



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Farklı Tür Agregalarla Üretilen Silindirle Sıkıştırılmış Betonların Özellikleri

 İsmail KILIÇ<sup>a,\*</sup>,  Ahmet Okan SAVAŞ<sup>b</sup>

<sup>a</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, TÜRKİYE

<sup>b</sup> İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ismail.kilic@klu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.869509

### ÖZ

Bu çalışmada, farklı tür agregalardan üretilen silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) örneklerinin özellikleri araştırılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R Portland çimentosu, dolomit, bazalt, mermer ve iki farklı tür kalker olmak üzere beş farklı agrega, doğal kum ve şebeke suyu kullanılmıştır. Agrega örnekleri üzerinde sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme, Los Angeles parçalanma direnci tayini ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Farklı tür agregalarla yapılan karışımlarda su/çimento oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Dolomit, bazalt, mermer, iki farklı tür kalker olmak üzere beş farklı agreganın her biri 12-19 mm kırmataş II, 4-12 mm kırmataş I ve 0-4 mm kırmataş tozu olarak kullanılmıştır. Ayrıca farklı agrega ile üretilen betonların her birinde 0-4 mm boyutunda doğal kum kullanılmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir, 28 günlük eğilme dayanımı için ise 15 cm×15 cm×75 cm boyutlarında prizmatik kiriş örnekler üretilmiştir. Eğilme dayanımı testinden önce 28 günlük prizmatik kiriş numunelerden yararlanılarak ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Silindirle sıkıştırılmış beton, Beton yol, Dolomit, Bazalt, Kalker, Mermer

## Properties of Roller Compacted Concretes Produced with Different Types of Aggregates

### ABSTRACT

In study, test results of roller compacted concrete (RCC) samples produced from different types of aggregates were researched. CEM I 42.5 R Portland cement, five different coarse aggregates (dolomite, basalt, marble, two different types of limestone), natural sand and tap water were used. The compact and loose bulk density, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion resistance and sieve analysis tests were performed on the aggregate samples used. The water/cement ratio has been kept constant as 0.35 in mixtures produced with different types of aggregates. The RCC produced with five different aggregates: dolomite, basalt, marble and two different types of limestone, each were used as 12-19 mm crushed stone II, 4-12 mm crushed stone I and 0-4 mm crushed stone powder. In addition, 0-4 mm natural sand was used in each of the concretes produced with different aggregates. In order to determine the compressive strengths at the ages of 7 and 28 days, cylindrical specimens with 15 cm diameter and 30 cm height were used. Prismatic specimens with the dimensions of 15 cm×15 cm×75 cm were used to determine flexural strengths at the age of 28 days. Before bending test, ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity values were determined by using 28-day prismatic specimens.

**Keywords:** Roller compacted concrete, Concrete road, Dolomite, Basalt, Limestone, Marble

# I. GİRİŞ

Beton, yollar, köprüler, barajlar ve konutlar olmak üzere birçok alanda kullanılan en önemli yapı malzemelerinden birisidir [1]. Beton üretiminde kullanılan agregata ve çimento gibi malzemeler, yerel koşullarda bile kolayca temin edilebilir [2]. Betonda aranılan en önemli özellik basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri agregata özellikleridir. Betonda kullanılan agregatanın dayanım özellikleri düşük olmamalıdır [3]. Agregata betonda iskelet görevi görmektedir [4]. Beton üretiminde tercih edilen agregatların özellikleri, betonun dayanım ve dayanıklılığı açısından oldukça önemlidir [5]. Agregata, su ve çimentonun kimyasal reaksiyonunu bozmadan betona aderans sağlayabilecek, yeterli dayanımına sahip dolgu malzemesidir [6]. Beton basınç dayanımlarını artırabilmek için öncelikle beton içerisindeki boşlukları en aza indirmek gerekir [7]. Betonda boşluk miktarı azaldıkça, basınç dayanımı da buna bağlı olarak yükselmektedir [8].

