

**GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI
BETONLARIN CDF YÖNTEMİ İLE
DONMA-ÇÖZÜLME (YÜZEYSEL KABUK ATMA)
DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ**

Yeşim TOSUN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı
Doç. Dr. Remzi ŞAHİN
2014
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI BETONLARIN CDF YÖNTEMİ
İLE DONMA-ÇÖZÜLME (YÜZEYSEL KABUK ATMA)
DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ**

Yeşim TOSUN

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI BETONLARIN CDF YÖNTEMİ İLE DONMA-
ÇÖZÜLME (YÜZEYSEL KABUK ATMA) DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ

Doç. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında, Yeşim TOSUN tarafından hazırlanan bu çalışma 27/11/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU

İmza

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 25.11.2014. tarih ve 51.11.2014. nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI BETONLARIN CDF YÖNTEMİ İLE DONMA-ÇÖZÜLME (YÜZEYSEL KABUK ATMA) DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ

Yeşim TOSUN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

Bu çalışmada inşaat sektörünün ürettiği yapısal atıklardan elde edilen geri kazanılmış agrega (GKA) içeren betonların donma-çözülme dirençleri (yüzeysel kabuk atma) araştırılmıştır. Çalışmada %15, %30, %45 ve %60 oranlarında GKA normal agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üç farklı maksimum agrega tane boyutunun (16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm) seçildiği çalışmada üç farklı (%0,06, %0,13 ve %0,20) oranda hava sürükleyici katkı maddesi (HSKM) kullanılmıştır. Çalışmada mineral katkı olarak uçucu kül, kimyasal katkı olarak ise sentetik karboksilat polimer esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Taze beton deneylerine (çökme, hava içeriği miktarı tayini ve birim ağırlık) ilaveten sertleşmiş beton deneyi olarak hacimce su emme, kılcal su emme, basınç dayanımı ve CDF yöntemiyle donma-çözülme direnci (TS CEN/TS 12390-9'a göre) deneyleri yapılmıştır. Sonuçların değerlendirmesinde kullanılan GKA miktarının artmasıyla basınç dayanımının, kontrol numunelerine kıyasla, ortalama %20 oranında azaldığı görülmüştür. Ancak, %3'lük NaCl çözeltisinde ve (-20°C)-(+20°C) sıcaklık aralığında donma-çözülme çevrimine maruz kalan GKA içeren numunelerin 28 çevrim sonunda donma-çözülme dirençleri GKA katılmamış olanlara göre artmıştır. Bu artış %15, %30, %45 ve %60 oranında GKA katılan numunelerde, sırasıyla, %77, %82, %85 ve %86 oranlarında olmuştur. GKA içeren betonların donma-çözülme dirençlerindeki bu artışa onların sahip oldukları yüksek porozitenin neden olduğu düşünülmektedir. GKA içeren betonlarda HSKM oranının artması ise yüzeysel kabuk atma miktarını azaltmış yani donma çözülme direncini artırmıştır. Bu artış %0,13 ve %0,20 oranlarında HSKM içeren betonlarda, %0,06 oranında HSKM içeren betonlara göre, sırasıyla, %62 ve %70 oranlarında olmuştur. Agrega maksimum tane çapının 16 mm'den 22,4 mm ve 31,5 mm'e çıkarılması ise betonların donma-çözülme dirençlerini, sırasıyla, %84 ve %66 oranlarında artırmıştır.

2014, 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geri kazanılmış agrega, donma-çözülme direnci(CDF), hava sürükleyici katkı, maksimum agrega çapı

ABSTRACT

Master Thesis

DETERMINATION OF FREEZE-THAW (SURFACE SCALING) RESISTANCE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE BY CDF METHOD

Yeşim TOSUN

Ataturk University,
Institute of Science and Technology
Department of Civil Engineering
Construction Department

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

In this study, freeze-thaw resistance of concrete (surface scaling) containing recycled aggregate (RCA) which is obtained from structural waste generated by the construction industry has been investigated. RCA in the ratio of %15, %30, %45 and %60 have been used interchangeably with the naturel aggregate. In the study, three different maximum aggregate size (16 mm, 22,4 mm and 31,5 mm) have been selected and air-entraining admixture (AEA) in three different ratio (0,06%, 0,13% and 0,20%) has been used. In this study, fly ash as a mineral admixture and also synthetic carboxylate polymer-based super plasticizer as the chemical admixtures have been used. In addition to fresh concrete experiments (slump, determination of the weather content and unit weight), experiments of water absorption by volume, capillary water absorption, compressive strength and freeze-thaw resistance with CDF method (according to TS CEN / TS 12390-9) as hardened concrete experiment have been performed. In evaluation of results, it has been found that compressive strength decreased by about 20% with the increase of RCA amount in the concrete compared to the control sample. However, freeze-thaw resistance of samples containing RCA subjected to freeze-thaw cycles in 3%NaCl solution and in the temperature range of (-20)-(+20°C) has increased at the end of 28 cycles. This increase in the samples including 15%, 30%, 45% and 60% RCA has been in the ratio of 77%, 82%, 85% and 86% respectively. It has been that high porosity of RCA could cause to increase in their freeze-thaw resistance of concrete with RCA. On the other hand, increase in the amount of AEA in the concrete containing RCA has decreased of amount of surface scaling, that is it has increased the freeze thaw resistance of concrete. This increase was 0,13% and 0,20% AEA containing in the concretes according to 0,06% AEA containing in the concrete being respectively 62% and 70%. The removal of the aggregate maximum particle size from 16 mm to 22,4 mm and 31,5 mm has paved the way for increase respectively in the ratio of 84% and 66% in freeze-thaw resistance of concrete.

2014, 113 pages

Keywords: recycled concrete aggregates, freeze-thaw resistance (CDF), air entraining admixture, maximum aggregate size

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen ve çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Remzi ŞAHİN'e

Deneysel çalışmalar esnasında yardımları ve önerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan değerli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT ile Sayın Arş. Gör. Mahmut KILIÇ ve Sayın Öğr. Gör. Ali ÖZ'e,

Laboratuvar çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen Teknisyen İlhami AYHAN ve kuzenim Oğuz BEKÇİ'ye,

Geri kazanılmış agrega teminindeki yardımlarından dolayı İSTAÇ A.Ş, normal agrega teminindeki yardımlarından dolayı KORKMAZ BETON A.Ş. ve kimyasal katkıların temininde gösterdikleri yardımdan dolayı GRACE Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş.'ye,

Öğrenim hayatım boyunca gösterdikleri sabır ve destek için annem Medine TOSUN'a ve arkadaşlarıma,

Ayrıca tez çalışmam süresince sabrını, sevgisini ve desteğini esirgemeyen İsmail Hakkı TARHAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Yeşim TOSUN

