.
- [15] P. C. C. Gomes, C. Ulsen, F. A. Pereira, M. Quattrone, and S. C. Angulo, "Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates," *Waste Manag.*, vol. 45, pp. 171–179, 2015.
- [16] D. G. Montgomery, "Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate," in *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, 1998, pp. 287–296.
- [17] R. Deju, I. Robu, M. Dragusin, C. Mazilu, and C. Tuca, "Selection Tests For Recycled Radioactive Sand Obtaining Method," *Rom. Reports Phys.*, vol. 67, no. 2, pp. 673–692, 2015.
- [18] Y. Sui and A. Mueller, "Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete," *Mater. Struct.*, vol. 45, pp. 1487–1495, 2012.
- [19] H. Dilbas, Ö. Çakır, and C. D. Atiş, "Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 716–726, 2019.
- [20] M. Casuccio, M. C. Torrijos, G. Giaccio, and R. Zerbino, "Failure mechanism of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1500–1506, 2008.
- [21] H. Dilbas and Ö. Çakır, "Fracture and Failure of Recycled Aggregate Concrete (RAC)–A Review," *Int. J. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–48, 2016.
- [22] W. Jian-hua, M. Shi-cheng, T. Zhao-qing, L. Xiao-quan, and L. Xiao-gen, "Intensified test research on the influence of polypropylene fiber & silica fume on recycled concrete," *Concrete*, vol. 11, pp. 36–38, 2006.
- [23] J. Xie, C. Fang, Z. Lu, Z. Li, and L. Li, "Effects of the addition of silica fume and rubber particles on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete with steel fibres," *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 656–667, 2018.
- [24] Y. Wang, P. Hughes, H. Niu, and Y. Fan, "A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: Composite addition of basalt fiber and nano-silica," *J. Clean. Prod.*, vol. 236, p. 117602, 2019.
- [25] K. Sobhan and M. Mashnad, "Fatigue Durability of Stabilized Recycled Aggregate Base Course Containing Fly Ash and Waste-Plastic Strip Reinforcement," 2000.
- [26] E. Fantino, "Fatigue Behavior Of Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Base Course," *J. Exp. Anal. Behav.*, vol. 56, no. 3, pp. 425–425, 1991.

- [27] P. Mlv and R. K. Pancharathi, "Strength studies on glass fiber reinforced recycled aggregate concrete," *Asian J. Civ. Eng. (Building Housing)*, vol. 8, no. 6, pp. 677–690, 2015.
- [28] H. Katkhuda and N. Shatarat, "Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 328–335, 2017.
- [29] D. Soares, J. de Brito, J. Ferreira, and J. Pacheco, "In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 237–245, 2014.
- [30] P. Pereira, E. L, and de B. J, "The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 28, pp. 722–729, 2012.
- [31] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, "Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 141–151, 2014.
- [32] H. Dilbas, M. Şimşek, and Ö. Çakır, "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 50–59, 2014.
- [33] B. González-Fonteboa and F. Martínez-Abella, "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 429–437, 2008.
- [34] K. Akça, Ö. Çakır, M. İpek, and M. Ipek, "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 98, pp. 620–630, 2015.
- [35] Ö. Çakır, "Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, no. 212, pp. 17–25, 2014.
- [36] H. Dilbas and Ö. Çakır, "Geri Kazanılmış Agregaların Mekanik Öğütme Yöntemi İle İyileştirilmesi," in *Beton2017*, 2017, pp. 458–467.
- [37] C. S. Poon and D. Chan, "Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 1, pp. 164–175, 2007.
- [38] S. C. Kou and C. S. Poon, "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, no. 1, pp. 12–19, 2013.
- [39] R. V Silva, J. de Brito, L. Evangelista, and R. K. Dhir, "Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 144–156, 2016.
- [40] R. V Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 201–217, 2014.

- [41] I. B. Topçu and N. F. Günçan, "Using Waste Concrete As Aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1385–1390, 1995.
- [42] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materails*, Third Edit. New York: *The McGraw-Hill*, 2006.
- [43] İ. Şahin, Ö. Çakır, and H. Dilbas, "Yapı Yıkıntı Atıklarının Geri Kazanımı - Terrazo Karo Üretimi," in *10. Beton Kongresi*, 2019, pp. 592–600.
- [44] S. Marinkovic, V. Radonjanin, M. Malesev, I. Ignjatovic, M. Malešev, and I. Ignjatovic, "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 11, pp. 2255–2264, 2010.
- [45] M. Etxeberria, E. Vázquez, a. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, 2007.
- [46] E. Worrel, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, "Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry," *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 26, pp. 303–329, 2001.
- [47] L. Ferreira, J. De Brito, and N. Saikia, "Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 196–204, 2012.
- [48] E. Arıoğlu, C. Girgin, and N. Arıoğlu, "Betonda çekme/basınç dayanımı oranının irdelenmesi," *Hazır Bet.*, vol. January-Fe, pp. 58–63, 2002.
- [49] W.-C. Jau, C. W. Fu, and C.-T. Yang, "Study of feasibility and mechanical properties for producing high-flowing concrete with recycled coarse aggregates," in *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 2004, pp. 89–102.
- [50] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 108–118, May 2015.
- [51] M. Malesev, V. Radonjanin, and M. Marinkovic, "Recycled concrete as aggregate for structural concrete production," *Sustainability*, vol. 2, pp. 1204–1225, 2010.
- [52] K. A. Paine and R. K. Dhir, "Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach," *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 7, pp. 519–530, 2010.
- [53] C. Hoffmann, S. Schubert, A. Leemann, and M. Motavalli, "Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 701–709, 2012.
- [54] Y.-N. Sheen, H.-Y. Wang, Y.-P. Juang, and D.-H. Le, "Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 298–305, 2013.
- [55] Wang Mingchao, Zhang Zuoguang, Li Yubin, Li Min, and Sun Zhijie, "Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 393–407, Mar. 2008.

- [56] S. Xu and H. W. Reinhardt, "Determination of double-Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture Part I: experimental investigation of crack propagation," *Int. J. Fract.*, vol. 98, pp. 111–149, 1999.
- [57] E. Kumar, A. Bhatnagar, W. Hogland, M. Marques, and M. Sillanpää, "Interaction of anionic pollutants with Al-based adsorbents in aqueous media - A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 241, pp. 443–456, 2014.
- [58] A. E. Orhan, "Accounting for Greenhouse Gases Emission From Cement Production," Hacettepe University, 2018.
- [59] A. Coelho and J. de Brito, "Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO₂ emissions," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 5, pp. 1258–1267, May 2013.
- [60] G. A. Blengini and E. Garbarino, "Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 10–11, pp. 1021–1030, Jul. 2010.
- [61] P. Sukontasukkul, "Methodology for Calculating Carbon Dioxide Emission in the Production of Ready-Mixed Concrete," in *1st International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures*, 2009.
- [62] D. X. Xuan, L. J. M. Houben, A. A. A. Molenaar, and Z. H. Shui, "Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 143–151, 2012.
- [63] T. Erdoğan, *Beton* (in Turkish), 2nd ed. Ankara Turkey: METU Press, 2007.
- [64] J. de Brito and N. Saikia, *Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer, 2013.
- [65] N. Kabay, "Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 95–101, 2014.
- [66] B. Baradan, H. Yazıcı, and H. Ün, *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık Durabilite*. THBB, 2010.
- [67] K. Ramyar, A. Mardani-Aghabaglou, G. Inan, G. Inan Sezer, and K. Ramyar, "Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 17–25, 2014.
- [68] A. Sadeghi, O. Lotfi, A. Sadeghi Nik, and O. Lotfi Omran, "Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO₂ using ultrasonic pulse velocity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 654–662, 2013.
- [69] M. E. Arslan, "Investigation on the effects of basalt fibers on the mechanical properties and fracture energy of ordinary concretes," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 23, no. 3, pp. 203–208, 2017.
- [70] J. F. Dong, Q. Y. Wang, and Z. W. Guan, "Material properties of basalt fibre reinforced concrete made with recycled earthquake waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 241–251, 2017.

- [71] H. Dilbas, Ö. Çakır, and M. Şimşek, "Recycled Aggregate Concretes (RACs) for Structural Use: An Evaluation on Elasticity Modulus and Energy Capacities," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 247–261, Mar. 2017.
- [72] C. S. S. Poon, Z. H. H. Shui, and L. Lam, "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, no. 6, pp. 461–468, 2004.
- [73] M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V Barai, *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete*, 1st ed. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [74] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang, and J. Jiang, "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 5, pp. 701–708, May 2010.
- [75] H. Dilbas and Ö. Çakır, "Silis Dumanın Geri Kazanılmış Agregalı Beton Kırılma Parametreleri ve Çatlak Haritası Üzerine Etkisi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 2018, no. 2018, pp. 137–154, 2018.
- [76] G. M. Chen, H. Yang, C. J. Lin, J. F. Chen, Y. H. He, and H. Z. Zhang, "Fracture behaviour of steel fibre reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 272–286, 2016.
- [77] S. Xu and H. Reinhardt, "Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams," *Int. J. Fract.*, vol. 98, pp. 151–177, 1999.
- [78] S. Kumar and S. Barai, *Concrete Fracture Models and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer International Publishing, 2011.
- [79] R. K. Choubey, S. Kumar, M. C. Rao, and M. Chakradhara Rao, "Modeling of fracture parameters for crack propagation in recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 168–178, 2016.
- [80] ACI, "CT-13: ACI Concrete Terminology - An ACI Standard," 2017.
- [81] M. Abed and R. Nemes, "Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 350–361, 2019.
- [82] J. de Brito, "Abrasion resistance of concrete made with recycled aggregates," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 58–64, Mar. 2010.
- [83] P. Laplante, P. C. Aitcin, and D. Vazina, "Abrasion resistance of high performance concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–28, 1991.
- [84] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2869–2876, 2009.
- [85] L. Ferreira, M. Barra, and J. De Brito, "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties," *Magazine of Concrete Research*, vol. 63, no. 8, 2011.

- [86] M. Gesoglu, E. Güneyisi, H. Ö. Öz, I. Taha, and M. T. Yasemin, "Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 334–344, 2015.
- [87] C. J. Zega and Á. A. Di Maio, "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 11, pp. 2336–2340, 2011.
- [88] O. Sengul, "Use of electrical resistivity as an indicator for durability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 434–441, 2014.
- [89] S.-C. Kou, P. C-S, and A. F, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cem Concr Compos*, vol. 33, pp. 788–795, 2011.
- [90] A. Ben Fraj and R. Idir, "Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 952–964, Dec. 2017.
- [91] H. Dilbas and Ö. Çakır, "Geri Kazanılmış Agregaların Mekanik Öğütme Yöntemi İle İyileştirilmesi," in *Beton 2017*, 2017, pp. 458–467.
- [92] P. Amorim, J. de Brito, and L. Evangelista, "Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability," *ACI Mater. J.*, vol. 109, pp. 195–204, 2012.
- [93] M. Barra and E. Vázquez, "Properties of concretes with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation," in *International Symposium on Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate*, 1998.
- [94] L. Butler, J. S. S. West, and S. L. L. Tighe, "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 10, pp. 1037–1049, 2011.
- [95] F. Buyle-Bodin and R. Hadjieva-Zaharieva, "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete," *Mater. Struct.*, vol. 35, pp. 504–509, 2002.
- [96] P. B. Cachim, "Mechanical properties of brick aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 1292–1297, 2009.
- [97] H. Chen, T. Yen, and K. Chen, "Use of building rubbles as recycled aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, pp. 125–132, 2003.
- [98] W. C. Choi and H. D. Yun, "Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading," *Eng. Struct.*, vol. 41, pp. 285–293, 2012.
- [99] V. Corinaldesi, "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1616–1620, 2010.
- [100] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Self-compacting concrete: A great opportunity for Recycling materials," in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 2004, pp. 600–609.

