

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FERROKROM ATIKLARI İLE ÜRETİLEN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
LİF TAKVİYELİ YEŞİL REAKTİF PUDRA BETONLARININ
BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

İbrahim ATLI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin İPEK

Temmuz 2024

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FERROKROM ATIKLARI İLE ÜRETİLEN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
LİF TAKVİYELİ YEŞİL REAKTİF PUDRA BETONLARININ
BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

İbrahim ATLI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 05/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Metin İPEK	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Ferhat AYDIN	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Yusuf SÜMER	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

İbrahim ATLI

05/07/2024

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Metin İPEK'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarında bana yol gösteren ve değerli bilgi birikimini esirgemeyen Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a, Prof. Dr. Ferhat AYDIN'a, Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na, Dr. Öğretim Üyesi Kutalmış Recep AKÇA'ya, ve Dr. Öğretim Üyesi Abdülhalim AKKAYA'ya, Doç. Dr. Muhammet Fevzi ASLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Musa KAĞIT, Şenol YILDIZ, Musa KARACABEY'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No:072-2022) teşekkür ederim. Doktora çalışmalarına maddi destek sağlayan Bilimsel Araştırma Projelerinden dolayı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkürlerimi bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarımın malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen Yıldırım Holding Elazığ firması arge sorumlusu Dr. Ali KESKİN beye, Nuh Çimento Firmasına ve kimyasal katkı desteleri sağlayan Best Regards Firmasına teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar benden desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	vi
ŞEKİLLER	vii
TABLolar	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
REAKTİF PUDRA BETONU.....	3
2.1. Reaktif Pudra Betonu ile Yapılmış Çalışmalar	3
2.2. RPC'nin Bileşenleri	4
2.3. RPC'nin Karışım Oranları	5
2.4. RPC'nin Mekanik Özellikleri	7
2.5. RPC'nin Kullanım Alanları,	11
2.6. RPC'nin Literatür Taraması	13
2.7. Çalışmanın Konusu, Amacı ve Kapsamı	19
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	22
3.1. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	22
3.1.1. Çimento	22
3.1.2. Silis dumanı.....	25
3.1.3. Kuvars pudrası.....	27
3.1.4. Kuvars kumu	29
3.1.5. Çelik tel	31
3.1.6. Kimyasal katkı.....	33
3.1.7. Su.....	34
3.1.8. Atıklar.....	35
3.1.9. Serpantin.....	38
3.1.10. Olivin.....	39
3.1.11. Uçucu kül	40
3.1.12. Pota altı.....	41

3.1.13. Ferrokrom cürufu	42
3.1.14. Atık lifler	43
3.1.15. Hardox 500 zırh çeliği.....	46
3.2. Ön Deneyler	46
3.2.1. FeCr Cürufların temini	46
3.2.2. FeCr Cürufların deneysel çalışmaları.....	47
3.2.2.1. FeCr Cürufların su muhtevası ve su emme oranının belirlenmesi .	47
3.2.2.2. FeCr Cürufların kuru birim hacim ağırlık deneyi	47
3.2.2.3. FeCr Cürufların özgül ağırlık (yoğunluk) deneyi	48
3.2.2.5. FeCr Cürufların porozite ve kompozite oran hesabı	49
3.2.3. FeCr Cüruflarının karışım boyutlarında hazırlanması.....	49
3.2.4. FeCr Cüruflarının kombinasyonlu olarak karıştırılması	51
3.2.5. Agreganın karışım oranlarının belirlenmesi.....	53
3.2.6. Lif oranının belirlenmesi	55
3.2.7. Deney numunelerinin üretilmesi	56
3.2.8. Balistik numunelerin üretilmesi	57
3.2.9. Balistik numune özellikleri	58
3.2.9.1. C40 Referans numuneleri.....	58
3.2.9.2. GRPB Numuneleri üretilmesi	59
3.2.9.3. Kompozit numuneleri üretilmesi.....	61
3.2.10. Basınç dayanım deneyi.....	61
3.2.11. Eğilme dayanım deneyi.....	62
3.2.12. Balistik testlerin yapılması	66
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	69
4.1. Basınç Dayanımı Deneyi.....	69
4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi.....	75
4.2.1. Lifsiz numunenin değerlendirilmesi.....	77
4.2.2. %1 Lifli numunenin değerlendirilmesi	78
4.2.3. %2 Lifli numunenin değerlendirilmesi	79
4.2.4. %3 Lifli numunenin değerlendirilmesi	80
4.2.5. %4 Lifli numunenin değerlendirilmesi	82
4.3. Birim dayanım maliyeti.....	85
4.4. Balistik deney sonuçları	88
4.4.1. Referans numunenin değerlendirilmesi (NC)	92
4.4.2. Zırh takviyeli referans betonunun değerlendirilmesi (NC-A).....	92
4.4.3. Reaktif pudra betonunun değerlendirilmesi (RPC).....	94
4.4.4. Zırh takviyeli reaktif pudra betonunun değerlendirilmesi (RPC-A)	95
4.4.5. Kompozit betonunun değerlendirilmesi (GRPC+C40+GRPC)	96
4.4.6. Zırh takviyeli kompozit betonunun değerlendirilmesi (GRPC+C40 - A+GRPC).....	98
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR	103
EKLER.....	108

KISALTMALAR

C	: Pota Altı
CF	: Pota altı + Ferrokrom Cürufu
COS	: Pota Altı + Olivin + Serpantin
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
CU	: Agregat + Uçucu Kül
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
DF	: Deforme Olmuş Çelik Elyaf
E	: Endüstriyel
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
F	: Ferrokrom Cürufu
FCO	: Ferrokrom Cürufu + Pota Altı + Olivin
FCS	: Ferrokrom Cürufu + Pota Altı + Serpantin
FeCr	: Ferrokrom Cürufu
FOS	: Ferrokrom Cürufu + Olivin + Serpantin
FU	: Ferrokrom Cürufu + Uçucu Kül
GNP	: Grafen Nanoplatelet
GRPB	: Yeşil Rektif Pudra Betonu
GRPC	: Green Reactive Pavder Concrete
HCFerCr	: Yüksek Karbonlu Ferrokrom
MF	: Mikro Çelik Elyaf
NC	: Referans Numunesi
NC-A	: Zırlı Referans Numunesi
NDT	: Bağlı Dinamik Modül
O	: Olivin
OA	: Olivin Cürufu
OC	: Olivin Pota Altı
OF	: Olivin + Ferrokrom Cürufu
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lif
PCP	: Poliüretan Dolgulu Kompozit Cephe Paneline

P-RPC	: Pomza İçeren Reaktif Pudra Betonun
RPC	: Reaktif Pudra Betonu
RPC-A	: Zırlı Reaktif Pudra Betonu
S	: Serpantin
SASKİ	: Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi
SC	: Serpantin +Pota Altı
SF	: Serpantin + Ferrokrom Cürufu
TÇMA	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin
U	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrasonik Darbe Hızı
UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
WF	: Atık Çelik Elyaf
WGA	: Atık Cam Agregası
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
C1E	: C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif içeren numune
C1E-Z	: C40 Betonarme + Endüstriyel Lif (%1) + Zırh (2 cm)
GRPC4W	: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)
GRPC4W-Z	: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zırh (2 cm)
COMP	: [GRPC + ÖTL Lif (%4)10 cm] + [C40 Betonarme + Endüstriyel Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm]
COMP-Z	: [GRPC+ÖTL Lif (%4) 10 cm] + [C40 Betonarme+Endüstriyel Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm]+ Zırh (2 cm)

SİMGELER

σ	: Net Basınç Dayanımı
σ_e	: Net eğilme dayanımı
τ	: Kayma Gerilmesi
δ_0	: Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu
γ_d	: Doygun Birim Hacim Ağırlık
σ_f	: Çekme Gerilmesi
γ_k	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
A	: Numune kesit alanı
b	: Numune kesitinin genişliği
D	: Çapı
d	: Elek boyutu,
G	: Özgül Ağırlık
g	: Yer çekimi ivmesi
G_f	: Kırılma enerjisinin
h	: Numune kesitinin yüksekliği
k	: Kompozite
l	: Mesnetler arası uzaklık
L_{cr}	: Kritik Lif Uzunluğu
m	: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı
n	: Fuller Katsayısı
O	: Oksijen
P	: Elekten geçen malzeme miktarı
p	: Porozite
P	: Kırılma Yüğü
P_e	: Kırılma yüğü
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum Dioksit
W_o	: Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan

ŞEKİLLER

Şekil 2.1: RPC'nin ilk üretim ürünü Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsü [7]	4
Şekil 2.2 : Normal beton ve çelik lif donatılı UHPC'nin eğilme davranışı [21].....	10
Şekil 2.3 : Normal harç ve lif katkılı RPC200'ün eğilme davranışı [20].....	11
Şekil 2.4 : RPC'den üretilmiş elemanlar [21]	12
Şekil 3.2 : Silis dumanı taneleri ve EDS analizi	26
Şekil 3.3 : Kuvars pudrası SEM görüntüsü.....	28
Şekil 3.4 : Endüstriyel çelik lifler	32
Şekil 3.5 : Kromit Cevheri.	35
Şekil 3.6 : Ferrokrom cüruflarının oluşum süreci.	37
Şekil 3.7 : Serpantin cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.	38
Şekil 3.8 : Olivin cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	39
Şekil 3.9 : Uçucu kül tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	40
Şekil 3.10 : Pota altı cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi	41
Şekil 3.11 : Ferrokrom cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	42
Şekil 3.12 : Taneli malzemelerin granülometri eğrisi.....	43
Şekil 3.13 : Mekanik yollarla ayıklanan ve depolanan ÖTL telleri.	44
Şekil 3.14 : ÖTL Liflerin boyutsal olarak ayıklanması.....	44
Şekil 3.15 : ÖTL Liflerinin ayrışma boyutları	45
Şekil 3.16 : Endüstriyel ve ÖTL liflerinin görünümü.	45
Şekil 3.17 : Endüstriyel ve ÖTL mikro lifleri.	45
Şekil 3.18 : Hardox 500 Çeliği.....	46
Şekil 3.19 : Ferrokrom cürufları su muhtevası ve su emme deneyi.....	47
Şekil 3.20 : Ferrokrom cürufları kuru birim ağırlık deneyi.	48
Şekil 3.21 : Ferrokrom cürufu birim hacim deneyi.....	48
Şekil 3.22 : Ham ve Elenmiş Ferrokrom Cürufları	50
Şekil 3.23 : Bıçaklı Öğütücü Değirmen	50

Şekil 3.24 : Ham ve öğütülmüş FeCr Cürufu.....	51
Şekil 3.25 : FeCr Cürufların kombinasyonları.....	51
Şekil 3.26 : Taneli malzemelerin karışım teorisi [46].....	54
Şekil 3.27 : Agrega Karışım Oranları grafiği.....	55
Şekil 3.28: Mikser ve matris hamurunun görünümü.....	56
Şekil 3.29 : Numunelerin priz süreci ve kür edilmesi.....	57
Şekil 3.31 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif içeren numune kesiti.....	58
Şekil 3.32 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif (C1E) içeren referans numunelerin üretimi.....	59
Şekil 3.33 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif + Zırh (2 cm) (C1E-Z) içeren zırlı referans numune üretimi.....	59
Şekil 3.34: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4) (GRPC4W) içeren numune kesiti.....	60
Şekil 3.35 : GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4) (GRPC4W) içeren numune üretimi	60
Şekil 3.36: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zırh (2 cm), (GRPC4W-Z) içeren numune kesiti.....	60
Şekil 3.37 : GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zırh (2 cm), (GRPC4W-Z) içeren numune üretimi.....	61
Şekil 3.38 : [GRPC + ÖTL Lif (%4)10 cm] + [C40 Betonarme + Endüstriyel Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm] içeren numune kesiti.....	61
Şekil 3.39 : Eğilme Deney düzeneği.....	62
Şekil 3.40: Lifsiz ve %4 numunelerin eğilme deneyi sonucu kırılma şekilleri.....	63
Şekil 3.41 : Eğilme Deneyi Sonucu kırılma şekilleri.....	63
Şekil 3.42 : Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu deney düzeneği.....	63
Şekil 3.44 : Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu [60]......	65
Şekil 3.45 : Numunelerin konumlandırılması için hazırlanan alt betonarme platform...	66
Şekil 3.46 : Atış öncesi numunelerin test alandaki mevcut durumları.....	67
Şekil 3.47 : Kameraların atış alanındaki konumları.....	68
Şekil 3.48 : Temsili tank ve Sabot mermisi.....	68
Şekil 4.1 : Basınç dayanım test düzeneği ve referans kırılmış numune resmi.....	69
Şekil 4.4 : Lif oranı, basınç dayanımı değişim grafiği.....	74
Şekil 4.5. Eğilme dayanım deneyi sonucu kırılmış Referans (lifsiz) ve lifli kesilmiş numune kesit.....	74
Şekil 4.6. ÖTL Lifli ve Endüstriyel Numunenin Eğilme Kesit.....	75
Şekil 4.7. Lif içerikli GRPC'ye ait SEM görüntür.....	76

Şekil 4.11. Referans ve %2 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği	80
Şekil 4.12. Referans ve %3 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği.	81
Şekil 4.13. Referans ve %4 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği	83
Şekil 4.16. Lif oranı, eğilme dayanımı birim maliyeti değişim grafiği.....	87
Şekil 4.17. Lif oranı basınç dayanım birim maliyet değişim grafiği.	88
Şekil 4.18 : Numunelerin test alanındaki kamera görüntüleri.....	89
Şekil 4.18 (Devam) : Numunelerin test alanındaki kamera görüntüleri	90
Şekil 4.19. Atış sonrası numunelerin genel durumu.	91
Şekil 4.20. C40 betonunun atış deneyi sonrası görünümü.	92
Şekil 4.21 : Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü	93
Şekil 4.22: Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü	93
Şekil 4.22 (Devam) : Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü	94
Şekil 4.24. Zırh takviyeli reaktif pudra betonunun (RPC-A) atış sonrası görünümü.	96
Şekil 4.25: Kompozit Betonunun (GRPC+C40+GRPC) atış sonrası görünümü.....	97
Şekil 4.26 : Zırh Takviyeli Kompozit Betonunun Değerlendirilmesi.....	98

TABLolar

Tablo 2.1 : RPC200 ve RPC800'yi oluşturan malzemeler ve miktarları [19].	7
Tablo 2.2 : RPC200 ve RPC800'ün mekanik özellikleri [5].	8
Tablo 2.3 : RPB'nin mekanik özellikleri [19].	9
Tablo 2.4 : RPC mekanik özelliklerinin, geleneksel ve dayanımı yüksek betonlarla kıyaslanması [19].	9
Tablo 3.1 : Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	23
Tablo 3.2 : Çimento ve silis dumanının tane dağılımı	24
Tablo 3.2(Devam) : Çimento ve silis dumanının tane dağılımı	25
Tablo 3.3 : Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri.	27
Tablo 3.4 : Kuvars pudrası elek analiz sonuçları.	28
Tablo 3.5 : Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri	30
Tablo 3.6. Kuvars kumu tane dağılımı	30
Tablo 3.7. Kullanılan lifin teknik özellikleri [39].	32
Tablo 3.8 : Kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri.	34
Tablo 3.9 : Deneylerde kullanılan suyun kimyasal özellikleri.	34
Tablo 3.10 : Endüstriyel ÖTL lifi fiziksel özellikleri.	44
Tablo 3.11: Ferrokrom cüruflarının malzeme özellikleri ve kodları.	49
Tablo 3.12: FeCr cüruflarının ikili karışım malzemesinin özellikleri.	52
Tablo 3.13: FeCr cüruflarının üçlü karışım malzemesinin özellikleri	52
Tablo 4.1: İkili Karışım Oranları ve Basınç Dayanım Sonuçları	70
Tablo 4.2: Üçlü Karışım Oranları ve Basınç Dayanım Sonuçları	70
Tablo 4.3: RPC ile GRPC'nin karışım oranları ve basınç dayanımı değerleri	72
Tablo 4.4: Endüstriyel ve ÖTL lif katkılı GRPC'nin karışım oranları ve basınç dayanımı.	73
Tablo 4.5: ÖTL ve Endüstriyel lif katkılı GRPC'nin eğilme deney sonuçları	84
Tablo 4.6: RPC ve GRPC'nin birim maliyeti.	85
Tablo 4.6 (Devam) : RPC ve GRPC'nin birim maliyeti.	86

Tablo 4.7: GRPC'nin birim dayanım maliyeti.....	86
Tablo 4.7 (Devam): GRPC'nin birim dayanım maliyeti.....	87



FERROKROM ATIKLARI İLE ÜRETİLEN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ LİF TAKVİYELİ YEŞİL REAKTİF PUDRA BETONLARININ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Reaktif Pudra Betonu (RPC) yüksek dayanımlı, özel yapılarda kullanılan ve kullanımı gün geçtikçe artan yüksek maliyetli yeni nesil bir betondur. Bu çalışmada, RPC'lerde kullanılan yüksek mukavemetli ve maliyetli agregalar yerine, ferrokrom üretiminde açığa çıkan atık malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca RPC'de mikro boyutlu çelik endüstriyel liflerin yerine ömrünü tamamlamış otomobil lastiklerinden (ÖTL) mekanik olarak elde edilen mikro boyutlu atık çelik liflerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Böylece bünyesinde bağlayıcı madde ve kimyasal katkı maddeleri dışında diğer tüm malzemelerin atık malzemeler kullanılarak elde edilmiş çevreci özelliğe sahip reaktif pudra betonu (GRPC) geliştirilmiştir. Bu da atıkların bertaraf edilmesi ve maliyet açısından geleneksel RPB'nin daha ekonomik GRPB elde edilmiştir. İlk aşamada, lifsiz RPC'de, ferrokrom atıkları kullanılarak fiziksel ve mekaniksel özellikleri incelenmiş ve optimum karışım oranı belirlenmiştir. İkinci aşamada, farklı oranlarda çelik endüstriyel lifi ve çelik ÖTL lifi kullanılmıştır. Son aşamada, GRPC ile betonarme ve zırh çeliği içeren blok numuneler üretilmiş ve balistik özellikler incelenmiştir. Sonuç olarak, en iyi agrega ikame oranının, %70 ferrokrom cürufu (F) ve %30 Olivin (O) olduğu belirlenmiştir. Bu atık agregalar kullanılarak elde edilen RPC numunelerinin basınç dayanım değeri, referansa numuneye göre değeri %15 oranında artış göstermiş ve maliyeti %35,5 oranında azaldığı görülmüştür. Optimum karışıma, aynı oranda çelik endüstriyel lifi ve çelik ÖTL lifi hacimce %4 oranında ilave edilmiştir. ÖTL lifinin karmaşık bir yapıya sahip olması, matris ile lif arasındaki aderansa ciddi avantaj sağlamış ve çelik endüstriyel life göre basınç dayanım ve eğilme dayanımında ciddi şekilde artış sağlamıştır. Karışımda en yüksek eğilme dayanım değeri %4 ÖTL lifinde elde edilmiş ve endüstriyel lifli numuneye göre %11 dayanım değeri daha yüksek olduğu, maliyetin ise %41 oranında düşmüştür. GRPC'nin balistik özellikleri yüksek hıza sahip olan tank mermisi ile test edilmiştir. Merminin numuneye giriş ve çıkış hızı sırasıyla 1434 m/sn ve 144 m/sn ölçülmüştür. Numunenin ciddi oranda merminin kinetik enerjisini sönmülediği görülmüştür. Böylece atık malzemelerden elde edilen GRPC'nin balistik etkilere karşı özel yapılarda kullanılabilmesi görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Reaktif Pudra Betonu, Ferrokrom cürufu, Olivin, ÖTL, Balistik,

INVESTIGATION OF BALLISTIC PROPERTIES OF RECYCLED FIBER REINFORCED GREEN REACTIVE POWDER CONCRETES PRODUCED WITH FERROCHROME WASTES

ABSTRACT

Reactive Powder Concrete (RPC) is a high-strength, high-cost new generation concrete used in special structures and increasingly used. In this study, waste materials released in ferrochrome production were used instead of high-strength and costly aggregates used in RPCs. In addition, the usability of micro-sized waste steel fibers obtained mechanically from end-of-life automobile tires (OTL) instead of micro-sized industrial steel fibers in RPC was investigated. Thus, reactive powder concrete (GRPC) with environmentally friendly properties was developed, which was obtained by using waste materials other than binders and chemical additives. This resulted in more economical GRPB than traditional RPB in terms of waste disposal and cost. In the first stage, the physical and mechanical properties of fiber-free RPC were examined using ferrochrome wastes and the optimum mixing ratio was determined. In the second stage, steel industrial fiber and steel STL fiber were used in different proportions. In the last stage, block samples containing reinforced concrete and armor steel were produced with GRPC and ballistic properties were examined. As a result, it was determined that the best aggregate replacement ratio was 70% ferrochrome slag (F) and 30% olivine (O). It was observed that the compressive strength value of the RPC samples obtained using these waste aggregates increased by 15% compared to the reference sample and the cost decreased by 35.5%. The same amount of steel industrial fiber and steel STL fiber were added to the optimum mixture at a rate of 4% by volume. The complex structure of the STL fiber provided a serious advantage to the adhesion between the matrix and the fiber and provided a serious increase in compressive strength and bending strength compared to the steel industrial fiber. The highest bending strength value in the mixture was obtained with 4% STL fiber and the strength value was 11% higher than the industrial fiber sample and the cost decreased by 41%. The ballistic properties of GRPC were tested with a high-speed tank projectile. The projectile's entry and exit speed into the sample were measured as 1434 m/s and 144 m/s, respectively. It was observed that the sample significantly damped the kinetic energy of the projectile. Thus, it was seen that GRPC obtained from waste materials could be used in special structures against ballistic effects.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Ferrochrome Slag, Olivine, ELT, Ballis

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Beton, üretiminin aşamasındaki kolay elde edilişi, tasarlanan ve istenen şeklin verilebilmesi, gösterdiği yüksek basınç ve ekonomik olmasından dolayı hâlihazırda yapı malzemelerinde vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Bu sebepten dolayı yapıların inşa edilmesi aşamalarında gerek betonarme gerekse çelik yapılarda kullanılan bir betondur. Bu özelliklerinden dolayı yapı elemanlarında kullanılmasının getirdiği talep karşısında gün geçtikçe gelişim içerisinde.

Beton, çimento, su, agrega ve istenildiği zaman kimyasal katkıları kullanarak oluşan bir yapı malzemesidir. Beton başlangıçta işlenebilir kıvamda olup, zamanla bağlayıcının hidrasyon özelliği ile katılaşıyor ve dayanım kazanan malzemedir. Kolay şekil verilebilir oluşu, basınç dayanımının yüksek olması ve zamanla iç ve dış etkilerden etkilenerek özelliğini kaybetmemesi betonu öncelikle tercih edilen bir yapı malzemesi olmuştur. Beton bu özelliklerinden dolayı mikro yapıların yanında makro olan baraj gibi birçok yapının inşasında kullanılmaktadır. Betonun en önemli dezavantajları olarak yoğunluğunun yüksek olması, gevreklik ve çekme dayanımının düşük olması gösterilmektedir. Betonun bu dezavantajlarını gidermek için genellikle lif kullanılmaktadır. Bu sayede betonun gevreklik ve eğilmedeki çekme dayanımı iyileştirilmektedir. Beton teknolojisindeki gelişmeler sayesinde beton basınç dayanımları 100 MPa üzerine çıkmıştır. Bu dayanım artışı betonun durabilitesini de olumlu etkilemiştir. Bu sayede sıra dışı birçok yapı inşa edilebilmektedir [1-4].

Yüksek performanslı betonlarda, sadece basınç dayanımının yüksek olması hedeflenmemekte aynı zamanda süneklik ve dayanıklılık özellikleri de birlikte değerlendirilmektedir. Bu nedenle yüksek dayanımlı betondan ziyade yüksek performanslı beton olarak nitelendirilmektedir. Yüksek performanslı betonların süneklik düzeyini arttırmak için genellikle hacimce % 4 orana kadar çelik lifler katılmaktadır. Bu lif oranı işlenebilirlik nedeniyle daha fazla arttırılamamaktadır.

Bu lif düzeyi aksel şekil değiştirme kapasitesini büyük oranda arttırmakta, sünekliliği yeterli seviyeye getirmektedir [5].

Betonda çelik life alternatif olarak bazalt, karbon, cam ve polipropilen lifler kullanılmaktadır. Lifler sayesinde, eğilme veya çekme dayanımlarının karşılanması, rötre çatlaklarının büyük oranda engellenmesi ve enerji yutma kapasitesinin diğer bir değişle tokluğun artması sağlanmaktadır [2,5].

Betona lif katılmasına ek olarak, tane dağılımının normal betonlara göre çok daha hassas düzenlenmesi, puzolanik reaksiyonun en üst seviyede gerçekleştirecek mineral katkıların kullanılması, farklı karışım ve üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve ideal kür koşullarının sağlanmasıyla ultra yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Bu betonlarda kullanılan tüm malzemelerin üstün kalite standardında ve üst düzey homojenlikte olması gerekmektedir. Özel amaçlar için üretilen yüksek performans özelliği aranan betonlardan biri de reaktif pudra betonudur (RPC). Bu beton 1990'lı yıllarda bulunmasına karşın hızla kullanılmaya ve gelişmeye başlamıştır [1-5].

BÖLÜM 2. REAKTİF PUDRA BETONU

RPC genellikle ince taneli (1 mm'den daha düşük) malzemelerden meydana gelmekte ve yüksek oranda çimento ve puzolan, tane dağılımı hassas olarak ayarlanmış yüksek kalite ve mukavemetli agrega, kimyasal katkı ve çelik lif içeren performansı yüksek bir betondur. RPC basınç dayanımı olarak genellikle 120 MPa dayanımdan yüksek olması beklenmektedir. Puzolan olarak yüksek oranda (yaklaşık %30) genellikle silis dumanı kullanılmaktadır. RPC'nin terminolojisi ise, toz boyutundaki malzemelerden meydana geldiği için pudra ifadesini almaktadır. Puzolonik aktivitesinden dolayı reaktif kelimesini almıştır. Çimento matrisli olduğu için beton sınıfına girmektedir.

2.1. Reaktif Pudra Betonu ile Yapılmış Çalışmalar

Yüksek performanslı betonların kullanımı 1990'lı yıllarda başlanmıştır. İlk çalışmalara Richard ve arkadaşı tarafından yapılmıştır [3]. RPC ile yapılan imalatlardan ilki olan ve Kanada'nın Quebec eyaletinin güney doğusunda yer alan Sherbrooke ilindeki Şekil 2,1'deki yürüme yolu olmuş ve takip eden yıllarda giderek yaygınlaşmıştır. Günümüzde prekast yapı elemanlarında, köprü ayaklarında, nükleer santraller, deniz yapıları, petrol arama platformları ve askeri yapılarda kullanılmaktadır [4,7].



Şekil 2.1: RPC'nin ilk üretim ürünü Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsü [7]

2.2. RPC'nin Bileşenleri

RPC'de kusursuz bir içyapı elde edebilmek için, normal betonlarda kullanılan iri agrega karışımından çıkarılmış ve tane boyutu 1 mm'den (genellikle 500 μ) daha küçük boyuta sahip agregalar tercih edilmektedir. Agrega tane dağılımının hassas olarak belirlenmesi ile kusursuz bir içyapı ve homojenlik sağlanmaktadır. Puzolan olarak kullanılan silis dumanı çimento ile yüksek oranda reaksiyona girerek puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır. Bunun yanı sıra çimentodan daha küçük tane boyutuna sahip olması hem çimento taneleri arasındaki boşluğu hem de agregalar arasındaki minimum boşluğu doldurmaktadır. Elde edilen matrise uygun mikro boyuttaki lifler ile matris güçlendirilmekte ve süneklik kazandırılmaktadır.

Matrisin yüksek dayanımı için sertlik derecesi yüksek, homojen, dayanımı yüksek olan ve bulunabilirliği kolay ve ekonomik olan malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Normal betonlar gibi RPC da bağlayıcı özelliği olan çimento hamurlu bir betondur ve bağlayıcılığın ana maddesi çimentodur. Dayanımı yüksek betonlarda kullanılan çimentolar kullanılmıştır [6]. Yapısal özellikler ve mekanik performans bakımından en iyi çimento yüksek silis içerikli ve düşük alkaliye sahip C_3A çimentodur [8]. Bu tip çimentoların çok yavaş sertleşme dezavantajları bulunmaktadır.

Yüksek Blain değerine sahip çimentolar, fazla su ihtiyacı duymalarına karşın çok iyi mekanik performans göstermeleri nedeniyle kullanılmaktadır. Genellikle bu betonlar için CEM I 52,5 MPa basınç dayanıma sahip bağlayıcılar kullanılmaktadır [5,9]. Bünyesindeki tane boyutu μ olan taneli malzemeleri bir arada tutacak, bağlayıcı matristeki çok küçük boşlukları dolduracak ve çimentonun reaksiyonu ile meydana gelen serbest kireç (Ca(OH)_2) ile puzolanik reaksiyon gerçekleştirerek bir miktar dayanımı artıracak bir puzolan malzeme gerekmektedir. Bu gereksinim, silis dumanı tarafından en iyi şekilde karşılanmaktadır [3-6-11-12-13]. Silbu malzeme, silikon veya demirli silisyum (ferrosilisyum) imalatında cüruf olarak meydana gelen amorf yapılı, şeffaf, %85 ile %98 arası silisyum dioksit (SiO_2) kürelerinden meydana gelen bir maddedir. Bu küreler yaklaşık olarak boyutu 0,5 μm altındadır [14].

RPC'nun bünyesindeki su/bağlayıcı oranı 0,15-0,25 aralığındadır. Bu değer in sağlanabilmesi için su azaltıcı katkılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca düşük su/bağlayıcı oranında iyi bir işlenebilirlik sağlamak mümkün değildir. Bu nedenle normal betonlarda kullanılan su azaltıcı ve akışkanlaştırıcılardan daha farklı kimyasal katkılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek performanslı betonlardaki bu ihtiyacı karşılamak için polikarboksilat esaslı katkıları kullanılmaktadır. Bu katkıların oranı normal betonlardan daha fazla olarak çimento ağırlığının %3-4 oranındadır [5,15].

RPC'nin yüksek dayanımlı matrisine sahip olmasına karşı sünekliği standart betonlara kıyasla düşüktür. Bu istenmeyen bir durum olan süneklik ve çekme dayanımını arttırmak için matrisine çelik lifler katılmaktadır. Bu lifler genellikle mikro boyutta kancasız, olup yüzeyleri düz ve pirinç kaplıdır. Bu liflerin geometrisi 0,15-0,30 mm kalınlığında ve 6-15 mm uzunluklarındadır. Betona hacimce %1,5-5 arasında karışıma eklenmektedir [16].

2.3. RPC'nin Karışım Oranları

RPC'nin karışım oranlarının belirlenmesinde herhangi bir standart günümüzde mevcut değildir. Bu nedenle standart bir karışım oranı yoktur. Karışım oranlarının belirlenmesindeki temel prensip normal betonlarda olduğu gibi maksimum doluluk oranını sağlamaktır. Karışım oranlarının belirlenmesinde ilk olarak agrega karışım oranları belirlenmektedir. Agrega karışım oranları için Fuller, Andreasen ve Andersen benzeri metotlar kullanılmaktadır [17,18].

RPC'nin karışım oranları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde homojen, daha sıkı bir içyapı elde etmeyi amaç edinen Richard ve arkadaşları [3], bu amaca uygun karışım elde etmek için aşağıdaki yaklaşımları uygulamışlardır.

- Homojenliğin artırılması için makro boyuttaki agregaların kullanılmaması,
- Sünekliğin artırılması için mikro boyuttaki liflerin kullanılması,

Geleneksel beton içinde bulunan malzemelerin boyut farklılıklarından dolayı homojen olmayan bir içyapısı mevcuttur. Bu sebepten dolayı betonun ana malzemelerinden olan agregalar yeterince çimento matrisi tarafından iyi sarılmamakta ve bir bütün olarak iskelet şeklinde davranmamaktadır. İçyapının homojen olması için aşağıdaki yaklaşımlar yapılmıştır.

- Boyutsal olarak mikro yapıyı elde edebilmek öncelikle makro boyuttaki malzemeleri matris boyutuna indirgenmelidir. Bunun için Agregam/matris oranının 1'e yakın olacak şekilde dizayn edilmelidir.
- Makro boyuttaki agregalar yerine boyutu maksimum 500 µm ince taneli kum kullanılmalıdır.
- Mekanik özelliklerin artırılması için iyileştirilmiş bir ara yüzey elde edilmelidir.

Yukarıdaki yaklaşımlar homojenliği artırıcı yönde iyileştirmeler elde edilse bile matris ile agrega arasında istenmeyen zayıf bağların olması homojenlik ve dayanım yönünden önemlidir. Geleneksel beton içerisinde agrega sert bir yapı şeklindedir. Uygulanan basınç kuvvetiyle, agrega-matris ara yüzeyinde kesme ve çekme kuvvetleri neticesinde pastada çatlakların oluşmasını yol açmaktadır. Bu çatlakların boyutu çekme veya kesme gerilmelerine maruz kalan bölgenin yük altında uzamasıyla bağlantılıdır. RPC'de kullanılacak kaba agrega boyutunu 20 mm değil de yaklaşık 20 kat daha azaltılarak mikro boyut olan 400 µm kullanılması çatlakların azalmasını sağlayacaktır [3]. Dugat ve arkadaşları [19], reaktif pudra betonlarının mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, RPC200 ve RPC800 betonlarını oluşturan malzemeler Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1 : RPC200 ve RPC800'yi oluşturan malzemeler ve miktarları [19].