Agregatları tane şekline, yüzey dokusuna, elde edilişlerine, jeolojik yapılarına ve mineral muhtevalarına göre sınıflandırmak mümkündür [6]. Agregatlar elde edilişlerine göre doğal ve yapay agregatlar diye ikiye ayrılırlar. Tane boyutlarına göre iri agregata ve ince agregata olmak üzere iki sınıfta incelenirler [9]. Agregatları kökenlerine göre ise magmatik (volkanik), sedimanter (tortul) ve metamorfik (başkalaşım) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

İmal edildikleri malzemelere bağlı olarak karayolları üst yapıları iki sınıfa ayrılırlar. Bunlar, esnek ve rijit yapılar olarak tanımlanırlar. Esnek yol üst yapıları, yüzey tabakaları bitümlü malzeme, temeli bitümlü ya da granüler malzeme, alt temeli ise daima granüler malzeme olan üst yapılarıdır. Rijit yol üst yapıları ise yüzey tabakası betondan oluşan kaplamalar olarak bilinmektedir. Beton kaplamalar, ağır trafiğin olduğu karayollarında ve havaalanlarında hareket eden taşıtlar için gerekli konfor ve emniyeti temin etmek amacıyla yapılan yüksek standartlı üst yapılarıdır. Beton kaplamalar, esnek kaplamalar ile ekonomik yönden karşılaştırılacak olursa, beton kaplamaların ilk yapım maliyeti genelde esnek kaplamalara göre daha yüksektir fakat beton kaplamaların onarım ve bakım maliyetleri daha düşüktür. Bu da beton kaplamaların yaygınlığını artırmak için önemli bir etkidir. Ayrıca, beton kaplamalar tamamen yerli ürünler kullanılarak inşa edilebilmekte, esnek kaplamalarda ise petrol türevi malzeme kullanılmaktadır. Millî ve yerli kaynaklar açısından beton yolların desteklenmesi önem arz etmektedir.

Beton kaplamaların dayanımları ve ömürleri önemli avantajlarıdır. Beton kaplamalar rijit kaplama olarak, elastik olan zemine oturmuş kirişler şeklinde çalışırlar. Üzerlerine gelen yükü geniş alanlara yayarak taban zeminine iletirler [10]. Betonun kullanım özelliklerinin araştırılmasında birincil olarak bakılması gereken parametreler betonun mekanik özellikleridir [11]. Rijit üstyapı tasarımının kaliteli bir şekilde olabilmesi için üstyapı kaplanmasında kullanılacak olan betonun ve bileşenlerinin çok iyi bilinmesi gereklidir [12].

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) normal betona göre aynı bileşenlerin farklı oranlarda karşılaştırılması ile üretilmektedir [13]. SSB sertleşmemiş halde iken üzerinden silindirlerin geçmesine imkân verecek şekilde kuru kıvamda olan bir beton türüdür [14]. SSB'de su/çimento oranı 0,30 ile 0,40 arasında olmalıdır. Diğer beton çeşitlerinde olduğu gibi, SSB'nin ekonomik oluşunu ve kalitesini belirlemedeki en önemli etkenlerden biri doğru agregatanın seçilmesidir SSB ve geleneksel betonlardaki agregatlar arasında en önemli farklardan biri agregata granülometrisidir. SSB'de maksimum dane boyutu 19 mm olmalıdır [15]. Ayrışma olmaması, karıştırmayı kolaylaştırmak ve yüzey düzgünlüğünü oluşturmak amacıyla dane boyutu yüksek seçilmemelidir [16].

SSB'nin normal betona göre hiç çökme göstermemesi, bağlayıcı madde oranının daha az oluşu, daha az hidrasyon ısısının oluşması, yol ekipmanları ile serilip sıkıştırılabilmesi, hızlı ve seri üretimi, derz sayısının normal betona göre daha az oluşu, ekonomik oluşu en önemli farklılıklarıdır [17]. SSB yolların en önemli üstünlüğü, gerek beton kaplamalar gerekse çok tabakalı asfalt kaplamalara göre çok daha hızlı kullanıma açılması ve ekonomik olmasıdır [18]. Ayrıca, SSB yol yapımında hiçbir zaman kalıp kullanılmamakta, genellikle yüzey düzeltme işlemi yapılmamakta, kayma donatısı ve bağ donatısı gibi herhangi bir çelik donatı kullanılmamaktadır [13].

SSB'nin karıştırılması, taşınması, serilmesi ve sıkıştırma işlemleri mümkün olduğunca en kısa zamanda ve ayrışmaya uğratılmadan yapılmalıdır [19]. Taşınma sırasında SSB'nin ayrışmaya uğratılmaması, işlenebilirliğini kaybetmemesi ve mümkün olan en kısa zamanda getirilmesi için uygun bir taşıma yöntemi seçilmelidir. SSB'yi sermek için en iyi araçlar finisher ve dozerlerdir. Sıkıştırma işlemi için de genellikle dinamik kuvveti 8 kg/mm olan tek veya çift tamburlu ve ağırlığı 10 ton olan silindirler kullanılmaktadır [20]. SSB tabakasının, sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra vakit geçirilmeden en çok iki saat içinde su veya kimyasal kür malzemesi ile kaplanması gerekmektedir [21].

