



Physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete with ground granulated blast furnace slag

Özgür Çakır*^{ID}, Selin Sayaca Topgül^{ID}

Department of Civil Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, 34220, Turkey

Highlights:

- Concrete production with recycled aggregates
- Sustainable concrete
- Physical and mechanical performance

Keywords:

- CDW
- Recycled aggregate concrete
- GGBFS
- Physical properties
- Mechanical properties

Article Info:

Research Article
Received: 14.09.2020
Accepted: 16.11.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.794747

Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge to ISTAC and AKÇANSA.

Correspondence:

Author: Özgür Çakır
e-mail: cozgur@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5242

Graphical/Tabular Abstract



Figure A. Recycled aggregate production

Purpose: It is clear that increasing amount of CDW and the shortage of the natural sources are major problems around the world and gaining importance day by day. The use of CDW as recycled aggregate in concrete has a great potential and vital importance in order to solve the environmental problems and producing sustainable concrete. In the scope of the experimental study, the usability of recycled aggregate in concrete with and without GGBFS was investigated with physical and mechanical tests.

Theory and Methods:

Recycled aggregates obtained from CDW were used (0-35-70%) in concrete by replacing natural aggregates in the experimental study with incorporating 0-15-30% GGBFS. Fresh and hardened concrete tests were carried out on concrete specimens at 7th, 28th and 90th days. Density, slump and air content of the concretes were measured at fresh state. The density, water absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive strength and splitting strength tests were also carried out on hardened concretes. In total, 342 concrete samples were produced and tested.

Results:

Natural fine and coarse aggregates can be replaced by recycled aggregates in concrete production by using ground granulated blast furnace slag up to 30%. Increasing recycled aggregate volume up to 70% with 30%GGBFS in concrete production showed better mechanical and physical performance at later ages due to the hydration of mineral additive.

Conclusion:

Recycled aggregates obtained from CDW has weak properties compared to natural aggregates. Therefore, some additional improvement methods (pre-saturation, mineral addition, fibers or mechanical treatment) should be applied before/during recycled aggregate concrete production.



Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren geri kazanılmış agregalı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgür Çakır*^{ID}, Selin Sayaca Topgül^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220, Davutpaşa Yerleşkesi, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Geri kazanılmış agregalı beton üretimi
- Sürdürülebilir beton
- Fiziksel ve mekanik performans

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.09.2020

Kabul: 16.11.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.794747

Anahtar Kelimeler:

Yapı-yıkıntı atığı,
geri kazanılmış agregalı
beton,
öğütülmüş granüle yüksek
fırın cürufu,
fiziksel özellikler,
mekanik özellikler

ÖZET

Ülkemizde inşaat sektörünün büyüklüğü ve kalite denetiminin yetersiz olduğu dikkate alındığında, çarpık kentleşme yapılarının halihazırda ve gelecekteki kentsel dönüşüm sürecindeki iyileştirme ve yıkım çalışmaları sırasında çıkan/çıkan betonların değerlendirilmesi için geri kazanılmış agregası (GKA) sektörünün ülkemizde de kurulması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) katkılı (%0-15-30) GKA'nın beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada, doğal agregası ve GKA içeren beton numuneler üzerinde 7., 28. ve 90. günlerde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Doğal agregalı seriler için; doğal agregalar kullanılarak su/bağlayıcı oranı 0.50 olan, 380 dozlu, XS1 etki sınıfına maruz kalacağı düşünülen, hedef dayanımı C30/37 olan beton üretilmiştir. GKA içeren serilerin üretiminde; geri dönüşüm tesisinden alınan geri kazanılmış agregalar doğal agregalarla aynı granulometriye getirilmiş ve aynı dozajla, aynı su/bağlayıcı oranının kullanıldığı betonlar üretilmiştir. Taze betonda; birim ağırlık, işlenebilirlik (çökme) ve hava içeriği deneyleri ile, sertleşmiş betonda; birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases, kılcal su emme ve hacimce su emme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, iri ve ince doğal agregaların, ÖGYFC da kullanılarak hem fiziksel hem de mekanik olarak GKA ile yüksek oranlarda yer değiştirilerek kullanılabilmesini göstermektedir. %30 oranında ÖGYFC içeren GKA içeren beton serilerinin performansları özellikle 28. ve 90. günlerde doğal agregalı beton serilerine göre daha iyidir.

Physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete with ground granulated blast furnace slag

H I G H L I G H T S

- Concrete production with recycled aggregates
- Sustainable concrete
- Physical and mechanical performance

Article Info

Research Article

Received: 14.09.2020

Accepted: 16.11.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.794747

Keywords:

Construction and demolition
waste,
recycled aggregate concrete,
ground granulated blast
furnace slag,
physical properties,
mechanical properties

ABSTRACT

Considering the size of the construction industry in our country and the insufficient quality control, it is necessary to establish and develop the recycled aggregate (RA) sector in our country in order to evaluate the concrete extracted / to be released during the improvement and demolition works of the urban transformation processes in the current and future urban transformation process. In this experimental study, in which the usability of RA with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) (0-15-30%) in concrete production was investigated; physical and mechanical tests were carried out on concrete samples containing natural aggregate and RA at the 7th, 28th and 90th days. For natural aggregate series; concrete with a water/binder ratio of 0.50, 380 doses, expected to be exposed to XS1 effect class and target strength C30/37 was produced using natural aggregates. In the production of series containing RA; the recycled aggregates taken from the recycling facility were brought to the same granulometry as the natural aggregates and concretes with the same dosage and the same water / binder ratio were produced. Unit weight, workability (slump) and air content tests in fresh concrete; unit weight, compressive strength, split tensile strength, ultrasonic pulse velocity test, capillary water absorption and volumetric water absorption tests on hardened concrete were performed. The results obtained show that coarse and fine natural aggregates can be used both physically and mechanically by replacing them with RA at high rates by using GGBFS. The performance of concrete series containing RA with 30% GGBFS is better than natural aggregate concrete series, especially at the 28th and 90th days.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olan beton, üretiminde kullanılan hammaddelerin doğal kaynakları yoğun şekilde tüketmesi nedeni ile çevresel etki bakımından oldukça önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, inşaat sektöründe tüm dünyada çeşitli nedenler ile oluşan/oluşacak yapım-yıkıntı atıklarının depolanması ve bertaraf edilmesi günden güne daha büyük bir sorun haline gelmektedir. Sektörde sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi ve çevresel tahribatın önüne geçilebilmesi amacı ile, açığa çıkan söz konusu atık malzemelerin işlemlerden geçirilerek betonda geri kazanılmış agrega olarak kullanılması son zamanlarda tüm dünyada önem kazanmıştır.

Konu ile ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde, geri kazanılmış agregaların beton üretiminde kullanılmasının önünde bazı kısıtlayıcı etmenler olduğu görülmektedir. Geri kazanılmış agregaların doğal agregalara kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olması, üzerinde yapılmış halde bulunan eski harç kalıntısının miktarı, su emme değerinin yüksek olması ve kirletici maddelerin (cam, ahşap, seramik vb.) bulunması gibi sebeplerden dolayı üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği ifade edilmektedir [1]. Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek amacı ile geri kazanılmış agregaların beton üretiminde kullanılmadan/kullanılırken bazı iyileştirme suya doyurma, mineral katkı ilavesi, lif kullanımı ve mekanik iyileştirme) yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Yapılan bir deneysel çalışmada [2], %5 silis dumanı kullanımının geri kazanılmış agregalı betonların kırılma performansını arttırdığı ifade edilmektedir. Bazalt liflerin kullanıldığı bir başka deneysel çalışmada ise [3], %60 oranında geri kazanılmış agrega kullanılarak üretilen betonlarda hacimce %0,5 bazalt lif kullanımının basınç dayanımı bakımından optimum olduğu belirtilmektedir. Farklı mineral katkıların kullanıldığı geri kazanılmış agregalı betonların da fiziksel ve mekanik performanslarının belirgin şekilde iyileştiği belirlenmiştir [4, 5]. İyileştirme yöntemleri ayrı ayrı uygulanabildiği gibi birkaç yöntemin beraber uygulanması şeklinde de gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin, lif ve uçucu külün beraber kullanıldığı deneysel çalışmada [6] geri kazanılmış agregalı betonların doğal agregalı betonlara kıyasla daha üstün özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Benzer başka bir çalışmada [7] ise geri kazanılmış agregalı betonlarda lif ve silis dumanının birlikte kullanılması beton performansını arttırmıştır. İyileştirme yöntemlerinin optimize edildiği bir başka deneysel çalışmada [8], geri kazanılmış agregalar beton üretiminde kullanılmadan önce mekanik iyileştirmeye tabi tutulmuştur. İyileştirme sonucu geri kazanılmış agreganın %60 oranında, betonlarda mekanik ve kırılma parametreleri bakımından kullanılabilmesi belirtilmiştir. Mahini vd. tarafından, %0-50-100 oranlarında geri kazanılmış iri agrega ve %60 ÖGYFC içeren numunelerde yapılan deneysel çalışmalarda, ÖGYFC kullanılmasının geri kazanılmış agregalı betonlarda su emme ve boşluk hacmini belirgin oranda azalttığı ve doğal agregalı betonlara kıyasla sülfat-asit etkisine karşı daha üstün direnç gösterdiği, bu