Aralık, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Beton Endüstrisinde Geri Dönüşüm.....	5
1.1.1. İnşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesinin çevresel etkileri	8
1.1.2. İnşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesinin ekonomiye katkısı	10
1.2. Amaç ve Kapsam.....	11
2. KURAMSAL TEMELLER.....	14
2.1. Geri Kazanılmış Agregalar.....	14
2.1.1. Geri kazanılmış agregaların tarihçesi	16
2.1.2. Geri kazanılmış agregaların dünyada kullanımı.....	18
2.1.3. Geri kazanılmış agregaların kullanım alanları	20
2.1.4. Geri kazanılmış agrega kullanımını engelleyen faktörler	20
2.1.5. Geri kazanılmış agregaların normal agregadan farkları	21
2.1.6. Geri kazanılmış agregalı betonun mekanik ve durabilite özellikleri.....	23
2.2. Geri Kazanılmış Agregalı Betonlarla İlgili Literatür Çalışmaları.....	26
2.3. Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Donma-Çözülme Dirençleri ile İlgili Literatür Çalışmaları	36
3. MATERYAL ve METOD.....	41
3.1. Kullanılan Malzemeler	41
3.1.1. Çimento	41
3.1.2. Su.....	42
3.1.3. Agrega	42
3.1.3.a. Geri kazanılmış agrega içerisindeki çeşitli maddeler	45
3.1.4. Katkı malzemeleri	45

3.1.4.a. Uçucu kül.....	46
3.1.4.b. Süper akışkanlaştırıcı	47
3.1.4.c. Hava sürükleyici katkı maddesi.....	47
3.2. Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama	48
3.3. Deneysel Çalışma	50
3.3.1. Agrega deneyleri	50
3.3.1.a. Yoğunluk, su emme, yüzey nemi deneyi.....	51
3.3.1.b. Los Angeles deney metodu ile aşınma direncinin tayini.....	52
3.3.1.c. Agregaların donma çözülme dirençleri	54
3.3.2. Beton karışım hesapları ve numune üretimi.....	56
3.3.3. Taze beton deneyleri	61
3.3.3.a. Birim ağırlık deneyi.....	61
3.3.3.b. Çökme (slump) deneyi	61
3.3.3.c. Hava içeriği tayini deneyi.....	62
3.3.4. Numunelerin kürü.....	63
3.3.5. Sertleşmiş beton deneyleri.....	64
3.3.5.a. Yoğunluk tayini	64
3.3.5.b. Hacimce su emme deneyi.....	65
3.3.5.c. Kılcal su emme katsayısı belirlenmesi deneyi.....	66
3.3.5.d. Basınç dayanımı deneyi.....	67
3.3.5.e. Donma-çözülme deneyi	68
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME	77
4.1. Taze Beton Özellikleri.....	77
4.1.1. Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	78
4.1.2. Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	80
4.1.3. Hava içeriği deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi.....	81
4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	83
4.2.1. Yoğunluk tayini deney sonuçlarının incelenmesi	84
4.2.2. Hacimsel su emme oranı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	86
4.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	88
4.2.4. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	90
4.2.5. Donma-çözülme deneyleri sonuçları.....	92

4.2.5.a. Maksimum agrega çapının GKA içeren betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etikleri.....	93
4.2.5.b. Hava sürükleyici katkı maddesi oranının GKA içeren betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etikleri.....	97
4.2.5.c. Geri kazanılmış agrega (GKA) oranının betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etikleri.....	102
4.2.5.d Tüm parametrelerin betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etikleri	104
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	108
ZGEMİř	114

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

ACI	American Concrete Institute
AEA	Hava Sürükleyici Katkı
ASTM	American Society For Testing and Materials
D	Birim Ağırlık
DKY	Doygun Kuru Yüzey
F	Donma-Çözülme Deney Sonucu Kütle Kaybı (Yüzde)
f_c	Basınç Dayanımı
FRP	Fiber Reinforced Plastics
GKA	Geri Kazanılmış Agregası
HS	Hacimce Su Emme Oranı
HTYAKY	Hafriyat Toprağı ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği
İSTAÇ	İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme Aş.
K	Kılcal Su Emme Katsayısı
LA	Los Angeles Katsayısı
N	Yüzey Nemi
NA	Normal Agregası
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
RCA	Recycled Concrete Aggregate
RİLEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux,
Sn	Donma-Çözülme Sonucu Kabuk Atma Yoluyla Uzaklaşan Malzemenin Yığılımlı Kütlelerinin Numunenin Alanına Oranı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül
W_{A24}	Su Emme Oranı
ρ_{ssd}	Doygun ve Yüzeyi Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Atık yönetimi piramidi	3
Şekil 1.2. Henüz yapım aşamasındaki bir binanın yol açtığı katı atıklara bir örnek	6
Şekil 1.3. İnşaat yıkıntı atığı içeriği	7
Şekil 1.4. Yapısal atık materyallerinin dönüşüm şeması	9
Şekil 1.5. İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesinin yararları	11
Şekil 2.1. Geri kazanılmış agrega üretim süreci	16
Şekil 2.2. Hong Kong’da geri dönüşüm fabrikası.....	19
Şekil 2.3. Geri kazanılmış agregalı beton görüntüsü	21
Şekil 2.4. Geri kazanılmış agrega içeren betonun içeriği	22
Şekil 3.1. Deneylede kullanılan agregaların resimleri.....	44
Şekil 3.2. GKA içerisindeki çeşitli maddeler ve GKA’ların genel görüntüleri.....	45
Şekil 3.3. Uçucu külün görünüşü ve SEM görüntüsü.....	46
Şekil 3.4. Aşınma (Los Angeles) deneyi öncesi agregalar	53
Şekil 3.5. Los Angeles deneyi sonrası agregalar	53
Şekil 3.6. Taze betonda çökme deneyi.....	62
Şekil 3.7. Hava içeriği tayini cihazı ve deney anına ait bir görüntü (sağda)	63
Şekil 3.8. Kür havuzu ve iklim kontrollü kabin (sağda).....	64
Şekil 3.9. Numunelerin etüvde kurutulması (a), suda (b) ve havada(c) tartılması	66
Şekil 3.10. Kılcal su emme deneyi	67
Şekil 3.11. Basınç dayanımı deneyinin yapılması	68
Şekil 3.12. Dondurucu Ortam	69
Şekil 3.13. Dondurucu ortam ve numune merkezindeki sıcaklık değişimi (dondurma-çözdürme rejimi)	69
Şekil 3.14. CDF Yöntemine göre oluşturulan donma-çözülme deney düzeneği.....	70
Şekil 3.15. CDF yöntemi için geliştirilmiş olan deney düzeneği	72
Şekil 3.16. Numunelerin dondurulma (a) ve çözdürülme (b) işlemleri	72
Şekil 3.17. Donma çözülme çevrimlerinden sonra numunelerden kopan parçalar.....	74
Şekil 3.18. Kopan parçaların etüvde kurutulması ve hassas terazide tartılması	74