Beton karışımında en fazla kullanılan bileşen agregadır. Agreganın özellikleri betonun dayanım ve dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Agregaların kimyasal ve mineralojik özellikleri farklılıklar göstermektedir. Aynı tür dahi olsa, farklı taş ocaklarında üretilen agregaların özelliklerinin aynı olmayacağı bilinmelidir. Bu nedenle farklı agregalarla üretilen betonların farklı dayanım özellikleri göstermesi beklenmektedir.

Yapılan çalışmada volkanik, tortul ve başkalaşım kökenli olmak üzere beş farklı tür agrega kullanılmış, agrega kökeninin SSB üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların farklı türde olması ve farklı yerlerden temin edilmesi granülometrik özelliklerinin farklılık göstermesine neden olmuştur. Agregada granülometrisinin betonun dayanım özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, her bir agrega türü kendi içerisinde boyutlarına göre farklı oranlarda karıştırılmış ve karışım agregalarının granülometrisinin birbirine yakın olması sağlanmıştır.

## **II. MATERYAL VE YÖNTEM**

### **A. MATERYAL**

DeneySEL çalışmalarda bağlayıcı olarak Limak Trakya Çimento fabrikasından temin edilen CEM-I 42,5 R çimento kullanılmıştır (Tablo 1). Karma suyu olarak Kırklareli şebeke suyu kullanılmıştır. Agregada dolomit, bazalt, mermer, iki farklı kalker ve doğal kum kullanılmıştır. Beş farklı agrega türü karışımlarda kırmataş II (12-19 mm), kırmataş I (4-12 mm) ve kırmataş tozu (0-4 mm) olacak şekilde üç farklı boyutta kullanılmıştır. Ayrıca her karışımında 0-4 mm aralığında Pınarhisar'dan temin edilen doğal kum kullanılmıştır.

*Tablo 1. Çimentonun kimyasal analizi, fiziksel ve mekanik özellikleri.*

<b>Kimyasal Analiz</b>												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	Kızdırma Kaybı	Çözünmeyen Kalıntı	Toplam Alkali
%	19,15	4,78	3,25	63,98	1,18	2,90	0,64	0,24	0,0128	3,43	0,35	0,66
<b>Fiziksel Deneyler</b>												
Priz Süresi (dak)	Başlangıç								140			
	Son								200			
Özgül Ağırlık									3,11			
Özgül Yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)									3712			
Toplam Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)									1,00			
45 µ elek üstü									2,35			
90 µ elek üstü									-			
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>												
Mekanik Özellik-Gün	Erken Dayanım (2 gün)								30,6			
	Erken Dayanım (7 gün)								47,1			
	Standart Dayanım (28 gün)								59,5			

Dolomit, kireçtaşlarında CaO'nun yerine kısmen veya tamamen MgO'nun alması ile oluşmaktadır. Masif yapılı, köseli ve serttir. Genelde bej renklidir. Kökenlerine göre tortul taşlar olarak sınıflandırılır. Deneylerde kullanılan dolomit agregası Pınarhisar bölgesinden temin edilmiştir. Dolomit agregasından üretilen beton örneklerinde D kodu kullanılmıştır.

Bazalt, volkanik taş türüdür. Masif yapılı, sert ve dayanıklı bir taştır. Siyah ve koyu gri tonlu renklere sahiptir. Kökenlerine göre volkanik taşlar olarak sınıflandırılır. Deneylerde kullanılan bazalt agregası Afyon bölgesinden temin edilmiştir. Bazalt agregasından üretilen beton örneklerinde B kodu kullanılmıştır.

Mermer, başkalaşım olayı sonucunda kalkerin (kireçtaşı) yeniden kristalleşmesiyle meydana gelen bir taş türüdür. Masif yapılı ve taneli dokuludur. Renkleri genellikle beyaz ve açık gridir. Kökenlerine göre başkalaşım taşlar olarak sınıflandırılır. Deneylerde kullanılan mermer agregası Afyon bölgesinden temin edilmiştir. Mermer agregasından üretilen beton örneklerinde M kodu kullanılmıştır.

Kalker (kireçtaşı), kalsiyum karbonattan oluşan tortul bir taştır. Oldukça sağlamdır ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Kökenlerine göre tortul taşlar olarak sınıflandırılır. Deneylerde kullanılan kalker I agregası Pınarhisar bölgesinden, kalker II agregası Silivri-Çatalca bölgesinden temin edilmiştir. Kalker I agregasından üretilen beton örneklerinde KI, kalker II agregasından üretilenlerde ise KII kodu kullanılmıştır.