Kullanılan Malzeme (kg/m ³)	RPC200	RPC800
Portland çimentosu	950	980
Silis dumanı	237	225
Öğütülmüş kuvars	-	382
Silis kumu	997	490
Çelik lif (1,3 cm)	146	-
Paslanmaz çelik lif (0,3 cm)	-	617
Süper akışkanlaştırıcı	17	18
Toplam su	180	186
Su/bağlayıcı (Çimento +silis dumanı)	0,15	0,14

Kullanılacak malzemeler farklı bölgelerde olması durumuna göre karışım oranları değişiklik gösterebilir. Bölgesel farklılıklardan dolayı birçok karışım dizaynları mevcuttur. Burada elde edilecek karışımda geleneksel betonlarda kullanılan Fuller teorisi gibi teorilerden yararlanılmaktadır. Karışım oranları incelendiğinde, su/bağlayıcı oranının düşük olduğu, toplam karışımın yaklaşık %38'lik bir oranla çimento miktarının diğer betonlara göre oldukça fazladır. Su miktarının düşük olması yeterince su bulamayan çimento taneleri reaksiyona giremediği için hidrate olamaz. Fakat silis dumanı, pudra ve çimento benzer boyutta olduğu için reaksiyona girmeyen çimento taneleri agrega olarak davranmaktadır. Bu durum dayanıma olumlu etki sağlamaktadır.

2.4. RPC'nin Mekanik Özellikleri

Normal betonlarla kıyaslanmayacak kadar üstün mekanik özellikleri olan RPC diğer betonların birkaç mekanik özellikleri çelikler ile kıyas yapılabilecek düzeydedir.

Kıyaslanacak mekanik özelliklere ulaşılması için karışımın ana özelliklerinden olan homojenlik ve içyapıdaki kusurların minimize edilmesidir.

Bu özellikler, RPC'lerin çeliğe alternatif malzeme olarak değerlendirildiği bazı uygulama alanlarında kullanılmaya başlamıştır [1].

Mekanik özelliklerin yükseltilmesi için en belirgin özellik, matris-agrega arasında sağlam bir aderans sağlanması ve boşluk oranı minimize edilmiş pastanın elde edilmesidir. RPC betonlar ile ilk çalışmaları yapan araştırmacılar RPC'yi RPC200 ve RPC800 olarak iki tipte adlandırmışlardır. Bunlardan RPC200 geleneksel beton oluşum teknikleri ile üretilebilirken RPC800 ise normal betonlardan daha farklı üretim teknikleri ile meydana getirilmektedir. Bu betonların kıyaslanması Tablo 2.2'de verilmiştir [5].

Tablo 2.2 : RPC200 ve RPC800'ün mekanik özellikleri [5].

Deneyleler	RPC 200	RPC 800
Ön priz basıncı (MPa)	-	50
Isısal kür	20°C - 90°C	260°C - 410°C
Basıncı dayanımı (MPa)	170-230	Kuvars kumu 480-680
		Çelik agrega 640-800
Eğilme dayanımı (MPa)	35-65	44-140
Kırılma enerjisi (J.m ⁻²)	21000-41000	1250-21000
Son deformasyon (m.m ⁻¹)	5100 x 10 ⁻⁶ -7100 x 10 ⁻⁶	5000 x 10 ⁻⁶ -7000 x 10 ⁻⁶
Elastisite modülü (GPa)	55-65	70-80

Bu çalışmalara ek olarak Dugat ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, RPC'nin mekanik özelliklerini incelenmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2.3'te verilmiştir [19].

Tablo 2.3 : RPB'nin mekanik özellikleri [19].

Özellikler	RPC200	RPC800
Statik elastisite modülü (GPa)	63-67	64-75
Dinamik elastisite modülü (GPa)	60-62	33-37
Statik poisson oranı	0,23-0,25	0,20-0,29
Dinamik poisson oranı	0,23-0,25	-
Basınç dayanımı (MPa)	195-204	422-521
Lineer elastik sınır (dayanımın) (%)	60	-

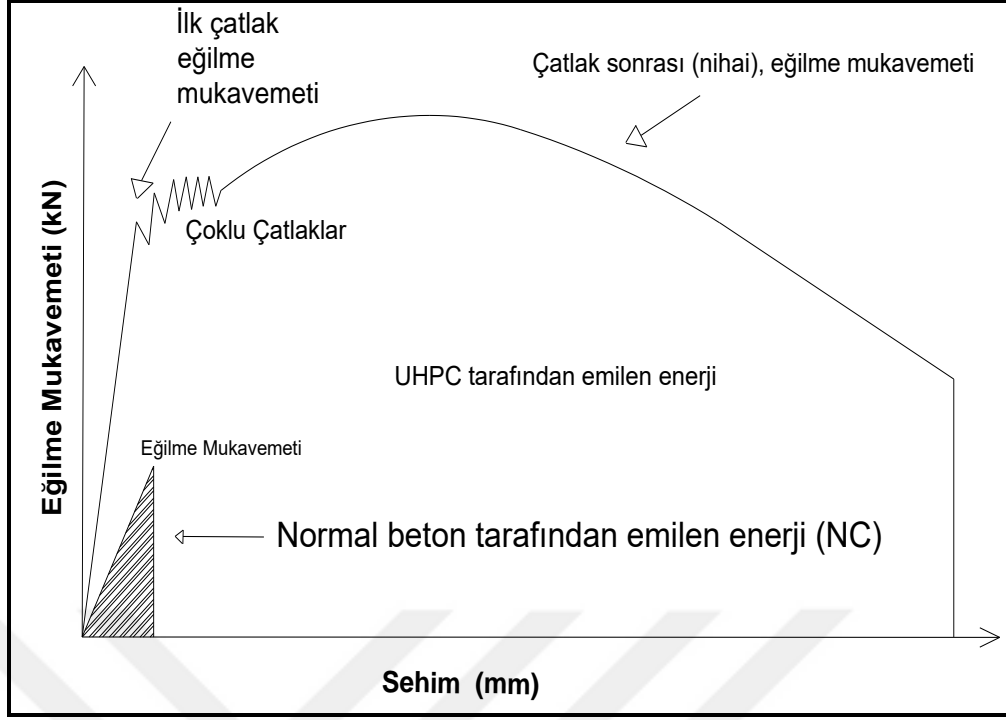
Dugat ve arkadaşları yaptıkları çalışmada RPC'yi geleneksel ve dayanımı yüksek betonlar ile kıyaslamışlardır (Tablo 2.4).

Tablo 2.4 : RPC mekanik özelliklerinin, geleneksel ve dayanımı yüksek betonlarla kıyaslanması [19].

Mekanik Özellikler	Geleneksel Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Reaktif Pudra Betonu
Eğilme dayanımı (MPa)	5-9	7-11	16-150
Basınç dayanımı (MPa)	25-55	70-90	300-900
Son gerilme uzaması (10^{-6})	110-160	110-160	2100-8100
Kırılma enerjisi (J/m^2)	140	150	1100-4000

Tablo 2.4'te görüleceği üzere RPC'yi, normal ve yüksek dayanımlı betonlarla kıyasladığımızda mekanik özelliklerinin diğer betonlardan oldukça üstün olduğu görülmektedir. Buna ek olarak RPC'nin en belirgin özelliğinin enerji yutma kapasitesi diğer betonlara kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu kapasiteyi artırıcı etkenlerin en başında matrise eklenen çelik lifler gelmektedir.

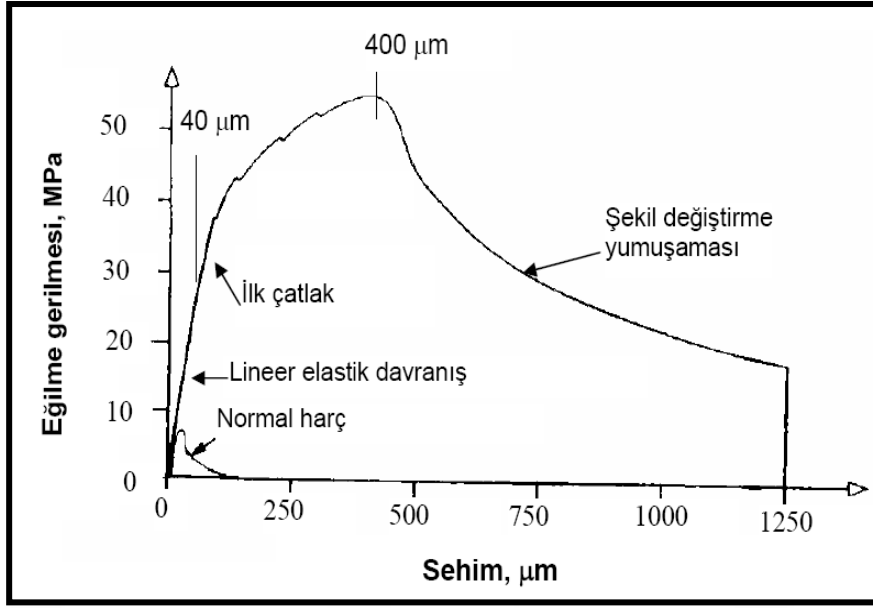
Bu çelik lifler enerji yutma kapasitesinin yanında rijitlik özelliklerini elastik özelliğe çeviren bir eleman gibi betona daha sünek bir davranış katmaktadır. Şekil 2.2'de çelik lif katkılı Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) ile Normal beton harcın kırılması karşılaştırılması olarak verilmektedir. UYPB normal harca kıyasla daha uzun zamanda ve çok daha yüksek şekil değiştirme meydana gelerek kırılmakta, böylece normal harçtan çok daha fazla enerji yutmaktadır [20].



Şekil 2.2 : Normal beton ve çelik lif donatılı UHPC'nin eğilme davranışı [21].

Çelik lif takviyeli RPC'de max yük, ilk andaki çatlak yükünü şekildeki gibi geçmekte, ilk çatlak yükü ile max yük arasında, çelik malzemenin gerilme grafiğine benzer şekilde bir değişim sergilenmektedir (Şekil 2.2). Ayrıca Şekil 2.3'te normal harcın ve RPC200'ün normal kiriş durumundaki mekanik durumlarını sergilemektedir. Maksimum gerilme ile ilk çatlak arasındaki deplasman 10 katı kadardır [20].

Homojen bir mikro yapıya sahip RPC'nin iç yapısının sıklığı nedeniyle geçirimsizlik oldukça düşüktür. Bu durum durabilitesini yani dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Durabilitesi yüksek bir RPC bu özelliği nedeniyle, daha uzun servis ömrü gerektirecek kimyasal atıklarda, radyoaktif malzemelerin depolanmasında ve savunma sanayiinde, özel yapılarda kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.



Şekil 2.3 : Normal harç ve lif katkılı RPC200'ün eğilme davranışı [20].

2.5. RPC'nin Kullanım Alanları,

RPC betonlarının kullanılmasında en önemli amaç dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle ömrünün uzun olmasıdır. Bunu homojen bir içyapı ve kullanılan malzemelerin mikro boyutta olması nedeniyle malzemeler arasında daha güçlü bir aderansa sahip olmasıdır. Bu özelliklerin sağladığı dayanım yönünden daha güçlü bir beton, geçirimsizliği az ve servis ömrü daha uzun bir beton olmasıdır. Bu özellikleri nedeniyle aşağıda belirtilen özel yapılarda kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

- Savunma ve güvenlik amaçlı yapılar,
- Sığınaklar,
- Köprü ayakları ve üst prekast elemanlar,
- Nükleer atık depoları,
- Depreme dayanıklı yapılar,
- Güçlendirme işlerinde,
- Plaka veya köşebent şeklinde kolon-kiriş altına veya birleşim bölgelerinde,
- Taşıt yüklerine mukavim elemanlar,
- Rögar, mazgal, kanal, baca kapakları,

- Yağmur suyu ızgarası ve kanalı,

RPC’lerden istenilen veya hedeflenen mekanik özelliklere ulaşılması için şantiye alanlarında üretimi zor bir işlemdir. Bu zorluklar göz önüne alınarak üretim tesislerinde prekast elemanlar olarak üretilerek Şekil 2.4’te görüldüğü gibi gerek köprü gerekse büyük açıklıkların geçilmesinde kiriş olarak kullanılmıştır. Daha sonra prefabrik olarak yaya kaldırımı, ankraj plakası, yüksek desibelli olan otoban kenarlarına ses kırıcı özelliği bakımından ses bariyeri ve yağmur kanalı ızgaraları ve muayene kapakları üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 : RPC’den üretilmiş elemanlar [21]

2.6. RPC'nin Literatür Taraması

Gelişen teknoloji paralel olarak inşaat alanında meydana gelen gelişmelerle beraber mevcut betonların ihtiyaca cevap verememesi yüksek dayanım özellikli betonlar ile ilgili kapsamlı çalışmaları beraberinde getirmektedir. Bu özelliklere sahip özel imalatlardan biri de Reaktif Pudra Betonudur (RPC). Bu özel beton hakkında P. Richard ve arkadaşı tarafından yapılan ilk çalışma, RPC üretimi hakkında öncü olmuş ve bu çalışma hakkında yapılacak araştırmaların temel kaynağını oluşturmuştur [3]. RPC'lerin en belirgin özellikleri dayanım ve dayanıklılıklarının yüksek olmasıdır. Bu özelliklerin gelişmesindeki etkenlerden en önemlisi bu betonlarda kullanılan agregalar oluşturmaktadır. Reaktif pudra betonu (RPC) kullanılan agregalar mikro boyutta olup dayanımı ve maliyeti yüksektir. Daha ekonomik agregalar kullanmak genellikle yoğunlukları yüksek malzeme atıklarının değerlendirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Genellikle daha ekonomik beton üretmek ve çevresel atıkları betonda kullanarak atıkların bertaraf edilmesine yönelik birçok çalışma yapılmaktadır.

Yüksek performanslı betonlarda üstün özelliklere sahip olan (fiziksel ve mekaniksel özellikler) atıkların kullanılması ile ekonomi sağlayabilmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında RPC'lerde atık malzemelerin agrega yerine ikame edilmesi çalışması üzerinde yaygınlık bulunmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Gül ve Geçten yaptığı çalışmada; ferrokrom cürufunun hafif beton üretiminde kullanılabileceğini araştırmışlardır. Çalışmada granüle cüruf %25, %50, %75 ve %100 gibi değişken oranlarda kum yerine ikame edilerek bağlayıcı olarak kullanılan çimento dozajındaki özelliklerin tespit edilmesi amacıyla 300, 400 ve 500 kg/m³ çimento dozajlarında hafif betonlar üretilmiştir. Elde edilen bu betonların birim ağırlıkları, ısı iletkenlikleri, basınç ve çekme dayanımı gibi özellikleri, yalnız kum kullanılarak yapılan betonun aynı özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Granüle cüruf kullanılarak elde edilen betonların sadece kum kullanılarak elde edilen betonlara göre %17-%20 daha az olduğu, ısı iletkenliklerinin %20 -%40 civarında düştüğü ve basınç ile çekme dayanımlarının ise kullanılan cüruf oranındaki artışla ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Buda bize Elazığ Ferrokrom işletmesi granüle cürufunun yalıtım maksatlı ve taşıyıcı olarak kullanılan hafif betonların üretiminde

değerlendirilebileceği, ayrıca çevreye olumsuz etki bırakan bu atıkların etken ve verimli kullanımı olacağı gözlemlenmiştir [22].

S. Yazıcıoğlu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Elazığ Ferrookrom İşletmesinde ortaya çıkan atık malzemenin basınç dayanımı etkileri ve çarpma enerjisi etkileri incelenmiştir. Beton içeriğindeki agregaların maksimum tane çapları 4-8-16 ve 32 mm seçilmiştir. Çimento boyutunda elde edilen atık, beton bünyesine portland çimentosu ile ağırlıkça % 1-3-5-7 ve % 10 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışma, sabit slump değerinde (6-9cm) yapılmış ve numunelerin 28 günlük basınç dayanımına ve çarpma enerjilerine bakılmıştır. Çalışmada max agrega tane çapı arttıkça basınç dayanımında ve çarpma enerjisinde paralel olarak artış olduğu saptanmıştır. Cüruf içeriği % 3 seçilen betonların mukavemeti şahit numuneye göre yüksek ve %5 katkılı betonlarda ise şahit numuneden elde edilen değere yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın neticesinde, maliyeti düşürmek bakımından cüruf ilavesinin %5 değerine kadar çimento katkı malzemesi olarak betonda değerlendirilebileceğini göstermişlerdir [23].

E Sancak ve Ö. Çoban çalışmalarında; olivin cürufunun betonda kullanımı ile üretilen betonda matris ile sarmalanmış olan donatının korozyona karşı koruma etkinliği araştırılmıştır. Bu koruma kalkanı olarak kullanılan pastanın incelenmesi ile hedef basınç dayanımı C30 olarak belirlenmiş ve referans ile kıyaslanmak üzere çimento boyutlarında öğütülmüş olan olivin cüruflarının (OA) değerlendirilmesi ile cürüflü betonlar üretilmiştir. Olivin cürufu (OA) betonda bğlayıcıyla, hacimce %5, %10, %20 ve %40 şeklinde eklenerek 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelere 7 ve 28 günlük periyotlarda 21°'de kür uygulanmıştır. Kür neticesinde OA'lı betonlara prizini almış betonun yoğunluğu ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Prizini almış betonların yoğunluğu ve basınç dayanımı değerlerinde belirli oranlarda düşüş meydana gelmiştir. Fakat %5, %10 ve %20 oranlarında cüruf barındıran numuneler hedef basınç dayanım değerinin üzerinde sonuçlara ulaşılmıştır. Hedeflenen basınç dayanımına ulaşan %5, %10 ve %20 oranlarında bünyesinde OA barındıran beton pastası ile Ø5x10 cm ebatlarındaki kalıplara demir donatılı (Ø10) betonarme örnekleri dökülmüştür. Bu numunelere, 14 gün standart kür uygulandıktan sonra betonarme donatısı korozyon dirençlerinin belirlenmesi amacı ile %5'lik NaCl içeren çözeltiye alınmış ve bu çözeltide 17 hafta

(yaklaşık 120 gün) boyunca her hafta Lineer Polarizasyon metodu uygulanarak Korozyon hızı, R_p , Ecor ve Icor değerleri not edilmiştir. Deney sonuçlarına göre betonda %5 ve %10 oranında OA ikame edilmesi ile betonarme donatısında korozyon hızının, referans numunelere göre azaldığı gözlemlenmiştir [24].

Muhammed Safari Savadkoohi, Muhammed Reisi yaptıkları çalışmada; Reaktif Pudra Beton (RPC) üretiminde taş kesme atıklarının kullanımına yönelik bir araştırma yapılmış, bu amaçla, üç su-bağlayıcı oranı ($w/b= 0,14, 0,17$ ve $0,2$), üç silis dumanı/bağlayıcı oranı ($SF/B = 0,15, 0,2$ ve $0,25$), iki bağlayıcı (çimento + silis dumanı) içeriği (1200 ve 1500 kg/m^3) ile RPC karışım tasarımı ve silika kumunun granit atıklarla beş farklı oranı ($GW/Agg = \%0-10-20-30$ ve $\%40$) hazırlanmıştır. Süper akışkanlaştırıcı içeriği, çökme testinde 200 mm 'lik bir yayılma çapı elde etmek için beton karışımlarında kullanılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme testleri tüm beton karışımlarının numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, silis kumu yerine RPC 'de $\%30$ 'a kadar granit atığı eklenerek betonun mekanik özelliklerindeki gelişmeler beklenmiştir. $GW / Agg = \%30$ 'da, basınç ve eğilme dayanımları $\%78$ ve $\%60$ oranında artarken, betonun su emilimini $\%75$ oranında azaltmıştır. Sonuçlar olarak $GW/Agg = \%30$ ile RPC'nin $120-300 \text{ kg}$ granit üretim atığı kullanılabileceği saptanmıştır [25].

Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, RPC'yi yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Geleneksel beton kullanılarak, eğilme ve basınç testine tabi tutulacak numunel üretilerek, eğilme numunelerinin alt tarafına ve basınç numunelerinin çevresine RPC ve tamir harcı yapıştırılmışlardır. Bunlara ilave olarak kıyaslama için geleneksel beton, tamir harcı ve RPC kullanarak numuneler üretmişlerdir. Onarım malzemelerinin bağ dayanıklılığının değerlendirilmesi için bir hızlandırılmış yaşlanma ortamı, yani donma-çözülme döngüsü hızlandırma bozulma testi seçilmiştir. Yaşlanmadan önce ve sonra numuneler basınç dayanımı, bağ dayanımı (eğik kesme testi), çelik çekme dayanımı ve bağıl dinamik modül NDT testleri ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, RPC'nin basınç ve eğilme güçlendirmesinde mükemmel onarım ve iyileştirme potansiyelleri gösterdiğini ve diğer betonlarla karşılaştırıldığında yüksek bağ dayanımına, dinamik modüle ve bağ dayanıklılığına sahip olduğunu göstermektedir. RPC ile çelik arasındaki yapışma da diğer betonlara göre çok daha fazladır. Bu iyileştirilmiş yapışma ve onarımın betonarme yapılardaki kullanılabilirliği görülmüştür [26].

Yazıcı ve arkadaşları çalışmalarında, mikro boyuttaki uçucu kül, silis dumanını ve yüksek fırın cürufu portland çimentosuna ekleyerek bir çalışma yürütmüşlerdir. Uçucu kül ile yüksek fırın cürufu, çimento ile %0-20-40-60-80 oranlarında değiştirilerek numune üretilmiştir. Bu numunelerde agrega olarak bazalt ve kuvars tozu kullanılmıştır. Numuneler üç farklı kür yöntemlerine (Standart, autoclave ve buhar kürü), tabi tutulmuştur. Standart kür yöntemi 20°C de 28 gün, autoclave kürü, 210°C de 2.0 MPa buhar basıncında, 8, 16 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede, buhar kürü ise 90°C sıcaklıkta basınç olmadan ve 6 ile 12 gün olmak üzere iki farklı sürede numunelere uygulanmıştır. Deney sonuçları, yüksek dayanıma sahip bir betonunun, yüksek hacim miktarında mineral katkı ile birlikte üretilebilirliği gözlemlenmiştir. Bu karışımların basınç dayanımı, 170 MPa'lı geçmektedir. Bu malzemelerin karışımları RPB'lerde kullanılabilirliği görülmüştür [27].

Rougea ve Borys yaptıkları çalışmada, özel performanslı betonlarda, silis dumanına alternatif toz haline getirilmiş kireç taşı, silis taşı, phonolith, metakaolin ve uçucu kül kullanmışlardır. Bu numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, porozite, su emme, karbonatlaşma direnci deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak, su emme değeri sırasıyla en düşük silis dumanı, metakaolin, silis taşı, kireç taşı, phonolith ve uçucu kül olmuştur. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonucunda hiçbir numunede karbonatlaşma görülmemiştir. Silis dumanı ilave edilen numunelerin basınç dayanımları 200 MPa'la ulaşırken, diğer malzemeler kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımı 150 MPa civarında olmuştur. Silis dumanı katkılı numunelerin eğilme dayanımı 29 MPa olurken diğer malzemeler ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı 25 MPa civarında olmuştur [28].

Reaktif pudra betonları normal betonlara kıyasla maliyet açısından oldukça yüksektir. Bu yüksek maliyete etki eden faktörlerin başında kullanılan agrega ve çelik lifler gelmektedir. Yukarıda incelenen çalışmalar RPC'lerde maliyet açısından buna ek olarak da atık bertaraf etme açısından kullanılan agrega malzemesinin yerine kullanılabilir alternatif malzemeler üzerinde çalışmalar yapıldığı gözlemlenmiştir. RPC'yi oluşturan malzemelerin çok ince boyutta olması sıkı gözeneklere sahip olmasını sağlamaktadır. Bu durum RPC'yi oluşturan matrisin oldukça rijit olmasını sağlamaktadır. Bu rijitliğe elastikiyet vermek ve gevrek halden süneklik kazandırmak için endüstriyel lifler kullanılmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar incelendiğinde,

A. Bakış; yaptığı çalışmada, Atık Çelik Lif olarak ÖTL Takviyeli bünyesinde Pomzataşı İçeren Reaktif Pudra Betonun Rijit Kaplama İmalatında Kullanımı çalışmasında; rijit kaplama inşasında C30/37 betonu yerine, atık çelik lif takviyeli pomza içeren reaktif pudra betonun (P-RPC) kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, C30/37 betonu, kontrol karışımı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada yeni bir beton olan P-RPC betonu üretilmiştir. Çalışmada C30/37 betona, 28 gün 20°C standart su kürü uygulanmıştır. P-RPC'ye ise, 28 gün 20°C standart su kürü ve kombine kür (Kombine kür, oluşturulan bir beton numunesine birkaç farklı kürün ara verilmeden ardı sıra uygulanması) olmak üzere 2 farklı kür uygulanmıştır. Kombine kür sonrası P-RPC'nin basınç dayanımı 105,2 MPa, eğilme dayanımı 12,5 MPa bulunmuştur. Çalışma sonuçları, P-RPC betonun rijit üstyapı inşasında beton kaplama olarak kullanılabilirliğini göstermiştir [29].

S. Subaşı ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada; inşaatlarda kullanılan kompozit malzemelerin çevresel etkisini azaltmak ve endüstriyel atıkların yeniden kullanımının önemini ortaya koyabilmek için, 50 mm kalınlığındaki poliüretan dolgulu kompozit cephe paneline (PCP) %25 oranında geri dönüştürülmüş lastik atık eklenmiş ve bu panelin yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yöntemi ile çevresel performansı hesaplanmıştır. Çalışmanın neticesinde, poliüretan dolgulu kompozit panelinin çevresel etkisinin azaltılması ve böylece daha sürdürülebilir bir kompozit panel üretimi için poliüretanın geri dönüştürülmüş lastik atık ile ikamesinin çevresel açıdan uygun bir seçenek olduğu belirlenmiştir [66].

S. Subaşı ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada; ince olivin agrega ile doldurulmuş karbon fiber takviyeli harçlar araştırılmıştır. İnce agrega dolgulu harçlar ekseriyetle bina cephe sıvalarında kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, %0,5, %0,75 ve %1,0 karbon fiber ve %100 geri dönüştürülmüş olivin agrega içeren çimentolu harçların mekanik, elektriksel, dinamik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Dinamik rezonans deneylerinin yapılmasının amacı, karbon fiberin sönümlenme oranına etkisini araştırmaktır. Dört farklı karışımdan elde edilen iletken harç numunelerinin 28 günlük basınç, eğilme, dinamik rezonans, ultrasonik darbe hızı (UPV), Leeb sertliği ve kuru yoğunluk testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı zaman aralıklarında özdirençlerini belirlemek için 2, 14, 28, 90 ve 180 günlük elektriksel iletkenlik testleri gerçekleştirildi. Dinamik rezonans testlerinin yapılmasının amacı, karbon fiberin sönümlenme oranına etkisini incelemektir. CF'nin elektriksel iletkenlik

ve sönümlenme oranı üzerinde önemli bir pozitif etkisi gözlemlenirken, mekanik sonuçlarda ihmal edilebilir bir azalma gözlemlendi. Çimento karışımında olivin dolgusu kullanılarak hidrasyonla oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapısı, aderans oluşumları meydana geldiği kanıtlanmıştır [67].

Ahmed el-Tikrite & Muhammed N.S. Hadi yaptıkları çalışmada; çelik elyafının (endüstriyel/atık) tipi, içeriği ve geometrisinin reaktif pudra betonun (RPC) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve sıkıştırma altındaki gerilme-gerinim davranışı açısından RPC'da endüstriyel mikro çelik elyaf (MF), endüstriyel deforme olmuş çelik elyaf (DF) ve atılan lastiklerden geri kazanılan atık çelik elyaf (WF). RPC'ye toplam hacmin %1, %2, %3 ve %4'ünde çelik lifler eklenmiştir. Test sonuçları, DF ve WF'nin sırasıyla %3 ve %4'e kadar eklenmesinin, RPC'nin akışkanlığını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. %4 MF ilavesi, basınç dayanımı, elastisite modülü, pik gerilme ve karşılık gelen birim deformasyon en yüksek artışı sağlamıştır [30].

K. Yılmaz ve M. İpek yaptıkları çalışmada, reaktif pudra betonunun (RPC); karışım oranları, lif içeriği ve kür koşullarını optimizasyonunun araştırmışlar, reaktif pudra betonunu oluşturan çok ince taneli farklı yapıdaki pudra malzemeler üzerinde yapılan deneylerle fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş RPC'nu oluşturan malzemelerin özellikleri kullanılarak, bilgisayar paket programları, literatür ve farklı karışım teknikleri yardımıyla karışım oranları elde edilmiştir. Bu karışım oranlarına göre hazırlanan numuneler belirli yaşlarda basınç dayanım deneyine tabi tutulmuş ve bunlardan en yüksek basınç dayanımı veren dört adet farklı karışım daha sonraki deneylere esas olmak üzere seçilmiştir. Seçilen bu karışımlara, RPC'da kullanılan mikro boyuttaki lif, hacimce altı farklı oranda (%0-2-4-6-8-10) katılarak deney numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı deneyleri yapılmış ve bütün karışımlar için optimum lif içeriği %4 olarak bulunmuştur [31].

S. Aslan, N Öksüzer ve H.S. Gökçe yaptıkları çalışmada, ultra yüksek dayanımlı bir beton türü olan reaktif pudra betonun (RPC) mekanik ve taşıma özelliklerini geliştirmek için grafen nanoplatelet (GNP) ve atık cam agrega (WGA) kullanımı araştırılmıştır. %0,14 GSMH ve %30 WGA'nın birlikte eklenmesi, RPC'nin basınç dayanımında 192,9'dan 258,9 MPa ve eğilme dayanımında 16,2 MPa'dan 38,7 MPa'a

önemli bir artışa neden olmuştur. Çalışmada en anlamlı iyileşme (%138,6) RPC'nin eğilme dayanımı değerlerinde elde edilmiştir [32].

İpek yaptığı çalışmada, atık erozyon tellerinin reaktif pudra betonunda lif olarak kullanılabilirliğinin araştırmış, metal işleme endüstrisinde kullanılan erosion teli atıklarının RPC'de lif olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık erosion teli, Reaktif Pudra Betonunda (RPC) kullanılan mikro çelik liflere çok benzemektedir. Çalışmada, Atık erozyon telleri ile mikro çelik lifler RPC'de aynı oranlarda kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için lifsiz, %2 ve %4 oralarında atık erozyon teli ve çelik lif içerikli RPC numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapılarak numunelerin mekanik özellikler belirlenmiştir. Ayrıca maliyet analizleri yapılarak numunelerin birim dayanım maliyetleri belirlenmiştir. Sonuç olarak %4 atık erosion teli ve çelik lif içeren numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 230 MPa ve 260 MPa ulaşırken eğilme deneyi sonucunda 40,50 MPa ve 22,06 MPa değerlerine ulaşılmıştır. Atık erozyon tellerinin, hem geri dönüşüm hem de maliyet açısından RPC'de lif olarak kullanılmasının yararlı olabileceği görülmüştür [33].

2.7. Çalışmanın Konusu, Amacı ve Kapsamı

Dünyada konuyla ilgi yapılan çalışmalar oldukça fazla olup bu betonların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizde ise kapsamlı bir çalışma yapılmamıştır. Bunlara bağlı olarak bu çalışmada henüz kapsamlı bir çalışma yapılmamış ve RPC kullanımının normal betonlara göre oldukça az olduğu görülmüştür. Yapısal kullanımlarda tercih edilmemesi maliyetinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. RPC'nin maliyet açısından en yüksek maliyet agregası gelmektedir. Ayrıca RPC'ye süneklik kazandıran malzemelerden biri de çelik liflerdir. Bu çalışmada RPC'lerde kullanılan agregaların yerine ikame edilecek atık malzemelerden elde edilen agregalar ve mekanik yollarla elde edilen atık ÖTL telleri kullanılarak mekanik davranışları incelenecektir. Bu yönüyle çevresel kirliliğe neden olan atıkların bertaraf edilmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. RPC'yi oluşturan malzemelerin yerine ikame edilecek atık malzeme çalışmalarında Ferrokrom atıklarının detaylı şekilde inceleyen çalışmaya şu ana kadar literatürde rastlanılmamıştır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, RPC'de ferrokrom atıklarının kullanılmasına yönelik çalışmaların yetersiz olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar ferrokrom

atıklarının jeopolimer olarak davranışının irdelendiği çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, ferrokrom atıklarının RPC’da agrega olarak kullanılabilirliği, buna ek olarak da mekanik yönden davranışları, yüksek darbelere karşı tepkileri araştırılmıştır.

Ferrokrom elde edilirken atık cürufların fazla olması depolama problemlerini ve buna bağlı olarak ciddi bertaraf mecburiyeti meydana getirmektedir. Kromit cevheri ısı işlemlere tabi tutularak ferrokrom ve beraberinde atık cüruf üretilmektedir. Üretilen 1 ton ferrokrom alaşımı meydana gelirken ortalama üretimin 1,5 katı cüruf meydana gelmektedir [23-24]. Dünyada her yıl 41 milyon ton ve Türkiye’de ise her yıl yaklaşık 6,9 milyon ton ferrokrom işlenmektedir [23-26]. Buna bağlı olarak yaklaşık 9 milyon/yıl ton ferrokrom atığı ortaya çıkmaktadır. Dünyada bu atıkların depolanması sırasında ciddi çevre kirliliği olmaktadır. Özellikler açık alanda depolanan bu cüruflar yağış suları ile yeraltı sularına karışmakta buradan derelere ve kullanım sularına kadar ulaşmaktadır. Bu yönüyle canlı sağlığı açısından oldukça risk oluşturmaktadır. Ayrıca rüzgar ve bulutlarla mikro boyutta taşınımı neticesinde bulunduğu yöre dışında da çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu atıkların özgül ağırlıklarının yüksek olması üretildikleri kayaçların ağır agrega olması, yüksek performanslı betonda kullanılabileceği ön görülmüştür.

