

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK MERMER BULAMACININ REAKTİF PUDRA  
BETONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rıdvan İYİLİKSEVER**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ**

**Haziran 2014**

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK MERMER BULAMACININ REAKTİF PUDRA  
BETONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rıdvan İYİLİKSEVER**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ**

**Bu tez 16 / 06 /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Prof. Dr. Kemalettin  
YILMAZ  
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. İ. Ayhan  
ŞENGİL  
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Ferhat  
AYDIN  
Üye**

## ÖNSÖZ

Yapılan bu tez çalışmasında atık olarak doğada depolanan mermer bulamacının RPB üretiminde kullanılması araştırılmıştır. Özellikle RPB’de kullanılan malzemeler ve üretim tekniği hakkında detaylı bilgiler sunulmaya çalışılmıştır. Tezin amacı kuvars pudrası yerine ve çimento ikameli olarak atık mermer bulamacının kullanılması ile RPB’nin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve atık mermer bulamacı kullanılması sonucunda birim maliyet analizlerinde ekonomi sağlanacağı gösterilmiştir.

Bu tez çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen ve her türlü desteği veren danışmanım Prof. Dr. Kemalettin Yılmaz’a, teşekkür ederim. Çalışmalarımda bana yol gösteren ve değerli bilgi birikimini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Metin İPEK’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında göstermiş olduğu anlayıştan dolayı çalıştığım kurum olan Kocaeli Büyükşehir Belediyesi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bugüne kadar benden desteklerini esirgemeyen eşim Filiz’e, çocuklarım Zeynep, Ömer ve Hümeysra’ya teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
REAKTİF PUDRA BETONU (RPB).....	3
2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	3
2.1.1. RPB’yi oluşturan malzemeler.....	5
2.1.2. RPB’nin karışım oranları.....	10
2.1.3. RPB’nin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı.....	11
2.1.4. RPB’nin üretim teknolojisi.....	15
2.1.5. RPB’nin kullanım alanları.....	17
2.1.6. RPB ile ilgili literatür taraması.....	24
2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	29
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	33
3.1.1. Çimento.....	33

3.1.2. Silis dumanı.....	34
3.1.3. Kuvars pudrası.....	35
3.1.4. Kuvars kumu.....	37
3.1.5. Mermer atığı (Bulamaç).....	40
3.1.6. Çelik tel.....	41
3.1.7. Kimyasal katkı.....	42
3.1.8. Su.....	42
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	42
3.2.1. Deneyleerde kullanılan yöntem.....	44
3.2.2. Karışımın belirlenmesi.....	45
3.2.3. Basınç dayanımının belirlenmesi.....	45
3.2.4. Eğilme parametrelerinin belirlenmesi.....	46
3.2.5. Ultrases hızının belirlenmesi.....	51
3.2.6. Schmidt değerin belirlenmesi.....	53
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>54</b>
4.1. Deneysel Bulgular ve Tartışma.....	54
4.1.1. Birim hacim ağırlık.....	55
4.1.2. Basınç dayanımı.....	55
4.1.3. Ultrases geçiş hızı.....	59
4.1.4. Schmidt çekici deneyi.....	63
4.1.5. Eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu.....	65
4.2. Birim Maliyet Analizleri.....	85
4.2.1. Basınç dayanımı birim maliyeti.....	88
4.2.2. Eğilme dayanımı birim maliyeti.....	88
4.2.3. Kırılma tokluğu birim maliyeti.....	89
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>94</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>94</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>100</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A$	: Numune kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
ASTM	: American Society for Testing and Materials
$b$	: Numune kesitinin genişliği (mm)
$c$	: Normalizasyon işlemi sonucu bulunan değer
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
$\text{Ca(OH)}_2$	: Kalsiyum hidroksit
Ç	: Çimento
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
ÇYDB	: Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar
$d$	: Elek ya da tane çapı
$d_0$	: Kalıptaki betonun yoğunluğu
$d_s$	: Taneli karışımın sıkıştırılmış olarak varsayılan katı yoğunluğu
E	: Elastisite modülü (MPa)
EDS	: Energy dispersive spectroscopy
$g$	: Yer çekimi ivmesi
$h$	: Numune kesitinin yüksekliği (mm)
$I_5$	: Elastik şekil değiştirme indeksleri ( $3\delta$ )
$I_{10}$	: Elastik şekil değiştirme indeksleri ( $5,5\delta$ )
$I_{20}$	: Elastik şekil değiştirme indeksleri ( $10,5\delta$ )
$l$	: Mesnetler arası uzaklık (mm)
$M$	: % Kümülatif geçen
$P$	: Kırılma yükü (N)
$P_e$	: Net Kırılma yükü (N)
RPB	: Reaktif Pudra Betonu
RPB200	: Basınç dayanımı 170 - 230 MPa arasında olan RPB
RPB800	: Basınç dayanımı 490-810 MPa arasında olan RPB

R <sub>5,10</sub>	: Birincil Kalıcı dayanım faktörleri
R <sub>10,20</sub>	: İkincil Kalıcı dayanım faktörleri
s	: Su
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SD	: Silis dumanı
SİFCON	: Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit
TL	: Türk Lirası
TÇMA	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TS	: Türkiye Standartları Enstitüsü
UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Betonlar
W <sub>o</sub>	: Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan-tokluk (Nm)
YDB	: Yüksek Dayanımlı Betonlar
$\sigma$	: Basınç dayanımı (MPa)
$\sigma_e$	: Net eğilme dayanımı (MPa)
1.KK	: 100-300 $\mu\text{m}$ tane aralığındaki kuvars kumu
2.KK	: 300-600 $\mu\text{m}$ tane aralığındaki kuvars kumu

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsü.....	4
Şekil 2.2.	Boşlukları doldurma malzemesi ve puzolanın, betonun basınç dayanımına etkisi.....	7
Şekil 2.3.	Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı.....	14
Şekil 2.4.	Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı.....	15
Şekil 2.5.	Karışım işlemi süresince güç tüketimi.....	16
Şekil 2.6.	Sherbrooke şehrindeki, RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü giriş kesiti.....	19
Şekil 2.7.	Shepherds ırmağı üzerindeki, RPB kullanılarak yapılan ilk araç köprüsü girişi.....	20
Şekil 2.8.	RPB'den araştırma amaçlı yapılmış köprü ve girişi.....	20
Şekil 2.9.	Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü girişleri....	21
Şekil 2.10.	Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk köprü'nün giriş kesiti.....	21
Şekil 2.11.	Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk yaya köprüsü.	22
Şekil 2.12.	Sakata-Mirai RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü girişleri.....	22
Şekil 2.13.	Papatoetoe ve Penrose RPB kullanılarak yapılan üst geçit köprüsü girişleri.....	22
Şekil 2.14.	RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırımı elemanı.....	23
Şekil 2.15.	RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası.....	23
Şekil 2.16.	RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri.....	23
Şekil 2.17.	RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapağı.....	24



Şekil 2.18.	Eğilme testi için tamir malzemeli ve malzemesiz numune boyutları a) Tamir harcı/normal beton yada RPB/normal beton numune boyutları b) Normal beton, tamir harcı ve RPB numune boyutları.....	27
Şekil 2.19.	Basınç testi için tamir malzemeli numune boyutları.....	27
Şekil 2.20.	RPB'nin güçlendirmede kullanılması.....	28
Şekil 2.21.	Mermer bulamacının doğada depolanması.....	31
Şekil 2.22.	Mermer bulamacının doğada depolanması.....	32
Şekil 3.1.	Kuars pudrası EDS analizi.....	36
Şekil 3.2.	Taneli malzemelerin granülometri eğrisi.....	39
Şekil 3.3.	Karışımında Kullanılan Mermer Bulamacı.....	41
Şekil 3.4.	RPB üretimi.....	43
Şekil 3.5.	Deney akış şeması.....	44
Şekil 3.6.	Beton basınç dayanımı.....	46
Şekil 3.7.	Eğilme deneyi ve numune yükleme şekli.....	47
Şekil 3.8.	Eğilme deney düzeneği.....	48
Şekil 3.9.	Örnek yük sehim eğrisi grafiği.....	49
Şekil 3.10.	Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu.....	51
Şekil 3.11.	Ultras ses geçiş hızı testi.....	52
Şekil 3.12.	Schmidt test çekici deneyi.....	53
Şekil 4.1.	Birim hacim ağırlık bulamaç oranları ilişkisi.....	55
Şekil 4.2.	Basınç deneyi sonucu kırılan numunenin yapısı.....	56
Şekil 4.3.	Basınç dayanımı bulamaç oranları ilişkisi.....	57
Şekil 4.4.	Beton basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi.....	59
Şekil 4.5.	Bulamaç oranlarının ultra ses hızı ile ilişkisi.....	60
Şekil 4.6.	Ultra ses hızı birim hacim ağırlık grafiği.....	62
Şekil 4.7.	Ultra ses hızı, basınç dayanımı grafiği.....	63
Şekil 4.8.	Bulamaç oranlarının schmidt test çekici değerleri ilişkisi.....	64
Şekil 4.9.	Schmidt test çekici, basınç dayanımı grafiği.....	65
Şekil 4.10.	Eğilme deneyi sonucu kırılan numune.....	66
Şekil 4.11.	RPB' ye ait yük sehim grafiği.....	66
Şekil 4.12.	MRPB' ye ait yük sehim grafiği.....	67
Şekil 4.13.	MRPB5' e ait yük sehim grafiği .....	68

Şekil 4.14.	MRPB10' a ait yük sehim grafiği.....	69
Şekil 4.15.	MRPB15' e ait yük sehim grafiği.....	71
Şekil 4.16.	MRPB20' ye ait yük sehim grafiği.....	72
Şekil 4.17.	MRPB25' e ait yük sehim grafiği.....	73
Şekil 4.18.	MRPB30' a ait yük sehim grafiği.....	75
Şekil 4.19.	Bütün serilere ait karma yük sehim grafiği.....	76
Şekil 4.20.	Bulamaç oranlarının eğilme dayanımı değerleri ile ilişkisi.....	77
Şekil 4.21.	Bulamaç oranlarının kırılma tokluğu değerleri ile ilişkisi.....	79
Şekil 4.22.	Eğilme dayanımı, basınç dayanımı grafiği.....	81
Şekil 4.23.	Kırılma tokluğu, basınç dayanımı grafiği.....	83
Şekil 4.24.	Kırılma tokluğu, eğilme dayanımı grafiği.....	84
Şekil 4.25.	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu birim maliyeti grafiği.....	87

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonlarının çimentoya göre karışımın oranları.....	10
Tablo 2.2.	RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları.....	11
Tablo 2.3.	Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri.....	12
Tablo 2.4.	Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri.....	12
Tablo 2.5.	RPB’nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması.....	13
Tablo 2.6.	RPB ile normal ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması.....	15
Tablo 2.7.	Eşit moment taşıma kapasitesine sahip kirişlerinin karşılaştırılması.....	18
Tablo 3.1.	Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	33
Tablo 3.2.	Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	34
Tablo 3.3.	Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri .....	35
Tablo 3.4.	Kuvars pudrası elek analiz sonuçları .....	37
Tablo 3.5.	Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri .....	38
Tablo 3.6.	Kuvars kumu tane dağılımı.....	38
Tablo 3.7.	Kuvars kumu tane dağılımı.....	39
Tablo 3.8.	Mermer tozunun kimyasal yapısı .....	41
Tablo 3.9.	Kullanılan lifin teknik özellikleri .....	42
Tablo 3.10.	Karışım Oranları (1 m <sup>3</sup> ).....	45
Tablo 3.11.	Elastik şekil değiştirme indeks değerleri .....	50
Tablo 3.12.	Ultra Ses Hızı .....	52
Tablo 4.1.	Beton Birim Hacim Ağırlıkları .....	54

Tablo 4.2.	Beton Basınç Dayanımı .....	56
Tablo 4.3.	Beton Basınç Dayanımı-Birim Hacim Ağırlık İlişkisi .....	58
Tablo 4.4.	Ultra Ses Geçiş Hızı .....	60
Tablo 4.5.	Ultra Ses Hızı-Birim Hacim Ağırlık İlişkisi .....	61
Tablo 4.6.	Ultra Ses Hızı-Basınç Dayanımı İlişkisi .....	62
Tablo 4.7.	Schmidt Test Çekici Deneyi .....	64
Tablo 4.8.	Schmidt Test Çekici-Basınç Dayanımı İlişkisi.....	64
Tablo 4.9.	Schmidt Test Çekici-Basınç Dayanımı İlişkisi.....	65
Tablo 4.10.	Eğilme Dayanımı .....	77
Tablo 4.11	Kırılma Tokluğu .....	79
Tablo 4.12.	Eğilme Dayanımı-Basınç Dayanımı İlişkisi .....	81
Tablo 4.13.	Basınç Dayanımı-Kırılma Tokluğu İlişkisi .....	82
Tablo 4.14.	Kırılma Tokluğu-Eğilme Dayanımı İlişkisi.....	84
Tablo 4.15.	Maliyet Analizi.....	86
Tablo 4.16.	Birim Maliyet Analizi .....	87

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Reaktif pudra betonu, mermer bulamacı, lif, eğilme dayanımı

Bu çalışmada atık mermer bulamacının Reaktif pudra betonunda (RPB) kullanılması incelenmiştir. Mermer endüstrisinde mermer işleme sırasında bulamaç olarak ortaya çıkan yaklaşık 50 mikronun altındaki atıklar kullanılmıştır. Bu atıklar ilk olarak kuvars pudrası yerine ve daha sonra ise çimento ile 6 farklı oranda (%5, 10, 15, 20, 25, 30) ikameli olarak kullanılmıştır. Numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, ultra ses geçiş hızı, Schmidt test çekici deneyleri yapılmıştır.

Sonuç olarak kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılması mekanik özellikler üzerinde kayda değer bir etki yapmamıştır. Bununla birlikte çimento ile ikameli kullanılan mermer bulamacı reaktif pudra betonunun mekanik özelliklerini bir miktar olumsuz etkilemiştir. Birim maliyet yönünden bulamaç kullanılması ekonomiklik sağlamaktadır. Ayrıca mermer bulamaç atıklarının yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi çevresel yönden olumlu çarpan etkisine sahiptir.

# **EFFECTS OF WASTE MARBLE PASTE TO MECHANICAL BEHAVIORS OF REACTIVE POWDER CONCRETE**

## **SUMMARY**

Keywords: Reactive powder concrete, waste marble, fibre, flexure strength

In this paper, we studied about using waste marble paste as an ingredient in Reactive Powder Concrete (RPC). Wastes marble that are smaller than 50  $\mu$  were used for experiments. First of all, waste marble was used instead of quartz powder and after this we used waste marble paste in cement with 6 different proportions alternately (%5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30). Experiments such as; flexure and compressive strength, fracture toughness, Schmidt hammer test and ultrasonic test were carried out.

Using waste marble paste instead of quartz powder did not make any remarkable change on mechanical properties. However; waste marble paste used in cement has negative effect on mechanical properties of RPC. Using waste marble paste is more economical In terms of cost. Also, waste marble paste that is used as structural material makes positive multiplier effect for environment.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Beton, üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, donatı için pasif bir ortam sağlaması, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle günümüzde vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır. Hem betonarme hem de çelik yapı sistemlerinde betonun kullanılmadığı alan sınırlıdır. Beton teknolojisi ise bu yoğun talep karşısında sürekli bir gelişim içerisinde.

Beton, çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek dayanım kazanan ve tekrar çözünmeyen kompozit bir yapı malzemesidir [1].

150 yılı aşkın bir süredir beton insanoğlunun beklenti ve ihtiyaçları doğrultusunda sürekli bir değişim ve gelişim göstermiştir. 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15–25 MPa civarında iken 1970'li yıllarda yüksek basınç dayanımına ihtiyaç duyulan yüksek katlı yapıların kolon yüklerinin temele taşıtılabilmesi için 40–50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [2,3]. Betonları en genel şekliyle normal ve özel betonlar olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür.

Normal betonlar, üretiminin kolay olması, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilen betonlardır. Basınç dayanımları genellikle 20 MPa ile 50 MPa arasındadır. Yapı sektöründe ekonominin önemi göz önünde tutulduğunda bu betonların uygulamada her zaman yer bulacağı muhakkaktır.

Özel betonlar, normal betonların fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinde amaca uygun olarak iyileştirme yapılması ile elde edilmiş betonlardır. Bunlara, yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar ve harçlar, hafif betonlar, polipropilen ve çelik tel takviyeli betonlar, püskürtme betonlar ve ultra yüksek dayanımlı betonlardır.

Son yıllarda yapılan araştırmada [2,3], çimento matrisli malzemeler ile yüksek mekanik performans kazanılması hedeflenmiştir. Bu araştırmaların sonucunda, Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB), Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar (ÇYDB), Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF), Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP), Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON), Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB) ortaya çıkmıştır.

Ancak son yıllarda betonda yüksek performans, sadece yüksek dayanımla değil betonun dayanıklılığı ve süneklik özelliklerinin de dayanımla birlikte değerlendirilmesi olarak ortaya çıkmıştır. Dayanımı artırılmış beton veya bilinen adıyla yüksek dayanımlı betonlar geçirimsiz olması sebebiyle dayanıklılık yönünden de olumlu özelliklere sahip olmasına karşın diğer yandan bu betonlarda dayanım arttıkça ortaya çıkan önemli bir problem ise gevreklik olmuştur [3].

Betonda meydana gelen gevreklik probleminin çözümünde, dayanıklılık özelliklerinin dışında yüksek süneklik özeliğine sahip betonlara gereksinim duyulmuştur. Bu problemi çözmek için normal betonun çekme dayanımı, çatlak direnci, aşınma ve darbe dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için içerisine çelik, cam ve polipropilen lifler katılmaktadır. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi, tokluk olarak da adlandırılan enerji yutabilme kapasitesidir [4].

Liflerin eklenmesiyle, betonda meydana gelen gevreklik problemini çözmek ve betonun çekme dayanımını artırmak amaçlı yüksek dayanımlı betonlardan farklı olarak betona lif katılması ve lif katılması ile birlikte tane dağılımın değiştirilerek yeniden düzenlenmesi, puzolanik aktivitenin artırılması ve farklı üretim ile kür



işlemine tabi tutulmasıyla ultra yüksek performanslı betonlar üretilmiştir. Ultra yüksek performanslı betonlar sınıfında bulunan betonlardan biri de reaktif pudra betonudur (RPB). Reaktif pudra betonu 1990 yılların ilk yarısında bulunmuş ve gelişmeye başlamıştır.

## BÖLÜM 2. REAKTİF PUDRA BETONU

### 2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Reaktif Pudra Betonu, ince taneli malzemelerden oluşan yüksek dozajda çimento ve düşük su/çimento oranına sahip yeni nesil ultra yüksek performanslı betondur. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar sınıfında bulunan ve 170 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına ve süneklığe sahip çimento matrisli malzemelerin yeni bir tipi olarak da tanımlanabilir. Reaktif pudra betonu (RPB) adını, yapımında kullanılan malzemeler ve puzolanik aktiviteden almaktadır. Pudra kelimesi, RPB'yi oluşturan malzemelerin pudra tane boyutunda olmasından, reaktiflik kelimesi, inert kuvars agregasından diğer bir değişle, puzolanik aktivitesi olmayan yüksek oranda silis içeren kuvars kumundan, ve beton kelimesi ise çimento matrisli olmasından dolayı gelmektedir.

Reaktif pudra betonu, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır [5]. Reaktif pudra betonlarının ilk kullanımı ise Kanada'nın Quebec eyaletinde bulunan Sherbrooke şehrinde şekil 2.1'deki yaya köprüsünde olmuş ve kullanımı daha sonraki yıllarda giderek artmıştır [6].



şekil 2.1. Sherbrooke şehrindeki RPB ile üretilmiş yaya köprüsü [6].

### 2.1.1. RPB'yi oluşturan malzemeler

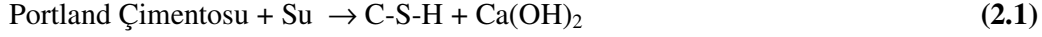
Betonun içyapısının kusursuz olması için, daha sıkı tane düzenine sahip olan ve mümkün olan en sıkı mikro yapıyı elde edebilecek ve bu mikro yapıyı yine mikro boyuttaki teller ile güçlendirerek çimento matrisli en yüksek dayanımlı betonu yapmak asıl amacı oluşturmaktadır. RPB'de kullanılan malzemeler, yüksek dayanımlı, sert, homojen ve bol miktarda bulunan ucuz malzemeler olması gerekmektedir. Bu malzemeler aynı zamanda içyapıdaki kusurları en aza indirmek ve en yüksek homojenliğin sağlanması için mikro boyutta olması gerekmektedir. RPB'de kullanılan malzemeler genellikle, çimento, silis dumanı, pudra, kum, çelik agrega, çelik lif, su ve kimyasal katkıdır.

Diğer betonlar gibi RPB da çimento matrisli bir betondur ve asıl bağlayıcı malzemesi çimentodur. Yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan çimentolar bu betonlarda kullanıldığı gibi farklı çimentolarda kullanılmaktadır. Kimyasal içeriği bakımından  $C_3A$  içeriği düşük olan çimentolar daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Reolojik özellikler ve mekanik performans açısından en iyi çimento yüksek silis modüllü çimentodur. Bununla birlikte bu tip çimento çok yavaş sertleşme oranı dezavantajına sahiptir. Tane boyutu açısından yüksek bir Blain incelikli çimento fazla su ihtiyacı olması nedeniyle bu betonlar için uygun görülmemesine rağmen, geleneksel hızlı sertleşen yüksek performanslı çimento yüksek su ihtiyacına rağmen çok iyi mekanik performansı için tercih edilmektedir [7]. Genellikle bu betonlar için katkısız portland çimentosu yani Tip I ve 42,5 MPa veya 52,5 MPa'lık basınç dayanıma sahip çimentolar tercih edilmektedir.

Mikron boyuttaki taneleri bir arada tutacak, bağlayıcı pastadaki boşlukları dolduracak ve en önemlisi de çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireç ( $Ca(OH)_2$ ) ile reaksiyona girerek puzolanik aktivite gerçekleştirerek dayanıma katkı sağlayacak bir puzolan malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç, en iyi şekilde silis dumanı tarafından karşılanmaktadır [5, 7, 9, 10, 11]. Bütün bu özelliklere sahip çok ince tane yapılı silis dumanı, puzolan olarak RPB de oldukça yüksek oranda kullanılmaktadır [8]. Tipik olarak silis dumanı/çimento oranı 0,25'dir. Bu değer

çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kirecin tamamen tüketilmesi için gerekli olan dozaja da çok yakındır [5, 7, 9, 10, 11].

Silis dumanının çimento ürünleri ile reaksiyonu kimyasal olarak;



Burada,

C-S-H ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ):Kalsiyum silikat hidrat “Tobermit” ismi verilen jel, çimento tanesinin 1/1000 oranında, çok küçük parçacıklardan oluşan ve çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlayan hidratasyon ürünüdür.

$\text{Ca(OH)}_2$  (Kalsiyum hidroksit): Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçtir.

Bu denklemden hem bağlayıcılık özelliği olan C-S-H, hem de yan ürün olan serbest kireç açığa çıkmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan bu ürünler silis dumanı ile reaksiyona girmektedir. Bu kimyasal reaksiyonda şayet serbest kirecin tamamı tüketilirse, kimyasal denklem;



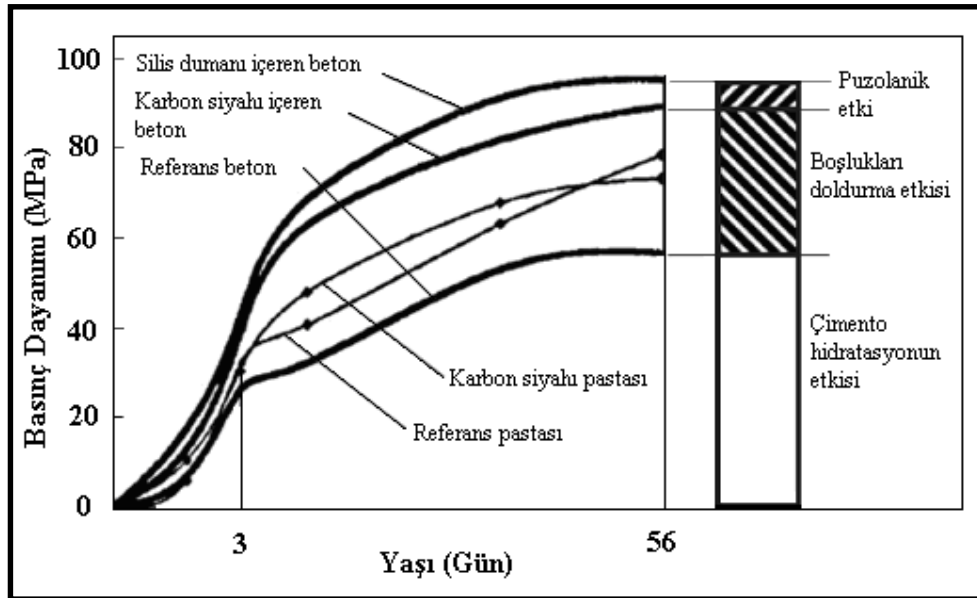
şeklinde olur ve reaksiyon sonucu yine bağlayıcılık özelliği olan C-S-H bileşenleri oluşur [12].

Silis dumanının bu etkisi, porozitenin daha fazla olduğu ve  $\text{Ca(OH)}_2$  kristallerinin biriktiği agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde, aderans arttırarak, dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek olan bir iç yapı oluşturur. Bu özeliği sayesinde yüksek dayanımlı yapıların uzun süreli performanslarında sağladığı üstünlükler nedeniyle, yüksek fiyatına rağmen, tercih edilen bir malzeme olmaktadır [9].

Silis dumanının dayanıma asıl etkisi boşlukları doldurma etkisidir[10]. Silis dumanının çok ince taneli olmasından dolayı, çimento ile agregalar arasındaki çok

ince boşlukları dahi doldurarak, yoğun ve yüksek dayanımlı bir matris oluşturmasıdır [11]. Bu malzemeler, agrega ve çimento arasındaki boşlukları azaltarak, daha homojen bir mikro yapının oluşmasını sağlarlar.

Goldman ve Bentur [10], yaptıkları çalışmada, silis dumanının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisinin dayanımı ne kadar etkilediğini incelemişlerdir. Bağlayıcı özelliği bulunmayıp yalnızca boşlukları doldurma etkisi olan karbon siyahı içeren, silis dumanı içeren ve referans betonları üretilmiş ve bu betonların basınç dayanımlarını elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2.Boşlukları doldurma malzemesi ve puzolanın, betonun basınç dayanımına etkisi [10]

Doldurma etkisinin basınç dayanımına etkisi, puzolanik etkiden oldukça fazla olduğu, hatta dördte bir oranına yakın olduğu daha önce yapılmış çalışmalardan anlaşılmaktadır [13-17]. Bu doldurma etkisi RPB’de sadece çimento tanelerinin değil aynı zamanda pudraların da arasını doldurmak için gereklidir.

Normal beton heterojen bir malzemedir ve betonda agregalar (kum, çakıl) çimento pastasının içerisinde bitişik taneli bir iskelet elemanları ve hacimsel açıdan büyük bileşenlerdir. Bunun anlamı pasta büzülmesinin küçük bir oranı taneli iskelet tarafından engellenir ve sonuçta boşluklar artar. Bu RPB da ise pastanın hacmi kum

içeriğinden en az %20 daha fazladır. Böylece agregalar sıkı bir iskelet oluşturmazlar. Ama sürekli matris içerisinde bir dizin oluştururlar. Pasta büzülmesi her agrega parçası tarafından bölgesel olarak engellenir. Özellikle pudra malzemeler pastada bulunan bir puzolan gibi bulunarak mikro boyutta kimyasal büzülmeleri sınırlandırabilmektedir. Bu sınırlama pastadaki boşluk miktarını azaltmaktadır. Homojenliğin artırılması için agrega tane boyutu küçültülerek kaba agregalar karışımlardan çıkarılmaktadır. Agrega boyutunun azaltılması sadece homojenlik için değil aynı zamanda aderans alanının artırılması ve agrega matris ara yüzeyinin istenilen düzeye gelmesine de katkı sağlamaktadır. Agreganın pastaya göre oranının azaltılması da yine homojenliğe olumlu katkı sağlamaktadır.