Şekil 3.19. En çok kabuk atan karışım (16D0G6A) (a) ile en az kabuk atan karışımın (22D30G20A) (b) kabuk atmalarının karşılaştırılması	75
Şekil 4.1. Taze betonların çökme değerlerin deney parametrelerine göre değişimi.....	78
Şekil 4.2. Ortalama çökme değerlerinin her bir parametereye göre değişimi	79
Şekil 4.3. Betonların birim ağırlıklarının parametrelere göre değişimi	80
Şekil 4.4. Ortalama birim ağırlık değerlerinin parametrelere göre değişimi	81
Şekil 4.5. Betonların hava içeriklerinin parametrelere göre değişimi	82
Şekil 4.6. Ortalama hava içeriği değerlerinin parametrelere göre değişimi	82
Şekil 4.7. Betonların yoğunluklarının deney parametrelerine göre değişimi	85
Şekil 4.8. Ortalama yoğunluk değerlerinin parametrelere göre değişimi	86
Şekil 4.9. Hacimsel su emme oranının deney parametrelerine göre değişimi.....	87
Şekil 4.10. Seçilen parametrelerin ortalama su emme değerleri üzerindeki etkisi	87
Şekil 4.11. Kılcal su emme katsayısının karışımların parametrelere göre değişimi.....	89
Şekil 4.12. Seçilen parametrelerin ortalama kılcal su emme katsayısı üzerindeki etkisi	89
Şekil 4.13. Basınç dayanımı üzerinde seçilen parametrelerin etkisi.....	90
Şekil 4.14. Parametrelerin ortalama basınç dayanımı üzerindeki etkileri	91
Şekil 4.15. Maksimum agrega çapı ve GKA içeriklerine göre betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi.....	95
Şekil 4.16. Maksimum agrega tane çapının karışımların yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkisi	97
Şekil 4.17. Hava sürükleyici katkı miktarı ve GKA içeriklerine göre betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi.....	99
Şekil 4.18. Hava sürükleyici katkı oranının karışımların yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkisi	101
Şekil 4.19. GKA oranının betonun yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkisinin donma-çözülme çevrimine göre değişimi	103
Şekil 4.20. Seçilen parametrelere göre ortalama yüzeysel kabuk atma grafiği	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. RILEM TC121-DRG Raporu'na göre geri kazanılmış agrega şartnamesi	15
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri	41
Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	42
Çizelge 3.3. Kullanılan agrega sınıfları	43
Çizelge 3.4. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.5. Süperakışkanlaştırıcı içeriği ve özellikleri.....	47
Çizelge 3.6. Hava sürükleyici katkı maddesi içeriği ve özellikleri.....	48
Çizelge 3.7. Karışımları oluşturan parametreler ve seviyeleri.....	49
Çizelge 3.8. Agregaların yüzey nemi, tane yoğunluğu ve su emme oranları	52
Çizelge 3.9. Aşınma deneyi sonuçları.....	54
Çizelge 3.10. Agregaların donma-çözülme deneyi sonuçları	55
Çizelge 3.11. 16D0G6A kodlu betonun karışım hesapları	56
Çizelge 3.12. 31D60G20A kodlu betonun karışım hesabı	57
Çizelge 3.13. Karışım Hesapları	59
Çizelge 4.1. Taze betonda hava içeriği, birim ağırlık ve çökme deneyi sonuçları	77
Çizelge 4.2. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları	84
Çizelge 4.3. Betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi.....	92

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunda ve kentleşme potansiyelindeki hızlı artış, birçok alanda gerçekleşen teknolojik gelişmeler, endüstriyel alanlardaki yenilikler, insan gereksinimlerinin hızla değişmesi gibi birçok nedenden dolayı inşaat sektörüne olan ilgi her geçen gün çığ gibi artmaktadır. Bu ilginin karşılanabilmesi doğal hammadde kaynaklarının tüketilmesi ve ortaya çıkan atıkların yol açtığı bir takım ekolojik sorunları beraberinde getirmiştir. Yaşam alanları daralmakta ve ekonomik sıkıntılar baş göstermektedir. Bu sorunların çözümü için ekolojik ve ekonomik bir çözüm yöntemi olarak geri dönüşüm gelmektedir.

Geri dönüşüm terim olarak, kullanım dışı kalan geri dönüştürülebilir atık malzemelerin çeşitli geri dönüşüm yöntemleri ile hammadde olarak tekrar imalat süreçlerine kazandırılmasıdır (Anonim 2014a).

Sürdürülebilir kalkınmanın gereği olan geri dönüşüm; tükenmekte olan doğal kaynakları en verimli şekillerde kullanarak gelecek kuşaklara aktarılmasını sağlayan en önemli atık yönetim biçimidir (Tüfekçi 2011).

Dünya doğal kaynaklarının tükenmesine ilişkin endişeler, 1992'de Rio de Janeiro (Brezilya)'da yapılan BM Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda o güne kadarki en geniş katılımlı devlet başkanları toplantısının yapılmasına yol açtı. Bu ve bunu izleyen diğer zirvelerin ardından, sürdürülebilir kalkınma ilkesi, AB'nin Amsterdam Anlaşması¹'na da dâhil edildi. Sürdürülebilir gelişme ve sürdürülebilirlik kavramları, yüzyılımızın en çok önem verilen kavramları haline gelmiştir. İnsanlık tarihinde toplumların gelişmesiyle doğrudan ilişkili ve bilinen en eski mühendislik alanı olan inşaat mühendisliğinde de bu iki kavramın bütüncül yaklaşımları ve kullanımları büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda Avrupa Komisyonu, malzeme üreticilerinin, inşaat sektöründe

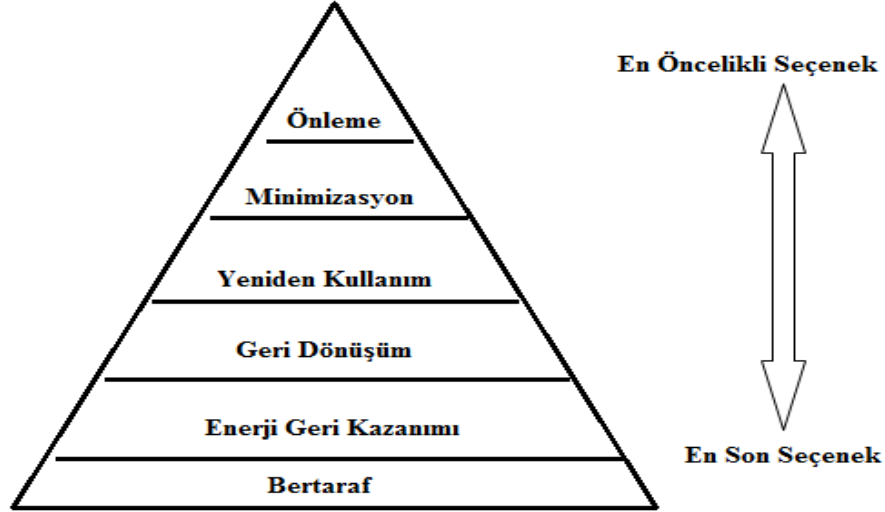
¹ Amsterdam Anlaşması: 2 Ekim 1997 tarihinde Avrupa Birliği üyesi ülkelere imzalanmış ve 1 Mayıs 1999 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Anlaşma Avrupa Parlamentosu'nun yetkilerini arttırmış; demokrasi, birey hak ve özgürlükleri, Avrupa Birliği vatandaşlığı gibi konular üzerine yeni vurgular yapmıştır. Bu anlaşmayla çevreye yönelik daha fazla koruma ve AB çapında sürdürülebilir gelişimin teşviki için yasal dayanak güçlendirilmiştir (Anonymous 2003-2011).

sürdürülebilirliğin sağlanmasına yapacakları önemli katkıları olduğunu belirlemiştir. İnşaat sektörü, imalat süreçlerindeki girdileri asgari düzeye indirmeye, hammadde ve enerji tüketimini, emisyonları ve mekân kullanımını mümkün olduğu kadar azaltmaya çalışmaktadır (Akbulut ve Gürer 2006). İnşaat sektörü doğal kaynakları hızla tüketen ve milyarlarca ton atık ortaya çıkarabilen bir sektördür ve sürdürülebilir gelişimi olumsuz etkileyebilmektedir (Silva *et al.* 2014).

