



## Atık mermer bulamacının reaktif pudra betonun mekanik özelliklerine etkisi

Metin İpek\*, Rıdvan İyiliksever, Kemalettin Yılmaz

Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

*08.05.2013Geliş/Received, 13.08.2014Kabul/Accepted*

### ÖZ

Bu çalışmada, mermer endüstrisinde mermer işleme sırasında bulamaç olarak ortaya çıkan atık mermer bulamacının Reaktif Pudra Betonunda (RPB) kullanılması incelenmiştir. Bu atıklar RPB’de kullanılan kuvars pudrasının yerine kullanılmıştır. Numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak basınç dayanımının mermer bulamacı katılması sonucu çok az bir miktarda (%6) azaldığı görülmüştür. Eğilme parametrelerinde ise kayda değer bir etkiye sebep olmadığı gözlemlenmiştir. Birim maliyet analizleri, kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının eğilme dayanımında %2,5, kırılma tokluğunda ise %6,12 oranında ekonomik olduğunu göstermektedir. Bu atığın kullanılmasıyla hem ekonomi hem de çevreye olumlu etki sağlanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Reaktif Pudra Betonu, mermer bulamacı, çevre, tokluk

## Effects of waste marble paste to mechanical behaviors of reactive powder concrete

### ABSTRACT

In this study, use of waste marble pastes that is emerged during production was investigated on reactive powder concretes (RPC). This waste was used instead of quartz powder. Compressive strength, flexural tensile strength, fracture toughness, ultrasonic pulse velocity, schmidt test hammer experiences were performed on all specimens. As a result of the study, a slight reduction (6%) has been observed on compressive strength by using marble paste in mixture. However, significant loss of flexural parameters is not observed arising from waste marble paste. Unit cost analysis showed that the use of marble paste instead of quartz powder is more economic 2.5% of flexural strength and 6.12% of fracture toughness. By means of this study, it was seen that the use of marble paste is available on RPB. Besides, the results referred that it may contribute economy and also disposing of a waste that harms environment.

**Keywords:** Reactive powder concrete, waste marble, environment, toughness

---

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author  
Yazar e-postaları: [metini@sakarya.edu.tr](mailto:metini@sakarya.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Reaktif Pudra Betonu, mikron boyutundaki taneli malzemelerden oluşan, düşük su/çimento oranı ile üretilen, yüksek mukavemete ve durabilite özelliklerine sahip yeni nesil bir 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, ilk kez 1990'lı yılların ortalarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarında üretilmiştir. İlk çalışmalar Richard ve Cheyrey tarafından yapılmıştır. RPB'nin mekanik özellikleri ve üretim tekniği hakkında genel bilgi Tablo 1.1'de verilmiştir [1].

Tablo 1.1. Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri [1](Mechanical behaviors of reactive powder concrete)

	RPB 200	RPB 800
<b>Ön Sıkıştırma Bas. (MPa)</b>	Yok	50
<b>Sıcak kür</b>	20°C ile	250-400°C
<b>Basınç Day. (MPa)</b>	170-230	Kuv. kumu 490-680 Çelik agrega 650-810
<b>Eğilme Day. (MPa)</b>	30-60	45-141
<b>Kırılma Enj. (Jm<sup>-2</sup>)</b>	20000-40000	1200-20000
<b>Son Def. (m.m<sup>-1</sup>)</b>	5-7x10 <sup>-9</sup>	5-7x10 <sup>-9</sup>
<b>Elast. Mod. (GPa)</b>	50-60	65-75

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.

Tüm dünyada çevre ve atıklar konusu önem kazanmakla birlikte, yapılan bilimsel ve endüstriyel çalışmalar maalesef yeterli düzeyde değildir. Bununla birlikte atıkların yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma vardır. Genellikle çimento ve beton üretiminde, atık olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. RPB'de de atık olarak silis dumanı yaygın olarak kullanılmakta ve ayrıca uçucu kül kullanımı ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Toz inceliğindeki malzemelerden oluşan RPB, benzer boyuttaki atıkların kullanımına daha uygundur.