- [101]V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Recycling of concrete in precast concrete production," in *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2007, pp. 69–75.
- [102]V. Corinaldesi, G. Orlandi, and G. Moriconi, "Self-compacting concrete incorporating recycled aggregate," in *International Conference on Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 2002, pp. 454–464.
- [103]J. R. Correia, J. de Brito, and A. S. Pereira, "Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates," *Mater. Struct.*, vol. 39, pp. 169–177, 2006.
- [104]E. Dapena, P. Alaejos, A. Lobet, and D. Pérez, "Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, pp. 414–422, 2011.
- [105]F. Debieb and S. Kenai, "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp. 886–893, 2008.
- [106]R. K. Dhir, T. D. Dyer, and K. A. Paine, "Dismantling barriers: Roles for research in realising markets for construction and demolition wastes," in *1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management*, 2004, pp. 1–22.
- [107]R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, and T. Leelawat, "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes," *Proc. ICE – Struct. Build.*, vol. 134, pp. 257–274, 1999.
- [108]R. K. Dhir and K. A. Paine, "Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete," in *1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management*, 2004, pp. 108–123.
- [109]R. K. Dhir and K. A. Paine, "Performance related approach to the use of recycled aggregates," in *Waste and Resources Action Programme (WRAP) Aggregates Research Programme*, STBF 13/14C, 2007, p. 77.
- [110]R. K. Dhir, K. A. Paine, S. O'Leary, and S. O'Leary, "Use of recycled concrete aggregate in Concrete pavement construction: A case study," in *International Symposium on Sustainable Waste Management*, 2003, pp. 373–382.
- [111]A. Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M. A. Serrano-López, P. Serna, and J. O. Castaño-Tabares, "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 2545–2553, 2009.
- [112]Y. Dosho, "Development of a sustainable concrete waste recycling system," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 5, pp. 27–42, 2007.
- [113]L. Evangelista and J. de Brito, "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 5, pp. 397–401, 2007.
- [114]L. Evangelista and J. de Brito, "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, pp. 9–14, 2010.
- [115]L. Evangelista and J. de Brito, "Concrete with fine recycled aggregates: A review," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 18, pp. 129–172, 2014.

- [116] L. Ferreira, J. de Brito, and M. Barra, "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties," *Mag. Concr. Res.*, vol. 63, pp. 617–627, 2011.
- [117] J. M. V. Gómez-Soberón, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled Concrete aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 1301–1311, 2002.
- [118] A. Gonçalves, A. Esteves, and M. Vieira, "Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability," in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 2004, pp. 554–562.
- [119] B. González-Fonteboa and F. Martínez-Abella, "Shear strength of concrete with recycled aggregates," in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 2004, pp. 619–628.
- [120] S. Kenai, F. Debieb, and L. Azzouz, "Mechanical properties and durability of Concrete made with coarse and fine recycled aggregates," in *International Symposium On Sustainable Concrete Construction*, 2002, pp. 383–392.
- [121] F. M. Khalaf, "Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, pp. 518–526, 2006.
- [122] F. M. Khalaf and A. S. De Venny, "Performance of brick aggregate concrete at high temperatures," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, pp. 556–565, 2004.
- [123] F. M. Khalaf and A. S. De Venny, "Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: Review," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, pp. 331–340, 2004.
- [124] F. M. Khalaf and A. S. De Venny, "Properties of new and recycled clay brick aggregates for use in concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, pp. 456–464, 2005.
- [125] J. M. Khatip, "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 763–769, 2005.
- [126] S.-W. Kim and H.-D. Yun, "Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete," *Eng. Struct.*, vol. 48, pp. 133–143, 2013.
- [127] J. Knights, "Relative performance of high quality concretes containing recycled aggregates and their use in construction," in *International Symposium On Sustainable Construction: Use Of Recycled Concrete Aggregate*, 1998, pp. 275–286.
- [128] S. C. Kou and C. S. Poon, "Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 2877–2886, 2009.
- [129] S.-C. C. Kou, P. C-S, A. F, C. S. Poon, and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cem Concr Compos*, vol. 33, pp. 788–795, 2011.
- [130] S. C. Kou, C. S. Poon, and D. Chan, "Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, pp. 709–717, 2007.

- [131]A. Koulouris, M. C. Limbachiya, A. N. Fried, and J. J. Roberts, "Use of recycled aggregate in concrete application: Case studies," in *International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities*, 2004, pp. 245–257.
- [132]M. Limbachiya, M. S. Meddah, and Y. Ouchagour, "Performance of Portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate," *ACI Mater. J.*, vol. 109, pp. 91–100, 2012.
- [133]S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bignozzi, "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 312–318, 2013.
- [134]D. Matias, J. de Brito, a. Rosa, and D. Pedro, "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 101–109, 2013.
- [135]S. Nagataki, A. Gokce, T. Saeki, and M. Hisada, "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 965–971, 2004.
- [136]F. T. Olorunsogo, "Early age properties of recycled concrete," in *International Seminar on Exploiting Wastes in Concrete*, 1999, pp. 163–170.
- [137]N. Otsuki, S. Miyazato, and W. Yodsudjai, "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 443–451, 2003.
- [138]S. G. Park, "Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete," 1999.
- [139]P. Pereira et al., "The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 28, pp. 722–729, 2012.
- [140]L. Evangelista, J. de Brito, P. Pereira, L. Evangelista, and J. de Brito, "The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, pp. 9–14, 2012.
- [141]C. Poon and S. Kou, "Effects of fly ash on mechanical properties of 10-year-old Concrete prepared with recycled concrete aggregates," in *2nd International Conference on Waste Engineering Management*, 2010, pp. 46–59.
- [142]C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, and S. C. Kou, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 31–36, 2004.
- [143]K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 1, pp. 407–415, 2007.
- [144]A. Rao, K. N. Jha, and S. Misra, "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete," *Conserv. Recycl.*, vol. 50, pp. 71–81, 2007.
- [145]M. Rao, S. Bhattacharyya, and S. Barai, "Influence of recycled aggregate on mechanical properties of concrete," in *5th Civil Engineering Conference in the*

- Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference 2010*, 2010, pp. 749–754.
- [146]R. S. Ravindrarajah, Y. H. Loo, and C. T. Tam, “Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 39, pp. 214–220, 1987.
 - [147]A. G. Razaqpur, G. Fathifazl, B. Isgor, A. Abbas, B. Fournier, and S. Foo, “How to produce high quality concrete mixes with recycled concrete aggregate,” in *2nd International Conference on Waste Engineering Management*, 2010, pp. 11–35.
 - [148]A. R. M. Ridzuan, A. Ibrahim, A. M. M. Ismail, and A. B. M. Diah, “Durability performance of recycled aggregate concrete,” in *International Conference on Global construction: Ultimate Concrete Opportunities: Achieving Sustainability in Construction*, 2005, pp. 193–202.
 - [149]R. M. Salem, E. G. Burdette, and N. M. Jackson, “Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 100, pp. 216–221, 2003.
 - [150]S. de Juan, M. S., and P. Alaejos, “Influence of recycled aggregate quality on Concrete properties,” in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 2004, pp. 545–553.
 - [151]S. R. Sarhat, “An experimental investigation on the viability of using fine concrete recycled aggregate in concrete production,” in *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2007, pp. 53–57.
 - [152]A. Shayan and A. M. Xu, “Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate,” *ACI Mater. J.*, vol. 100, pp. 371–380, 2003.
 - [153]K. Tang, M. N. Soutsos, and S. G. Millard, “Concrete paving products made with recycled demolition aggregates,” in *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2007, pp. 77–84.
 - [154]K. Teranishi, Y. Dosho, M. Narikawa, and M. Kikuchi, “Application of recycled aggregate concrete for structural concrete: Part 3 - Production of recycled aggregate by real-scale plant and quality of recycled aggregate concrete,” in *International Symposium on Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate*, 1998, pp. 143–156.
 - [155]C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez de Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1054–1065, 2013.
 - [156]T. Vieira, “Concrete incorporating fine recycled ceramic aggregates: Durability-related performance,” University of Lisbon, 2013.
 - [157]N. Waleed and T. D. G. Canisius, *Engineering properties of concrete containing recycled aggregates*. Oxon, UK: Waste & Resources Action Programme, 2007.
 - [158]Z. Wang, L. Wang, Z. Cui, and M. Zhou, “Effect of recycled coarse aggregate on Concrete compressive strength,” *Trans. Tianjin Univ.*, vol. 17, pp. 229–234, 2011.

- [159]J. Z. Xiao, J. Li, and C. Zhang, "Mechanical properties of recycled aggregate Concrete under uniaxial loading," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1187–1194, 2005.
- [160]J.-Z. Z. Xiao, J.-B. B. Li, and C. Zhang, "On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview," *Mater. Struct.*, vol. 39, no. 6, pp. 655–664, 2006.
- [161]J. Yang, Q. Du, and Y. Bao, "Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 1935–1945, 2011.
- [162]K. Yang, H. Chung, and A. Ashour, "Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties," *ACI Mater. J.*, vol. 105, pp. 289–296, 2008.
- [163]M. M. Tüfekçi, and Ö. Çakır, "An Investigation on Mechanical and Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with GGBFS," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 549–563, 2017.
- [164]S. Omary, G. Wardeh, E. Ghorbel, and H. Gomart, "Comportement à la flexion des poutres en béton armé à base de graviers recyclés .," in *32èmes Rencontres de l'AUGC*, 2014.
- [165]G. Wardeh and E. Ghorbel, "Mechanical Properties of Recycled Concrete : An Analytical Study," in *International symposium on Eco-Crete*, 2014, no. 1, pp. 1–8.
- [166]T. Uygunoğlu, İ. B. Topçu, O. Gencil, and W. Brostow, "The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 180–187, 2012.
- [167]B. S. Kutlu, Y. A. Abalı, and T. Eren, "Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Seçmeli Ders Seçimi," *Sos. Bilim. Derg.*, vol. 2, no. 2, pp. 5–25, 2012.

A

TOPSİS YÖNTEMİ

TOPSİS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) çok ölçütlü karar destek sistemlerinden birisidir. Karmaşık işlemler dizisi ve algoritmalar içermeyen sade ve basit bir yöntemdir. Uygulanabilirliği bakımından tüm alanlarda kolaylıkla kullanımı sayesinde birçok çalışmada başvurulmuş bir yöntemdir.

Yöntemin ilk aşamasında, karar matrisi oluşturulur ve sonrasında normalize edilmiş karar matrisi elde edilerek ağırlıklandırılır. Çözüm içerisinde, ideal olana ve ideal olmayana yani pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar hesap edilerek son aşamada yönleme girişi yapılan her bir durumun (alternatifin) sayısal olarak sonucu hesaplanır ki bu puanlama ile yapılan sıralamada 1'e yakınlık ideale en yakınlığı 0'a yakınlık idealden en uzaklığı ifade eder.

- **Karar matrisinin oluşturulması:** $i \times j$ boyutlarında karar matrisi yönleme girilecek alternatiflerin verilerini içerir ve karar verici tarafından matris verileri girilerek matris şekillenir. Satırlarda karar noktaları ve sütunlarda etkenler (faktörler) yer alır (A.1).

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

- **Normalize matrisin oluşturulması:** Her bir karar matrisi elemanının (a_{ij}) kareleri alınır. Kareleri alınmış elemanları içeren matrisin sütun toplamı elde edilir ve her bir sütundaki matris elemanları ait olduğu sütun toplamının kareköküne bölünür. Böylece normalizasyon işlemi gerçekleşir ((A.2) ve (A.3)).

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}} \quad (A.2)$$

$$(i = 1,2,3, \dots, m \text{ ve } j = 1,2,3, \dots, n)$$

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

$$(i = 1,2,3, \dots, m \text{ ve } j = 1,2,3, \dots, n)$$

- **Normalize matrisinin ağırlıklandırılması:** Normalize edilmiş her bir veriyi içeren matris w_{ij} ağırlık katsayısı ile çarpılarak ağırlıklandırılır ((A.4)). Her bir ağırlık katsayısı 0 ile 1 aralığında değer alır ve toplamı 1 olmak zorundadır. Ağırlıklandırma katsayıları ile çarpma, objektif TOPSİS yönteminin tek sübjektif işlemidir.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 \times n_{11} & \cdots & w_n \times n_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 \times n_{i1} & \cdots & w_n \times n_{ij} \end{bmatrix} \rightarrow V_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{i1} & \cdots & v_{ij} \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

- **Pozitif ve negatif ideal çözüm matrisi:** Problemin durumuna göre, en büyükleme amaçlanıyorsa her bir sütuna ait en büyük değerler bulunur ve bu değerler pozitif ideal çözüm matrisinde toplanır, sonra her bir sütuna ait en küçük değerler bulunur ve bu değerler negatif ideal çözüm matrisinde toplanır ((A.5) ve (A.6)). Aksi olarak, en küçükleme yapılıyorsa bu değerler tam tersi olacaktır ((A.7) ve (A.8)).