RPB'da kullanılan agregaların, yüksek dayanımlı kuvars, silis ve bazalt gibi sağlam mineralojik yapıya sahip saflığı yüksek malzemeler olması gerekmektedir. Bu malzemeler sadece Bu malzemelerin doğal olanları betonun su ihtiyacı açısından yararlı etkilere sahip olduğu için tercih edilirken, kırmataş olanlar ise, bağlayıcı pasta ile çok iyi bir ara yüz oluşturduğu için tercih edilmektedir. Sonuçta her iki tipte RPB'da kullanılabilir [18].

RPB'de kullanılan agregalar, pudra ve kum olarak iki farklı tipte bulunmaktadır. Pudra malzeme 0-100 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsarken kum 100-2000 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsamaktadır. Doğal malzemelerden 0-100 µm boyutundaki malzemenin içerisinde aynı zamanda kil bulunmaktadır. Bu karışımın su ihtiyacını, işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle kullanılacak pudra inceliğindeki malzemelerin, dayanımı yüksek kayaların kırılıp öğütülmesi ile elde edilmesi beton özelliklerine olumlu etki yapmaktadır.

RPB'nın su/çimento oranının 0,30 mertebesinde olması işlenebilirlik için kimyasal katkı kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Yüksek dozajda silis dumanı (SD) kullanılması, hem taze betonun işlenebilirliğini azaltmakta, hem de gerekli su miktarı artırmaktadır. Bu durumda, silis dumanlı betonlarda, süper akışkanlaştırıcı kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. SD tanelerinin yüzey alanlarının çok büyük olması, taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton

yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına neden olmaktadır. Yani SD katkılı betonlarda terleme önemli miktarda azalmaktadır. Ancak terlemenin çok azalması veya hiç oluşmaması da plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırmaktadır. Bu nedenle bu tip betonlarda etkili bir kimyasal katkı kullanılması kaçınılmazdır [5].

En etkili süper akışkanlaştırıcılardan olan polycrylate-içerikli dağıtıcı etkiler, bu betonlar için uygun gözüktüğü de geciktirici özellik sergilemesi pratik uygulamalar için bir problem olduğu için kullanımını kısıtlamaktadır. Bunun için geleneksel süper akışkanlaştırıcılar daha zayıf sonuçlar vermesine rağmen çimento ile uyumluluğundan dolayı tercih edilmektedir. Düşük s/ç oranları için bu katkılardan yüksek oranlarda RPB’de kullanılmaktadır. Bu oran, çimento içeriğinin %1,5-3’ü arasında değişiklik gösterirken, kimyasal katkının etkin madde kısmı yani katı kısmı dikkate alınarak, diğer kısmı karışım suyu olarak düşünülerek daha düşük oranlarda değerler gösterilebilmektedir. Kullanılacak katkı tipi ve miktarı, çimento tipi ve dozajından bağımsız düşünülmemelidir. Katkı oranı aynı zamanda pudra ve kumun özelliklerine bağlı olarak ta farklılık gösterebilmektedir. Örneğin kırma taş pudra ve kum kullanımı katkı miktarını arttırırken doğal agrega kullanımı azaltmaktadır. Bununla birlikte çimento tane boyutuna yakın boyutta olan pudra miktarı da katkı oranını etkilediği yapılan ön deneylerde görülmüştür.

Çok yüksek basınç dayanımlı bir matris üretilmesine rağmen süneklilik normal betonlardan daha iyi değildir. Tellerin katılması çekme dayanımını arttırır ve ayrıca süneklilik düzeyini yükseltir. Lifler RPB’nin sünekliliğinin arttırılması için katılmak zorundadır. Düzgün kancasız çelik fiberler 0,16 mm’lik bir çapta ve 6-13 mm uzunluğunda olan mikro boyuttaki lifler hacmin %1,5 – 6 arasında bir oranda karışıma ilave edilir. RPB için mekanik performans (basınç ve çekme gerilmesi) iyileştirilmesi beton içerisinde rastgele dağılmış şekilde 3 mm’den daha kısa kesilmiş liflerin agrega olarak kullanılmasıyla elde edilir. Bu durumda basınç dayanımı artarken kırılma enerjisi azalmaktadır [5].

### 2.1.2. RPB'nin karışım oranları

RPB için bir araştırma programı yapan Richard ve arkadaşları [5], karışım belirlenmesinde, aşağıdaki prensipleri uygulanmışlardır.

Kaba agregaların çıkartılması ile homojenliğin artırılması, sertleşme süreci ve öncesinde basınç uygulanması ve taneli karışımın optimize edilmesi ile sıkışmış yoğunluğun artırılması, sıcak kür etkisiyle hızlı sertleşme ve mikro yapının iyileştirilmesi, küçük boyutta çelik tellerin katılmasıyla sünekliğin artırılması, karışımın korunması için, dökümün bilinen tekniklerle iyi bir şekilde yapılması, normal beton heterojen bir malzemedir ve agregalar çimento pastasının içerisinde bitişik taneli bir iskelet şeklindedir. Heterojenlik ile ilgili problemler aşağıdaki uygulamalar ile RPB'de azaltılmıştır. Kaba agreganın çıkartılarak yerine ince kum (Maks. 600  $\mu\text{m}$ ) konması, agrega/matris oranının düşürülmesi, pastanın mekanik özelliklerinin artırılarak, pasta-agrega ara yüzeyinin iyileştirilmesidir [5, 18].

Reaktif pudra betonlarının karışım tasarımı için henüz bir standart mevcut değildir. Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmıştır. Bu teoriler, Mooney'in süspansiyon viskozite modelinden türemiştir [19]. Mooney'in modelinden yola çıkarak farklı karışım tasarımları yapılmıştır. Bu karışım tasarımlarından genel olarak kullanılan karışımlar Tablo 2.1'de verilmiştir [5].

Tablo 2.1. Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonlarının çimentoya göre karışımın oranları [5]

Malzemeler	RPB 200				RPB 800	
	Lifsiz		Lifli		Silis	Çelik
Portland Çimentosu	1	1	1	1	1	1
Silis Dumanı	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Kum 150-600 $\mu\text{m}$	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Kırılmış Kuartz $d_{50}=10 \mu\text{m}$	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Süper Akışkanlaştırıcı	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Çelik Tel L = 12 mm	-	-	0,175	0,175	-	-
Çelik Tel L = 3 mm	-	-	-	-	0,63	0,63
Çelik agregalar < 800 $\mu\text{m}$	-	-	-	-	-	1,49
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19



Dugat ve arkadaşları [20], reaktif pudra betonlarının mekanik davranışını inceledikleri çalışmalarında, RPB200 ve RPB800 betonları için karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımlara ait malzeme miktarları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2.RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları [20]

Malzemeler (kg/m <sup>3</sup> )	RPB200	RPB800
Portland çimentosu	950	980
Silis dumanı	237	225
Kırılmış kuvars	-	382
Silis kumu	997	490
13 mm çelik lif	146	-
3 mm paslanmaz çelik lif	-	617
Süper akışkanlaştırıcı	17	18
Toplam su	180	186
Su/bağlayıcı (Çimento+silis dumanı)	0,15	0,14

Karışım oranları incelendiğinde, çimento miktarının normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre oldukça fazla olduğu su/çimento (s/ç) oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu betonlarda çimentonun tamamı yeterli su bulamadığı için hidrate olamaz ama çimento tane boyut ile silis dumanı ve pudra tane boyutu birbirine yakın olduğu için hidrate olmayan çimento taneleri agrega olarak görev yapmaktadır.

### 2.1.3. RPB’nin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı

RPB diğer betonlara göre üstün mekanik özelliklere sahip bir betondur ve bazı mekanik özellikleri çelikler ile kıyaslanabilecek düzeydedir. Bu mekanik özelliklerin kazanılmasında da en önemli özelliklerden olan homojenlik ve içyapı kusurlarındaki hataların minimize edilmesi her zaman çelik türü malzemeler dikkate alınarak düşünülmektedir. RPB’ler bazı uygulama alanlarında çeliğe alternatif malzeme olarak kullanılmaya başlamıştır [2].

Betonun mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için temel ilke, agrega-matris ara yüzeyinde iyi bir yapışma ve mümkün olan en yoğun matrisin elde edilmesidir. Bu bütün betonlarda istenilen bir durumdur. RPB konusu hakkında ilk çalışmaları yapan

araştırmacılar RPB'yi, RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki tip olarak isimlendirmişlerdir. Bunlarda RPB200 olarak adlandırılan tip normal beton üretim teknikleri ile üretilebilirken RPB800 normal betondan farklı üretim teknikleri ile üretilmektedir. Her iki tipe ait mekanik özellikler bu konuda ilk çalışmalarını yapan Richard ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Mekanik özellikler ve üretim tekniğı hakkında genel bilgi Tablo 2.3'te verilmiştir [5].

Tablo 2.3. Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri [5]

	<b>RPB 200</b>	<b>RPB 800</b>	
<b>Ön sertleşme basıncı</b>	Yok	50	
<b>Sıcak kür</b>	20°C ile 90°C	250°C ile 400°C	
<b>Basıncı dayanımı (MPa)</b>	170-230	Kuvars kumu	490-680
		Çelik agrega	650-810
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>	30-60	45-141	
<b>Kırılma enerjisi (J. m<sup>-2</sup>)</b>	20000-40000	1200-20000	
<b>Son deformasyon (m.m<sup>-1</sup>)</b>	5000 x 10 <sup>-6</sup> -7000 x 10 <sup>-6</sup>	5000 x 10 <sup>-6</sup> -7000 x 10 <sup>-6</sup>	
<b>Elastisite modülü (GPa)</b>	50-60	65-75	

RPB200 betonların üretim aşamasında ön basınç tekniğı kullanılmaz yani taze haldeki betona basınç uygulanarak sıkıştırılmaz ve bu betonların üretimi geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir. RPB'nun mekanik özellikleri Dugat ve arkadaşları tarafından da incelenmiş ve sonuçlar Tablo 2.4'te verilmiştir [20].

Tablo 2.4. Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri [20]

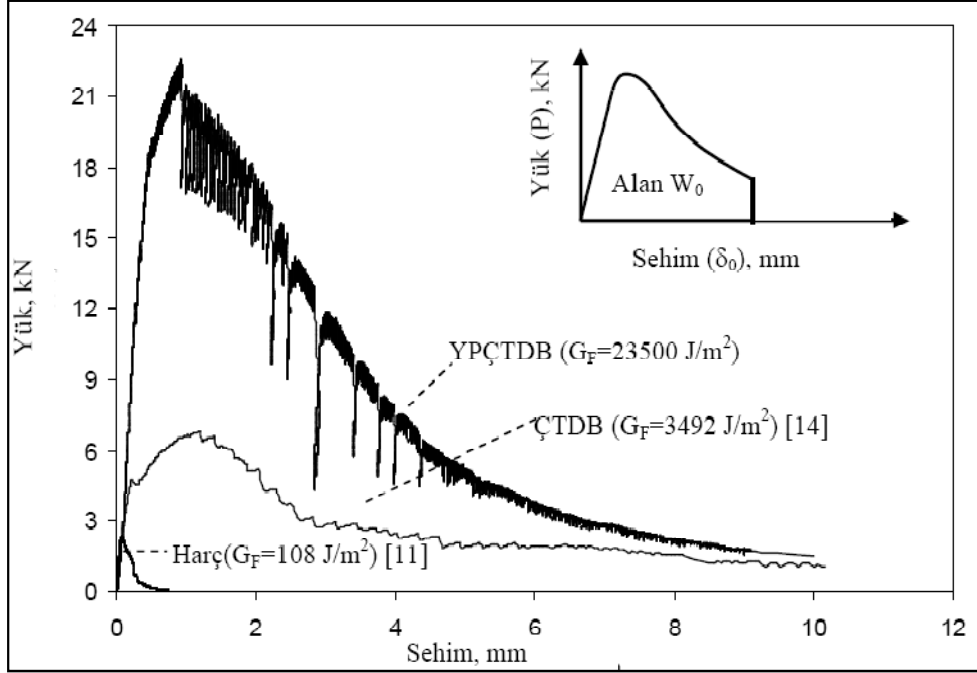
<b>Özellikler</b>	<b>RPB200</b>	<b>RPB800</b>
Basıncı dayanımı (MPa)	194-203	422-520
Statik elastisite modülü (GPa)	62-66	63-74
Dinamik elastisite modülü (GPa)	59-61	32-36
Statik poisson oranı	0,22-0,24	0,19-0,28
Dinamik poisson oranı	0,22-0,24	-
Lineer elastik sınır (dayanımın) (%)	60	-

Aynı araştırmacılar RPB'yi normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırmışlardır (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. RPB'nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması [20]

Mekanik Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Reaktif Pudra Betonu
Basınç dayanımı (MPa)	20-50	60-80	200-800
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	15-140
Kırılma enerjisi (J/m <sup>2</sup> )	130	140	1000-40000
Son gerilme uzaması (10 <sup>-6</sup> )	100-150	100-150	2000-8000

Tablo 2.5 incelendiğinde RPB'yi, normal ve yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldığında RPB'nin mekanik özelliklerinin diğer betonlardan çok üstün olduğu görölmektedir. Ayrıca, RPB'lerin en önemli özelliğinin yüksek enerji yutma kapasitesi olduğu görölmektedir. Karışıma eklenen çelik lifler sayesinde malzeme çok daha sünek bir davranış sergilemekte ve bunun sonucu olarak ta daha fazla enerji yutarak kırılmaktadır. Şekil 2.3'te Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB) ve Normal harcın kırılması karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere UYPB normal harca göre daha uzun sürede ve çok daha büyük şekil değiştirme yaparak kırılmakta, böylelikle normal harca göre çok daha fazla enerji yutmaktadır [21].

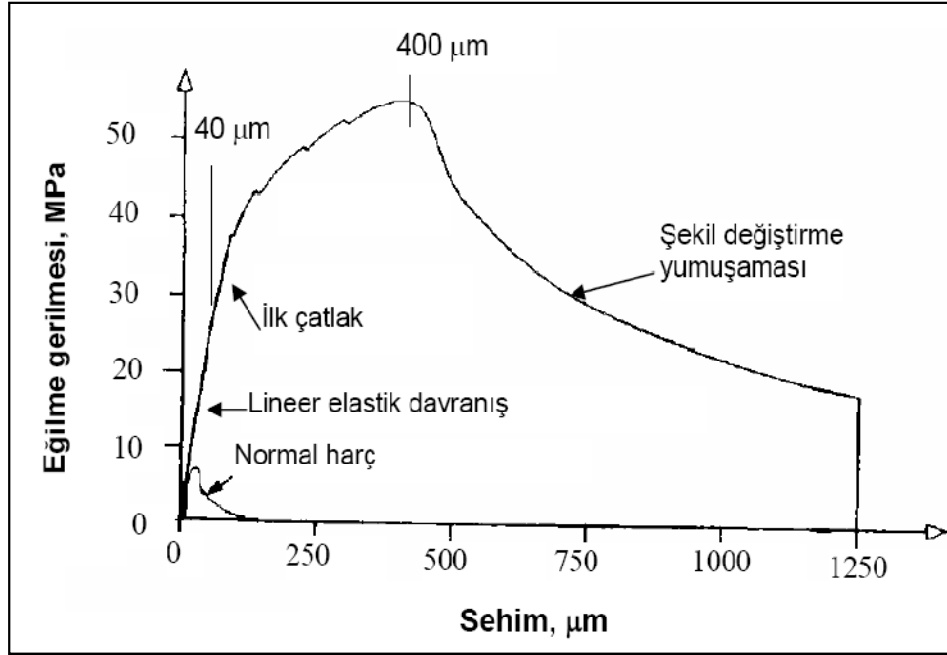


Şekil 2.3. Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı [21]

Lif katkılı reaktif pudra betonunda en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında, çeliğin gerilme deformasyon grafiğinde olduğu gibi, şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir (Şekil 2.4).

Şekil 2.4'te normal harcın ve RPB200'ün (basınç dayanımı 200 MPa) basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlamadaki gerilmenin iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür [18,21].

Mikro yapının çok iyi olması, kompasitesinin yüksek olması ve mikro boyutta kullanılan malzemeler nedeniyle RPB'de geçirimsizlik çok düşük olmaktadır. Bu da dayanıklılığa direkt olarak olumlu etki yapmaktadır. Tablo 2.6'da ise RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların durabilite yönünden karşılaştırılması verilmektedir [22-26]. Dayanıklılık özellikleri sayesinde RPB'ler, radyoaktif malzemelerin, kimyasal atıkların depolanması gibi yerlerde tercih edilmektedir.



Şekil 2.4. Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı [21]

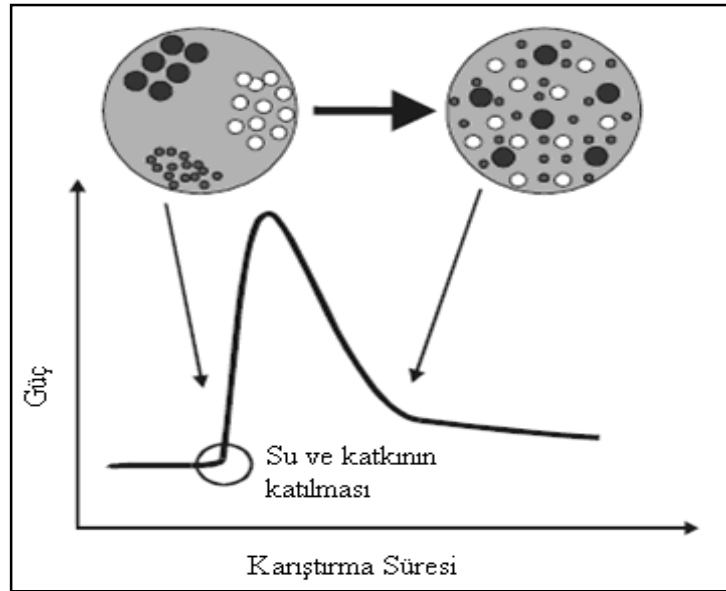
Tablo 2.6. RPB ile normal ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması [22-26]

Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	RPB
Permabilite K (m <sup>2</sup> )	6,7 <sup>-17</sup>	4 <sup>-17</sup>	0,01 <sup>-17</sup>
Aşınma dayanımı	-	-	2-3 kat>YDB
Donma Çözünme (Çevrim)	50	150	Zarar yok
Su emme	1-4	0,25	0-0,05

#### 2.1.4. RPB'nin üretim teknolojisi

RPB'nin mekanik özelliklerinin artması ile üretin teknolojisi değişmekte ve zorlaşmaktadır. Basınç dayanımı 200 MPa(RPB200) civarında olan RPB'nin üretim teknoloji normal betonlara yakın olmasına rağmen yine de ayrı bir teknik ve deneyim gerektirmektedir. RPB, düşük su/çimento oranına sahip bir beton olduğu için betonu kimyasal katkı yardımıyla akıcı bir hale getirmek gerekmektedir. Ancak katkılar betona karıştırıldıktan hemen sonra etkilerini gösterememektedir. Betonu bir süre karıştırdıktan sonra etkilerini yavaş yavaş göstermektedirler. Bu nedenle katkı etkisini gösterene kadar ki karıştırma işlemi önem kazanmaktadır [18].

RPB'nin karıştırma işlemi üzerine Mave Orgass bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda karıştırma işlemi ile ilgili Şekil 2.5'deki grafiği elde etmişlerdir. Grafiğe göre, karıştırmada harcanan güç, katkı ve suyun eklenmesi ile ani olarak artmakta ve daha sonra katkının etkisini göstermesiyle yine ani olarak azalmaktadır [27].



Şekil 2.5. Karışım işlemi süresince güç tüketimi [27]

Karışımında kullanılan mikserin Şekil 2.5'deki tepe noktasını aşacak güçte olması gerekmektedir. Aksi takdirde tepe noktası aşılamamakta ve beton elde edilememektedir. RPB'nin kıvamı genellikle likit duruma yakındır. Kendiliğinden kalıba yerleşme eğilimindedir. RPB200 için yerleştirmede genellikle herhangi bir ek işleme gerek yoktur.

RPB'ye farklı tiplerde kürler uygulanmaktadır. RPB200 için normal beton kürü uygulanabildiği gibi sıcak kür işlemi de uygulanabilmektedir. RPB200 ve RPB800 de yüksek dozajda puzolan kullanıldığı için genellikle sıcak kür işlemi tercih edilmektedir. Bu kür tipleri, 20°C su, 90°C buhar, 90°C sıcak su, basınçlı buhar kürü, 200-500°C arasında sıcak hava ve bu kürlerin birbiri ile kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. RPB800 için istenilen dayanıma ancak yüksek derecelerdeki kür işlemi ile ulaşılabilir. Yüksek derecelerdeki (250°C-400°C) sıcaklık hem

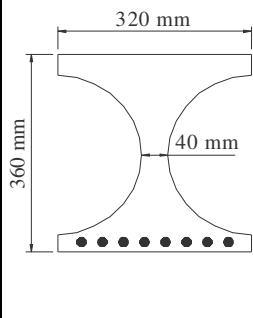
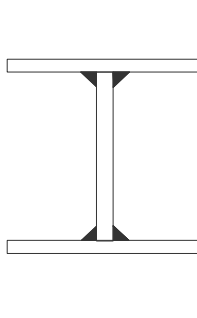
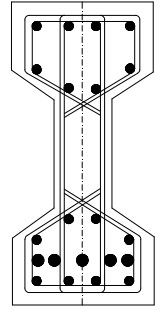
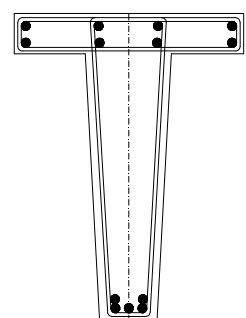
puzolanik aktiviteyi hızlandırır hem de sertleşmiş pastanın büyük ölçüde yeniden hidrasyonuna eşlik ederek kristal hidratelerin oluşumuna yol açar [5, 12-15 18].

### **2.1.5. RPB'nin kullanım alanları**

Mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından diğer betonlara göre daha üstün olan RPB'nin, şantiye şartlarında üretimi oldukça zordur. Bu nedenle şu ana kadar bütün ürünler prefabrik olarak üretilmiştir. Prefabrik olarak üretilen elemanlar genellikle köprülerde kullanılan kirişler şeklinde olmuştur.

Normal beton ile üretilen prefabrik ön gerilmeli kirişlerde, çelik ön germe halatlarının dışında, üretilen elemanın bütünlüğünün bozulmaması ve kompozit olarak hareket edebilmesi için ikinci bir donatı konulmasından dolayı maliyeti arttırmaktadır. RPB ile yapılan ön gerilmeli prefabrik kiriş elemanlarda ikinci bir donatıya gereksinim duyulmamakta ve eleman boyutları küçülmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmanın sonuçları Tablo 2.7'de verilmiştir [28-30]. Tablo2.7'de RPB, aynı moment taşıma kapasitesine (675 kNm) sahip, çelik, ön gerilmeli beton ve betonarme kirişler ile karşılaştırılmıştır. Burada RPB, çeliğe alternatif bir malzeme olarak gösterilmiştir. Geleneksel betonda biraz pahalı olmasına karşılık çelik malzemedен daha ucuzdur. Büyük mimari özgürlüklere sahip çok narin yapıların tasarımına olanak sağlamaktadır.

Tablo 2.7. Eşit moment taşıma kapasitesine sahip kirişlerinin karşılaştırılması [28-30]

Kesit şekli				
Kesit tipi ve yüksekliği	Ön Gerilmeli RPB 360 mm	Geniş Tablalı Çelik 360 mm	Ön Gerilmeli Beton 700 mm	Betonarme 700 mm
Ağırlık	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

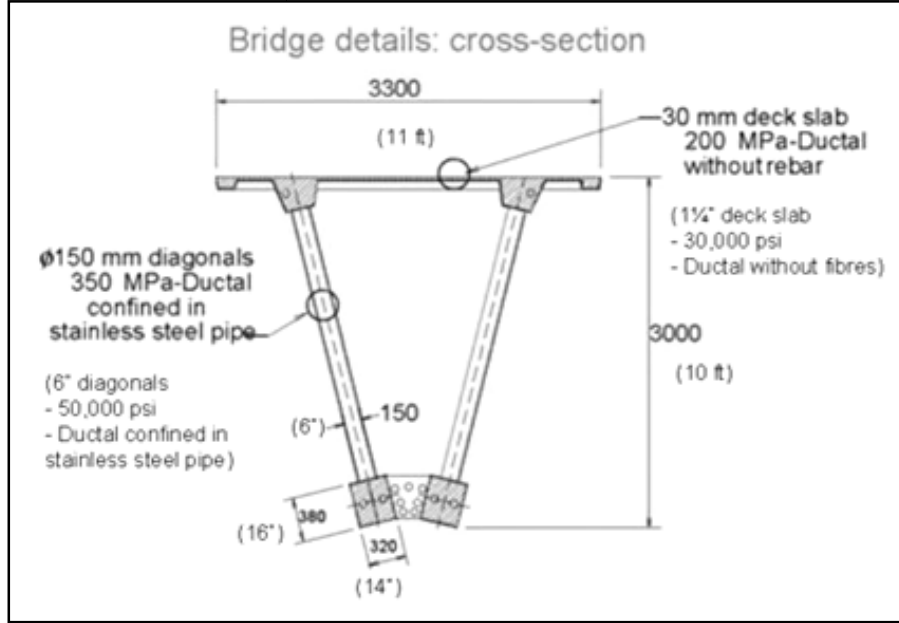
RPB200'ün üretiminde ön basınç tekniği kullanılmaz ve geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir. Bu betonların yüksek süneklik göstermesi nedeniyle geleneksel pasif güçlendirmeye tabi olmayan yapılar için kullanıma elverişlidir. RPB'nin çekme ve basınç dayanımının yüksek olması nedeniyle çekme ya da eğilmeye çalışan ön gerilmeli elemanlarda kullanılır.

RPB800 yalnız prekast elemanların üretimi için kullanılır. RPB800 askeri yapılarda, mekanik parçaların üretiminde çeliğin yerine kullanılabilceği düşünülmektedir. Bu malzeme hem de patlama dağılma kopma etkisi yönünden çok iyi dayanıklılığına sahip olması ile askeri ekipman ve yapılarda kullanılabilir. Mekanik özelliklerin haricinde RPB betonlar ultra yoğun bir mikro yapıya sahiptirler. Buda dayanıklılık ve su geçirmezlik avantajı verir. Bu malzemeler endüstriyel ve nükleer atıkların depolandığı tesislerde de kullanılabilir [5, 18, 31].

Reaktif pudra betonlarının ilk kullanımı, 1997 yılında Kanada'nın Quebec eyaletinin güney doğusunda bulunan Sherbrooke şehrinde bir yaya köprüsünde olmuş ve köprülerde kullanımı daha sonraki yıllarda giderek artmıştır (Şekil 2.6.) [6, 18]. Bu köprü Magog nehri üzerine ve daha önceden nehir üzerindeki çelik yaya köprüsünün hemen yanına yapılarak inşası bittikten sonra eski çelik köprü yıkılmıştır. Yapım



amacı, yeni bir malzemenin denenmesinin yanı sıra estetiklidir. Köprü kirişleri ticari isim olarak Lafarge firmasının Ductal isimli sistemi ile yani ince cidarlı ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır.



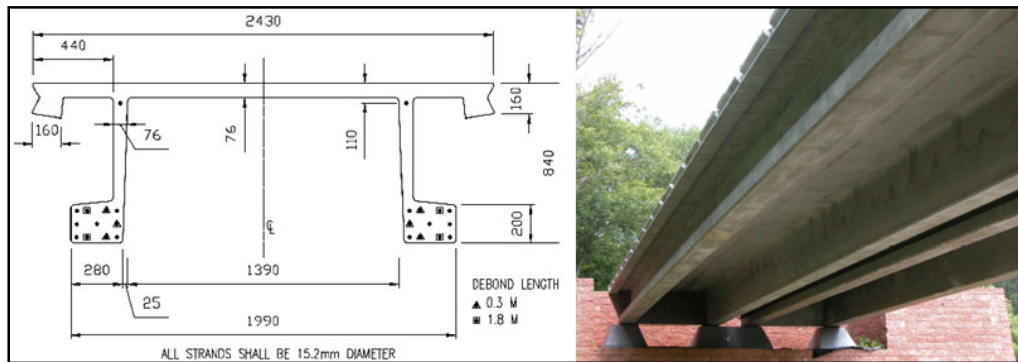
Şekil 2.6. Sherbrooke şehrindeki, RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü kiriş kesiti [32]

Köprü yaya ve bisiklet köprüsü olarak prefabrik ve ön gerilmeli olarak imal edilmiştir. Köprünün açıklığı 60 m, genişliği 3,30 m'dir. Köprü, 6 adet 10 m uzunluğunda 3,30 m genişliğinde ve 55 ton ağırlığındaki parçaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Köprüde kullanılan diyagonal elemanlar 150 mm'lik paslanmaz çelik tüplerin içerisine yaklaşık 200 MPa basınç dayanımına sahip RPB doldurularak sıkıştırılması ile elde edilmiştir [18,32]. RPB kullanılarak 2005 yılında Avustralya'da Shepherds ırmağı üzerine araç köprüsü yapılmıştır (Şekil 2.7.) [18,33].