Özellikle teknolojik ve ekonomik değeri olan mermer atıklarının değerlendirilmesi ne yazık ki çok düşük seviyede kalmaktadır. İnşaat sektöründe de bu atıkların geri dönüşüm döngüsü içerisinde kullanım alanı ve yaygınlığı, atıkları ortadan kaldıracak düzeyde değildir. 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 yoğun olarak çalışılmaktadır. Kaynakların sürdürülebilir ve yenilenebilir halde kalabilmesi için ortaya çıkan atıkların uygun şekilde değerlendirilip geri kazanım döngüsü içerisinde kullanılması kaçınılmazdır. 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 [2].

Günümüzde RPB ile ilgili kapsamlı birçok çalışma yapılmaktadır. Fakat buna rağmen RPB kullanımının normal betonlara göre oldukça az olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedenlerinin arasında ham maddenin pahalı olması gelmektedir. Ham maddenin ucuzlaması veya alternatif ham maddelerin bulunması ile birlikte RPB'nin ekonomiklik kazanması mümkündür. Bu çalışmanın konusu da, bu gereksinim doğrultusunda mermer atıklarının RPB'de kuvars pudrası yerine kullanılabilirliğinin araştırılması olmuştur.

Mermerlerin istenilen geometriye getirilebilmesi için bir takım kesme işlemlerinden geçmesi gerekmektedir. Kesme işlemi sırasında, kesici uçta ortaya çıkan ısıyı azaltmak ve mermerin tozumasını engellemek için soğutma suyu kullanılmakta ve sulu kesim yapılmaktadır. Su ile karışan 0-50 µ boyutundaki mermer partikülleri, ince şlam durumundaki bulamaç halini almaktadır. Bu bulamaç doğrudan araziye açılmış kuyulara doldurulmaktadır. Ayrıca bulamacın dışında, mermerlerin ocaktan çıkarılması sırasında da mermer üretiminden geriye kalan bütün mermer parçalar ve tozlar atık olarak kabul edilmektedir. Mermer atıkları, boyutlarına göre molozlar, kapaklar, paledyenler ve toz atıkları olarak adlandırılıp sınıflandırılmaktadırlar [2]. Türkiye genelinde yıllık ortalama 1.750.000 ton mermer işlenmekte ve tesislerde mermerlerin işlenmesi sırasında oluşan toz ve kırıntı artıkları, işlenen mermerlerin yaklaşık olarak %30'unu oluşturmaktadır [3].

Mermer işleme tesislerinde üretim atığı olarak çıkan bulamaç halindeki atıklar genellikle değerlendirilememekte ve doğaya geliş güzel olarak doğrudan atılmaktadır. Bu atıklar çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmakta ve ayrıca ekosistemde yaşayan canlılar için de hayati risk teşkil etmektedir.

Bu atıkların çevresel olumsuz etkilerinin bertaraf edilmesi ve yeniden ekonomiye kazandırılması ülkemiz açısından oldukça önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmanın temel amacını RPB'de kullanılan ve çelik liften sonra en büyük maliyeti oluşturan kuvars pudrası yerine, mermer atığı olan

bulamacı kullanmak oluşturmuştur. Bunun için ilk olarak karışımdaki kuvars miktarı çıkarılmış ve aynı hacme sahip mermer bulamacının kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaç için üretilmiş numuneler üzerinde, basınç ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici deneyleri ile birim maliyet analizleri yapılarak mermer bulamacının kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

#### 2.1.1. Çimento (Cement)

Deneysel çalışmaların tamamında 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 Tablo 2.1’de verilmiştir. Çimentonun özellikleri incelendiğinde, çimentoya büyük oranda bağlayıcılık özelliği sağlayan C<sub>3</sub>S(3CaO.SiO<sub>2</sub>)ve C<sub>2</sub>S(2CaO.SiO<sub>2</sub>) bileşenlerinin fazla olduğu görülmektedir (Tablo 2.1).

#### 2.1.2. Silis Dumanı (Silica Fume)

Yapılan deneysel çalışmada, Norveç, Elkem firmasından alınan silis dumanı kullanılmıştır (Tablo 2.1). 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, başka bir ifadeyle çimento tanesinden yaklaşık 100 kat daha küçük olduğunu söylemek mümkündür. Silis dumanının Blain değeri yaklaşık 20000 cm<sup>2</sup>/gr’dır [4] [5] [6].