Pozitif ideal çözüm değerleri:

$$A^+ = \{(max_i v_{ij})\} \quad (A.5)$$

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (A.6)$$

Burada, A^+ matrisi herbir sütuna ait en büyük değerleri içerir.

Negatif ideal çözüm değerleri:

$$A^- = \{(min_i v_{ij})\} \quad (A.7)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (A.8)$$

TOPSİS YÖNTEMİ İÇİN BETON ÖZELLİKLERİNİN AĞIRLIK KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

TOPSİS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) çok ölçütlü karar destek sistemlerinden birisidir. Karmaşık işlemler dizisi ve algoritmalar içermeyen sade ve basit bir yöntemdir. Yöntemin ilk aşamasında, karar matrisi oluşturulur ve sonrasında normalize edilmiş karar matrisi elde edilerek ağırlıklandırılır. Çözüm içerisinde, ideal olana ve ideal olmayana yani pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar hesap edilerek son aşamada yönleme girişi yapılan her bir durumun (alternatifin) sayısal olarak sonucu hesaplanır.

Ağırlıklandırma aşamasında, normalize edilmiş her bir veri w_{ij} gibi ağırlık katsayısı ile çarpılarak ağırlıklandırılır. Her bir ağırlık katsayısı 0 ile 1 aralığında değer alır ve toplamı 1 olmak zorundadır. Ağırlıklandırma katsayıları ile çarpma, objektif TOPSİS yönteminin tek sübjektif işlemidir.

Ağırlıklandırmadan kasıt, alternatiflerin sahip oldukları n tane parametrenin her birinin kendi içinde önem sırasını belirleyebilmektir. Böylelikle alternatifleri değerlendirirken alternatiflerin parametrelerini önemlilik sırasına koymuş olunmaktadır. Ağırlıklandırma işlemi için birden çok seçenek bulunmaktadır:

- 1) Deneyimli kişi/kişilerden tecrübelerini almak
- 2) Deneyimli kişilerin görüşlerini alarak istatistiki yaklaşım geliştirmek
- 3) Literatürde yapılan benzer çalışmalardan faydalanmak
- 4) Literatür veri tabanı oluşturarak parametrelerin ağırlıklarını tahin etmek

Bu tez çalışmasında ağırlıklandırma katsayılarının oluşturulması, literatürden elde edilen verilere dayanmaktadır.

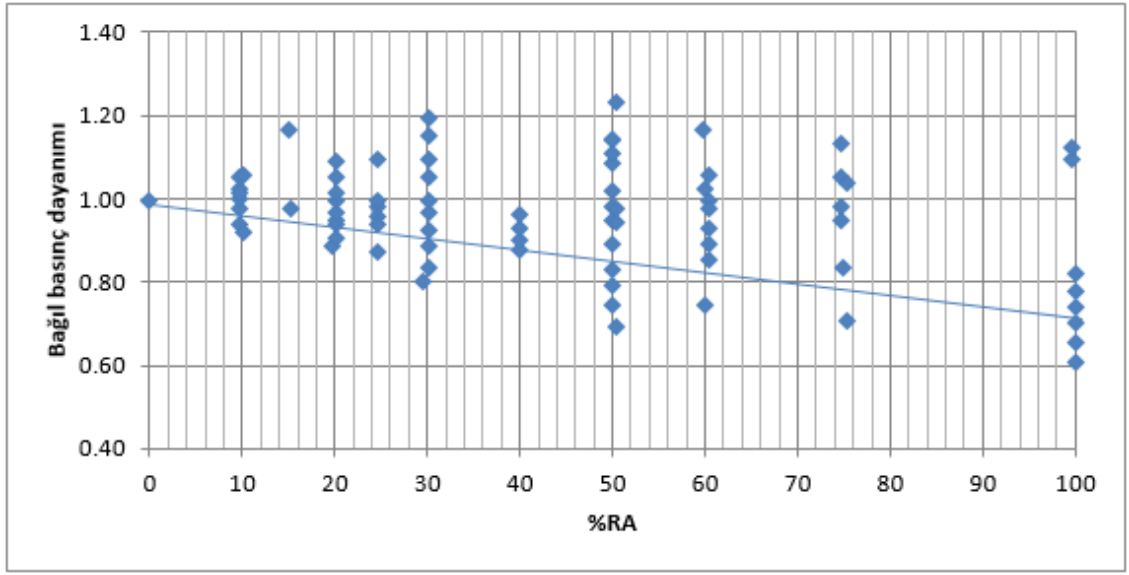
Literatürde yapılan geri kazanılmış agrega konulu çalışmalar bir araya getirilerek beton yoğunluk, su emme, basınç dayanımı, yaramda çekme dayanımı ve elastisite modülü verileri toplanmıştır [11], [19], [93]–[102], [20], [103]–[112], [32], [113]–

[122], [35], [123]–[132], [41], [133]–[142], [45], [143]–[152], [49], [153]–[162], [72], [163]–[166], [92].

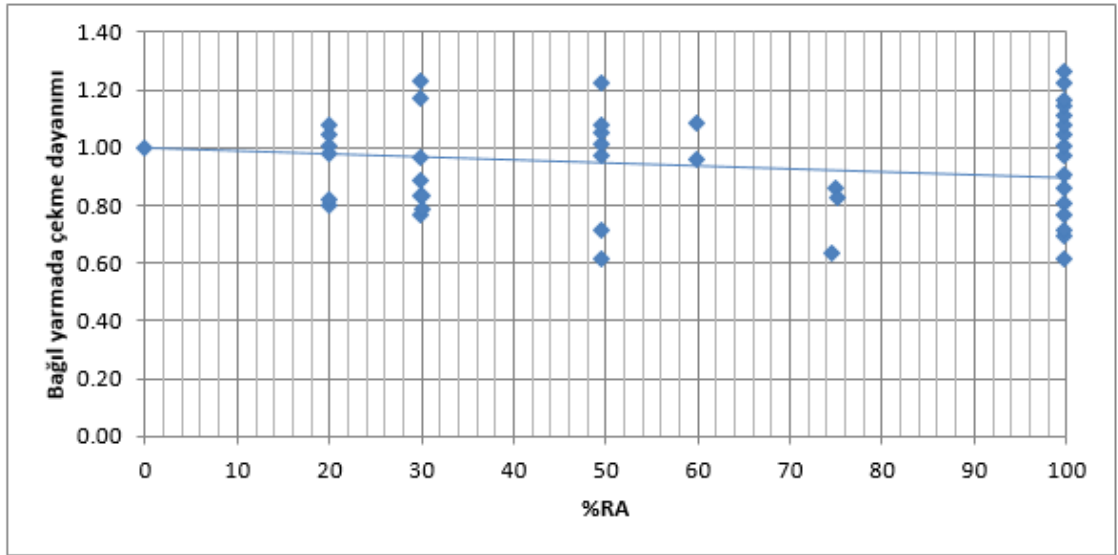
Ardından geri kazanılmış agreganın betonda kullanım miktarına göre beton parametresi değişimi grafikleştirilmiş ve analitik olarak en yüksek uygunluklu doğru uydurma işlemi yapılmıştır (Tablo B.1) (Şekil B.1-B.5). Ardından %100 geri kazanılmış agreganın kullanımı durumunda ilgili beton parametresinin %0 kullanım durumuna göre oransal olarak ne kadar değişim gösterdiği tespit edilmiş ve geri kazanılmış agreganın o beton parametresi üzerindeki etkisi rakamsal olarak bir oranla sayısallaştırılması sağlanmıştır. Son olarak, her bir beton parametresinin %100 geri kazanılmış agreganın kullanımı durumundaki etkilenme oranları toplanmış ve her bir beton parametresinin %100 geri kazanılmış agreganın kullanımı durumundaki etkilenme oranları toplam ile oranlanarak normalize edilmiştir. Böylece, 0 ile 1 aralığında beton parametreleri ağırlık katsayıları elde edilmiştir.

Tablo B.1 Uydurulan eğrilere ait denklemler

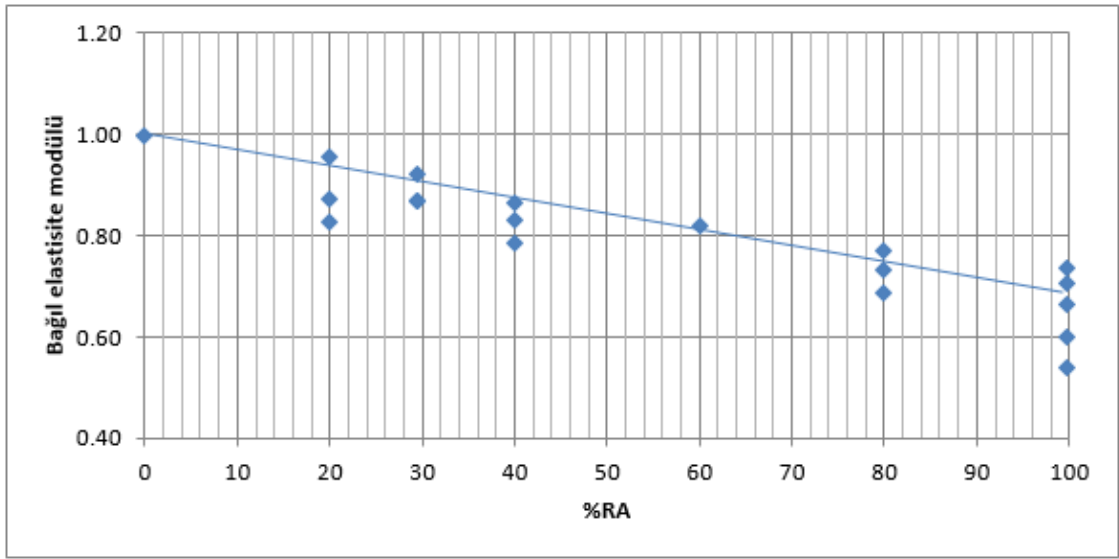
İlişki ismi	Denklem
Basınç dayanımı-%RA ilişkisi	$y = -0,00341x + 1,012$
Yarmada çekme dayanımı-%RA ilişkisi	$y = -0,00070x + 0,989$
Elastisite modülü-%RA ilişkisi	$y = -0,00290x + 1,010$
Yoğunluk-%RA ilişkisi	$y = -0,00120x + 1,005$
Su emme-%RA ilişkisi	$y = +0,03670x + 1,001$