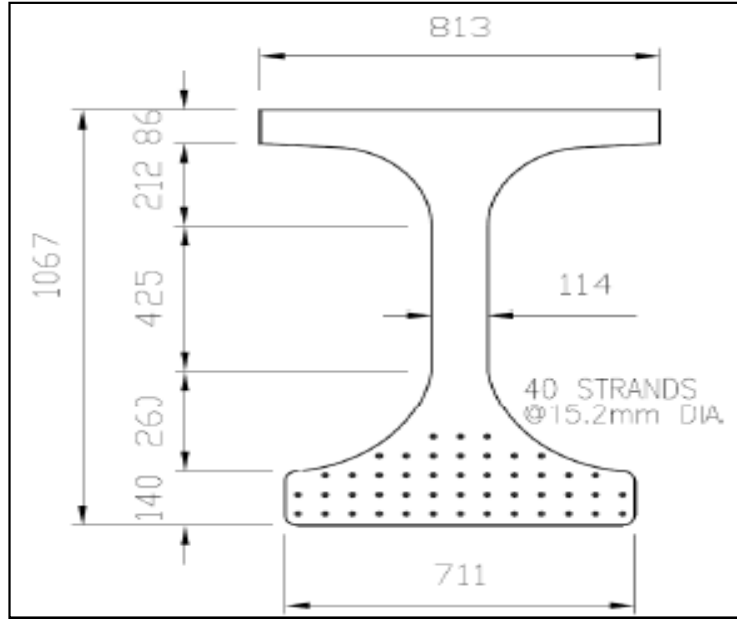


Şekil 2.7. Shepherds ırmağı üzerindeki, RPB kullanılarak yapılan ilk araç köprüsü kirişi [33]

Toplam açıklığı 15 m uzunluğunda olan ve 20,8 m genişliğinde olan köprünün yapımı prefabrik ve ön gerilmeli I kesitindeki RPB kirişler ile gerçekleştirilmiştir. Köprünün yapım aşaması, normal betonla yapılan köprü ile aynı şekilde olmuştur. Köprünün 15,1 m uzunluğundaki I kirişlerinin ağırlığı 4,2 ton olurken, aynı taşıma kapasitesine sahip normal beton ile yapılanın ağırlığı 9 ton olarak hesaplanmıştır. Bu RPB ile yapılan elamanların ağırlık yönünden daha üstün olduklarını göstermektedir. Amerika’da araştırmacılar, RPB ile araştırma amaçlı portatif bir RPB köprüsü yapmışlardır (Şekil 2.8.) [34]. RPB’den ilk kez otopan köprüsü 2005 yılında Amerika’da yapılmıştır (Şekil 2.9) [18,35,36,]. Köprü kirişlerinin uzunluğu 35,6 m ve kesiti şekildeki gibi PI şeklindedir. Kirişler ticari isim olarak adlandırılan Lafarge Ductal sistemi ile yapılmıştır.

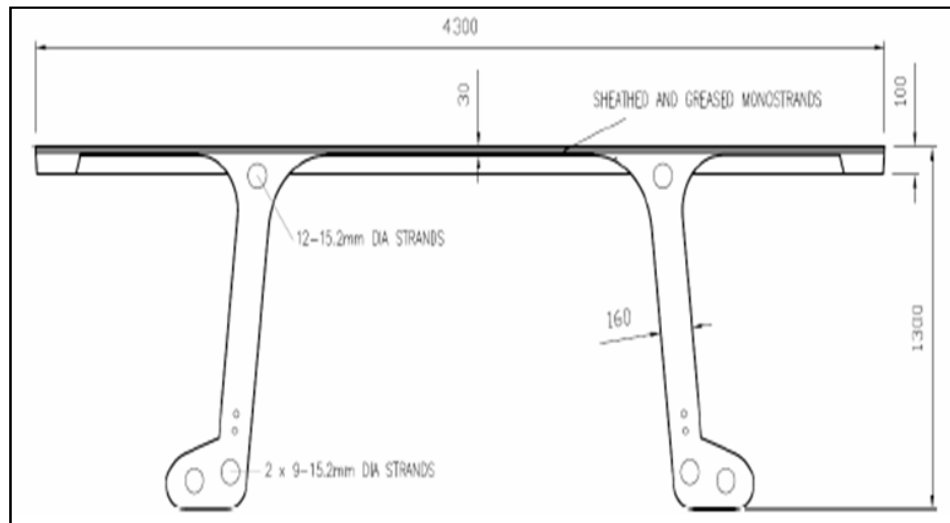


Şekil 2.8. RPB’den araştırma amaçlı yapılmış köprü ve kirişi [34]



Şekil 2.9. Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü kirişleri [35, 36]

RPB'den yapılan en büyük köprü Kore Sunyudo'da 2002 yılında, 120 m açıklığında olan yürüyüş ve bisiklet köprüsüdür (Şekil 2.10-11) [37]. Köprü kirişleri ticari isim olarak adlandırılan Lafarge Ductal sistemi ile PI şeklinde Şekil 2.10'da verilen şekildeki ölçülerde yapılmıştır.

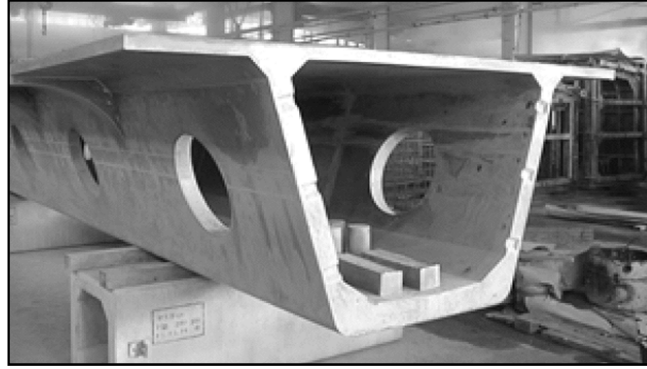


Şekil 2.10. Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk köprü'nün kiriş kesiti [37]



Şekil 2.11. Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk yaya köprüsü [37]

RPB kullanılarak yapılan diğer bir yaya köprüsü de Japonya'da yapılan Sakata-Mirai yaya köprüsüdür (Şekil 2.13) [38]. Yaya köprüsü parça kirişlerden prefabrik ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır.



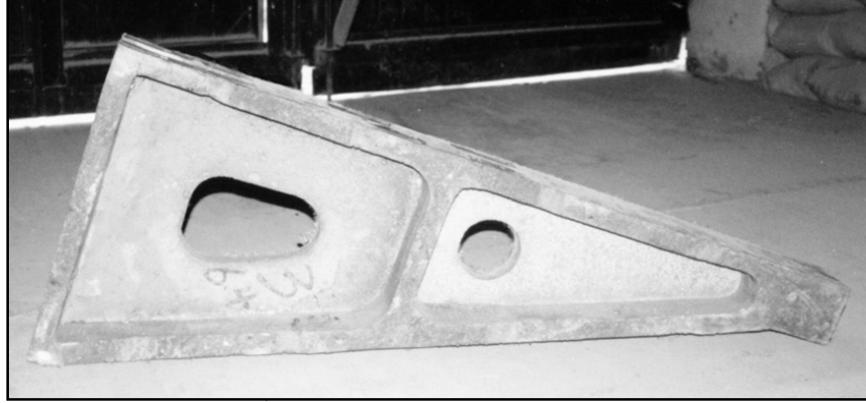
Şekil 2.12. Sakata-Mirai RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü kirişleri [38]

RPB kullanılarak yapılan ilk üst geçit köprüsü Yeni Zelanda'da yapılmıştır. [39]. Köprü toplam 10 adet ayağa, toplam 120 m uzunluğa ve en büyük 20 m açıklığa sahiptir (Şekil 2.13).

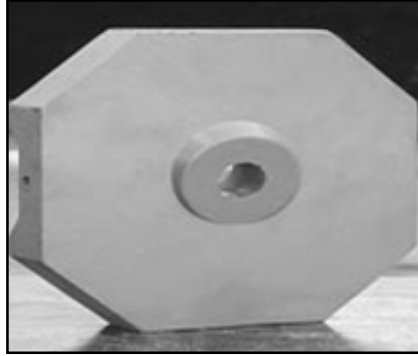


Şekil 2.13. Papatoetoe ve Penrose RPB kullanılarak yapılan üst geçit köprüsü kirişleri [40]

Üst geçit köprüsü Şekil 2.14'teki gibi tek bir parça kirişten prefabrik ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır. Köprü kirişlerin dışında RPB, ankraj plakası, ses bariyeri, kaldırım elemanları, yağmur suyu ızgaraları ve kapakları gibi prefabrikasyon üretime uygun yapı elemanları üretilmektedir (Şekil 2.14-17) [18, 40, 41, 42].



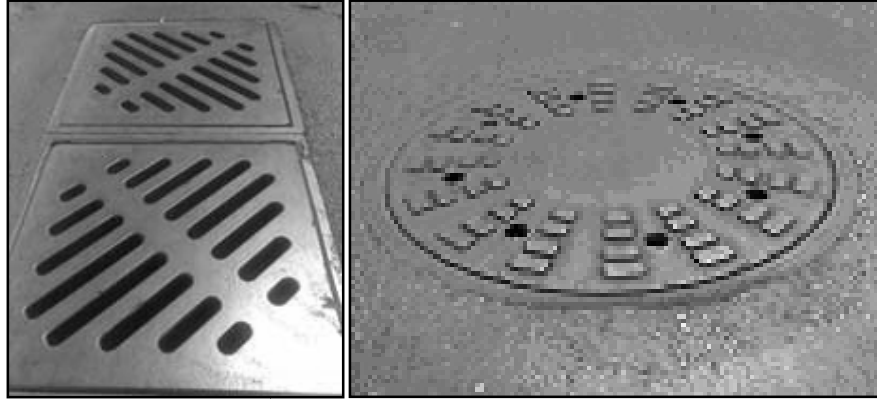
Şekil 2.14. RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırımı elemanı [40]



Şekil 2.15. RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası [41]



Şekil 2.16. RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri [41]



Şekil 2.17. RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapağı [42]

### 2.1.6. RPB ile ilgili literatür taraması

Reaktif pudra betonu, Richard ve Cheyreyz tarafından geliştirilmiş ve bu araştırmacılar bir dizi çalışmalar yapmışlardır [5]. Çalışmalarındaki amaç, içyapısı daha sıkı tane düzenine sahip olan ve mümkün olan en sıkı mikro yapıyı elde etmek ve bu mikro yapıyı yine mikro boyuttaki teller ile güçlendirerek çimento matrisli en yüksek dayanımlı betonu elde etmektir. Çalışmada aynı zamanda taze betonu 50 MPa basınç altında sertleştirerek betona farklı sıcaklıklarda kür işlemi uygulamış ve dayanımın büyük oranda arttığını gözlemlemişlerdir. RPB'yi, basınç dayanımlarına göre RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki farklı gruba ayırmışlardır. Bu ayırımın asıl amacı karışıma giren malzemelerin farklılığı ve üretim teknolojisinin farklılık göstermesidir. RPB200 normal betonun üretim teknolojisi ve kür ortamına benzer yöntemlerle üretilen, basınç dayanımı 170 MPa ile yaklaşık 230 MPa arasında olan RPB'nuna denilmektedir. RPB800 ise karışımında çelik agrega gibi farklı malzemeleri bulunan ve üretim teknolojisi ile kür ortamı farklılık gösteren ve basınç dayanımı 490 MPa ile 810 MPa arasında olan RPB'nuna denilmektedir. Daha sonra bu tür bir ayırım dikkate alınmamış karışım ve üretim teknolojisi RPB200 olan ama uygulanan kür tekniği RPB800 olan veya karışımı RPB200 olup üretim tekniği RPB800 olan farklı çalışmalar yapılmıştır [18, 20, 43, 44, 45].

P. Richard ve M. Cheyreyz tarafından yapılan bu ilk çalışma [5], RPB üretimi için bir rehber olmuş ve bundan sonra yapılan çalışmaların temel kaynağını oluşturmuştur.

Dugat ve arkadaşları [20] yaptıkları çalışmada, RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki değişik karışım üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapmışlardır. Ürettikleri RPB200 numunelere, 7 gün 20°C'de su kürü, 4 gün 90°C'de sıcak su kürü ve 2 gün 90°C'de kuru sıcak hava kürü olmak üzere 3 farklı türde kür uygulanmışlardır. Ürettikleri RPB800 türdeki betonlara yerleştirme ve sertleşme sırasında 60 MPa basınç uygulamışlardır. Ayrıca RPB800 numunelere 4 gün 90°C sıcak su ve ardından 250°C'de ısı işlem kürü uygulamışlardır. RPB200 numunelerinde basınç dayanımını yaklaşık 200 MPa, elastisite modülünü 66 GPa, eğilme dayanımını ortalama 32 MPa olarak bulmuşlardır. RPB800 numunelerinde ise basınç dayanımını yaklaşık 500 MPa ve elastisite modülünü 36 ile 74 GPa olarak bulmuşlardır. Ayrıca betona katılan lif hacminin kırılma enerjisine olan etkisini incelemiştir. Yaptıkları deneylerde, kırılma enerjisini 40,000 J/m<sup>2</sup> ulaştırmışlar ve lif hacmini optimum olarak %2 ile %3 arasında bulmuşlardır.

Chan ve Chu [46] yaptıkları çalışmada, RPB matrisinin çelik tellere yapışma özelliklerine, silis dumanının etkisi, yapışma dayanımı, pull-out enerjisi gibi özelliklerini araştırmışlardır. Silis dumanı içeriğini, %0'dan %40'a kadar çeşitli karışım oranlarında kullanmışlardır. RPB matrisine, çelik telin yapışma özelliklerini pull-out testi ile ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, silis dumanının karıştırılması tel-matris ara yüzey özelliklerini özellikle de telin pull-out enerjisini etkili bir şekilde arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Yapışma özellikleri açısından optimum silis dumanı içeriğinin %20 ve %30 arasında olduğunu göstermişlerdir. Bu oranlar aynı zamanda mikro yapısal ara yüzey gözlemlerde, pull-out test sonuçlarını doğruladığını görmüşlerdir.

Bonneau ve arkadaşları [44] yaptıkları çalışmada, RPB'nin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada üç değişik karışımla oluşturulan numuneler, basınç dayanımı, donma ve çözülme direnci ve klorür iyonu geçirimsizliği açılarından test edilmişlerdir. Aynı zamanda çelik bir tüp içinde kapalı RPB'nin davranışı da incelemiştir. Çalışmalarının sunucunda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

RPB malzemelerinin seçiminde dikkat ve özen gösterilmesi ve karışımın düzenlenmesinin tane boyut dağılımı açısından optimize edilmesi şartıyla, uygun

yerel malzemeler kullanılarak yapılabilir. RPB, normal hazır betonlar gibi üretilir. 90 °C de sıcak su kürü ve veya standart düşük basınçlı buhar kürü uygulanan numuneler için 200 MPa ve kapalı çelik tüpteki RPB numuneleri için de 285 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. Numuneler donma - çözülme deneylerinde yüksek dayanım göstermiş ve çok az bir kütle kaybı gözlenmiştir. Klorür iyonu geçirimsizliği çelik lifli numunelerde 10 Coulomb'un altında kalmıştır.

Matte ve Moranville [31] yaptıkları çalışmada, RPB'nun nükleer atıkların depolanmasında kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Çalışmalarında, RPB'nun iç yapısını (Scanning electron microscopy) ve (X-ray diffraction analyses) inceleyerek, malzemedeki Ca (kalsiyum) konsantrasyonundaki değişimi inceleyerek nükleer atıkların beton içerisindeki ilerlemesini tahmin etmeye çalışmışlardır. RPB içinde silis dumanının yararlı etkilerini X ışını difraksiyon analizleri (XRD), taramalı elektron mikroskopu(SEM), trityum yayını ve boşluk dağılımı analizlerini (civalı porozimetre (MIP)) kullanarak göstermişlerdir. Sonuç olarak silis dumanının poroziteyi ve dayanıklılık üzerinde yararlı etkiye sahip olduğunu ve nükleer atıkların depolanmasında RPB'nin kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

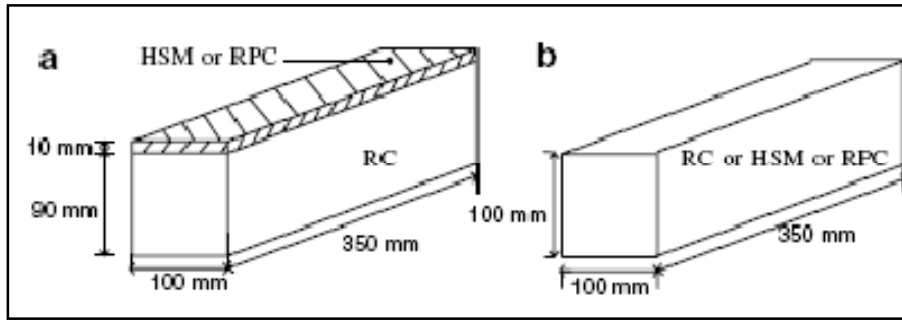
Bu çalışmaya benzer olarak, çimento matrisinin hidrasyon gelişimi ile elektriksel iletkenlik ve izotermal kalorimetri arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuçta hidrasyon derecesi ile iletkenliğin logaritması arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür [18, 47].

Ma ve Orgass [27] yaptıkları çalışmada, kaba agrega (bazalt 2-5 mm) kullanılan ultra yüksek performanslı beton ile kaba agrega kullanılmayan reaktif pudra betonunu karşılaştırmışlardır. Betonlara normal su kürü ve 90°C buhar kürü olmak üzere iki tip kür uygulamışlar ve 150-180 MPa arasında dayanımlı betonlar elde etmişlerdir. Sonuç olarak basınç dayanımı ve akıcılığı benzer olan ultra yüksek performanslı betonun çimento hacim oranı, reaktif pudra betonundan yaklaşık %20 daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ultra yüksek performanslı betonun karışımı, akıcılığı ve homojenliği reaktif pudra betonundan daha kolay olduğunu ve kısa sürdüğünü ifade etmişlerdir. Ultra yüksek performanslı betonun otojen rötresi, reaktif pudra betonun

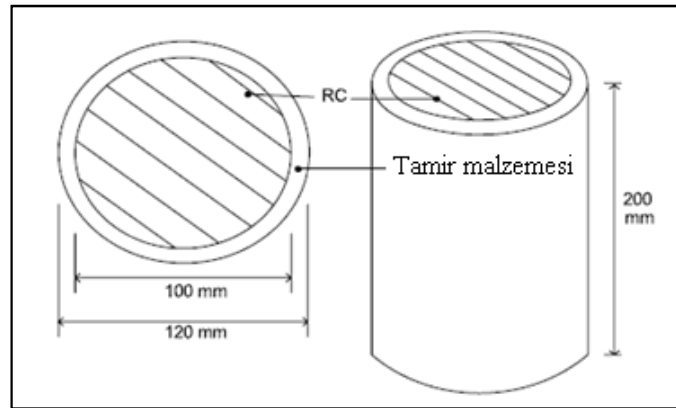


otojen rötresinin %60'ı kadar olduğunu ve ultra yüksek performanslı betonun maksimum gerilme altındaki deformasyonun, reaktif pudra betonuna göre daha az ve buna bağlı olarak elastisite modülünün daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [18,27].

Lee ve arkadaşlarının [48] yaptığı çalışmada, RPB'yi betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Normal beton kullanılarak, eğilme ve basınç numuneleri üreterek, eğilme numunelerinin alt kısmına ve basınç numunelerinin etrafına RPB ve tamir harcı yapıştırmışlardır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için yalnız normal beton, tamir harcı ve RPB kullanarak numuneler üretmişlerdir (Şekil 2.18-19).



Şekil 2.18. Eğilme testi için tamir malzemeli ve malzemesiz numune boyutları (a) Tamir harcı/normal beton yada RPB/normal beton numune boyutları (b) Normal beton, tamir harcı ve RPB numune boyutları [48]

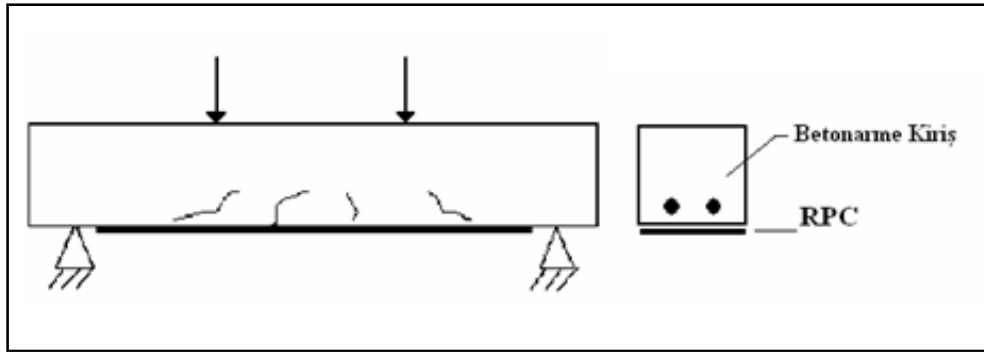


Şekil 2.19. Basınç testi için tamir malzemeli numune boyutları [48]

Bu şekilde hazırladıkları numuneleri aynı geometrik boyuttaki yalnız normal beton, RPB ve tamir harcı ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak en yüksek eğilme dayanımı sırasıyla, yalnız RPB, RPB ile güçlendirilmiş normal beton, yalnız normal beton, tamir

harcı ile güçlendirilmiş beton ve yalın tamir harcı vermiştir. En yüksek basınç dayanımını ise sırasıyla, yalın RPB, yalın tamir harcı, RPB ile güçlendirilmiş normal beton, tamir harcı ile güçlendirilmiş beton ve normal beton vermiştir.

Yerlikaya [49] yaptığı çalışmada, reaktif pudra betonunu, çelik bir levha gibi betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanmıştır. 2 cm kalınlığında imal edilen levhalar, epoksi ile kiriş altına yapıştırılarak güçlendirme yapılmıştır (Şekil 2.20). Sonuç olarak, reaktif pudra betonunu kullanılarak, yapıların daha ekonomik ve hızlı olarak güçlendirilmesinin mümkün olabileceğini ifade etmiştir.



Şekil 2.20. RPB'nin güçlendirmede kullanılması [49]

Yazıcı [50] yaptığı çalışmada, toz hale getirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanını portland çimentosuna katarak bir çalışma yapmıştır. Uçucu kül ile yüksek fırın cürufu, çimento ile %0-20-40-60-80 oranlarında yer değiştirmiştir. Bazalt ve kuvars tozu, karışımlarda agrega olarak kullanılmıştır. Üç farklı kür yöntemi (Standart, autoclave ve buhar kürü), örneklere uygulanmıştır. Standart kür 20°C sıcaklıktaki su içerisinde 28 gün, autoclave kürü, 210°C sıcaklıkta 2.0 MPa buhar basıncında, 8, 16 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede, buhar kürü, 90°C sıcaklıkta basınçsız ve 6 ile 12 gün olmak üzere iki farklı sürede, numunelere uygulanmıştır. Test sonuçları, yüksek dayanımlı betonunun, yüksek hacimde mineral katkı ile elde edilebileceğini göstermiştir. Bu karışımların basınç dayanımı, 170 MPa'nın üzerindedir. Bu karışımların reaktif pudra betonlarında kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Topçu ve Karakurt [51] yaptıkları çalışmada, hazırladıkları RPB karışımını, kalıplara döküldükten sonra 2,5 MPa aksenal basınç kuvveti altında prizini alana kadar kür uygulamışlardır. Daha sonra numunelere 7 gün süreyle 90°C suda ardından da 7 gün süreyle 250°C'de buhar kürüne tabi tutmuşlar ve bu kür sürecinin sonunda numunelere basınç ve eğilme dayanımı deneyleri uygulanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda en fazla 253,2 MPa'lık basınç ve 63,67 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşabilmışlerdir.

Yazıcı ve arkadaşları [52] yaptıkları çalışmada, RPB'de yüksek oranda kullanılan silis dumanı ve çimentoyu azaltarak yerine uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu mineral katkıların, autoclave kürü ile RPB'nin basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. İlk olarak silis dumanı ve otoklav kürünün RPB'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İkinci olarak aşama aşama çimento ve silis dumanının miktarını azaltarak yerine farklı oranlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu katmışlardır. Sonuç olarak RPB'de kullanılan uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu önemli bir dayanım düşüşüne yol açmadığını ifade etmişlerdir. Dayanımda en az düşüşe, çimento miktarının, %10 uçucu kül ve %10 granüle yüksek fırın cürufu katkılı numuneler olmuştur.

Purkiss [53] yaptığı çalışmada, normal lifli betonların, lif içermeyen betonlara göre yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek amacıyla değişik lif yüzdelerinde çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bu karışımları 300-800°C arasında değişen sıcaklıklarda deneye tabi tutmuş ve lifli betonların lif şekli ve miktarından bağımsız olarak 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda dayanımlarının normal betondan daha yüksek olduğunu görmüştür. Fakat genel olarak 800°C'lik bir sıcaklıkta tüm karışımların dayanımları azalmaktadır.

## 2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ülkemiz Avrupa Birliği uyum süreci içinde ve süreç içinde çevre, tarım, enerji, eğitim, sağlık, yargı, savunma, v.b. düzenlemeleri yapmak ile yükümlüdür. Uyum süreci içerisinde en sorunlu olarak görülenlerden "Çevre" konusu ve alt başlığı olan

“Atıklar” konusudur. Ayrıca Çevre Ajansının uyguladığı çevre ve atıklarla ilgili stratejilere de uymak zorundadır [54]. Bu bağlamda atıkların bertarafı ve değerlendirmesi ülkemiz açısından önem kazanmaktadır.

Atık ürünlerin depolanması ya da doğal çevreye atılması çevre kirliliğine ve doğal kaynakların kirlenmesi gibi sorunlara neden olabilmektedir. Günümüzde, atık ve artık olarak ortaya çıkan malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda atıklardan yeni ürünler elde edilmesi veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Atıkların yeniden kullanımı veya geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak, doğanın tahrip edilmesini önlemekte, üretimde verimliliği artırmakta ve atık depolanması sonucu oluşacak çevre problemlerini en aza indirmektedir.

Bu çalışmalar dikkate alınarak, mermer işleme endüstrisi atığı olan mermer bulamacı ile ilgili çalışmaların yapılması düşüncesi ortaya çıkmıştır. Mermerlerin ocaktan çıkarılması, blok mermerin fabrikada işlenmesi esnasında ortaya çıkan ve mamul mermer üretiminden geriye kalan bütün mermer parça ve tozları mermer atığı olarak kabul edilmektedir. Mermer atıkları, oluşum yerlerine göre ocaklarda ve fabrikalarda oluşan atıklar, boyutlarına göre ise; molozlar, kapaklar, paledyenler ve toz atıkları olarak adlandırılıp sınıflandırılmaktadırlar [54].

Mermerlerin düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilmesi gerekmektedir. Kesme işlemi sonunda mermer tozu ortaya çıkmaktadır. Mermerlerin kesiminde soğutma suyu kullanıldığından ve toz bastırıcı olarak sulu kesim yapıldığından, mermer kesiminden çıkan ince şlam boyutundaki parçacıklar başlangıçta ıslak olarak depo edilmekte veya doğrudan araziye bırakılmaktadır. Dolayısı ile çevre kirlenmesi söz konusudur. Mermer işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerdeki mermer atık sahaları, kamuoyu gözünde çevre ve doğal güzelliğe zarar verdiği gerekçesiyle tepkilere neden olmaktadır (Şekil 2.21-22).