Diğer taraftan, estetik görünüm kadar ekolojik zenginliğin de korunması ve geliştirilmesi yönünde gerekli çabanın harcanması, gelecek kuşaklara yeterli kaynak bırakılmasına ve çevre üzerindeki zararlı etkilerin en az düzeye indirilmesine yardımcı olacaktır. İyi bir çevre yaratmanın gereği olan katı atık yönetimi, dünyanın sahip olduğu enerji, hammadde gibi doğal kaynakların kıtlığı ve kullanılmasında maksimum verimin sağlanması zorunluluğu ile teknik, ekonomik ve sosyal disiplinlerle çok yönlü ilişkiler içerisinde olan önemli bir faaliyet dalı olarak açıklanabilir (Erdal 2011).

Atık yönetimi; atığın kaynağında azaltılması, özelliğine göre ayrılması, toplanması, geçici depolanması, ara depolanması, geri kazanılması, taşınması, bertarafı ve bertaraf işlemleri sonrası kontrolü ve benzeri işlemleri içeren bir yönetim biçimidir (Bayram vd 2012). Atık yönetimiyle, yapısal atıkların kurtulunması gereken bir kirlilik değil de yararlanılması/değerlendirilmesi gereken bir kaynak olarak görülmesi, ekonomik ve çevresel yarar sağlayan bir yaklaşım olacaktır. Atık yönetimi, atıkların geri kazanılmasını, atık miktarını artıran üretim ve tüketim türlerinin sınırlandırılmasını ve istihdam yaratılmasını da kapsayan ve giderek önemi artan bir konu haline gelmiştir. Günümüzde dünyada inşaat ve yıkıntı atığı yönetmeliği adı altında birçok çalışma yapılmaktadır. Şekil 1.1’de T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı’nca önerilen “Atık Yönetimi Piramidi” görülmektedir. Atık Yönetim Piramidi üst basamaktan alt basamaklara doğru değerlendirilir. Yani ilk aşama atığın oluşmasının önlenmesi, eğer bu sağlanamıyorsa atığın minimizasyonu, diğer bir deyişle atığın en aza indirilmesi amaçlanır. Daha sonra atığın yeniden kullanımı eğer bu da mümkün olmuyorsa önce geri dönüşüm ve sonra enerji geri kazanımı amaçlanır. Bu uygulanan yöntemlerden

sonra elimizde kalan atığa ya da bu yöntemleri uygulayamadığımız atığa yapılacak en son işlem bertaraftır (düzenli depolama veya yakma gibi).



Şekil 1.1. Atık yönetimi piramidi (Anonim 2014b)

Ülkemizde 31 Mayıs 2012 tarihli Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Düşürülmesi Hakkında Kanun” ile öncelikle birinci derece deprem kuşağında bulunan iller olmak üzere, ekonomik ömrünü tamamlamış, afet riski taşıyan binaların yıkılarak yerine güvenli, sağlıklı ve yaşanabilir yapılar yapılmasını sağlayacak dönüşüm çalışmaları başlatılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda ilk etapta Ekim 2012’de 35 ilde ve 65 farklı noktada 3169 binanın yıkımına başlanılmıştır. Kanun ile kentsel dönüşümde belediyelerin de önü açılmış olup proje kapsamında 20 yıllık bir süre içerisinde 6,5 milyon konutun dönüştürülmesinin hedeflendiği T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından kamuoyuna deklare edilmiştir.

Türkiye’de yılda 125 milyon ton hafriyat bertaraf edilmektedir. Ancak, kentsel dönüşüm çalışmalarıyla birlikte bu miktarda büyük bir artış olacaktır. Kılıç (2012)’de 6306 sayılı kanun ile birlikte ilk 3 yıl boyunca yıllık 10 milyon ton toplam inşaat atığının çıkacağı geri kazanılacak malzeme miktarının da yıllık 6 milyon ton olacağının hesaplandığı belirtilmiştir.

Atık Yönetimi konusunda, Türkiye'deki başlıca yasal mevzuat şöyle özetlenebilir (Bayram vd 2012);

i. Kanunlar:

- ✓ 2872 sayılı Çevre Kanunu,
- ✓ 5393 sayılı Belediye Kanunu,
- ✓ 5237 sayılı Türk Ceza Kanunu.

ii. Yönetmelikler:

- ✓ Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (14.03.1991),
- ✓ Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (18.03.2004),
- ✓ Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (05.07.2008),
- ✓ Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği (17.07.2008),
- ✓ Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik (29.04.2009).
- ✓ Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (26.03.2010).

iii. Tebliğler:

- ✓ Atıkların Ek Yakıt Olarak Kullanılmasında Uyulacak Genel Kurallar Hakkında Tebliğ,
- ✓ Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalatına Dair Dış Ticarete Standardizasyon Tebliği.

iv. Diğer Mevzuat:

- ✓ Uluslararası Anlaşmalar,
- ✓ Basel Sözleşmesi.

Özellikle son yıllarda, atıkların kontrolüne ilişkin yeni yönetmeliklerin yürürlüğe girdiği görülmektedir. 1991 tarihli “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği” ile Türkiye’de atık yönetiminin genel çerçevesi ortaya konulmuştur. Yönetmelik, atık üretiminin mümkün olduğunca azaltılmasını, geri kazanılabilir atıkların kaynağında ayrıştırılmasını ve değerli atıkların tekrar ekonomiye kazandırılmasını, geri kazanımı olmayan atıkların da çevreye duyarlı yöntemlerle bertarafını öngörmektedir.

1.1. Beton Endüstrisinde Geri Dönüşüm

Dünya üzerinde 2002 yılında 2,7 milyar m³ beton tüketilmiştir ve 2050 yılında yaklaşık 7,5 milyar m³ tüketilmesi beklenmektedir (Silva *et al.* 2014) İnşaat sektörü; ham maddesinin %50’sini doğadan sağlar, toplam enerjinin %40’ını tüketir ve toplam atıkların %50’sinin de oluşumuna neden olur (Oikonomou 2005). Çevre kirliliğine sebep olan atıkların büyük bir bölümüne yapısal inşaat atıkları sebep olmaktadır. Yapısal inşaat atıklarının yaklaşık %40’nı beton atıkları oluşturmaktadır. Bununla birlikte betonun yaklaşık %55-%80’ini ise agregalar oluşturmaktadır. Geniş bir alana sahip inşaat sektörünün en önemli hammaddesi olan doğal agregalar dünyada her yıl yaklaşık 8–12 milyar ton tüketilmektedir (Köken ve Köroğlu 2008). Bu durum alternatif agrega kaynaklarına olan ihtiyacı da ortaya çıkarmıştır.