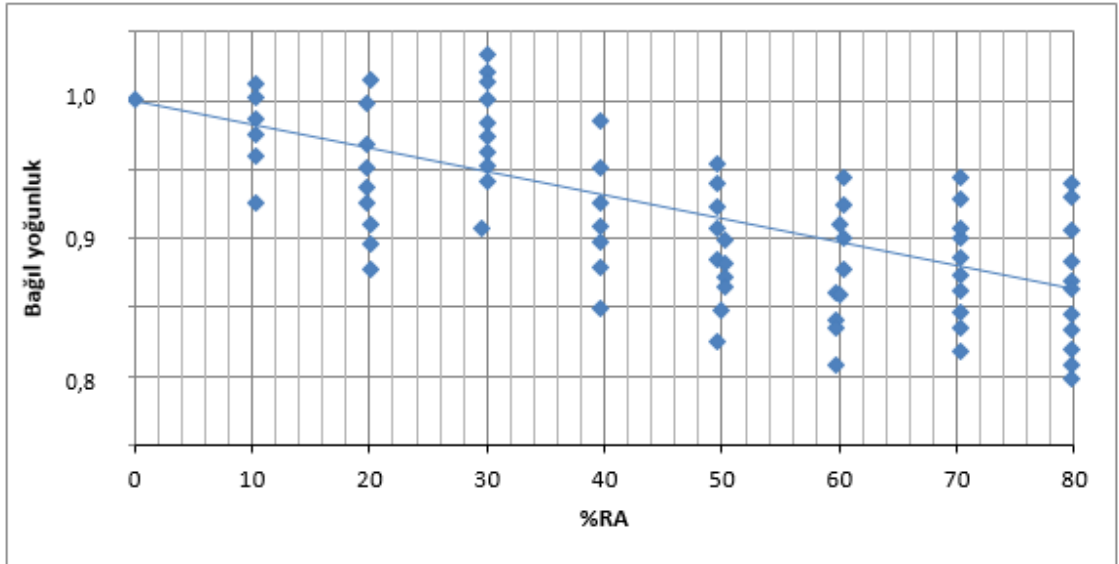
Şekil B.1 Basınç dayanımı-%RA ilişkisi



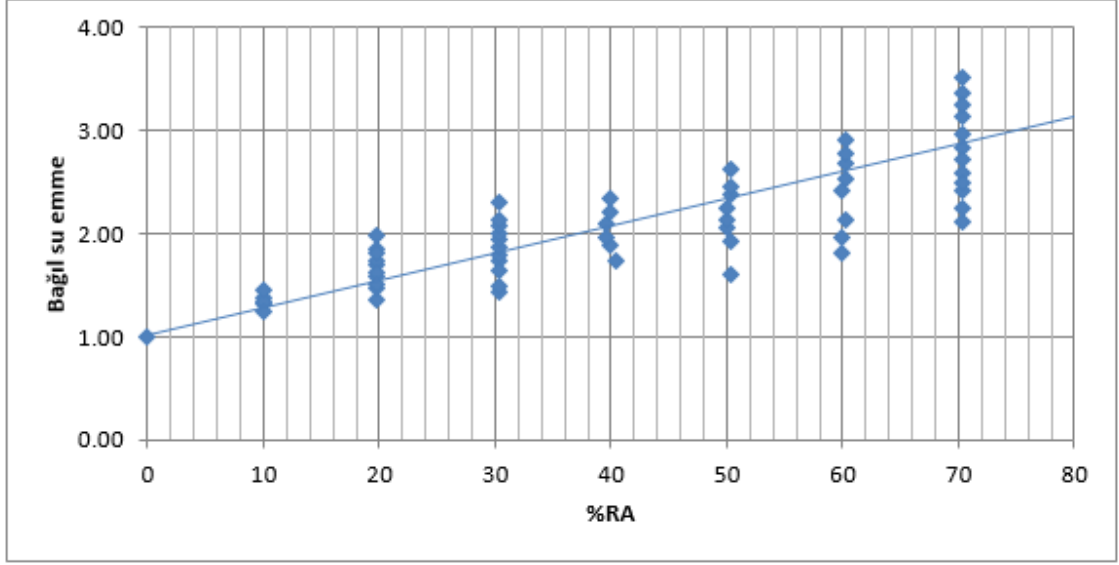
Şekil B.2 Yarmada çekme dayanımı-%RA ilişkisi



Şekil B.3 Elastisite modülü-%RA ilişkisi



Şekil B.4 Yoğunluk-%RA ilişkisi



Şekil B.5 Su emme-%RA ilişkisi

Literatür verileri ile elde edilen veriler irdelenmiş, bulunan sonuçlar kullanılarak literatürde önerilen 0-9 ağırlık katsayısı ölçeğine göre beton özellikleri için ağırlık katsayıları seçilmiştir (Tablo B.2-B.3). Tablo B.3'te belirtilen ağırlık katsayıları kullanılarak beton deney sonuçları TOPSİS'te irdelenmiş ve Tablo B.4'te verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo B.2 Önem derecelerine göre ağırlık katsayıları [167]

Önem ölçeği	Tanım
1	Eşit derecede önemli
3	Orta derecede önemli
5	Kuvvetli derecede önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli
9	Kesin önemli

Tablo B.3 Beton parametreleri için elde edilmiş ağırlık katsayıları (10 üzerinden)

Beton özelliği	Yoğunluk	Su emme	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Elastisite modülü
Belirlenen ağırlık katsayısı	3	9	9	3	7

Tablo B.4 TOPSİS analizi sonuçları

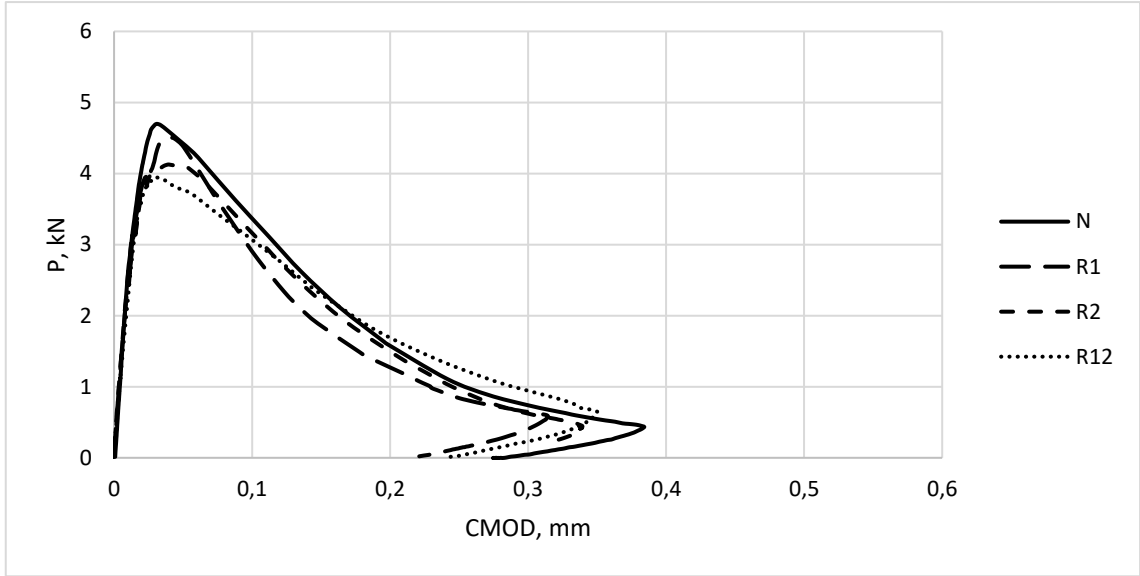
Seriler	%RA	Gi	Grupta En Büyük Değer
N		0,677	
NS5		0,773	
NS10		0,885	
NB25		0,717	
NB50		0,669	
NB100	0	0,694	0,885
NS5B25		0,780	
NS5B50		0,793	
NS5B100		0,688	
NS10B25		0,793	
NS10B50		0,761	
NS10B100		0,701	
R1		0,377	
R1S5		0,563	
R1S10		0,696	
R1B25		0,357	
R1B50		0,399	
R1B100	20	0,385	0,696
R1S5B25		0,501	
R1S5B50		0,493	
R1S5B100		0,484	
R1S10B25		0,559	
R1S10B50		0,488	
R1S10B100		0,463	
R2		0,283	
R2S5		0,506	
R2S10		0,525	
R2B25		0,333	
R2B50		0,328	
R2B100	40	0,291	0,525
R2S5B25		0,351	
R2S5B50		0,352	
R2S5B100		0,299	
R2S10B25		0,474	
R2S10B50		0,425	
R2S10B100		0,395	
R12		0,204	
R12S5		0,360	
R12S10		0,411	
R12B25		0,186	
R12B50		0,154	
R12B100	60	0,046	0,411
R12S5B25		0,346	
R12S5B50		0,301	
R12S5B100		0,257	
R12S10B25		0,324	
R12S10B50		0,261	
R12S10B100		0,208	

Tablo B.4 TOPSİS analizi sonuçları (devam)

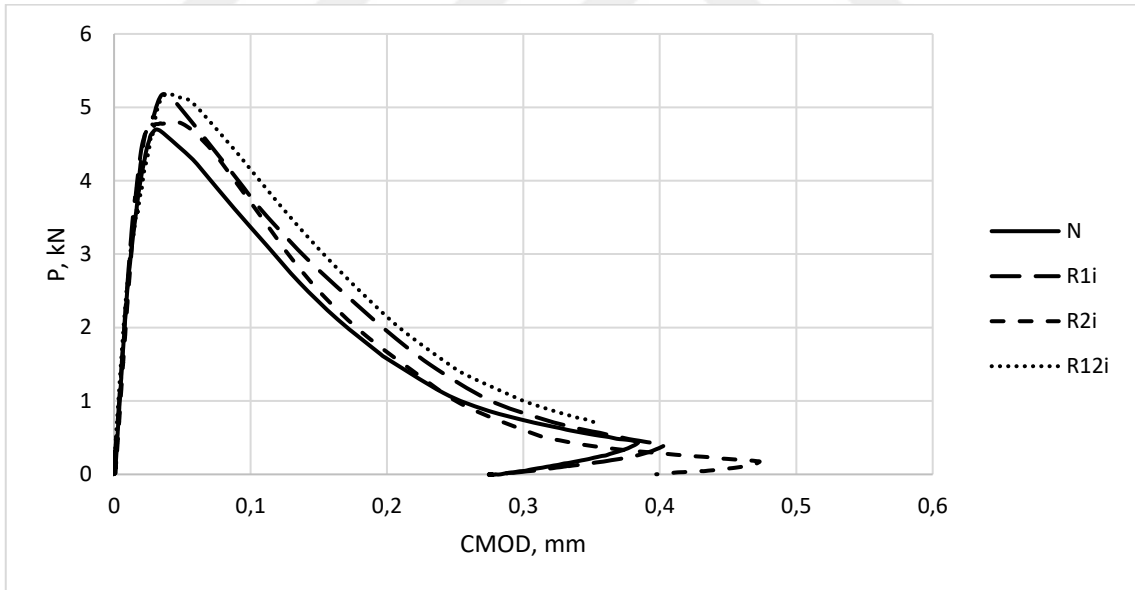
Seriler	%RA	Gi	GRUPTA EN BÜYÜK
R1i		0,630	
R1iS5		0,764	
R1iS10		0,849	
R1iB25		0,709	
R1iB50		0,701	
R1iB100		0,628	
R1iS5B25	20	0,738	0,849
R1iS5B50		0,733	
R1iS5B100		0,686	
R1iS10B25		0,712	
R1iS10B50		0,662	
R1iS10B100		0,613	
R2i		0,568	
R2iS5		0,731	
R2iS10		0,903	
R2iB25		0,592	
R2iB50		0,551	
R2iB100		0,599	
R2iS5B25	40	0,618	0,903
R2iS5B50		0,584	
R2iS5B100		0,557	
R2iS10B25		0,594	
R2iS10B50		0,598	
R2iS10B100		0,538	
R12i		0,534	
R12iS5		0,618	
R12iS10		0,739	
R12iB25		0,560	
R12iB50		0,560	
R12iB100		0,510	
R12iS5B25	60	0,626	0,739
R12iS5B50		0,617	
R12iS5B100		0,482	
R12iS10B25		0,648	
R12iS10B50		0,624	
R12iS10B100		0,583	