Bu çalışma ile FeCr cüruflarının hem çevresel problemleri hem de atıkların üstün özellikleri sayesinde RPC’da kullanılmasıyla mekanik özelliklerde olumlu gelişmeler ve özellikle maliyette ciddi oranda azalma olacağı düşünülmektedir.

Karbon salınımı açısından çelik lifin kullanımını incelenmiştir. 1 ton çelik üretiminde 2,2 ton CO₂ salındığı bilinmektedir [65]. RPC’de ÖTL lifinin kullanılması ile birlikte RPC’nin karbon salınımında ciddi bir oranda azalma olacağı öngörülmektedir. Bu durumda çevreci bir beton olan Yeşil Reaktif Pudra Betonu (GRPC) elde edilecektir.

RPC’da agrega olarak kullanılan kuvars malzemesi hem dayanımı hem de maliyeti yüksek bir malzemedir. Bu çalışma kapsamında kuvars agregası yerine Elazığ Ferrokrom (Türkiye) işletmesinden temin edilen Ferrokrom cüruflarından olan olivin ve saf atık malzemeleri kullanılmıştır.

Bu atıklar ile farklı kombinasyonlarda kullanarak RPC üretilmiştir. RPC’deki en büyük maliyeti oluşturan endüstriyel çelik lifler yerine de atık ÖTL lifinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık ferrokrom ve ÖTL liflerini kullanılarak üretilen

GRPC'lerin basınç, eğilme dayanım sonuçları ile kırılma tokluğu sonuçları incelenmiştir. Bu özelliklerin maliyete yansımaları normal RPC ile kıyaslanarak araştırılmıştır.

Yapılan literatür çalışmaları öncülüğünde, tezin birinci ana hedefi reaktif pudra betonunu oluşturan malzemelerin yerine Ferrokrom cürufu kullanılarak ideal karışım metotları ile üretilmesi ve mekanik özelliklerinin irdelenmesidir. Ayrıca RPC'ye süneklik kazandıran endüstriyel çelik liflerin yerine ömrünü tamamlamış lastiklerden mekanik yollarla elde edilen ÖTL telleri kullanılarak yeni oluşan Yeşil Reaktif Pudra Betonu (GRPC) mekanik özelliklerini incelemek ve normal RPC ile kıyaslamaktır.

Tezin ikinci temel amacı ise, atık malzemelerden elde edilen GRPC betonuna donatı ve darbeye karşı koyma direncini artırmak için hardox çelik plakalar yerleştirilerek balistik GRPC blokları üretilmiştir. Ayrıca referans olarak geleneksel C40 betonu kullanılarak balistik bloklar da üretilmiştir. Bu numunelere zırh delici ve yüksek hıza sahip (1750 m/sn) tank mermisi olan SABOT mermi atışı yapılarak balistik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda test çalışmasının ana hatları aşağıda sıralanmıştır.

- FeCr atık agregalarının malzeme özelliklerini belirlenmesi,
- RPC'de FeCr atık agregalarının kullanılması,
- Fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda optimum GRPC karışımının belirlenmesi,
- ÖTL atık liflerinin GRPC'de kullanılması,
- Balistik testler için GRPC bloklarının üretilmesi,
- GRPC bloklarının balistik özelliklerinin belirlenmesi,

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Çalışmalarda kullandığımız malzemeler ülkemizdeki kaynaklardan üretilen malzemeler olup sadece silis dumanı ithal edilmiştir. Malzeme seçiminde tedarik açısından her zaman kolay elde edilebilen ve talep edilen kadar bulunabilen, özellikleri değişmeyen ve homojenliği sağlayan malzemeler olmasına özen gösterilmiştir. Kullanılan malzemelerin homojenliği beton hamurunun karışım kolaylığı ve dayanım yönünden oldukça önemlidir.

3.1.1. Çimento

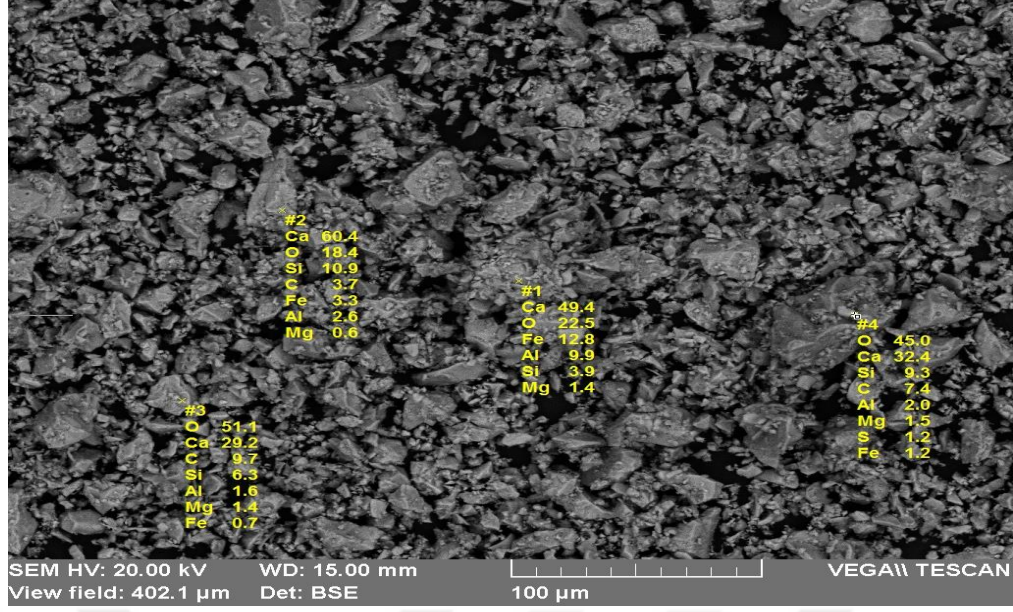
RPC'lerin en önemli ve ana bileşenlerinden olan çimentodur. İnyapıdaki aderansın ana kaynağıdır. Bu açıdan bu tür özel betonlarda çimento seçimi oldukça önem arz etmektedir. Çalışma amacına uygun çimento seçiminde daha önceki çalışmalar irdelenmiş ve bu tür çalışmalarda yüksek performanslı çimentolar kullanıldığı görülmüştür [3,11, 34, 35]. Bu nedenle çalışma süresince yüksek performanslı çimento kullanılmıştır. Çalışmalarda Nuh Çimento tarafından üretilen, CEM I R 52,5 MPa dayanıma sahip yüksek performanslı çimento kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemeye ait özellikler üreticiden alınarak Tablo 3.1'de verilmiştir. Bağlayıcının yapısına bakıldığında, çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C_3S ($3CaO.SiO_2$) ve C_2S ($2CaO.SiO_2$) bileşenlerinin oldukça fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 : Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

	Çimento	Silis Dumanı
Bileşen	%'si	%'si
CaO	64,48	0,51
SiO ₂	20,13	95
C	-	1,52
Al ₂ O ₃	5,05	0,71
Fe ₂ O ₃	2,74	0,26
MgO	1,73	0,61
K ₂ O	0,67	0,84
Cl	0,01	0,11
Na ₂ O	0,22	0,23
P ₂ O ₅	-	0,12
SO ₃	3,02	0,54
H ₂ O	-	0,80
Kızdırma kaybı	2,11	1,50
İri Parçacıklar(>45µm)	-	1,00
pH değeri (taze)	-	5,0-8,0
C ₃ S	60,71	-
C ₂ S	11,78	-
C ₃ A	8,53	-
C ₄ AF	8,34	-
Silikat Modülü	2,63	-
Alümina Modülü	1,78	-
Hidrolik Modül	2,32	-
Toplam alkali	0,59	-
Özellik	Değer	Değer
Blaine özgül yüzeyi	5164 cm ² /g	200000 cm ² /g
Birim hacim ağırlık	-	0,650 g/cm ³
Özgül ağırlık	3,14	2,260
Priz başlangıcı	156 dakika	-
Priz sonu	1921,3 dakika	-
Hacim Genleşmesi	0,85 mm	-
2 günlük basınç dayanımı	39,84 MPa	-
7 günlük basınç dayanımı	54,25 MPa	-
28 günlük basınç dayanımı	61,84MPa	-

Bağlayıcının Blain değeri, normal bağlayıcılara (yaklaşık 2000-4000 cm²/g) göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum yüzey alanının arttırmasına ve ilave su ihtiyacı meydana getirmesine karşın yüksek dayanım amacı için tercih edilmektedir.

Çalışmada tercih edilen çimento tanelerinin içyapısı, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında tarama elektron mikroskobu (SEM) ve EDS cihazıyla belirlenmiştir. Çimento taneleri geometrik yapı itibariyle şekilsiz tanelerden oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Çimento tanelerinin EDS görüntüsü

Karışım oranlarının belirlenmesi işlemlerinde çimentonun ve karışıma giren diğer malzemelerin hassas olarak tane dağılımının bilinmesi gerekmektedir [36]. Deneylede kullanılan malzemenin elek analizi Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin (TÇMA) laboratuvarında kuru olarak lazer tane dağılım analizi ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Çimento ve silis dumanının tane dağılımı

Tane Boyutu (µm)	Çimento Geçen %	Silis Dumanı Geçen %
1	6,25	0
2	15,26	6,08
3	21,96	8,31
4	27,84	10,59
5	32,95	13,43
10	50,8	35,1
15	65,09	57,06
20	72,64	72,83
25	80,14	82,45

Tablo 3.2(Devam) : Çimento ve silis dumanının tane dağılımı

Tane Boyutu	Çimento Geçen %	Silis Dumanı Geçen %
30	85,69	88,23
35	89,62	91,22
40	92,34	94,13
45	94,17	95,67
50	95,36	97,88
60	96,39	97,96
75	96,69	98,73
90	96,71	98,96
100	96,72	98,98
125	96,73	99,00
150	96,81	99,03
200	97,16	99,27
250	97,58	99,55
300	97,95	100
400	98,19	100
500	98,48	100
600	98,97	100
700	99,3	100
800	100	100

Tane dağılımına göre deneylerde kullanılan çimentonun ortalama tane büyüklüğü 10 μm ve tanelerin %90'ından fazlası 40 μm 'nin altındadır.

3.1.2. Silis dumanı

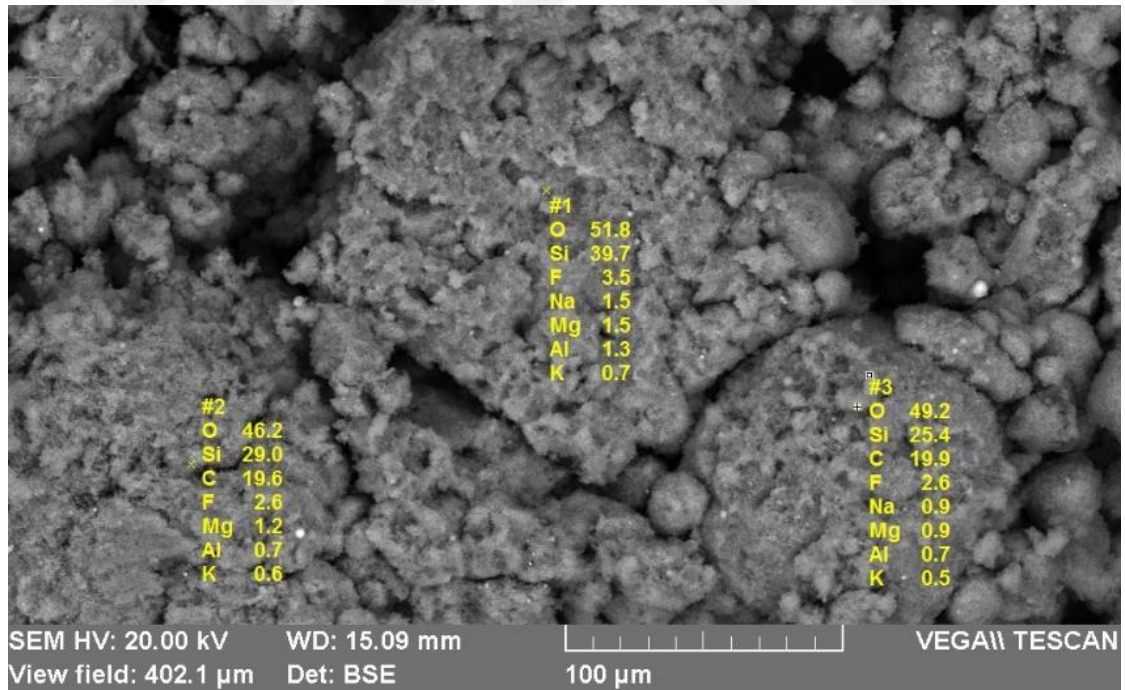
Silis dumanı, silikon veya demirli silisyum üretimi esnasında atık olarak ortaya çıkan amorf görünümlü şeffaf silisyum dioksit (SiO_2) kürelerinden meydana gelen bir mineraldir (Şekil 3.2). Bu kürelerin boyutu yaklaşık 0,5 μm altındadır. Bağlayıcı tane boyutundan 100 kat daha küçüktür. Silis dumanının Blain değeri yaklaşık 20000 cm^2/g 'dir [13, 37].

Deneysel çalışmaların hemen hemen tamamında, silis dumanı olarak Norveç'teki Elkem firmasının 968-U kodlu yoğunlaştırılmayan silis dumanı tercih edilmektedir. Ülkemizde ETİ Maden İşletmeciliği tarafından da silis dumanı atık malzeme olarak

üretilmektedir. Literatür çalışmaların tamamında Norveç'ten alınan silis dumanı tercih edilmiştir. Ayrıca bu ürünün temini kolay olduğu için tercih edilmiştir.

Deneylelerdeki silis dumanının iç yapı görüntüleri SEM cihazı ile çekilmiş ve EDS (energy dispersive spectroscopy) ile çıkartılan kimyasal yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir. Ayrıca silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri üretici firmadan alınmış olup Tablo 3.1'de verilmiştir. EDS sonuçları ile üretici firma tarafından verilen silis dumanı kimyasal içerikleri arasında bir uyum olduğu kimyasal yapışının büyük çoğunluğunda SiO_2 oluşturduğu görülmektedir. Puzolanik aktivitede ana bileşenlerden birinin SiO_2 olması nedeniyle bu durum oldukça önemlidir.

Karışım oranı hesabında kullanılmak üzere silis dumanının elek analizi, TÇMA laboratuvarında tane dağılım analizi yapılarak bulunmuş ve bu değerler Tablo 3.2'de verilmiştir. Deneylelerde kullanılan silis dumanının tane dağılımı üretici firma tarafından elde edilen verilere göre daha iri tanelerden oluştuğu anlaşılmıştır. Bunun nedeni silis dumanının pazarlanabilmesi için bir miktar yoğunlaştırılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.2 : Silis dumanı taneleri ve EDS analizi

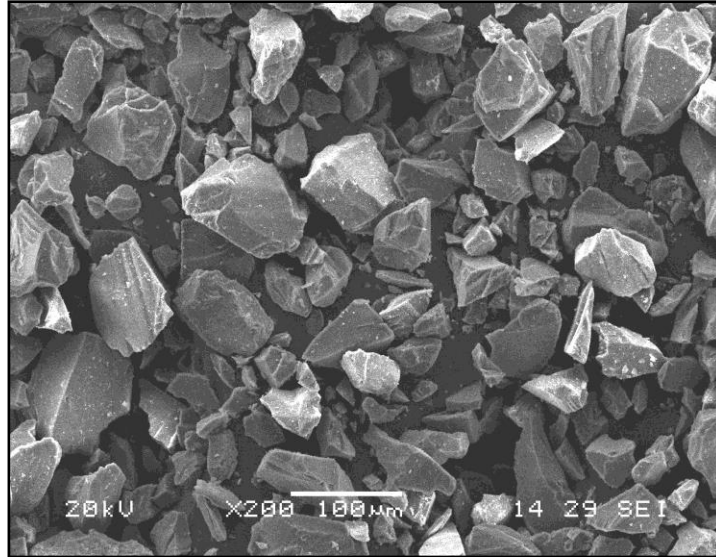
3.1.3. Kuvars pudrası

RPC'lerde kullanılan malzemelerin μ ölçeğinde olması nedeniyle pudra kelimesi bu özelliklerinden gelmektedir. Kuvars pudrası doğal kırma taş agregasıdır. Bu agreganın kimyasal özellikleri üretici tarafından temin edilmiştir. Fiziksel özellikleri ise deneysel çalışmalar neticesinde bulunmuştur. Fiziksel özelliklerden özgül ağırlık, birim hacim ağırlık ve su emme deneyleri Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında, özgül yüzey deneyi ise TÇMA laboratuvarında test edilmiştir. Malzemelerin kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 : Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Bileşen	Kuvars pudrası %
SiO ₂	99,50
Al ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	0,01
CaO	-
MgO	-
Na ₂ O+K ₂ O	0,37
TiO ₂	0,07
Kızdırma Kaybı	0,40
Toplam	100
Renk	Beyaz
Yoğunluk	1,341 g/cm ³
Özgül ağırlığı	2,701 g/cm ³
Özgül yüzeyi	2142 cm ² /g
Nem içeriği	% 0,08

Kuvars pudrası kum boyutundaki malzemenin bir takım teknikler ile hedeflenen boyutlara getirilmiştir. Kuvars pudrası, kuvars cevherinin mekanik yollarla kırılması ile elde edildiği için bünyesinde betonlarda istenmeyen malzemeler olan kil veya silt gibi küçük taneler yoktur. Bu pudranın elde edilmesinde kullanılan eleme yöntemi, kuru şekilde ve hava basıncı sayesinde yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan kuvars pudrasının geometrik yapısı (SEM) Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Kuvars pudrası SEM görüntüsü

Kuvars pudrasının bünyesinin çoğunluğunda silisyum (Si) ve oksijen (O) oluşturmaktadır ve bu durum üretici firma tarafından da verilen ($\text{SiO}_2 = \%99,5$) kimyasal içerik tarafından teğit edilmektedir. Bu pudradan 0-100 μm boyutlarında numuneler alınmış ve karışım oranlarında kullanılmak üzere bu numunelerin TÇMA laboratuvarında granülmetrisi belirlenmiştir. Elek analiz değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 : Kuvars pudrası elek analiz sonuçları.

Tane Boyutu (μm)	Kümülatif Elekten Geçen %
1	2,014
2	4,991
3	7,474
4	9,982
5	12,53
10	23,874
15	32,782
20	39,754

Tablo 3.4 (Devam) : Kuvars pudrası elek analiz sonuçları.

Tane Boyutu (μm)	Kümülatif Elekten Geçen %
25	45,43
30	50,142
35	54,231
40	57,853
45	61,112
50	64,064
60	75,134
75	85,933
90	96,151
100	100

3.1.4. Kuvars kumu

RPC'lerde kullanılan agregalarda tane çapı en büyük olan malzeme kuvars kumudur. Kuvars malzemesi diğer malzemelere göre çok sağlam ve serttir. Geleneksel betonlarda kullanılan agregaların dayanımı yaklaşık 100 MPa olurken, kuvars agregasının basınç dayanımı 180 MPa kadar ulaşmaktadır. Çok sert bir malzeme olması nedeniyle aşınma direnci oldukça yüksektir [38,39].

RPC'de hedeflenen dayanımın elde edilmesi için bu betonlarda kullanılan agregaların özel seçilmesi gerekmektedir. Kuvars kumu RPC'de kullanılması uygun olmasının yanında ülkemizde oldukça fazla bulunmaktadır. Kuvars kumu ile kuvars pudrası tane boyutu açısından farklılık göstermesinin yanında diğer özellikleri aynıdır. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri, özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı ve su emme yüzdeleri Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında yapılmış, özgül yüzey ise TÇMA laboratuvarında yaptırılarak sonuçlandırılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5 : Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri

Özellik	Kuvars Kumı (150–300 µm)	Kuvars Kumı (300–600 µm)
Birim hacim ağırlığı	1,603 g/cm ³	1,595 g/cm ³
Özgül ağırlığı	2,676	2,680
Özgül yüzeyi	219 cm ² /g	81 cm ² /g
Nem İçeriği	% 0,067	% 0,036

Çalışmada kullanılan kuvars kumu, 100–300 µm ve 300-600 µm boyutlarındadır. Kuvars kumu olarak 100-300 µm ve 300-600 µm boyutlarında kumlardan örnekler alınmış ve bu numunelerin granülometrisinin belirlenmesi TÇMA laboratuvarına dağılım analizi yapılmıştır. Bu analizlere ait sonuçlar Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Kuvars kumu tane dağılımı

Tane Boyutu (µm)	Kuvars Kumı 100-300 µm Elekten Geçen %	Kuvars Kumı 300-600 µm Elekten Geçen %
1	0,2	0,06
2	0,39	0,12
3	0,52	0,15
4	0,65	0,18
5	0,78	0,2
10	1,14	0,29
15	1,32	0,32
20	1,45	0,33
25	1,57	0,33
30	1,66	0,34

Tablo 3.6(Devam) : Kuvars kumu tane dağılımı

Tane Boyutu (μm)	Kuvars Kumu 100-300 μm Elekten Geçen %	Kuvars Kumu 300-600 μm Elekten Geçen %
35	1,76	0,36
40	1,86	0,39
45	2,01	0,43
50	2,2	0,49
60	2,8	0,62
75	4,33	0,83
90	6,71	0,98
100	8,75	1,12
125	15,32	1,26
150	23,24	1,77
200	40,44	4,24
250	56,58	8,84
300	70,71	15,71
400	88,34	35,71
500	96,52	60,85
600	100	80,87
700	100	92,79
800	100	100

3.1.5. Çelik tel

Normal beton, çekme gerilmesinde zayıf taşıma kapasitesine ve yapısal çelikle kıyaslama yapıldığında çeliğin çekme dayanımının yalnızca %0,1 - %0,01'i, kırılma tokluğu %0,2 - %4'üne sahip aşırı kırılğan bir malzemedir. RPC'de şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktasından sonra gerilme azalışı hızlı şekilde olmakta ve daha gevrek kırılmalar meydana gelmektedir. Gevreklik sorunu, beton matrisine lif takviyeleri ile giderilmeye çalışılmaktadır. Lif takviyesiyle, hem eğilme dayanımı hem de enerji yutma kapasitesi artmaktadır. Liflerin betona yüksek oranda karıştırılması betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediğinden dolayı katılacak olan lif oranı belirli bir oranda olması gerekmektedir.



Şekil 3.4 : Endüstriyel çelik lifler

Süneklik özelliği de betonda istenen özelliklerden biridir. Betonun avantajlarının yanında dezavantajlarından olan gevreklik durumu süneklik özelliğinin artmasıyla giderilmeye çalışılmaktadır. Betonun gevreklik dezavantajına en ideal çözümlerden biri betona çelik lif katmaktır. Gevrek bir beton matrisinde lif takviyesi sayesinde hem yük sönümlenme kapasitesi hem de eğilme dayanımı artışlar olmaktadır.

RPC'nin eğilme ve basınç dayanımı ile enerji yutma kapasitesini arttırmak için matrise eklenecek olan lifler, Beksa Çelik ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den alınmıştır [39]. Kullanılan çelik liflerin üzeri pirinç ile kaplanmıştır. Üretici tarafından elde edilen liflere ait fiziksel ve mekaniksel özellikler Tablo 3.7'de verilmiştir. Kullanılan lifin kritik boyu aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir [40].

Tablo 3.7. Kullanılan lifin teknik özellikleri [39].

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
Mezo	6	0,16	37,48	2252	7,180
Makro	50	0,90	55	1600	7,180

$$L_{cr} = \frac{\sigma_f D}{2\tau} \quad (3.1)$$

Burada;

L_{cr} = Kritik lif uzunluğu

σ_f = Çekme gerilmesi

D = Çapı

τ = Lif ile beton arasında oluşan kayma gerilmesini ifade eder.

Chan ve arkadaşının yaptıkları çalışmada, pull-out testi neticesinde %30 lif içeren RPC'nin çelik tel ile arasında oluşan kayma gerilmesini 5,48 MPa olarak bulmuşlardır. Bu çalışmadaki değer kullanılarak yapılan hesaplama sonucu çelik lifin sıyrılmadan kopması için kritik lif uzunluğunun 32,8 mm olması gerekmektedir. Lif boyunun kısa olması durumunda ise lifler, beton içerisinden sıyrılarak çıkacaktır. Lif boyutunun uzun olması RPC'nin matris hamurunun karışma ve malzemeyi uygulama problemi ortaya çıkaracağı için liflerin makro yerine mikro boyutta olması daha yerinde olacağı kanaatine varılmıştır [41].

3.1.6. Kimyasal katkı

Çalışmalarda su/bağlayıcı değerinin düşük olması ve hedeflenen işlenebilirliğe ulaşmak için akışkanlaştırıcı gerekmektedir. Bu gereksinimi karşılamak için süperakışkanlaştırıcı içeren katkılar kullanılmıştır. Bu katkı maddesi çimento tanelerinin topaklanmasını önleyerek çimento hamurunun akışkanlığını arttırmaktadır.

Bu çalışmada Master Glenium ACE 450 türü kimyasal katkı kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı düşük su/çimento oranında yüksek işlenebilir özellikli beton üretilmesinde, betonu taze kıvamda tutarak işlenebilirliğinin korunmasında ve betonun erken yüksek dayanım kazanmasında oldukça etkilidir. Özellikle reaktif pudra betonlarında ihtiyaç duyulan reolojiyi koruması ve dayanım gerektiren uygulamalarda kullanımı ön görülmektedir. Malzemeye ait özellikler Tablo 3.8'de özetlenmiştir.

Tablo 3.8 : Kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri.

Özellik	Değerler
Görünüm	Sıvı
Renk	Amber
Yoğunluk	1,1 g/cm ³
pH	7,0±0,5
Klorür içeriği	≤ % 0,1
Katı madde içeriği	%35±1,5

3.1.7. Su

Çalışmalarda kullanılan su kullanılabilir özellikte olan Sakarya Büyük Şehir Belediyesince şehre temin edilen şebeke suyu kullanılmıştır. Suyun analiz sonuçları Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) temin edilerek Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9 : Deneylerde kullanılan suyun kimyasal özellikleri.

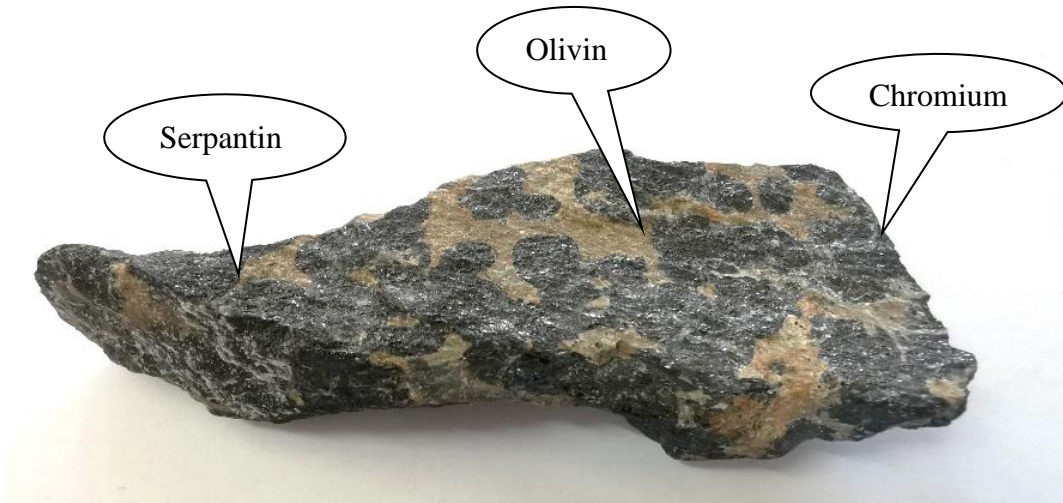
Kimyasal Özellikler	Değerler
Sertlik (Fs °)	12,83
Bakır (mg/l)	0,002
Kurşun (mg/l)	0,0029
Siyanür (mg/l)	0,0009
Mangan (mg/l)	0,0068
Alüminyum (mg/l)	0,1269
Klorür (mg/l)	8,16
Nitrit (mg/l)	0,010
Sülfat (mg/l)	20,0

Tablo 3.9 (Devam) : Deneylerde kullanılan suyun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Değerler
Nitrat (mg/l)	0,45
Amonyum (mg/l)	0,0096
Demir (mg/l)	0,017
Krom (mg/l)	0,0008
Kadmiyum (mg/l)	0,0007
Nikel (mg/l)	0,001

3.1.8. Atıklar

Kromit cevheri içinde birkaç mineral barındıran bir hammaddedir (Şekil 3.5). Ferrokrom cürufu kromit malzeme içerisinde ısıtılarak alınan ferrokrom beraberinde atık cüruf da çıkmaktadır. Ferrokrom üretiminde 1 ton üretimde üretimin 1,5 katı kadar ortalama 1,5 ton atık cüruf çıkmaktadır [42]. Ülkemizde her yıl yaklaşık 100.000 ton cürufun çıkmaktadır. Bu atıkların depolanmasında ciddi çevre kirliliği olmaktadır. Ferrokromun geleneksel betonda kullanımına ilişkin birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda genel olarak ferrokrom cürufu agrega olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.5 : Kromit Cevheri.

Ferrokrom, malzemesi bir demir alaşımı olup genellikle paslanmaz ve ısıya dirençli çelik üretiminde değerlendirilen metal bir bileşiktir. Ferrokrom üretimi nihayetinde ortaya çıkan FeCr cürufu ise ferrokrom üretimi yapan tesislerin fırınlarından yapılan işlem sonucu açığa çıkan atık malzemedir [43]. Ferrokrom bünyesinde belirli bir oranda krom (%50 - %70) ve demir (%30 - %50) barındıran bir alaşımdır. Alaşım, demir magnezyum krom oksidinin, elektrik ark ocağında eritilmiş halidir. Ferrokrom; kromit cevherlerinin kok kömürü kullanılarak elektrik ark-direnç fırınlarında indirgenmesiyle üretilmektedir [44].

Türkiye’de iki bölgede endüstriyel boyutta ferrokrom cürufu ortaya çıkmaktadır. Biri Antalya Ferrokrom işletmesi diğeri Elazığ Ferrokrom İşletmesi’dir. Bu çalışmada Elazığ merkezli Yıldırım Holding bünyesindeki Eti Kromun işletmesini yaptığı; dünyanın en büyük ikinci yüksek karbonlu ferrokrom (HCFeCr) üreticisinden ortaya çıkan cüruflar temin edilmiştir. Bu cüruflar serpantin, olivin, pota altı, baca külü ve son atık cürufudur (Şekil 3.6). Ferrokrom cürufları 50 kg miktarlarında ferrokrom üretim yerinden alınarak laboratuvarında malzeme özellikleri irdelenmiştir. Bu atıklar fiziksel olarak düzensiz şekilli, yüzeyi pürüzlü, koyu gri ve siyah renk tonlarındadır. Resim 3.5.’te görüldüğü gibi yeşil renkli kısımları olivin, koyu kahverengi kısımları krom ve serpantin olduğu görülmektedir.

FeCr cürufu, beton agrega malzemesi olarak kullanım için mükemmel mekanik ve mühendislik özelliklerine sahiptir. Ferrokrom üretimi esnasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar SiO₂, metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur ve bu cüruf kalıplara dökülerek atılır. Açık havada soğumaya bırakılan FeCr cürufunun bir kısmı ince taneli granüler yapıdadır bir kısmı ise değişik ebatlardaki iri tanelerden oluşmaktadır. Bu çalışmada cürufun ince kısmı sadece eleme işlemine tabi tutularak filler olarak kullanılabilir [45].

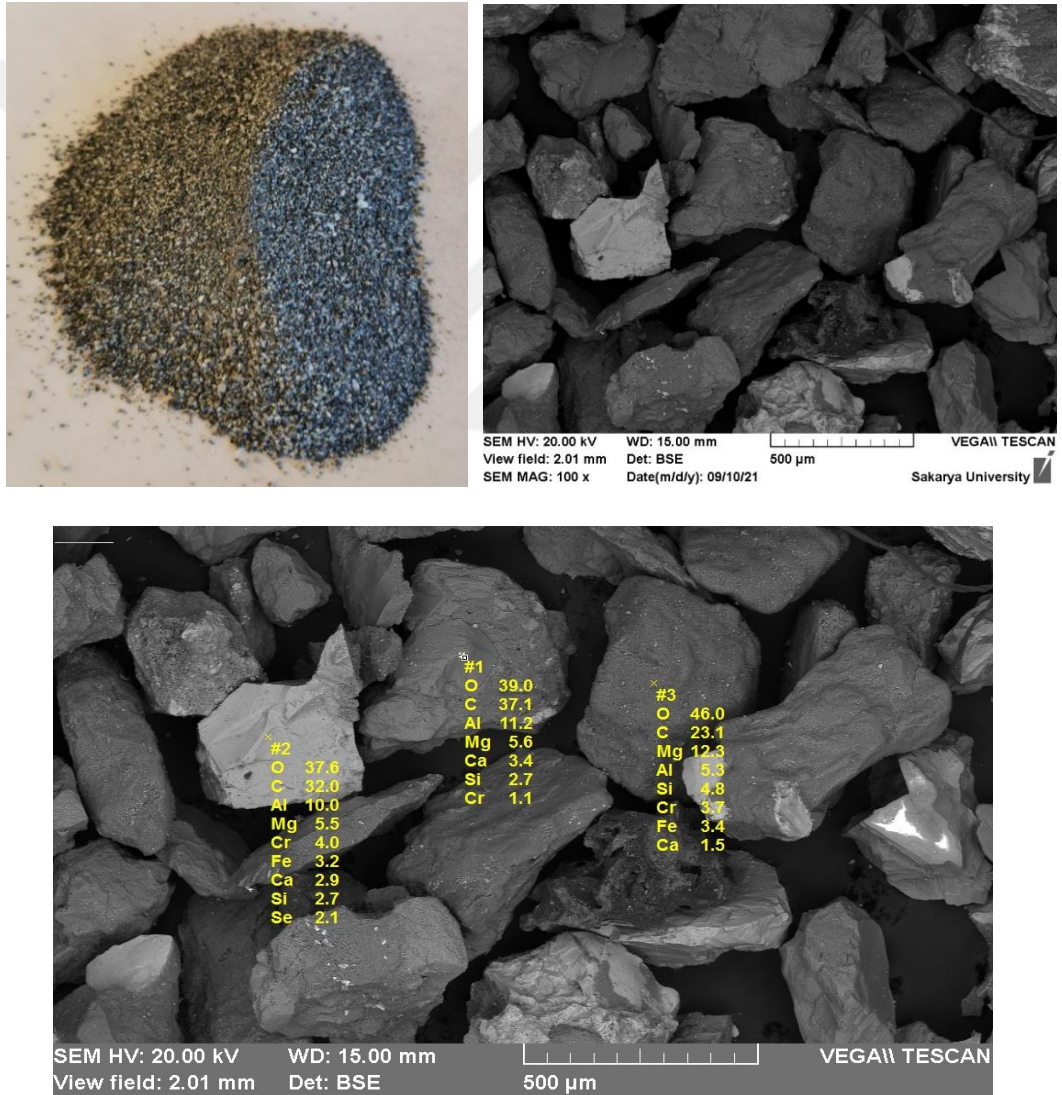
KROMİT + OLİVİN + SERPANTİN



Şekil 3.6 : Ferrokrom cüruflarının oluşum süreci.