olumlu etkinin, C-S-H, etrenjit ve doldurma etkisi ile mikro yapıdaki iyileşmeler sonucu gerçekleştiği ifade edilmektedir [9]. Tabsh ve Abdelfatah tarafından geri kazanılmış agregalı betonlar üzerine yapılan deneysel çalışmada, geri kazanılmış agregalı betonların yarmada çekme dayanımının geleneksel betona kıyasla daha düşük olduğu, yüksek oranda geri kazanılmış agrega kullanımı ile bu düşüşün %30'lara vardığı ifade edilmiştir [10]. Benzer bir deneysel çalışmada, Xiao vd. tarafından geri kazanılmış agreganın %100 oranında kullanıldığı geri kazanılmış agregalı betonların çekme dayanımının geleneksel betona kıyasla %31 oranında azaldığı belirtilmektedir [11]. Brito vd. tarafından geri kazanılmış agregalı betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmada ise, geri kazanılmış agregaların tane dağılımının, işlenebilirlik, geçirimsizlik, dayanım ve dayanıklılık gibi pek çok özellik üzerinde doğrudan etkili olduğu ifade edilmektedir [12]. %0-40-60 oranlarında ÖGYFC ve %50-100 geri kazanılmış iri agrega içeren beton numunelerde yapılan deney sonuçlarına göre, yüksek oranda ÖGYFC ve geri kazanılmış agreganın betonda kullanımının klorür etkisine karşı geri kazanılmış agregalı betonların direncini arttırdığı ve sürdürülebilir beton üretiminde kullanılabilmesi belirtilmektedir [13]. Doğal agreganın %25-50-100 oranlarında geri kazanılmış iri agrega ile yer değiştirildiği ve %0-20-40-60 oranlarında ÖGYFC içeren beton numunelerde gerçekleştirilen benzer bir deneysel çalışmada, %50 oranında geri kazanılmış agrega ile %40 ÖGYFC içeren serilerin kabul edilebilir mekanik dayanımlar gösterdiği ifade edilmektedir [14]. Kou vd. tarafından silis dumanı, metakaolin, uçucu kül ve ÖGYFC gibi farklı mineral katkıları kullanılarak gerçekleştirilen geri kazanılmış agregalı betonlar üzerindeki deneysel çalışmalarda, uçucu kül ve ÖGYFC nun olumlu etkisinin geç yaşlarda görüldüğü ifade edilmiştir. Aynı çalışmada, %55 oranında ÖGYFC kullanımının basınç dayanımını azalttığı ancak geri kazanılmış agregalı betonlarda dayanıklılık performansını iyileştirdiği belirtilmiştir [15]. Diğer taraftan, geri kazanılmış agregaların karbonatlaşma değerinin betonun karbonatlaşmasına kıyasla daha hızlı ve kolay olduğu ifade edilmektedir [16]. Bu deneysel çalışma kapsamında, mineral katkı olarak ÖGYFC kullanılarak (%0-15-30) iyileştirme yöntemi uygulanan geri kazanılmış agregalı (%0-35-70) betonların taze haldeki ve 7., 28., 90. günlerdeki fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC), geri kazanılmış agregalı betonların özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada; geleneksel beton ile, geleneksel beton üretiminde kullanılan ince, iri ve her iki agreganın (aynı anda) geri kazanılmış olanlarıyla %100 oranında ikame edildiği beton serileri üretilmiş ve üretilen beton numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılan ÖGYFC ise %0, %15 ve %30 oranlarında çimentoyla ikame edilerek kullanılmıştır. Doğal agregalı seriler için; doğal agregalar kullanılarak 380 dozlu,

hedef dayanımı C30/37 olan, su/bağlayıcı oranı 0.50 olan, XS1 (deniz suyundaki klorürün sebep olduğu korozyon tehlikesi olan) etki sınıfına maruz kalacağı düşünülen beton üretilmiştir. Geri kazanılmış agregalı seriler içinse, geri kazanım tesisinden temin edilen atık malzeme olan molozlar kırılarak doğal agregalarla aynı granülometriye getirilmiş ve aynı dozajla, su/bağlayıcı oranının kullanıldığı beton üretilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 108 adet 15x15x15 cm boyutlu küp, 108 adet 10/20 cm boyutlu silindirik ve 108 adet 7x7x7 cm boyutlu küp beton numune olmak üzere toplam 600 lt beton ve 324 adet numune üretilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun geri kazanılmış agregalı betonların özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada, kaynağı belli olmayan geri kazanılmış agreganın geleneksel agregaya ile aynı granülometriye getirilmesi, numunelerin üretimi, kuru ve deneylerden oluşan aşamalar izlenmiştir.

2.1. Üretimde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri (Material Properties)

Beton numune üretiminde, özellikleri aşağıda verilen; agregaya, çimento, şehir şebeke suyu, mineral katkı maddesi olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kimyasal katkı maddesi olarak polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

2.1.1. Agregalar (Aggregates)

Beton üretiminde doğal agregaya olarak maksimum dane büyüklüğü 4 mm olan silis esaslı doğal kum ile maksimum dane büyüklüğü 31,5 mm olan kalker esaslı kırmataşlar

kullanılmıştır. Agregaların özellikleri ve granülometrisi TS EN 1097-6 ve TS 3529'a uygun olarak belirlenmiştir. TS 3530 EN 933-1'e göre yapılan elek analizi sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir. Karışım agregasının granülometri eğrisinin A32-B32 referans eğrileri arasında olması sağlanmıştır. Geri kazanılmış agregaya ise İstaç tesislerinden alındıktan sonra çeneli kırıcı ile kırılmış, ardından eleme aleti ile elenmiş ve ayrı ayrı doğal ince (N1) ve iri agregaya (N2) ile aynı granülometriye sahip geri kazanılmış ince (R1) ve iri agregaya (R2) olarak elde edilmiştir. Geri kazanılmış agregalar 24 saat su içinde bekletilerek suya doyurulmuş ve laboratuvar ortamında kurutularak kullanıma hazır duruma getirilmiştir. Tüm agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

2.1.2 Çimento (Cement)

Beton üretiminde Akçansa San. A.Ş.'den temin edilen ve fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri Tablo 3'te verilen CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır.