C

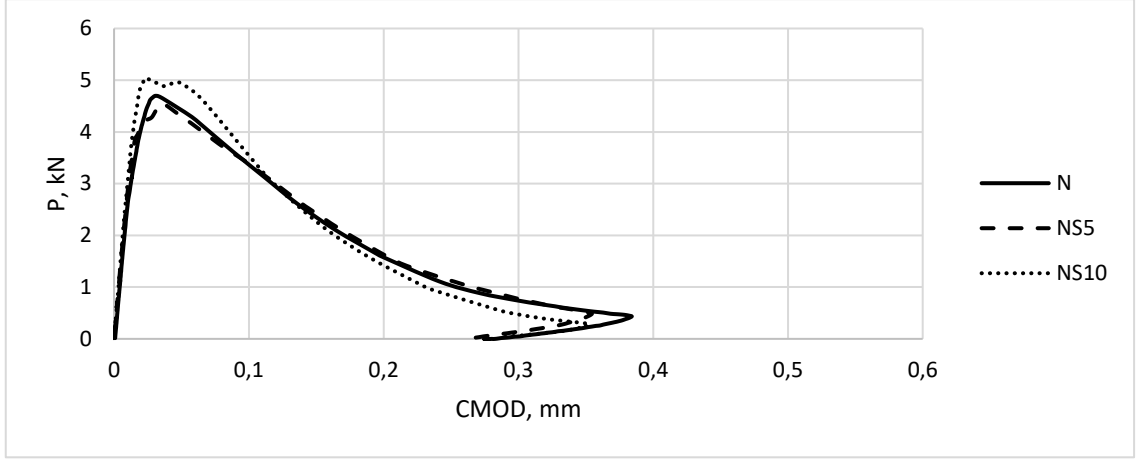
YÜK-ÇATLAK AĞZI AÇIKLIĞI VERİLERİ



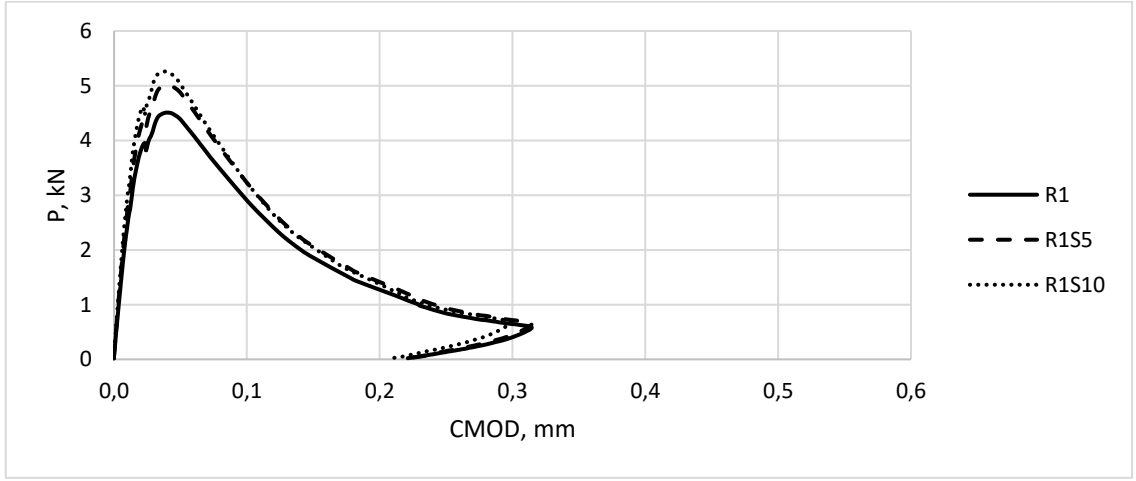
Şekil C.1 NA ve RA içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



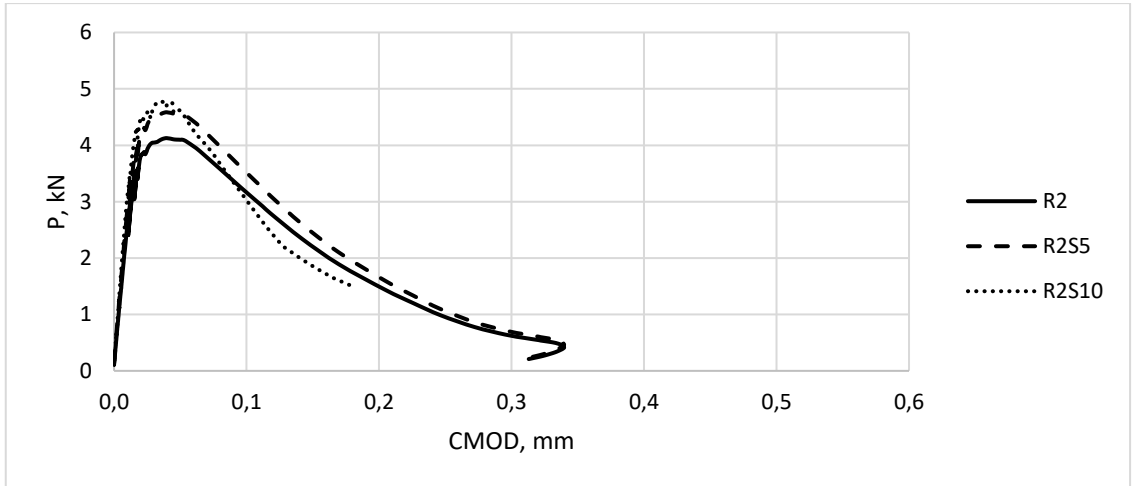
Şekil C.2 NA ve RAI içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



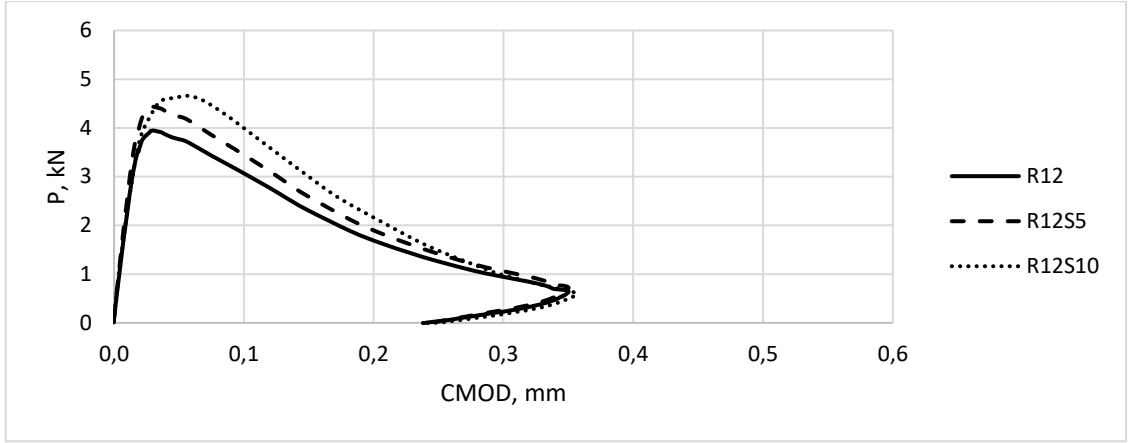
Şekil C.3 NA ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



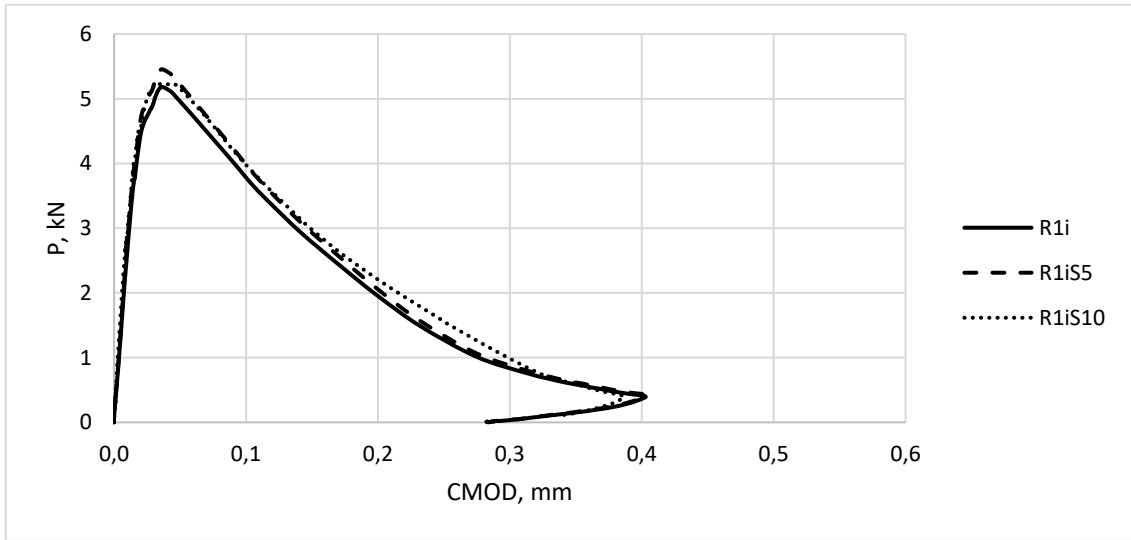
Şekil C.4 RA1 ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



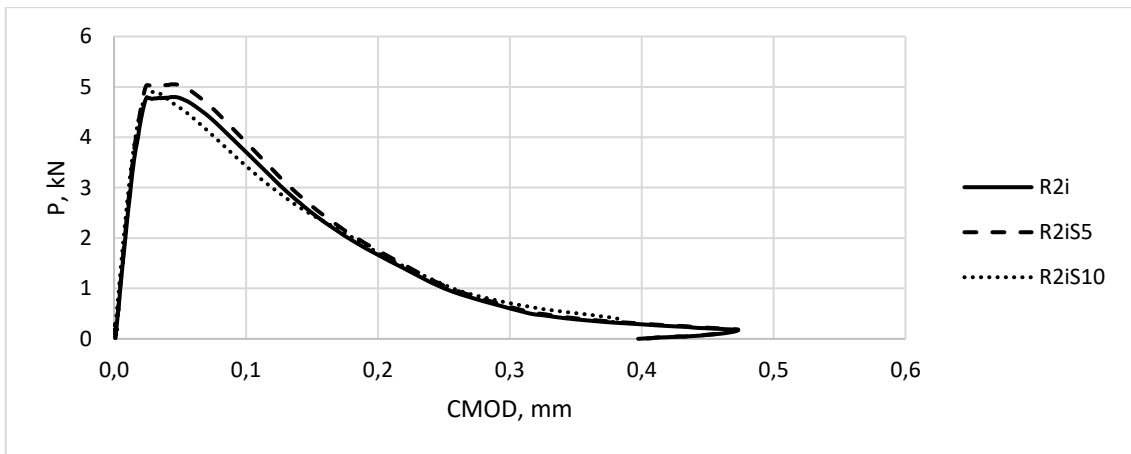
Şekil C.5 RA2 ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



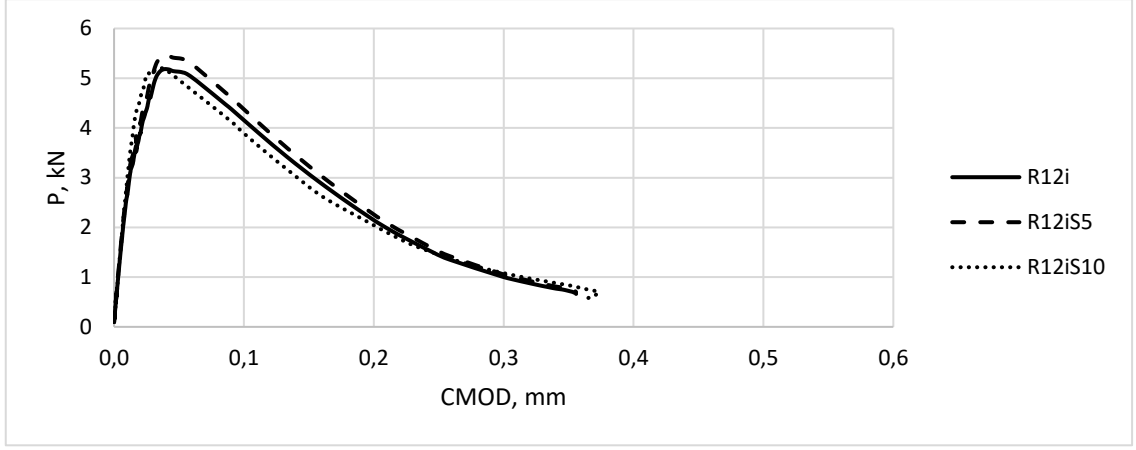
Şekil C.6 RA12 ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



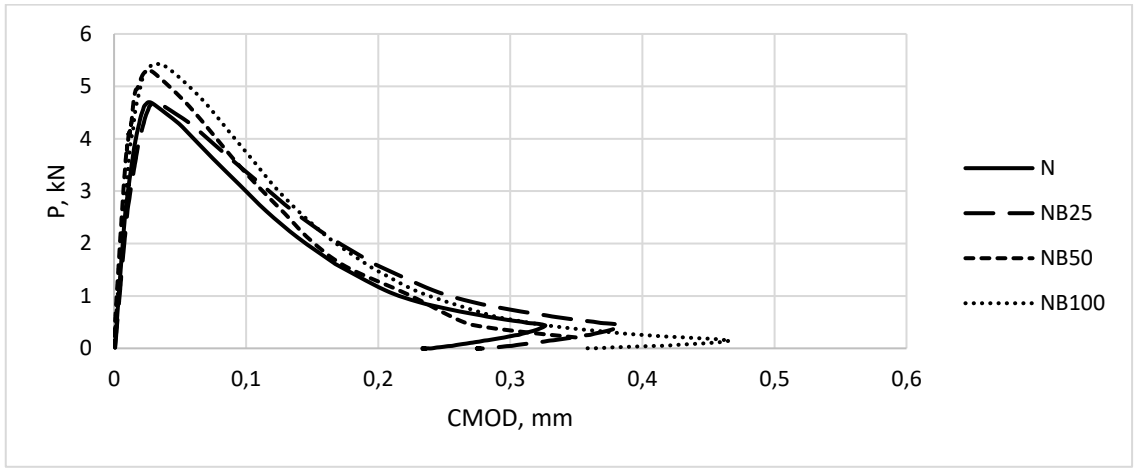
Şekil C.7 RA1i ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