Türkiye genelinde yıllık ortalama 1.750.000 ton mermer işlenmekte ve tesislerde işlenen mermerlerden toz ve kırıntı artıkları, işlenen mermerlerin yaklaşık olarak %30'unu oluşturmaktadır [54,55]. Değişik sanayi kollarında kullanım alanı bulabilen

kırıntı mermer atıkları, alternatiflerinin yerine kullanıldığı takdirde çok daha ucuz bir girdi olabilmektedir. Mermer fabrikalarında üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte ve çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır. Ayrıca ekosistemde yaşayan canlılar için de risk teşkil etmektedir.



Şekil 2.21. Mermer bulamacının doğada depolanması



Şekil 2.22. Mermer bulamacının doğada depolanması

RPB, diğer betonlara göre yeni ve teknolojik bir malzeme olmasının karşın, malzeme maliyetinin yüksek olması nedeniyle kullanımı sınırlanmaktadır. RPB’de kullanılan ham maddenin ucuzlaması veya alternatif ham maddelerin bulunması ile birlikte RPB ekonomiklik kazanarak kullanım miktarı artabilecektir.

Bu bağlamda çalışmanın temel amacını, RPB’ de kullanılan ve çelik liftten sonra en büyük maliyeti oluşturan kuvars pudrası ve çimentonun yerine, mermer atığı olan bulamacı farklı oranlarda ikameli olarak kullanmaktır. bunun için ilk olarak karışımdaki kuvars miktarı çıkarılmış ve aynı hacme sahip ve aynı gradasyona sahip mermer bulamacı kullanılmıştır. daha sonra karışımdaki kuvars pudrasının tamamının yerine ve çimento miktarının sırasıyla %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında ikameli olarak kullanılmıştır. Bu şekilde üretilmiş numuneler üzerinde, basınç ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici, birim hacim ağırlık deneyleri yapılarak mermer bulamacının etkisi araştırılmıştır.

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyde kullanılan malzemelerin, silis dumanı dışında tamamı ülkemizdeki kaynaklardan üretilen malzemelerden temin edilmiştir. Malzeme seçiminde öncelikle malzemelerin her zaman bol miktarda bulunan, homojen özelliklere sahip ve zamanla kalitesi ve özellikleri değişmeyen malzemeler olmasına dikkat edilmiştir.

#### 3.1.1. Çimento

Reaktif pudra betonlarının ana bileşenlerinden miktar olarak en büyüğü olan çimentodur. Bundan dolayı bu betonlarda çimento seçimi çok daha önemlidir. Amaca uygun çimento seçiminde daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmaların genelinde yüksek performanslı çimentolar kullanıldığı görülmüştür [5, 9, 12, 18, 20, 28, 50]. Yapılan deneysel çalışmaların tamamının da, Nuh Çimento fabrikası tarafından üretilen, PÇ 42,5 CEM I R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait özellikler üretici firmadan temin edilerek, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo3.1'de verilmiştir. Çimentonun özellikleri incelendiğinde, çimentoya büyük oranda bağlayıcılık özelliği sağlayan  $C_3S(3CaO.SiO_2)$  ve  $C_2S(2CaO.SiO_2)$  bileşenlerinin fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3.1).

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

	<b>Çimento</b>	<b>Silis Dumanı</b>
<b>Bileşen</b>	<b>Miktarı %</b>	<b>Miktarı %</b>
CaO	64,47	0,50
SiO <sub>2</sub>	20,09	96
C	-	1,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,01	0,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,73	0,25

Tablo 3.2. Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Devamı)

MgO	1,95	0,60
K <sub>2</sub> O	0,66	0,85
Cl	0,01	0,10
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,10
SO <sub>3</sub>	2,65	0,50
H <sub>2</sub> O		0,80
Kızdırma kaybı	2,34	1,50
İri Parçacıklar(>45µm)		1,00
pH değeri (taze)		5,0-8,0
<b>Özellik</b>	<b>Değer</b>	<b>Değer</b>
Blaine özgül yüzeyi	3830 cm <sup>2</sup> /gr	200000 cm <sup>2</sup> /gr
Birim hacim ağırlık	-	0,650 gr/cm <sup>3</sup>
Özgül ağırlık	3,16	2,260
Priz başlangıcı	156 dakika	-
Priz sonu	198 dakika	-
Hacim Genleşmesi	1,1 mm	-
2 günlük basınç dayanımı	27,3 MPa	-
7 günlük basınç dayanımı	-	-
28 günlük basınç dayanımı	55,3 MPa	-

### 3.1.2. Silis dumanı

Silis dumanı, silikon veya demirli silisyum imalatı sırasında atık olarak ortaya çıkan şekilsiz şeffaf silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) kürelerinden oluşan bir mineraldir. Bu kürelerin ortalama büyüklüğü 0,5µm altındadır yani çimento tanesinden yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Silis dumanının Blain değeri yaklaşık 20000 cm<sup>2</sup>/gr'dır [11, 56].

Yapılan deneysel çalışmaların tamamında, silis dumanı olarak Norveç'te bulunan Elkem firmasının 968-U kodlu yoğunlaştırılmamış silis dumanı kullanılmıştır.

Ayrıca silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri üretici firmadan temin edilerek Tablo 3.1'de verilmiştir.



### 3.1.3. Kuvars pudrası

Reaktif pudra betonunun ismindeki pudra kelimesi, bu betonlarda kullanılan mikron boyuttaki silis ve kuvars pudrasından gelmektedir. Kuvars pudrası yapay yani kırma taş agregadır. Pudranın kimyasal özelliklerine ait bilgiler üretici firma tarafından verilmiştir. Fiziksel özelliklere ait bilgiler ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Fiziksel özelliklerden birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında, özgül yüzey ise TÇMA laboratuvarında test edilmiştir. Bu pudraların kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

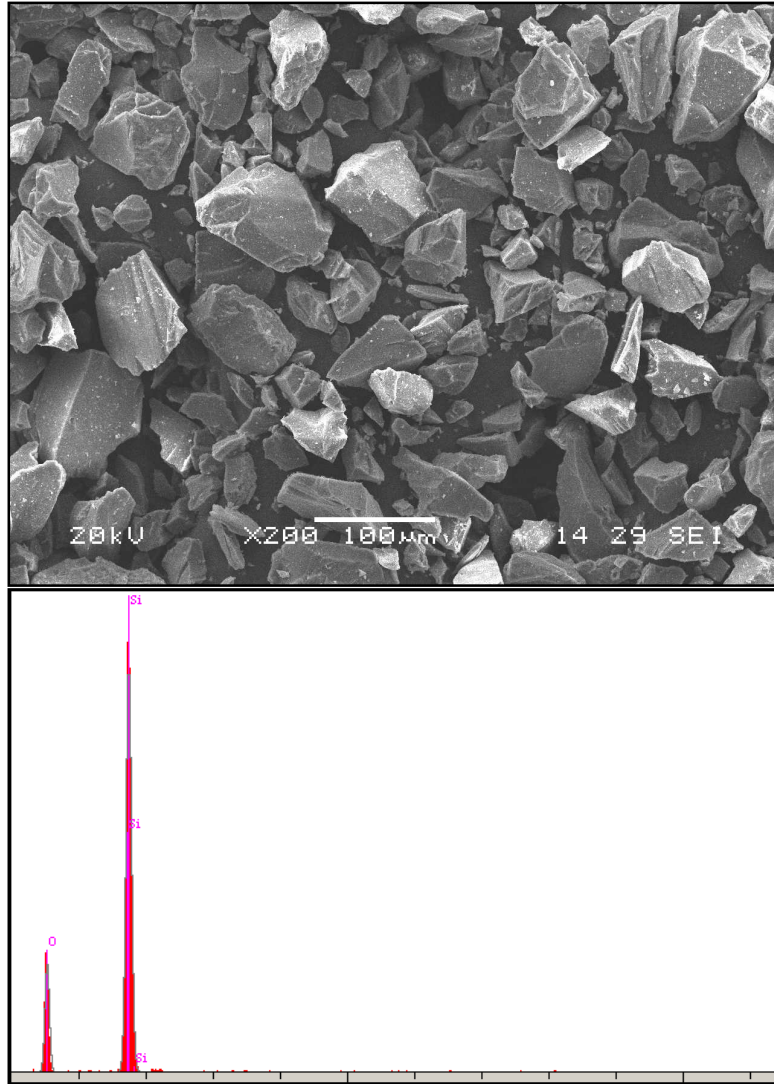
Tablo 3.3. Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri

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

Kuvars pudrası normal olarak kum boyutundaki agreganın özel teknikler sayesinde istenilen boyutlara getirilmesiyle oluşmaktadır. Kuvars pudrası, kuvars kayasının parçalanmasından elde edildiği için içerisinde kil veya silt gibi küçük taneler yoktur.

Bu pudranın elde edilmesinde kullanılan eleme yöntemi, kuru olarak ve basınçlı hava yardımıyla yapılmaktadır [18].

Deneylerde kullanılan kuvars pudrası, Aydın'ın Çine ilçesinden Santoz Sanayi Tozları Firmasından elde edilmiştir. Deneyde kullanılan kuvars pudrasının geometrik yapısı (SEM) ve kimyasal içeriği (EDS) Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kuvars pudrası EDS analizi

EDS sonuçlarına göre kuvars pudrasının tamamına yakını silisyum (Si) ve oksijen (O) oluşturmaktadır ve bu durum üretici firma tarafından da verilen ( $\text{SiO}_2 = \%99,5$ ) kimyasal içerik ile uyumaktadır.

Kuvars pudrası olarak 0-100 $\mu$ m tane aralığındaki pudradan numuneler alınmış ve karışım oranlarının belirlenmesi işlemlerinde kullanılmak için bu numunelerin TÇMA laboratuvarında granülometrisi belirlenmiştir. Elek analiz değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Kuvars pudrası elek analiz sonuçları

Tane Boyutu ( $\mu$ m)	Kümülatif Elekten Geçen %
1	2,01
2	4,99
3	7,47
4	9,98
5	12,5
10	23,87
15	32,78
20	39,75
25	45,4
30	50,14
35	54,23
40	57,85
45	61,1
50	64,06
60	75,13
75	85,93
90	96,15
100	100

#### 3.1.4. Kuvars kumu

Genellikle reaktif pudra betonlarında kullanılan en büyük taneye sahip olan malzeme kuvars kumudur. Kuvars kayacı diğer kayalara göre çok sert ve sağlamdır. Normal dayanımlı betonlarda kullanılan agregaların dayanımı yaklaşık 100 MPa iken, kuvars agregasının basınç dayanımı yaklaşık 180 MPa'a kadar ulaşmaktadır. Sertlik olarak da çok sert bir agregadır olduğu için aşınma direnci yüksektir [57, 58].

RPB'de istenilen dayanımlara çıkabilmesi için bu betonlara uygun agregaya kullanılmalıdır. Kuvars kumu hem RPB için uygun bir agregadır hem de ülkemizde bol

miktarda bulunmaktadır. Kuvars kumu elde edilmiş şekli ve mineralojik bakımdan kuvars pudrası ile aynı özelliklere sahiptir ve sadece tane büyüklüğü açısından farklılık göstermektedir. Deneyde kullanılacak malzemelerin fiziksel özelliklerinden birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmış, özgül yüzey ise TÇMA laboratuvarında yaptırılarak sonuçlar Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri

Özellik	150–300 µm Kuvars Kumu	300–600 µm Kuvars Kumu
Birim hacim	1,603gr/cm <sup>3</sup>	1,595 gr/cm <sup>3</sup>
Özgül ağırlığı	2,676	2,680
Özgül yüzeyi	219 cm <sup>2</sup> /gr	81 cm <sup>2</sup> /gr
Nem İçeriği	% 0,067	% 0,036

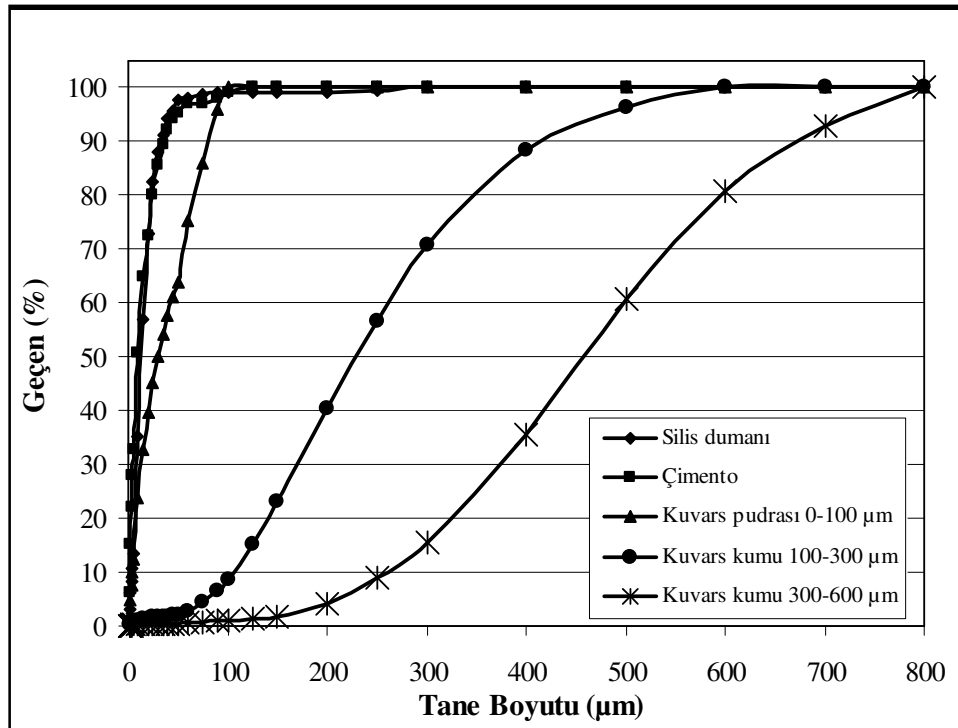
Deneylerde kullanılan kuvars kumu, 100–300µm ve 300-600 µm aralıktaki iki farklı sınıfta bulunmaktadır. Kuvars kumu olarak 100-300µm ve 300-600µm tane aralığında kumlardan numuneler alınmış ve bu numunelerin granülometrisinin belirlenmesi için TÇMA laboratuvarına gönderilmiştir. Bu numuneler üzerinde kuru olarak lazer tane dağılım analizi ile yapılmıştır. Bu analizlere ait sonuçlar Tablo 3.6’da verilmiştir. Reaktif pudra betonunda kullanılan taneli malzemelerin toplu olarak granülometri eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.6. Kuvars kumu tane dağılımı

Tane Boyutu (µm)	Kuvars Kumu 100-300µm Elekten Geçen %	Kuvars Kumu 300-600µm 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
35	1,76	0,36

Tablo 3.7. Kuvars kumu tane dağılımı (Devamı)

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



Şekil 3.2. Taneli malzemelerin granülometri eğrisi

### 3.1.5. Mermer atığı (Bulamaç)

Deneylerde kullanılan mermer bulamacı Kocaeli İli, Başiskele İlçesinde faaliyet gösteren orta ölçekli bir mermer işleme tesisinden doğal şartlarda depolanan stok alanından temin edilmiştir. Mermer bulamacı işletmede işlenen mermer miktarına göre belirlenen bir bölgede atmosfere açık bir şekilde stoklanmaktadır. Alınan numune miktarının homojen olması için stok alanın orta iç kısmından numune almaya özen gösterilmiştir. Mermer tozuna ait özellikler Tablo 3.10 da gösterilmiştir. Mermer bulamacının kimyasal bileşenleri ağırlıklı olarak kalsiyumdan ( $\text{CaO}=50-55$ ) oluşmaktadır. Genellikle inşaat sektöründe kullanılan mermerin ortalama basınç dayanım 60 MPa ve brinell sertliği 350, mohs sertliği 6' dır [59]. Mermer bulamacı üzerinde yapılan elek analizi deneyinde bulamaç 0,063 mm'lik elek üzerinde yıkanmıştır. Bulamaç ağırlığının %5'lik miktarı, 0,063 mm' lik elek üzerinde kalmış %95 elekten geçmiştir. bu tane boyutu ile kuvars pudrasına benzer özellik göstermektedir. Ayrıca mermer bulamacının su etkisi ile depolandığı ye ulaştırılması bulamacın kendi içindeki granülometrisinin dere agregalarına benzediği düşünülmektedir. bu durum karışımın doluluk oranı için olumlu etki yapabilir. bulamacın doğal su içeriği %42 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda bu su içeriğine dikkat edilerek karışım suyu düzenlemesi yapılmıştır. Şekil 3.3'. de mermer bulamacının reaktif pudra betonunda kullanılan resmi verilmiştir.



Şekil 3.3. Karışımda kullanılan mermer bulamacı

Tablo 3.8. Mermer tozunun kimyasal yapısı

SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kızdırma Kaybı	Toplam
4,67	0,8	51,8	0,03	41,17	98,06

### 3.1.6. Çelik tel

RPB'nin basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğunu arttırmak için karışıma katılacak olan lifler, Beksa Çelik ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir [60]. Lifler çelik olup üzeri korozyona karşı pirinç ile kaplanmış ve 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapındadır. Üretici firma tarafından çelik liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.7'de verilmiştir. Lif boyutunun uzun olması RPB'nin karıştırma ve yerleştirme problemlerini beraberinde getireceği için mikro boyutta lif kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 3.9.Kullanılan lifin teknik özellikleri [60]

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
Mezo	6	0,16	37,5	2250	7,181

### 3.1.7. Kimyasal katkı

Deneylerde düşük su çimento oranından dolayı istenilen işlenebilirliği elde etmek için yeni nesil katkılara ihtiyaç duyulmuştur. Yeni nesil katkıların karışım üzerindeki etkisi, süper akışkanlaştırıcı içeren çimentolu sistemde, çimento tanelerinin dağılma özeliği genel olarak “elektrostatik” ve “stearik” etki mekanizmasıyla açıklanabilir. Deneylerde bu özelliklere sahip İksa firması tarafından üretilen yeni jenerasyon bir polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı olan Polycar 100 kullanılmıştır.

### 3.1.8. Su

Deneylerde, içilebilir nitelikte olan Sakarya Büyük Şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneyler, Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır.

Deney numunelerinin hazırlanması normal betonlara göre farklılık göstermektedir. Özellikle reaktif pudra betonlarında karıştırma işlemi normal betonlara göre oldukça farklıdır. RPB'nin performans özellikleri mikserde karıştırılma işlemine karşı son derece duyarlı olup bu işlemin hassasiyetle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Karıştırma işlemi için kullanılan mikserin karıştırma hızı ve karışıma giren malzemelerin miksere konulma sırası belli bir düzen içerisinde olmalıdır. Aksi takdirde aynı malzemeler ile çok yüksek dayanımlı bir beton elde edilebileceği gibi çok düşük dayanımlı bir beton da elde edilebilir (Şekil 3.4.)



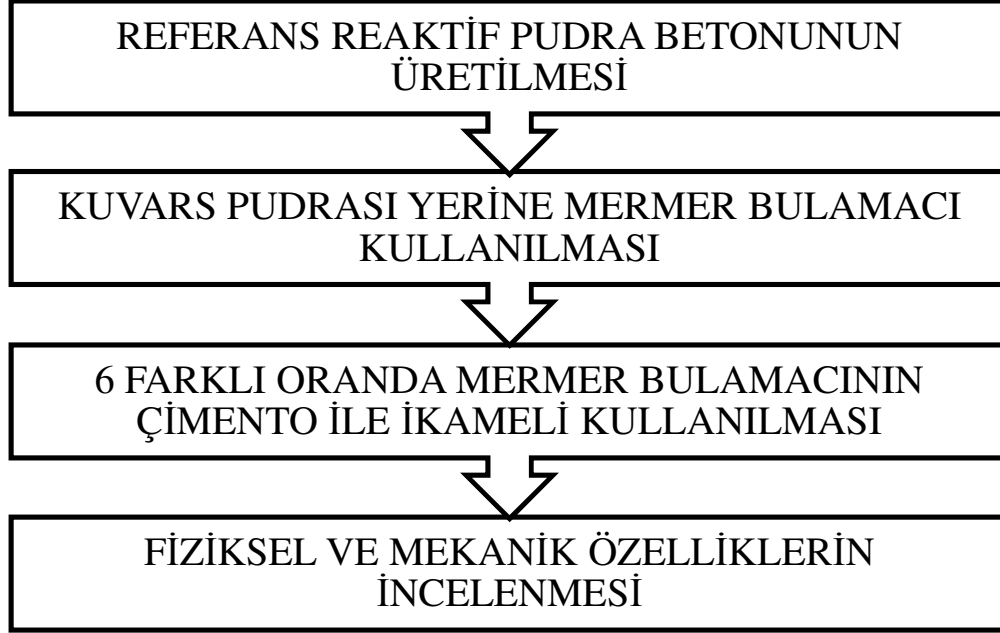


Şekil 3.4. RPB üretimi

Karıştırma işleminde ilk olarak Referans RPB için karıştırma kovasına su ve katkı daha sonra sırası ile çimento, kuvars pudrası, silis dumanı, kuvars kumu eklenerek karışım bulamaç haline gelene kadar karıştırılmış karışım işlenebilir hale geldikten sonra ise mikro çelik lif eklenerek tekrar el mikseri ile liflerin bulamacın hacimce her noktasında yayılmasını sağlayacak şekilde karıştırma işlemi yapılmıştır. Kuvars pudrası ikameli (MRPB) ve diğer mermer bulamacı ikameli gruplar içinse; mermer bulamacı, katkı ve su konularak çözülmesini sağlayacak yeterli bir sürede karıştırılmış, oluşan sulu süspansiyona sırası ile çimento, silis dumanı ve kuvars kumu eklenerek karışımın işlenebilir bir hale gelmesi sağlandıktan sonra mikro çelik lifler eklenmiştir. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıp ayırıcı yağ ile kalıplar yağlanmıştır. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesinde en iyi yerleştirme metodunu belirlemek amacıyla vibrasyon, şişleme tokmaktama denenmiş ve bunlardan tokmaklayarak yerleştirmenin en iyi yöntem olduğuna karar verilmiştir. Vibrasyonun kimyasal katkının bir takım özelliklerinden dolayı beton içerisindeki hava boşluğu miktarını arttırdığı görülmüştür. Numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak, 7 gün 90 °C sıcak buhar kürü işlemine tabi tutulmuştur.

### 3.2.1. Deneyleerde kullanılan yöntem

Bu çalışmada Şekil 3.5'deki akış şeması oluşturulmuş ve deneysel çalışmalar bu sıraya göre yapılmıştır.



Şekil 3.5. Deney akış şeması

Bu şemaya göre RPB'yi oluşturan malzemeler temin edilmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra karışım oranları önce kuvars pudrası yerine mermer bulamacı daha sonra çimento ikameli olarak mermer bulamacı oranları belirlenerek oluşturulmuştur. Bu deney karışımlarında referans olarak üretilen RPB'de ve deney gurubu olarak üretilen mermer bulamacı ikameli farklı oranlarda karışımlarda mermer bulamacının basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu deney sonucu mermer bulamacının RPB'nin üzerindeki mekanik etkileri incelenmiş ve birim maliyet analizlerinde mermer bulamacının performans kıyaslaması yapılmıştır.

Deneysel çalışmaların ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili detaylar Bölüm 4'te verilmiştir.

### 3.2.2. Karışımın belirlenmesi

Reaktif pudra betonlarının karışım oranları daha önce aynı malzemeler kullanılarak yapılan doktora tez çalışmasından alınmıştır [18]. Deneyde kullanılan karışım oranları Tablo3.10.'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Karışım oranları (1 m<sup>3</sup>)

Malzeme (Kg)	Referans RPB	MRPB	MRPB5	MRPB10	MRPB15	MRPB20	MRPB25	MRPB30
<b>Çimento</b>	900	900	855	810	765	720	675	630
<b>Silis dumanı</b>	270	270	256,5	243	230	216	202,5	189
<b>Kuvars pudrası</b>	278							
<b>Mermer Bulm. (Yaş Ağırlık)</b>	-	288 (408,96)	333 (472,86)	378 (536,76)	423 (600,36)	468 (664,56)	513 (728,46)	558 (792,36)
<b>Kuvars kumu</b>	504	504	433	488	538	592	672	714
<b>ΣSu miktarı</b>	270	270	256,5	243	251,15	244,84	253,92	265,12
<b>Katkı</b>	27	27	26	24	23	21,6	20,3	18,9
<b>Çelik lif</b>	287,24	287,24	287,24	287,24	287,24	287,24	287,24	287,24
<b>S/ç oranı</b>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,33	0,34	0,38	0,42

### 3.2.3. Basınç dayanımının belirlenmesi

Basınç deneyi ile ilgili olarak, 100 mm boyutlarında küp numune kullanılmıştır. Basınç dayanım testleri, yükleme hızı ayarlanabilen 3000 kN kapasiteli beton presinde TSE standartlarına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.6.) [61, 62].



Şekil 3.6. Beton basınç dayanımı deneyi

Deney sonuçları ilgili standarda göre değerlendirilerek numunelere ait mekanik özellikler elde edilmiştir. Buna göre elde edilen veriler kullanılarak numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında bağıntı (3.1) kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Burada,

$\sigma$  = Net basınç dayanımı (MPa)

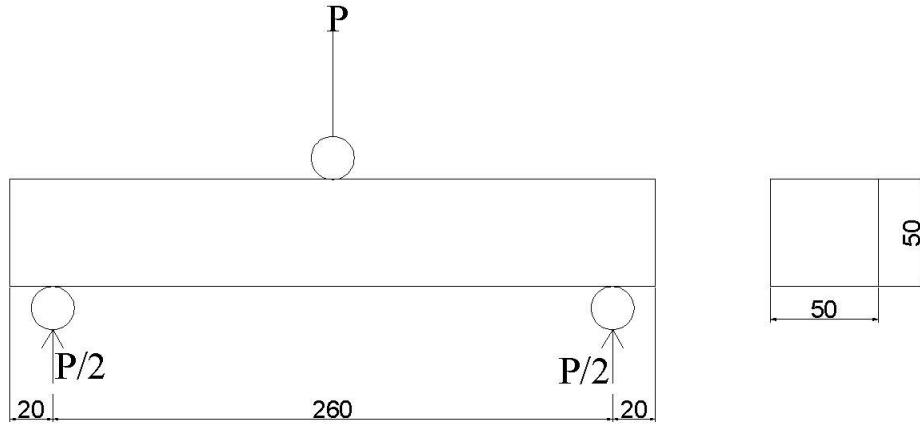
$P$  = Kırılma yükü (N)

$A$  = Numune kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

olarak ifade edilmektedir.

#### 3.2.4. Eğilme parametrelerinin belirlenmesi

Eğilme deneyi ile ilgili olarak, her bir numuneden 3 adet olmak üzere 300×50×50 mm numune üretilmiştir. Numuneler tek nokta yükleme yapılarak eğilme dayanım parametreleri belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Eğilme deneyi ve numune yükleme şekli

Eğilme deneyleri bilgisayar donanımlı ve yük sehım 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 3.7). İki mesnet arasındaki açıklık olan 260 mm, iki eşit parçaya bölünerek kiriş numunesi Şekil 3.7’deki gibi tek noktadan yüklenmiştir. Deney cihazının yükleme hızı TS 10515’te belirtildiği gibi kiriş orta noktasında, 0,05-0,10 mm/dak.sehim yapacak şekilde ayarlanmıştır [63-66]. Numuneler bu hızda tamamen kırılıncaya kadar yüklenerek yük sehım grafikleri elde edilmiştir. Eğilme numunelerine ait mekanik özellikler ilgili standarda göre ayrı başlıklar altında verilmiştir.