3.1.9. Serpantin

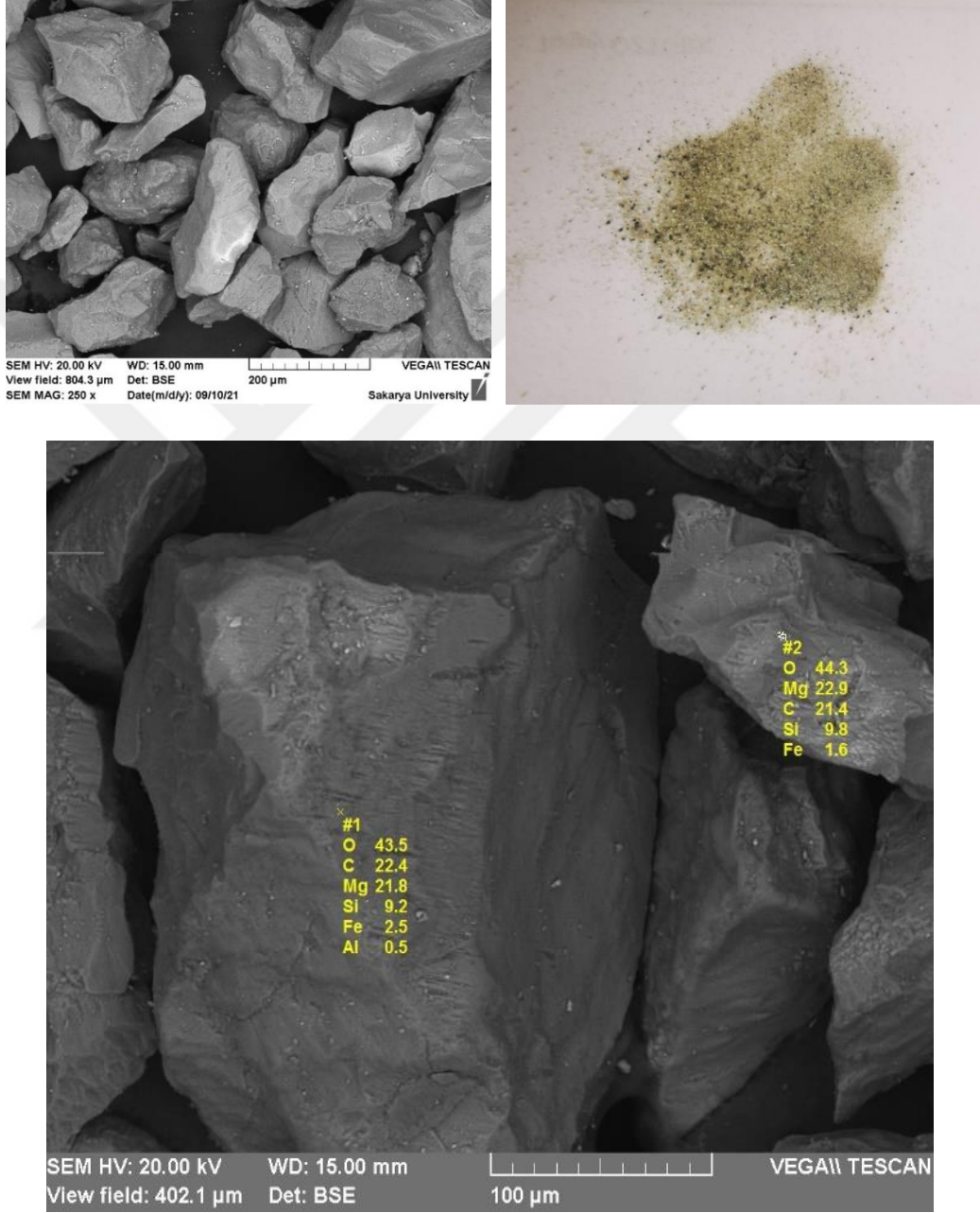
Ferrokrom alaşımı elde edilmesi aşamasının ilk durumda cevherden yoğunluk farkıyla serpantin ayrılmaktadır. Krom cevheri konsantrasyonla granül metrik olarak zenginleştirmeye maruz kalarak olivin ve kromit durumuna getiriliyor. Tozlarda uygulanan manyetik seperatörlerle ayrışma durumuna getirilmektedir. Bu durumda serpantin krom cevherinden yoğunluk farkı ile ayrışarak elde edilmektedir. Elde edilen serpantin 0-500 μ boyutlarında olduğu görülmektedir. Serpantin cürufunun SEM görüntüsü aşağıda verilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Serpantin cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

3.1.10. Olivin

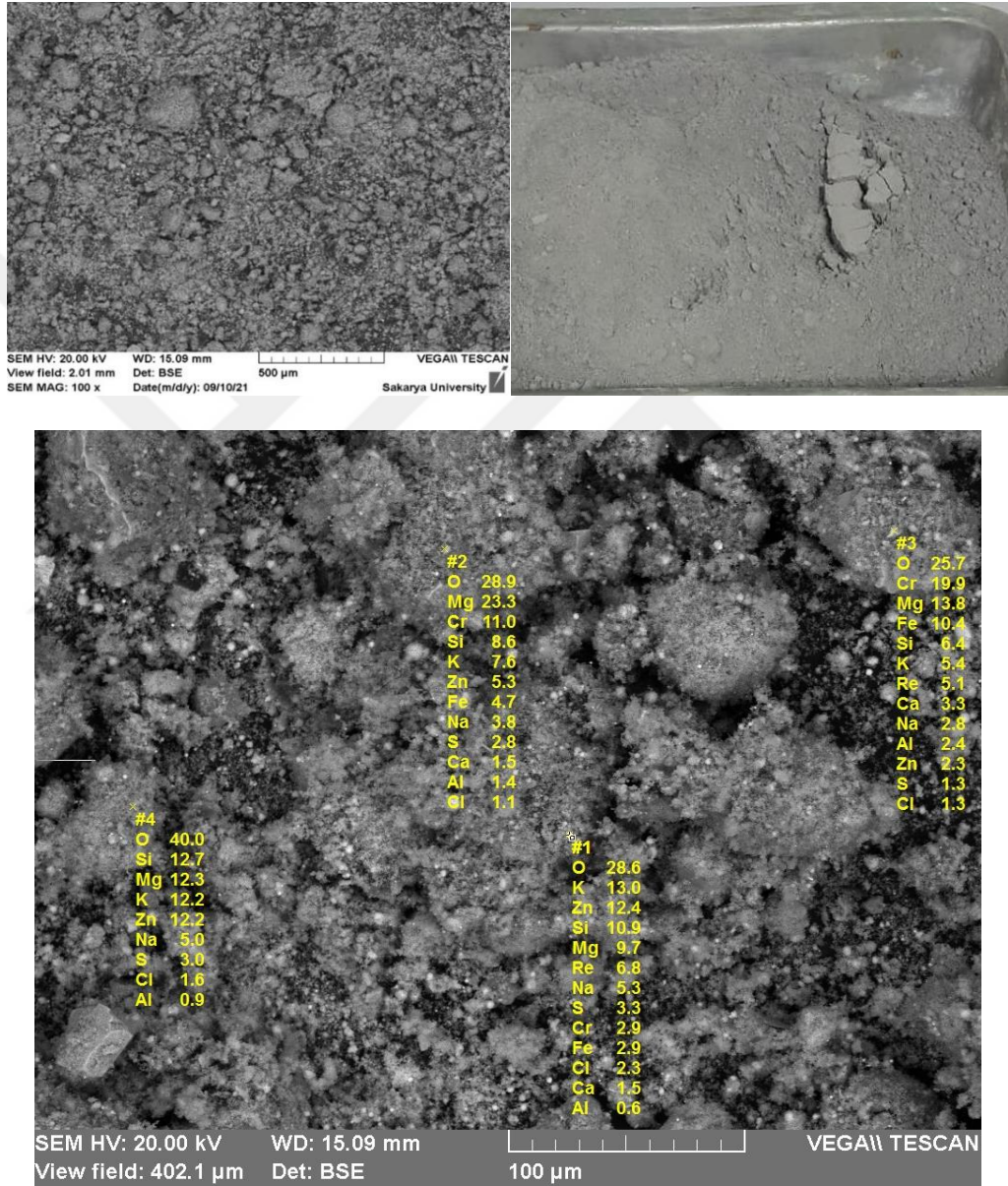
Cevher içerisinde bulunan olivin toz malzeme ayrıştırıcı yöntem olan manyetik seperatörlerle kromit ile olivin birbirinden ayrılarak kromit işleme durumuna getirilir. Artık kromit malzemesi elektrik arklarında eritilerek içinden krom alınmaktadır. Depolanan malzeme 0-500 μ boyutlarındadır.



Şekil 3.8 : Olivin cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

3.1.11. Uçucu kül

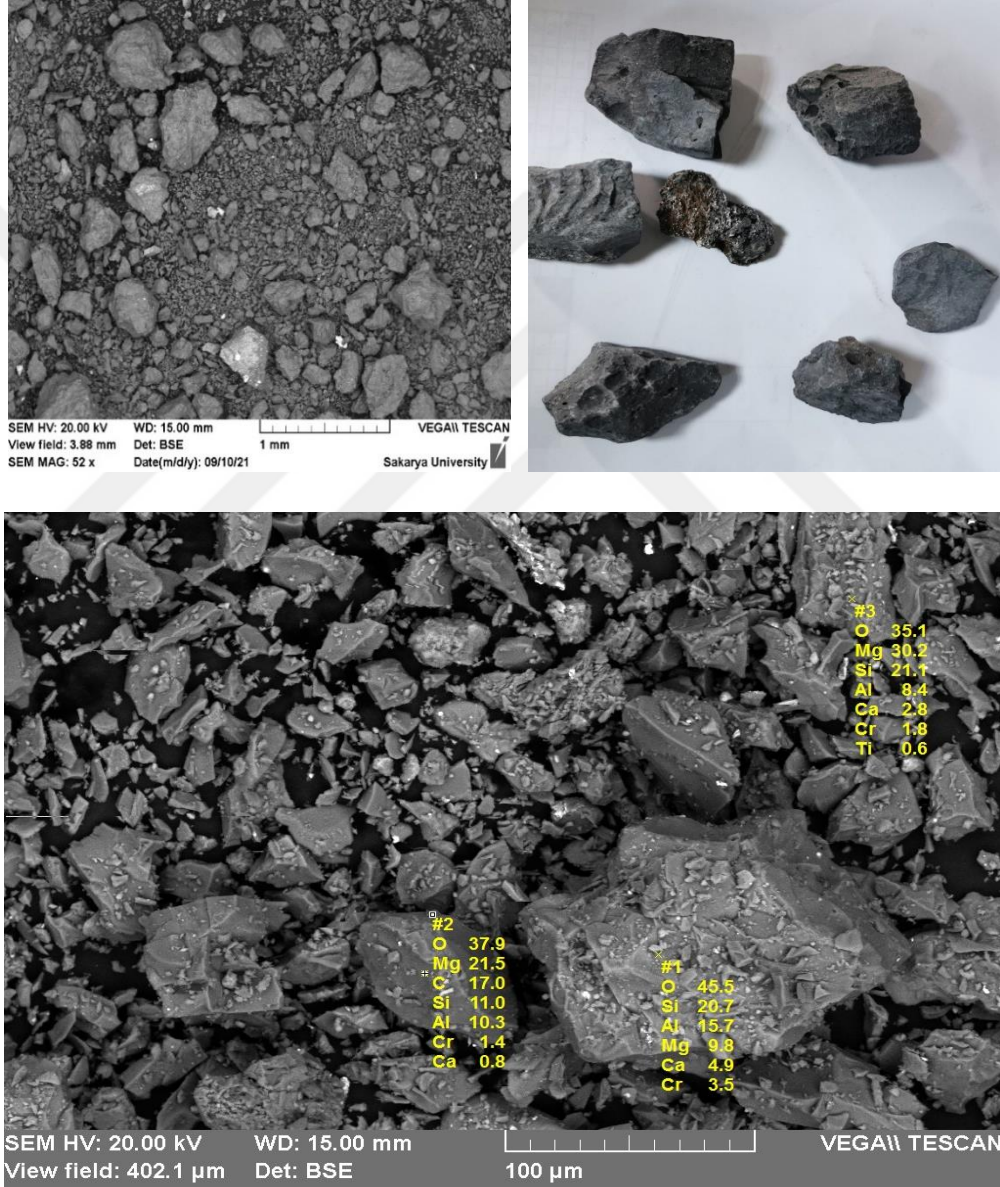
Kromit malzemenin 1700 °C elektrik arklarında eritilerek ferrokrom alaşımı elde edilmektedir. Bu ergime işleminde baca külü malzemesi atık olarak çıkmaktadır. Depolanan malzeme 0-300 µ boyutlarındadır. Bu atık malzemenin baca tozu olarak elde edilen malzeme cüruf olarak kullanılmaktadır. Baca külü cürufunun malzeme özellikleri Tablo 3.9’da verilmektedir.



Şekil 3.9 : Uçucu kül tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi

3.1.12. Pota altı

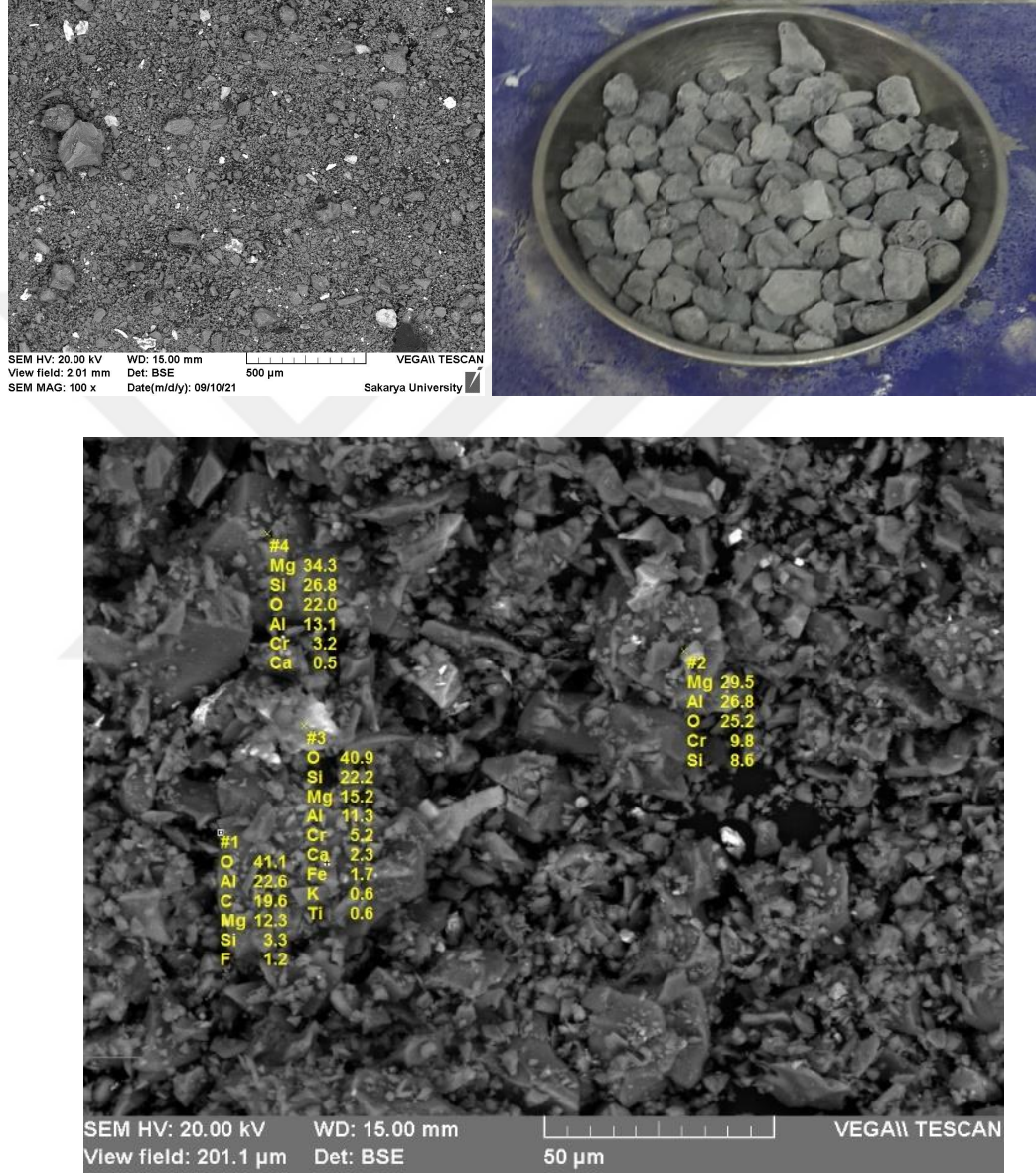
Ferrokrom malzemesinin elde edilmesi aşamasında krom yönünden en zengin atıktır. Zenginleştirme öncesi hammaddedir. Kromit malzemesinin elektrik arklarında eritilmesi sonrasında ham ferrokrom malzemesinin alınması sonrasında atıklar içinde ayrışamayan krom malzemesi ihtiva etmektedir. Depolanan malzeme 0-5 cm boyutlarındadır. Pota altı atık malzemesi olarak adlandırdığımız bu atık daha sonra zenginleştirme evresinden geçerek içinde ihtiva eden krom alınmaktadır.



Şekil 3.10 : Pota altı cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi

3.1.13. Ferrokrom cürufu

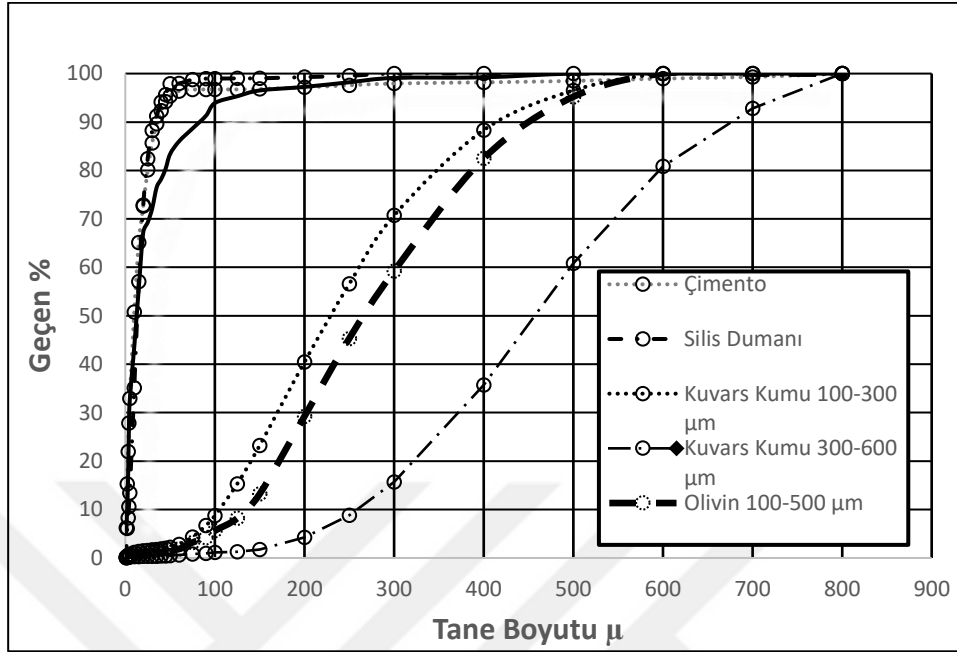
Pota altı malzemesinin içinde FeCr cürufu ve %10 krom ihtiva etmektedir. Elektrik arklarında eritilerek krom cevherinin alınması sonrasında içinde ihtiva eden kalıntı kromdan da ayrıışan malzeme FeCr cürufu ortaya çıkmaktadır. Depolanan FeCr cürufu 0-3 cm boyutlarındadır.



Şekil 3.11 : Ferrokrom cürufu, tanelerin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

Malzemelerin tane dağılımı grafiği (Şekil 3.12) incelendiğinde çalışmada karışıma eklenen kuvars kumu, 100–300 µm ve 300-600 µm aralıktaki farklı iki sınıfı bulunmaktadır. RPC’de kullanılan agregaların yerine ikame edilecek olan kromit atıkları olan olivin ve FeCr cürufu tane dağılımı incelendiğinde, olivin cürufu kuvars

kumu boyutunda, FeCr cürufu ise kuvars kumu boyutunda olduğu RPC betonunda kullanılan malzemelerin toplu olarak granülometri eğrisi Şekil 3.12’te görülmektedir.



Şekil 3.12 : Taneli malzemelerin granülometri eğrisi.

3.1.14. Atık lifler

RPC ince malzemelerden meydana geldiği için çimento ile agrega aderansı ne kadar güçlü olsa bile eğilme değeri oldukça düşüktür. Bunun için endüstriyel lifler kullanılarak betona süneklik özelliği kazandırılarak enerji yutma kapasitesi artırılmaktadır. Bu çalışmada atık malzemelerin reaktif pudra betonlarında kullanılabilirliği araştırılması nedeniyle endüstriyel liflere alternatif atık çelik tellerin lif yerine kullanılması çalışması literatürde karşılaşılmamıştır. Ayrıca RPC maliyet yönünden normal betonlara kıyasla oldukça yüksektir. Bu durumda göz önüne alındığında hem maliyeti düşürücü etkiyi verecek, hem de atık ÖTL liflerinin bertaraf edilmesi için endüstriyel lif ile atık lifin kıyaslaması yapılmıştır. Her yıl dünya çapında 1,6 milyar yeni lastik üretiliyor. Geri dönüştürülebilir lastik, üretilen lastiğin %6,5'ini oluşturur. Bu atıklardan 100 milyon lastik geri dönüştürülebilmektedir. Geri dönüştürülemeyen lastikler dünya için ciddi bir çevre sorunu teşkil etmektedir.

Yapılan çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerden mekanik yollarla elde edilen kırpıntı telleri Akyazı Tanırkulu geri dönüşüm fabrikasından temin edilmiştir. Burada teller 1-25 mm boyutlarında elekten elenerek RPC’lerde kullanılan endüstriyel tellerin boyutunda ayıklanmıştır.



Şekil 3.13 : Mekanik yollarla ayıklanan ve depolanan ÖTL telleri.



Şekil 3.14 : ÖTL Liflerin boyutsal olarak ayıklanması.

Tablo 3.10 : Endüstriyel ÖTL lifi fiziksel özellikleri.

Lif	Boy (mm)	Çapı (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
ÖTL	10 -25	0,1-0,2	67	~ 2000	7,81

Endüstriyel lif yerine ikame edilecek ÖTL atık lifleri atık lastiklerden mekanik yollarla elde edilen çelik teller kullanılmıştır. Liflerin boyutları her ne kadar 1 cm altında seçilmiş olsa da ÖTL lifleri genel olarak endüstriyel liflerden bir miktar

büyük ve toplam boyutları daha fazladır. ÖTL lifinin %25'ini lastik ve iplik kalıntıları, %60'ını ince makro lifler, % 15'ini de mikro lifler oluşturmaktadır. Atık lastiklerden elde edilen liflerin dağılım oranı aşağıda verilmektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : ÖTL Liflerinin ayrışma boyutları

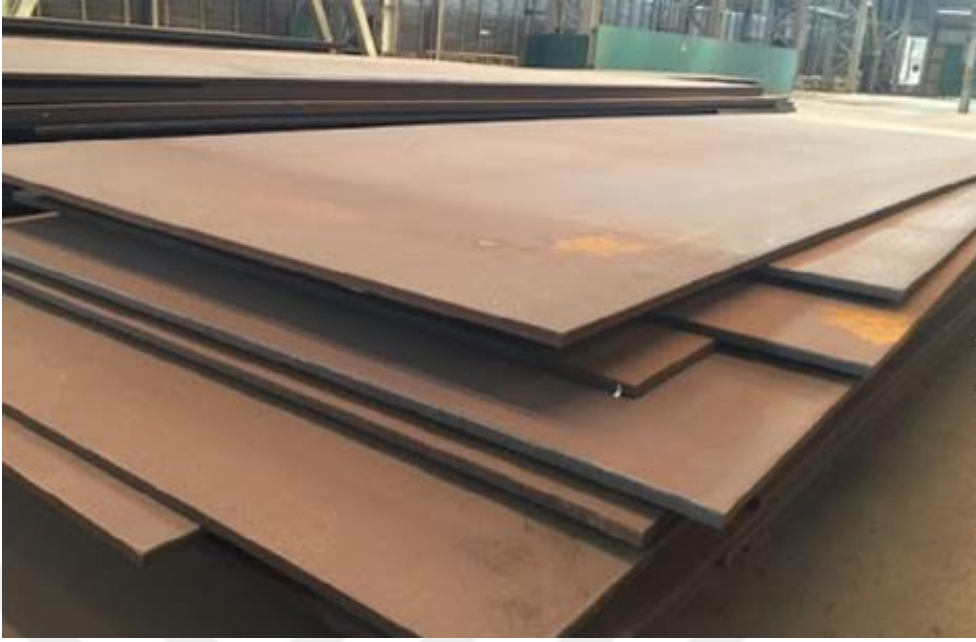


Şekil 3.16 : Endüstriyel ve ÖTL liflerinin görünümü.



Şekil 3.17 : Endüstriyel ve ÖTL mikro lifleri.

3.1.15. Hardox 500 zırh çeliği



Şekil 3.18 : Hardox 500 Çeliği.

Endüstriyel dünyada, aşınmaya ve yüksek stres koşullarına karşı dayanıklı malzeme olan Hardox 500, mükemmel aşınma direnci ve yüksek mukavemet ile endüstriyel uygulamalarda güvenilir bir çözümdür. Hardox 500, yüksek mukavemetli bir aşınma direnci çelik levhasıdır (Şekil 3.17).

3.2. Ön Deneyler

Deneyler, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarları yapılmıştır.

3.2.1. FeCr Cürufların temini

Kromit cevherinin manyetik seperatörlerle ve elektrik arklarında ısıtılarak işlemler neticesinde demir alaşımları ile FeCr elde edilirken ortaya çıkan cürufların boyutları 0-3 cm boyutundadır. Bu cüruflardan Serpantin cürufu (S) 0-700 μ ve Olivin cürufu (O) 0-500 μ boyutunda, baca külü (U) 0-300 boyutunda, yüksek sıcaklıkta eritilen kromit malzemesinde ferrokrom elde edildikten sonra içinde %10 krom içerikli olarak ortaya çıkan pota altı (C) 0-5 cm boyutlarındadır. Pota altı malzemesi soğutulmaya bırakıldığı için amorf ve düzensiz boyutlarda ortaya çıkmakta ve içinde krom atıklarının manyetik seperatörlerle arındırılması sonucunda 0-3 cm boyutunda

FeCr cürufu elde edilmektedir. Nihai atıklar elenerek 0-1 cm boyutuna getirilmiştir. Öğütme işlemi bu eleme işleminden sonra yapılarak 0-500 µ boyutlarında malzeme elde edilmiş olur. Böylece FeCr cürufu RPC karışımında kullanılacak boyuta getirilmiş olmaktadır.

3.2.2. FeCr Cürufların deneysel çalışmaları

Ferrokrom cüruflarının özelliklerinin belirlenmesinde yapılan çalışmalarda su muhtevaları, su emme, yoğunluk, birim hacim ağırlık, kompozite ve porozite özellikleri yönünden irdelenmiştir.

3.2.2.1. FeCr Cürufların su muhtevası ve su emme oranının belirlenmesi

Kullanılacak malzemeler laboratuvarında belirlenen ağırlıkta tartılır. Daha sonra bir kap içinde suya batırılarak 1 gün su emmesi sağlanmıştır. Daha sonra etüvde kurutularak $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ su emme oranı belirlenmiştir.



Şekil 3.19 : Ferrokrom cürufları su muhtevası ve su emme deneyi.

3.2.2.2. FeCr Cürufların kuru birim hacim ağırlık deneyi

Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_k): Kuru durumundaki agrega ağırlığının toplam hacmine oranıdır.

$$\gamma_k = W_k / V_T \quad (3.1)$$



Şekil 3.20 : Ferrokrom cürufları kuru birim ağırlık deneyi.

3.2.2.3. FeCr Cürufların özgül ağırlık (yoğunluk) deneyi

Özgül Ağırlık (G): Katı kısmın ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır. Kısacası bir cismin özgül ağırlığının, suyun özgül ağırlığına oranıdır ve birimi yoktur.

$$G = \gamma / \gamma_{su} \quad (3.2)$$

3.2.2.4. FeCr Cürufların birim hacim deneyi

Doygun Birim Hacim Ağırlık (γ_d): Doygun haldeki agrega ağırlığının toplam hacmine oranıdır.

$$\gamma_{dky} = W_{dky} / V \quad (3.3)$$



Şekil 3.21 : Ferrokrom cürufu birim hacim deneyi.

3.2.2.5. FeCr Cürufların porozite ve kompozite oran hesabı

Kompozite, dolu hacmin tüm hacme oranıdır. Porozite ise boşluk hacminin tüm hacme oranı olarak ifade edilmektedir. Kompozite ve porozite aşağıdaki bağıntılar yardımı ile bulunmuştur.

$$k = \gamma_{dky} / G \quad (3.4)$$

$$p = 1 - k \quad (3.5)$$

RPC matrisinde boşluk oranının en az olması dayanım yönünden oldukça önemlidir. Bu durum göz önüne alındığında FeCr cüruflarının malzeme özellikleri incelendiğinde sadece baca külünün 0,5 oranından düşük olmuştur. Diğer malzemelerin 0,5 oranından yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmada taneli malzemelerin yoğunluklarının çok yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 3.11: Ferrokrom cüruflarının malzeme özellikleri ve kodları

No	Cüruflar	Kod	Su Muhteva sı (%)	Su Emme	Yoğunluk	Dky Birim Hacim Ağırlık	Kompozite	Porozite
1	Pota altı	C	0,04	2,9	2,98	2,036	0,683	0,317
2	Olivin	O	0,12	8,64	3,23	1,875	0,58	0,42
3	Uçucu kül	U	0,95	-	2,84	0,661	0,233	0,767
4	Serpantin	S	0,42	4,75	2,99	1,668	0,558	0,442
5	FeCr cürufu	F	0,09	0,42	2,96	1,52	0,513	0,487

3.2.3. FeCr Cüruflarının karışım boyutlarında hazırlanması

RPC’de kullanılan malzeme boyutu 0-500 μ olması istenmektedir. FeCr cürufları bir kısmı sadece elenerek bir kısmı ise öğütme işlemi neticesinde istenen boyuta getirilmektedir. FeCr cüruflarının bu boyuta getirilmesi için laboratuvarında bıçaklı

öğütücü değirmende 2800 devir/sn hızında öğütülme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.22). Olivin 0-500 μ , serpantin 0-700 μ ve baca külü oluşum boyutları 500 μ altı olduğu için sadece elemesi yapılarak karışıma hazır hale getirilmiştir. Pota altı ve Agregat (son cüruf) malzemeleri dişli değirmende elenerek 500 μ altına getirilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : Ham ve Elenmiş Ferrokrom Cürufları



Şekil 3.23 : Bıçaklı Öğütücü Değirmen



Şekil 3.24 : Ham ve öğütülmüş FeCr Cüruflu.

3.2.4. FeCr Cüruflarının kombinasyonlu olarak karıştırılması

RPC betonlarında dayanımın yüksek olması matrisi oluşturan malzemelerin boyutsal olarak homojen olması hedeflenmektedir. Bu hedefi gerçekleştirmek için 500 μ boyutunda hazırlanan malzemeler ile ikili ve üçlü kombinasyon yapılmıştır. Genel özellikleri belirlenen cüruflar yapılan kombinasyonlarla RPC’de kullanılan agrega olarak kullanılan Kuvars kumu ve Kuvars pudrası yerine ikame edilecektir.



Şekil 3.25 : FeCr Cürufların kombinasyonları.

Karışımların birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık ve boşluk yapısı yönünden kıyaslama yapılmıştır. Burada hem dayanım yönünden en yüksek değeri verecek minimum boşluk yapısı olan karışım hem de kolay elde edilebilir olan malzemelerden oluşması hedeflenmektedir. Bu kombinasyonların basınç dayanımları, RPC’de agrega yerine ikame edilerek referans olarak üretilen RPC ile kıyaslayarak en uygun agrega karışım oranı olacaktır. Bu basınç değerlerinin en yüksek değeri elde edildiği karışım referans alınarak bu oranlar kullanılarak RPC’de

agrega oranı olarak belirlenmiş ve üretimine geçilmiştir. İkili ve üçlü kombine edilen malzemelerin özellikleri aşağıda Tablo 3.12’de verilmektedir.