Katı atıkların hacimsel ve ağırlık olarak %13-%29’unu; konut, ticari ve kamu binalarının, yolların, köprülerin yapımı ve yıkımı esnasında ortaya çıkan inşaat atıkları oluşturmaktadır. Bu oran deprem, fırtına, sel gibi doğal afetler sonucu %50’ye kadar çıkmaktadır. Bu katı atık miktarı Avrupa Topluluğu ülkelerinde yılda 180 milyon ton, Almanya’da 30 milyon ton ve ABD’de ise 136 milyon tondur (Erdal 2011). 2005 yılı verilerine göre katı atık miktarının Türkiye’de yıllık 38 milyon ton olduğu tespit edilmiştir. Buna göre toplam katı atık miktarının ortalama %25’ine tekabül eden inşaat yıkıntı atıklarının yaklaşık 10 milyon ton olduğu ortaya çıkmaktadır (Demir 2009). Yapılan çalışmalarda 1990–1995 yılları arasında Avrupa’da üretilen katı atık miktarında %10’luk bir artış meydana gelmiştir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD)’nün tahminlerine göre 2020 yılında, 1995’tekinden %45 daha fazla atık

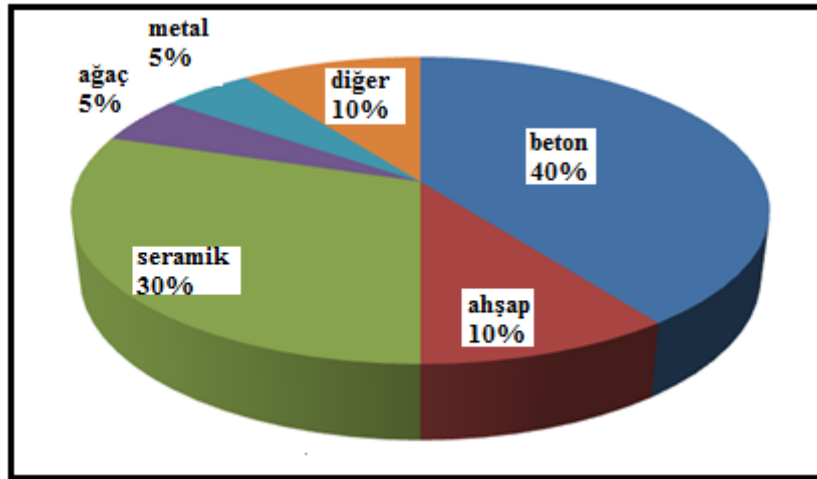
üretilecektir. (Kılıç 2012). İnşaat atıkları incelenecek olursa; oluşan bu atıkların %40'ını beton, %30'unu seramik, %10'unu ahşap, %5'ini metal, %5'ini plastik ve geri kalan %10'unu ise diğer malzemeler oluşturmaktadır (Köken vd 2008). Şekil 1.2'de Erzurum'da hukuki nedenlerle kısmen yıkılmış bir inşaatın çıkan atık malzemeler görülmektedir.



Şekil 1.2. Henüz yapım aşamasındaki bir binanın yol açtığı katı atıklara bir örnek (Erzurum)

Bir bina ya da yapının yıkılması ile elde edilen eski beton, kırılarak beton agregası ya da yollarda zemin altı malzemesi olarak yeniden kullanılabilir. Betonun ağır matrisi onu, aynen veya çok az güç ve performans kaybına uğrayarak kullanılabilen ideal bir geri dönüşümlü malzeme yapar. Ancak bu konuda henüz yeterli bir farkındalık oluşturulamamıştır. Geri kazanılmış agrega kullanımı oldukça sınırlıdır ve genelde taşıyıcı olmayan alanlarda kullanılmaktadır (Zhao *et al.* 20014). Kullanılmadan iade edilen betonun hemen ya da daha sonra beton karışımlarında kullanılmasını veya beton

ürünü, yol döşemesi ya da inşaat dolgu malzemesi olarak yeniden kullanılmasını sağlayan sistemler de vardır. Ülkemizde henüz uygulaması olmasa da Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 200 milyon ton² beton kaplamanın geri dönüşümü yapılmakta ve kanuni yaptırımla 44 eyalette geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılmaktadır (Gürer vd 2004). Bununla birlikte, inşaat atıklarının tamamının beton agregası olarak kullanılmayacağını belirtmek gerekir. Şekil 1.3'de de gösterildiği gibi yapısal atıklarda metal, doğal ya da yapay ahşaplar ve tuğla gibi seramik malzemeler başta olmak üzere çeşitli türden atıklar da bulunmaktadır.



Şekil 1.3. İnşaat yıkıntı atığı içeriği (Erdal 2011)

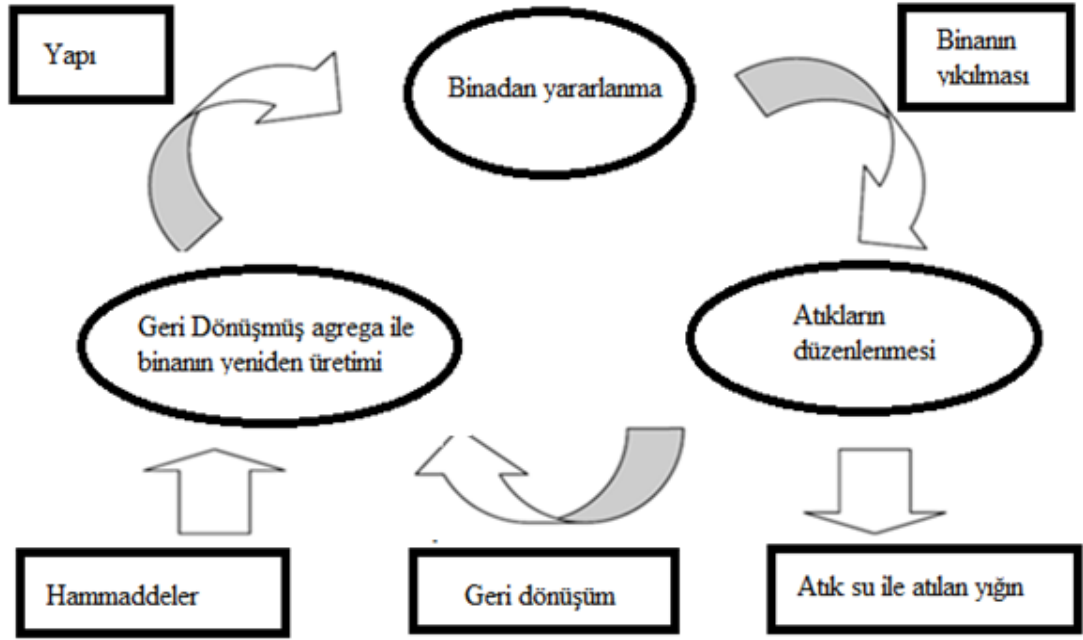
Çevremizdeki yapıyı yeni tamamlanmış binalar yakın gelecekte birer atık beton haline gelecektir. Normal şartların dışında, deprem gibi doğal afetler bu süreci daha da hızlandıracaktır. Bu açıdan bakıldığında, dünyadaki ve ülkemizdeki atık beton kaynağını ve bu kaynağın büyüklüğünü görmek mümkündür. Bunların dışında eski binaların fazla olduğu, yeni imar uygulamalarının hızla yapıldığı eski kent merkezlerinde, atık beton kırıklarının fazlaca bulunması dikkate alınır atık betonların, uygulama alanı bulabilecek bir malzeme olduğu görülebilir (Gürer vd 2004). Katı

² Amerika Birleşik Devletleri'ndeki yapısal atık miktarlarına dair literatürde farklı rakamlar verilmektedir. Nitekim bu paragrafta belirtildiği üzere Gürer vd (2004) yıllık 200 milyon ton rakamını verirken Köroğlu ve Köken (2008) ile Erdal (2011)'e göre bu rakam 136 milyon ton'dur. Demir (2009)'e göre ise ABD'de 2005 yılı için 130 milyon ton yapısal atık üretilmiştir.

atıkların önemli bir bölümünü oluşturan yapısal inşaat atıklarının geri dönüştürülmesi çevreye verilen zararları da azaltacaktır.