Tablo 2.1. Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Chemical, physical and mechanical behaviors of cement and silica fume)

Bileşen	Çimento	Silis
	Miktarı (%)	Miktarı (%)
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
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		1.00
pH değeri (taze)		5.0-8.0
Özellik	Değer	Değer
Blaine özgül yüzeyi	3830 cm <sup>2</sup> /gr	200000
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	27.3 MPa	-
7 günlük basınç	-	-
28 günlük basınç	55.3 MPa	-

#### 2.1.3. Kuvars Pudrası (Quartz Powder)

Reaktif pudra betonunun isimlendirmesindeki pudra kelimesi, bu betonlarda kullanılan mikron boyuttaki silis ve kuvars pudrasından gelmektedir. Kuvars pudrası yapay, yani kırma taş agregadır. Deneylerde kullanılan kuvars pudrası, Aydın’ın Çine ilçesinden Santoz Sanayi Tozları Firmasından elde edilmiştir. Karışımda kullanılan kuvars kumu ve pudrası, mermer bulamacının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri bütün olarak Tablo 2.2’de verilmiştir [6].

Tablo 2.2. Kuvars pudrasının ve mermer bulamacının kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical behaviors of quartz powder and marble paste)

Bileşen	Kuvars Pudrası %	Mermer Bulamacı %	Kuvars Kumusu %
SiO <sub>2</sub>	99.50	4.67	99.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.01
CaO	-	51.8	-
MgO	-	0,8	-
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.37	-	0.37
TiO <sub>2</sub>	0.07	-	0.07
Kız. Kaybı	0.40	41.16	0.40
Toplam	100	98.06	100
Renk	Beyaz	Beyaz	Beyaz
Yoğunluk	1.34 gr/cm <sup>3</sup>	1.24	1.60 gr/cm <sup>3</sup>
Özgül Ağ.	2.7 gr/cm <sup>3</sup>	2.8 gr/cm <sup>3</sup>	2.68 gr/cm <sup>3</sup>
Özgül Yüz.	2142 cm <sup>2</sup> /gr	-	219 cm <sup>2</sup> /gr
Nem içeriği	% 0.08	%42	% 0.067

#### 2.1.4. Mermer Atığı Bulamaç (Waste Marble Paste)

Deneylerde kullanılan mermer bulamacı, Kocaeli'nin Başiskele ilçesinde faaliyet gösteren orta ölçekli bir mermer işleme tesisinden doğal şartlarda depolanan stok alanından temin edilmiştir. Mermer bulamacı, işletme çevresinde belirlenen bölgede atmosfere açık bir şekilde stoklanmaktadır. Alınan numune miktarının homojen olması için stok alanının orta iç kısmından numune alınmaya özen gösterilmiştir.

Mermer bulamacına ait özellikler Tablo 2.2'de verilmiştir. Mermer bulamacının kimyasal içeriği incelendiğinde, yüksek oranda kalsiyum içerdiği görülmektedir. Genellikle inşaat sektöründe kullanılan mermerin ortalama basınç dayanımı 60 MPa, brinell sertliği 350, mohs sertliği 6' dır [7]. 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. Bulamacın doğal su içeriği %42 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda, bu su içeriğine dikkat edilerek karışım suyu düzenlemesi yapılmıştır. Şekil 2.1'de mermer bulamacının reaktif pudra betonunda kullanılan resmi verilmiştir. Ayrıca mermer bulamacının su etkisi ile depolandığı yere ulaştırılması bulamacın, dere agregalarına benzer şekilde, iyi bir granülometrik diziliş içerisinde olduğu düşünülmektedir. Bu durum, karışımın doluluk oranı için olumlu katkı yapabilir.



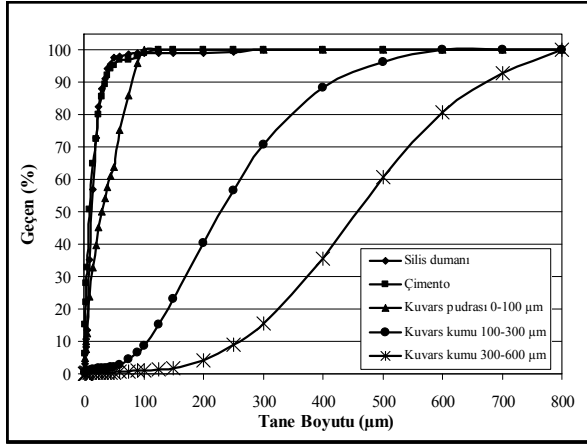
Şekil 2.1. Karışımda kullanılan mermer bulamacı (Marble paste that used in mixture)

#### 2.1.5. Kuvars Kumusu (Quartz Sand)

Genellikle reaktif pudra betonlarında kullanılan en büyük tane boyutuna 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 agregada olduğu için aşınma direnci yüksektir [8] [9].