2.1.3. Katkı maddeleri (Additives)

Deneysel çalışma sırasında mineral katkı olarak Akçansa San. A.Ş.'den temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Mineral katkı maddesi, ilgili serilerde çimento ağırlığının %15 ve %30'u oranında çimentoyla ikame edilerek beton karışımına katılmıştır. Karışımında kullanılan yüksek fırın cürufunun özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Beton üretiminde tüm serilerde sabit kıvamı (S4) sağlamak amacı ile kimyasal katkı olarak, BASF Yapı Kimyasalları San. A.Ş.'den temin edilen Glenium SKY 608

Tablo 1. Agregaların elek analizi değerleri (Sieve Analysis of Aggregates)

Elek Gözü D _i (mm)	Doğal İnce (N1)		Doğal İri (N2)		Doğal Kum		Karışım
	Geçen (g)	%P _{F1}	Geçen (g)	%P _{F2}	Geçen (g)	%P _{C1}	%P _K
31,5	3000	100	3000	100	750	100	100
22,4	3000	100	2922	97	750	100	100
16	2985	99,5	1066	36	750	100	100
11,2	2602	86,7	53	2	750	100	100
8	1797	59,9	11	0	750	100	100
4	313	10,4	0	0	646	86	86
2	93	3,1	0	0	426	57	57
1	38	1,3	0	0	291	39	39
0,5	0	0	0	0	166	22	22
0,25	0	0	0	0	56	7	7
Karışım Oranları	% 35		% 35		% 30		%100

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri (Physical properties of aggregates)

Agregalar	Agrega Tipi	Tane Boyutu (mm)	B (kg/dm ³)	Γ (kg/dm ³)	Su emme (%)	Karışım Oranı
Doğal ince agregaya (N1)	Kalker Esaslı	2-16	1,386	2,670	0,5	35
Doğal iri agregaya (N2)	Kalker Esaslı	8-31,5	1,304	2,671	0,5	35
Doğal Kum	Silis Esaslı	0,25-4	1,511	2,550	0,5	30
Geri kazanılmış ince agregaya (R1)		2-16	1,217	2,370	3,0	35
Geri Kazanılmış iri agregaya (R2)		8-31,5	1,258	2,381	3,0	35

Tablo 3. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri (Physical, chemical and mechanical properties of cement)

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler		
Bileşim	Analiz Sonuçları (%)	Fiziksel Deneyler		Deney Sonuçları
CaO	63,48	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3,14
SiO ₂	20,12	Birim Ağırlık (g/cm ³)		1,1
Al ₂ O ₃	4,92	Priz Başlangıç		2 saat 9 dak.
Fe ₂ O ₃	3,57	Priz Son		3 saat 11 dak.
MgO	1,23	Hacim Sabitliği		1 mm
SO ₃	2,88	Özgül Yüzey (cm ² /g)		3942
Cl ⁻	0,0425	Mekanik Özellikler		
Na ₂ O/K ₂ O	0,24/0,89	Basınç Dayanımı (MPa)		
Kükürt	-	2.gün	7.gün	28.gün
Kızdırma Kaybı	1,72	29,6	45,8	56,1
Çözülme Kalıntısı	0,92			

Tablo 4. Yüksek fırın cürufunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri (Physical, chemical and mechanical properties of GGBFS)

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler		
Bileşim	Analiz Sonuçları (%)	Fiziksel Deneyler		Deney Sonuçları
CaO	35,26	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		2,91
SiO ₂	42,15	Birim Ağırlık (g/cm ³)		4130
Al ₂ O ₃	12,35	İncelik		
Fe ₂ O ₃	2,35	0.045 mm Elekte Kalan (%)		1,2
MgO	5,23	Aktivite Test Değeri (MPa)		13,4
Cl ⁻	0,0123	Mekanik Özellikler		
Na ₂ O/K ₂ O	0,21/1,25	Basınç Dayanımı (MPa)		
Kükürt	0,250	2.gün	7.gün	28.gün
Kızdırma Kaybı	-	29,6	45,8	56,1
Çözülme Kalıntısı	-			
Çözülme Kalıntısı	-			

kodlu polikarbosilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Kimyasal katkı maddesi TS EN 934-2'de ifade edilen yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı beton katkısı ve ASTM C 494'te verilen F tipi: yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı beton katkısı standartlarına uygundur. Karışımda istenilen çökme değeri %0 ve %100 oranında geri kazanılmış agrega kullanılarak üretilen taze betonlar içerisinde %0,8 ve %1,2 oranında süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanmıştır.

2.2. Numune Üretimi ve Kodlanması (Specimen Production and Codes)

Beton üretiminde TS EN 206-1 standardında tanımlanan etki sınıflarından XS1 (deniz suyundaki klorürün sebep olduğu korozyon tehlikesi olan) etki sınıfı dikkate alınmıştır. Bu etki sınıfında minimum çimento dozajı 380 kg/m³, minimum dayanım sınıfı C30/37 ve maksimum su/bağlayıcı oranı 0,50'dir. Geleneksel beton üretiminde doğal agregalar kullanılarak üretim yapılmıştır. Geri kazanılmış agregalı beton üretimi ise, doğal iri agreganın aynı granulometriye sahip geri kazanılmış iri agregayla, doğal ince agreganın aynı granulometriye sahip geri kazanılmış ince agregayla %100 oranında ikame edildiği seriler ile her iki tipteki doğal agreganın (iri ve ince) aynı anda geri kazanılmış olanlarıyla (hem iri hem ince) ikame edildiği seriler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Beton üretiminde kullanılan tüm

agregalar suya doymun yüzey kuru durumdayken kullanılmıştır. Üretilen tüm serilere ait numunelere verilen kodlar Tablo 5'te açıklanmıştır. TS 802'ye göre yapılan beton tasarımı karışım hesaplarında, bütün serilerde çökme değeri S4 (160-210 mm) olacak şekilde süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanmıştır. 1 m³ beton üretimi için gerekli malzeme miktarları Tablo 6'da verilmiştir.

2.3. Numunelerin Kürü (Curing)

Bütün numuneler üretimden 24 saat geçtikten sonra kalıptan çıkartılmış ve deney gününe kadar 20±2 °C sıcaklıktaki kirece doymun su içinde kür edilmiştir.

2.4. Taze Beton Deneyleri (Fresh Concrete Tests)

Beton üretimi, düşey eksenli, cebri karıştırıcı, 45 lt kapasiteli betoniyerde yapılmış, doğal ve geri kazanılmış agrega kullanılarak üretilen betonlarda çökme (h, cm), taze beton yoğunluğu (D, kg/m³) ve hava içeriği (A, %) belirlenmiştir.

2.4.1. Birim ağırlık deneyi (Density test)

Beton numunelerde TS EN 12390-6'ya uygun şekilde birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Numuneler kütlesi (m1, kg) ve hacmi (V, m³) belli olan bir kalıp içerisine sıkıştırılarak doldurulmuş, beton dolu olan kalıp tartılarak (m2, kg), taze

Tablo 5. Numunelerin kodları (Sample Codes)

Numune Kodu	Açıklama
N	Katkısız geleneksel beton
R1	İnce agregasının % 100'ü geri kazanılmış katkısız beton
R2	İri agregasının % 100'ü geri kazanılmış katkısız beton
R12	Hem ince hem iri agregasının % 100'ü geri kazanılmış katkısız beton
NC15	%15 mineral katkılı geleneksel beton
NC30	%30 mineral katkılı geleneksel beton
R1C15	İnce agregasının % 100'ü geri kazanılmış ve % 15 mineral katkılı beton
R1C30	İnce agregasının % 100'ü geri kazanılmış ve % 30 mineral katkılı beton
R2C15	İri agregasının % 100'ü geri kazanılmış ve % 15 mineral katkılı beton
R2C30	İri agregasının % 100'ü geri kazanılmış ve % 30 mineral katkılı beton
R12C15	Hem ince hem iri agregasının % 100'ü geri kazanılmış % 15 mineral katkılı beton
R12C30	Hem ince hem iri agregasının % 100'ü geri kazanılmış % 15 mineral katkılı beton

Tablo 6. Taze beton için gerçek malzeme miktarları (Mix proportions)

Numune Kodu	Çimento Dozajı (kg)	Su (kg)	Katkı Maddesi (kg)		d_{min}/D_{max} mm				
					Doğal Agregata			.Geri Kazanılmış	
					İnce (N1)	İri (N2)	Kum	İnce (R1)	İri (R2)
			K. K.*	M.K.*	(kg)				
N	380		0	0					
NC15	323		0	57	640	640		0	0
NC30	266			114					
R1	380			0					
R1C15	323		3	57	0	640		640	0
R1C30	266			114					
R2	380	190		0			524		
R2C15	323		3	57	640	0		0	640
R2C30	266			114					
R12	380			0					
R12C15	323		5	57	0	0		640	640
R12C30	266			114					