Çalışmalarda beş farklı agrega türü ile silindirle sıkıştırılmış beton örnekleri üretilmiştir. Her bir agrega türü için 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyi için 6 adet 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde silindir beton örnekleri ve 28 günlük eğilme dayanım deneyi için 3 adet 15x15x75 cm boyutunda prizmatik kiriş beton örnekleri üretilmiştir. Toplamda 30 adet silindir ve 15 adet kiriş beton örnekleri üretilmiştir.

## **B. YÖNTEM**

Beş farklı agrega üzerinde, agrega deneyleri ve bu agregalar kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış beton örnekleri üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Birim hacim ağırlık deneyi TS EN 1097-3 [22], agregada özgül ağırlık ve su emme oranı tayini TS EN 1097-6 [23], agrega parçalanma direnci tayini TS EN 1097-2 [24], elek analizi TS EN 933-1[25], çökme deneyi TS EN 12350-2 [26], taze beton birim hacim ağırlık TS EN 12350-6 [27], basınç dayanımı TS EN 12390-3[28], eğilme dayanımı TS EN 12390-5 [29] (Şekil 2b), ultrases geçiş hızı ASTM C 597-09 [30] standartlarına göre yapılmıştır.

Farklı agregalarla yapılan karışım hesaplarında su/çimento oranı 0.35 olarak sabit tutulmuştur. Bu karışımlarda çökme sıfır olacak şekilde su ve çimento miktarları değişmemiş, agrega miktarları ise her bir agrega türünün kendi içerisindeki karışım oranları farklı olduğu için karışımdaki miktarları da değişkenlik göstermiştir.

ASTM C 1435/C1435M-20 [31] standardına göre silindirle sıkıştırılmış beton örneklerinin üretimi yapılmıştır. Silindir örnekler her biri yaklaşık 20 saniye olmak üzere 3 kademede sıkıştırılmıştır (Şekil 1a ve Şekil 1b). Prizmatik kiriş örneklerin sıkıştırılma işlemi 2 kademede yapılmıştır. Üretilen örnekler, üretimden bir gün sonra kalıptan çıkarılmış, kırım günlerine kadar kür havuzunda kirece doygun suda bekletilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 1.** (a) SSB örneğinin sıkıştırma aşaması ve (b) sıkıştırma işlemi tamamlanmış SSB örneği.

Ultras ses geçiş hızı ve dinamik elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan deneylerde Proceq marka Pundit PL-200 ultrasonik test cihazından yararlanılmıştır (Şekil 2a). Ultras ses geçiş hızı ve dinamik elastisite modülünün tespiti için, eğilme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla üretilen 15x15x75 cm boyutlu prizmatik beton örneklerinden yararlanılmıştır. Her bir kiriş numunesi üzerinde üç farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Ultras ses geçiş hızı tespiti için dalga boyu 68,5 mm olan 54 kHz P dalgası duyargaları kullanılmıştır. Dinamik elastisite modülünün tespiti için ise önce dalga boyu 68,5 mm olan 54 kHz P dalgası duyargaları ile ilk ölçüm yapılmış, ardından bu duyargalar çıkarılarak yerine dalga boyu 10 mm olan 250 kHz S dalgası duyargaları takılmış ve ikinci ölçüm yapılmıştır. S ve P dalgası duyargaları kullanılarak yapılan ölçümler sonrasında betonun dinamik elastisite modülü cihazın dijital ekranından okuma yapılarak tespit edilmiştir. Dalga boylarının hesaplanmasında 3700 m/s'lik boyuna dalga ve 2500 m/s'lik enine dalga darbe hızı kullanılmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 2.** (a) Ultras ses geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü tespitinde kullanılan test cihazı ve (b) SSB kiriş örneğinin eğilme dayanımı deney aşaması.

### **III. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Agregaların birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve parçalanma direnci deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde birim hacim ağırlık deneylerinin gevşek ve sıkışık olmak üzere iki şekilde yapıldığı görülmektedir. Özgül ağırlık değerleri incelendiğinde en yüksek değeri bazalt

agregasının aldığı görülmektedir. Doğal kumun özgül ağırlığı 2,76, gevşek birim hacim ağırlığı 1,54 g/cm<sup>3</sup>, sıkışık birim hacim ağırlığı 1,64 g/cm<sup>3</sup> ve su emmesi % 1,30 olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Agregaların birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve parçalanma direnci deney sonuçları.