1.1.1. İnşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesinin çevresel etkileri

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de nüfus artışı ve şehirlere olan göç, özellikle büyük şehirlerimizde inşaat sektörünü hızlandırmıştır. Aynı zamanda eski yapıların yıkılması ve yerlerine yenilerinin yapılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Yıkılan bu eski yapıların atıklarının atılacak yerlere uzak olması ve çevre kirliliğine sebep olması aynı zamanda agrega kaynaklarının azalması, beton için gerekli olan agregayı sağlamak için yeni kaynaklar bulunması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır (Topçu 1997). Beton, doğal kaynaklar üzerinde yıkıcı ve kullanımından sonrada zararlı çevresel etkileri nedeniyle, yapı malzemesi olarak çevre dostu değildir. Sürdürülebilir gelişme kavramı dikkate alındığında geri dönüşüm malzemelerinin daha iyi kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır (Durmuş vd 2009). Her 1 metreküp inşaat yıkıntı atığından yaklaşık 0,60 metreküp malzeme geri dönüştürülmektedir. Kentsel yenilemeyle birlikte yıkım sektöründe de ciddi bir hareketlilik yaşanacaktır. Ancak, moloz döküm alanları yetersiz kalacaktır. Bu problemin en etkili çözüm yöntemlerinin başında yıkım alanlarının bulunduğu yerlere ya da döküm sahalarına geri dönüşüm tesislerinin kurulması gelmektedir. Bu yapıldığı zaman çok önemli bir ekonomik kazanç da elde edilecektir. Kurulacak tesisle molozdan kum ve mıcır elde edilebilecek ve bunları yol ve kanal yapımında kullanmak mümkün olabilecektir (Kılıç 2012). Şekil 1.4'de yapısal atık materyallerinin dönüşüm şeması verilmiştir.



Şekil 1.4. Yapısal atık materyallerinin dönüşüm şeması (Kılıç 2006)

Doğal agrega üretimi için çok geniş bir alandaki doğal çevrenin tahrip edilmesi gerekir. Ayrıca, bu agregaların üretildikleri tesislerin çevreye yaydığı toz emisyonu, gürültü ve görüntü kirliliği de dikkate alınması gereken etkilerdir. AB'nin Çevresel Eylem Programı'nda atık yönetimi, öncelikli dört konudan biri olarak ele alınmıştır. Düzenli depo alanlarına dökülecek atık miktarının 2050 yılında %50 azaltılması hedeflenmiştir (Kılıç 2012). Çok büyük miktarlar oluşturan inşaat ve yıkıntı atıklarının depolama alanlarına atılması doğal çevreye çeşitli şekillerde zarar verebilmektedir. Bu nedenle geri kazanım ve yeniden kullanım olanaklarının değerlendirilmesi son derece öneme sahiptir. Aksi takdirde bu atıkların depolanması için çok büyük doğal alanların tahribine yol açacağı öngörülebilir. Bu amaçla kullanılan depolama alanları, ilgili bölgedeki toprağın verimliliğini kaybetmesi sonucu tarım alanı olarak kullanılamayacak duruma gelir. ABD, İngiltere, Danimarka, Almanya ve Hollanda da karışık haldeki inşaat ve yıkıntı atıklarının yeraltı suyunun kirlenmesine neden olabileceğine dikkat çekilerek depolanmasında daha itinalı olunması ve içme suyu kaynaklarının bulunduğu bölgelerde depolama yapılmaması istenmektedir (Demir 2009). Erdal (2011) tarafından yapılan tez çalışmasında belirtildiği üzere inşaat ve yıkım atıklarında insan sağlığını tehdit eden

asbest ve kurşun içeren bileşenler de bulunmaktadır. Bu bileşenlerin çevreye geliş güzel bırakılması insan sağlığı üzerinde olumsuz etki yaratabilmektedir.

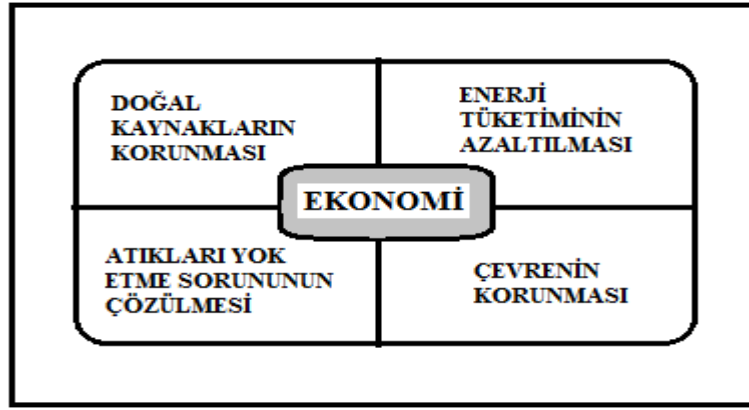
Diğer taraftan, madencilik, agrega işleme ve taşıma işlemleri gibi büyük miktarlarda enerji tüketen sektörler önemli miktarlarda sera gazı artışına neden olarak ekolojik dengeyi bozmaktadırlar. Şantiyeler ve agrega ocakları arasındaki mesafeler arttıkça sera gazı emisyonu da artmaktadır. Son yüzyılda yapılan çalışmalar neticesinde sera gazı artışının en önemli sonuçlarından birinin, iklim değişikliklerine neden olması olduğu anlaşılmıştır. Bu olgu geri kazanılmış agrega kullanmanın gerekliliği bir kere daha ortaya çıkmaktadır (Abbas 2007).

1.1.2. İnşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesinin ekonomiye katkısı

Bir metreküplük betonun üretim maliyeti içerisinde en büyük payı %40 ile çimento alırken, ikinci sırada %20 ile iri agrega gelmektedir (Demir 2009). İnşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen beton atıkları, kırılıp parçalandıktan sonra en çok iri agrega olarak kullanılabilir (Poon 2006; Rakshvir and Barai 2006).

Yukarıda da belirtildiği gibi, 2005 yılı verilerine göre katı atık miktarının Türkiye’de yıllık 38 milyon ton olduğu tespit edilmiştir (Demir 2009). Toplam katı atık miktarının ortalama %25’ine tekabül eden inşaat yıkıntı atıklarının ise yaklaşık 10 milyon ton olduğu ortaya çıkmaktadır. Büyük şehirlerde doğal agrega kaynaklarının şehir merkezlerinden çok uzak olmasından dolayı nakliye masraflarının yanında, nakliye sırasında harcanan iş ve zaman kaybını da azaltacaktır (Gürer vd 2004). Alternatif agrega kaynakları bulunmadığı takdirde, 2010 yılından sonra dünyada her yıl 8–12 milyar ton doğal agrega tüketileceği tespit edilmiştir. Kişi başına Türkiye’de 4 ton olduğu ifade edilmektedir. Bu miktar ABD’de 10 ton iken Avrupa Birliği’nde 7 ton’dur. Dünya ortalamasına bakıldığında ise kişi başı yaklaşık 1 ton civarındadır (Demir 2009; Erdal 2011). Diğer taraftan, günümüzde inşaat yıkıntı atıklarının taşıma ve depolama alanı ücretleri, depolama alanlarına atılmaları, geri kazanımının maliyetine göre çok daha pahalı duruma gelmiştir (Kılıç 2012).