*K. K. : Kimyasal Katkı Maddesi

*M. K. : Mineral Katkı Maddesi

betonun birim ağırlıkları (D , kg/m^3) belirlenmiştir. Birim ağırlık değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

2.4.2. Çökme deneyi (Slump test)

Doğal ve geri kazanılmış agregata kullanılarak üretilen betonda çökme deneyi TS EN 12350-2'ye uygun şekilde kesik huni şekilli kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın 25 defa şişlenmesiyle sıkıştırılarak doldurulmuştur. Doldurma işleminden sonra kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilmiş, kalıbın üst seviyesi ile çöken betonun en yüksek noktası arasındaki mesafe (h , cm) ölçülmüş taze betonun çökmesi (slump) belirlenmiştir. Üretilen tüm serilerde işlenebilirliğin TS EN 206-1 standardında verilen kıvam sınıflarından S4 sınıfında (16-21 cm) sabit tutulması amaçlanmış ve özellikleri verilen süper akışkanlaştırıcı katkı maddesini %0,8-1,2 oranlarında kullanarak çökme değerleri 16-21 cm arasında olması sağlanmıştır. Çökme deney sonuçları beton serileri için Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Taze haldeki betonun özellikleri (Properties of fresh concrete)

Numune Kodu	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Hava İçeriği (%)	Çökme (cm)
N	2430	1,7	18
NC15	2403	0,9	20
NC30	2418	0,8	19
R1	2391	1,3	20
R1C15	2391	1,2	19
R1C30	2388	1,0	19
R2	2424	1,5	18
R2C15	2421	0,8	20
R2C30	2412	0,5	18
R12	2394	0,9	20
R12C15	2394	0,8	19
R12C30	2391	0,7	18

2.4.3. Hava içeriği tayini deneyi (Air content test)

Taze betonda hava içeriği tayini deneyi TS EN 12350-7'e uygun şekilde yapılmıştır. Hava ölçer kabı üç aşamada, her kademesi 25 defa şişleme çubuğu ile şişlenerek doldurulmuş sıkıştırılan taze betonun hava içeriği (A, %) belirlenmiştir. Taze betonda hava içeriği değerleri tüm seriler için Tablo 7'de verilmiştir.

2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri (Hardened Concrete Tests)

Doğal ve geri kazanılmış agregaya ile mineral katkısız, %15 ve %30 mineral katkılı (öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu) olarak üretilen beton numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde aşağıda açıklanan fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir.

2.5.1. Fiziksel deneyler (Physical tests)

Doğal agregaya veya geri kazanılmış agregaya ile üretilen beton numuneler üzerinde 7., 28. ve 90. günlerde yoğunluk, hacimce su emme, kılcal su emme ve ultrases geçiş süresi deneyleri uygulanmıştır.

2.5.1.1. Yoğunluk tayini (Density)

Sertleşmiş betonda yoğunluk tayini deneyi, kalıptan çıkarılıp kür havuzunda bekletilmekte olan numuneler üzerinde TS 12390-7'ye uygun şekilde yapılmıştır. Beton numunelerin yoğunluk tayini 15x15x15 cm boyutlardaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler suya doygun yüzey kuru durumdakiler hassas terazi ile kütlesi (m, kg) belirlenmiş ve düzgün hacme sahip olduğu kabul edilerek numune kütlesi hacmine (V, m³) oranlanarak sertleşmiş betonun yoğunluğu (D, kg/m³) tayin edilmiştir. Sertleşmiş betonun 7., 28. ve 90. günler için yoğunluk deney sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Yoğunluk (kg/m³) ve bağıl değerler (Density and relative values)

Numune/ Gün	Bağıl Değişim (%)					
	7	28	90	7	28	90
N	2408	2448	2436	98	100	100
NC15	2390	2405	2416	98	98	99
NC30	2386	2401	2412	97	98	99
R1	2386	2381	2415	97	97	99
R1C15	2374	2377	2401	97	97	98
R1C30	2369	2373	2390	97	97	98
R2	2402	2396	2415	98	98	99
R2C15	2390	2429	2432	98	99	99
R2C30	2389	2416	2425	98	99	99
R12	2390	2378	2414	98	97	99
R12C15	2385	2390	2411	97	98	99
R12C30	2362	2381	2405	96	97	98

2.5.1.2. Hacimce ve ağırlıkça su emme deneyi (Water absorption by volumetric and mass)

Beton numunelerin hacimce su emme deneyi 7x7x7 cm boyutlardaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney

numuneleri etüv içinde 105±5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra desikatör içinde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (W₀). Bu numuneler 24 saat 20±3 °C olan su içinde bekletildikten sonra suya doygun hale getirilmiş ve suya doymuş haldeki numunenin havadaki ağırlığı (W_{SH}) ile suya doymuş haldeki numunenin su içindeki ağırlığı (W_{SS}) belirlenmiştir. Tartımlar 0,1 g duyarlılıklı 5500 g kapasiteli dijital terazi kullanılarak yapılmış, hacimce su emme oranları (h_s, %) ve ağırlıkça su emme oranları (h_d, %) hesaplanarak tüm seriler için 7., 28. ve 90. günlerdeki sonuçlar sırası ile Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9. Hacimce su emme oranı (h_s, %) ve bağıl değerler (Volumetric water absorption values and relative values)

Numune/ Gün	Bağıl Değişim (%)					
	7	28	90	7	28	90
N	11,5	9,3	8,4	124	100	90
NC15	14,3	11,9	9,8	154	127	105
NC30	14,9	12,0	9,9	160	129	107
R1	13,6	11,2	9,6	146	120	103
R1C15	14,9	12,3	10,3	160	132	111
R1C30	15,3	12,4	10,5	164	134	113
R2	13,4	10,6	9,8	144	114	105
R2C15	14,7	12,1	10,0	158	130	107
R2C30	15,0	12,3	10,1	162	132	109
R12	14,1	11,4	10,2	152	123	110
R12C15	15,4	12,5	10,6	165	134	114
R12C30	15,7	12,7	10,8	168	136	116

Tablo 10. Ağırlıkça su emme oranı (a_s, %) ve bağıl değerler (Water absorption by mass and relative values)

Numune/Gün	Bağıl Değişim (%)					
	7	28	90	7	28	90
N	4,9	4,8	4,1	103	100	86
NC15	6,2	5,2	4,2	130	108	87
NC30	6,6	5,5	4,3	137	114	89
R1	6,1	5,9	4,4	128	123	92
R1C15	6,5	6,3	4,5	135	131	94
R1C30	6,8	6,5	4,5	141	135	95
R2	6,2	5,2	4,3	130	109	89
R2C15	6,6	5,5	4,5	138	113	94
R2C30	6,9	5,5	4,6	144	116	95
R12	6,3	5,5	4,3	132	115	91
R12C15	6,8	6,2	4,5	142	130	94
R12C30	7,0	6,5	4,6	146	135	97

2.5.1.3. Kılcal su emme deneyi (Capillary water absorption)

Beton numunelerde kılcal su emme deneyi 7x7x7 cm boyutlardaki küp numunelerde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri etüvde 105±5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra, desikatörde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (W₀). Numunelerin su ile temas edecek yüzey alanı (F, cm²) boyutları kumpas ile ölçülerek belirlenmiştir. Numuneler parafin ile kaplanarak içinde 20±3 °C sıcaklıkta su bulunan bir kap içerisinde bagetlerin üzerine 5 mm'lik kısmı su içinde kalacak şekilde suya bırakılmış ve her birinin 1, 4, 9, 16, 25,

36, 49 ve 64. dakikalardaki (t, dk) su emme miktarı 0,1 g duyarlılıkla tartılarak kütle değişimleri (Q, cm^3) belirlenmiştir. Kılcal su emme katsayısı ($K, \text{cm}^2/\text{sn}$), $Q/F-\sqrt{t}$ grafiği çizilerek belirlenen doğrunun eğiminden elde edilmiştir. Sertleşmiş betonun 7., 28. ve 90. günler için kılcal su emme deney sonuçları tüm seriler için Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Kılcal su emme katsayısı ($K \times 10^{-6}, \text{cm}^2/\text{sn}$) ve bağıl değerler (Cappillary water absorption and relative values)