Agrega Türü	Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )		Özgül Ağırlık	Su Emme (%)	Los Angeles Parçalanma Direnci (%)
	Gevşek	Sıkışık			
Dolomit	Kırmataş II	1,50	1,59	2,80	0,56
	Kırmataş I	1,57	1,61	2,80	0,37
	K.Tozu	1,89	1,90	2,81	1,75
Bazalt	Kırmataş II	1,51	1,56	2,81	0,20
	Kırmataş I	1,53	1,63	2,82	0,14
	K.Tozu	1,67	1,80	2,83	1,56
Mermer	Kırmataş II	1,52	1,60	2,70	0,42
	Kırmataş I	1,62	1,75	2,71	0,30
	K.Tozu	1,73	1,89	2,74	1,92
Kalker I	Kırmataş II	1,51	1,59	2,78	0,36
	Kırmataş I	1,51	1,63	2,79	0,43
	K.Tozu	1,65	1,83	2,80	1,20
Kalker II	Kırmataş II	1,52	1,60	2,80	0,21
	Kırmataş I	1,54	1,68	2,81	0,75
	K.Tozu	1,59	1,75	2,82	1,16

Los Angeles parçalanma direnci deneyleri sonucu dolomit agregasının % 19,56, bazalt agregasının % 10,56, mermer agregasının % 42,88, kalker I agregasının % 24,16 ve kalker II agregasının % 24,75 parçalanma direncine sahip oldukları tespit edilmiştir. Mermer agregasının Los Angeles parçalanma değeri % 30'un üzerinde olduğu için yol kaplamaları için kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuca rağmen mermer agregasından üretilecek olan silindire sıkıştırılmış betonların farklı amaçlarla kullanılabilceğinden dolayı deneysel çalışmalarda kullanılmaya devam edilmiştir.

Dolomit, bazalt, mermer, kalker I ve kalker II agregalarının kırmataş II, kırmataş I ve kırmataş tozu olmak üzere üç farklı boyutta ve doğal kumun elek analizleri yapılmıştır. Yol kaplamalarında kullanılacak olan beton agregaları için istenilen gradasyon eğrisi alt ve üst sınır değerleri dikkate alınarak, her agrega türü için kendi içerisinde farklı karışım yüzdeleri belirlenmiştir. Tablo 3'de karışım agregalarının elek analizi sonuçları verilmiştir.

**Tablo 3.** Karışım agregalarının elek analizi sonuçları.

Elek No (mm)	Agregaların Karışım Granülometrileri (%)				
	Dolomit	Bazalt	Mermer	Kalker I	Kalker II
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	85,62	90,11	89,68	94,68	95,75
12,50	73,01	78,23	78,13	81,20	85,93
9,5	67,83	70,12	73,26	76,59	77,24
8	62,93	64,34	68,18	72,68	67,40
4	49,34	53,29	49,99	54,91	41,63
2	40,56	44,74	44,34	44,47	28,97
1	32,49	36,34	39,02	36,78	21,54
0,5	21,66	23,75	28,10	24,79	13,96
0,25	10,82	10,89	13,67	11,75	6,27
0,125	5,19	3,76	3,37	4,29	2,58
0,075	3,03	1,70	0,93	1,50	1,91
0,063	1,76	1,00	0,46	0,70	1,30

Kırmataş II, kırmataş I, kırmataş tozu ve doğal kum karışım yüzdeleri sırasıyla; dolomit agregası için % 25, 25, 25 ve 25, bazalt agregası için % 15, 30, 30 ve 25, mermer agregası için % 20, 30,30 ve 20, kalker I agregası için % 20, 25, 30 ve 25, kalker II agregası için % 15, 30, 20 ve 35 olacak şekilde karıştırılarak karışım agregaları hazırlanmıştır. Her agregaya türü için farklı karışım oranları kullanılmasının nedeni, temin edilen agregaların farklı boyutlarda olmasından kaynaklanmıştır. Bu nedenle agregalar farklı oranlarda karıştırılarak, karışım agregası granülometrik değerlerinin birbirine yakın ve istenilen aralıkta olması sağlanmıştır.

Dolomit, bazalt, mermer, kalker ve kalker II olmak üzere beş farklı agregaya kullanılarak üretilen silindire sıkıştırılmış betonların ağırlıkça karışım miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Farklı tür agregalarla üretilen silindire sıkıştırılmış betonların karışım miktarları ( $1m^3$ ).