Tablo 3.12: FeCr cüruflarının ikili karışım malzemesinin özellikleri.

No	İkili Karışımlar	Kodlar	Birim Hacim Ağırlık	Özgül Ağırlık	Kompozite %	Porozite %
1	POT. ALTI + AGR	CF	1,62	2,98	0,54	0,46
	OLIVIN + AGR	OF	1,72	3,14	0,55	0,45
2	SERP. + AGR	SF	1,59	2,98	0,53	0,47
	AGR + UÇ.	FU	1,43	3,1	0,46	0,54
	OLIVIN + POT	OC	1,73	3,14	0,55	0,45
	SERP. + POT	SC	1,611	2,98	0,54	0,46
	POT + UÇ.	CU	1,183	3,041	0,39	0,61

Tablo 3.13: FeCr cüruflarının üçlü karışım malzemesinin özellikleri

No	Üçlü Karışımlar	Birim Hacim Ağırlık	Özgül Ağırlık	Kompozite %	Porozite %
1	AGR+ POT + OLIV	1.79	3.14	0.57	0.43
	AGR+ POT + SERP.	1.735	3.11	0.56	0.44
	AGR+ POT +UÇ.	1.52	3.11	0.49	0.51
2	AGR+ OLIV + SERP.	1.85	3.016	0.61	0.39
	AGR+ OLIV + UÇ.	1.6	3.28	0.49	0.51
	AGR+ SERP. + UÇ.	1.56	3.16	0.49	0.51
3	POT+ OLIV + SERP.	1.63	3.11	0.52	0.48
	POT+ OLIV + UÇ.	1.4	3.11	0.45	0.55
	AGR+ SERP. + UÇ.	1.41	3.07	0.46	0.54

Yukarıda tablolarda görüleceği üzere değerlendirildiğinde uçucu kül ikame edilen karışımların kompozitesi 0,5 değerinin altında olduğu görülmektedir. Karışımlara uçucu kül eklenmeden devam etmesi daha doğru olacağı görülmüştür (Tablo 3.11-Tablo 3.12).

3.2.5. Agreganın karışım oranlarının belirlenmesi

Reaktif pudra betonlarının karışım dizaynı için henüz yerli ve yabancı herhangi bir standart mevcut değildir. Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmaktadır. İdeal tane dağılımının nasıl olması gerektiği konusundaki çalışmalar yaklaşık 150 yıl önce başlamış olup, 1845'te Wright, 1897'de Feret, 1907'de Fuller ve Thomson, 1930'da Bolomey, 1938'de Faury gibi ünlü birçok bilim adamı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, Fuller ve Andreasen ve Andersen yöntemleri kullanılmış fakat daha iyi sonuç verdiği için Fuller bağıntısı tercih edilmiştir. Fuller bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$P = 100x(d/D)^n \quad (3.6)$$

Burada;

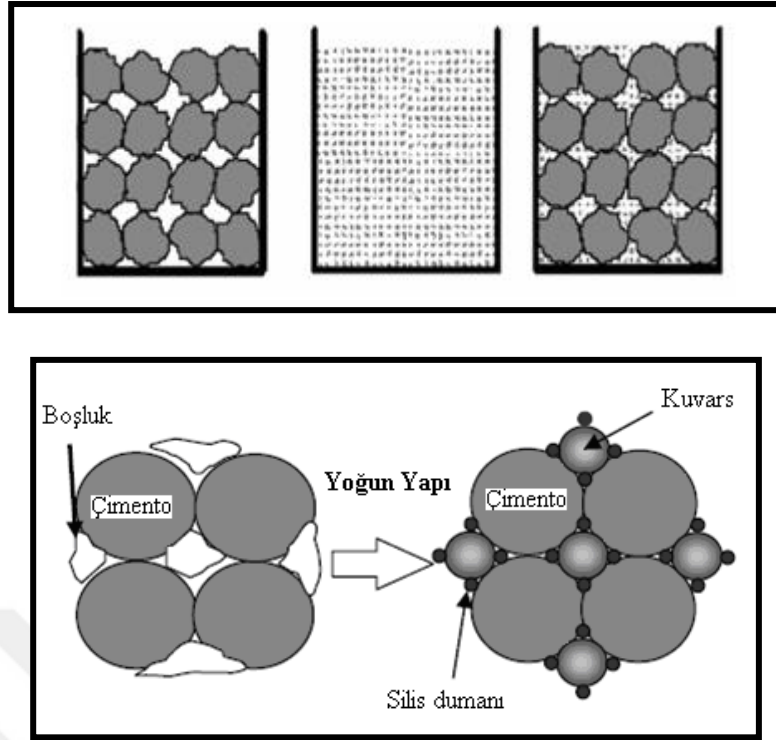
P : elekten geçen malzeme miktarı (%),

d : elek boyutu,

D : agreganın en büyük tane boyutu,

n : 0,3-0,5 aralığında katsayıdır.

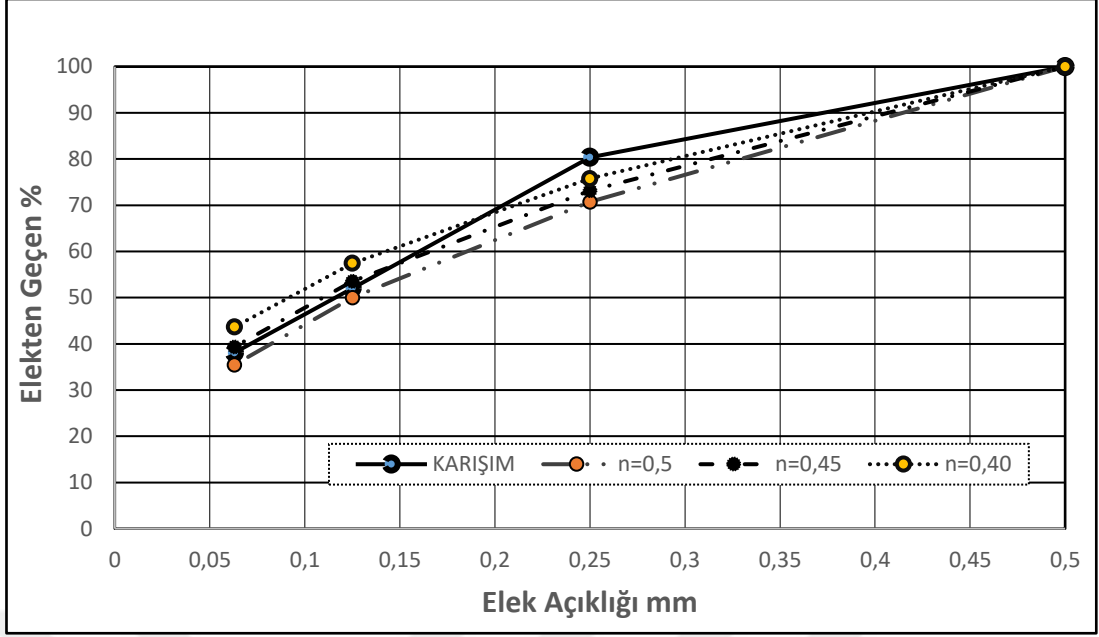
Bu teorilerden birisi reaktif pudra betonları için en çok kullanılan teori olan Fuller eğrisi modelidir [46]. Ferrokrom atıklarının elek analiz sonuçları kullanılarak Farklı Fuller katsayısı (n= 0.4 –0.45 ve 0.50) kullanılarak karışım oranları belirlenmiştir. Fuller bağıntısında en fazla birim hacim ağırlık elde edebilmek için n katsayısının 0,5 alınması gerektiği belirtilmiştir. Agreganın iyi bir tane dağılımına (gradasyona) sahip olup, olmadığına söz konusu karışımın beton içindeki performansı gözlenerek karar verilir. Teorilerin temel mantığı Şekil 3.26'teki gibi büyük tanelerin arasını daha küçük taneli malzeme ile doldurarak doluluk oranını arttırmaktır.



Şekil 3.26 : Taneli malzemelerin karışım teorisi [46]

Taze betonun karıştırılması, taşınması, yerine serilmesi ve sıkıştırılması işlemleri boyunca, iri ve ince tanelerin segregasyonuna neden olmayarak, istenilen işlenebilmenin ve yoğunluğun elde edilmesini sağlayacak olan agrega tane boyutu dağılımıdır. Bu yöntem ile iki veya daha fazla malzeme karıştırılarak yeni karışımlar oluşturulabilir ve oluşturulan karışımlar ile yeni malzemeler veya karışımlar birbiri ile karıştırılarak betonu oluşturan taneli malzemelerin maksimum doluluk oluşturacak şekilde hesaplamaları yapılabilmektedir (Şekil 3.26).

Farklı ferrokrom atıkların elek analizlerinden elde edilen eğriler ile 0,40 mm, 0,45 mm ve 0,5 mm elek açıklıklarına göre ideal Fuller değerler eğrileri oluşturulmuştur. Bu değerlere en yakın olan cüruf karışım değerleri hesaplanmış ve fuller eğrilerine paralel olan malzeme oranları belirlenmiştir. İdeal Fuller eğrisine en yakın değerlerde olan farklı agregaların karışım oranlarına ulaşılmıştır. İdeal fuller eğrisi referans alınarak agrega karışım oranları ayarlanarak eğrilerin olabildiğince simetri olması sağlanmıştır. Düşük elek açıklığı kısımlarında simetri olmadığı noktalarda karışım içinde bulunan daha ince boyutlu çimento ve silis dumanı ile doldurulması göz önünde bulundurularak simetri durumu sağlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.27. de gösterilen kalın kesik çizgili eğri karışım oranı ideal karışım eğrisi olarak seçilmiştir.



Şekil 3.27 : Agrega Karışım Oranları grafiği.

3.2.6. Lif oranının belirlenmesi

Reaktif Pudra Betonunu oluşturan tüm malzemeler, kullanılacak lif hacmi oranına göre azaltılarak lif ikamesi yapılmıştır. Reaktif pudra betonlarında agrega olarak tanımlanan malzemeler neredeyse tüm katı malzemeler olduğu için böyle bir yöntem seçilmiştir. Lifin sadece kuvars kumu ile yer değiştirmesi, özellikle yüksek oranlardaki lifli karışımlarda karışım oranlarını önemli ölçüde değiştireceği de göz önüne alınarak, bu yöntem tercih edilmiştir. Bu yöntemin diğer bir avantajı da bütün lif oranlarında, su/çimento, su/bağlayıcı ve su/kimyasal katkı oranlarının sabit kalmasıdır. Sonuç olarak, karışıma giren tüm malzemelerin kendi içindeki oranları, tüm lif yüzdelerinde sabit tutulmuştur. Lif hacminin belirlenmesi için kullanılan deney numuneleri, basınç ve eğilme için ayrı ayrı hazırlanmıştır.

Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında RPC'deki optimum lif oranının %4 olduğu ve bu orandan daha fazla lif katıldığında işlenebilirlik ve yerleştirilme problemleri ortaya çıktığı bilinmektedir. Buradan yola çıkarak atık liflerin de Endüstriyel lifler yerine ikame edilmesi için öncelikle her iki lif ile en yüksek değeri veren karışıma endüstriyel ve atık liflerin etkisini araştırmak için hacimce %1, %2, %3 ve %4 oranlarında lifler karışıma 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapındaki endüstriyel çelik lif ile benzer boyutlardaki ÖTL lifleri eklenmiştir.

3.2.7. Deney numunelerinin üretilmesi

RPC numunelerinin hazırlanması geleneksel betonlara göre farklılık arz etmektedir. Özellikle RPC betonlarında karışım sıralamasına çok dikkat edilmelidir. RPC betonlarının karışım işlemi performansı oldukça etkilidir. Karıştırma işlemi yapan mikserin hızı ve malzemelerin mikserde koyulum sırası son derece önemlidir. Bu sıralama belli düzen içinde olmalıdır. Aksi takdirde karışımı oluşturan malzemelerin yoğunluğu ve kendi içinde yüksek özellikte olması karışım hızının ve karıştırma düzeninin uygun olmaması durumunda çok farklı sonuçlar alınabilmektedir. RPC betonlarının dökümü için hassas özel mikserler tasarlanmıştır. ayarlanabilmektedir (Şekil 3.28). Bu sayede hedeflenen performans sonuçları elde edilebilmektedir.



Şekil 3.28: Mikser ve matris hamurunun görünümü

Malzemelerin mikserde dökülmesinde karışıma ilk olarak taneli malzemelerden Çimento ve Silis dumanı dökülerek 400 devir/dak. düşük hızlı bir devirde 5 dakika karıştırılır. Aynı devirde agregalar sıra ile ilave edilerek 5 dakika daha karışım sağlanır. Daha sonra kimyasal katkı ile karışım suyunun karıştırıldığı beherden ikili karışım püskürtülerek karışıma ilave edilir ve karışım hızı 1400 devir/dak. çıkarılarak 5 dakika bu hızda karışım yapılır. Hazırlanan matrise aynı devirde hazırlanan lifler homojen dağılacak şekilde ilave edilir. Daha önce ayırıcı yağ ile beton dökülecek yüzeyleri yağlanmış 100x100x100 mm kare kalıplara dökülerek numuneler hazırlanmaktadır. Vibrasyon ve şişleme yapılarak sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler karışım suyunu muhafaza etmesi için hava ile temasını azaltacak şekilde sarılarak piriz alması sağlanır. Tüm deneysel çalışmada, numuneler bir gün sonra

kalıptan çıkarılmış ve 20 °C'deki kür havuzuna konulmuştur. Kür havuzunda 28 günlük kür işlemine tabi tutulan numuneler havuzdan çıkarılarak 1 gün kurumaya bırakılarak kırılmaya tabi tutulmuştur (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 : Numunelerin priz süreci ve kür edilmesi.



Şekil 3.30 : Deney öncesi numunelerin görünümü.

3.2.8. Balistik numunelerin üretilmesi

Askeri yapılar ile ilgili sınırlı kaynakların olması sebebiyle referans numune seçiminde güçlükler yaşanmasına rağmen edinilen bazı bilgiler ışığında, balistik test için %1 makro (50 mm) çelik lif içerikli C40 beton sınıfına sahip betonarme eleman kullanılmıştır. Mekanik deneyler sonucunda elde edilen optimum karışım olan GRPC (green reactive powder concrete) numuneleri, %4 lif içerikli betonarme olarak kullanılmıştır. Tüm numuneler 140x140x40 cm boyutlarındadır.

3.2.9. Balistik numune özellikleri

Tüm numuneler 140x140x40 cm boyutlarındadır. Tüm numuneler, Ø14 çapında, yatayda ve düşeyde 15 cm aralıklı ve çift sıra donatıya sahiptir. Numune türleri ve kodları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

C1E = C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif içeren numune,

C1E-Z = C40 Betonarme + Endüstriyel Lif (%1) + Zırh (2 cm),

GRPC4W = GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4),

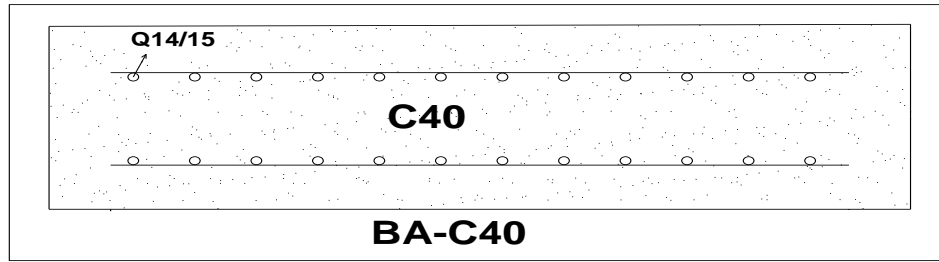
GRPC4W-Z = GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zırh (2 cm),

COMP = [GRPC + ÖTL Lif (%4)10 cm] + [C40 Betonarme + Endüstriyel
Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm]

COMP-Z = [GRPC+ÖTL Lif (%4) 10 cm] + [C40 Betonarme+Endüstriyel
Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm]+ Zırh (2 cm),

3.2.9.1. C40 Referans numuneleri

Üretilen C1E referans numunesinin beton basınç dayanım 40MPa ve hacimce %1 endüstriyel makro çelik life sahiptir (Şekil 3.31). C1E referans numunesinin orta bölgesine, zırh olarak hardox 500 çelik levha konularak oluşturulmuştur. Zırh malzemesi 1 cm kalınlığındadır. 2 adet zırh malzemesi üst üste kullanılarak 2 cm kalınlıkta zırh elde edilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.31 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif içeren numune kesiti.



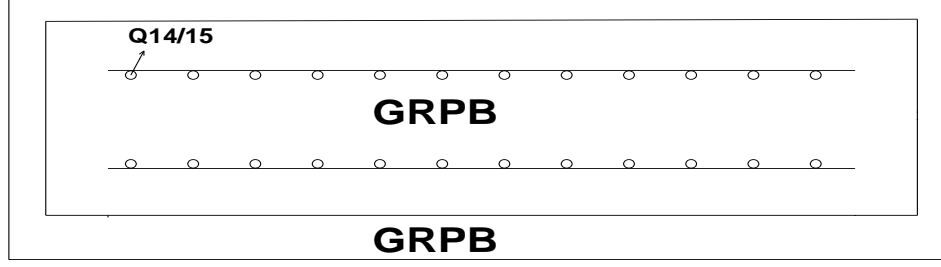
Şekil 3.32 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif (C1E) içeren referans numunelerin üretimi



Şekil 3.33 : C40 Betonarme + %1 Endüstriyel Lif + Zırh (2 cm) (C1E-Z) içeren zırlı referans numune üretimi.

3.2.9.2. GRPB Numuneleri üretilmesi

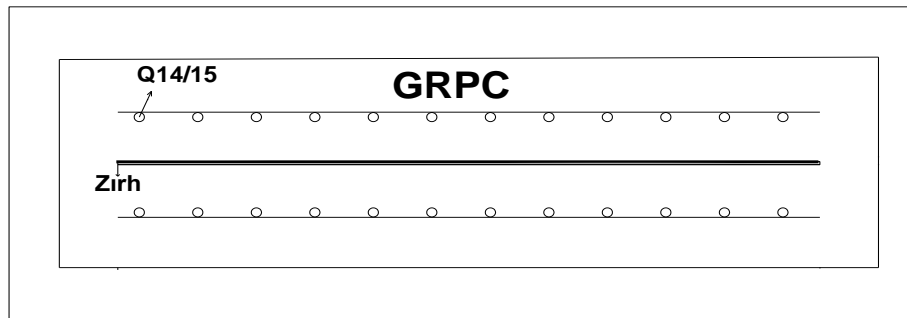
GRPC numuneleri %4 mikro ÖTL lif oranıyla hem zırhsız hem de zırlı olarak üretilmiştir. Numune içine iki doğrultuda donatı ilave edilmiştir (Şekil 3.35). GRPC4W numunesine 1cm kalınlığında ilave 2 adet zırh eklenmiştir. Zırh eklenerek GRPC4W-Z numunesi üretilmiştir (Şekil 3.36).



Şekil 3.34: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4) (GRPC4W) içeren numune kesiti.



Şekil 3.35 : GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4) (GRPC4W) içeren numune üretimi



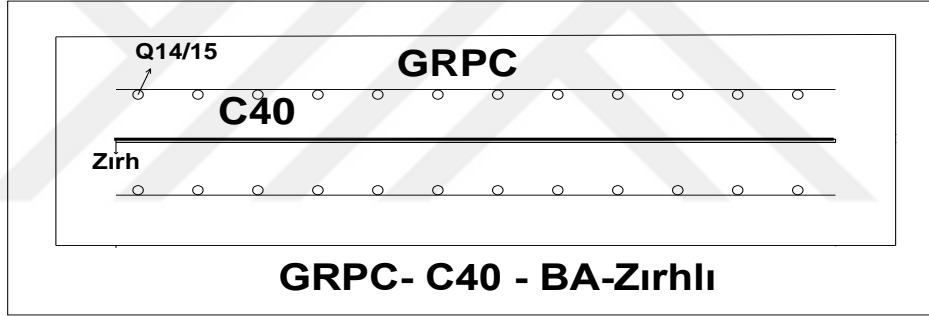
Şekil 3.36: GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zirh (2 cm), (GRPC4W-Z) içeren numune kesiti

3.2.9.3. Kompozit numuneleri üretilmesi

Öncelikle 20 cm betonarme C40 referans betonumuzu döktük. Daha sonra elde edilen GRPC betonunu kaplama olarak GRPB betonumuzun her iki kısmına 10 cm kalınlığında döktük. Diğer dökülen betonlarımızın referans betonu olarak dökülen iç kısmına 1 cm kalınlığında 2 adet zırh yerleştirilmiştir (Şekil 3.37).



Şekil 3.37 : GRPC Betonarme + ÖTL Lif (%4)+ Zırh (2 cm), (GRPC4W-Z) içeren numune üretimi



Şekil 3.38 : [GRPC + ÖTL Lif (%4)10 cm] + [C40 Betonarme + Endüstriyel Lif (%1) 20 cm]+ [GRPC + ÖTL Lif (%4) 10 cm] içeren numune kesiti

3.2.10. Basınç dayanım deneyi

Kür uygulanmış numuneler laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra basınç deney testi yapılmıştır. Bu testler, yükleme hızı kontrol edilebilen 3000 kN yük kapasiteli TSE standartlarına uygun beton presinde yapılmıştır [50,51].

Basınç deneyi cihazı yük uygulama tabasına, numunenin kalıp görmüş yüzeyleri gelecek şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ilgili standartlarda değerlendirilerek malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiş [52, 53]. Elde edilen veriler kullanılarak numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında aşağıdaki 4.1 bağıntı kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Burada,

σ = Net basınç dayanımı (MPa)

P = Kırılma yükü (N)

A = Numune kesit alanı (mm²) ‘yi göstermektedir.

3.2.11. Eğilme dayanım deneyi

Birim alanda çatlak meydana gelmesi için ihtiyaç olan enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı koyma direncini gösterir. Şekil değiştirme özelliği sünek malzemelerde yüksek olduğu için, kırılma anında malzeme büyük sehim değerlerine çıkmakta ve harcanan enerji buna paralel olarak artmaktadır. Burada, numunelerin yük sehim eğrilerinden kırılma enerjileri hesaplanabilmektedir. Şekil değiştirme özelliği gevrek malzemelerde düşük olduğu için bu tür malzemelerin enerji yutma kapasitesi düşüktür. RPC’lerde kullanılan çelik lifler betona yüksek süneklik özelliği kazandırır. Numunelerde lifler kullanılmasından dolayı yavaş şekilde kırılma meydana gelmekte ve sehim artış göstermektedir. Bu durumda, numunelerin enerji yutma kapasiteleri geleneksel betona göre daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 3.39 : Eğilme Deney düzeneği

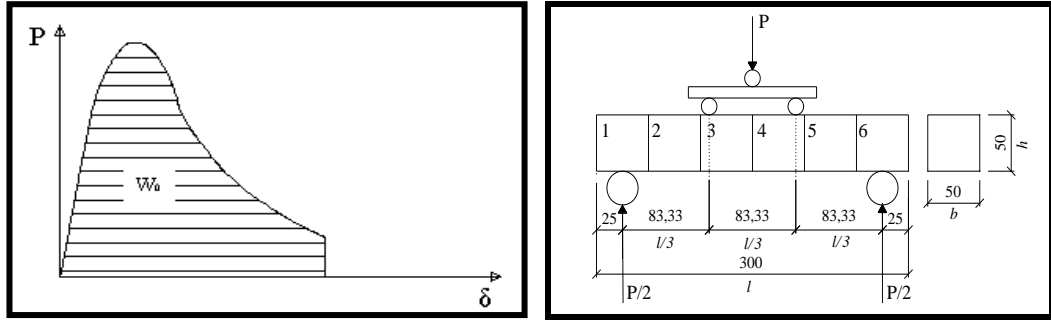
Eğilme deneyi numune boyutları, 50 mm genişlikte, 300 mm uzunluğunda ve yaklaşık 50 mm yüksekliğindedir.



Şekil 3.40: Lifsiz ve %4 numunelerin eğilme deneyi sonucu kırılma şekilleri.



Şekil 3.41 : Eğilme Deneyi Sonucu kırılma şekilleri.



Şekil 3.42 : Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu deney düzeneği.

Eğilme deneyleri bilgisayar destekli, yük-sehim grafiğini otomatik olarak çizebilen eğilme test cihazında yapılmıştır. Kiriş numuneleri her iki ucundan mesnetleri 20 mm geçecek şekilde kendi etrafında dönebilen rulo şeklindeki mesnetler üzerine konulmuştur (Şekil 3.39). İki mesnet arası 260 mm, üç eşit parçaya bölünerek kiriş numunesi Şekil 3.39'daki gibi tek noktadan yüklenmiştir. Deney cihazının yükleme hızı TS 10515'te belirtildiği gibi kiriş orta noktasında, 0,0 0,10 mm/dak. sehim yapacak şekilde ayarlanmıştır [54-58]. Numuneler sabit hızda tamamen kırılıncaya

kadar yükleme devam ederek yük sehim grafikleri çıkarılmıştır. Eğilme numunelerine ait mekanik özellikler ilgili standarda göre ayrı başlıklar altında verilmiştir.

Net eğilme dayanımlarının hesaplanması; Numunelerin ilk çatlak ve eğilme dayanımlarının hesaplanmasında bağıntı 4.2 kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{P_e l}{bh^2} \quad (4.2)$$

Burada,

σ_e = Net eğilme dayanımı (MPa)

P_e = Kırılma yükü (N)

l = Mesnetler arası uzaklık (mm)

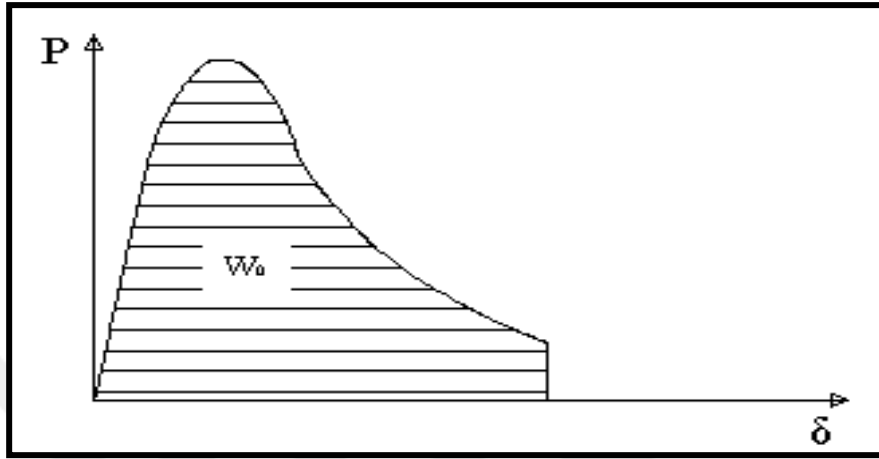
b = Numune kesitinin genişliği (mm)

h = Numune kesitinin yüksekliği (mm) olarak ifade edilmektedir. Numunelere ait dayanımlar hesaplanarak deneysel sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Elastik şekil değiştirme indeksleri; ASTM C 1018'de tokluk değerlendirmesi, betonun yük sehim eğrisi altındaki alanın hesaplanmasını ifade etmektedir [59]. Lifli numunenin taşıma gücünü kaybetmesi gereken toplam enerji, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın büyümesi ile artırılabilir. Eğrinin altında kalan alan hesaplanarak malzemenin eğilme özellikleri hakkında değerlendirme yapılabilir.

Kırılma tokluğu ve enerjilerinin hesaplanması; Bir numunenin yük-sehim eğrisi meydana getirildiğinde, oluşturulan eğri altındaki alan enerji yutma kapasitesini (kırılma tokluğunu) vermektedir. Yük-Sehim eğrisinin altındaki alan excel programı yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca bu alan kullanılarak, kırılma gerçekleşme anına kadar harcanan enerji bulunabilmektedir. Birim alanda çatlak meydana gelmesi için ihtiyaç olan enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı koyma direncini gösterir. Şekil değiştirme özelliği sünek malzemelerde yüksek olduğu için, kırılma anında malzeme büyük sehim değerlerine çıkmakta ve harcanan enerji buna paralel olarak artmaktadır. Burada, numunelerin yük sehim eğrilerinden kırılma enerjileri hesaplanabilmektedir. Şekil değiştirme özelliği gevrek malzemelerde düşük olduğu için bu tür malzemelerin enerji yutma kapasitesi düşüktür. RPC'lerde kullanılan çelik

lifler betona yüksek süneklik özelliği kazandırır. Numunelerde lifler kullanılmasından dolayı yavaş şekilde kırılma meydana gelmekte ve sehim artış göstermektedir. Bu durumda, numunelerin enerji yutma kapasiteleri geleneksel betona göre daha yüksek çıkmaktadır [63]. Şekil 4.44'te örnek bir yük-sehim eğrisi ve denklem 4.8'te kırılma enerjisinin (G_f) hesaplanma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.44 : Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu [60].

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A} \quad (4.8)$$

Burada;

G_f = Kırılma enerjisi (N/m)

W_0 = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan-tokluk (Nm)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9,81 m/sn²)

δ_0 = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A = Etkin kesit alanı (m²) 'yi göstermektedir.

Kirişin göçme deformasyonu her kiriş için farklılık göstereceği için ve bu son deformasyonun ani olarak kirişin parçalanması durumunda ölçülmesinin zor olduğu bilinmektedir. Yerli ve yabancı standartlarında iki mesnet arasındaki açıklığın 150 sabit sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir ve standarda göre üretilen numunelerde 3 mm'ye tekabül etmektedir [52-60]. Numunelerin normal standartlara göre daha küçük boyutta olmasına rağmen sünekliği normal betonlara göre fazla

olmaktadır. Bu nedenle son deformasyon değeri olarak 10 mm kabul edilmiş ve yük sehim eğrisinin bu sehime kadar olan kısmı dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Japon standardı olan JSCE SF-4'e göre, tokluk değerlendirmesi kiriş açıklığının 1/150 değerindeki sehime kadar olan kısım dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Daha sonra bağıntı 3.15 ile tokluğa bağlı eşdeğer eğilme dayanımı hesaplanmaktadır [61].

$$\sigma_e = \frac{W_0 l}{\delta b h^2} \quad (4.9)$$

Burada;

$\sigma_{eş}$ = Tokluğa bağlı eşdeğer eğilme dayanımı (MPa),

W_0 = Yük - Sehim eğrisinin altında kalan alan (Nmm),

l = Kiriş açıklığı (mm),

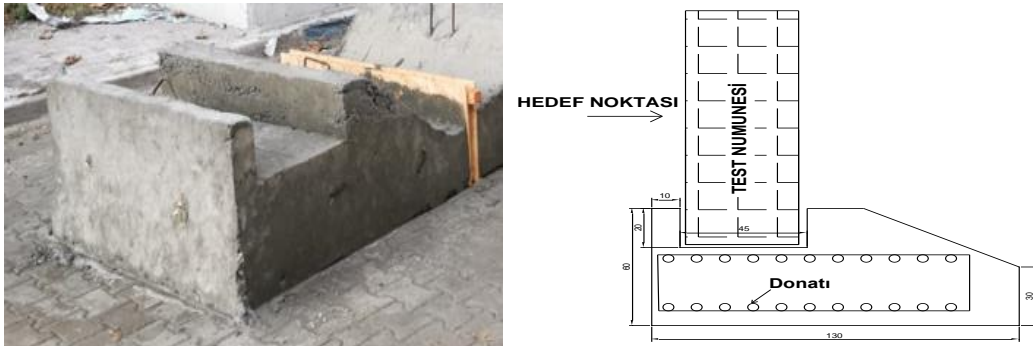
b = Kiriş genişliği (mm),

h = Kiriş yüksekliği (mm),

δ = Kiriş açıklığının 1/150 değerindeki sehime olarak ifade edilmektedir. Eğilme deney sonuçları bu standarda göre de değerlendirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.2.12. Balistik testlerin yapılması

Balistik deney numunelerinin yerden yükseltilmesi atış sırasında tank tarafından numunenin kolay hedeflenmesi ve numunelerin konumlandırılması için test platformu yapılmıştır (Şekil 3.45.)



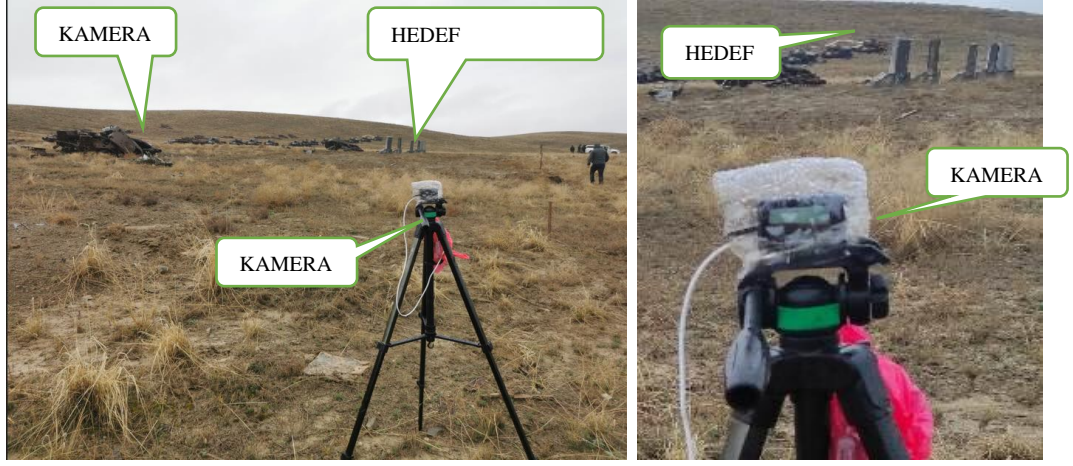
Şekil 3.45 : Numunelerin konumlandırılması için hazırlanan alt betonarme platform.