RPB'de istenilen dayanımlara çıkılabilmesi için bu betonlara uygun agregaya kullanılmalıdır. Kuvars kumu, RPB için uygun bir agregaya olmakla birlikte, ülkemizde de bol miktarda bulunmaktadır. Kuvars kumu elde edilmiş şekli ve mineralojik bakımdan kuvars pudrası ile aynı özelliklere sahiptir ve sadece tane büyüklüğü açısından farklılık göstermektedir.

Deneylerde kullanılan kuvars kumu, 100–300 µm ve 300–600 µm aralıktaki iki farklı sınıfta bulunmaktadır. Kuvars kumu numunelerinin granülometri eğrisi Şekil 2.2'de, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Taneli malzemelerin granülometri eğrisi (Grain size curve of granular materials)

### 2.1.6. Çelik Tel (Steel Fiber)

RPB'nin basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğunu arttırmak için karışıma katılacak olan lifler, BEKSA A.Ş.'den temin edilmiştir [10]. Çelik lifler, 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapında ve korozyona karşı pirinç ile kaplanmıştır. Çelik lifin çekme dayanımı 2250 MPa ve özgül ağırlığı 7,181g/cm<sup>3</sup>'tür.

### 2.1.7. Su ve Kimyasal Katkı (Water and Chemical Admixture)

Deneylerde içilebilir nitelikte olan Sakarya Büyükşehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmış, düşük su-çimento oranından dolayı istenilen işlenebilirliği elde etmek için yeni nesil katkılara ihtiyaç duyulmuştur. Beton karışımlarında, istenilen özelliklere sahip yeni jenerasyon bir polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı olan İksa firması tarafından üretilen Polycar 100 kullanılmıştır.

### 2.2. Metot (Method)

Reaktif pudra betonlarının karışım oranları daha önce aynı malzemeler kullanılarak yapılan bir doktora tez çalışmasından alınmıştır [6]. Deneyde kullanılan karışım oranları Tablo 2.3'de verilmiştir. Karıştırma işleminde ise ilk olarak Referans RPB için karıştırma kovaına 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 guruplar 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 tokmaktama yöntemi kullanılmıştır. Numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak, 3 gün 90 °C sıcak buhar kürü işlemine tabi tutulmuş daha sonra ise 20 °C'deki suda 25 gün kür işlemine tabi tutulmuştur.

Tablo 2.3. Karışım Oranları (1 m<sup>3</sup>) (Mixing ratios)

Malzeme (Kg)	Referans	MRPB
Çimento	900	900
Silis dumanı	270	270
Kuvars pudrası	278	-
Mermer Bul. (Yaş)	-	288 (408.96)
Kuvars kumu	504	504
Toplam su miktarı	270	270
Katkı	27	27
Çelik lif	287.24	287.24
Su/çimento oranı	0.30	0.30

Deney karışımlarında referans olarak RPB kodlu numune kuvars pudrası ile üretilmiş, MRPB kodlu numune ise kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılarak üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mermer bulamacı içeren numunelerin karıştırılma sırası; bulamaç, su ve katkı, çimento, silis dumanı, kuvars kumu ve liflerin katılması şeklinde olmuştur.

Basınç dayanımı için 10 cm boyutlarında küp, eğilme dayanımı için ise 5x5x30 cm dikdörtgen prizma şeklinde kiriş kalıpları kullanılmıştır. Numuneler bir gün sonunda kalıptan çıkarılarak 3 gün 90 °C de sıcak buhar kürüne tabi tutulmuş ve daha sonra 20 °C'deki suda 25 gün kür edilmiştir. Küp numunelerde basınç dayanımının belirlenmesinden önce ultrases geçiş hızı testi yapılmıştır (Şekil 2.3.).