Şekil 3.8. Eğilme deney düzeneği

Net eğilme dayanımlarının hesaplanması; Numunelerin ilk çatlak ve eğilme dayanımlarının hesaplanmasında bağıntı (3.2.) kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{3 P_e l}{2 b h^2} \quad (3.2)$$

Burada,

$\sigma_e$  = Net eğilme dayanımı (MPa)

$P_e$  = Kırılma yükü (N)

$l$  = Mesnetler arası uzaklık (mm)

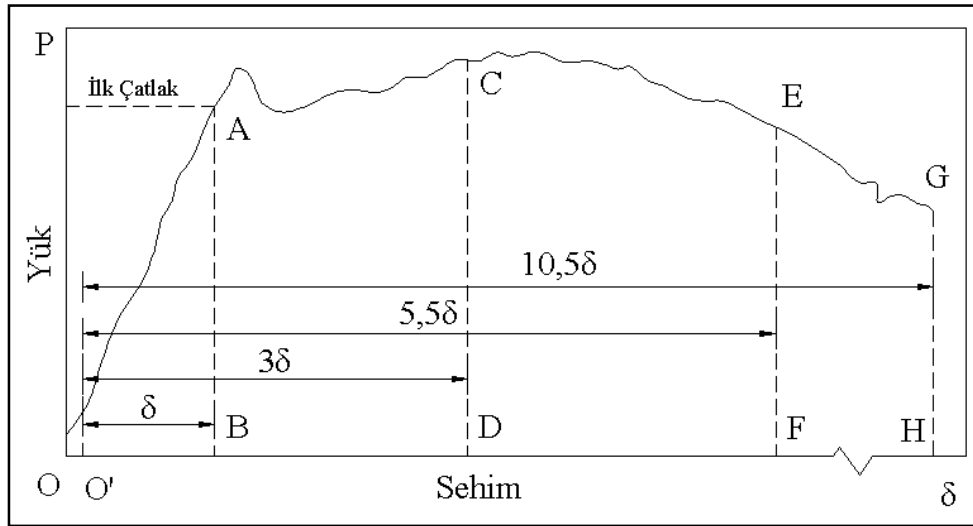
$b$  = Numune kesitinin genişliği (mm)

$h$  = 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 sehım eğrisi altında kalan alan cinsinden ifade edilmektedir [66]. Lifli betonun taşıma gücünü yitirmesi için gereken enerji, yük-sehım eğrisinin altında

kalan alanın büyümesi ile artmaktadır. Bu alan kullanılarak malzemenin eğilme özellikleri hakkında değerlendirme yapılabilmektedir. ASTM C 1018 standardına göre, tokluk indeksleri seçilen sehim değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılır. Farklı sehim değerlerine kadar oluşan alanların birbirleriyle kıyaslanması için indeks değerleri kullanılmaktadır. Bu indeksler, elastik şekil değiştirme indeksleri olarak tanımlanmaktadır ve  $I_5$ ,  $I_{10}$  ve  $I_{20}$  olarak üç adettir. Gerçek performansın, referans performans seviyesi ile karşılaştırılmasını sağlar.  $I_5$ ,  $I_{10}$  ve  $I_{20}$ 'e ait değerler, birinci çatlakla kadar lineer elastik malzeme hareketine, daha sonra plastik davranışa karşılık gelmektedir. Bu indeksler, Şekil 3.9 üzerinde gösterilen noktalara göre yazılan denklem 3.3-5'e göre hesaplanmaktadır [67-70].



Şekil 3.9. Örnek yük sehimi eğrisi grafiği

$$I_5 = \frac{O'ACD}{OAB} \quad (3.3)$$

$$I_{10} = \frac{O'AEF}{OAB} \quad (3.4)$$

$$I_{20} = \frac{O'AGH}{OAB} \quad (3.5)$$

Tablo 3.11. Elastik şekil değiştirme indeks değerleri [69]

Baz Alan	İndeks	Eğilme Kriteri	Düz Beton	Elastik-Plastik Malzeme	Telli Beton İçin Aralık
OACD	I <sub>5</sub>	3	1	5	1-6
OAEF	I <sub>10</sub>	5,5	1	10	1-12
OAGH	I <sub>20</sub>	10,5	1	20	1-25

Tokluk indeksleri numune özelliklerinden bağımsızdır. Çelik lifli betonların elastik-plastik davranışını açıklayabilmek için geliştirilmiştir. Çatlama sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterebilir. ASTM C 1018'e göre kalıcı dayanım faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R_{5,10} = 20 (I_{10}-I_5) \quad (3.6)$$

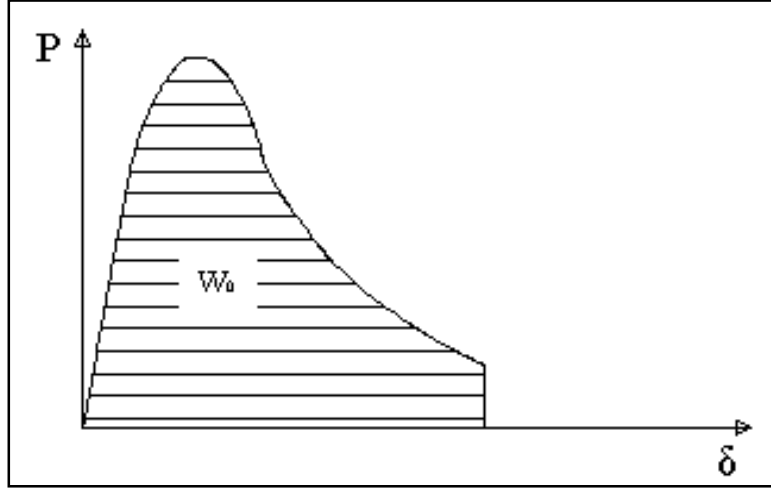
$$R_{10,20} = 10 (I_{20}-I_{10}) \quad (3.7)$$

R değerleri, liflerin beton yapısı üzerindeki fonksiyonları ve tel donatılı betonların birbirleri ile mukayeseleri konusunda somut sayılardır. Bu somut sayılar, yük-sehim grafiğinin ne şekilde olduğunu ifade etmektedir. Örneğin R<sub>5,10</sub> ve R<sub>10,20</sub>'nin değeri küçük olan numunenin yük-sehim eğrisi ile ilgili olarak, numunenin çatlak dayanımından sonra eğrinin kolunun yatay eksene yaklaştığı anlaşılmaktadır. İndeksler ve kalıcı dayanım faktörlerinin ifade ettiği anlam birbirine benzerdir.

Kırılma tokluğu; Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan kırılma tokluğunu vermektedir. Sünek malzemelerde şekil değiştirme kapasitesi yüksek olduğu için, kırılma anında büyük sehimlere ulaşılmakta ve harcanan enerji artmaktadır. Burada, numunelerin yük sehim eğrileri elde edilerek kırılma toklukları hesaplanabilmektedir. Gevrek malzemelerde şekil değiştirme miktarı küçük olduğundan bu tür malzemelerin enerji yutma kapasitesi, yüksek sehim yapabilen sünek malzemelere karşı düşüktür. Bu çalışmada kullanılan çelik lifler betona yüksek süneklik özelliği kazandırır ve Üretilen numunelerde çelik lifler kullanıldığı için kırılma yavaş gerçekleşmekte ve sehim miktarı artmaktadır.



Böylece, numunelerin kırılma enerjileri normal betona göre daha yüksek olacaktır [70]. Şekil 3.10'da örnek bir yük-sehim eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu [70]

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

olarak ifade edilmektedir.

Yük sehim eğrisinin altında kalan düzensiz şekilli alanların belirlenmesi Simpson matematik kuralının uygulanmasını veya bilinen alanlardaki karelerin sayılmasını gerektirmektedir. Bu alanların bulunmasında excel hazır paket programından yararlanılmıştır [71].

### 3.2.5. Ultrases hızının belirlenmesi

Ultrases geçiş hızı deneyi, beton içerisindeki boşluk miktarından yola çıkarak ses iletiminin hızına göre beton kalitesi hakkında fikir edinebilmek için yapılan tahribatsız deneylerdendir. Deney, 15x15x15 cm boyutlu 7 ve 28 günlük küp numunelerde yapılmıştır. Ultrases aletinin probaları, küp numunenin iki karşıt yüzeyine Şekil 3.11'deki gibi tatbik edilmiş ve ekrandan ses geçiş süresi okunmuştur. Ses kaybını önlemek amacıyla probalar ile numune arasına gres yağı sürülmüştür. Ses

geçiş süresi ( $t$ ,  $\mu s$ ) ekrandan okunarak problemler arası mesafe ( $L$ , mm) ye bölünmesiyle ultra ses geçiş hızı ( $V$ , mm/ $\mu s$ ) elde edilmiştir.

Bağıntısı ile hesaplanan ses geçiş hızı, betonun nicel anlamda dayanımı konusunda belirleyici olmasa da kalitesi hakkında fikir vermektedir. Ses geçiş hızına göre beton kalite aralıkları Tablo 3.10.'da verilmiştir.

Tablo 3.12. Ultra ses hızı

Ultrases Geçiş Hızı (mm/ $\mu s$ )	<2.0	2.0-3.0	3.0-3.5	3.5-4.5	>4.5
Beton Kalitesi	Çok Zayıf	Zayıf	Şüpheli	İyi	Çok İyi

Şekil 3.11'de ultrases geçiş hızı deneyinin numuneye uygulanması gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Ultra ses Geçiş hızı testi

### 3.2.6 Schmidt değerin belirlenmesi

Yüzey sertliğinden yola çıkarak basınç dayanımı tahminine dayanan Schmidt Çekici Deneyi tahribatsız beton deneylerindedir. Bu deney sayesinde, tahribat oluşturmaksızın betonun basınç dayanımı hakkında fikir elde edebilmek mümkündür. Deney için 7 günlük 90 C sıcak buhar kürüne tabi tutulmuş 10x10x10 cm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Beton çekici yalnız gözeneksiz betonlar için uygundur. Ölçüm yapılacak yüzey temiz, düz ve kuru bir satıh olmalıdır. Bunun için beton yüzeyi boya, yağ, toz gibi maddelerden arındırılarak düzgün bir hale getirilmelidir. Her bir örnek yüzeyden en az 10 okuma alınmalı ve her okuma noktası arasında minimum 20 mm bulunmalıdır. Ayrıca kenarlara 40-50 mm den fazla yaklaşılmamalıdır. Şekil 3.12’de beton çekicinin numuneye uygulanması gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Schmidt test çekiçi deneyi

## BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Deneysel Bulgular ve Tartışma

Deney sonuçları ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

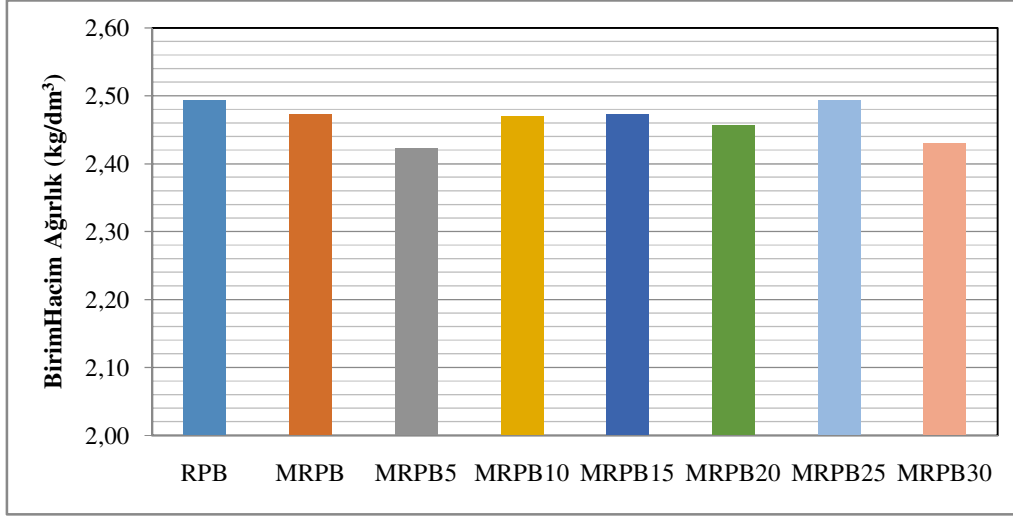
#### 4.1.1. Birim hacim ağırlık

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin betonun birim hacim ağırlığına ait değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Beton birim hacim ağırlıkları

Numune Adı	Birim hacim ağırlık(kg/dm <sup>3</sup> )
RPB	2,49
MRPB	2,47
MRPB5	2,42
MRPB10	2,47
MRPB15	2,47
MRPB20	2,46
MRPB25	2,49
MRPB30	2,43

Birim hacim ağırlığının bulamaç oranları ile olan ilişkisine ait grafik Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Birim hacim ağırlık bulamaç oranları ilişkisi

Şekil 4.1. incelendiğinde üretilen numunelerin, Birim hacim ağırlık değerleri 2,4-2,5 kg/dm<sup>3</sup> arasında bir değerde dağılım göstermektedir. Referans betona (RPB), kuvar pudrası ikameli betona (MRPB), ve diğer oranlarda üretilen çimento ikameli betonların birim hacim ağırlıkları arasında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

#### 4.1.2. Basınç dayanımı

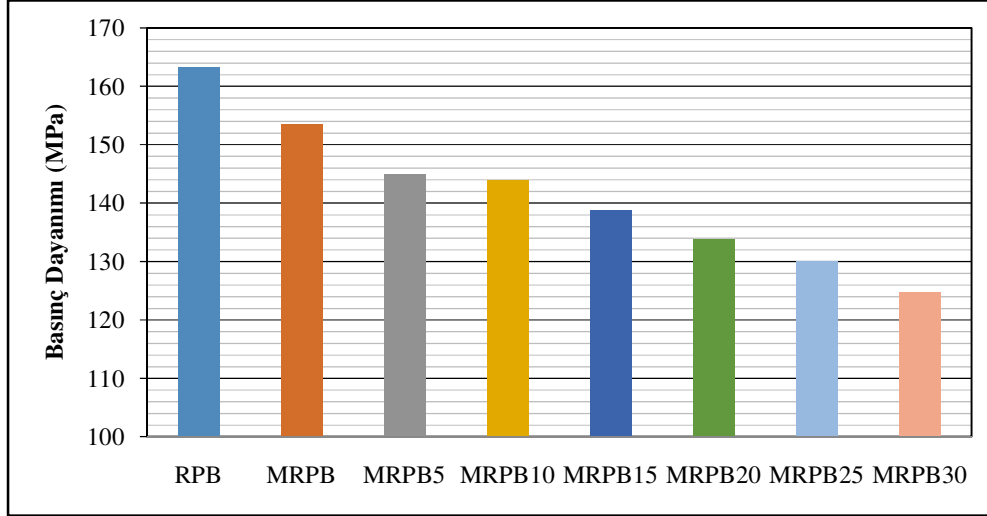
Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB'nin MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin betonunun basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Numuneye ait kırılma resmi Şekil 4.2'de dayanım değerleri Tablo 4.2'de ve dayanım değişim grafiği de Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Basınç deneyi sonucu kırılan numunenin yapısı

Tablo 4.2. Beton basınç dayanımı

Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)
RPB	163,26
MRPB	153,53
MRPB5	144,98
MRPB10	143,86
MRPB15	138,76
MRPB20	133,84
MRPB25	130,08
MRPB30	124,72



Şekil 4.3. Basınç dayanımı bulamaç oranları ilişkisi

Şekil 4.3. incelendiğinde RPB'nin basınç dayanımı diğer gruplar içinde en yüksek sonucu verirken, MRPB30'un basınç değeri ise en düşük değeri vermiştir. Basınç dayanımındaki düşüş grafikte incelendiğinde basınç dayanımı ile bulamaç miktarı arasında lineer bir bağıntıda görülmektedir. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun basınç dayanımı azalmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) birlikte, basınç dayanımı referans RPB'ye göre %6 oranında azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı (MRPB5), basınç dayanımı referans numuneye göre %12 ve MRPB'ye göre ise %6 oranında azalmıştır.

MRPB10'un basınç dayanımı referans numuneye göre %13 MRPB5'e göre ise % 1 oranında azalmıştır. MRPB15'in basınç dayanımı referans numuneye göre %15 ve MRPB10'a göre %4 oranında azalmıştır. MRPB20'nin basınç dayanımı referans numuneye göre %18 ve MRPB15'a göre % 4 oranında azalmıştır. MRPB25'in basınç dayanımı referans numuneye göre % 20 ve MRPB20'ye göre % 3 oranında azalmıştır, MRPB30'un basınç dayanımı referans numuneye göre %24 ve MRPB25'e göre %4 azalmıştır.

Basınç dayanımının mermer bulamacı katılması ile doğru orantılı olarak azalmasına karışım içerisindeki bağlayıcı çimento miktarının azalması en temel etki olabilmektedir. Bunun yanı sıra işlenen mermer türüne göre değişiklik gösteren

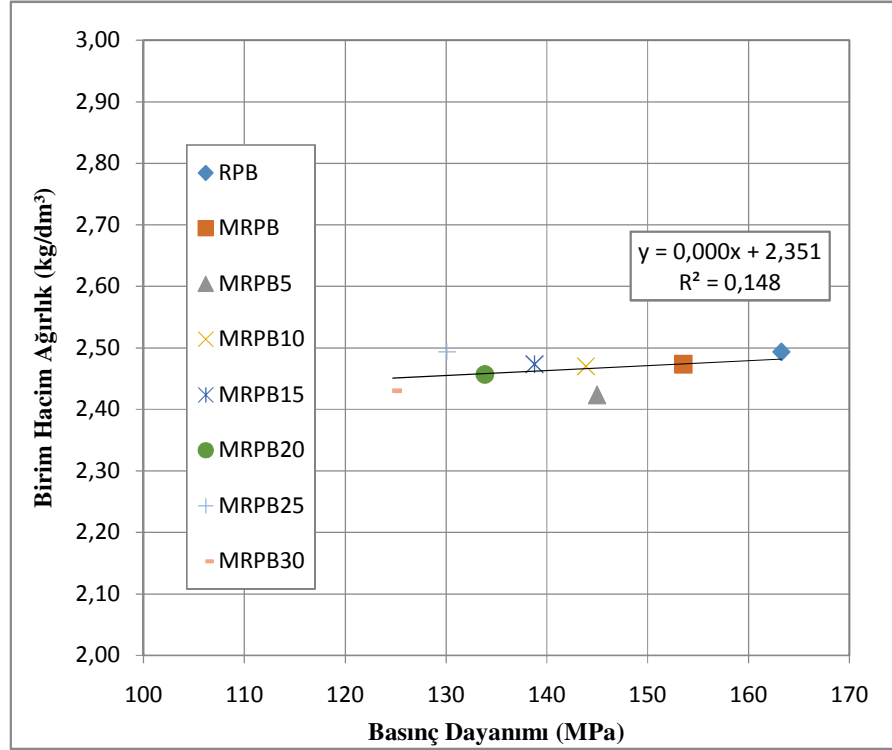
mermer bulamacı dayanımı, kuvars pudrası kadar homojen ve aynı dayanımda olmayabilir. Ayrıca MRPB15 ve daha yüksek bulamaç oranlarının üretilmesinde aynı işlenebilirliği ve bulamaç kıvamını yakalamak için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır. Karışımdaki su miktarı ihtiyacının artmasının sebebi ise karışımdaki su miktarı, çimento miktarına bağlıdır. Çimento miktarının azalması sonucunda karışıma giren işlenebilirlik için gerekli su miktarında azalma olmuş ve buna ek olarak da çimentonun yerine ikameli olarak kullanılan bulamaç miktarı artmıştır. Bu artış ıslanacak agrega ara yüzey alanının artmasına sebep olmuştur. İşlenebilirlik için gerekli su miktarının artması basınç dayanımını olumsuz olarak etkilemiştir.

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin betonun birim hacim ağırlığı, basınç dayanımına ait değerleri Tablo 4.3'de, grafik ise Şekil 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Beton basınç dayanımı-Birim hacim ağırlık ilişkisi

<b>Numune Adı</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>	<b>Birim hacim ağırlık(kg/dm<sup>3</sup>)</b>
RPB	163,26	2,49
MRPB	153,53	2,47
MRPB5	144,98	2,42
MRPB10	143,86	2,47
MRPB15	138,76	2,47
MRPB20	133,84	2,46
MRPB25	130,08	2,49
MRPB30	124,72	2,43





Şekil 4.4. Beton basınç dayanımı-Birim hacim ağırlık ilişkisi

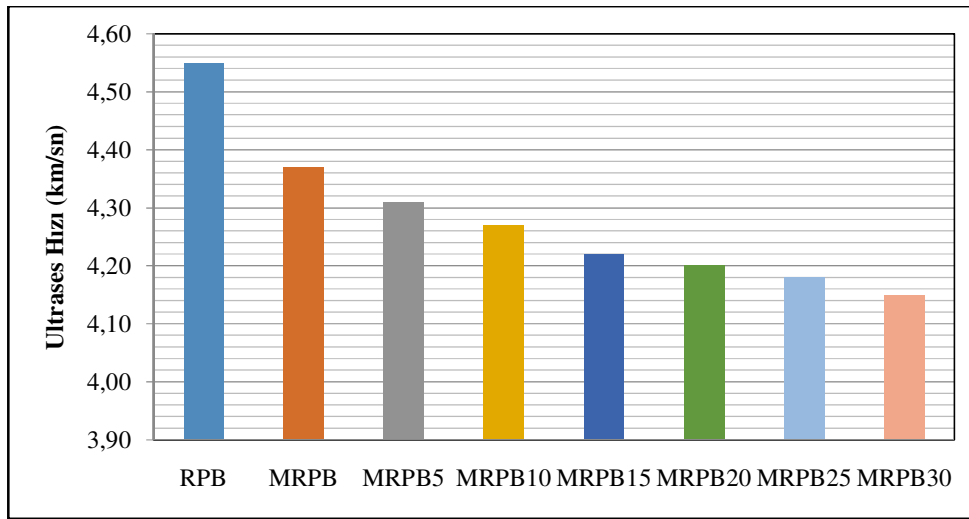
Şekil 4.4. incelendiğinde ise betonun birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı arasında korelasyon değerine bağlı bir ilişkiden söz etmek mümkün olmamaktadır. Fakat grafikte RPB'nin hem en yüksek basınç dayanımına hem de en yüksek birim hacim ağırlığa sahip olduğu görülmektedir.

#### 4.1.3. Ultrases geçiş hızı

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin ultra ses geçiş hızına ait değerler ve Tablo 4.4'de ve grafik Şekil 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Ultra ses geçiş hızı

Numune Adı	Ultra Ses Hızı (Km/sn)
RPB	4,55
MRPB	4,37
MRPB5	4,31
MRPB10	4,27
MRPB15	4,22
MRPB20	4,20
MRPB25	4,18
MRPB30	4,15



şekil 4.5. Bulamacı oranlarının ultra ses hızı ile ilişkisi

şekil 4.5. incelendiğinde ultra ses geçiş hızı değeri en yüksek olan numune RPB'ye aittir. Ultra ses geçiş hızı değeri grafikte incelendiğinde bulamacı miktarı ile arasında linear bir bağıntı vardır. Karışımdaki bulamacı oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun ultra ses geçiş hızı azalmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle(MRPB) birlikte, ultra ses geçiş hızı referans RPB'ye göre %4 oranında azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve imento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı (MRPB5), ultra ses geçiş hızı referans numuneye göre %5,3 ve MRPB' ye göre ise %1,4 oranında azalmıştır. MRPB10'un ultra ses geçiş hızı referans numuneye göre %6,2 MRPB5'e göre ise % 0,9 oranında azalmıştır. MRPB15'in ultra ses geçiş hızı referans numuneye göre %7,3 ve MRPB10'a göre %1,2 oranında azalmıştır. MRPB20'nin ultra ses geçiş hızı referans numuneye göre %7,7 ve MRPB15'a göre % 0,5 oranında azalmıştır.

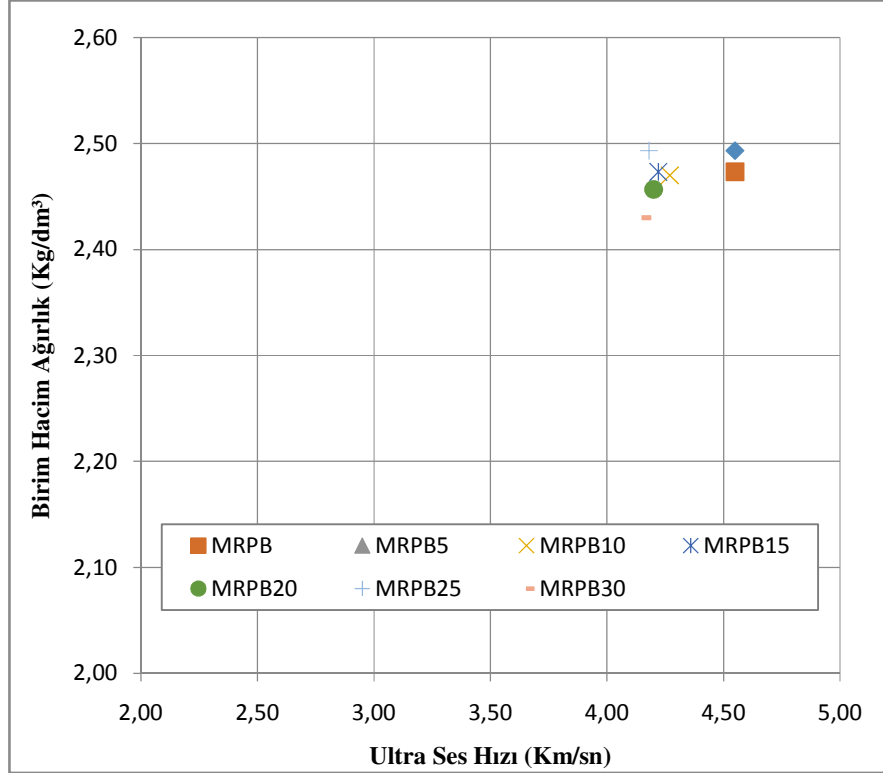
MRPB25'in ultra ses geçiş hızı referans numuneye göre % 8,1 ve MRPB20'ye göre % 0,5 oranında azalmıştır, MRPB30'un basınç dayanımı referans numuneye göre %8,8 ve MRPB25'e göre %0,7 oranında azalmıştır.

Ultra ses geçiş hızındaki azalmanın sebepleri; MRPB, MRPB5, MRPB10, MRPB15, MRPB20, MRPB25 ve MRPB30 numunelerinde karışımdaki su miktarının kademeli olarak artması sonucu betonun doluluk oranı RPB' ye göre azalmış ve daha boşluklu hale gelmiştir. Boşluk oranı artan betonlarda dayanımın düşeceği, ses dalgalarının geçişinde engel oluşturarak geçiş yolunun uzaması ile birlikte ultra ses geçiş hızının düşmesine sebep olacaktır. Buna paralel olarak kullanılan bulamaç miktarı arttıkaa beton basınç dayanımları da azalmıştır ki bu da ultra ses geçiş hızı değerindeki azalmanın sebeplerindedir.