Beton Kodu	Agrega Türü	S/Ç	Su (kg)	Çimento (kg)	Kırmataş II (kg)	Kırmataş I (kg)	Kırmataş Tozu (kg)	Doğal Kum (kg)
D	Dolomit	0,35	150	429	488,25	488,25	488,25	488,25
B	Bazalt	0,35	150	429	293,40	586,80	586,80	489,00
M	Mermer	0,35	150	429	377,80	566,70	566,70	377,80
KI	Kalker I	0,35	150	429	388,80	486,00	583,20	486,00
KII	Kalker II	0,35	150	429	194,50	583,50	389,00	680,75

SSB karışımlarında su/çimento oranı 0,35 olarak sabit tutulduğu için beş farklı karışımda 150 kg su ve 429 kg çimento kullanılmıştır. Boyut aralığına göre agregaya miktarları değişkenlik göstermiştir. Bunun nedeni, her tür agregaya için uygun granülometri eğrisini yakalamak için kendi içerisinde farklı oranlarda karıştırılmasından kaynaklanmıştır.  $1 m^3$  beton içerisindeki toplam agregaya karışımının granülometrik özellik açısından benzerlik göstermesinin, agregaya türleri arasında yapılacak kıyaslamada daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Ayrıca agregaların yoğunluklarının da farklı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

DeneySEL çalışmalar için üretilen silindire sıkıştırılmış beton karışımlarının hepsinde çökme değeri sıfır olarak tespit edilmiştir. Dolomit, bazalt, mermer, kalker I ve kalker II agregaları kullanılarak üretilmiş olan silindire sıkıştırılmış betonların birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Çökme (slump), birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü deney sonuçları.

Beton Kodu	Agrega Türü	Birim Hacim Ağırlık ( $g/cm^3$ )	Basınç Dayanımı (MPa)		Eğilme Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
			7	28			
D	Dolomit	2,54	27,60	35,35	10,43	4,86	36,17
B	Bazalt	2,56	28,64	37,01	8,78	4,65	38,87
M	Mermer	2,51	25,64	32,31	8,16	4,29	35,88
KI	Kalker I	2,45	23,83	31,30	6,78	4,09	29,10
KII	Kalker II	2,57	26,65	33,88	10,03	4,56	39,43

Taze beton birim hacim ağırlık değerleri dolomit, bazalt, mermer, kalker I ve kalker II agregaları ile üretilen SSB örnekleri için sırasıyla 2,54, 2,56, 2,51, 2,45 ve 2,57  $g/cm^3$  olarak belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık deney sonuçlarına bakıldığında en yüksek değeri 2,57  $g/cm^3$  ile dolomit agregalı D kodlu SSB örnekleri, en düşük değeri 2,45  $g/cm^3$  ile kalker I agregalı KI kodlu SSB örnekleri almıştır.

7 günlük basınç dayanımları D, B, M, KI ve KII kodlu SSB örnekleri için sırasıyla 27,60, 28,64, 25,64, 23,83 ve 26,65 MPa'dır. 28 günlük basınç dayanımlarının ise sırasıyla 35,35, 37,01, 32,31, 31,30 ve 33,88 MPa olduğu belirlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında, 7 günlük basınç dayanımlarına göre; dolomit agregası kullanılan betonda % 28, bazalt agregası kullanılan betonda % 29, mermer agregası kullanılan betonda % 26, kalker I agregası kullanılan betonda % 31 ve kalker II agregası kullanılan betonda % 27 artış meydana gelmiştir. En yüksek artış kalker I agregası kullanılan betonda, en düşük artış ise mermer agregası kullanılan betonda görülmüştür. Ayrıca tasarlanan C30/37 sınıfı SSB için farklı agregalarla üretilen her karışımda, hedeflenen basınç dayanımı değerine ulaşılmıştır. En yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri bazalt agregası ile üretilen B kodlu SSB örneklerinden elde edilmiştir.

28 günlük eğilme dayanımları D, B, M, KI ve KII kodlu SSB örnekleri için sırasıyla 10,43, 8,78, 8,16, 6,78 ve 10,03 MPa olarak tespit edilmiştir. Beton yol kaplamaları için istenilen minimum 4,2 MPa eğilme dayanımı değerinin üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında en yüksek değeri 10,43 MPa ile dolomit agregalı D kodlu SSB alırken en düşük değeri 6,78 MPa ile kalker I agregalı KI kodlu SSB almıştır.