Deney sırasında geçiş süresi belirlenmiş ve bu süre geçiş yolu uzunluğuna bölünerek ultrases geçiş hızı hesaplanmıştır. Daha sonra, basınç dayanımı testi sırasında numuneler basınç altında iken schmidt test çekici deneyi uygulanmıştır (Şekil 2.4.). Basınç dayanım testleri, yükleme hızı ayarlanabilen 3000 kN kapasiteli beton presinde TSE standartlarına [11] uygun olarak yapılmıştır (Şekil 2.5.). Beton presinden alınan basınç kuvveti numune kesit alanına bölünerek basınç dayanım değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.3. Ultrases geçiş hızı testi (Ultrasonic velocity test)



Şekil 2.4. Schmidt test çekici testi (Schmidt hammer test)



Şekil 2.5. Basınç dayanımı testi (Compressive strength test)

Eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu için numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. İki mesnet arasındaki açıklık olan 260 mm olmak üzere kiriş numunesi Şekil 2.6'daki gibi üç noktadan yüklenmiştir. Deney cihazının yükleme hızı kiriş orta noktasında, 0,05-0,10 mm/dak. sehimi yapacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler bu hızda tamamen kırılıncaya kadar yüklenerek yük-sehim grafikleri elde edilmiştir. Eğilme deneyi sırasında numunenin çatlak yükü ve en büyük kuvvet değeri okunarak eğilme dayanımı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu değeri bilgisayar programı yardımıyla, yük-sehim eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunmuştur [11-16].

$$\sigma_e = \frac{3 P_e l}{2 b h^2} \quad (1)$$

Burada,  $\sigma_e$  eğilme dayanımı (MPa),  $P_e$  kırılma yükü (N),  $l$  mesnetler arası açıklık (mm),  $b$  numune kesitinin genişliği (mm),  $h$  numune kesitinin yüksekliği (mm) ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Üç nokta eğilme deneyi (Three point flexure strength test)

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

RPB'nin ve MRPB'nin ve mekanik özelliklerine ait değerler Tablo 3.1' de verilmiştir. Basınç deneyi sonucunda, lifler sayesinde numunenin bütünlüğünü koruduğu ve homojen bir deformasyon yaptığı görülmüştür (Şekil 3.1.).

Basınç deneyi sonuçları grafik olarak incelendiğinde (Şekil 3.2.), kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) birlikte, basınç dayanımının referans RPB'ye göre çok az bir miktarda, %6 oranında azaldığı görülmektedir (Tablo 3.1.). Benzer durum ultrases geçiş hızı (Şekil 3.3.) değerleri incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır. Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle (MRPB) birlikte, ultrases geçiş hızı referans RPB'ye göre % 3,95 oranında azalmıştır. Bulamacı kullanılması ile birlikte Schmidt test çekici

deney sonuçlarının da bir miktar olumsuz etkilendiği görülmüştür (Şekil 3.4.).

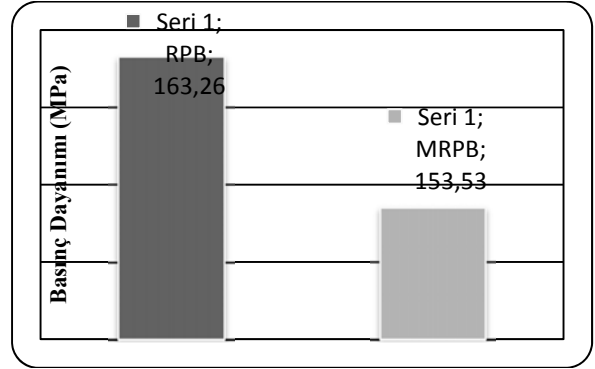


Şekil 3.1. Basınç numunelerine ait örnek kırılma şekli (Example for Compressive strenght test)

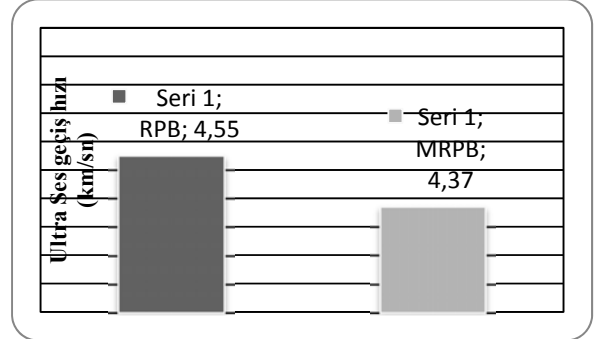
Mermer bulamacı kullanılan numunelerde basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve schmidt test çekici sonuçlarındaki azalmanın nedeninin, mermer bulamacının kuvars pudrasına göre dayanımının düşük, boşluklu ve yumuşak bir malzeme olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Boşluk oranı artan betonlarda dayanımın düşeceği bilinmekle birlikte, beton numuneleri içindeki boşluklar, ses dalgalarının geçişinde engel oluşturarak geçiş yolunun uzaması ile birlikte ultrases geçiş hızının düşmesine sebep olabilmektedir.