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik kp numunelerde RPB' nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin ultra ses geçiş hızın, birim hacim ağırlıklarına ait değerler Tablo 4.5'de ve grafik Şekil 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Ultra ses hızı-Birim hacim ağırlık ilişkisi

Numune Adı	Ultra Ses Hızı (km/sn)	Birim hacim ağırlık(kg/dm <sup>3</sup> )
RPB	4,55	2,49
MRPB	4,37	2,47
MRPB5	4,31	2,42
MRPB10	4,27	2,47
MRPB15	4,22	2,47
MRPB20	4,20	2,46
MRPB25	4,18	2,49
MRPB30	4,15	2,43

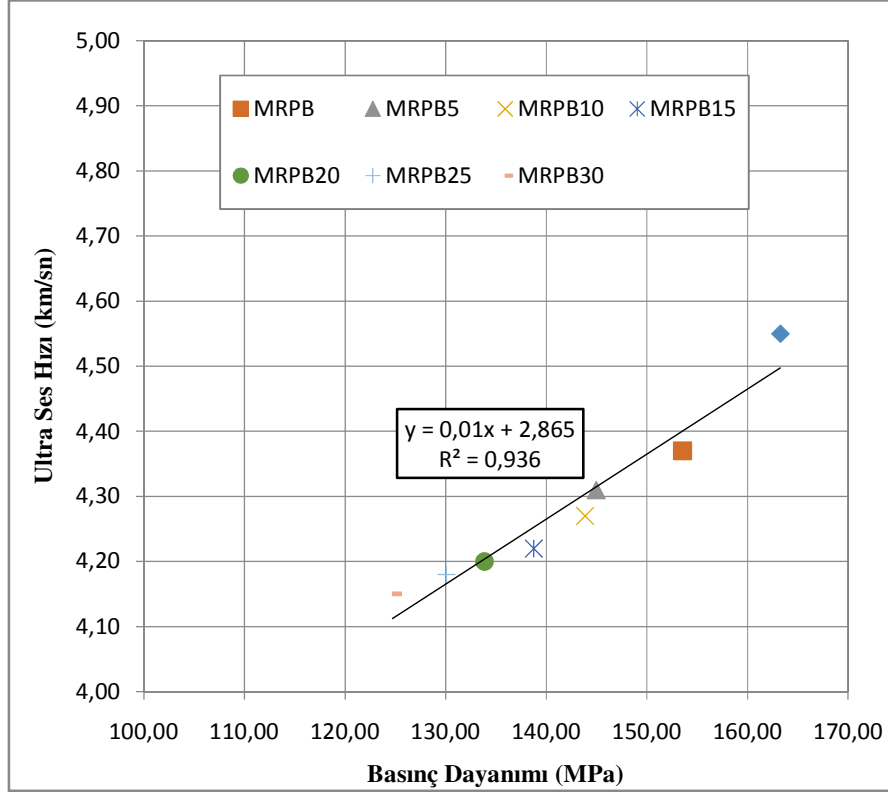


Şekil 4.6. Ultra ses hızı - Birim hacim ağırlık grafiği

Şekil 4.6 incelendiğinde deney guruplarının birim hacim ağırlık ve ultra ses geçiş hızı arasında birbirini etkileyen bir bağıntı olmadığı görülmektedir. Karışımdaki bulamaç oranlarının değişmesi ve çimentonun ikameli olarak mermer bulamacı yerine kullanılmasının ultra ses geçiş hızının betonun birim hacim ağırlığı ile mukayesesinde kayda değer bir ilişkiye rastlanmamıştır. Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB' nin, MRPB' nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin ultra ses geçiş hızının, basınç dayanımına ait değerler Tablo 4.6'da, ve grafik ise Şekil 4.7'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Ultra ses hızı - Basınç dayanımı ilişkisi

Numune Adı	Ultra Ses Hızı (km/sn)	Basınç Dayanımı (MPa)
RPB	4,55	163,26
MRPB	4,37	153,53
MRPB5	4,31	144,98
MRPB10	4,27	143,86
MRPB15	4,22	138,76
MRPB20	4,20	133,84
MRPB25	4,18	130,08
MRPB30	4,15	124,72



Şekil 4.7. Ultra ses hızı - Basınç dayanımı grafiği

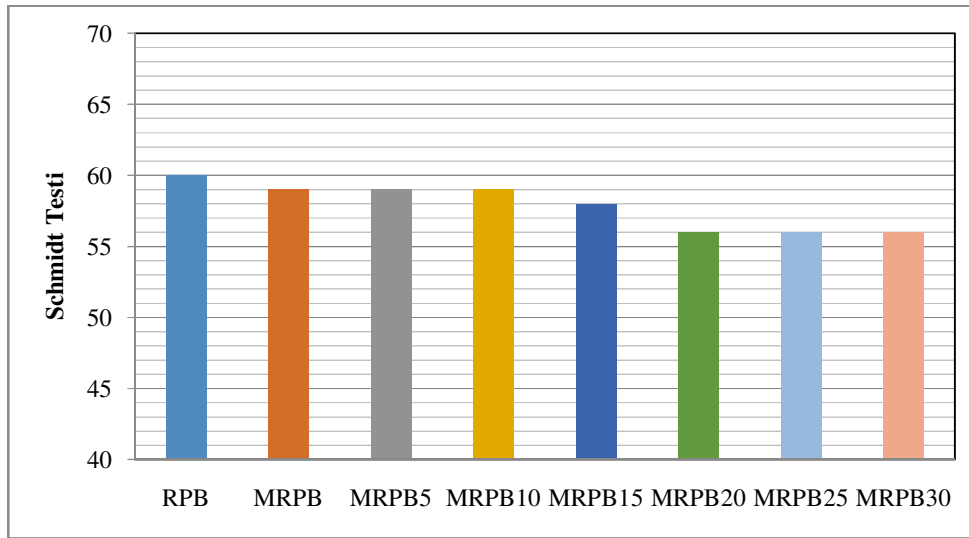
Şekil 4.7. incelendiğinde ultra ses geçiş hızı artıka beton basınç dayanımında arttığı görülmektedir. Grafiğe bakıldığında beton basınç dayanımının ve ultra ses geçiş hızının en yüksek olduğu serinin RPB olduğu, en düşük olduğu serinin ise MRPB30 olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle karışımdaki bulamaç oranlarının artmasının betonun hem basınç dayanımını hem de ultra ses geçiş hızını düşüren lineer bir bağıntı ile açıklamak mümkündür. Basınç dayanımını arttıran ana nedenlerden biri de betondaki boşluk miktarı ve yapısıyla ilişkilidir. Aynı zamanda ses dalgalarının hızıda benzer şekilde etkilenmektedir. Bu nedenle basınç dayanımı ve ultrases arasındaki ilişki boşlukla oranına bağlı olarak değişebilmektedir.

#### 4.1.4 Schmidt çekici deneyi

Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB, MRPB ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin Schimdt test çekici deneyine ait değerler Tablo 4.7'de, grafik ise Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Schmidt test çekici deneyi

Numune Adı	Schmidt Testi
RPB	60,00
MRPB	59,00
MRPB5	59,00
MRPB10	59,00
MRPB15	58,00
MRPB20	56,00
MRPB25	56,00
MRPB30	56,00



Şekil 4.8. Bulamaç oranlarının Schmidt test çekici değerleri ilişkisi

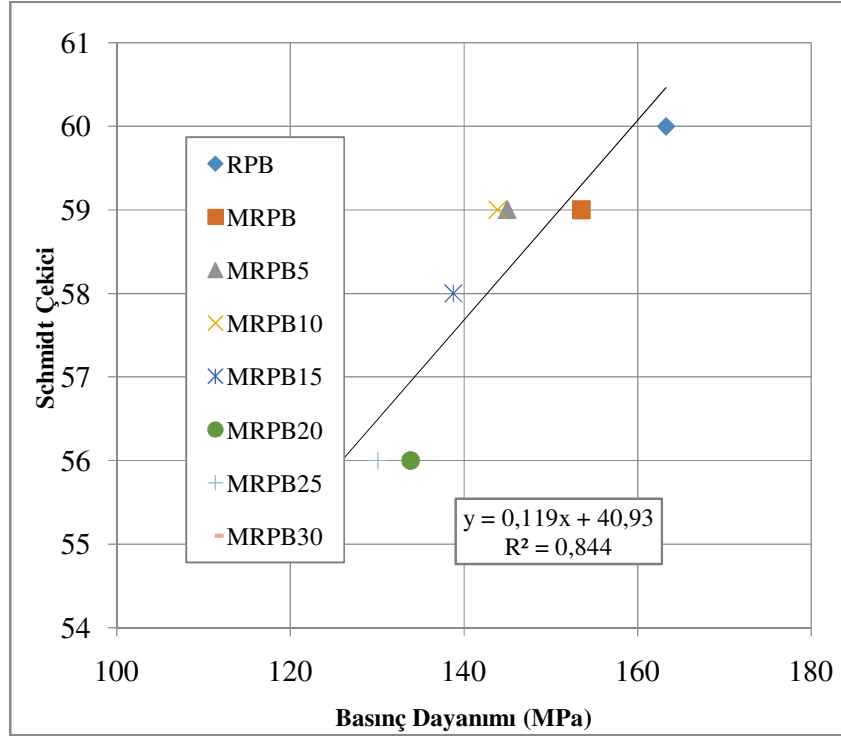
Şekil 4.8. incelendiğinde schmidt sonuçları ile karışımdaki bulamaç oranının artması arasında anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Bulamaç değerleri arttıkça nispeten Schmidt sonuçları bir miktar etkilenmektedir. Basınç deneyinde kullanılmak üzere üretilen 100 mm'lik küp numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin Schimdt test çekici, basınç dayanımına ait değerler Tablo 4.8'de, grafik ise Şekil 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.8. Schmidt test çekici-Basınç dayanımı ilişkisi

Numune Adı	Schmidt Testi	Basınç Dayanımı (MPa)
RPB	60,00	163,26
MRPB	59,00	153,53
MRPB5	59,00	144,98
MRPB10	59,00	143,86

Tablo 4.9. Schmidt test çekici - Basınç dayanımı ilişkisi (Devamı)

MRPB15	58,00	138,76
MRPB20	56,00	133,84
MRPB25	56,00	130,08
MRPB30	56,00	124,72



Şekil 4.9. Schmidt test çekici, basınç dayanımı grafiği

Şekil 4.9. incelendiğinde basınç dayanımı ve schmidt çekici deneyi arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmektedir. Grafiğe bakıldığında beton basınç dayanımının schmidt çekici değerinin en yüksek olduğu serinin RPB olduğu sırası ile ise MRPB MRPB5 MRPB10 MRPB15 MRPB20 MRPB25 ve en düşük olduğu serinin ise MRPB30 olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ise beton basınç dayanımı yüksek olan betonların schmidt çekici değerlerinin de yüksek olmasıdır. Dolayısı ile beton basınç dayanımının artması ile schmidt çekici değerlerinin arttığı görülmektedir.

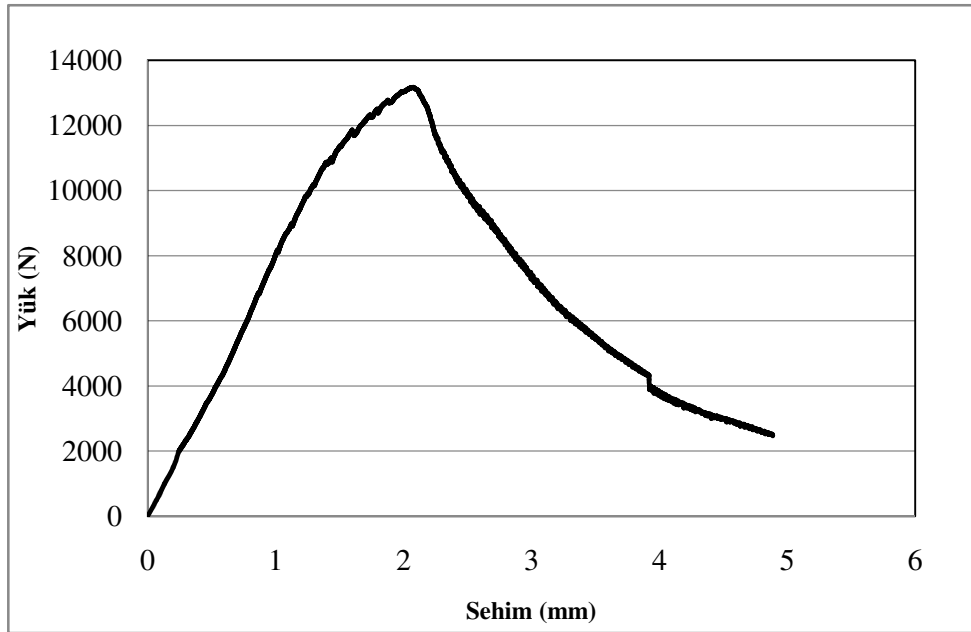
#### 4.1.5. Eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu

Eğilme deneyi sonucunda numunenin orta bölgesinden kırıldığı görülmüştür (Şekil 4.10.). Referans olarak üretilen Reaktif Pudra Betonun (RPB) yük sehim grafiği

Şekil 4.11’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasından sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.11.). RPB’nin eğilme dayanımı 41,09 MPa ve kırılma tokluğu 33,31 Nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10. Eğilme deneyi sonucu kırılan numune

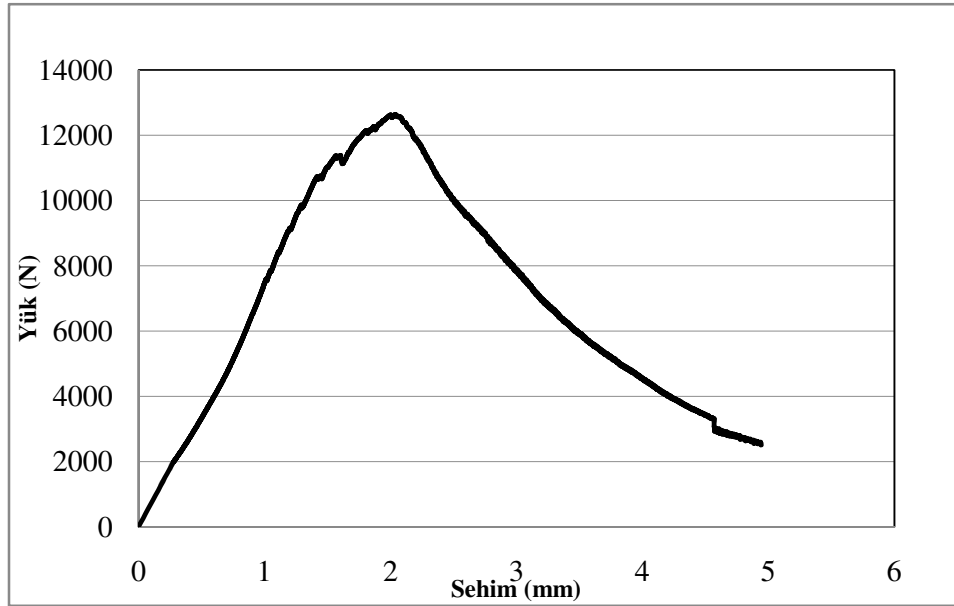


Şekil 4.11. RPB’ ye ait yük sehim grafiği

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=3,91$  ve  $I_{10}= 4,11$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 3.11’deki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde, RPB’ye aite numune lifli



betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

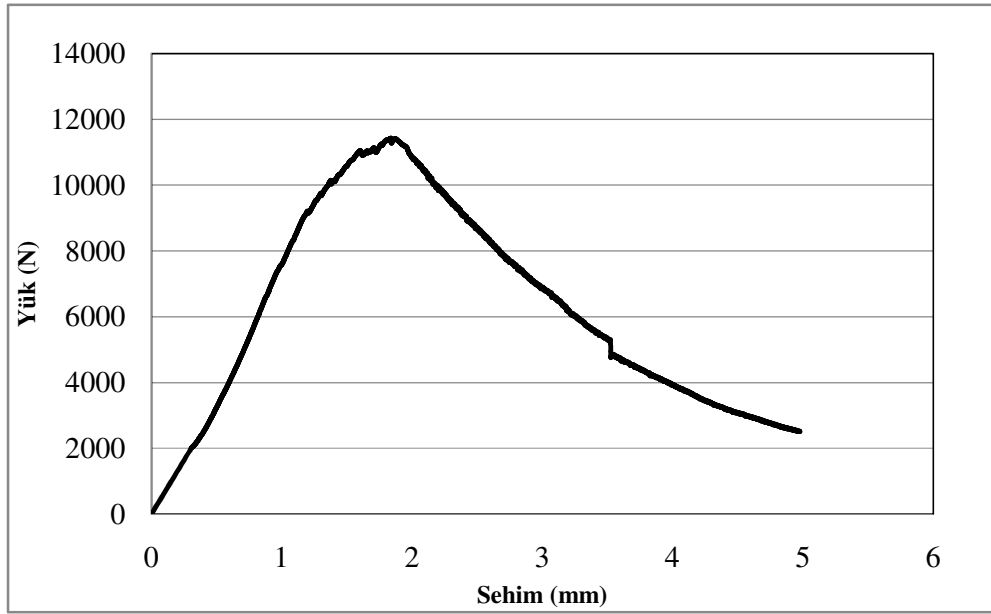


Şekil 4.12. MRPB'ye ait yük sehim grafiği

Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) yük sehim grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil4.10.). Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle MRPB'nin eğilme dayanımı 39,40 MPa ve kırılma tokluğu 33,55 Nm olarak bulunmuştur. Referans numune (RPB) ile karşılaştırıldığında eğilme dayanımı %4,11 azalmış, kırılma tokluğu ise %0,72 artmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır. Kırılma tokluğundaki artış için bulamacın kendi içindeki granülometrisinin kuvars pudrasına göre daha iyi olabilmektedir. Çünkü mermer işleme sırasında su kullanılması ve mermer tozlarının su ile uzaklaştırılması, dere agregalarında olduğu gibi doğal tane dizilimine yol açmaktadır. Bu nedenle istenilen granülometriye sahip olmaktadır. Kuvars pudrası ise kuvars kayacının kırılması sonucu elde edilmektedir. Üretim tekniği olarak

kırmataş agregaya benzemektedir. Bu nedenle taneler belirli boyutlardadır. Kendi içerisinde iyi bir granülometriye sahip değildir.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=4,29$  ve  $I_{10}= 4,58$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 3.9'daki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB'ye ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

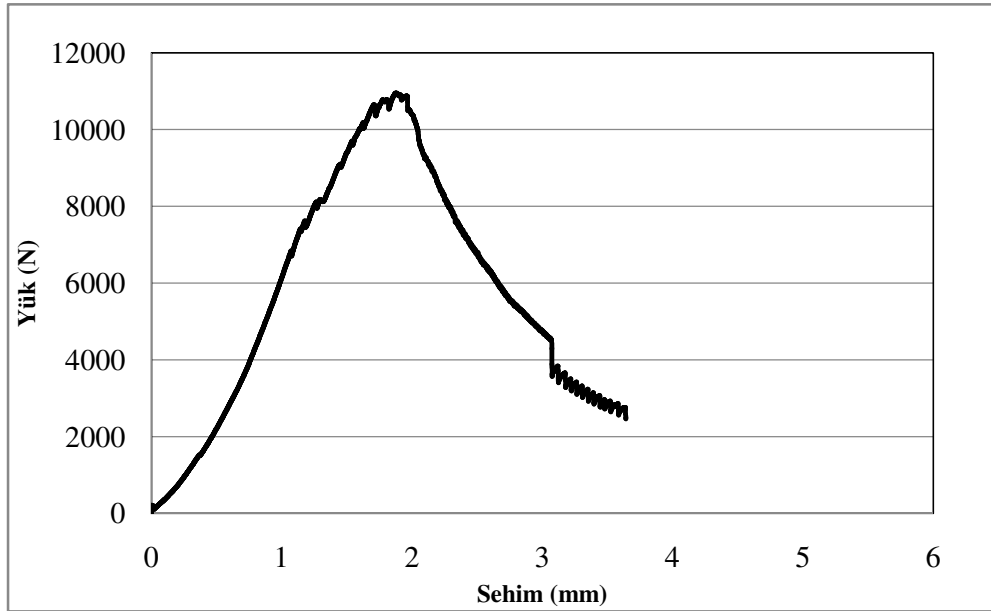


Şekil 4.13. MRPB5'in yük sehim grafiği

Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB5'in yük sehim grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.13.). Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB5'in eğilme dayanımı 35,66 MPa ve kırılma tokluğu 30,74 Nm olarak bulunmuştur. Kuvars pudrası yerine ve çimento

miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB5) ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %13,2 oranında, kırılma tokluğu ise %7,71 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB5 ile birlikte eğilme dayanımı, kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle(MRPB) ye göre %9,49 oranında, kırılma tokluğu ise %8,37 azalmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=4,34$  ve  $I_{10}= 4,85$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, (Tablo 3.11.) Elastik şekil değiştirme indeks değerleri)'ne göre değerlendirildiğinde MRPB5'e ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

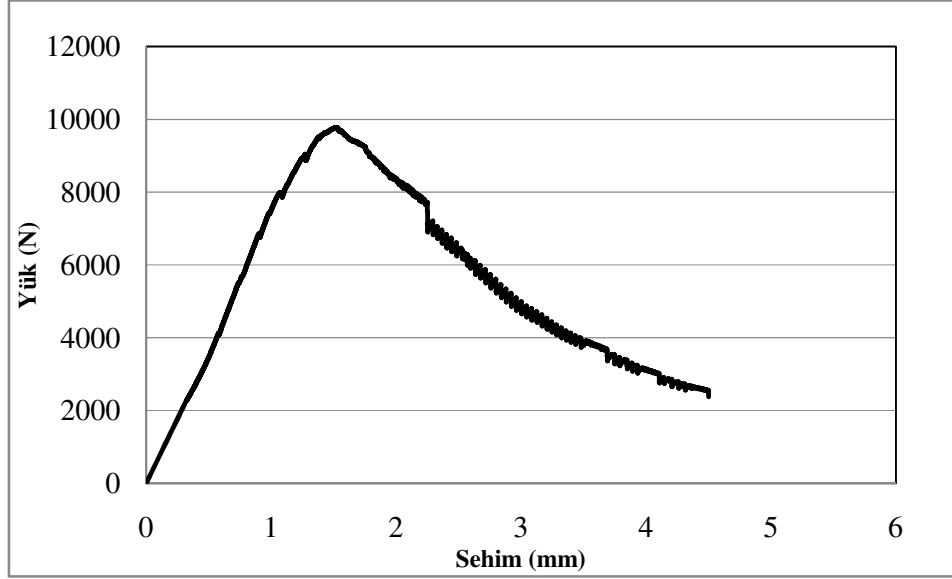


Şekil 4.14. MRPB10' a ait yük sehimi grafiği

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %10'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB10'nun yük sehimi grafiği Şekil 4.14'de verilmiştir. Grafik

incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.14.). Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %10'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB10'nun eğilme dayanımı 34,18 MPa ve kırılma tokluğu 20,76 Nm olarak bulunmuştur. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %10'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB10) ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %16,81 oranında, kırılma tokluğu ise %37,67 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %10'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB10) ile birlikte eğilme dayanımı, Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB5) ye göre %4,15 oranında, kırılma tokluğu ise %32,46 azalmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=4,59$  ve  $I_{10}= 4,59$  değerlerini almışlardır.  $I_5$  ve  $I_{10}$  indeks değerlerinin aynı çıkmasının sebebi ise eğilme testine tabi tutulan numunenin ilk çatlağın oluştuğu kuvvete karşılık gelen sehimin 5,5 katına karşılık gelen sehim değerine ulaşmamasıdır. Bu değerler, Tablo 3.11'deki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB10'a ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

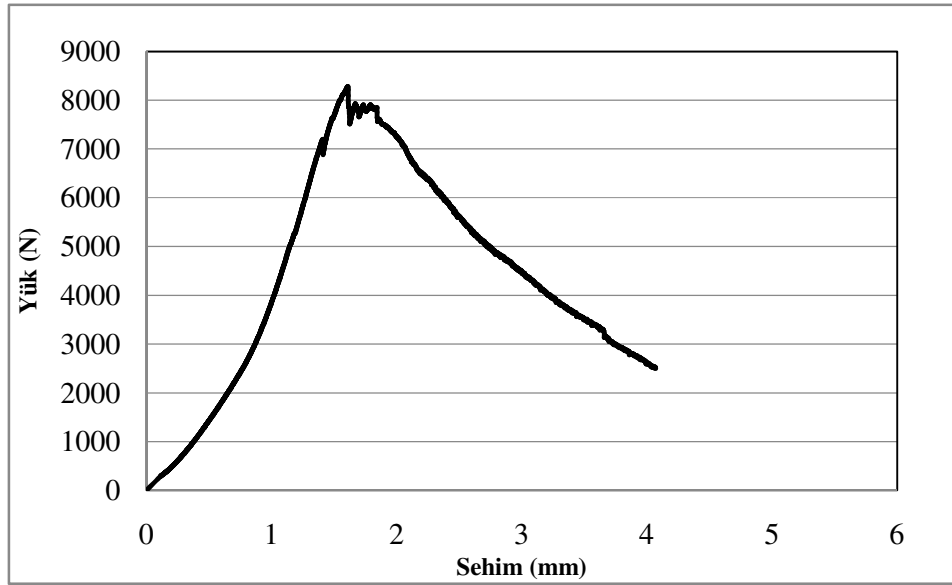


Şekil 4.15. MRPB15'in yük sehimi grafiği

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %15'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB15) in yük sehimi grafiği Şekil 4.15'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.15.). Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %15'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB15'in eğilme dayanımı 30,47 MPa ve kırılma tokluğu 24,38 Nm olarak bulunmuştur. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %15'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB15) ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %25,84 oranında, kırılma tokluğu ise %26,8 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %15'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB15) ile birlikte eğilme dayanımı, kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %10'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB10) a göre %10,8 oranında azalmış, kırılma tokluğu ise %17,43 oranında artmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır. Kırılma tokluğundaki artış için bulamacın kendi içindeki granülometrisinin kuvars pudrasına göre daha iyi olabilmektedir. Çünkü mermer işleme sırasında su kullanılması ve mermer tozlarının su ile uzaklaştırılması, dere agregalarında olduğu gibi doğal tane dizilimine yol açmaktadır. Bu nedenle istenilen granülometriye sahip olmaktadır. Kuvars pudrası ise kuvars kayacının kırılması sonucu elde edilmektedir. Üretim tekniği olarak kırılma

agregaya benzemektedir. bu nedenle taneler belirli boyutlardadır. Kendi içerisinde iyi bir granülometriye sahip değildir.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=4,58$  ve  $I_{10}= 5,6$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 3.11'deki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB15'e ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

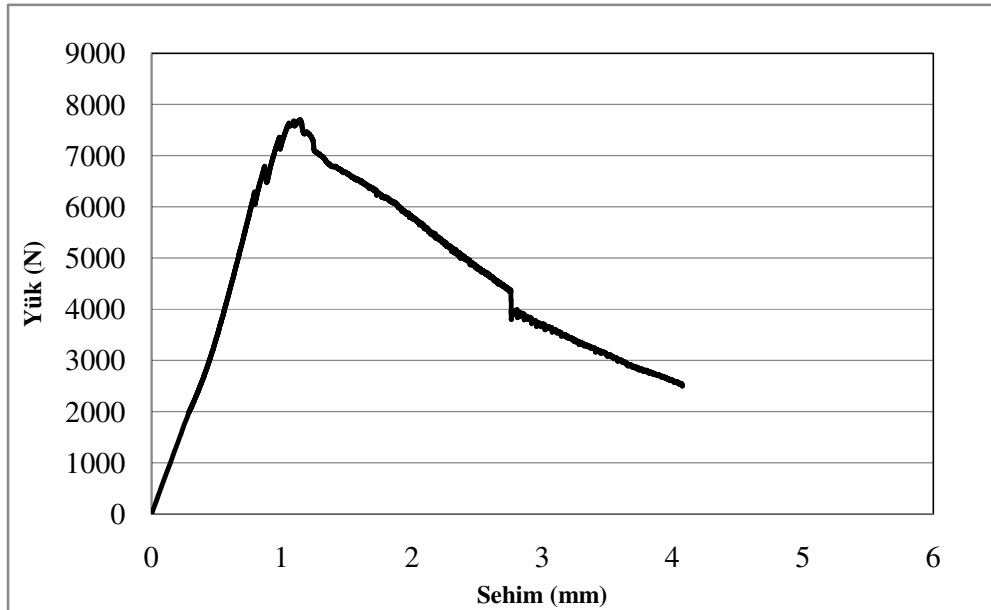


Şekil 4.16. MRPB20'nin yük sehimi grafiği

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %20'si kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB20'nin yük sehimi grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra ani bir düşüşle belirli bir seviyeye düştüğü daha sonra ise lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.16.). Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %20'si kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB20'nin eğilme dayanımı 25,83 MPa ve kırılma tokluğu 17,72 Nm olarak bulunmuştur.

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %20'si kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB20) ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %37,13 oranında, kırılma tokluğu ise %46,80 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %20'si kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB20) ile birlikte eğilme dayanımı, kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %15'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB15) e göre %15,22 oranında, kırılma tokluğu ise %27,31 oranında azalmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=5,09$  ve  $I_{10}= 5,09$  değerlerini almışlardır.  $I_5$  ve  $I_{10}$  indeks değerlerinin aynı çıkmasının sebebi ise eğilme testine tabi tutulan numunenin ilk çatlağın oluştuğu kuvvete karşılık gelen sehimin 5,5 katına karşılık gelen sehim değerine ulaşamamasıdır. Bu değerler, Tablo 3.11'deki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB20'ye ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.