Numune/Gün				Bağıl Değişim (%)		
	7	28	90	7	28	90
N	4,4	3,4	3,1	129	100	91
NC15	6,3	3,9	3,3	186	113	97
NC30	7,5	3,6	2,9	219	105	85
R1	7,1	6,2	5,3	209	182	156
R1C15	7,2	4,8	4,5	212	142	132
R1C30	7,7	4,4	4,1	226	128	121
R2	6,5	5,3	4,6	191	156	135
R2C15	6,6	4,4	4,0	193	128	118
R2C30	7,5	4,1	3,7	221	119	109
R12	7,3	6,5	5,4	215	191	159
R12C15	7,3	5,7	4,9	214	169	144
R12C30	8,3	5,5	4,4	244	161	129

2.5.1.4. Ultrases deneyi (Ultrasonic pulse velocity test)

Beton numunelerde ultrases deneyi 15 cm boyutlardaki küp numunelerde yapılmıştır. Beton numunelerde frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-02 (2002) ve BS 1881 Part 203 (1986)'ya uygun olan ultrases aleti ultrases geçiş süresi (t, μs) ölçülmüştür. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi uygulanmış, ölçümler problemler yer değiştirilerek 2 kez tekrarlanmıştır. Ölçüm yapılan numunede problemler arası mesafenin (L, mm), okunan süreye (t, μs) oranlanması ile ultrases geçiş hızı (V, $\text{mm}/\mu\text{sn}$) hesaplanmıştır. Ultrases deneyi 7., 28. ve 90. günlerde yapılmış ve deney sonuçları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Ultrases geçiş hızı (V, $\text{mm}/\mu\text{sn}$) ve bağıl değerler (Ultrasonic pulse velocity and relative values)

Numune/Gün				Bağıl Değişim (%)		
	7	28	90	7	28	90
N	4,5	4,5	4,8	100	100	107
NC15	4,5	4,7	5,0	100	103	111
NC30	4,4	4,5	5,0	98	100	112
R1	4,6	4,6	4,9	103	103	109
R1C15	4,5	4,5	5,0	99	101	110
R1C30	4,4	4,4	5,0	97	98	111
R2	4,4	4,5	5,1	98	101	113
R2C15	4,4	4,5	5,0	98	101	112
R2C30	4,4	4,5	5,0	97	98	112
R12	4,4	4,5	5,1	99	100	113
R12C15	4,4	4,4	4,9	98	99	100
R12C30	4,3	4,4	4,9	96	98	109

2.5.2. Mekanik deneyler (Mechanical tests)

Doğal agregaya veya geri kazanılmış agregaya kullanılarak üretilen 108 adet $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlu beton küp ve 108 adet $10/20$ cm boyutlu silindirik beton numunede 7., 28. ve 90. günlerde mekanik deneylerden tek eksenli basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır.

2.5.2.1. Basınç deneyi (Compressive strength test)

Beton numunelerde basınç dayanımını belirlemek amacıyla 7., 28. ve 90. günlerde kür havuzundan çıkarılan $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlu küp numunelerde TS EN 12390-3'e uygun şekilde basınç deneyi yapılarak kırma yükü (F, kN) belirlenmiştir. Basınç deneyinde 3000 kN kapasiteli Auto Test basınç aleti kullanılmış ve yükleme hızı $0,4 \text{ MPa/sn}$ olacak şekilde ayarlanarak deney yapılmıştır. Basınç dayanımının (f_c , MPa) ortalama değerleri 7., 28. ve 90. günler için Tablo 13'te verilmiştir.

2.5.2.2. Yarmada çekme deneyi (Splitting tensile strength test)

Beton numunelerde yarmada çekme dayanımını belirlemek amacıyla 7., 28. ve 90. günlerde kür havuzundan çıkarılan $10/20$ cm boyutlu silindirik numunelerde TS EN 12390-6'ya uygun şekilde yarmada çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Yarma aparatının içine yerleştirilmiş deney numuneleri üzerinde 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aletinde $0,03 \text{ MPa/sn}$ 'lik sabit yükleme hızı ile kırma yükü (F, N) belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı (f_{ct} , MPa) hesaplanmış ve sonuçlar 7., 28. ve 90. günler için Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 13. Basınç dayanımı (f_c , MPa) ve bağıl değerler (Compressive strength and relative values)

Numune/Gün				Bağıl Değişim (%)		
	7	28	90	7	28	90
N	40,43	46,72	49,23	87	100	105
NC15	32,86	40,13	49,97	70	86	107
NC30	27,82	39,12	51,14	60	84	109
R1	39,28	46,87	48,92	84	100	105
R1C15	35,55	47,16	50,23	76	101	108
R1C30	29,42	48,51	52,80	63	104	113
R2	41,57	46,44	52,01	89	99	111
R2C15	38,24	46,93	56,36	82	100	121
R2C30	30,68	48,88	59,27	66	105	127
R12	39,53	48,61	51,66	85	104	111
R12C15	38,14	50,16	55,02	82	107	118
R12C30	29,79	51,72	58,33	66	111	125

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun, geri kazanılmış agregalı betonların özelliklerine etkisinin araştırıldığı, geleneksel beton ve geleneksel beton üretiminde kullanılan ince, iri ve her iki agreganın (aynı anda) geri kazanılmış olanlarıyla %100 oranında ikame edildiği, mineral katkısız, %15 ve %30 mineral katkılı (yüksek fırın cürufu), 12 farklı

tipte betonun üretildiği bu deneysel çalışma kapsamında, agregalarda; birim ağırlık, özgül ağırlık, granülometri, su emme deneyleri, taze betonda; yoğunluk, çökme (slump) ve hava içeriği deneyleri ile 7., 28. ve 90. günlerde sertleşmiş beton numunelerde; yoğunluk, hacimce su emme, kılcal su emme, ses geçiş hızı, basınç ve yarma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

Tablo 14. Yarmada çekme dayanımı (f_{ct} , MPa) ve bağıl değerler
(Splitting tensile strength and relative values)

Numune/ Gün	Bağıl Değişim (%)					
	7	28	90	7	28	90
N	2,93	3,29	3,18	89	100	97
NC15	2,81	3,34	3,52	85	102	107
NC30	2,74	3,37	3,58	83	102	109
R1	2,79	3,79	3,81	85	115	116
R1C15	2,91	3,33	4,01	88	101	122
R1C30	2,96	3,41	4,13	90	104	126
R2	3,61	3,65	3,75	110	111	114
R2C15	3,08	3,51	3,78	94	107	115
R2C30	3,03	3,67	4,03	92	112	122
R12	3,36	3,41	3,51	102	104	107
R12C15	3,16	3,28	3,79	96	100	115
R12C30	3,12	3,39	4,15	95	103	126

3.1. Agregada Özellikleri (Aggregate Properties)

Deneysel çalışmalar kapsamında agregalar üzerinde birim ağırlık, özgül ağırlık, granülometri analizi ve su emme deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre geri kazanılmış agreganın, doğal agregaya göre birim ağırlık ve özgül ağırlık değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu düşüşün geri kazanılmış agregaların üzerinde kalan harç kalıntıları nedeniyle olduğu bilinmektedir.

Doğal ve geri kazanılmış agreganın özelliklerini karşılaştırmak amacıyla TS EN 1097-6'ya uygun olarak yapılan su emme deneyi deney sonuçlarına göre geri kazanılmış agreganın su emme oranı da doğal agregaya göre yüksektir. Su emme oranındaki yükseliş, geri kazanılmış agregaların üzerinde yapışık halde bulunan yüksek poroziteli eski harç kalıntılarından kaynaklanmaktadır.

3.2. Taze Beton Özellikleri (Fresh Concrete Properties)

Taze betonda işlenebilmenin belirlenmesi amacı ile tüm serilerde TS EN 12350-2'ye uygun olarak yapılan çökme (slump) deney sonuçlarına göre, üretilen tüm serilerin işlenebilmesi TS EN 206-1'de verilen kıvam sınıflarından S4 sınıfında (16-21 cm), süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanarak sabit tutulmuştur. TS EN 12350-3'e uygun olarak yapılmış Ve-Be deneyine göre tüm serilerde TS EN 206-1'de verilen V4 sınıfında (3-5sn) olduğu belirlenmiştir. TS EN 12350-7'e uygun olarak yapılmış olan taze betonda hava içeriği deneyi sonuçları incelendiğinde doğal (N) ve geri kazanılmış agregada (R) ile üretilen katkısız, %15 ve %30 mineral katkılı serilerin hava içeriklerinde belirgin farklılık görülmüştür.