Tablo 3.1. RPB'nin ve MRPB'nin mekanik özellikleri (Mechanical behaviors of RPB and MRPB)

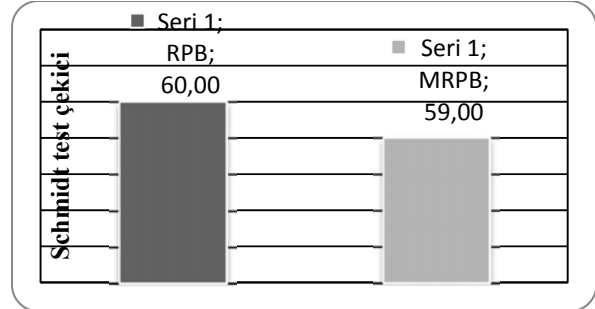
Numune Adı	Basınç Day. (MPa)	Ultrases Hızı (km/sn)	Schmidt Testi	Eğilme Day. (MPa)	Kırılma Tokl. (Nm)
RPB	163.26	4.55	60.00	41.09	33.31
MRPB	153.53	4.37	59.00	39.40	33.55



Şekil 3.2. Basınç dayanımı değişim grafiği (Changing graphic of compressive strenght)



Şekil 3.3. Ultrases hızı değişim grafiği (Changing graphic of ultrasonic velocity)



Şekil 3.4. Bulamaç oranlarının schmidt test çekici geri tepme sayısı değerleri ilişkisi (the relationship with marble paste rates and schmidt hammer test results)

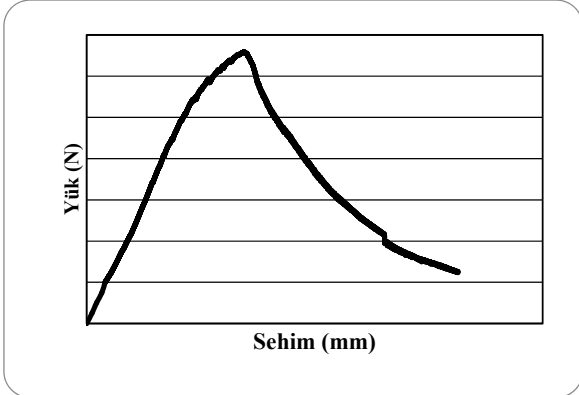
Eğilme deneyi sırasında, çatlakın ilk olarak kiriş alt bölgesinde başladığı ve yükün tepe noktasından sonra lineer bir şekilde düşerek numunenin kırıldığı görülmüştür (Şekil 3.5.). Kırılan parçalar incelendiğinde, mikro liflerin sıyrıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.6.). RPB'nin eğilme dayanımına ait yük sehim grafiği Şekil 3.7'de verilmiştir. RPB'nin eğilme dayanımı 41,09 MPa ve kırılma tokluğu 33,31 Nm olarak bulunmuştur. Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla  $I_5=3,91$  ve  $I_{10}= 4,11$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Eğilme numunelerine ait örnek kırılma şekli (Example for flexure strength test)

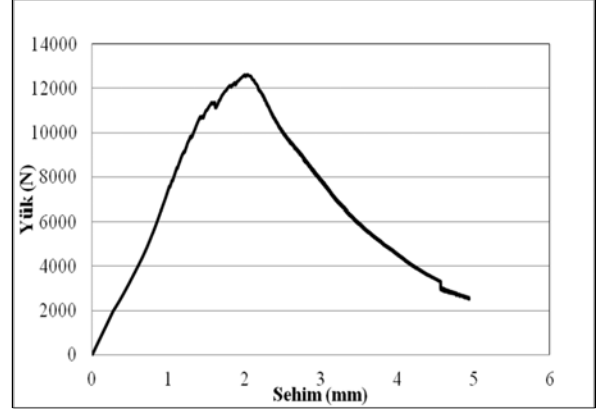


Şekil 3.6. Kırılmış eğilme numunesi kesiti. (Example for broken flexure test sample)



Şekil 3.7. RPB'nin yük sehim grafiği (Load-displacement graphic of RPB)