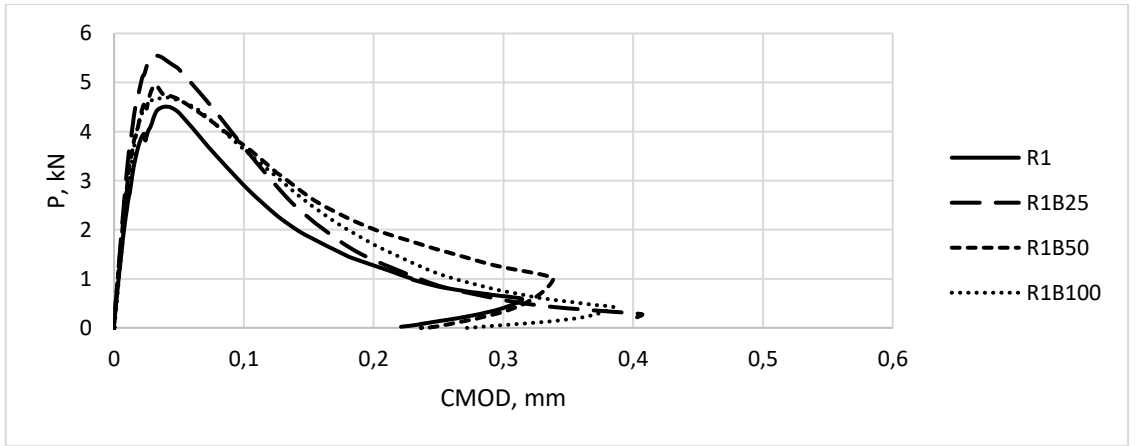
Şekil C.8 RA2i ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



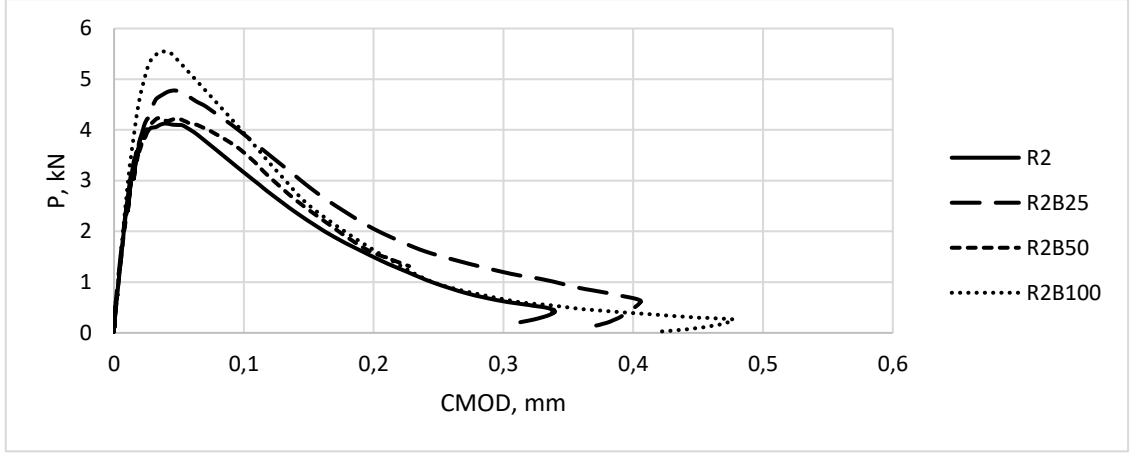
Şekil C.9 RA12i ve SF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



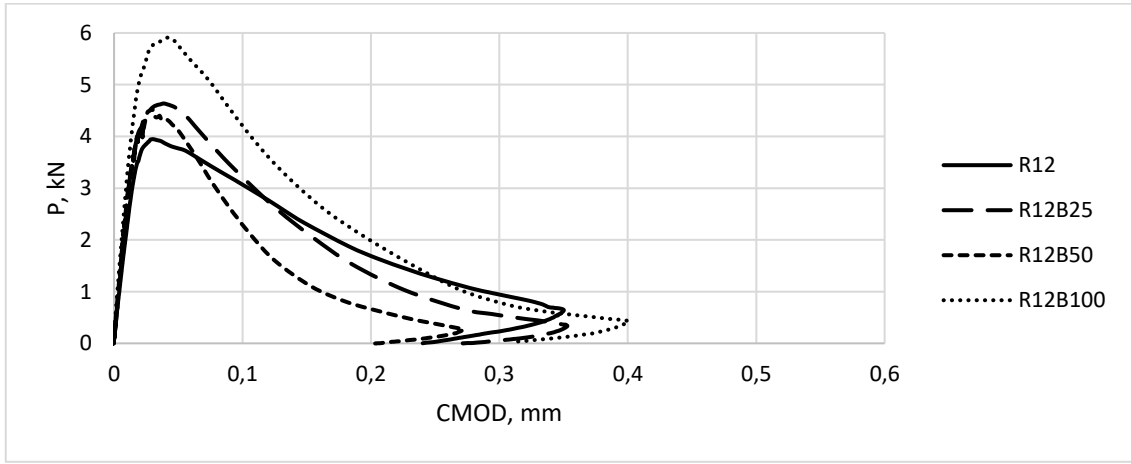
Şekil C.10 NA ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



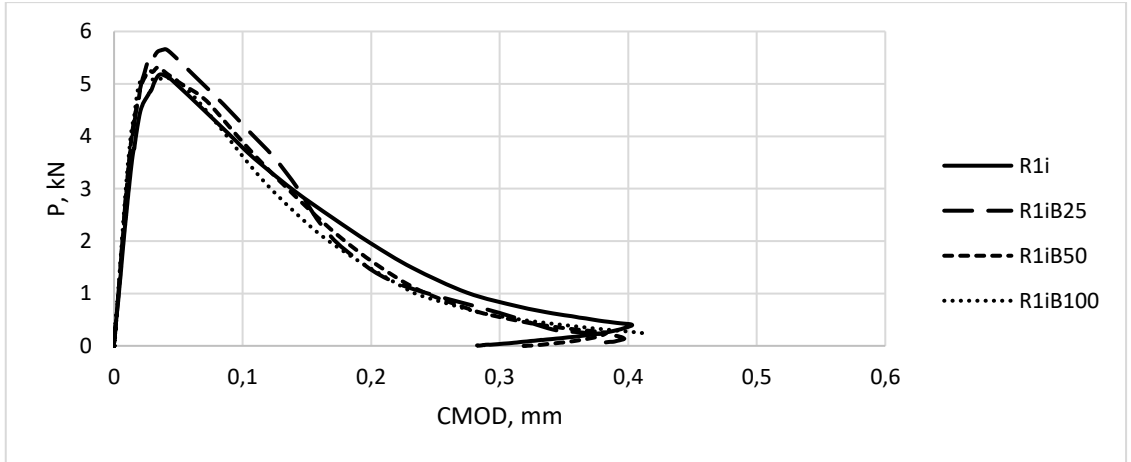
Şekil C.11 RA1 ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



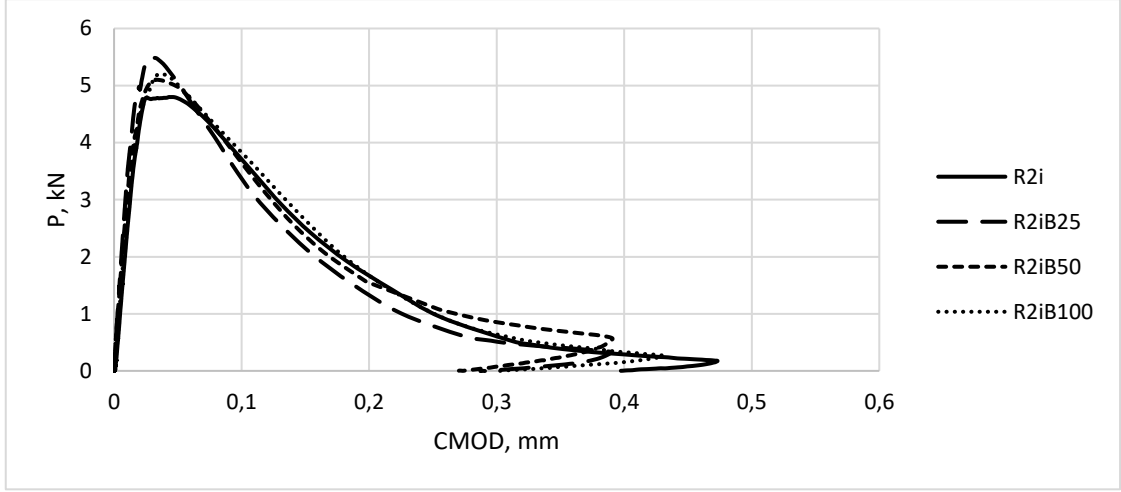
Şekil C.12 RA2 ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



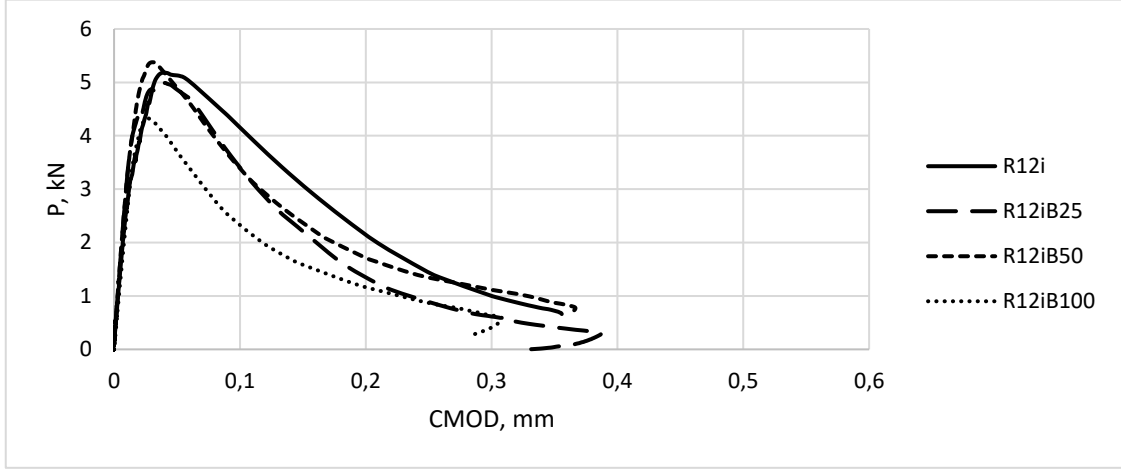
Şekil C.13 RA12 ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