Ultras ses geçiş hızı test sonuçları incelendiğinde D, B, M, KI ve KII kodlu SSB örneklerinin 4,86, 4,65, 4,29, 4,09, 4,56 km/s geçiş hızına sahip oldukları belirlenmiştir. Farklı agregalar kullanılarak üretilen SSB örneklerinin tamamında 4 km/s ultras ses geçiş hızının üzerinde çok iyi değerlere ulaşılmıştır. Dolomit, bazalt ve kalker II agregalarından üretilen SSB örneklerini ASTM C 597-09 standardına göre 4,5 km/s ultras ses geçiş hızının üzerinde değer aldıkları için kaliteli beton olarak sınıflandırmak mümkündür.

Tablo incelendiğinde, genelde dinamik elastisite modülü değerleri 28 günlük basınç dayanımı değerleriyle doğru orantılı seyretmiştir. Sadece kalker I agregası ile üretilen SSB örneğinde bu orantı bozulmuştur. Kalker II agregalı silindire sıkıştırılmış betonun dinamik elastisite modülü 39,43 GPa olarak en yüksek değer olmasına rağmen, 28 günlük basınç dayanımı 37,01 MPa ve dinamik elastisite modülü 38,87 GPa değerleri birlikte incelendiğinde en iyi sonucu bazalt agregalı SSB vermiştir. SSB örneklerinin ultras ses geçiş hızı arttıkça, 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde de farklı oranlarda artış tespit edilmiştir. Ayrıca SSB örneklerinin eğilme dayanım değerleri arttıkça dinamik elastisite modülü değerlerinde de artışlar görülmüştür.

## **IV. SONUC**

Su/çimento oranı 0,35 olarak belirlenmiş ve dolomit, bazalt, mermer, kalker I ve kalker II olmak üzere beş farklı agregaya kullanılarak üretilen SSB örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucu;

- Agregaya türü ve granülometrisinin SSB'nin dayanım özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir.
- Tasarlanan C30/37 sınıfı, beş farklı agregadan üretilen SSB örneklerinin tamamı hedeflenen basınç dayanımı değerine ulaşmıştır.
- En yüksek basınç dayanımı değerine 37,01 MPa olarak bazalt agregası kullanılan SSB örneklerinde ulaşılmıştır. Bazalt, volkanik kökenli bir taş türü olduğundan diğer tortul ve başkalaşım kökenli taşlara göre daha sert ve dayanımları yüksektir. Basınç dayanımı değerini agregaya özelliklerinin etkilediği bilinmektedir.
- Her bir agregaya türü, SSB karışımlarında kendi içerisinde farklı oranlarda karıştırıldığı için elde edilen verilerde, granülometri farklılığının dayanım sonuçlarına etki etme ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.



- Beş farklı agrega kullanılarak üretilen SSB örneklerinin 28 günlük eğilme dayanım değerlerinin, beton yol kaplamaları için istenilen minimum 4,2 MPa dayanımı değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir.
- SSB örneklerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve dinamik elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında en iyi sonuçları veren betonların bazalt ve dolomit agregalı SSB örnekleri olduğu tespit edilmiştir.
- Mermer agregasından üretilen SSB örnekleri yol kaplamaları için gerekli olan basınç ve eğilme dayanımı değerlerini sağlamıştır. Buna rağmen, yol kaplamaları için istenilen %30 parçalanma direncinin üzerinde %42,88 değer aldığı için kullanılmamalıdır. Fazla aşınmaya maruz kalmayan uygulama alanlarında SSB üretiminde değerlendirilebilir.
- SSB örneklerinden edilen deney sonuçlarına göre karışımlarda kullanılan agrega türünün betonun dayanım özelliklerini etkilediği görülmüştür. Karışımlardaki agregaların granülometri eğrilerinin aynı olması durumunda etkinin daha net bir şekilde ortaya çıkacağını söylemek mümkündür. SSB üretimi yapılmadan önce, agrega granülometrisine ve maksimum agrega dane çapının (Dmax) doğru seçimine dikkat edilmelidir.

SSB karışımlarında çimento miktarının azaltılmasıyla da yeterli basınç ve eğilme dayanımının sağlanabileceği düşünülmektedir. SSB ile ilgili yapılacak çalışmalarda ince agreganın (kırmataş tozu) karışımdaki oranı azaltılarak, çimento miktarında düşüş sağlanabileceği öngörülmektedir. Karışımdaki çimento miktarını azaltmak ekonomik yönden katkı sunacaktır.