3.2.1. Taze beton yoğunluğu (Fresh concrete density)

Taze betonda TS EN 12350-6'ya uygun olarak yapılan yoğunluk deneyi sonuçlarına göre, taze beton yoğunluğu en düşük 2377 kg/m³ ile R12C30, en yüksek 2430 kg/m³ ile N serisindedir. Geri kazanılmış agreganın her iki tipteki doğal agregayla ikame edilmesi ve yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla taze beton yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Bu azalış, geri kazanılmış agreganın yoğunluğunun doğal agreganın yoğunluğundan az oluşu ve çimentoyle ikame edilen yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığından az oluşundan kaynaklanmaktadır. Yalnızca iri agreganın ikame edildiği serilerin yoğunluğunun, yalnızca ince agreganın ikame edildiği serilerin yoğunluğundan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum geri kazanılmış iri agregada yoğunluğunun, geri kazanılmış ince agregada yoğunluğundan yüksek olmasıyla açıklanabilir. Taze beton yoğunluğundaki azalma geri kazanılmış agregada ve yüksek fırın cürufu nedeniyle en fazla %2'dir.

3.2.2. Hava içeriği (Air content)

Taze betonda TS EN 12350-7'ye uygun olarak yapılan hava içeriği deney sonuçlarına göre, beton üretiminde doğal agregada ve geri kazanılmış agregada kullanılarak üretilen tüm beton serilerinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça taze betondaki hava içeriği azalmıştır. Deney sonuçlarına göre taze betonda hava içeriği en düşük %0,5 ile R2C30, en yüksek %1,7 ile N serisindedir. Bu durum, çimentodan daha ince yapıya sahip olan yüksek fırın cürufunun boşlukları doldurması ve hava içeriğinde azalmaya sebep olması şeklinde açıklanabilir.

3.3. Sertleşmiş Beton Özellikleri (Hardened Concrete Properties)

Geleneksel beton ve geleneksel beton üretiminde kullanılan ince, iri ve her iki agreganın (aynı anda) geri kazanılmış olanlarıyla %100 oranında ikame edilmesiyle üretilen mineral katkısız, %15 ve %30 mineral katkılı beton serilerinde 7., 28. ve 90. günlerde yapılan sertleşmiş beton deney sonuçlarının karşılaştırılması aşağıda yapılmıştır.

3.3.1. Yoğunluk (Density)

Yoğunluk deney sonuçlarına göre, tüm serilerde ve tüm yaşlarda sertleşmiş betonun yoğunluğu en düşük 2362 kg/m³ ile R12C30-7, en yüksek 2448 kg/m³ ile N-28 serisindedir. Zamanla tüm serilerin yoğunluğunun arttığı, ancak geri kazanılmış agreganın birim ağırlığının doğal agregaya göre daha düşük olması ve çimentoyle ikame edilen yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığından az olması nedeniyle beton numunelerde geri kazanılmış agregada miktarı ve yüksek fırın cürufu oranı arttıkça beton yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Serilerin yoğunluğunun zamanla artması hidrasyon sonucu oluşan ürünlerin zamanla artması ve beton yoğunluğunu arttırması şeklinde açıklanabilir.

3.3.2. Hacimce su emme oranı (Volumetric water absorption)

Hacimce su emme deney sonuçlarına göre tüm serilerde ve tüm yaşlarda betonun hacimce su emme oranı en düşük %8,40 ile N-90, en yüksek %15,7 ile R12C30-7 serisi olduğu görülmektedir. Zamanla tüm serilerin hacimce su emme oranları azalmış ancak geri kazanılmış agrega miktarı ve yüksek fırın cürufu oranı arttıkça betonun hacimce su emme oranı artmıştır. Yüksek fırın cürufunun hacimce su emme oranına olumlu etkisi görülmemiştir. Yüksek fırın cürufu katkısız geri kazanılmış agregalı beton serilerinde, yalnızca iri agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R2 serisinin en düşük, hem iri hem de ince agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R12 serisinde ise en yüksek sonucu verdiği görülmüştür. Artış oranı R1, R2 ve R12 serilerinde 7. günde N-7 serisine göre sırasıyla %18, %17 ve %23'tür. Katkı oranından bağımsız olarak serilerin sonuçları incelendiğinde, tüm günlerde, doğal agregalı N serilerinin hacimce su emme oranı ortalamasının en düşük, her iki tipteki agregası da geri kazanılmış olarak kullanılan R12 serilerinin hacimce su emme ortalamasının ise en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Yalnızca ince agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R1 serilerinin hacimce su emme ortalaması ise yalnızca iri agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R2 serilerinin hacimce su emme ortalamasından fazladır. Bu durum geri kazanılmış agregaların su emme oranlarının, doğal agregaların su emme oranlarından; ince agregaların su emme oranlarının ise iri agregaların su emme oranlarından fazla olmasıyla açıklanabilir. Yüksek fırın cürufu kullanımının hacimce su emme oranına olumlu etkisi olmamasına karşın kılcal su emme katsayısına olan olumlu etkisi, yüksek fırın cürufunun, kılcal boşlukları tıkmak suretiyle sürekliliğini kesmesi şeklinde açıklanabilir.

3.3.3. Ağırlıkça su emme oranı (Water absorption by mass)

Ağırlıkça su emme deney sonuçlarına göre tüm serilerde ve tüm yaşlarda betonun ağırlıkça su emme oranı en düşük %4,1 ile N-90, en yüksek %7,0 ile R12C30-7 serisi olduğu görülmektedir. Zamanla tüm serilerin ağırlıkça su emme oranları azalmış ancak geri kazanılmış agrega miktarı ve yüksek fırın cürufu oranı arttıkça betonun ağırlıkça su emme oranı artmıştır. Yüksek fırın cürufunun ağırlıkça su emme oranına olumlu etkisi görülmemiştir. Katkı oranından bağımsız olarak sonuçlar incelendiğinde, tüm günlerde, doğal agregalı N serilerinin ağırlıkça su emme oranı ortalamasının en düşük, her iki tipteki agregası da geri kazanılmış olarak kullanılan R12 serilerinin ağırlıkça su emme ortalamasının ise en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum geri kazanılmış agregaların su emme oranlarının, doğal agregaların su emme oranlarından daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

3.3.4. Kılcal su emme katsayısı (Capillary water absorption)

Kılcal su emme katsayısı deney sonuçlarına göre tüm yaşlarda ve tüm günlerde betonun kılcal su emme katsayısı en yüksek $8,3 \times 10^{-6}$ cm²/sn değeri ile R12C30-7, en düşük $2,9 \times 10^{-6}$ cm²/sn değeri ile NC30-90 serisindedir. Zamanla tüm serilerin kılcal su emme katsayısı azalmış ancak tüm günlerde kılcal su emme katsayısı; yalnızca iri agregası geri kazanılmış seriler, yalnızca ince agregası geri kazanılmış

seriler ve hem iri hem de ince agregası geri kazanılmış seriler sıralamasıyla artmıştır. Bu durum yüksek fırın cürufu katkısız geri kazanılmış agregalı beton serilerinde de geçerlidir. Artış oranı R2, R1 ve R12 serilerinde 7. günde N-7 serisine göre sırasıyla %48, %61 ve %66; 28. günde sırasıyla %20, %41 ve %48; 90. günde sırasıyla %5, %20 ve %23'tür. Katkı oranından bağımsız olarak serilerin sonuçları incelendiğinde, tüm yaşlarda, doğal agregalı N serilerinin kılcal su emme oranı ortalamasının en düşük, her iki tipteki agregası da geri kazanılmış olarak kullanılan R12 serilerinin kılcal su emme ortalamasının ise en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Yalnızca ince agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R1 serilerinin kılcal su emme ortalaması ise yalnızca iri agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R2 serilerinin kılcal su emme ortalamasından fazladır. Bu durum geri kazanılmış agregaların su emme oranlarının, doğal agregaların su emme oranlarından; ince agregaların su emme oranlarının ise iri agregaların su emme oranlarından fazla olmasıyla açıklanabilir. Yüksek fırın cürufu kullanımının hacimce su emme oranına olumlu etkisi olmamasına karşın kılcal su emme katsayısına olan olumlu etkisi, yüksek fırın cürufunun, kılcal boşlukları tıkmak suretiyle sürekliliğini kesmesi şeklinde açıklanabilir.