Yukarıda verilen bilgilerden hareketle inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen betonların yeniden kullanımının ekonomiye büyük oranlarda katkısı olacağı net olarak söylenebilir. Agregada üretimi sırasında kırma, eleme ve nakliye için tüketilen zaman ve enerji miktarındaki azalma da göz önünde bulundurulduğunda sağlanan ekonomik katkının miktarının daha da artacağı söylenebilir (Durmuş vd 2009; Erdal 2011). Rao *et al.* (2007)'de de geri kazanılmış agregaların doğal agregalara göre çok daha ucuz olduğu belirtilmiştir. Aşağıdaki Şekil 1.5'de inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesinin ekonomik yararları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesinin yararları (Bahera *et al.* 2014)

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1- Yapılan literatür taramasında geri kazanılmış agregalarla üretilen betonların daha çok yol ve saha betonlarında kullanılmalarının önerildiği belirlenmiştir. Bu alanlarda kışın oluşan buz eritmek için yaygın olarak buz çözücü tuz kullanılmaktadır. Bu nedenle, betonun sodyum klorür çözeltisi ile yapılan donma-çözülme (yüzeysel kabuk atma) direnci incelenerek bu agregada ile üretilmiş betonların servis ömrü boyunca maruz kalacakları ve önemli bir durabilite problemleri olan donma-çözülme etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi,

- 2- Literatürde normal agregalı betonların donma çözülme dirençleri için optimum hava miktarı önerileri mevcuttur. Bu çalışmada ise geri kazanılmış agregalar ile üretilmiş betonların donma-buz çözücü tuz dirençleri için optimum hava miktarı önerisinde bulunulması,
- 3- Maksimum agrega tane çapı, hava sürükleyici katkı maddesi oranı ve geri kazanılmış agrega oranının hem taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi hem de beton donma-çözülme direncine etkilerinin araştırılması,
- 4- Literatür çalışmaları incelendiğinde geri kazanılmış agregalar ile üretilen betonların donma-çözülme dirençleriyle ilgili çelişkili sonuçlara erişildiği göze çarpmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı geri kazanılmış agregaların boşluk oranının fazla olması nedeniyle donma-çözülme direncine olumlu katkıda bulunduğunu vurgularken bir kısım çalışmalarda ise bu boşlukların düzenli bir dağılım göstermemesinden dolayı donma-çözülme direncini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Bu çalışma ile geri kazanılmış agregalı betonların donma-çözülme dirençleri üzerinde oluşan farklı/zıt sonuçların da açıklığa kavuşturulmasına yardımcı olunması,
- 5- Tez çalışmasının yürütüldüğü Erzurum ile başta olmak üzere donma-çözülme çevrimlerinin en yoğun yaşandığı yer Türkiye’de Doğu Anadolu Bölgesi’dir. Ülke çapında başlatılan kentsel dönüşüm çalışmalarının Erzurum ilinde de yürütülmeye başlanması ile bu süreçte ortaya çıkacak yapısal atıkların donma-çözülme etkisinde kalacak elemanlarda kullanılması durumunda ne gibi sonuçlara karşılaşılabileceğinin araştırılması,
- 6- Geri kazanılmış agregaların betonda optimum kullanım oranının belirlenmesi,
- 7- Beton endüstrisi başta olmak üzere yapı malzemesi üreticileri ve uygulamacıları gibi inşaat sektörünü oluşturan kesimlerde yapısal atıklar hakkında farkındalık oluşturmak ve ülke genelinde geri dönüşüm bilincinin artırılmasına katkıda bulunmak,

8- Ülke çapında başlanılan kentsel dönüşümden çıkan yapısal atıkların yeniden kullanılabilceği alanlar hakkında öneriler geliştirerek bu atıkların olumsuz çevresel etkilerini azaltmak, ekonomi sağlanmak ve doğal hammadde kaynaklarını korumak.

9- Geri kazanılmış agregalar üzerinde yapılan bilimsel çalışmalara katkı sağlayarak bilgi eksikliği nedeniyle bu atıkların gerektiği gibi değerlendirilememesinin önüne geçmek.

Yukarıda belirtilen amaçları gerçekleştirmek için tezin kapsamı, Materyal ve Metot Bölümü'nde detaylandırıldığı gibi, tez süresi ve laboratuvar koşulları da göz önünde bulundurularak oldukça geniş tutulmaya çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Geri Kazanılmış Agregalar

Beton agregası; beton veya harç yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen, organik olmayan doğal veya yapay malzemenin genellikle 100 mm'yi aşmayan büyüklüklerdeki kırılmış veya kırılmamış tanelerin oluşturduğu bir yığındır (Köken vd 2008). Beton agregaları petrografik, mineralojik, mekanik, fiziksel, geometrik ve içerik bakımından ilgili standartlarda belirtilen özelliklere sahip olmalıdır.

Ülkemizde 2006 yılında hazır beton üretiminde 170 milyon ton, asfalt uygulamalarında 100 milyon ton ve özel uygulamalarda 20 milyon ton olmak üzere toplam 290 milyon ton agrega kullanılmıştır (Demir 2009). Dünya genelinde ise yıllık 10 milyar ton agrega kullanıldığı tahmin edilmektedir (Durmuş vd 2009). Bu bilgilerden anlaşılacağı üzere dünyada her yıl oldukça yüksek miktarlarda agrega tüketilmekte/kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de bu denli fazla kullanılan beton bileşeninin çevreyi daha az tahrip ederek elde edilmesinin mümkün olup olmayacağını araştırmaktadır. Bunun için doğal agregaların yerine inşaatlardan elde edilen yapısal atıkların kullanılması önerilmektedir.

RILEM tarafından 2002 yılında yayınlanan TC121-DRG numaralı raporda (Anonnyous 2002) geri kazanılmış ince agrega hakkında bir bilgi yoktur ancak geri kazanılmış iri agrega farklı sınıflara ayrılmış ve beton uygulamasının kapsamı belirtilmiş, geri kazanılmış agregalı betonun dayanım sınıfları ve maruz kalabileceği çevresel etkiler ifade edilmiştir. Raporda geri kazanılmış agregalar;

(a) Tip I: agreganın esasının duvar molozundan geldiğinin dolaylı farz edilmiş olması (Bu tip agregalar kargir kalıntılarından elde edilir)

(b) Tip II: agreganın esasının beton molozundan geldiğinin dolaylı farz edilmiş olması (Bu tip agregalar beton kalıntılarında elde edilir)

(c) Tip III: agreganın doğal agrega ve geri kazanılmış agreganın karışımından meydana geldiğinin dolaylı farz edilmiş olması (karışım en az %80 doğal agrega ve en fazla %10 oranında tip I agrega)

şeklinde sınıflandırılır. Çizelge 2.1'de RILEM bu üç tip geri kazanılmış agrega için RILEM önerileri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu sınıflandırmanın amacı geri kazanılmış agreganın kullanımında en büyük zorluk olan, agreganın kalitesinin değişken ve düzensiz olduğunun gösterilmesidir (Tüfekçi 2011).