Silindir SSB örnekleri üretilirken, sıkıştırılan tabaka kalınlığı ve sıkıştırma süresi dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır. Ayrıca, sıkıştırılan tabakalar arasında yatayda boşlukların oluşabilme ihtimaline karşılık önlemler alınmalıdır.

Hızlı inşa edilmesi, alternatif yollara nazaran trafiğe daha çabuk açılması, gece sürüş halinde görüş olanağının daha iyi olması, uzun ömürlü ve daha az bakım gerektirmesi, ekonomikliği, petrol ve türevlerine olan bağımlılığı azaltması nedeniyle silindirle sıkıştırılmış betonların beton yol üretiminde ve diğer alanlarda kullanılması önerilmektedir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] O. Şimşek, *Beton ve Beton Teknolojisi*, 4.baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2009, ss. 263.
- [2] B. Kobu, *Üretim Yönetimi*, 11.baskı, İstanbul, Türkiye: Avcıol Basım Yayın, 2003, ss. 712.
- [3] M. Arslan, *Beton*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Atlas Yayın Dağıtım, 2001, ss. 237.
- [4] P. K. Mehta ve P. J. M. Monteiro, 3. baskı, *Concrete-Microstructure, Properties and Materials*, New York, USA: Mc Graw-Hill Professional Publishing, 2005, ss. 684.
- [5] İ. Ö. Yaman ve H. Ceylan, "Silindirle sıkıştırılmış beton yollar," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 487, ss. 44-61, 2015.
- [6] S. Akman, *Yapı Malzemeleri*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi Baskısı, 1990, ss.162.
- [7] D. S. Sarı, "Normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına lif içeriğinin ve dayanımının etkisi," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik

Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.

[8] G. Özışık, *Beton*, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 360.

[9] K. Akçaözoğlu, “Yüksek dayanımlı beton karışım dizaynı,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2001.

[10] THBB, “Beton Yollar,” *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 427, ss. 38-44, 2003.

[11] P. Pourhossein, “Yüksek dayanımlı çelik lifli betonarme kiriş ve kolonlarda çatlamlar göz önüne alınarak deplasmanların belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2012.

[12] E. Açar, İ. Süttaş ve G. Öztaş, *Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları)*, İstanbul, Türkiye: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 1998.

[13] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. Hazaree, H. Ceylan ve F. Bektaş, *Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements*, Ames, USA: National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University, 2010, ss. 104.

[14] N. Ağırlioğlu, “Baraj planlama ve tasarımı,” *Su Vakfı Yayınları*, c. 2, ss. 259, 2005.

[15] Portland Cement Association. (2009, Haziran). *Roller-compacted concrete pavements for highways and streets*. [Online]. Erişim: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2009/pdf/Halsted.pdf>

[16] Portland Cement Association. (2004, Haziran). *Guide specification for construction of roller compacted concrete pavements*, [Online]. Erişim:<https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Guidetorcc.PDF>

[17] K. D. Hansen ve W. G. Reinhardt, *Roller Compacted Concrete Dams*, New York, USA: Mc Graw-Hill, 1991, ss. 298.

[18] Portland Cement Association.(2006, Mayıs). *Roller-compacted concrete (RCC)*. [Online]. Erişim:[https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete applications/sn2975.pdf?sfvrsn=414bfdbf\\_2](https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete applications/sn2975.pdf?sfvrsn=414bfdbf_2)

[19] *Guide to Roller-Compacted Concrete Pavements*, American Concrete Institute, ACI 327R-14, 2015.

[20] R. F. Andriolo, *The Use of Roller Compacted Concrete*, Sao Paulo: Past-Press, 1998, ss.554.

[21] TÇMB, *Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar Teknik Şartnamesi*, Ankara, Türkiye: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2017.

[22] *Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler-bölüm 3: gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1097-3, 1999.

[23] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1097-6, 2013.

[24] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1097-2, 2020.

[25] *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımının tayini-*

*eleme yöntemi*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 933-1, 2012.

[26] *Beton-taze beton deneyleri-bölüm 2: çökme (slump) deneyi*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12350-2, 2019.

[27] *Beton-taze beton deneyleri-bölüm 6: yoğunluk*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12350-6, 2019.

[28] *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: sertleşmiş beton deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12390-3, 2019.

[29] *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 5: sertleşmiş beton deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12390-5, 2019.

[30] *Standard test method for pulse velocity through concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM C 597-09, 2009.

[31] *Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer*, American Society for Testing and Materials, ASTM C1435 / C1435M-20, 2020.