3.3.5. Ultrases geçiş hızı (Ultrasonic pulse velocity)

Ultrases geçiş hızı deney sonuçları incelendiğinde, tüm serilerde ve tüm yaşlarda betonun ultrases geçiş hızı en yüksek 5,1 mm/μs değeri ile R12-90, en düşük ise 4,3 mm/μs değeri ile R12C30-7 serisindedir. Zamanla tüm serilerin ultrases geçiş hızı artmıştır. Yüksek fırın cürufu kullanımı erken yaşlarda ultrases geçiş hızını azaltırken geç yaşta ultrases geçiş hızını artırıcı etki göstermiştir. Ultrases geçiş hızındaki artış oranı R1, R2 ve R12 serilerinde 90. günde sırasıyla %9, %13 ve %13'tür. Katkı oranından bağımsız olarak serilerin sonuçları incelendiğinde, ultrases geçiş hızı ortalama değerlerinin her bir seri için 7. günden 90. güne geldiğinde arttığı görülmüştür. Deney sonuçlarına göre, tüm serilerde ve tüm günlerde ultrases geçiş hızı ortalama değerleri, en düşük her iki tipteki agregası da geri kazanılmış olarak kullanılan R12 serilerinin 7. gündeki ortalaması, en yüksek ise yalnızca iri agregası geri kazanılmış R2 serilerinin 90. gündeki ortalamasıdır.

3.3.6. Basınç dayanımı (Compressive strength)

Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, tüm serilerde ve tüm yaşlarda betonun basınç dayanımı en yüksek 59,27 MPa değeri ile R2C30-90, en düşük 27,82 MPa değeri ile NC30-7 serisindedir. Zamanla tüm serilerin basınç dayanımı artmıştır. Yüksek fırın cürufunun kullanımı ve oranlarının artırılması 7. günde basınç dayanımını azaltmış ancak 28. ve 90. günlerde dayanıma olumlu katkı yaparak, basınç dayanımlarını arttırmıştır. Yüksek fırın cürufu katkısız geri kazanılmış agregalı beton serilerinde, basınç dayanımı N serisine göre 7. günde R1 ve R12 serileri sırasıyla %3 ve %2 azalmış R2 serisi ise %3 artmıştır. 28. günde R1, R2 ve R12 serilerinin basınç dayanımı N-7 serisine göre sırasıyla %16, %15 ve %20 artmıştır. 90. günde R1, R2 ve R12 serilerinin

basınç dayanımı N-7 serisine göre sırasıyla %21, %29 ve %28 artmıştır. Geri kazanılmış agregalı betonda yüksek fırın cürufu oranı arttıkça 7. günde basınç dayanımı belirgin bir farkla azalmış ancak 28. ve 90. günlerde katkıli betonlar arasındaki fark kapanmaya başlamıştır. Katkı oranından bağımsız olarak serilerin sonuçları incelendiğinde, tüm günlerde, doğal agregalı N serilerinin basınç dayanımı ortalamasının en düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlarına göre, tüm serilerde ve tüm günlerde basınç dayanımı ortalama değerleri, en düşük doğal agregalı N serilerinin 7. günde ortalama değeri, en yüksek ise yalnızca iri agregası geri kazanılmış R2 serilerinin 90. günde ortalama değeridir.

3.3.7. Yarmada çekme dayanımı (Splitting tensile strength)

Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, tüm yaşlarda ve tüm günlerde yarmada çekme dayanımı en yüksek 4,15 MPa değeri ile R12C30-90, en düşük 2,74 MPa değeri ile NC30-7 serisindeydi. Zamanla tüm serilerin yarmada çekme dayanımı artmıştır. Geri kazanılmış agregalı serilerde yarmada çekme dayanımı doğal agregalı seriye göre artış göstermiştir. Yüksek fırın cürufu katkısız geri kazanılmış agregalı beton serilerinin yarmada çekme dayanımı, N serisine göre 7. günde R1 serisinde %5 azalırken, R2 ve R12 serilerinde sırasıyla %23 ve %15 artmış, 28. günde R1, R2 ve R12 serilerinin yarmada çekme dayanımı N-7 serisine göre sırasıyla %29, %25 ve %16 artmıştır. 90. günde R1, R2 ve R12 serilerinin yarmada çekme dayanımı N-7 serisine göre sırasıyla %30, %28 ve %20 artmıştır. Geri kazanılmış agregalı betonda yüksek fırın cürufu katkı oranının artışı 7. günlerde yarmada çekme dayanımına olumsuz etki yapmasına rağmen 28. ve 90. günlerde bu olumsuz etki ortadan kalkmıştır. Katkı oranından bağımsız olarak serilerin sonuçları incelendiğinde, tüm yaşlarda, doğal agregalı N serilerinin yarmada çekme dayanımı ortalamasının en düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlarına göre, tüm

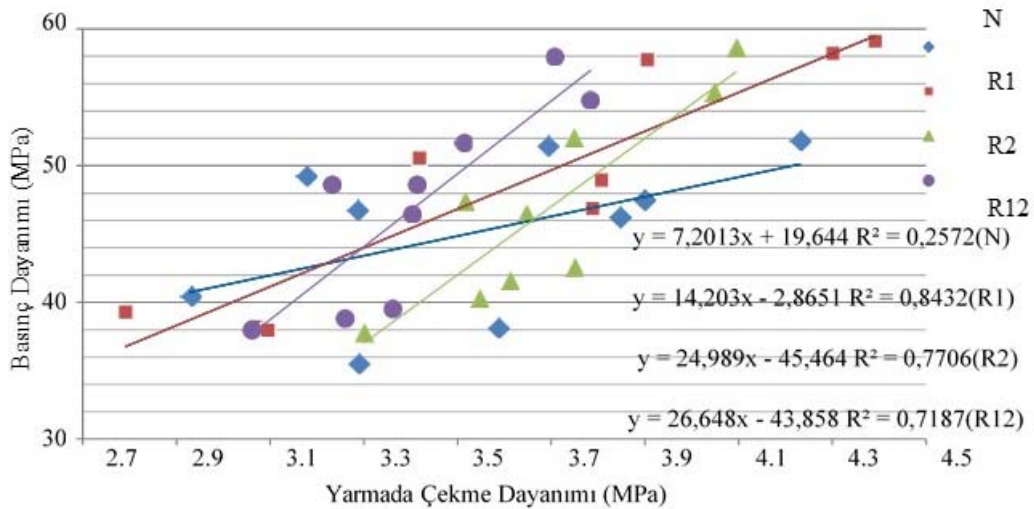
serilerde ve tüm günlerde basınç dayanımı ortalama değerleri, en düşük doğal agregalı N serilerinin 7. günde ortalama değeri, en yüksek ise yalnızca iri agregası geri kazanılmış R1 serilerinin 90. günde ortalama değeridir.