Kuvars pudrasının mermer bulamacı ile yer değiştirilmesiyle üretilen MRPB'nin yük sehim grafiği Şekil 3.8'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yükün tepe noktasında sonra lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Deney sırasında yükün düştüğü noktada mikro lifler sıyrılarak matris içerisinden çıkmıştır (Şekil 3.8.). MRPB'nin eğilme dayanımı 39,40 MPa ve kırılma tokluğu 33,55 Nm olarak bulunmuştur. Referans numune (RPB) ile karşılaştırıldığında, eğilme dayanımı yaklaşık %4 azalmış, kırılma tokluğu ise hemen hemen benzer değer almıştır.



Şekil 3.8. MRPB'nin yük sehim grafiği (Load-displacement graphic of MRPB)

Mermer işleme sırasında su kullanılması ve mermer tozlarının su ile uzaklaştırılması, dere agregalarında olduğu gibi doğal tane dizilimine yol açmaktadır. Bu durum, bulamacın kendi içindeki granülometrisinin kuvars pudrasına göre daha iyi olmasına neden taneli olmaktadır. Richard, Cheyrezy yaptıkları çalışmada ince malzemelerin kendi içerisindeki tane dağılımının aderansı etkilediğinden bahsetmişlerdir [1]. Bu olumlu durum matris-lif ara yüzeyinde olumlu etki yaparak kırılma tokluğunu çok az bir miktarda arttırmıştır.

RPB numunesinin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan kırılma indis sonuçları,  $I_5$  ve  $I_{10}$  sırasıyla 3,91 ve 4,11 değerlerini almışlardır. MRPB numunesinin kırılma indis sonuçları ise,  $I_5$  ve  $I_{10}$  sırasıyla 4,29 ve 4,58'dir. Standartta [12] [13] indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda sünek malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu değerler, hem RPB, hem de MRPB, lifli betonlar sınıfına girmektedir. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

### 3.1. Birim Maliyet Analizi (Unit Cost Analysis)

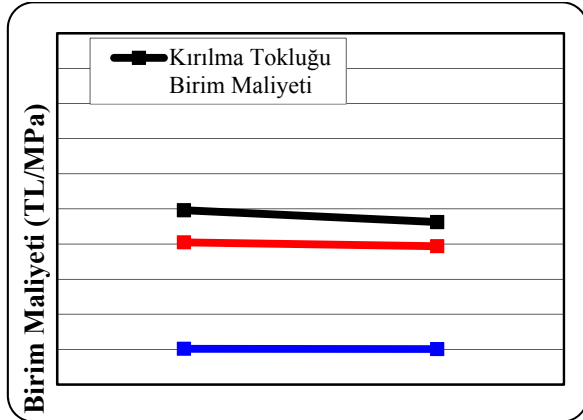
Bu başlık altında; üretilen numunelerin karışım oranlarındaki farklılıklar sonucu değişen mekanik özelliklerin birim fiyat dayanımı üzerine olan etkileri hesaplanmıştır. Eğilme ve basınç deneylerinde kullanılmak üzere üretilen numunelerde; RPB'nin ve MRPB'nin  $1 \text{ m}^3$ 'ü için birim maliyet ile basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti ve kırılma tokluğu birim maliyeti değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Basınç dayanımı birim maliyeti, eğilme dayanımı birim maliyeti, kırılma tokluğu birim maliyetine ait grafikler ise Şekil 3.9'da verilmiştir.



Tablo 3.2. Birim Maliyet Analizi (Unit Cost Analysis)

Numara adı	Birim Fiyat (kg/TL)	DDR	MDDR
Cimento (kg)	0.14	900	900
Silis Dum. (kg)	0.25	270	270
K. Pudrası (kg)	0.40	278	-
I. K. Kum (kg)	0.20	252	252
II. K. Kum (kg)	0.20	252	252
Mer. Bul. (kg)	0	-	409
Su (kg)	0.002	270	149
K. Katkı (kg)	4	27	27
Celik Lif (kg)	4	287	287
Top. Mal. (TL)	-	1663	1552
Basınç Day. Bir.	-	10	10
Eğ. Day. Bir.	-	40	39
Kır. Tokl. Bir.	-	49	46

Tablo 3.2. incelendiğinde RPB'deki karışıma kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının betonun basınç dayanımı birim maliyetini değiştirmediği, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu birim maliyeti göz önüne alındığında ise maliyeti bir miktar azaltarak daha ekonomik bir çözüm sunduğu görülmektedir.