Platformlar 130 cm uzunluğunda 120 cm genişliğinde ve 40 cm yüksekliğindedir. Platformların beton sınıfı C25 ve donatıları Ø14 çapında Şekil w de gösterildiği gibi

alt ve üst donatı kullanılmıştır. Numuneler tankın olduğu yerden 1400 m ileriye ve tanka dönük olarak yan yana yaklaşık olarak aralarında 4 m mesafe olacak ve birbirlerinden etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.46.). Atış sırasındaki tank mermisinin ve numunelerin atış anındaki durumlarını gözlemlemek için 3 adet kamera Şekil 3.47. deki gibi konumlandırılmıştır. Bu kameralar yüksek çözünürlükte çekim yapma kapasitesine sahip aksiyon kameraları kullanılmıştır. Bu kameralardan elde edilen görüntüler ile mermi hızları tespit edilmeye çalışılmıştır. Test sonrası numunelerin almış olduğu hasar durumları detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.46 : Atış öncesi numunelerin test alandaki mevcut durumları.



Şekil 3.47 : Kameraların atış alanındaki konumları.

Tasarlanan numunelerinin askeri yapılara etkimesi düşünülen ve yaygın olarak kullanılan ve ayrıca savaş uçağı mühimmatına da benzeyen 120 mm'lik zırh delici sabot tank mermisi atışı yapılmıştır Şekil 3.48. Sabot mermilerinin numuneye etkileyen çekirdek kısmı 35 mm kalibreli ve 52 cm uzunluğundadır. Çekirdeğin üst kısmı sabot olarak geçmekte ve ateşlendikten sonra yaklaşık 60 m içerisinde çekirdek kısımdan ayrılmaktadır. Çekirdek kısım tungsten metalinden oluşmaktadır. Merminin namludan yivsiz olarak çıkış hızı 1750 m/sn olmakla birlikte yaklaşık 2 km mesafede hızında büyük bir değişim olmamaktadır. Sabot mermisi ve tanka ait temsili görüntü Şekil 3.48. verilmiştir. Askeri gizlilik nedeniyle askeri alan ve atış yapacak araçlar hakkında bilgi verilememektedir. Askeri makamlar tarafından atış sırasında sadece numunenin olduğu bölgenin kamera ile kayıt altına alınmasına izin verilmektedir. Deneysel numuneleri numunelerin orta noktasına nişan alınarak yapılmaktadır.



Şekil 3.48 : Temsili tank ve Sabot mermisi.

BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

FeCr atıklarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini karşılaştırmak amacıyla ilk olarak daha önceki çalışmalardan yararlanılarak referans numune üretimi gerçekleştirilmiştir [11, 24-26]. Referans numunede atık olmayan kuvars agregası kullanılmıştır. Daha sonraki numunelerde atık agregalar kullanılarak referans numune ile karşılaştırılmıştır. Atık agregaların oranları yukarıda bölüm 3'te bulunan Tablo 3.9'da verilmiştir. Bu karışımlara bağlı olarak RPC karışımları hazırlanmış ve Tablo 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Tablodaki kodlar atık agregalar bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Kodlar kısaca tekrar özetlenmiştir. Atık agregalar, 0-500 μ boyutunda olanlar, Serpantin "S" ve Olivin "O" agregalarıdır. 0-300 μ aralığında olan baca külü "U", %10 krom içerikli ve 0-3 cm boyutlarında olan pota altı "C", son atık olarak bilinen 0-2 cm boyutunda ferrokrom cürufu "F" olarak ifade edilmiştir. Basınç dayanım test düzeneği ve kırılmış numunelere ait resimler Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Basınç dayanım test düzeneği ve referans kırılmış numune resmi.

Tablo 4.1: İkili Karışım Oranları ve Basınç Dayanım Sonuçları

Kod Malzeme (kg)	Ref.	CF	OF	SF	OC	SC
Çimento	900	900	900	900	900	900
Silis Dumanı	270	270	270	270	270	270
K. Pudrası	360	-	-	-	-	-
K. Kumu	516	-	-	-	-	-
Serpentin	-	-	-	105	-	105
Olivin	-	-	320	-	213	-
Pota Altı	-	524	-	-	853	944
Ferrokrom cürufu	-	524	746	944	-	-
Su	225	216	216	216	216	216
Kimyasal Katkı	27	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
Basınç Dayanımı (MPa)	115	124	133	109	130	121

Tablo 4.2: Üçlü Karışım Oranları ve Basınç Dayanım Sonuçları

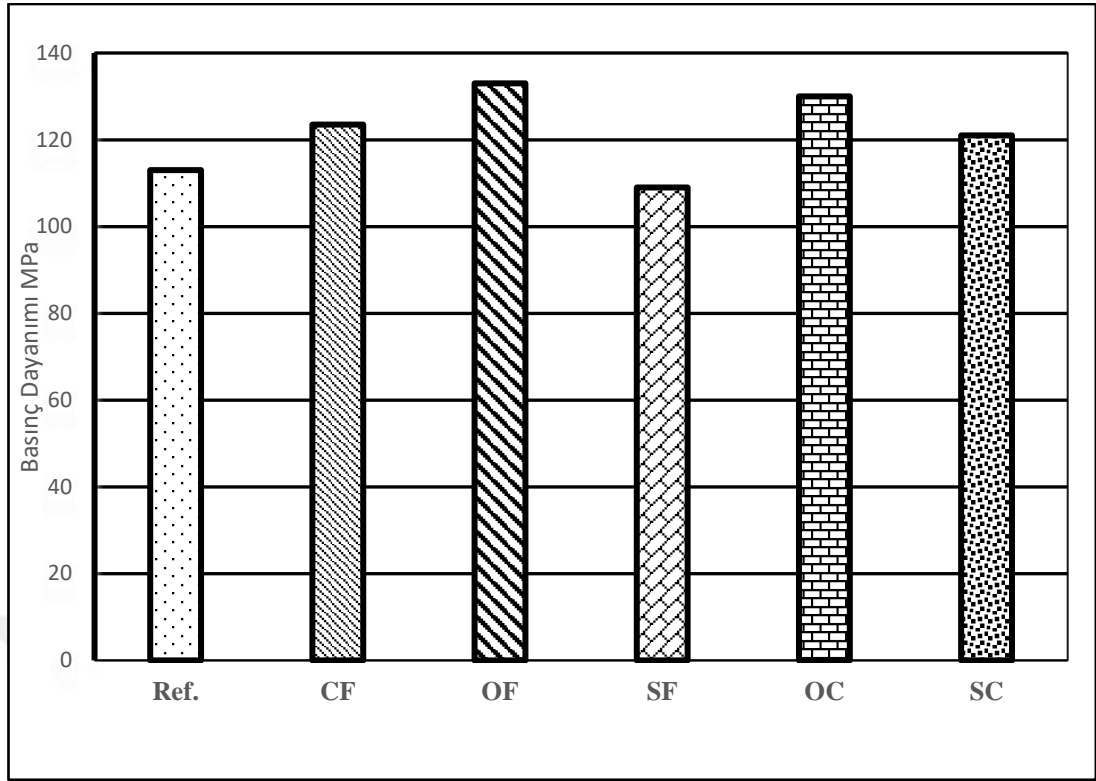
Seri No	Karışım Malzemeleri	Karışım Oranları	Ort. Dayanım. (MPa.)
-	Ref.		115,00
1	FCO	(%50 +%40+%10)	121.00
2	FCS	(%50 +%40+%10)	116.00
3	FOS	(%80 +%10+%10)	108.00
4	COS	(%80 +%10+%10)	111.00

Yapılan deney sonucunda atık malzemelerden yapılan numunelerin referans numunesine göre genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Basınç dayanımı

sonuçları değerlendirildiğinde, referans beton sonucuna göre kıyaslandığımızda en yüksek değer OF ve OC olduğu görülmektedir. Bu değerler referans numuneye göre sırasıyla %15 ve %11 daha fazladır. Elde edilen bu değerlerin kombinasyonları incelendiğinde olivin cürufunun ortak cüruf, değişken cürufların ise ferrokrom cürufu ve pota altı cürufları olduğu görülmektedir. Bu durumda en uygun karışım oranı belirlenirken dayanım yanında maliyetin de göz önüne alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Pota altı agrega boyutunu 0-500 μ boyuta getirmek için değirmende öğütme işlemi yapılması gerekmektedir. Ancak, içeriğinde %10 krom olması nedeniyle öğütme işlemi diğerlerinden çok daha zordur. Bu durum, hem maliyet hem de öğütme işlemi göz önüne alındığında ekonomik değildir. Tablo 4.1. incelendiğinde, elde edilebilirlik ve ekonomik açıdan en iyi agrega karışımının ferrokrom cürufu (F) %70 ve Olivin (O) %30 olduğu görülmektedir. Burada en yakın sonuç Potaaltı + Olivin karışımı 130 MPa olmasına karşın bu karışımda malzeme öğütülmesi ve Pota altının içinde %10 krom bulunması nedeniyle elde edilebilirlik ve ekonomiklik açısından uygun değildir. Sonuç olarak, en uygun agregaların, ferrokrom cürufu (F) ve Olivin (O) olduğu görülmektedir. Bu durumda agrega olarak kuvars kumu ve pudrası yerine %30 Olivin ve %70 ferrokrom cürufu kullanımına karar verilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında RPC'deki optimum lif oranının % 4 olduğu ve bu orandan daha fazla lif katıldığında işlenebilirlik ve yerleştirilme problemleri ortaya çıktığı bilinmektedir [6, 8, 11]. Bu nedenle endüstriyel ve atık liflerin etkisini araştırmak için hacimce %1, %2, %3 ve %4 oranlarında liflerin karışıma eklenmesine karar verilmiştir. Karışım oranları ve basınç dayanım sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Numunelerin tanımlanmasında kısaltılma yapılmıştır. Yeşil reaktif pudra betonunun "GRPC" olarak kısaltılmıştır. GRPC'den sonra gelen rakam hacimce lif yüzdesini, harf ise Endüstriyel (E) veya ÖTL (A) lifini ifade etmektedir. Örneğin GRPC-1E, atık malzemeden elde edilen matrise hacimce %1 endüstriyel lif katkılı olduğunu ifade etmektedir. GRPC-1A ise atık malzemeden elde edilen matrise hacimce %1 atık ÖTL lif katkılı olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.2 : Farklı agrega karışım oranlarına sahip numunelerin basınç dayanım grafiği

Referans betonu ile atık ve endüstriyel betonlar karşılaştırma tablosu aşağıda verilmektedir. (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: RPC ile GRPC'nin karışım oranları ve basınç dayanımı değerleri

Numune Türü	Çimento (kg)	Silis Dumunu (kg)	Kuvars Pudrası (kg)	Kuvars Kum	Oliven (kg)	Ferrokrom Cürufu (kg)	Su (kg)	K. Katkı (kg)	Toplam Ağırlık (kg)	Basınç dayanımı (MPa)
RPC	900	270	360	516	-	-	216	31,5	2293,5	115
GRPC	900	270	-	-	320	746	216	31,5	2596,5	113



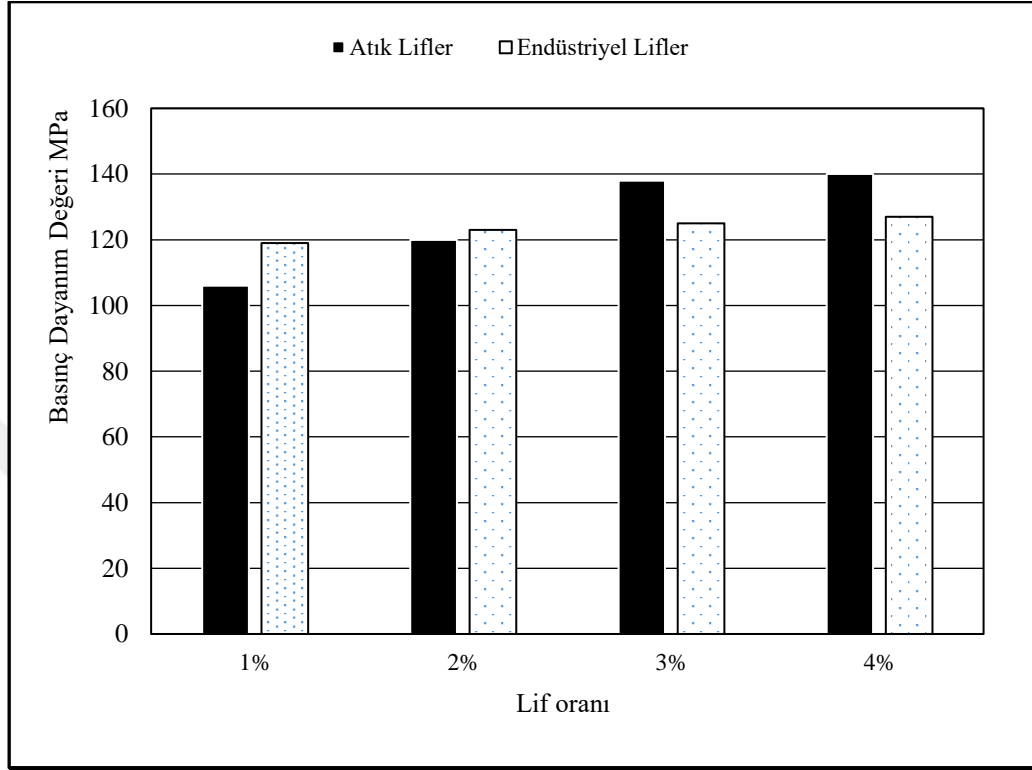
Şekil 4.3. Endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin basınç dayanım test sonrası görünümü.

Tablo 4.4: Endüstriyel ve ÖTL lif katkılı GRPC'nin karışım oranları ve basınç dayanımı.

Numune Türü	Çimento (kg)	Silis Dumanı (kg)	Olivin (%30)	FeCr Cürufu (%70)	Su (kg)	Kimyasal Katkı (kg)	ÖTL Lif (kg)	End. Lif		Basınç Dayanımı (MPa)
								(kg)	Toplam (kg)	
GRPC	900	270	320	746	216	31,50	-		2596,50	113
GRPC -1E	891	267,30	316,80	738,54	213,84	31,19		78	2642,67	119
GRPC -2E	882	264,60	310,46	723,77	209,56	30,87		156	2697,27	123
GRPC -3E	873	261,90	301,15	702,06	203,28	30,56		234	2743,95	125
GRPC -4E	864	259,20	289,10	673,97	195,15	30,26		312	2763,68	127
GRPC-1A	891	267,30	316,80	738,54	213,84	31,19	78		2642,67	106
GRPC-2A	882	264,60	310,46	723,77	209,56	30,87	156		2697,27	120
GRPC-3A	873	261,90	301,15	702,06	203,28	30,56	234		2743,95	138
GRPC-4A	864	259,20	289,10	673,97	195,15	30,26	312		2763,68	140

Lif takviyeli numunelerin basınç dayanımları grafiğine incelendiğinde (Şekil 4.4) endüstriyel lifli numunelerin %1'lik ilavesiyle 119 MPa elde edilirken %4'lük bir lif eklenmesi ile bu değer 127 MPa çıktığı ve %6,7'lik bir artış gözlenmiştir. Aynı matrise sahip numuneye ÖTL lifi eklenmesi ile birlikte, %1'lik lif ilavesi ile 106 MPa olmuştur. %4'lük ÖTL lifi eklenmesi ile bu değer 140 MPa olmuştur.

Bu durumda %4 lif yaklaşık %32'lik bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda ÖTL liflerinin lif olarak endüstriyel liflerin yerine kullanılabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4 : Lif oranı, basınç dayanımı değişim grafiği.

Basınç dayanımı numunelerinin deney sonrası kırılma yüzeyleri incelendiğinde, lifsiz numune kesitinde hava boşluklarının homojen olarak kesitin her yerine dağıldığı görülmektedir. Endüstriyel ve ÖTL lifli (%4) numune kesitinde hava boşlukları ve liflerin homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.5. Eğilme dayanım deneyi sonucu kırılmış Referans (lifsiz) ve lifli kesilmiş numune kesit.

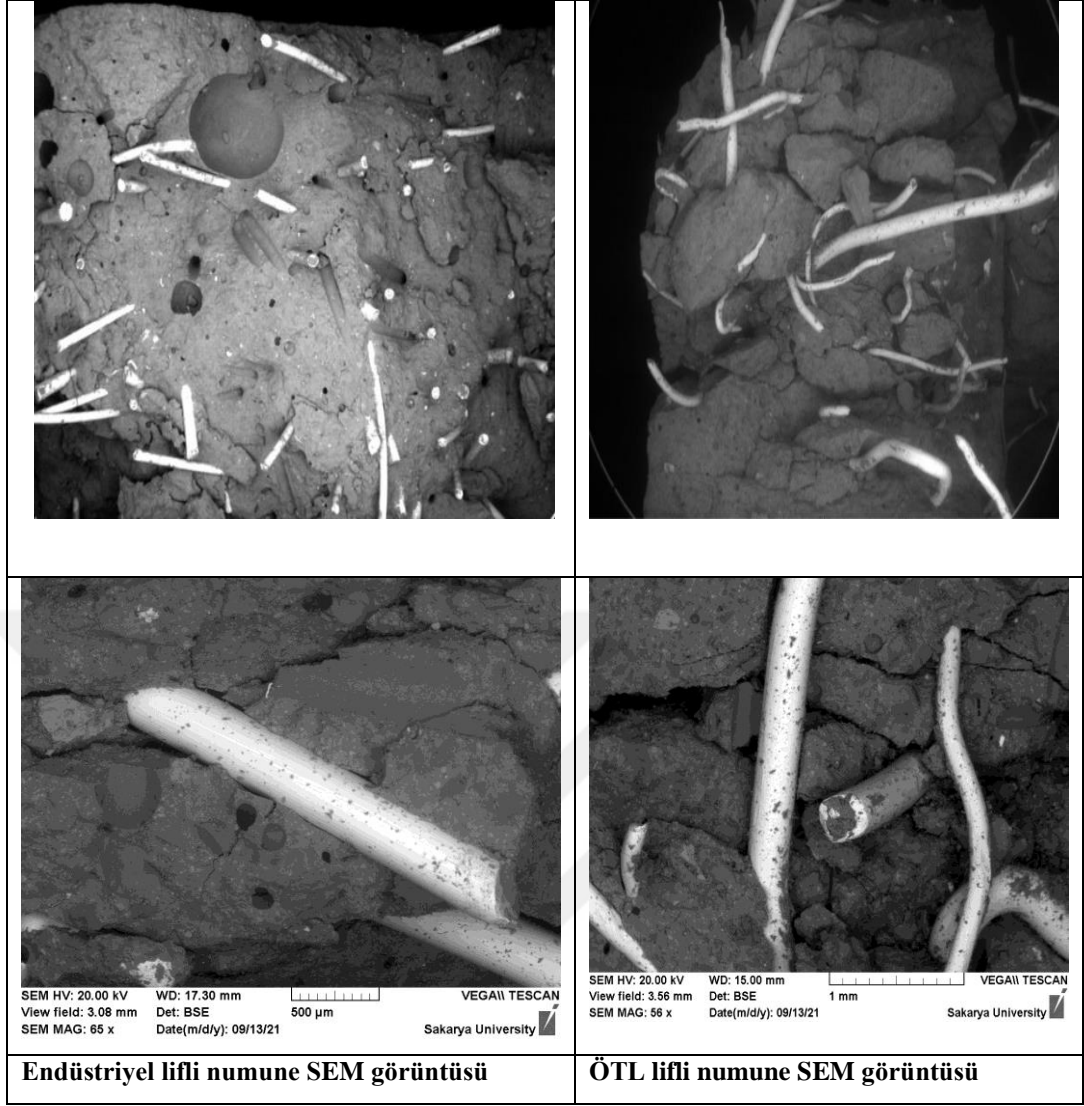
4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyinde liflerin sıyrılarak beton içerisinden çıktığı görülmektedir. Bu durum eğilme numunelerinin bütün mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Betonun lif ile aderansının artırılması, betonun boşluk yapısının en aza indirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu boşluk yapısını en aza indirmek için betonun yerleştirilmesi sırasındaki işlemler çok önemlidir. RPC akıcı bir kıvamda olduğu için kalıba kendiliğinden yerleşebilmektedir. Fakat bu durumun, yerleştirme problemlerini ortadan kaldırdığı düşünülse de boşluksuz bir yapı elde etmek için yeterli olmadığı görülmektedir (Şekil 4.6).

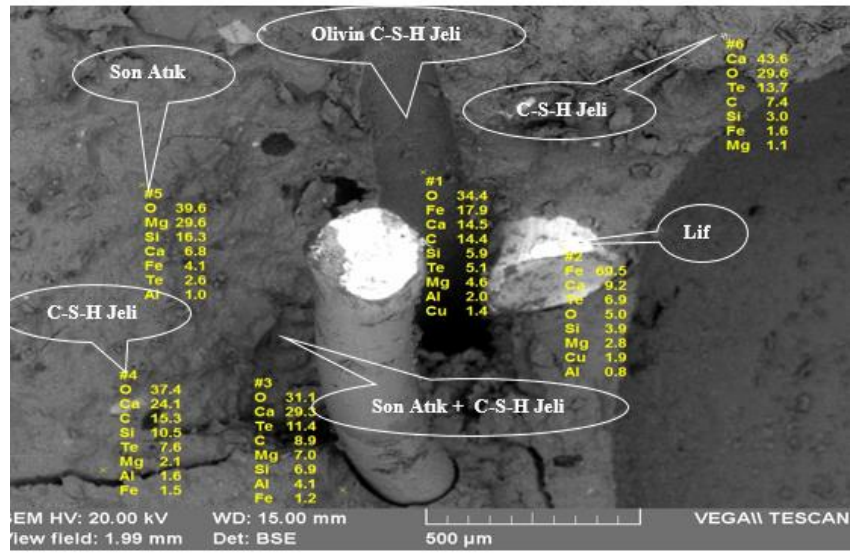


Şekil 4.6. ÖTL Lifli ve Endüstriyel Numunenin Eğilme Kesit.

Yapılan eğilme deneyinde lif dağılımlarının homojen olduğu ve liflerin sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Eğilme değerlerinde kırılma noktası maksimum momentin olduğu noktada başlamış ve kırılma orta noktasına yakın olmuştur. Endüstriyel ve ÖTL liflerinin çekme mukavemeti (~ 2000 MPa) çok yüksek olması nedeniyle her iki lif türünde de deney süresince kopması mümkün olmamıştır. İy yapısı incelendiğinde (Şekil 4.7), ÖTL lifinin boyuna doğrultuda karmaşık geometrik yapısı nedeniyle pastadan sıyrılması endüstriyel life göre daha zor olmuştur. Lif boylarının kısa olması çatlakların tüm kirişe yayılmamasına neden olduğu düşünülmektedir. Pasta ile lif ara yüzü iy yapısı incelendiğinde (Şekil 4.8), beklenen C-S-H jellerinin olduğu ve çimento pastası içerisinde mikro boyutta olivin ve FeCr cürufunun homojen dağıldığı ve boşlukları doldurduğu söylenebilir.



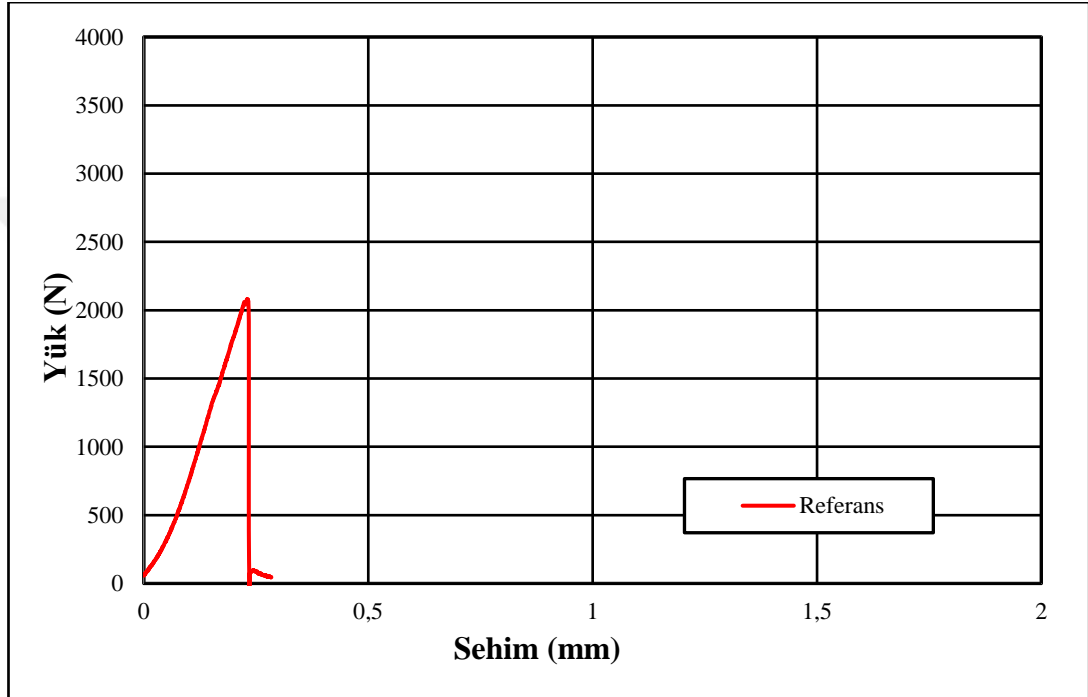
Şekil 4.7. Lif içerikli GRPC'ye ait SEM görüntü



Şekil 4.8. Lifli Numunenin SEM görüntüsü.

4.2.1. Lifsiz numunenin değerlendirilmesi

Lifsiz olarak üretilen Referans numunenin yük-sehim grafiği incelendiğinde (Şekil 4.9), maksimum kırılma yükü 2083 N, maksimum deformasyonu 0,24 mm olduğu görülmektedir. Referans numunelerde, normal betonlarda olduğu gibi, çatlak oluşumu ile kırılma ani olmaktadır. Bu da, kırılma tokluğu değerini dikkate alarak eğilme dayanımı hesaplayan Japon standardına göre dayanım değerinin çok düşük çıkmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.9. Referans numunenin yük-sehim grafiği

Referans numunenin ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımı 6,50 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 0,56 MPa olarak hesaplanmıştır. Normal betonların eğilme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık 1/10'nu kadardır. Bu durum, RPC içinde benzerlik göstermektedir. Kırılma tokluğu 0,47 Nm ve kırılma enerjisi 189,00 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Çatlak oluşumu ile kırılmanın aynı anda olması nedeniyle ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri birbirine eşittir. Numunenin çatlaktan sonraki dayanımını değerlendirmede kullanılan indeksler, çatlaktan sonra numunenin aynı anda kırılmasından dolayı bir (1) değerini almıştır. Buna bağlı olarak da kalıcı dayanım faktörleri de sıfır değerini almıştır.

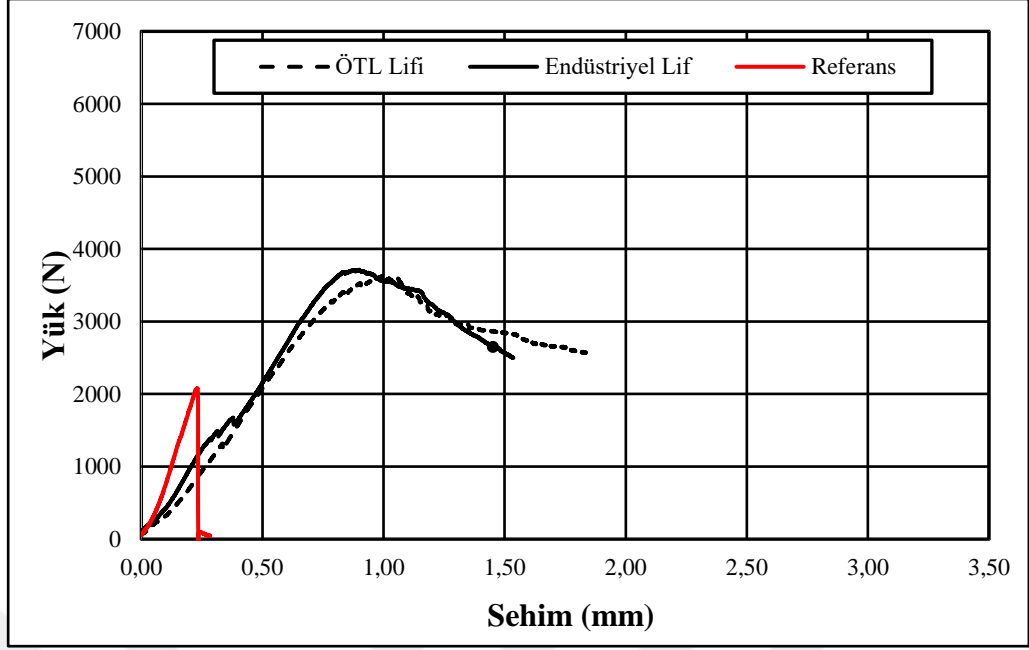
4.2.2.%1 Lifli numunenin değerlendirilmesi

Lif içeriği %1 olan RPC'nin endüstriyelde lifli numunesinde ilk çatlak yükü 2938 N, atlağın oluştuğu sehim 0,65 mm'dir. Maksimum yük 3750 N ve maksimum sehim miktarı 0,87 mm'dir. Referans numuneye göre maksimum yük değerinde yaklaşık %80'lük bir artış olurken kırılma ani olmamış ve çatlak sehim değeri referans numuneye göre 2,6 kat artış göstermiştir.

Endüstriyel lifli numunenin ilk çatlak dayanımı 7,8 MPa, eğilme dayanımı 9,17 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 4,58 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 3,86 Nm ve kırılma enerjisi 1538 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %20, eğilme dayanımı %41 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 8 kat arttırmıştır. Eşdeğer eğilme dayanımının, Referans numuneye göre çok fazla artmasının nedeni, dayanım hesaplamasında Japon standardının kırılma tokluğu değerini de dikkate almasıdır. Lifli numunede, yük sehim eğrisinin tepe yükünü aşmasından sonra da yük taşımaya devam etmekte ve çatlak ağzı açılarak kırılma gerçekleşmektedir. Referans numunede ise çatlağın başladığı yük ile kırılma yükü aynıdır. Bu nedenle eğri altında kalan alan, lifli numuneye göre oldukça küçük değer almaktadır.

ÖTL lifli numunenin ilk çatlak dayanımı 10,48 MPa, eğilme dayanımı 11,31 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 5,02 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 3,7 Nm ve kırılma enerjisi 3279 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %61, eğilme dayanımı %74 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 9 kat arttırmıştır. Bu durumda; %1 lif katkılı endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla %41 ve %74 eğilme dayanımının arttığı görölmüştür (şekil 4.10).

Kırılma tokluğu açısından değerlendirildiğinde her iki lif türünde de yaklaşık olarak 8 kat artış gözlemlenmiştir. Ayrıca ÖTL lifinin endüstriyel lif yerine ikamesi düşünüldüğünde; ilk çatlak dayanımında %34, eğilme dayanımında %23, kırılma enerjisinin 2 kat ve eşdeğer eğilme dayanımının yaklaşık %10 oranında artış olduğu sadece kırılma tokluğunun yaklaşık olarak yakın çıktığı görölmektedir.



Şekil 4.10. Referans ve %1 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği.

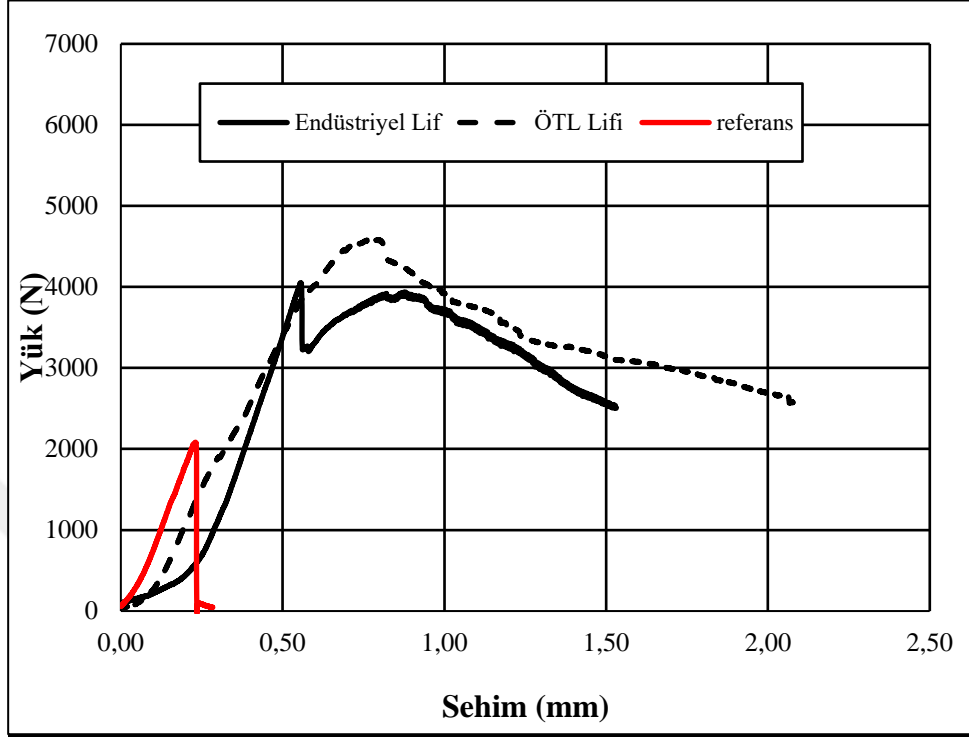
4.2.3. %2 Lifli numunenin değerlendirilmesi

Lif içeriği %2 olan RPC'nin endüstriyel içerikli lifli numunesinde ilk çatlak yükü 4055 N, çatlağın oluştuğu sehim 1,53 mm'dir. Maksimum yük 4051 N ve maksimum sehim miktarı 1,53 mm'dir. Referans numuneye göre maksimum yük değerinde yaklaşık %50'lük bir artış olurken kırılma ani olmamış ve çatlak sehim değeri referans numuneye göre %110 artış göstermiştir (Şekil 4.10).