3.3.8. Basınç Dayanımı-Yarmada çekme dayanımı ilişkisi (Relation Between compressive strength-splitting tensile strength)

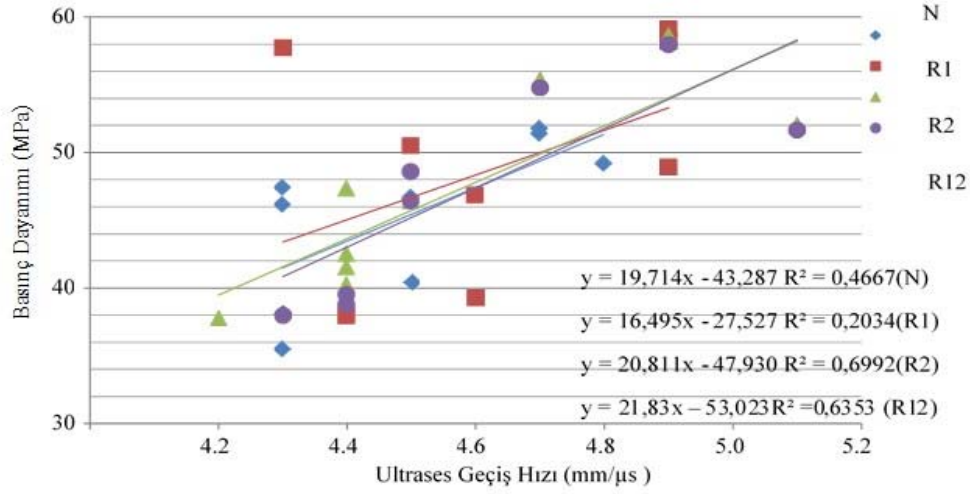
Doğal ve geri kazanılmış agregalı beton serilerinde elde edilen basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sonuçları kullanılarak bu iki özellik arasında kurulan ilişki Şekil 1'de verilmiştir. N doğal agregalı serilerin, R1 geri kazanılmış iri agregalı serilerin, R2 geri kazanılmış iri agregalı serilerin basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisini göstermektedir. N serisinde düşük olan korelasyon ($R^2 = 0,2572$) katsayısının R1, R2 ve R12 serileri için sırasıyla $R^2 = 0,8432$, $R^2 = 0,7706$ ve $R^2 = 0,7187$ olarak belirlenerek arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sonuçları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

3.3.9. Basınç Dayanımı-Ultrases geçiş hızı ilişkisi (Relation Between Compressive strength-ultrasonic pulse velocity)

Doğal ve geri kazanılmış agregalı beton serilerinde elde edilen basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları kullanılarak bu iki özellik arasında kurulan ilişki Şekil 2'de verilmiştir. N doğal agregalı serilerin, R1 geri kazanılmış iri agregalı serilerin, R2 geri kazanılmış iri agregalı serilerin basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisini göstermektedir. R1 serisinde düşük olan korelasyon ($R^2 = 0,2034$) katsayısının N, R2 ve R12 serileri için sırasıyla $R^2 = 0,4667$, $R^2 = 0,6992$ ve $R^2 = 0,6353$ olarak belirlenerek arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. Basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisi (Relation between compressive strength and splitting tensile strength)



Şekil 2. Basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi (Relation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

K. K. : Kimyasal Katkı Maddesi
M. K. : Mineral Katkı Maddesi

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı oranlarda geri kazanılmış ince ve iri agreganın beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katkısız ve katkılı beton serilerinde 7., 28. ve 90. günlerde yapılan, fiziksel ve mekanik deney sonuçlarına göre;

- Geri kazanılmış iri ve ince agreganın su emme oranı, aynı granüloometriye sahip doğal agregalara göre çok daha yüksektir.
- Geri kazanılmış agregalı ve yüksek fırın cürufu katkılı beton serilerinin hava içeriği, doğal agregalı beton serisine göre daha düşüktür. Ancak işlenebilirlik (çökme değerleri) geri kazanılmış agregalı beton serilerinde küçük farklarla da olsa daha yüksektir.
- Geri kazanılmış agreganın doğal agregaya, yüksek fırın cürufunun çimentoya göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasından dolayı ikame oranı arttıkça taze ve sertleşmiş betonun yoğunluğu azalmıştır.
- Geri kazanılmış agrega kullanımı, tüm günlerde betonun hacimce su emme oranını arttırmıştır. Yüksek fırın cürufu kullanımının betonun hacimce su emmesine olumlu bir katkısı görülmemiştir.
- Geri kazanılmış agrega kullanımı, tüm günlerde betonun kılcal su emme katsayısını arttırmıştır. Ancak beton üretiminde yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça, kılcal su emme katsayısı, erken yaşlarda (7. günde) arttıysa da, 28. günle birlikte bu artış durmuş ve yüksek fırın cürufu kullanım oranının artmasıyla kılcal su emme katsayısı azalmıştır.
- Geri kazanılmış agregalı betonda yüksek fırın cürufu kullanımı ve kullanım oranının artışı erken yaşlarda (7. ve 28. gün) doğal agregalı N serileri dışında tüm serilerin

ultrases geçiş hızını azaltmış, 90. günle birlikte yüksek fırın cürufu kullanımı ultrases geçiş hızını arttırıcı etki göstermiştir.

- Geri kazanılmış agregalı betonda yüksek fırın cürufu kullanımı ve kullanım oranının artışı erken yaşlarda (7. gün) basınç dayanımını azaltmış, 28. günle birlikte yüksek fırın cürufu kullanım oranının artışı doğal agregalı N, NC15 ve NC30 serileri dışındaki tüm seriler için basınç dayanımını arttırmıştır.
- Geri kazanılmış agregalı betonda yüksek fırın cürufu kullanımı ve kullanım oranının artışı erken yaşlarda (7. ve 28. gün) yarmada çekme dayanımını, doğal agregalı N serileri ve yalnızca ince agregası geri kazanılmış olarak kullanılan R1 serileri dışındaki tüm serilerde azalttıysa da 90. günle birlikte yüksek fırın cürufu kullanım oranının artışı yarmada çekme dayanımını tüm seriler için arttırmıştır.
- Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasında lineer bir ilişki olduğu bilinmekle birlikte geri kazanılmış agrega kullanılan betonlarda, geri kazanılmış agreganın yapısından dolayı bu korelasyonların yakalanması literatürde daha önce karşılaşılmayan bir durum olmuştur ancak deneysel çalışmamızda geri kazanılmış agregalı katkısız serilerde de bu korelasyonlar elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Makale, İnş.Yük. Müh.Selin Sayaca Topgül'ün Yüksek Lisans Tezinden üretilmiş olup, yazarlar, deneysel çalışma kapsamında inşaat molozlarını temin eden İSTAÇ'a, çimento temin eden AKÇANSA'ya teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rao M.C., Bhattacharyya S.K., Barai S.V., Systematic approach of characterisation and behaviour of recycled aggregate concrete, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering Book Series, Springer Publishing, 1-38, 2019.

2. Çakır Ö, Dilbas H., Silica fume effect on fracture parameters and cracking patternmaps of recycled aggregate concrete, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 134-154, 2019.
3. Dilbas H., Çakır Ö., Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials (JCBM)* 254, 119216, 2020.
4. Marinkovic S., Radonjanin V., Malesev M., Ignjatovic I., Malešev M., Ignjatovic I., Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Management (J Waste Manag)* 30, 2255–2264, 2010.
5. Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research (CCR)* 37, 735–742, 2007.
6. Sobhan K., Krizek R.J., Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course, *Journal of Materials in Civil Engineering (MTENG)* 11, 1999.
7. Xie J., Fang C., Lu Z., Li Z., Li L., Effects of the addition of silica fume and rubber particles on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete with steel fibres, *Journal of Cleaner Production (J CLEAN PROD)* 197, 656–667, 2018.
8. Dilbas H, Çakır Ö, Yıldırım H., An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method. *Construction and Building Materials (JCBM)* 252, 119118, 2020.
9. Majhi R.K. Nayak A.N., Mukharjee B.B., Characterization of lime activated recycled aggregate concrete with high-volume ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials (JCBM)* 259, 119882, 2020.
10. Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., Influence of recycled aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials (JCBM)* 23-2, 1163-1167, 2009.
11. Xiao J., Li W., Fon Y., Huang X., An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011) *Construction and Building Materials (JCBM)* 31-2, 364-383, 2012.
12. Brito J., Pereira A.S., Carreia J.R., Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites (CCC)* 27, 429-433, 2005.
13. Majhi R.K. Nayak A.N., Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials (JCBM)* 212, 578-595, 2019.
14. Majhi R.K., Nayak A.N., Mukharjee B.B., Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials (JCBM)* 159, 417-430, 2018.
15. Kou S.C., Poon C.S., Agrela F., Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites (CCC)* 33-8, 788-795, 2011.
16. Vivian W.Y.T., Butera A., Khoa N.L., Wengui L., Utilising CO₂ technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. *Construction and Building Materials (JCBM)* 250, 118903, 2020.