Şekil 3.9. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu birim maliyeti grafikleri (Unit Cost Analysis of compressive strength, flexure strength and fracture toughness)

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

RPB'yi oluşturan malzemeler temin edilerek bu malzemelerin özellikleri ve karışım oranları belirlenmiştir. Oluşturulan karışıma, kuvars pudrası ikameli mermer bulamacı ilave edilerek mermer bulamacının basınç, eğilme parametreleri ve maliyet üzerindeki etkisini incelemiş ve optimum bulamaç oranı belirlenmiştir. Daha sonra üretilen küp ve prizmatik numunelerin; üzerinde, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu parametreleri ile maliyet 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 karışımlarına mermer bulamacı katılması karışıma giren malzemelerin sırasını değiştirerek, bulamaç, su ve katkı, çimento, silis dumanı, kuvars kumu ve liflerin katılması şeklinde olmuştur.

Basınç dayanımının mermer bulamacı katılması sonucu çok az bir miktarda (%6) azaldığı görülmüştür. Bu durumun; mermer bulamacının dayanımının mermer türüne göre değişkenlik göstermesi, kuvars pudrası kadar homojen olmaması ve de kuvars pudrası ile aynı dayanıma sahip olmaması ile açıklanması mümkündür. Ultrases geçiş hızı değerleri karışıma mermer bulamacı katılması ile azalmıştır. Ultrases geçiş hızındaki azalmanın sebepleri olarak basınç dayanımının düşmesine sebep olabilecek etkenlerin gösterilmesi mümkündür. Bununla birlikte, karışımda kuvars pudrası yerine mermer bulamacı konulması sonucunda schmidt test çekici değerlerinde anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir.

Eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinde, karışımda kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının kayda değer bir azalmaya sebep olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonucun, mermer bulamacının kuvars pudrası gibi maliyeti yüksek bir malzemeye benzer mekanik özellikleri sağlayabilen alternatif bir malzeme olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaya beklenmektedir.

Genel olarak birim maliyet analizleri, kuvars pudrası yerine mermer bulamacı kullanılmasının ekonomik olduğunu göstermektedir.

Mermer işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerdeki mermer atık sahaları, kamuoyu gözünde çevreye ve doğaya zararlıdır. Bu çalışma ile atık mermer bulamaçların RPB'de kullanılabileceği gösterilmiştir. RPB'de mermer bulamacının kullanımıyla hem ekonomi hem de doğaya zararlı bir atığın bertaraf edilmesi sağlanabilecektir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Richard ve M. H. Cheyrezy, «Composition Of Reactive Powder Concrete,» *Cement And Concrete Research*, cilt 25, no. 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [2] M. Başpınar, G. Görhan ve E. Kahraman, «Mermer Tozu Ve Atıklarının Kullanım Alanlarının

- Araştırılması,» %1 içinde 6. Mermer Ve Doğaltaş Sempozyumu, 2008.
- [3] [Çevrimiçi]. Available: [www.immib.org.tr](http://www.immib.org.tr). [Erişildi: 15 3 2014].
- [4] Y. A., «Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı,» *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği /AR-GE Enstitüsü*, pp. 18-46, 2002.
- [5] 2008. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.materials.elkem.com>. [Erişildi: 7 3 2008].
- [6] M. İpek, «Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri,» *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 1-75, 2009.
- [7] [Çevrimiçi]. Available: [www.maden.org.tr](http://www.maden.org.tr). [Erişildi: 10 3 2014].
- [8] M. Korkanç ve A. Tuğrul, «Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi,» *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, cilt 17, no. 2, pp. 161-169, 2004.
- [9] A. P.C., «High Performance Concrete,» *E.&F.N. SPON, New York*, 2004.
- [10] [Çevrimiçi]. Available: <http://www.beksa.com.Tr>. [Erişildi: 4 7 2007].
- [11] T. E. 12390-3, «Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini,» *Türkiye Standartları Enstitüsü*, 2003.
- [12] T. 10513, «Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan,» *Türkiye Standartları Enstitüsü*, 1992.
- [13] T. 1. (1992), «Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma Ve Kontrol Kuralları,» *Türkiye Standartları Enstitüsü*, 1992.