Numunenin ilk çatlak dayanımı 8,7 MPa, eğilme dayanımı 11,59 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 4,87 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 4,02 Nm ve kırılma enerjisi 1432 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %34, eğilme dayanımı %78 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 8,5 kat arttırmıştır. ÖTL lifli numunenin ilk çatlak dayanımı 13,87 MPa, eğilme dayanımı 14,30 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 6,32 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 4,66 Nm ve kırılma enerjisi 4387 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %113, eğilme dayanımı %120 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 11 kat arttırmıştır (Şekil 4.11).

Bu durumda; %2 lif katkılı endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla %78 ve %120 eğilme dayanımının arttığı

görülmüştür. Ayrıca ÖTL lifilin endüstriyel lif yerine ikame edilmesi, eğilme dayanımı açısından %62'lük bir artış sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.11. Referans ve %2 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği

4.2.4. %3 Lifli numunenin değerlendirilmesi

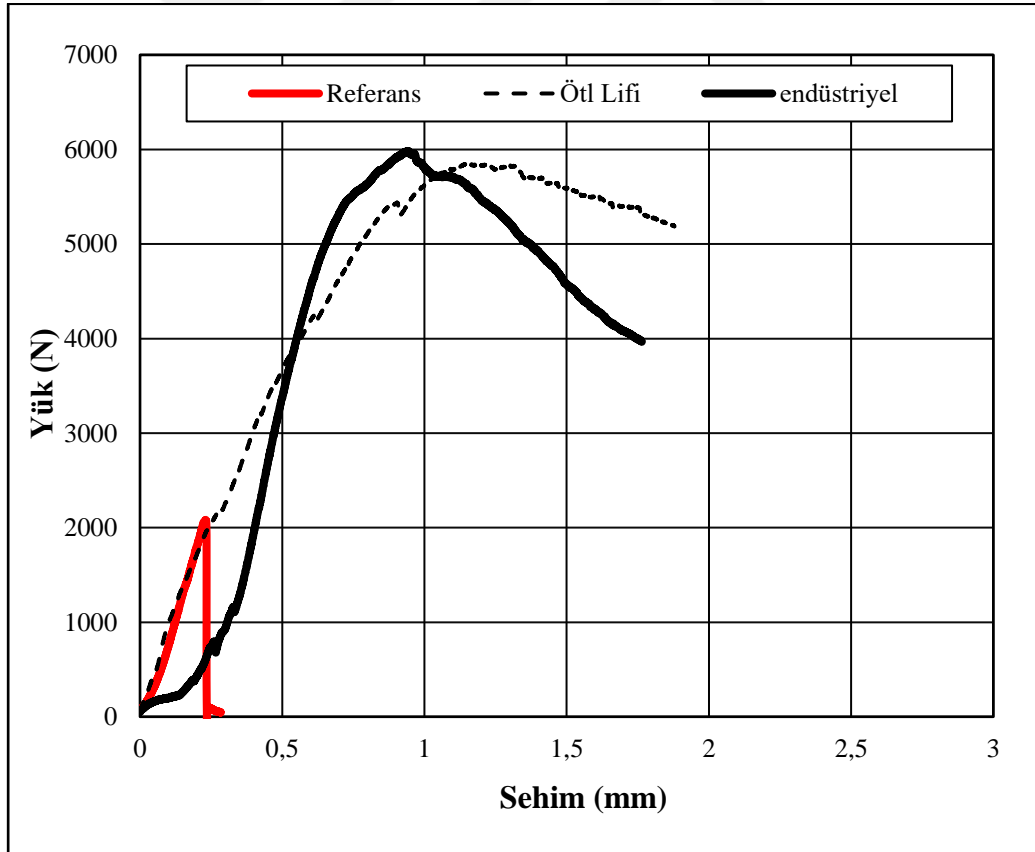
Lif içeriği %3 olan RPC'nin endüstriyelde lifli numunesinde ilk çatlak yükü 4350 N, çatlakın oluştuğu 0,6 mm'dir. Maksimum yük 4488 N ve maksimum sehim miktarı 0,8 mm'dir. Referans numuneye göre maksimum yük değerinde yaklaşık %46'lük bir artış olurken kırılma ani olmamış ve çatlak sehim değeri referans numuneye göre 3,5 kat artış göstermiştir (Şekil 4.12).

Numunenin ilk çatlak dayanımı 13,59 MPa, eğilme dayanımı 14 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 6,15 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 5,13 Nm ve kırılma enerjisi 2063 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %110, eğilme dayanımı %115 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 11 kat arttırmıştır.

ÖTL liflerinin katıldığı numune değerlerine bakıldığında; Lif içeriği %3 olan RPC'nin ÖTL lifli numunesinde ilk çatlak dayanımı 18,25 MPa, eğilme dayanımı 18,25 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 10,15 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma

tokluğu 7,71 Nm ve kırılma enerjisi 5918 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %180, eğilme dayanımı %180 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 18 kat arttırmıştır. Bu durumda; %3 lif katkılı endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla %115 ve %180 eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca ÖTL lifin endüstriyel lif yerine ikame edilmesi eğilme dayanımı açısından %57'lik bir artış sağladığı görülmektedir.

Tabloda atık liflerle endüstriyel liflerin aynı oranda karışım sağlanan bir numunenin eğilme davranışı görülmektedir. Burada endüstriyel lifli numunenin atık lifli numuneye göre yaklaşık 1500 N daha düşük olduğu görülmektedir. Bu farkın matrise katılan atık liflerin mekanik elde edilmişinden dolayı nervürlü bir donatı gibi davrandığı şekil olarak kıvrımlarının olması matristen sıyrılmamasının daha güç olmasını sağlamaktadır. Bu durum numunenin hem kırılma enerjisinin artmasına hem de enerji yutma kapasitesinin yüksek olmasına olanak sağlamıştır.



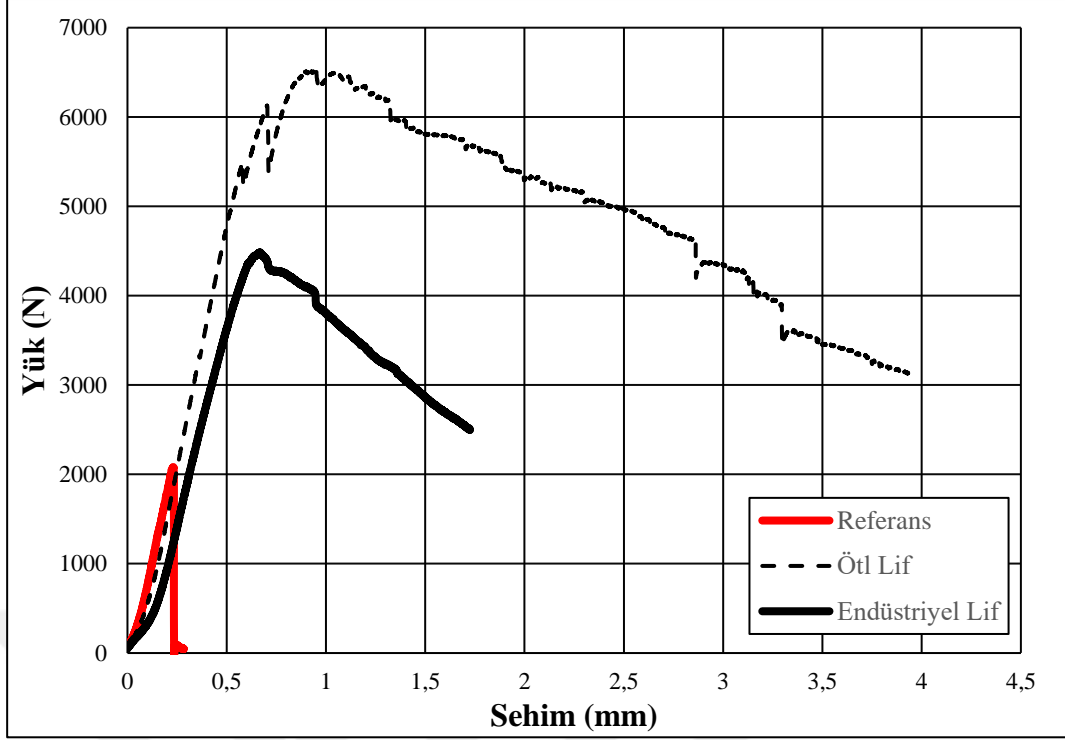
Şekil 4.12. Referans ve %3 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği.

4.2.5. %4 Lifli numunenin değerlendirilmesi

Lif içeriği %4 olan RPC'nin endüstriyelde lifli numunesinde ilk çatlak yükü 5884 N, atlağın oluştuğu sehim 0,75 mm'dir. Maksimum yük 6000 N ve maksimum sehim miktarı 0,95 mm'dir. Referans numuneye göre maksimum yük değerinde yaklaşık yaklaşık 3 kat artış olurken kırılma ani olmamış ve çatlak sehim değeri referansa göre 4,7 kat artış göstermiştir (şekil 4.13).

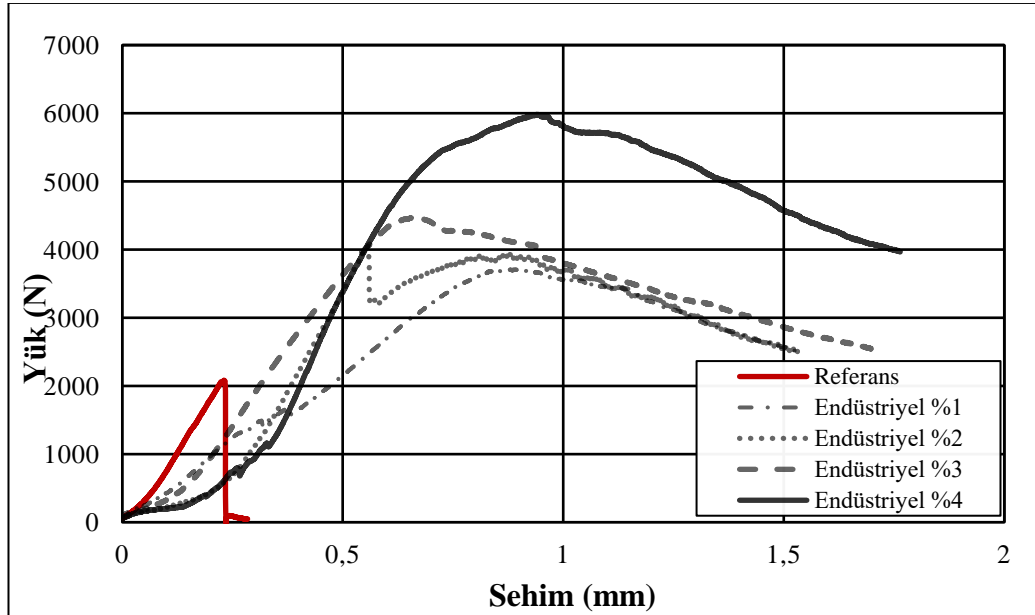
Endüstriyel lifli numunenin ilk çatlak dayanımı 17,13 MPa, eğilme dayanımı 18,36 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 8,1 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 6,9 Nm ve kırılma enerjisi 5138 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %160, eğilme dayanımı %180 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 14,5 kat arttırmıştır.

ÖTL lifli numunenin ilk çatlak dayanımı 18,78 MPa, eğilme dayanımı 20,38 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 9,03 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 8,43 Nm ve kırılma enerjisi 10241 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Referans numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %190, eğilme dayanımı %313 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 16 kat arttırmıştır. Bu durumda; %4 lif katkılı endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla %180 ve %313 eğilme dayanımının arttığı görölmüştür. Ayrıca ÖTL lifin, endüstriyel lif yerine ikame edilmesi eğilme dayanımı açısından %74'lük bir artış sağladığı görölmektedir.

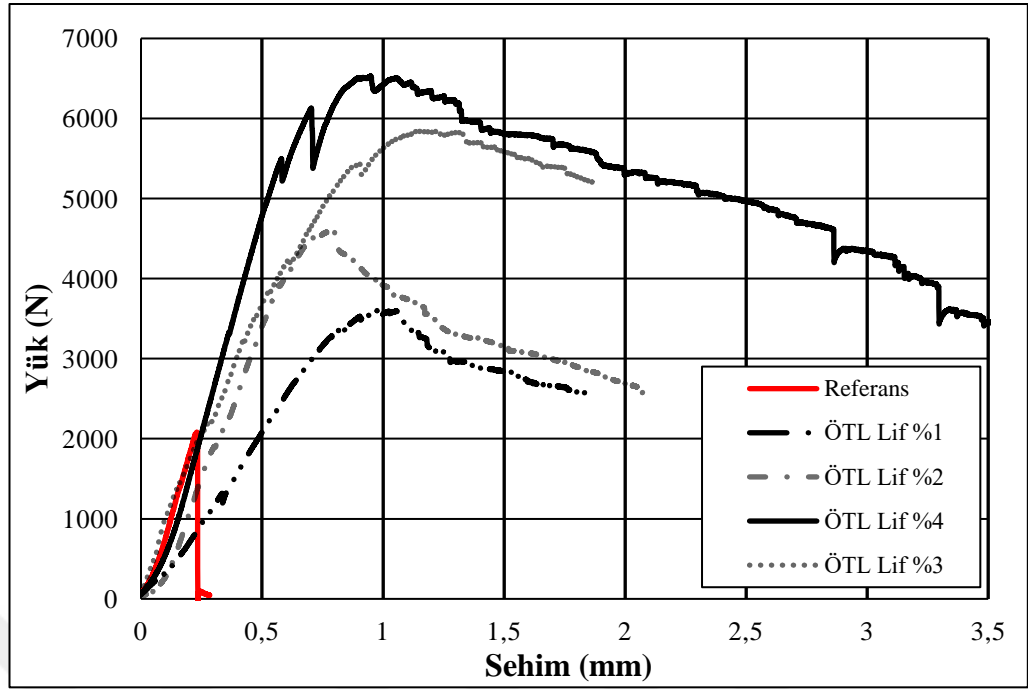


Şekil 4.13. Referans ve %4 Lif içerikli numunelerin yük-sehim grafiği

Eğilme deneyi grafikleri sonuçları toplu olarak Şekil 4.14-15 ve Tablo 4.5’de verilmiştir. Genel olarak lif oranı arttıkça eğilme dayanımı artmakta ve ÖTL lif katkılı RPC’de tokluk, endüstriyel lif katkılı RPC’ye göre en büyük kayda değer değişim %3 lif içeriğinde %23 oranında artmıştır.



Şekil 4.14. Endüstriyel lifli numuneler ile referans numuneye ait yük-sehim grafiği.



Şekil 4.15. ÖTL lifli numuneler ile referans numuneye ait yük-sehim grafiği

Tablo 4.5: ÖTL ve Endüstriyel lif katkılı GRPC'nin eğilme deney sonuçları

Numune Türü	İlk Çatlak Day. (MPa)	Eğilme Day. (MPa)	Kırılma Tokluğu (Nm)	Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)	Eşdeğer Eğilme Day. (MPa)
GRPC	6,5	6,5	0,47	189	0,56
GRPC -1E	4,63	9,17	3,86	1538	4,58
GRPC -2E	8,7	11,59	4,02	1432	4,87
GRPC -3E	13,59	14	5,13	2063	6,15
GRPC -4E	17,13	18,36	6,9	5138	8,10
GRPC-1A	10,48	11,31	3,7	3279	5,02
GRPC-2A	13,87	14,3	4,66	4387	6,32
GRPC-3A	18,25	18,25	7,71	5918	9,03
GRPC-4A	18,78	20,38	8,43	10241	10,15

4.3. Birim dayanım maliyeti

Birim dayanım maliyetleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir. 1 m³ lifsiz GRPC maliyeti RPC’nin ile karşılaştırıldığında %28 daha ekonomiktir. RPC basınç dayanım maliyeti açısından 11,026 Dolar/MPa iken GRPC’nin basınç dayanım maliyeti 7,104 Dolar/MPa bulunmuştur. Bu değerlere göre GRPC normal RPC’ye göre %41 daha ekonomiktir. GRPC matrisli %4 endüstriyel lifli numunenin maliyet değeri 1437,74 \$/m³ iken, %4 ÖTL lifli numunenin maliyet değeri 928,18 \$/m³ bulunmuştur. Bu değerlere göre GRPC matrisli %4 lifli numunenin endüstriyel lifli numuneye göre %35,5 daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Eğilme dayanımı birim maliyeti ise %42 daha ekonomiktir. Şekil 15’den de görüleceği üzere ÖTL lifli numunelerin Endüstriyel lifli numunelere göre maliyetinin azalan oran da olduğu görülmektedir (Tablo 4.6). Bu durum ÖTL liflerinin Endüstriyel liflerin yerine ikame edilmesinin hem dayanım açısından hem maliyet açısından daha uygun olacaktır. Sonuç olarak dayanım ve maliyet açısından incelendiğinde karışımlarda %4 ÖTL lifinin en uygun lif türü ve içeriği olduğu görülmektedir. Balistik çalışmalar için agregası ve lifi atık olan Tablo 4.7’den de görüleceği üzere GRPC-4A kodlu numune kullanılmıştır.

Tablo 4.6: RPC ve GRPC’nin birim maliyeti.

Lif İçeriği (%)	Birim Fiyat (kg/USD)										
	Çimento (kg)	Silisyum dumanı (kg)	Kuvars Pudrası (kg)	K Kum (kg)	FeCr (kg)	Olivin (kg)	Su (kg)	K. Katkı (kg)	Çelik Lif (kg)	ÖTL Lif (kg)	Toplam Maliyet (USD)
Ref.	90										
RPC	0	270	360	516	0	0	225	27	0	-	1108
GRPC	900	270	0	0	752	322	216	32	0	-	803
GRPC-1E	891	267	0	0	744	319	214	31	78	-	963

Tablo 4.6 (Devam) : RPC ve GRPC'nin birim maliyeti.

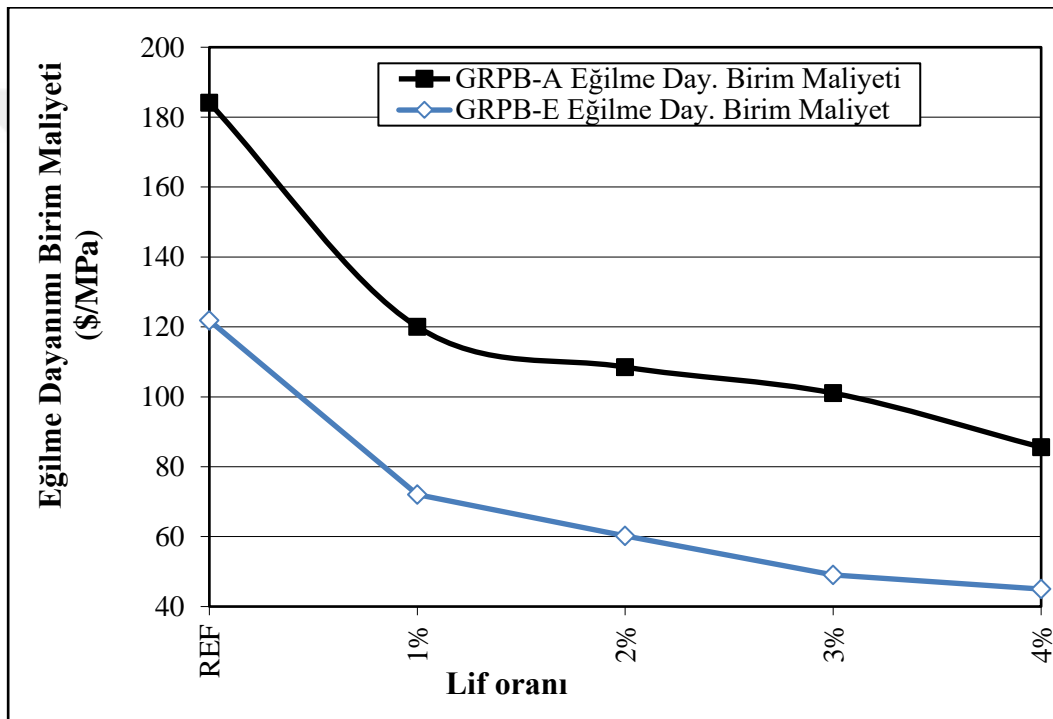
Lif İçeriği (%)	Çimento	Silis	dumanı	K. Pudrası	(kg)	K Kum	(kg)	FeCr (kg)	Olivin (kg)	Su (kg)	K. Katkı	(kg)	Çelik Lif	(kg)	ÖTL Lif	(kg)	Toplam	Maliyet	
	Birim Fiyat (kg/USD)																		
	0.648	0.475	0.329	0.419	0.007	0.044	0.001	2.274	2.154	0.499									
GRPC-2E	882	265	0	0	730	312	210	31	156	-	1122								
GRPC-3E	873	262	0	0	708	303	203	30	234	-	1280								
GRPC-4E	864	259	0	0	679	291	195	28	312	-	1438								
GRPC-1A	891	267	0	0	744	319	214	28	-	78	827								
GRPC-2A	882	265	0	0	730	312	210	34	-	156	873								
GRPC-3A	873	262	0	0	708	303	203	35	-	234	906								
GRPC-4A	864	259	0	0	679	291	195	32	-	312	928								

Tablo 4.7: GRPC'nin birim dayanım maliyeti.

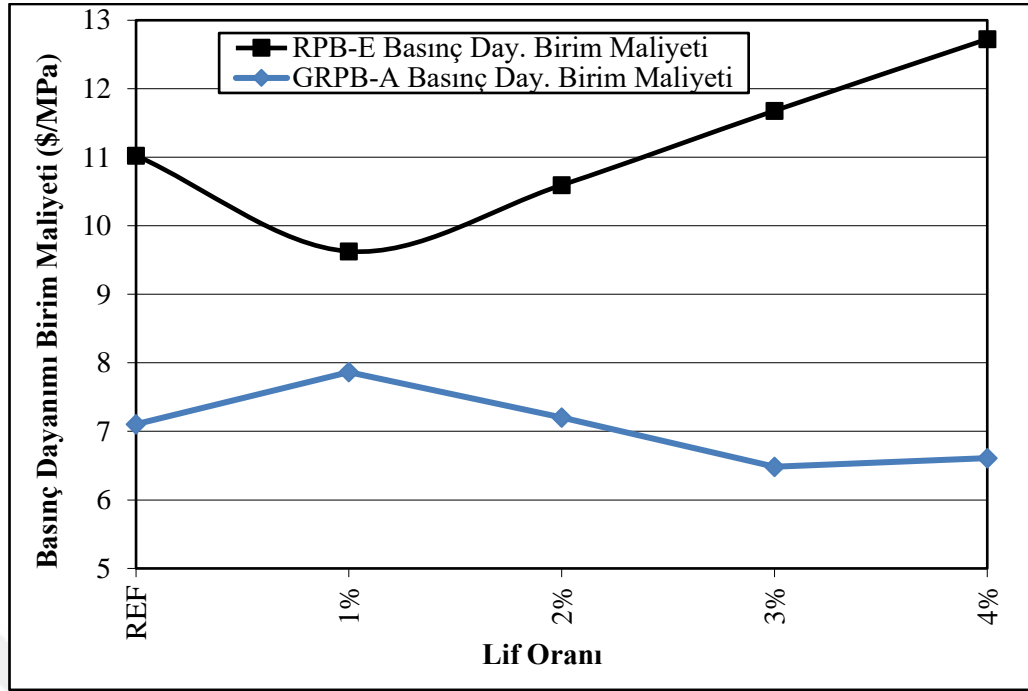
Türü	Basınç dayanımı	Eğilme dayanımı	Kırılma Enerjisi	Basınç dayanımı birim maliyet (Dolar/MPa)	Eğilme dayanım birim maliyet (Dolar/MPa)
Ref. RPC	115	6,6	0,233	11,026	192,126
GRPC	113	6,49	0,218	7.106	123.718
GRPC -1E	119	9,16	3,86	8.092	105.122
GRPC -2E	123	11,59	4,02	9.122	96.809
GRPC -3E	125	14	5,13	10.242	91.448
GRPC -4E	127	18,36	6,9	11.321	78.308

Tablo 4.7 (Devam): GRPC'nin birim dayanım maliyeti.

Türü	Basınç dayanımı	Eğilme dayanımı	Kırılma Enerjisi	Basınç dayanımı birim maliyet (Dolar/MPa)	Eğilme dayanım birim maliyet (Dolar/MPa)
GRPC-1A	106	11,31	3,67	7.801	73.117
GRPC-2A	120	14,29	4,66	7.271	61.057
GRPC-3A	138	18,24	7,71	6.562	49.646
GRPC-4A	140	20,38	8,43	6.630	45.544



Şekil 4.16. Lif oranı, eğilme dayanımı birim maliyeti değişim grafiği.



Şekil 4.17. Lif oranı basınç dayanım birim maliyet değişim grafiği.

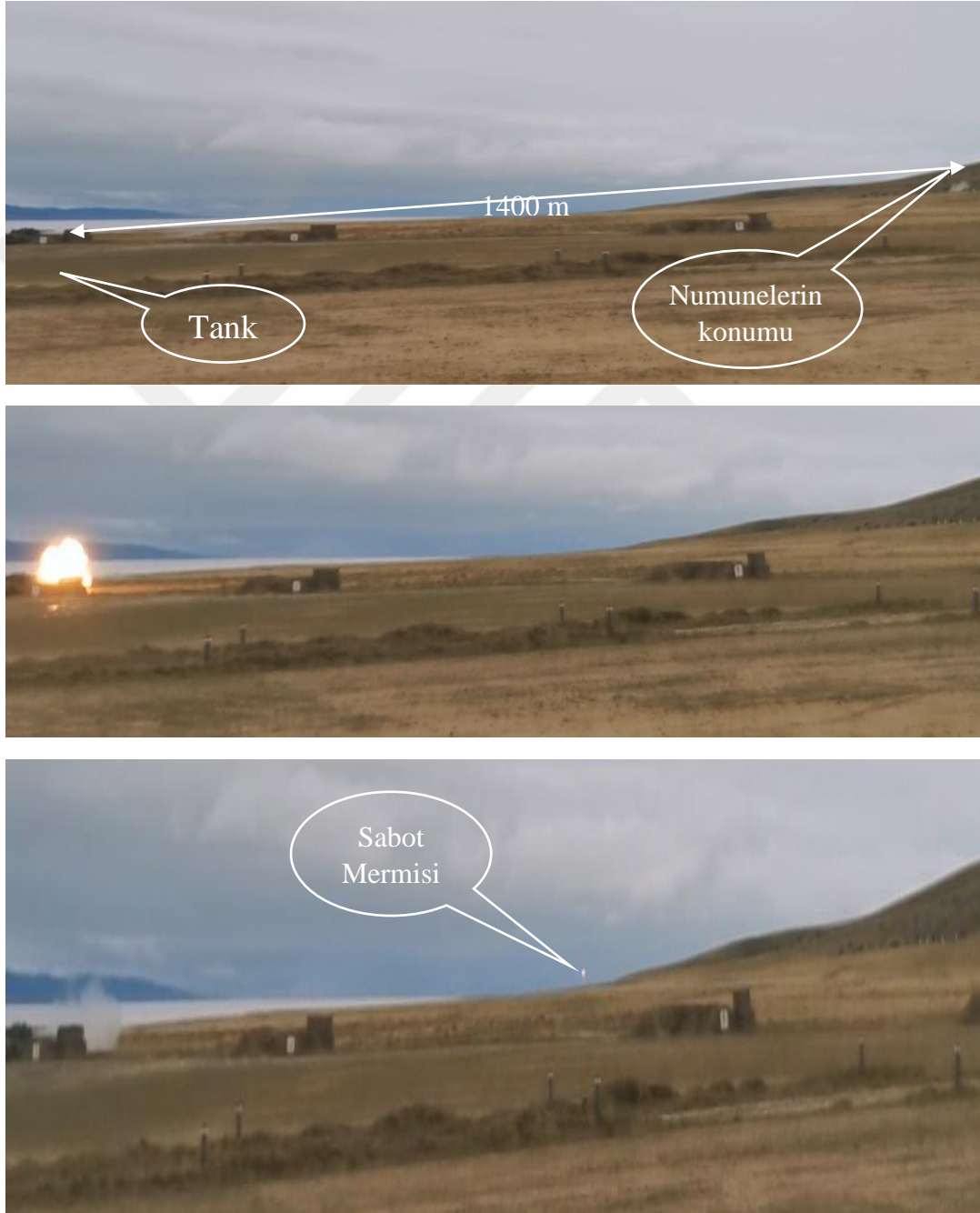
Karbon salınımı açısından çelik lifin kullanımı incelenmiştir. 1 ton çelik üretiminde 2,2 ton CO₂ salındığı bilinmektedir [69]. RPC’de %4 çelik lif hacminde 40 dm³ diğer bir deyişle 312 kg lif kullanılmaktadır. Bu lif miktarı için 0,69 ton CO₂ salınımı yapılmaktadır. Aynı oranda ÖTL lifi kullanarak bu CO₂ salınımının önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak dayanım ve maliyet açısından incelendiğinde karışımlarda %4 ÖTL lifinin en uygun lif türü ve içeriği olduğu görülmektedir. Balistik çalışmalar için agregası ve lifi atık olan GRPC-4A kodlu numune kullanılmıştır.

4.4. Balistik deney sonuçları

Askeri yapılar, genellikle bir savaş durumu sırasında hava saldırısının ilk hedefleri arasındadır. Hava saldırısında kullanılan zırh delici mühimmata en yakın kara mühimmatı tank tarafından atılabilen zırh delici sabot mermileridir. Bu nedenle balistik deneylerde tank tarafından atılan zırh delici sabot mermisi tercih edilmiştir (Şekil 3.48).

Numuneler 1400m mesafeden hedef alınmıştır (Şekil 4.18). Deneyde 20 adet 120’lik sabot mermisi kullanılmıştır. Numuneye yapılan atış sayısı merminin istenilen bölgeye isabet etmesine göre değişiklik göstermektedir. Genellikle her bir numuneye

2-4 adet mermi atışı yapılmıştır. Tüm atış işlemleri 1 saat içerisinde tamamlanmıştır. Atış sonrası her bir numune yakından detaylı incelenerek hasar alma durumları şekiller incelenerek aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Atış alanına yerleştirilen betonarme deney numunelerinin deney sonrası görünümü Şekil 4.19.'de verilmiştir. Deney sonucunda gözle yapılan incelemeler sonucunda tank tarafından ateşlenen delici sabot mermisinin tüm numuneleri deldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18 : Numunelerin test alanındaki kamera görüntüleri



Şekil 4.18 (Devam) : Numunelerin test alanındaki kamera görüntüleri



Şekil 4.18 (Devam) : Numunelerin test alanındaki kamera görüntüleri.



Şekil 4.19. Atış sonrası numunelerin genel durumu.

4.4.1. Referans numunenin değerlendirilmesi (NC)

Referans numune C40 betonunda oluşmakta içerisinde hacimce %1 oranında 50 mm uzunluğunda ve 0,75 mm çapında (4D) makro lifler bulunmaktadır. Numuneye ait donatı ve diğer boyutsal detaylar malzeme bölümünde (Şekil 4.1 ve 4.2) verilmiştir. Atış sırasında tank mermisi numunenin alt kısmına isabet etmiştir. Alt platform mermi darbesinin etkisiyle bütünlüğünü koruyamıyarak parçalanmıştır (Şekil 4.20). Bu numuneye ait hasar durumunu, Zırhlı NC numunesinde zırhın olmadığı bölgeye isabet eden merminin etkisi ile benzer olacaktır. Bu nedenle Zırhlı NC numunesinde zırhın olmadığı bölge incelenmiştir. Zırhsız bölgeye isabet eden merminin etkisiyle parça kopma oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kopan parçanın yakın bölgelerinde derin çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 4.20. C40 betonunun atış deneyi sonrası görünümü.

4.4.2. Zırh takviyeli referans betonunun değerlendirilmesi (NC-A)

NC-A numunesine 4 adet atış isabet etmiş, biri sağ üst, diğeri sol alt ve diğeri orta alt bölgeye isabet etmiştir. Orta bölgesine isabet eden 2 adet merminin numuneyi delerek geçtiği görülmüştür. Merminin girdiği bölgede donatıları kopararak delik açmış, arka bölgesinde ise deliğin olduğu bölgede parçalanmalar meydana gelmiştir. Parçalanmış bölgede beton bütünlüğünün bozularak agregaların pastadan ayrıldığı gözlemlenmiştir. NC-A da iki adet zırha isabet eden merminin 2 kat zırhı delerek numuneden çıkmıştır. Zırh ile beton arasında bir miktar ayrılma olduğu görülmüştür. Zırh delici merminin numuneye etkimesi sonucu betonun aderansı yeterli gelmediği ve buna bağlı olarak donatıdan ayrıştığı görülmüştür (Şekil 4.22).



Şekil 4.21 : Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü



Şekil 4.22: Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü



Şekil 4.22 (Devam) : Zırh Takviyeli C40 betonun atış sonrası görünümü

4.4.3. Reaktif pudra betonunun değerlendirilmesi (RPC)

Bu numuneye orta bölgesinden 2 adet mermi isabet etmiştir. Merminin girdiği yüzeyde kopma ve çatlakların az olduğu çıkış kısımlarında hasarın çok olduğu görülmüştür. Numunenin bütünlüğünü koruduğu herhangi bir dağılma parçalanma veya derin yarık oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte numunenin arka bölgesinde deliğin etrafında parça kopma gözlemlenmiştir (Şekil 4.23). GRPC basınç dayanımı referans betona göre yüksek olması yüzey çatlaklarının da çok az olmasını sağlamıştır. Numunede kullanılan donatının kancalı ve etriyeli olması bu parçalanma ve dağılmanın az olduğu gözlemlenmiştir. Donatı ile GRPC arasında aderansın yeteri kadar güçlü olduğu ve herhangi bir ayrışma olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.23 : RPC'nin atış sonrası görünümü.