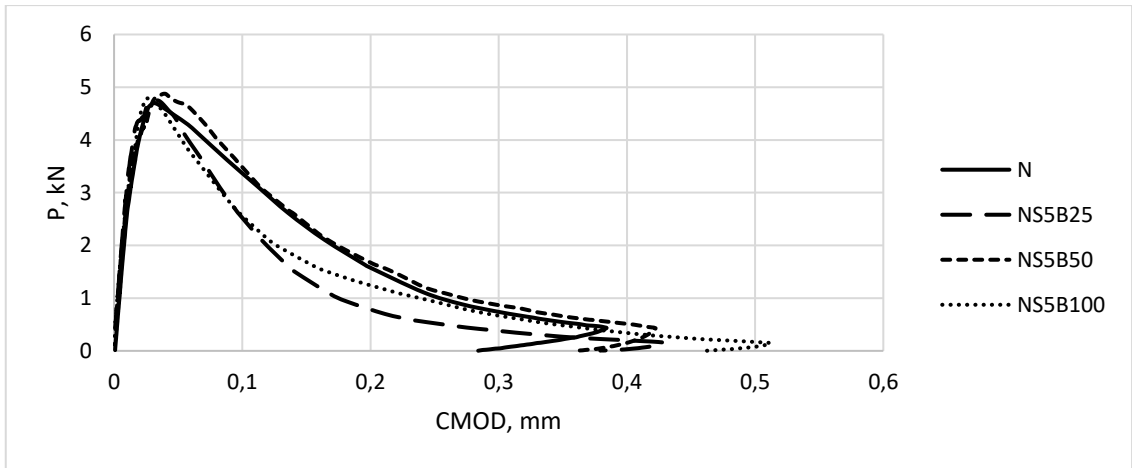
Şekil C.14 RA1i ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



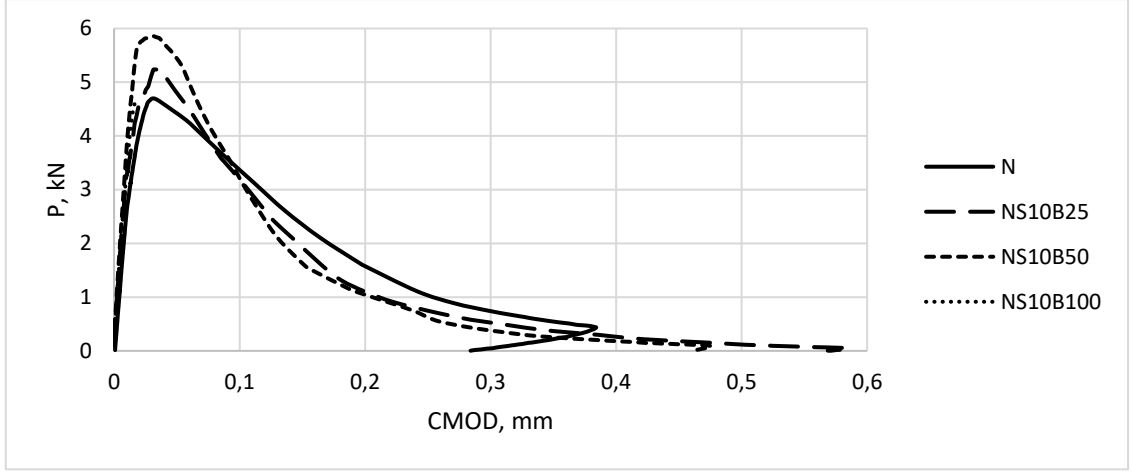
Şekil C.15 RA2i ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



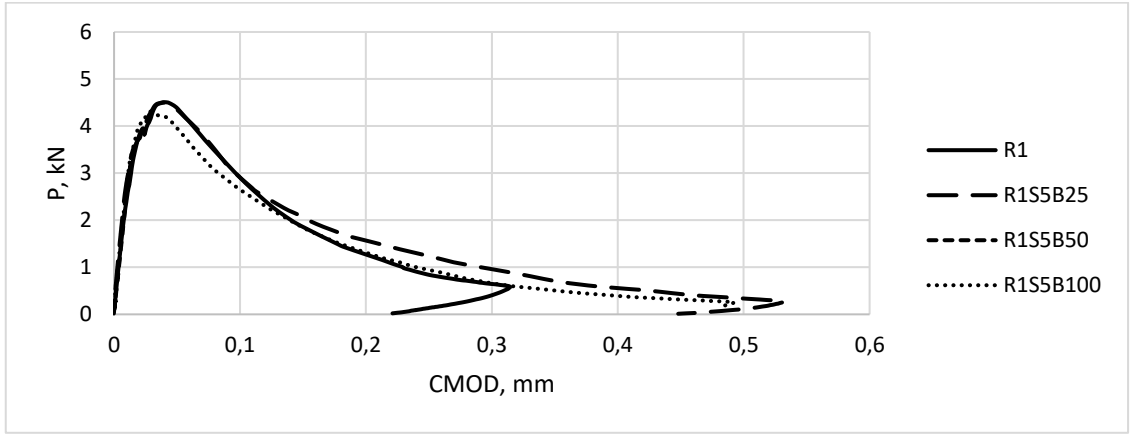
Şekil C.16 RA12i ve BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



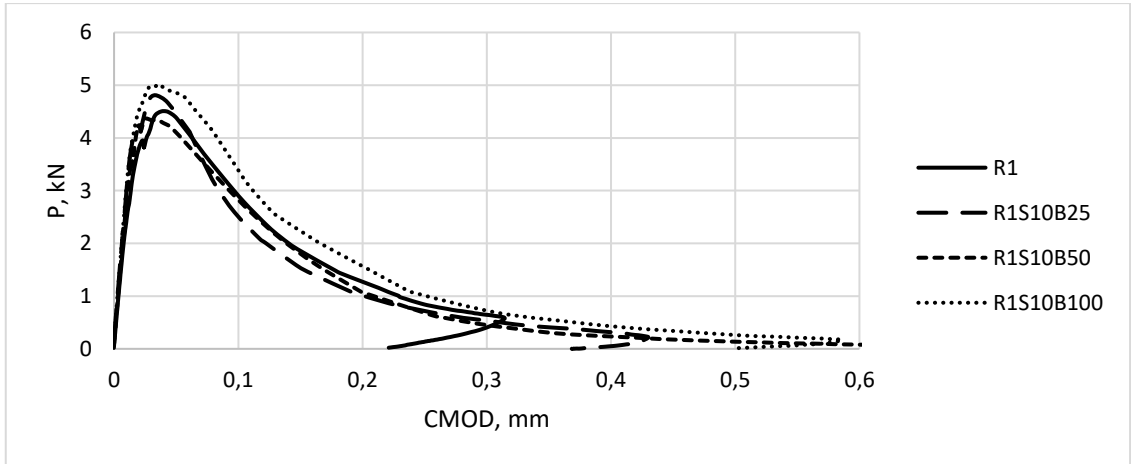
Şekil C.17 NA ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



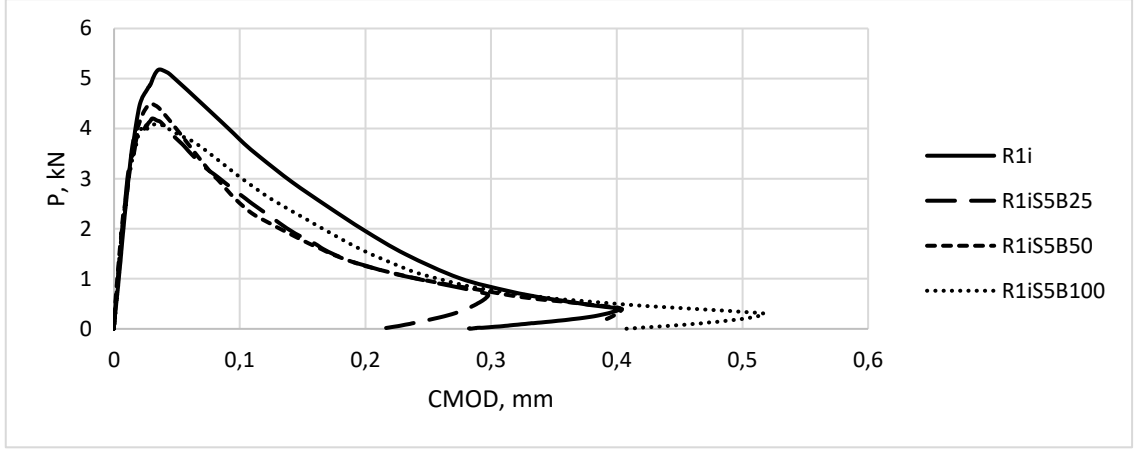
Şekil C.18 NA ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



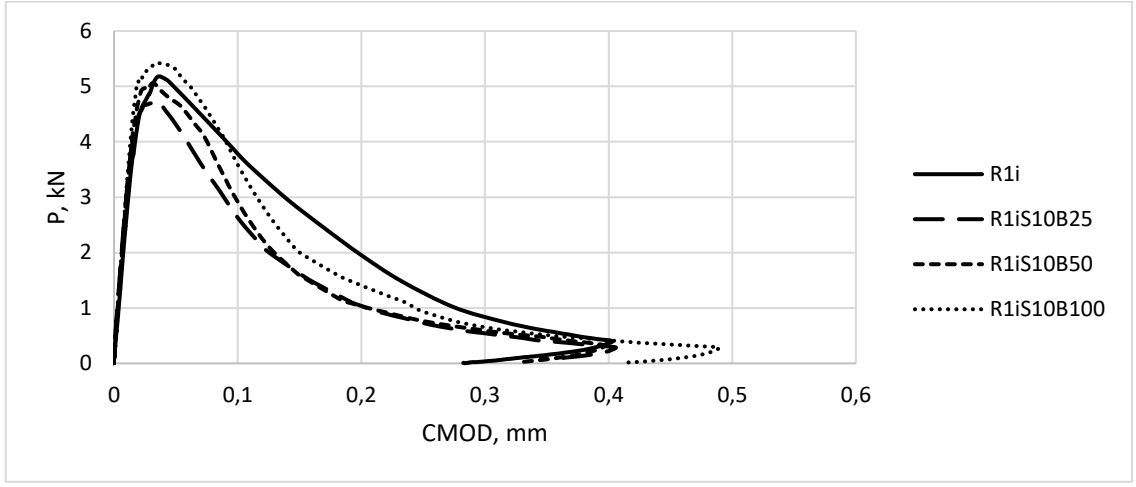
Şekil C.19 RA1 ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



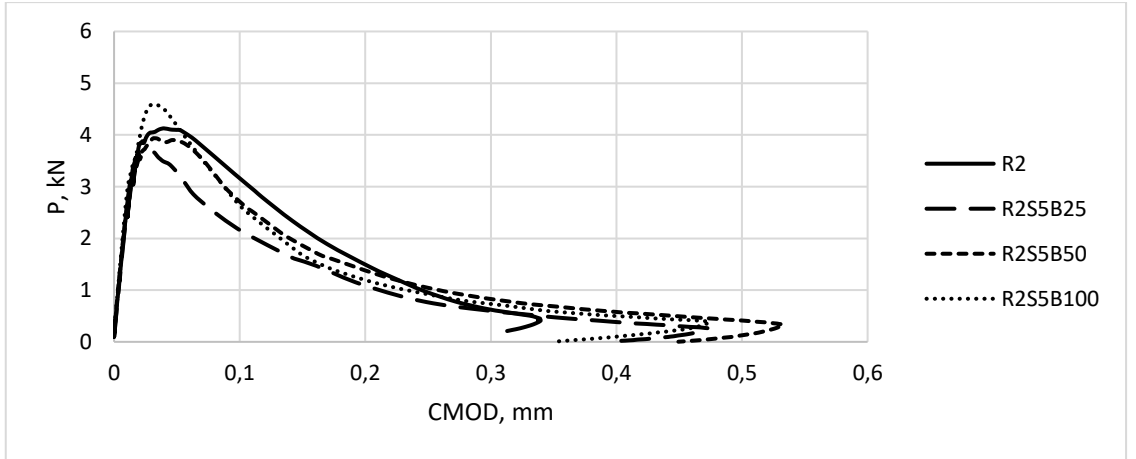
Şekil C.20 RA1 ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