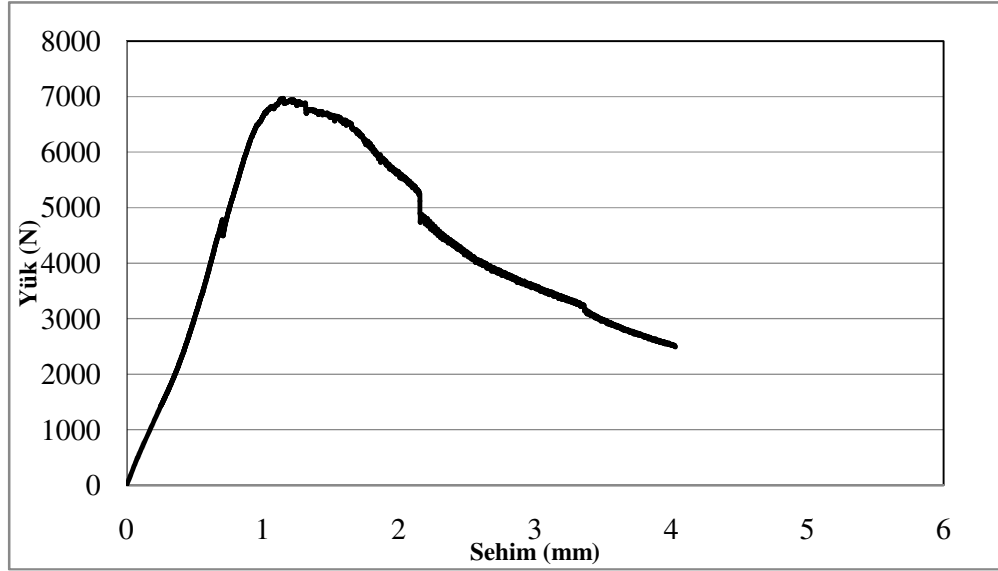
Şekil 4.17. MRPB25'e ait yük sehim grafiği

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %25'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB25'in yük sehim grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra ani bir düşüşle belirli bir seviyeye düştüğü daha sonra ise lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.17). Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %25'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB25'in eğilme dayanımı 24,04 MPa ve kırılma tokluğu 18,73 Nm olarak bulunmuştur.

Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %25'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan(MRPB25) ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %41,19 oranında, kırılma tokluğu ise %43,77 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %25'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB25) ile birlikte eğilme dayanımı,Kuars pudrası yerine ve çimento miktarının %20'si kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB20'ye göre %6,93 oranında azalmış, kırılma tokluğu ise %5,39 oranında artmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır.Kırılma tokluğundaki artış için bulamacın kendi içindeki granülometrisinin kuvars pudrasına göre daha iyi olabilmektedir. Çünkü mermer işleme sırasında su kullanılması ve mermer tozlarının su ile uzaklaştırılması, dere agregalarında olduğu gibi doğal tane dizilimine yol açmaktadır. Bu nedenle istenilen granülometriye sahip olmaktadır. Kuvars pudrası ise kuvars kayacının kırılması sonucu elde edilmektedir. Üretim tekniği olarak kırmataş agregaya benzemektedir. Bu nedenle taneler belirli boyutlardadır. Kendi içerisinde iyi bir granülometriye sahip değildir.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=4,6$  ve  $I_{10}=6,32$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 3.9'daki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB25'e ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.





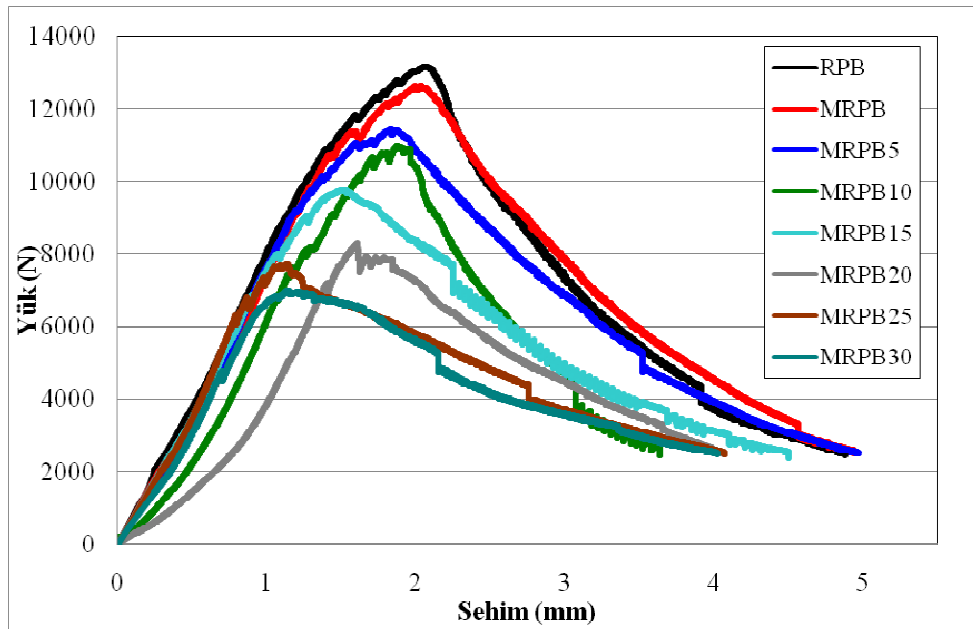
Şekil 4.18. MRPB30' a ait yük sehimi grafiği

Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %30'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB30'un yük sehimi grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra kademeli bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro liflerin sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.18). Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %30'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB30'un eğilme dayanımı 21,74 MPa ve kırılma tokluğu 17,1 Nm olarak bulunmuştur. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %30'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB30 ile birlikte eğilme dayanımı referans RPB'ye göre %47,09 oranında, kırılma tokluğu ise %48,66 azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %30'u kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan (MRPB30) ile birlikte eğilme dayanımı, kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %25'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanılan MRPB25'e göre %9,56 oranında azalmış, kırılma tokluğu ise %8,70 oranında artmıştır. Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=6,69$  ve  $I_{10}=10,8$  değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 3.11'deki elastik şekil değiştirme indeks değerlerine göre değerlendirildiğinde MRPB30'a ait numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması

durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin  $I_5$  ve  $I_{10}$  değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

Çimento miktarının azalması diğer açıdan bağlayıcı miktarının azalması eğilme parametrelerinde olumsuz etki yapmıştır. Kırılma tokluğundaki artış için bulamacın kendi içindeki granülometrisinin kuvars pudrasına göre daha iyi olabilmektedir. Çünkü mermer işleme sırasında su kullanılması ve mermer tozlarının su ile uzaklaştırılması, dere agregalarında olduğu gibi doğal tane dizilimine yol açmaktadır. Bu nedenle istenilen granülometriye sahip olmaktadır. Kuvars pudrası ise kuvars kayacının kırılması sonucu elde edilmektedir. Üretim tekniği olarak kırmataş agregaya benzemektedir. bu nedenle taneler belirli boyutlardadır. Kendi içerisinde iyi bir granülometriye sahip değildir.



Şekil 4.19. Bütün serilere ait karma yük sehim grafiği

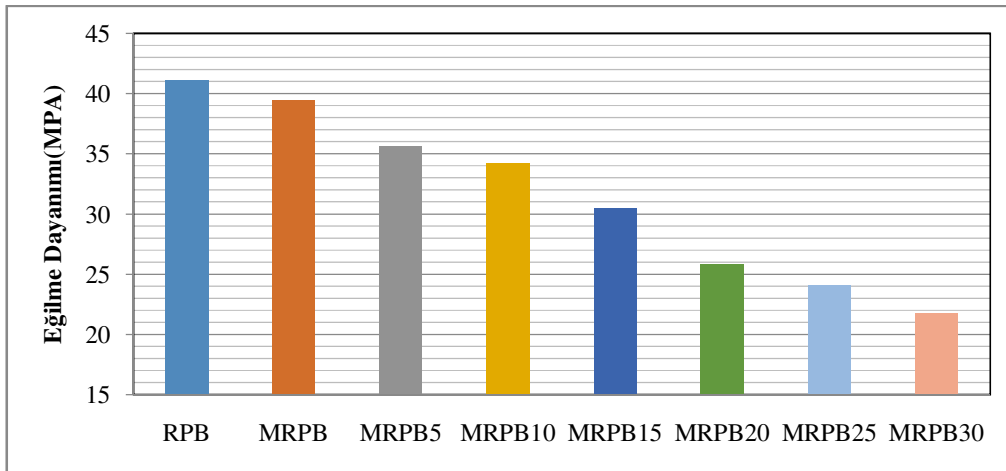
Şekil 4.19. incelendiğinde grafikte RPB'den MRPB30'a doğru genel bir azalma eğilimi olduğu söylenebilir. Bunun ana nedeni ise eğilme dayanımlarının karışımdaki çimento miktarının ikameli olarak azalması sonucuna bağlı olarak düşmesidir.

Ayrıca mermer bulamacının RPB ile oluşturduğu aderansın zayıfladığını bunun sonucunda kırılma tokluğu kapasitesinin azaldığı da söylenebilir (Şekil 4.19.).

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üretilen 300×50×50 mm prizmatik numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin eğilme dayanımına ait değerler Tablo 4.10'da, grafik ise Şekil 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4.10. Eğilme dayanımı

Numune Adı	Eğilme Dayanımı(MPA)
RPB	41,09
MRPB	39,40
MRPB5	35,66
MRPB10	34,18
MRPB15	30,47
MRPB20	25,83
MRPB25	24,04
MRPB30	21,74



Şekil 4.20. Bulamaç oranlarının eğilme dayanımı değerleri ile ilişkisi

Şekil 4.20. incelendiğinde RPB'nin eğilme dayanımı diğer guruplar içinde en yüksek sonucu vermekte, MRPB30'un eğilme dayanımı değeri ise en düşük değeri vermektedir. Eğilme dayanımındaki düşüş grafikte incelendiğinde eğilme dayanımı ile bulamaç miktarı arasında lineer bir bağıntıdan söz etmek mümkündür. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun eğilme dayanımı azalmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) birlikte, eğilme dayanımı referans RPB'ye göre % 4,11 oranında azalmıştır.

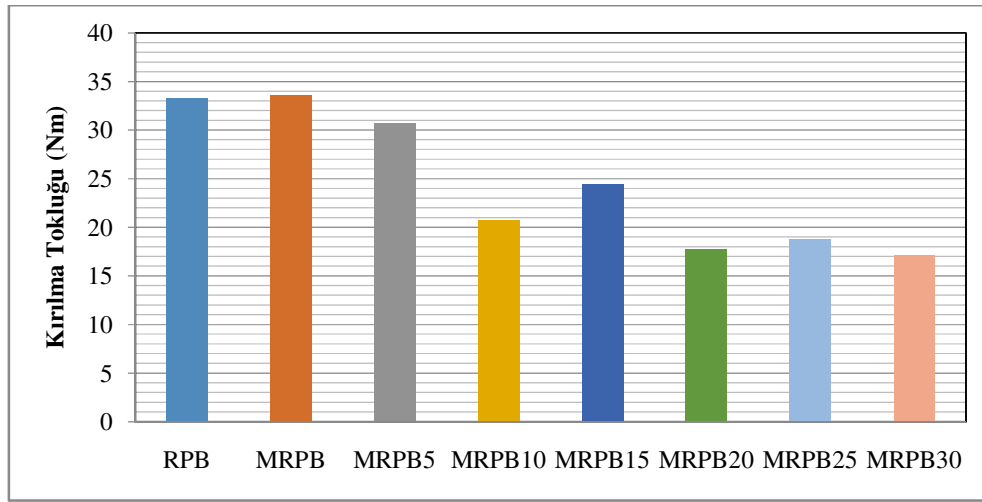
Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı (MRPB5), eğilme dayanımı referans numuneye göre %13,21 ve MRPB'ye göre ise %9,49 oranında azalmıştır. MRPB10'un eğilme dayanımı referans numuneye göre %16,81 MRPB5'e göre ise % 4,15 oranında azalmıştır. MRPB15'in eğilme dayanımı referans numuneye göre %25,84 ve MRPB10'a göre %10,85 oranında azalmıştır. MRPB20'nin eğilme dayanımı referans numuneye göre %37,13 ve MRPB15'a göre % 15,22 oranında azalmıştır. MRPB25'in eğilme dayanımı referans numuneye göre % 41,49 ve MRPB20'ye göre % 6,93 oranında azalmıştır, MRPB30'un eğilme dayanımı referans numuneye göre %47,09 ve MRPB25'e göre %9,56 oranında azalmıştır.

Eğilme dayanımının mermer bulamacı katılması ile doğru orantılı olarak azalmasına karışım içerisindeki bağlayıcı çimento miktarının azalması en temel etki olabilmektedir. Bunun yanı sıra işlenen mermer türüne göre değişiklik gösteren mermer bulamacı dayanımı, kuvars pudrası kadar homojen ve aynı dayanımda olmayabilir. Bu etken ise mikro çelik lifler ile beton ara yüzü arasındaki aderansı olumsuz etkileyerek, çelik liflerin daha kolay sıyırılmasına sebep olabilir. Ayrıca MRPB15 ve daha yüksek bulamaç oranlarının üretilmesinde aynı işlenebilirliği ve bulamaç kıvamını yakalamak için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır. Karışımdaki su miktarı ihtiyacının artmasının sebebi ise karışımdaki çimento miktarının azalması sonucu karışıma giren su miktarı azalmış buna karşılık çimentonun yerine ikameli olarak kullanılan bulamaç miktarı artmıştır. Bu artış ıslanacak agrega ara yüzey alanının artmasına sebep olmuştur. Bu artışın sonucunda su/çimento oranı yükselerek eğilme dayanımının düşmesine neden olabilmektedir.

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üretilen 300×50×50 mm prizmatik numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin kırılma tokluğuna ait değerler Tablo 4.11'de, grafik ise Şekil 4.21'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Kırılma tokluğu

Numune Adı	Kırılma Tokluğu (Nm)
RPB	33,31
MRPB	33,55
MRPB5	30,74
MRPB10	20,76
MRPB15	24,38
MRPB20	17,72
MRPB25	18,73
MRPB30	17,1



Şekil 4.21. Bulamaç oranlarının kırılma tokluğu değerleri ile ilişkisi

Şekil 4.21. incelendiğinde MRPB'nin kırılma tokluğu diğer gruplar içinde en yüksek sonucu vermekte, MRPB30'un kırılma tokluğu değeri ise en düşük değeri vermektedir. Kırılma tokluğundaki düşüş grafikte incelendiğinde kırılma tokluğu ile bulamaç miktarı arasında lineer bir bağıntıdan söz etmek mümkün değildir. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun kırılma tokluğu değeri değişkenlik göstermektedir. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) birlikte, kırılma tokluğu referans RPB'ye göre %0,72 oranında artmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı (MRPB5), kırılma tokluğu referans numuneye göre %7,71 ve MRPB'ye göre ise %8,37 oranında azalmıştır. MRPB10'un kırılma tokluğu referans numuneye göre %37,67 MRPB5'e göre ise % 32,46 oranında azalmıştır. MRPB15'in kırılma tokluğu referans numuneye göre %26,8 azalmış,

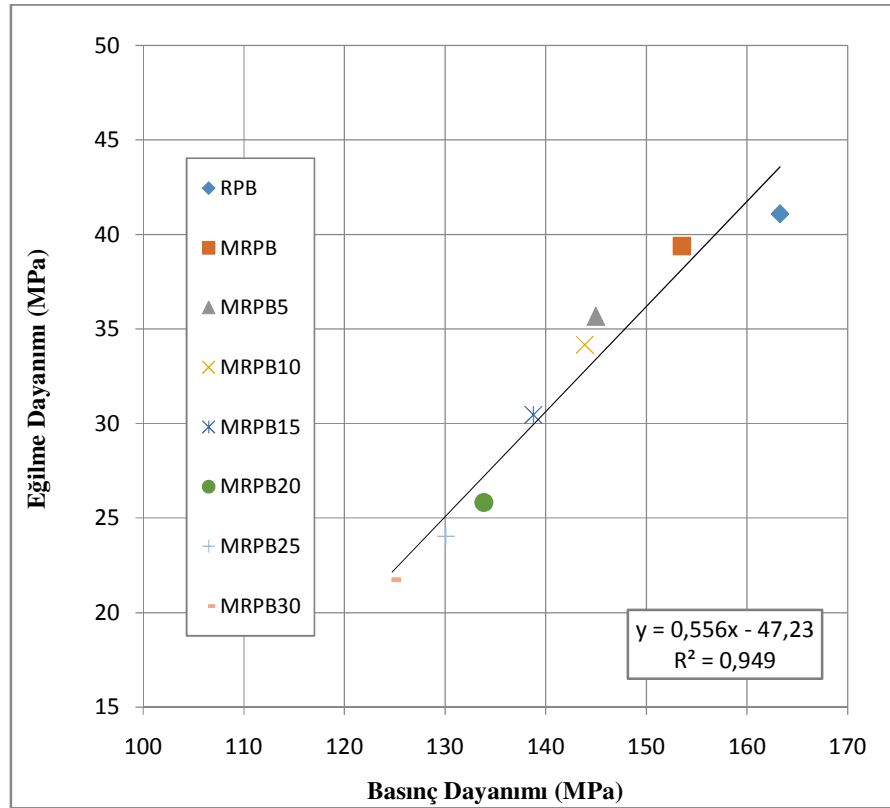
MRPB10'a göre ise %17,43 oranında artmıştır. MRPB20'nin kırılma tokluğu referans numuneye göre %46,8 ve MRPB15'a göre % 27,31 oranında azalmıştır. MRPB25'in kırılma tokluğu referans numuneye göre % 43,77 azalmış, MRPB20'ye göre ise % 5,69 oranında artmıştır. MRPB30'un kırılma tokluğu referans numuneye göre %48,66 ve MRPB25'e göre %8,70 oranında azalmıştır.

Kırılma tokluğu değerleri ile ilgili mermer bulamacı oranına bağlı bir bağıntı görülememiştir. Buna sebep karışım içerisindeki bağlayıcı çimento miktarının mermer bulamacı ikameli olarak azalması, kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılması en temel etkiler olabilmektedir. Bunun yanı sıra işlenen mermer türüne göre değişiklik gösteren mermer bulamacı dayanımı, kuvars pudrası kadar homojen ve aynı dayanımda olmayabilir. Bu etken ise mikro çelik lifler ile beton ara yüzü arasındaki aderansı olumsuz etkileyerek, çelik liflerin daha kolay sıyrılmasına sebep olabilir. Bunun sonucunda ise numunelerin kırılma tokluğunu etkileyen grafiğin altındaki alanların değişmesine neden olabilmektedir. Ayrıca MRPB15 ve daha yüksek bulamaç oranlarının üretilmesinde aynı işlenebilirliği ve bulamaç kıvamını yakalamak için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır. Karışımdaki su miktarı ihtiyacının artmasının sebebi ise karışımdaki çimento miktarının azalması sonucu karışıma giren işlenebilirlik için gerekli su miktarı azalmış buna karşılık çimentonun yerine ikameli olarak kullanılan bulamaç miktarı artmıştır. Bu artış ıslanacak agrega ara yüzey alanının artmasına sebep olmuştur. Bu artışın sonucunda hem su/çimento oranı yükselerek kırılma tokluğu değerinin düşmesine neden olmuş hem de betonun doluluk oranı etkilenmiştir.

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üretilen 300×50×50 mm prizmatik numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımına ait değerler Tablo 4.12'de, grafik ise Şekil 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Eğilme dayanımı-Basınç dayanımı ilişkisi

Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
RPB	163,26	41,09
MRPB	153,53	39,40
MRPB5	144,98	35,66
MRPB10	143,86	34,18
MRPB15	138,76	30,47
MRPB20	133,84	25,83
MRPB25	130,08	24,04
MRPB30	124,72	21,74



Şekil 4.22. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı grafiği

Şekil 4.22. incelendiğinde eğilme dayanımı arttıkça beton basınç dayanımında arttığı görülmektedir. Grafiğe bakıldığında beton basınç dayanımının ve eğilme dayanımının en yüksek olduğu serinin RPB olduğu, en düşük olduğu serinin ise MRPB30 olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle karışımdaki bulamaç oranlarının artmasının betonun hem basınç dayanımını hem de eğilme dayanımını düşüren lineer olmayan bir bağıntı ile açıklamak mümkündür. Basınç dayanımını arttıran ana

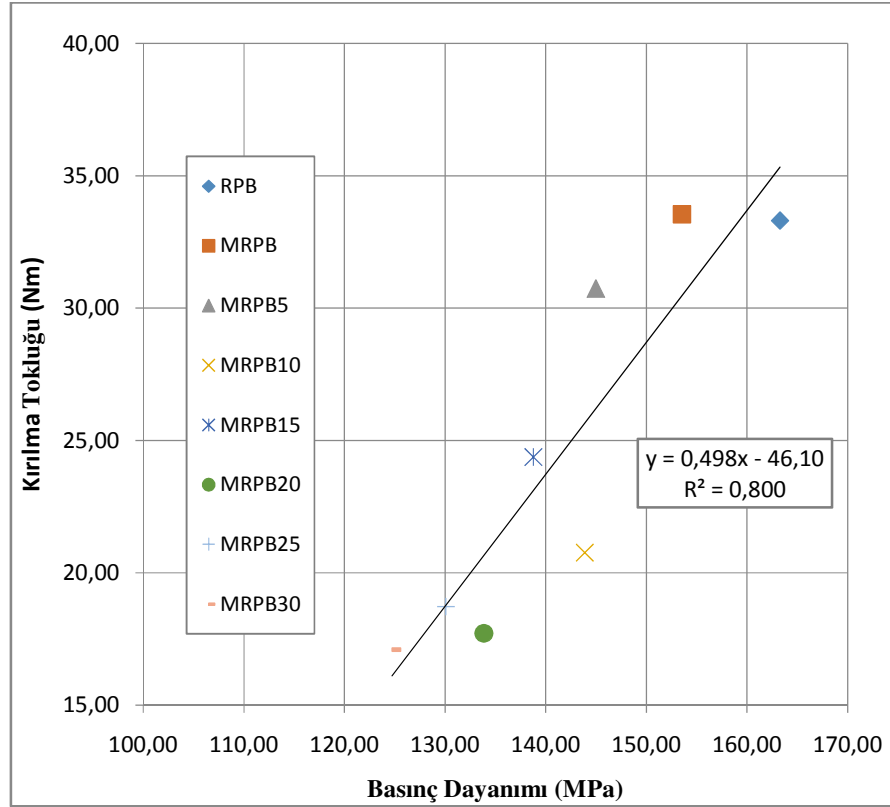
nedenlerden biri de betondaki boşluk miktarı ve yapısıyla ilişkilidir. Aynı zamanda eğilme dayanımı da benzer şekilde etkilenmektedir. Ayrıca karışıma giren bağlayıcı çimento miktarının azalması, bunun yerine ikameli olarak mermer bulamacı eklenmesi mikro çelik liflerin RPB ile olan aderansını dolayısı ile eğilme ve basınç dayanımlarını etkilemektedir.

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üretilen 300×50×50 mm prizmatik numunelerde RPB'nin, RPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin basınç dayanımı, kırılma tokluğuna ait değerler Tablo 4.13'de, grafik ise Şekil 4.23'de verilmiştir.

Tablo4.13. Basınç dayanımı-Kırılma tokluğu ilişkisi

<b>Numune Adı</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>	<b>Kırılma Tokluğu (Nm)</b>
RPB	163,26	33,31
MRPB	153,53	33,55
MRPB5	144,98	30,74
MRPB10	143,86	20,76
MRPB15	138,76	24,38
MRPB20	133,84	17,72
MRPB25	130,08	18,73
MRPB30	124,72	17,1





Şekil 4.23. Kırılma tokluğu, basınç dayanımı grafiği

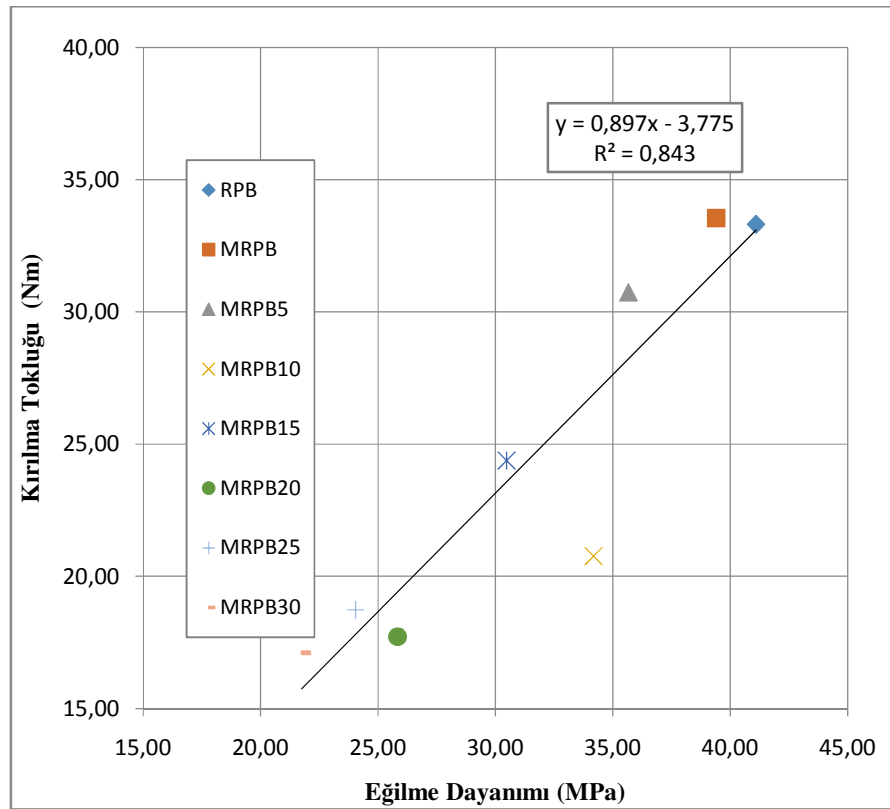
Şekil 4.23. incelendiğinde beton basınç dayanımı arttıkça kırılma tokluğunun MRPB30, MRPB25 ve MRPB15 numuneleri için arttığı, MRPB20 ve MRPB10 numuneleri içinse düşüş gösterdiği görülmektedir. Grafiğe bakıldığında beton basınç dayanımının ve kırılma tokluğunun en yüksek olduğu serinin RPB olduğu, en düşük olduğu serinin ise MRPB30 olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle karışımdaki bulamaç oranlarının artmasının betonun hem basınç dayanımını hem de kırılma tokluğunu düşüren lineer bir bağıntı ile açıklamak mümkündür. Basınç dayanımını arttıran ana nedenlerden biri de betondaki boşluk miktarı ve yapısıyla ilişkilidir. Aynı zamanda kırılma tokluğu da benzer şekilde etkilenmektedir. Ayrıca karışıma giren bağlayıcı çimento miktarının azalması, bunun yerine ikameli olarak mermer bulamacı eklenmesi mikro çelik liflerin RPB ile olan aderansını dolayısı ile kırılma tokluğu ve basınç dayanımlarını etkilemektedir.

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere üretilen 300×50×50 mm prizmatik numunelerde RPB'nin, MRPB'nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren numunelerin eğilme

dayanımı, kırılma tokluğuna ait değerler Tablo 4.14'de, grafik ise Şekil 4.24'de verilmiştir.

Tablo 4.14. Kırılma tokluğu-Eğilme dayanımı ilişkisi

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	Kırılma Tokluğu (Nm)
RPB	41,09	33,31
MRPB	39,40	33,55
MRPB5	35,66	30,74
MRPB10	34,18	20,76
MRPB15	30,47	24,38
MRPB20	25,83	17,72
MRPB25	24,04	18,73
MRPB30	21,74	17,1



Şekil 4.24. Kırılma tokluğu, eğilme dayanımı grafiği

Şekil 4.24. incelendiğinde eğilme dayanımı arttıkça kırılma tokluğunun da arttığı görülmektedir. Grafiğe bakıldığında kırılma tokluğunun en yüksek olduğu serinin MRPB olduğu, eğilme dayanımının en yüksek olduğu serinin ise RPB olduğu

anlaşılmaktadır. Ayrıca kırılma tokluğunun ve eğilme dayanımının en düşük olduğu serinin ise MRPB30 olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle karışımdaki bulamaç oranlarının artmasının genel olarak betonun hem kırılma tokluğunu hem de eğilme dayanımını düşüren lineer bir bağıntı ile açıklamak mümkündür. Kırılma tokluğunu arttıran ana nedenlerden biri de betondaki boşluk miktarı ve yapısıyla ilişkilidir. Aynı zamanda eğilme dayanımı da benzer şekilde etkilenmektedir. Ayrıca karışıma giren bağlayıcı çimento miktarının azalması, bunun yerine ikameli olarak mermer bulamacı eklenmesi mikro çelik liflerin RPB ile olan aderansını dolayısı ile eğilme dayanımını ve kırılma tokluğunu etkilemektedir.