4.4.4. Zırh takviyeli reaktif pudra betonunun değerlendirilmesi (RPC-A)

Bu numuneye 2'si orta bölge diğeri sol alt kısma olmak üzere 3 adet mermi isabet etmiştir. Numune bütünlüğü korunmuştur. Merminin zırha uyguladığı kuvvet etkisiyle beton zırh yüzeyinden ayrıştığı görülmüştür. Zırlı GRPC betonunda yapılan atışlarda hedef bölgelerinde zırhsız numuneye göre benzer hasaralar gözlemlenmiştir. GRPC'nin zırh levha ile arasında iyi bir aderans olduğu zırh delici 2 adet merminin isabet etmesine rağmen levhanın GRPC'den ayrılmadığı görülmüştür.(Şekil 4.24) GRPC ile donatı arasında ayrışma olmadığı ve donatıdan betonun sıyrılmadığı atış sonrası resimlerden anlaşılmaktadır. Merminin numuneye çarpmadan önceki hızı kamera görüntülerinden 1434 m/sn olarak hesaplanmıştır.

Merminin numuneyi deldikten sonraki hızı ise 144 m/sn olarak ölçülmüştür. Numunenin ciddi oranda merminin enerjisini sönmlediği görülmüştür.



Şekil 4.24. Zırh takviyeli reaktif pudra betonunun (RPC-A) atış sonrası görünümü.

Bu numuneye 2'si orta bölge diğeri sol alt kısma olmak üzere 3 adet mermi isabet etmiştir. Numune bütünlüğü korunmuştur. Merminin zırha uyguladığı kuvvet etkisiyle beton zırh yüzeyinden ayrıştığı görülmüştür. Zırhlı GRPC betonunda yapılan atışlarda hedef bölgelerinde zırhsız numuneye göre benzer hasaralar gözlemlenmiştir. GRPC'nin zırh levha ile arasında iyi bir aderans olduğu zırh delici 2 adet merminin isabet etmesine rağmen levhanın GRPC'den ayrılmadığı görülmüştür (Şekil 4.24).

4.4.5. Kompozit betonunun değerlendirilmesi (GRPC+C40+GRPC)

Bu numuneye 2'si orta bölge diğeri sağ üst kısım olmak üzere 3 adet mermi isabet etmiştir (Şekil 4.25). Bu numunede 10 cm GRPC alt ve üst tabaka olmak üzere ara

katman 20 cm C40 betondan elde edilmiştir. Merminin çıkış noktasındaki itme kuvvetiyle alt tabakadaki GFRP ana bloktan ayrılmıştır. Betonun soğuk derz kısımlarında ayrılmaların olduğu görülmektedir. Kompozit numunedeki NC'nin davranışı ile referans numunedeki hasar davranışının benzer olarak agrega dağılımlarının olduğu büyük çatlaklar ve kütle kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.25: Kompozit Betonunun (GRPC+C40+GRPC) atış sonrası görünümü

4.4.6. Zırh takviyeli kompozit betonunun değerlendirilmesi (GRPC+C40 - A+GRPC)

Bu numuneye sol alt bir adet, sol üst 1 adet ve orta kısma 2 adet olmak üzere 4 adet mermi isabet etmiştir. Atış sonrası numune incelendiğinde kopmaların tabaka şeklinde olduğu görülmektedir. Katmanlar arasında soğuk derz nedeniyle güçlü bir aderans sağlanamamıştır. Bunun sonucu olarak arka yüzeyindeki GRPC tabakasının bloktan tamamen ayrıldığı görülmüştür. NC içerisinde bulunan plakanın merminin çarpması etkisiyle bloktan ayrıldığı görülmüştür (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 : Zırh Takviyeli Kompozit Betonunun Değerlendirilmesi.

Bu numuneye sol alt bir adet, sol üst 1 adet ve orta kısma 2 adet olmak üzere 4 adet mermi isabet etmiştir. Atış sonrası numune incelendiğinde kopmaların tabaka şeklinde olduğu görülmektedir. Katmanlar arasında soğuk derz nedeniyle güçlü bir aderans sağlanamamıştır. Bunun sonucu olarak arka yüzeyindeki GRPC tabakasının bloktan tamamen ayrıldığı görülmüştür. NC içerisinde bulunan plakanın merminin çarpması etkisiyle bloktan ayrıldığı görülmüştür.



BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geleneksel Reaktif pudra betonunda kullanılan agregalara ve liflere alternatif olarak, FeCr atığı ile ömrünü tamamlamış atık ÖTL lifinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

İlk olarak krom atıklarının granülometreleri belirlenmiş, RPC’de kullanılması için öğütülerek istenilen boyutlara getirilmiştir. Daha sonra bu atıklar farklı oranlarda lifsiz RPC’de kullanılmış ve basınç dayanım özellikleri incelenmiştir.

RPC’de agrega olarak kullanılan kuvars kumu ve pudrası yerine ferrokrom atıklarının kullanılmasının basınç dayanımını olumlu etkilediği ve dayanımı arttırdığı görülmüştür.

Referans numunenin basınç dayanımı 115 MPa elde edilirken atık agregaların kullanılmasıyla basınç dayanımı %15 artarak 133 MPa ulaşmıştır. Sonuç olarak, en uygun atık agregaların, ferrokrom cürufu (F) ve Olivin (O) olduğu görülmektedir. Bu durumda agrega olarak kuvars kumu ve pudrası yerine %30 Olivin ve %70 ferrokrom cürufu kullanımına karar verilmiştir.

Basınç dayanım sonuçlarına göre optimum karışım oranı belirlenerek endüstriyel ve ÖLT lifi %1, %2, %3 ve %4 (hacimce) oranlarında kullanılarak basınç ve eğilme dayanım özellikleri incelenmiştir.

ÖTL lifinin karmaşık geometrik yapıya sahip olması nedeniyle aderans açısından ciddi bir avantaj sağlamış ve endüstriyel life göre basınç ve eğilme dayanımında kayda değer artışlar olmuştur.

ÖTL lif katkılı GRPC’de tokluk, endüstriyel lif katkılı RPC’ye göre en büyük kayda değer değişim %3 lif içeriğinde %23 oranında artmıştır.

Agrega ve lifin atık olması nedeniyle RPC çevre dostu olarak, GRPC (Green Reactivite Powder Concrete) olarak adlandırılmıştır. Lifsiz GRPC maliyeti RPC’nin ile karşılaştırıldığında %28 daha ekonomiktir. Atık agrega ve lif kullanılması ile birlikte yaklaşık %48 ekonomi sağlanmaktadır.

RPC 'de en yüksek maliyeti lif oluşturmaktadır. Özellikle %4 lif içeriğinde, basınç ve eğilme birim dayanım maliyetinde sırasıyla %41 ve %42 oranında maliyet azalmıştır. %4 lif katkılı endüstriyel ve ÖTL lifli numunelerin eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla %180 ve %313 eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca ÖTL lifin, endüstriyel lif yerine ikame edilmesi eğilme dayanımı açısından %74'lük bir artış sağladığı görülmektedir.

Karbon salınımı açısından çelik lifin kullanımı incelendiğinde, %4 çelik lif hacminde 0,69 ton CO₂ salınımı oluşmaktadır. ÖTL lifi kullanarak bu CO₂ salınımının önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma sonucunda hem çevresel atıkların bertaraf edilmesi hem de RPC'nin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve inşaat sektöründe kullanımı arttıracak çevreci GRPC geliştirilmiştir.

GRPC betonunun savunma sanayiinde kullanımı yönünde yapılan çalışmada elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmektedir.

İlk bölümde atık malzemeler kullanılarak elde edilen optimum karışım kullanılarak hazırlanan 140x140x40 cm ebatlarında blok numunelerine 1750 m/sn hıza ulaşan 120 mm'lik Sabot mermisi ile atış yapılmış ve zırh delici darbeye karşı etkileri değerlendirilmiştir. Mermi hızının çok yüksek olması nedeniyle, merminin takibi, numuneye giriş ve çıkış hızlarının tespiti için yüksek hassasiyette kameralar ile görüntüler alınmaya çalışılmıştır.

Zırh delici mermi etkisiyle beklenmeyen bir şekilde geleneksel betonda agregaların pastadan ayrılması gerçekleşmiştir. Ayrıca, beton ile donatı arasındaki aderansın yetersiz kaldığı görülmüştür. Benzer durumun daha kötüsü C25 beton ile lifsiz olarak üretilen numunelerin alt kısmında bulunan betonarme platformun parçalanarak agrega yığını haline gelmesiyle olmuştur.

Normal NC-A betonunda zırh levhası ile beton pastası arasında ayrışma olmasına rağmen GRPC'nin zırh levha ile arasında iyi bir aderans olduğu zırh delici 2 adet merminin isabet etmesine rağmen levhanın GRPC'den ayrılmadığı görülmüştür (Şekil 5.21).

GRPC ile donatı arasında ayrışma olmadığı ve donatıdan betonun sıyrılmadığı atış sonrası resimlerden anlaşılmaktadır. Merminin numuneye çarpmadan önceki hızı kamera görüntülerinden 1434 m/sn olarak hesaplanmıştır. Merminin numuneyi

deldikten sonraki hızı ise 144 m/sn olarak ölçülmüştür. Numunenin ciddi oranda merminin enerjisini sönmlediği görülmüştür.

Sonuç olarak askeri ve kritik öneme sahip yapıların bu tez çalışmasında detayları verilen GRPC elemanlar ile yapılamasının ülke savunması açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Bağlayıcı pasta oranının arttırılarak, agrega, lif ve pasta ara yüzeylerinin aderansının güçlendirilmesi konusunda çalışmalar yapılması önerilmektedir

Geleneksel betonlarda mikro lif kullanımının balistik özellikleri olumlu yönde arttırabileceği ve bununla ilgili çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Sabot mermisinin donatıyı koparması ve betonda büyük kütle kaybı oluşturmuştur. Donatı oranı ile ilgili kapsamlı bir çalışma yapılması önerilmektedir.

Numune içine kullanılan zırh levhalarının kalınlıklarının artması delinmeye karşı direnci arttıracaktır. Zırh levha yüzeylerinin pürüzsüz olması nedeniyle, NC-A ve Kom-A numunelerinde levha ile beton arasında ayrılma gerçekleşmiştir. Bu bölgedeki aderansın güçlendirilmesine yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Reaktif pudra betonu ile üretilen bloğun arka yüzeyinde oluşan parça kopmalarını engellemek için ve balistik dayanımı arttırmak için mikro liflerle birlikte makro lifler de kullanılması olumlu etki yapacağı düşünülmektedir. Bu konu ile ilgili kapsamlı deneysel çalışmalar önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Aıtcın, P.C., (2000), Cement of yesterday and today concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, 30, 9, 1349-1359,
- [2] Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., (2004), Betonun performansa göre tasarımında yeni gelişmeler, *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul, 1-34,
- [3] Richard, P., Cheyrezy, M.H., (1995) Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 25, 7, 1501-1511,
- [4] Aıtcın, P.C., (1995) Concrete the most widely used construction materials, *ACI SP- 154*, 257-266,
- [5] İpek, M. (2009) *Reaktif pudra betonlarının mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkıştırma basıncının etkileri*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [6] Aıtcın, P.C., Sarkar, S.L., Ranc, R., Levy, C., (1991), A High-Silica modulus cement for High Performance Concrete, *Advanced Cementitious Materials Ceramic Transaction, Gaithersburg*, 16, 103–121,
- [7] Mahesh Raj Bhatt.,(Jul 1,2016) <https://www.slideshare.net/slideshow/reactive-powder-concrete-as-high-strength-and-high-performance-concrete/63649398>
- [8] Talebinejad, I., Bassam, S.A., Iranmanesh, A., Shekarchizadeh, M., (2004), Optimizing Mix Proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with Strengths of 200–350 MPa, Ultra High Performance Concrete (UHPC), *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 133-41,
- [9] Strunge, J., Deuse, T., (2008), Special cements for ultra high performance concrete, *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 61–68.
- [10] Sorelli, L., Constantinides, G., Ulm, F.J., et al., (2008), The nano-mechanical signature of ultra high performance concrete by statistical nanoindentation techniques, *Cem. Concr. Res.*, 38, 1447-1456, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.002>
- [11] Richard, P., Cheyrezy, M.H., (1994), Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *ACI Spring Convention, San Francisco*,
- [12] Goldman, A., Bentur, A., (1993), The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, *Cement and Concrete Research*, 23, 4, 962–972,
- [13] Yeğınobalı, A., (2011, Nisan) Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği /AR-GE Enstitüsü*, 2.,18- 46, 209,

- [14] <http://www.elkem.com>. (10.2.2024)
- [15] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z., (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construction and Building Materials*, 101, 741–751, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- [16] Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites*, 19, 107-122,
- [17] Fuller, W., Thompson, S.E., (1907), The laws of proportioning concrete, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1053, 67-143,
- [18] Andreasen, A.H.M. and Andersen, J., (1930) Über die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen körnern (mit einigen Experimenten), *Colloid & Polymer Science*, 50 (3), 217-228,
- [19] Dugat, J., Roux, N., Bernier, G., (1996), Mechanical properties of reactive powder concretes, *Materials and Structures*, 29, 4, 233-240,
- [20] Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S., Aslan, G., (2005), Özel prefabrike elemanların ultra yüksek performanslı betonlarla üretimi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul*. 447–457,
- [21] <http://en.vsl.cz/other-technologies/>
- [22] Gül, R. ve Geçten, O., (2022.29.07), Elazığ ferrkrom işletmesi granüle cürufunun hafif beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırılması. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 291-301.
- [23] Yazıcıoğlu, S., Gönen, T., ve Çobanoğlu, Ö. C., (2005) *Elazığ ferrokrom cürufunun betonun basınç dayanımı ve çarpma enerjisi üzerine etkisi*, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., 17(4), 681-686
- [24] Sancak, E., Çoban, Ö., (2014) *Krom ve olivin atıklarının betonda kullanımının durabilite özelliklerine etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta
- [25] Savadkoohi, M. S., Reisi, M., (2020), Granit atıkların reaktif pudra betonda kullanılması ile çevre koruma temelli sürdürülebilir kalkınma, *Temiz Üretim Dergisi*, 266, 121973,
- [26] Lee, M.G., Wang, Y.C., Chiu, C.T., (2007), A Preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material, *Construction and Building Materials*, 21, 1, 182–189,
- [27] Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A.Ş., Baradan, B., (2008), Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete, 87, 12, 2401–2407,
- [28] Rougeau, P., Borys B., (2004), Ultra high performance concrete with ultra fine particles other than silica fume, ultra high performance concrete (uhpc), *International Symposium On Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 213–225,
- [29] Bakış, A.,(2018), Atık çelik lif takviyeli pomza içeren reaktif pudra betonun rijit kaplama imalatında kullanımı, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 63-71,

- [30] El-Tikrite A., Hadi, M.N.S.,(2017), Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression, *Construction and Building Materials*, 154, 1024-1034,
- [31] Yılmaz, K., İpek, M., (2008) Reaktif pudra betonlarında, karışım, lif içeriği ve kür koşullarının optimizasyonu, *Türkiye Hazır Beton kongresi, Beton 2008*, İstanbul 312-330.
- [32] Aslan, S., Öksüzer, N., Gökçe, H.S., (2022) Grafen nanoplatelet ve atık cam agrega kullanılarak reaktif pudra betonun mekanik ve taşıma özelliklerinin iyileştirilmesi, *İnşaat ve Yapı Malzemeleri Dergisi*, 318, 126199,
- [33] İpek, M., (2017), Journal of polytechnic, *Journal of Polytechnic*, 20, 451-457,
- [34] Sadrekarimi, A., (2004)., *Development of a light weight reactive powder concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(3), 409-417,
- [35] Yazıcı, H., (2007), the effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures, *Building and Environment*, 42, 5, 2083–2089,
- [36] Mooney, M., (1591) The viscosity of concentrated suspension of spherical particles, *Journal of Colloids*, 6, 162, [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(51\)90036](https://doi.org/10.1016/0095-8522(51)90036)
- [37] Feylessoufi, A., Villieras, F., Michot, L. J., DE Donato, P., Cases, J. M., Richard, P.,(1996), Water environment and nanostructural network in a reactive powder concrete, *Cement and Concrete Composites*, 18, 1, pp. 23–29, 1996.
- [38] Aıtcın, P.C., (2004), High performance concrete, *E.&F.N. SPON*, New York,
- [39] <http://www.beksa.com.tr>. (04.07.2024).
- [40] Nawy, E.G., (2008), Concrete construction engineering handbook, *CRC Press*, 2. Edition, 22-5, USA,
- [41] RICCIOTTI, R.(2001.), Bridge to the Future, *ASCE Civil Engineering Magazine*, 71, 1, 1–45,
- [42] Taşdemir A. (2006); *Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ
- [43] Yılmaz, A., Sütaş, İ., (2008), Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, *İMO Teknik Dergi*, 294, 4455-4470,
- [44]<https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/erzincan-ili-yuksekkarbonlu-ferrokrom-tesisi-yatirimi-on-fizibilite-raporu-2020.pdf>
- [45] Yılmaz, A., Sütaş, İ., (2002)Ferrokrom cürufu kullanılarak hazırlanan asfalt betonu numunelerinin mühendislik özellikleri, *İnşaat Mühendisleri Odası*,
- [46] Fuller, W, Thompson, S.E., (1907), The Laws of Proportioning Concrete, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1053, 67-143,
- [47] Shakhmenko, G., Bırsh, J.,(1998) *Concrete mix design and optimization, and International Ph.D. Symposium in Civil Engineering*, Budapest, Hungary, 1-8, 214

- [48] Uthus, L., Hermansson, A.,(2006), Horvli, I., Hoff, I., *A Study On The Influence of Water And Fines on the Deformation Properties and Frost Heave of Unbound Aggregates*, *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering*, Orono, Main,
- [49] AbdeL-Jawad, Y.A., Abdullah, W.S., (2002), *Design of Maximum Density Grading*, *Construction and Building Materials*, 16, 8, 495-508,
- [50] TS EN 12390-3,(2003), *Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini*, Türkiye Standartları Enstitüsü,
- [51] ASTM C 39/C39M, (1996), *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM (American Society for Testing and Materials),
- [52] TS 3502, (1981) *Betonda Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini*, *Türkiye Standartları Enstitüsü*,
- [53] ASTM C 469, (1996), *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM (American Society for Testing and Materials),
- [54] TS 10513, (1992), *Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan*, Türkiye Standartları Enstitüsü,
- [55] TS 10514,(1992), *Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları*, Türkiye Standartları Enstitüsü,
- [56] TS 10515, (1992), *Çelik Tel Takviyeli Betonun Eğilme Mukavemeti Deney Metodu*, Türkiye Standartları Enstitüsü,
- [57] ASTM C 1018,(1989), *Standard Test Method for Flexural Toughness and FirstCrack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with ThirdPoint Loading)*, ASTM (American Society for Testing and Materials), 4.02, 637–644,
- [58] JSCE Standard SF-4,(1984), *Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*, 58–66,
- [59] ASTM C 1018,(1989), *Standard Test Method for Flexural Toughness and FirstCrack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with ThirdPoint Loading)*, ASTM (American Society for Testing and Materials), 4.02, 637–644,
- [60] <http://www.materials.elkem.com> (07.03.2008).
- [61] Korkanç, M., Tuğrul A.,(2004)., *Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden incelenmesi*, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, 161-169,
- [62] Aıtcın, P.C.,(2004)., *High Performance Concrete*, E.&F.N. Spon, New York,.
- [63] <http://www.beksa.com.tr>.
- [64] Özalp, F., *Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı*, (Yüksek Lisans Tezi) Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 36-40, İstanbul
- [65]<https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20230704-09073528>.
- [66] Yılmaz E., Arslan H.; Subaşı S.; Uğur L. O.; Bideci A.; (2018); *Geri Dönüştürülmüş Lastik Atık İkameli Poliüretan Dolgulu Kompozit Panellerin*

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 1224-1233

[67] Dehghanpour, H., Doğan, F., Subaşı, S, Maraşlı, M., (2024)., Experimental Study on Engineering Properties of Recycled Olivine Aggregate Filled CF Reinforced Electrically Conductive Mortars, 3,452-465,

[68] <https://www.sezginssac.com/ürünler/hardox-500>

[69] <https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20230704-09073528>.



EKLER

EK A: Balistik Çalışmalar Numunelerinin Dökülmesi



Şekil A1: Referans numunenin kalıp ve donatısı.



Şekil A2: Referans beton dökümü



Şekil A3 : RPB numunesi agrega öğütülmesi.



Şekil A4: RPB numunesi dökümü.



Şekil A5: Balistik numunelerin döküm mikseri ve karışımı.

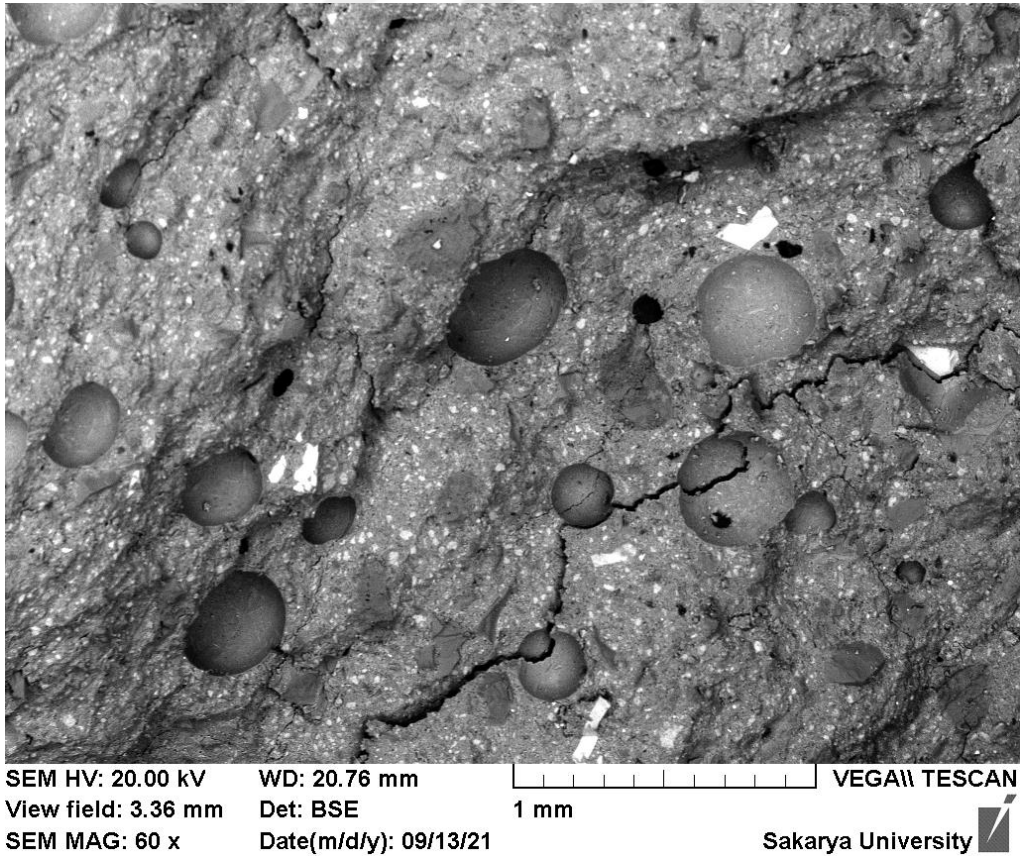


Şekil A6: Balistik numuneler ve tespit kaideleri

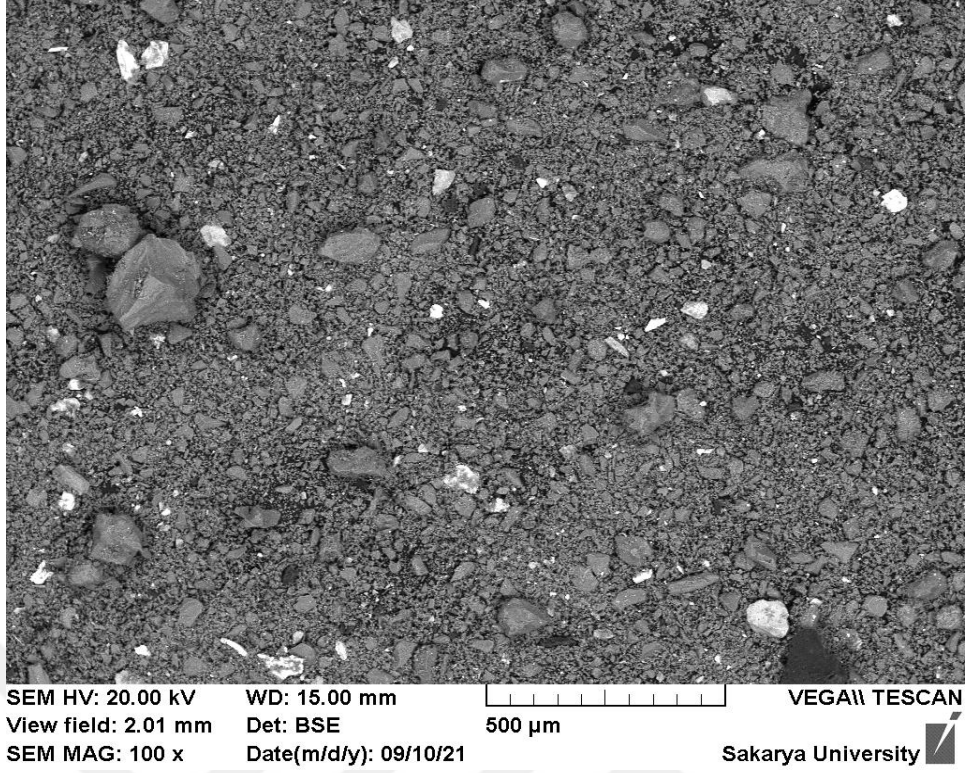


Şekil A7: Baristik numunelerin kür edilmesi.

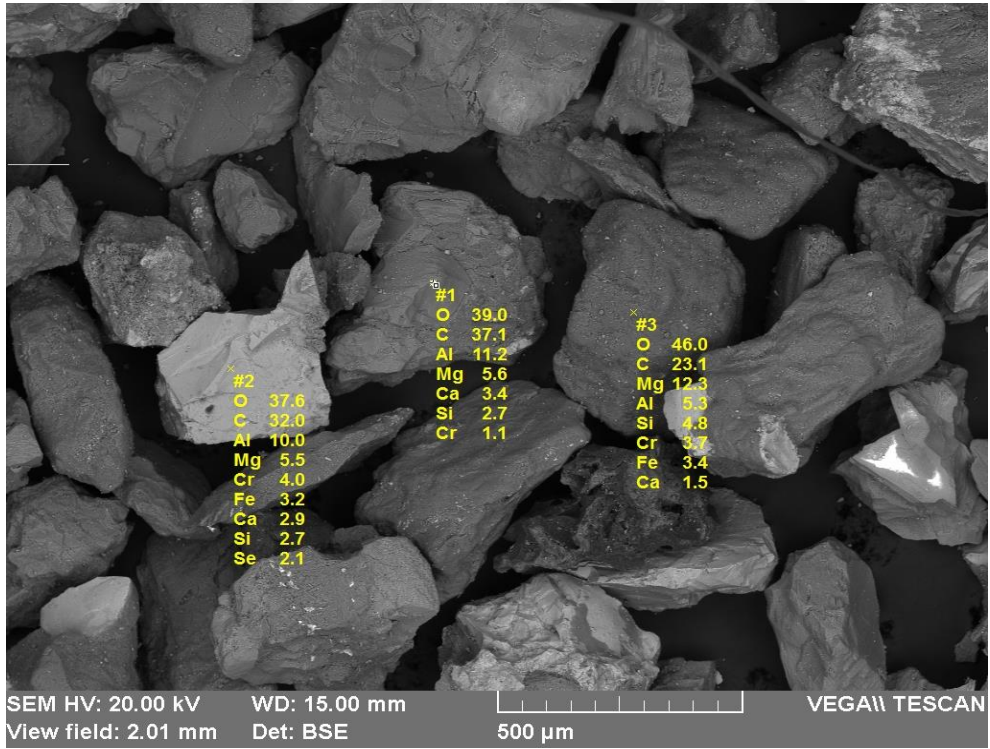
EK B : Numunelerin EDS analizi ve SEM görüntüsü.



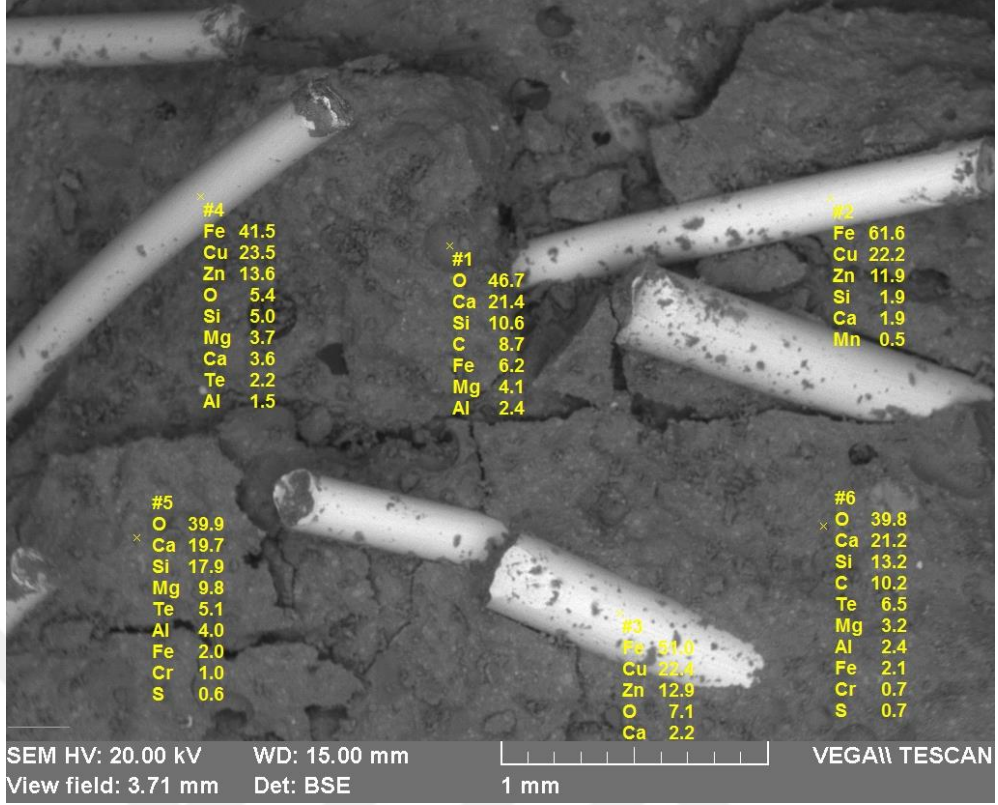
Şekil B 1: Referans numunesi SEM görüntüsü



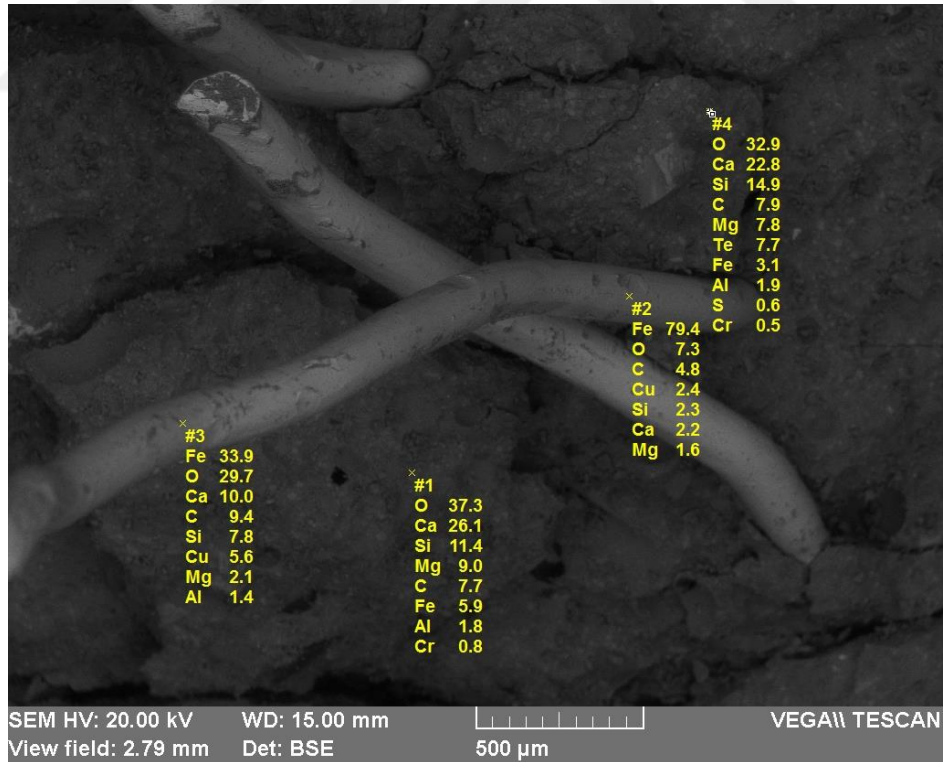
Şekil B 2: Ferrokrom cüruf SEM görüntüsü



Şekil B 3: Serpantin cüruf EDS görüntüsü



Şekil B 4: Endüstriyel lifli numune EDS görüntüsü.



Şekil B 5: Atık lifli numune EDS görüntüsü.