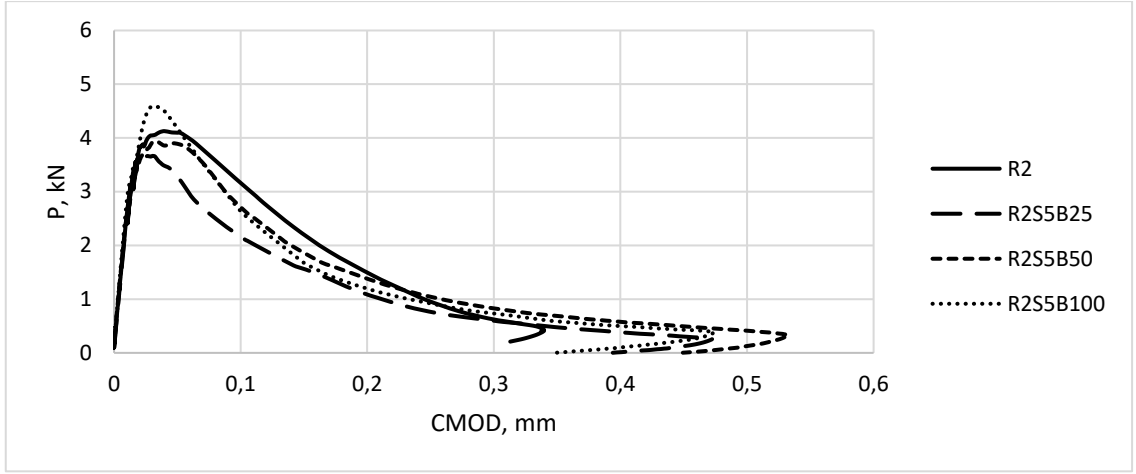
Şekil C.21 RA1i ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



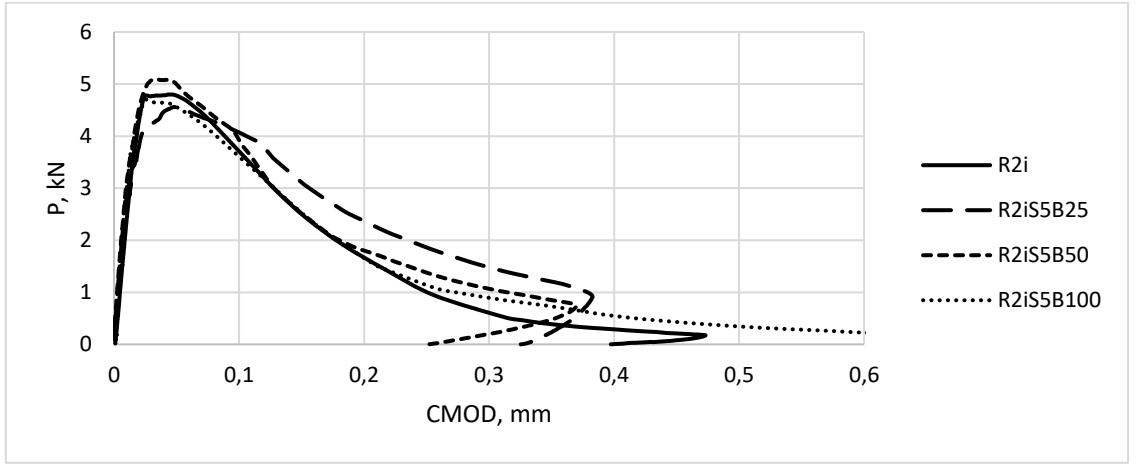
Şekil 22 RA1i ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



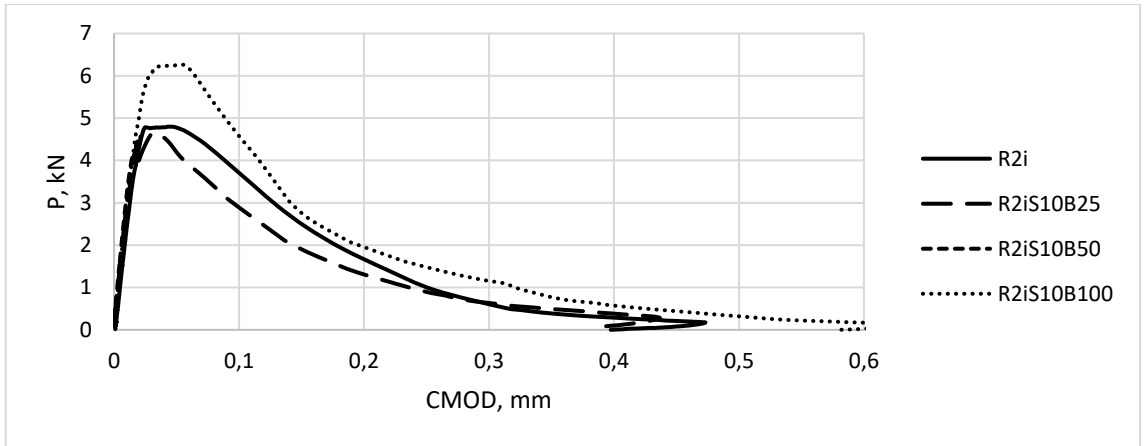
Şekil C.23 RA2 ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



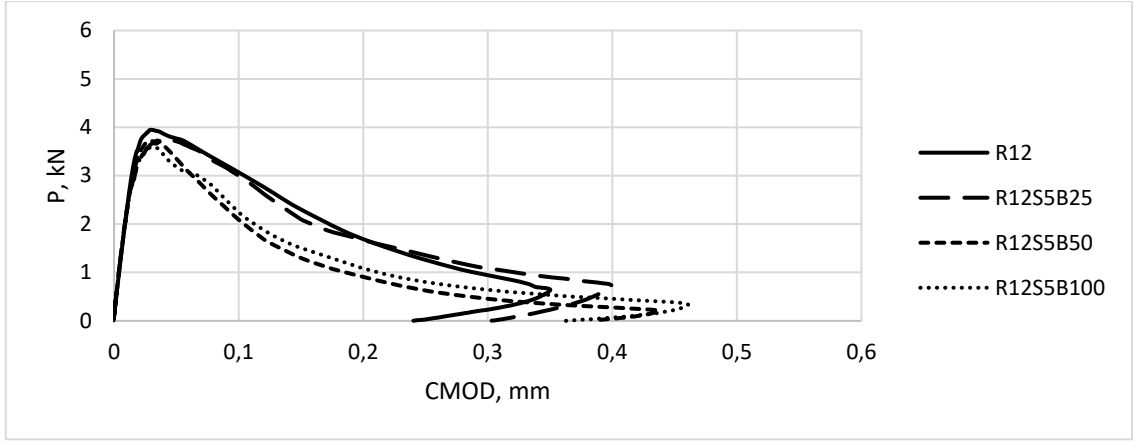
Şekil C.24 RA2 ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



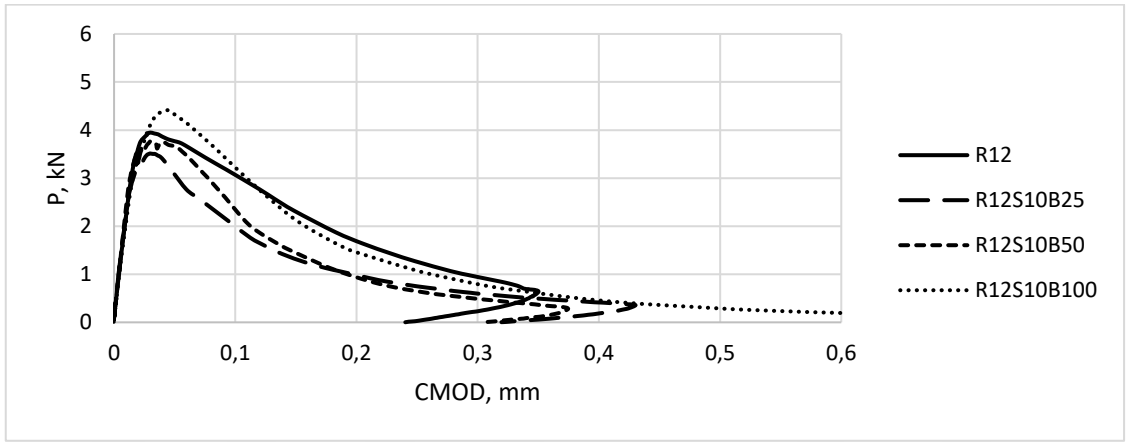
Şekil C.25 RA2i ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



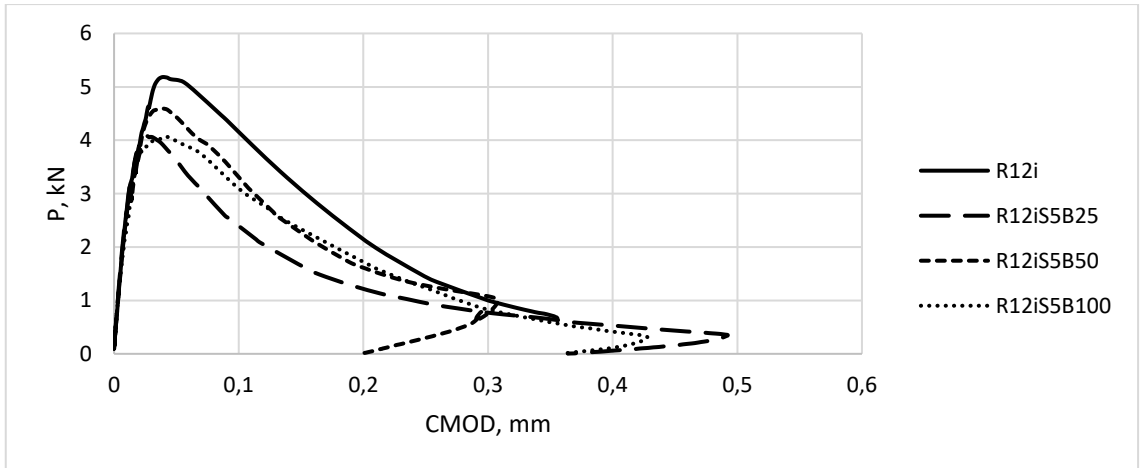
Şekil C.26 RA2i ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



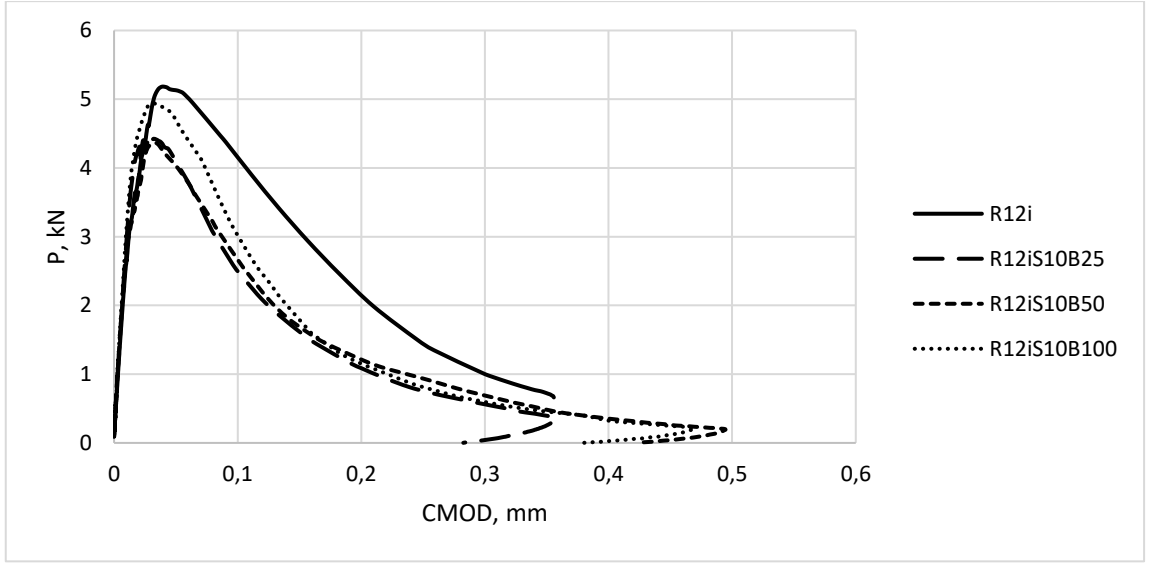
Şekil C.27 RA12 ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



Şekil C.28 RA12 ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



Şekil C.29 RA12i ve %5SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği



Şekil C.30 RA12i ve %10SF+BF içeren betonlara ait yük-çatlak ağzı açıklığı grafiği

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: hasandilbas@gmail.com

hasandilbas@yyu.edu.tr

Makaleler

- 1) H. Dilbas, Ö. Çakır, and C. D. Atış, "Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 716–726, 2019.
- 2) H. Dilbas, Ö. Çakır, and H. Yıldırım, "An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 119118, 2020.
- 3) H. Dilbas and Ö. Çakır, "Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119216, 2020.