#### **4.2. Birim Maliyet Analizleri**

Bu başlık altında; üretilen numunelerin karışım oranlarındaki farklılıklar sonucu değişen mekanik özelliklerin birim fiyat dayanımı üzerine olan etkileri hesaplanmıştır. Eğilme ve basınç deneylerin de kullanılmak üzere üretilen numunelerde; RPB' nin, MRPB' nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren serilerin 1 m<sup>3</sup> beton için birim maliyet analizine ait değerler Tablo 4.15.'de verilmiştir. Basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti, kırılma tokluğu birim maliyetine ait değerler Tablo 4.16.' da, grafik ise Şekil 4.25.' de verilmiştir.

Tablo 4.15. Maliyet analizi

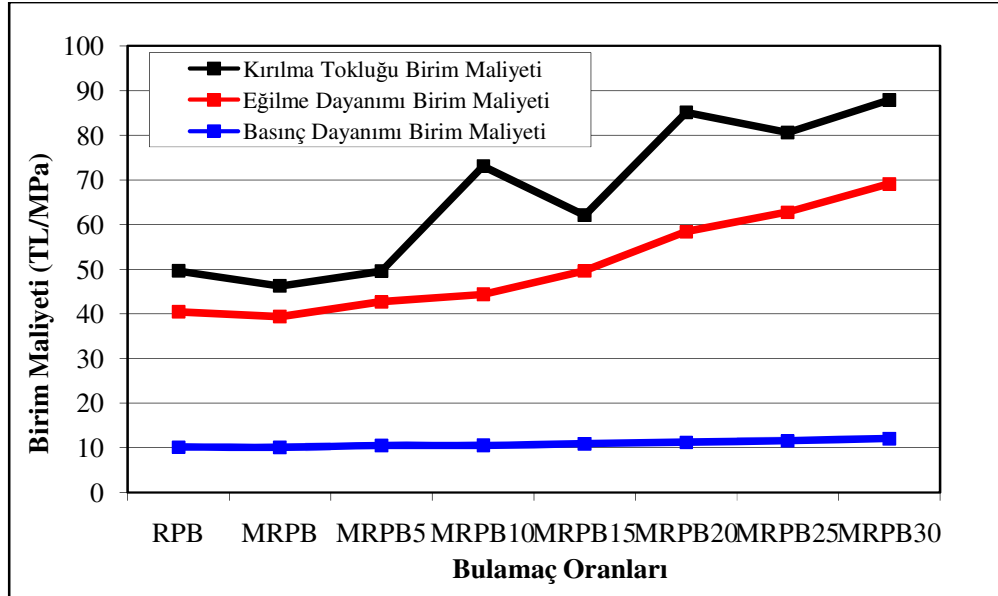
Bulamaç Oranları(%)	Çimento (kg)	Silis dumanı (kg)	K. Pudrası (kg)	K. Kum (100-300) (kg)	K. Kum (300-600) (kg)	Mermer Bulamacı (kg)	Su (kg)	K. Katkı (kg)	Çelik Lif (kg)	Toplam Maliyet (YTL)	Basınç Dayanımı(Mpa)	Eğilme Dayanımı(Mpa)	Kırılma Tokluğu(Nm)
	Birim Fiyat (kg/TL)												
	0,140	0,250	0,400	0,200	0,200	0,000	0,002	4,000	4,000				
<b>RPB</b>	900,00	270,00	278,00	252,00	252,00	0,00	270,00	27,00	287,24	1662,92	163,26	41,09	33,51
<b>MRPB</b>	900,00	270,00	0,00	252,00	252,00	408,96	149,04	27,00	287,24	1551,51	153,53	39,40	33,55
<b>MRPB5</b>	855,00	256,50	0,00	216,50	216,50	472,86	116,64	26,00	287,24	1523,58	144,98	35,66	30,74
<b>MRPB10</b>	810,00	243,00	0,00	244,00	244,00	536,76	84,24	24,00	287,24	1516,85	143,86	34,18	20,76
<b>MRPB15</b>	765,00	230,00	0,00	269,00	269,00	600,36	73,79	23,00	287,24	1513,28	138,76	30,47	24,38
<b>MRPB20</b>	720,00	216,00	0,00	296,00	296,00	664,56	48,28	21,60	287,24	1508,64	133,84	25,83	17,72
<b>MRPB25</b>	675,00	202,50	0,00	336,00	336,00	728,46	38,46	20,30	287,24	1509,75	130,08	24,04	18,73
<b>MRPB30</b>	630,00	189,00	0,00	357,00	357,00	792,36	30,76	18,90	287,24	1502,86	124,72	21,74	17,10

Eğilme ve basınç deneylerin de kullanılmak üzere üretilen numunelerde; RPB' nin, MRPB' nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren serilerin basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti ve kırılma tokluğu birim maliyeti Tablo 4.16.' da verilmiştir.

Tablo 4.16. Birim maliyet analizi

Lif Miktarı (%)	Basınç Day. Birim Maliyeti (TL/MPa)	Eğilme Day. Birim Maliyeti (TL/MPa)	Kırılma Tokluğu (TL/Nm)
RPB	10,19	40,47	49,62
MRPB	10,11	39,38	46,24
MRPB5	10,51	42,72	49,56
MRPB10	10,54	44,38	73,07
MRPB15	10,91	49,67	62,07
MRPB20	11,27	58,41	85,14
MRPB25	11,61	62,81	80,61
MRPB30	12,05	69,13	87,89

Eğilme ve basınç deneylerin de kullanılmak üzere üretilen numunelerde; RPB' nin, MRPB' nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren serilerin basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti ve kırılma tokluğu birim maliyetini gösteren grafik Şekil 4.22' de verilmiştir.



Şekil 4.25. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu birim maliyeti grafiği

#### 4.2.1. Basınç dayanımı birim maliyeti

Şekil 4.25. incelendiğinde MRPB'nin basınç dayanımı birim maliyeti diğer guruplar içinde en düşük sonucu vermekte, MRPB30'un basınç dayanımı birim maliyet değeri ise en yüksek değeri vermektedir. Basınç dayanımı birim maliyeti grafikte incelendiğinde karışımdaki bulamaç oranı miktarı ile arasında lineer bir bağıntıdan söz etmek mümkündür. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun basınç dayanımı birim maliyeti artmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle(MRPB) birlikte, basınç dayanımı birim maliyet değeri referans RPB'ye göre %0,78 oranında azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı(MRPB5), basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %3,04 ve MRPB'ye göre ise %3,80 oranında artmıştır. MRPB10'un basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %3,32 MRPB5'e göre ise % 0,28 oranında artmıştır. MRPB15'in basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %6,59 MRPB10'a göre ise %3,39 oranında artmıştır. MRPB20'nin basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %9,58 ve MRPB15'a göre % 3,19 oranında artmıştır. MRPB25'in basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre % 12,23 MRPB20'ye göre ise % 2,92 oranında artmıştır.MRPB30'un basınç dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %15,43 ve MRPB25'e göre % 3,65 oranında artmıştır.

Değerler incelendiğinde basınç dayanımı birim maliyeti açısından en verimli numunenin ve en uygun mermer bulamaç oranına sahip gurubun MRPB olduğunu söyleyebiliriz. Buda bize RPB'nin karışımında bulunan kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının betonun basınç dayanımı özelliği göz önüne alındığında daha ekonomik ve avantajlı olduğunu göstermektedir.

#### 4.2.2. Eğilme dayanımı birim maliyeti

Şekil 4.25. incelendiğinde MRPB'nin eğilme dayanımı birim maliyeti diğer guruplar içinde en düşük sonucu vermekte, MRPB30'un eğilme dayanımı birim maliyet değeri ise en yüksek değeri vermektedir.Eğilme dayanımı birim maliyeti grafikte

incelendiğinde karışımdaki bulamaç oranı miktarı ile arasında lineer bir bağıntıdan söz etmek mümkündür. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun eğilme dayanımı birim maliyeti artmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle(MRPB) birlikte, eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans RPB'ye göre %2,44 oranında azalmıştır. Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı(MRPB5), eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %5,26 ve MRPB'ye göre ise %7,81 oranında artmıştır. MRPB10'un eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %8,81MRPB5'e göre ise % 3,74 oranında artmıştır. MRPB15'in eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %18,52 MRPB10'a göre ise %10,65 oranında artmıştır. MRPB20'nin eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %30,71 ve MRPB15'a göre % 14,96 oranında artmıştır. MRPB25'in eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre % 35,56 MRPB20'ye göre ise % 7 oranında artmıştır.MRPB30'un eğilme dayanımı birim maliyet değeri referans numuneye göre %41,45 ve MRPB25'e göre % 9,14 oranında artmıştır.

Sonuç olarak, eğilme dayanımı birim maliyeti açısından en verimli numunenin ve en uygun mermer bulamaç oranına sahip gurubun MRPB olduğunu söyleyebiliriz. RPB'nin, karışımında bulunan kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının betonun eğilme dayanımı özelliği göz önüne alındığında daha ekonomik ve avantajlı olduğunu göstermektedir.

#### **4.2.3. Kırılma tokluğu birim maliyeti**

Şekil 4.25. incelendiğinde MRPB' nin kırılma tokluğu birim maliyeti diğer guruplar içinde en düşük sonucu vermekte, MRPB30'un eğilme dayanımı birim maliyet değeri ise en yüksek değeri vermektedir. Kırılma tokluğu birim maliyeti grafikte incelendiğinde karışımdaki bulamaç oranı miktarı ile arasında lineer bir bağıntıdan söz etmek mümkün değildir. Karışımdaki bulamaç oranı arttıkça buna bağlı olarak üretilen betonun kırılma tokluğu birim maliyeti değişkenlik göstermektedir. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle(MRPB) birlikte, kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans RPB'ye göre %6,77 oranında azalmıştır.

Kuvars pudrası yerine ve çimento miktarının %5'i kadar ikameli mermer bulamacı kullanımı(MRPB5), kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre % 0,12 ve MRPB'ye göre ise %6,69 oranında artmıştır. MRPB10'un kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre %32,09 MRPB5'e göre ise % 32,17 oranında artmıştır. MRPB15'in kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre %20,05 artmış, MRPB10'a göre ise %15,05 oranında azalmıştır. MRPB20'nin kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre % 41,71 ve MRPB15'a göre % 27,09 oranında artmıştır. MRPB25'in kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre % 38,44 artmış, MRPB20'ye göre ise % 5,32 oranında azalmıştır.MRPB30'un kırılma tokluğu birim maliyet değeri referans numuneye göre % 43,54 ve MRPB25'e göre % 8,28 oranında artmıştır.

Kırılma tokluğu birim maliyeti açısından en verimli numunenin ve en uygun mermer bulamaç oranına sahip gurubun MRPB olduğunu söyleyebiliriz. RPB'nin, karışımında bulunan kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının betonun kırılma tokluğu özelliği göz önüne alındığında daha ekonomik ve avantajlı olduğunu göstermektedir.



## BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

RPB'yi oluşturan malzemeler temin edilerek bu malzemelerin özellikleri ve karışım oranları belirlenmiştir. Oluşturulan karışıma, farklı oranlarda kuvars pudrası ve çimento ikameli mermer bulamacı ikame edilerek mermer bulamacının basınç, eğilme parametreleri ve maliyet üzerindeki etkisini incelemiş ve optimum bulamaç oranı belirlenmiştir. Tüm numunelere, 3 gün 90° de kür uygulanmıştır. Daha sonra üretilen küp ve prizmatik numunelerin; birim hacim ağırlığı, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma parametreleri ile maliyete etkisi incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- RPB'yi oluşturan malzemeler ve üretim tekniği normal betonlardan farklı olmakla birlikte çoğunluğu ülkemizde üretilen malzemeleri kullanılarak RPB üretilmektedir.
- RPB karışımlarının hazırlanması, normal betonlara göre farklılık göstermektedir. Karıştırma işlemi için kullanılan mikserin karıştırma hızı ve karışıma giren malzemelerin miksere konulma sırası belli bir düzen içerisinde olmalıdır. Bu nedenle RPB'nin karıştırma işlemi ve sıralaması için ikameli olarak kullanılan malzemenin özelliğine göre belirlenmiştir. Karıştırma işlemi sırası, yaş mermer bulamacı, su, akışkanlaştırıcı, çimento, silis dumanı, kuvars kumları ve çelik lif olarak belirlenmiştir.
- RPB'ye mermer bulamacı katılması ile birlikte karıştırma ve yerleştirme işlemlerinde zorluklarla karşılaşmıştır. Akıcı bir kıvama sahip olan RPB'nin %15 oranında mermer bulamacı kullanılmasından sonra bu özelliğini kaybettiği görülmüştür ve aynı işlenebilirliği sağlayabilmek için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır.

- Birim hacim ağırlık değerleri üzerinde, kuvars pudrası ile yakın özgül ağırlık değerine sahip mermer bulamacının kayda değer etkisi olmadığı görülmüştür.
- Referans olarak üretilen numuneler ve yüksek oranda mermer bulamacı içeren RPB'ler ile 120 MPa ile 170 MPa arasında değişen yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Basınç dayanımının mermer bulamacı katılması ile doğru orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Bunun temel nedeni karışım içerisindeki bağlayıcı çimento miktarının azalması olabilmektedir. Bunun yanı sıra işlenen mermer türüne göre değişiklik gösteren mermer bulamacı dayanımı, kuvars pudrası kadar homojen ve aynı dayanımda olmayabilir. Ayrıca MRPB15 ve daha yüksek bulamaç oranlarının üretilmesinde aynı işlenebilirliği ve bulamaç kıvamını yakalamak için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır. Karışımdaki su miktarı ihtiyacının artmasının sebebi ise çimento miktarına bağlıdır. Çimento miktarının azalması sonucunda karışıma giren işlenebilirlik için gerekli su miktarında azalma olmuş ve buna ek olarak da çimentonun yerine ikameli olarak kullanılan bulamaç miktarı artmıştır. Bu artış ıslanacak agrega ara yüzey alanının artmasına sebep olmuştur. İşlenebilirlik için gerekli su miktarının artması basınç dayanımını olumsuz olarak etkilemiştir.
- Ultrases hızı değerleri mermer bulamacı oranı arttıkça lineer olarak azalmıştır. Ultra ses geçiş hızındaki azalmanın sebepleri; karışımdaki su miktarının kademeli olarak artması sonucu deney numunelerindeki betonun doluluk oranı referans RPB' ye göre azalmış ve daha boşluklu hale gelmiştir. Boşluk oranı artan betonlarda dayanımın düşeceği, ses dalgalarının geçişinde engel oluşturarak geçiş yolunun uzaması ile birlikte ultra ses geçiş hızının düşmesine sebep olacaktır. Buna paralel olarak kullanılan bulamaç miktarı arttıkça beton basınç dayanımları da azalmıştır ki bu da ultra ses geçiş hızı değerindeki azalmanın sebeplerindedir.
- Scmidth test çekici değerleri ile karışımdaki bulamaç oranının artması arasında anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Bulamaç oranı arttıkça nispeten Schmidt sonuçları bir miktar etkilenmektedir.

- Eğilme dayanımını değerlerinin mermer bulamacı oranı ile doğru orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Karışım içerisindeki bağlayıcı çimento miktarının azalması buna en temel etki olabilmektedir. Bunun yanı sıra pasta dayanımının mermer bulamacı dayanımından etkilenmesi, mikro çelik lifler ile beton ara yüzü arasındaki aderansı olumsuz etkileyerek, çelik liflerin daha kolay sıyırılmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca MRPB15 ve daha yüksek bulamaç oranlarının üretilmesinde aynı işlenebilirliği ve bulamaç kıvamını yakalamak için karışımdaki su ihtiyacı artmıştır. Bu artışın sonucunda su/çimento oranı yükselerek eğilme dayanımının düşmesine neden olabilmektedir.
- Kırılma tokluğu değerleri ile ilgili mermer bulamacı oranına bağlı olarak olumsuz yönde etkilenmiştir. Eğilme dayanımının düşmesine neden olan sebepler kırılma tokluğunu doğrudan etkilemiştir.
- Eğilme ve basınç deneylerin de kullanılmak üzere üretilen numunelerde; RPB' nin, MRPB' nin ve diğer altı farklı oranda bulamaç içeren serilerin basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti ve kırılma tokluğu birim maliyeti değerleri incelendiğinde basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti ve kırılma tokluğu birim maliyeti açısından en verimli numunenin ve en uygun mermer bulamaç oranına sahip gurubun MRPB olduğunu söyleyebiliriz. Bu da bize RPB'nin karışımında bulunan kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının betonun basınç dayanımı özelliği göz önüne alındığında daha ekonomik ve avantajlı olduğunu göstermektedir.
- Mermer bulamacı atıklarının yapı malzemesi olarak kullanımı hem çevresel hem de ekonomik katkı sağlayabilecektir. Bununla birlikte günümüzde en önemli konuların başında gelen çevre ve insan sağlığı konularında fayda sağlanması çalışmanın önemini arttırmaktadır. Ayrıca mermer bulamacı gibi atıkların çevreye atılması yapay bataklıklar oluşturmakta rengi ve içerdiği su muhtevası sayesinde çevredeki canlıları kendine çekmektedir. Kedi, köpek, kuş gibi canlıların bu yapay bataklığa saplanması ile ölümler gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle bu atıkların gereken tedbirlerin alınmasıyla depolanması ve biran önce değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.lafarge-beton.com.tr>, Erişim Tarihi: 08.05.2013.
- [2] AITCIN, P.C., Cement of Yesterday and Today Concrete of Tomorrow, Cement and Concrete Research, 30, 9, pp. 1349–1359, 2000.
- [3] TAŞDEMİR, M.A., BAYRAMOV, F., KOCATÜRK, A.N., YERLİKAYA, M., Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton2004 Kongresi, İstanbul, sf. 1-34, 2004.
- [4] ÇİVİCİ, F., Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 2, sf. 183-188, 2006.
- [5] RICHARD, P., CHEYREZY, M.H., Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, 25, 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [6] AITCIN, P.C., Concrete the most widely used construction materials, ACI SP- 154, pp. 257-266, 1995.
- [7] AITCIN, P.C., SARKAR, S.L., RANC, R., LEVY, C., A High-Silica-Modulus Cement For High Performance Concrete, Advanced Cementitious Materials Ceramic Transaction, Gaithersburg, 16, pp. 103–121, 1991.
- [8] <http://www.elkem.com>, Erişim Tarihi: 10.2.2013.
- [9] RICHARD, P., CHEYREZY, M.H., Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, ACI Spring Convention, San Francisco, 1994.
- [10] GOLDMAN, A., BENTUR, A., The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, Cement and Concrete Research, 23, 4, pp. 962–972, 1993.
- [11] YEĞİNOBALI, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği /AR-GE Enstitüsü, 2. Baskı, sf. 18-46, Ankara, 2002.

- [12] AVAR, D., Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, SF. 27-32, 2006.
- [13] TAŞDEMİR, C., Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on The Sorptivity Coefficient of Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 10, pp. 1637–1642, 2003.
- [14] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., MILLS, N., BARR, B.I.G., LYDON, F.D., Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Postpeak Response of Concrete in Bending, ACI Mater. J., 96, 1, pp. 74–83, 1999.
- [15] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., MILLS, N., BARR, B.I.G., LYDON, F.D., Effects of Silica Fume and Aggregate Size on Brittleness of Concrete, Cement and Concrete Research, 26, 1, pp. 63–68, 1996.
- [16] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., GRIMM, R., KÖNIG, G., Microstructural Effects on Brittleness of High Strength Concretes, in: F.H., Wittmann (Ed.), Fracture Mechanics of Concrete Structures, FRAMCOS-2, Aedificatio Publishers, Freiburg, Germany, pp. 125–134, 1995.
- [17] TAŞDEMİR, M.A., TAŞDEMİR, C., AKYÜZ, S., JEFFERSON, A.D., LYDON, F.D., BARR, B.I.G., Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three Phase Composite Model Approach, Cement and Concrete Composites, 20, 4, pp. 301–318, 1998.
- [18] İPEK, M., “Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya 2009, 1-75.
- [19] LARRARD, F., SEDRAN, T., Optimization of Ultra-High-Performance Concrete By The Use of A Packing Model, Cement and Concrete Research, 24, 6, pp. 997–1009, 1994.
- [20] DUGAT, J., ROUX, N., BERNIER, G., Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, Materials and Structures, 29, 4, pp. 233-240, 1996.
- [21] TAŞDEMİR M.A., KOCATÜRK, A.N., HABERVEREN, S., ASLAN, G., Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul, pp. 447–457, 2005.
- [22] DALLAIRE, E., AITCIN, P.C., LACHEMI, M., High-Performance Powder, University of Sherbrooke Source: Civil Engineering (New York), ASCE Civ. Eng. Mag. USA, 68, 1, pp. 48-51, 1998.

- [23] DOWD, W.M., DAURIAC, C.E., Reactive Powder Concrete, HDR Engineering, Inc Source: Construction Specifier, Construction Specifications Institute Inc, Alexandria, VA, USA, 49, 12, pp. 47–52, 1996.
- [24] GILLILAND, S.K., Reactive Powder Concrete (RPC), A New Material For Prestressed Concrete Bridge Girders, HDR Engineering, Inc Source: Structures Congress-Proceedings of The 14th Structures Congress. Part 1 of 2, Chicago, IL, USA, pp. 125–132, 1996.
- [25] O'NIEL, F.E., DAURIAC, E.C., GILLILAND, S.K., Development of Reactive Powder Concrete (RPC) Products in The United States Conctruction Market, ACI, Convention Committee 363, High-Strenght Concrete, An International Perspective, Montreal, SP 167-12, 249–261, 1997.
- [26] TEICHMAN, T., SCHMIDT, M., Influence of The Packing Density of Fine Particles on Structure, Strength and Durability of UHPC, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 312-323, 2004.
- [27] MA, J., ORGASS, M., DEHN, F., SCHMIDT, D., TUE, N.V., Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 205-212, 2004.
- [28] SADREKARIMI, A., Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2, 3, pp. 409–417, 2004.
- [29] ADELIN R., BEHLOUL M., High Ductile Beams Without Passive Reinforcement, 4th International Symposium On Utilization Of High-Strength/High Performance Concrete, Paris, France, pp. 1383–1390, 1996.
- [30] ADELIN R., BEHLOUL M., BERNIER G., High Ductile Beams Without Passive Reinforcement, FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures, Concrete Society Publication CS112/113, pp. 592–606, 1996.
- [31] MATTE, V., MORANVILLE, M., Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, Cement and Concrete Composites, 21, 1, pp. 1–9, 1999.
- [32] BLAIS, P.Y., COUTURE, M., Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, 44, 5, pp. 61-71, 1999.

- [33] CAVILL, B., CHIRGWIN, G., The World's First RPC (Ductal) Road Bridge at Shepherds Creek, NSW, Austroads 5th Bridge Conference, Hobart, Australia, pp. 1–13, 2004.
- [34] CAVILL, B., REBENTROST, M., Reactive Powder Concrete Bridges, Austroads 6th Bridge Conference, Perth, Australia, pp. 11-23, 2006.
- [35] <http://www.wapellocounty.org/roads/marshill.htm>. Erişim Tarihi: 4.3.2008.
- [36] BIERWAGEN, D., ABU-HAWASH, A., Ultra High Performance Concrete Highway Bridge, Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, pp. 18–19, 2005.
- [37] RICCIOTTI, R., Bridge to the Future, ASCE Civil Engineering Magazine, 71, 1, pp 1–45, 2001.
- [38] TANAKA, Y., MUYYA, H., OOTAKE, A., SHIMOYAMA, Y., KANEKO, A., Design and Construction of Skata-Mirai Footbridge Using Reactive Powder Concrete, Proceedings of the 1st Fib. Congress, Osaka, Japan, pp. 417–424, 2002.
- [39] REBENTROST, M., Design and Construction of the First Ductal Bridge in New Zealand, New Zealand Concrete Industry Conference, Auckland, New Zealand, pp. 1–100, 2005.
- [40] WEN-YU, J., MING-ZHE, A., GUI-PING, Y., JUN-MIN, W., Study on Reactive Powder Concrete Used in the Sidewalk System of the Qinghai-Tibet Railway Bridge, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, pp. 333–339, 2007.
- [41] <http://www.ductal-lafarge.com>. Erişim Tarihi: 4.4.2008.
- [42] <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3147.pdf>, Erişim Tarihi: 6.7.2008.
- [43] WALRAVEN, J., The Evolution of Concrete, Structural Concrete, Journal of Fib, P1, 1, 3–11, 1999.
- [44] BONNEAU, O., LACHEMI, M., DALLAIRE, E., DUGAT, J., AITCIN, P.C., Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, ACI Materials Journal, 94, 4, 286–290, 1997.
- [45] FEYLESSOUFI, A., VILLIERAS, F., MICHOT, L. J., DE DONATO, P., CASES, J. M., RICHARD, P., Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Composites, 18, 1, pp. 23–29, 1996.

- [46] CHAN, Y., CHU, S., Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 7, pp. 1167–1172, 2004.
- [47] BONNEAU, O., VERNET, C., MORANVILLE, M., AITCIN, P. C., Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 12, pp. 1861–1867, 2000.
- [48] LEE, M.G., WANG, Y.C., CHIU, C.T., A Preliminary Study of Reactive Powder Concrete As A New Repair Material, *Construction and Building Materials*, 21, 1, pp. 182–189, 2007.
- [49] <http://www.beksa.com.tr/dramixDocs/deprensunu.pdf>, Erişim Tarihi: 02.04.2007.
- [50] YAZICI, H., The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete With High Volume Mineral Admixtures, *Building and Environment*, 42, 5, pp. 2083–2089, 2007.
- [51] TOPÇU, İ.B., KARAKURT, C., Reaktif Pudra Betonları, İMO, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi (TMH)*, 437, sf. 25-30, 2005.
- [52] YAZICI, H., YİĞİTER, H., KARABULUT, A.Ş., BARADAN, B., Utilization of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag As An Alternative Silica Source In Reactive Powder Concrete, 87, 12, pp. 2401–2407, 2008.
- [53] PURKISS, J.A., Steel Fibre Reinforced Concrete of Elevated Temperatures, *Int. Journal of Cem. Composites and Lightweight Concrete*, 6(3):179-183, August, 1984.
- [54] BAŞPINAR, M.S, GÖRHAN, G., KAHRAMAN E., Mermer Tozu ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması, 6. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, 28.06.2008, sf. 327-340, 2008.
- [55] <http://www.immib.org.tr>, Erişim Tarihi: 15.03.2014.
- [56] <http://www.materials.elkem.com>, Erişim Tarihi: 07.03.2008.
- [57] KORKANÇ, M., TUĞRUL A., Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi, *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 17, 2, sf. 161-169, 2004.
- [58] AITCIN, P.C., *High Performance Concrete*, E.&F.N. SPON, New York, 2004.
- [59] <http://www.maden.org.tr>, Erişim Tarihi: 10.03.2014.



- [60] <http://www.beksa.com.tr>, Erişim Tarihi: 04.07.2007.
- [61] TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türkiye Standartları Enstitüsü, 2003.
- [62] ASTM C 39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM (American Society for Testing and Materials), 1996.
- [63] TS 10513, Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [64] TS 10514, Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [65] TS 10515, Çelik Tel Takviyeli Betonun Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [66] ASTM C 1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM (American Society for Testing and Materials), V 4.02, pp. 637-644, 1989.
- [67] JSCE Standard SF-4, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, pp. 58-66, 1984.
- [68] SUKONTASUKKUL, P., Toughness Valuation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams Under Bending, Thammasa Int. J. Sc. Tech., 9, 3, pp. 35-41, 2004.
- [69] NATARAJA, M.C., DHANG, N., GUPTA, A.P., Toughness Characterization of Steel Fiber-Reinforced Concrete by JSCE Approach, Cement and Concrete Research 30, 4, 593-597, 2000.
- [70] ÖZALP, F., Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, SF. 36-40, 2006.
- [71] ÇETİN, A.E., Matlab 6.5, Alfa yayınları, sf. 20-240, İstanbul, 2003.

## ÖZGEÇMİŞ

Rıdvan İyiliksever, 10.09.1984'de Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şehitlik İlköğretim Okulunda tamamladıktan sonra Ankara Atatürk Anadolu Lisesine girdi. 2002 yılında buradan mezun olarak aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı ve 2006 yılında mezun oldu. 2009 yılında Sakarya Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı. Ayrıca 2008 yılından itibaren kamuda mühendis olarak çalışmaktadır. Evli ve üç çocuk babasıdır.