Çizelge 2.1. RILEM TC121-DRG Raporu'na göre geri kazanılmış agrega şartnamesi

Kontrol Edilecek Özellikler	Tip I	Tip II	Tip III	Test Metodu
Minimum kuru yoğunluk, (kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO6783 ve 7033
Maksimum su emme, (% ağırlıkça)	20	10	3	ISO6783 ve 7033
DKY yoğunluğu 2200 kg/m ³ 'den az olan malzeme maksimum yüzdesi, (% ağırlıkça)	-	10	10	ASTM C123
Maksimum kirlilik, (metal, cam, bitüm,), (% ağırlıkça)	5	1	1	Gözle
Maksimum metal miktarı, (% ağırlıkça)	1	1	1	Gözle
Maksimum organik madde, (% ağırlıkça)	1	0,5	0,5	NEN 5933
Maksimum dolgu malzeme, (<0,063 mm), (% ağırlıkça)	3	2	2	prNEN 933-1
Maksimum kum, (<4 mm), (% ağırlıkça)	5	5	5	prNEN 933-1
Maksimum sülfat miktarı, (% ağırlıkça)	1	1	1	BS 812, part 118

Geri kazanılmış agregaların üretim süreçleri Şekil 2.1'de verilen resimlerle gösterilmiştir. Bu resimlerde yapım ve yıkım atıklarının kaynaktan alınması ve geri dönüşüm tesisinde yapılan ayrıştırma işlemi görülmektedir. Bu işlemde beton atıkları diğer maddelerden (tuğla, demir, ahşap, plastik, alçı, demir vb.) arındırılarak beton

parçalarının kırılması ve eleme işleminden sonra istenilen boyutlarda depolanmaktadır (Tüfekçi 2011).



Şekil 2.1. Geri kazanılmış agrega üretim süreci (Tüfekçi 2011)

Geri kazanılmış agrega elde edilebilecek kaynaklar olarak; eski binalar, doğal afet yıkıntıları, yangın yıkımları, bozuk beton üretimi, kalite kontrol numuneleri ve prefabrikasyonda üretim artıkları ve uygun olmayan ürünler olarak gruplandırılmıştır (Arioğlu vd 1996).

2.1.1. Geri kazanılmış agregaların tarihçesi

Agregaların yeniden beton üretiminde kullanılması fikri, II. Dünya Savaşı sonrası yeniden yapılanma sürecine giren Avrupa'da ortaya çıkmıştır. 1980'li yılların başlarından beri Almanya, Hollanda, Avusturya, İsveç, Macaristan gibi ülkelerde inşaat malzemesi atıkları, çeşitli tesislerde işleme tabi tutularak geri kazanılmakta ve değerli malzeme olarak yeniden kullanıma sokulmaktadır (Kılıç 2012).

Küresel ölçekte bakıldığında bir taraftan çeşitli birimler tarafından geri kazanılmış agrega kullanımı konusunda standart ve yönetmelikler hazırlanırken bir taraftan da her geçen gün daha fazla ülkede geri kazanımın teşviki için mali kolaylıklar sağlandığı görülmektedir. 2002 yılı verilerine göre; Danimarka, Almanya ve Hollanda'da bu atıkların %80'den fazlası, Finlandiya, İrlanda ve İtalya'da %30 ile %50 arası, Lüksemburg'ta ise %10'u geri dönüştürülerek kullanılmıştır. Japonya'da %90 oranında geri kazanım hedefi belirlenmiş, 2000 yılında yaklaşık %96'ya ulaşılmıştır (Rao *et al.* 2007). Hollanda'da inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen çeşitli boyutlardaki taş malzemenin %95'i yol taban malzemesi olarak tekrar kullanılmakla birlikte yeniden kullanımın seviyesi ve kalitesini yükseltmeye yönelik çalışmalar da yürütülmektedir (Demir 2009).

Türkiye'de ise inşaat yıkıntı atıklarının yönetimi yasalarla belediyelere verilmiştir. Konu ile ilgili düzenlemeleri içeren Hafriyat Toprağı ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (HTYAKY)³ ile de bu atıkların yönetiminin nasıl yapılacağı belirlenmiştir. HTYAKY geri kazanılmış ürünlerin, ilgili standartları sağlamak şartı ile gerekli işlemlerden sonra orijinal malzemeler ile birlikte veya ayrı olarak, yeni beton üretiminde, yol, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları, drenaj çalışmaları, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi olmak üzere, alt ve üst yapı inşaatlarında, spor ve oyun tesisleri inşaatları ile diğer dolgu ve rekreasyon çalışmalarında öncelikli olarak kullanılacağını hükme bağlamıştır.

HTYAKY(Anonim 2014c) ve TS EN 206 (Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk) (Anonim 2014e) standardına rağmen GKA ile ilgili olarak ülkemizdeki mevcut standart ve yönetmeliklerin yetersiz olduğu söylenebilir. Ancak sektör

³ 2872 sayılı Çevre Kanununun 8, 11 ve 12 nci maddeleri ile 4856 sayılı Çevre ve Orman Bakanlığı Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanununun 9 uncu maddesinin (d), (h), (o), (p) ve (s) bentlerine dayanılarak hazırlanan bu yönetmelik 18 Mart 2004 tarih ve 25406 sayılı Resmi Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelikte tez kapsamı ile ilgili yapılan bazı önemli tarifler aşağıda verilmiştir:

İnşaat Atıkları: Konut, bina, köprü, yol ve benzeri alt ve üst yapıların yapımı esnasında ortaya çıkan atıklar,

Yıkıntı Atıkları: Konut, bina, köprü, yol ve benzeri alt ve üst yapıların tamirata, tadilatı, yenilenmesi, yıkımı veya doğal bir afet sonucunda ortaya çıkan atıklar,

Tehlikeli İnşaat ve Yıkıntı Atıkları: İnşaat ve yıkıntı atıkları içerisinde bulunan asbest, boya, florasan ve benzeri zararlı ve tehlikeli atıklar.

toplantılarında ve kongrelerde yakın gelecekte hem rezervlerin hızla tükenmesi hem de çarpık şehirleşme nedeniyle agrega temininde büyük zorluklarla karşı karşıya kalınacağı dile getirilmektedir. Ayrıca ülkemizde konut sektörünün büyüklüğü ve kalite denetiminin de yetersiz olduğu dikkate alındığında, bu yapıların gelecekteki iyileştirme ve yıkım çalışmalarında ortaya çıkacak atık betonların değerlendirilmesi için geri kazanılmış agrega sektörünün oluşturulması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

2.1.2. Geri kazanılmış agregaların dünyada kullanımı

Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl yaklaşık 2,7 milyar ton agrega üretimi yapılmakta ve üretilen agrega yol ve yapım işlerinde güncel olarak kullanılmaktadır. Üretilen bu agreganın %10-15'i kaldırım işlerinde, %20-30'u yol yapım ve onarım işlerinde ve %60-70 gibi büyük bir kısmı da yapı betonlarında kullanılmaktadır. Tüm inşaat yapılarından 1980 yılında yaklaşık 55 milyon ton yapım ve yıkım atığı oluşurken, 2005 yılında bu değer yaklaşık 162 milyon tona ulaşmıştır ve 30 milyon tonu sadece beton atığı olduğu görülmüştür. Yapım ve yıkım atığı miktarı son 30 yılda üç katına çıkmış ve bu değer hızla artmaya devam ettiği bildirilmektedir (Tüfekçi 2011).

Avrupa da inşaat yıkıntı atıklarının 450 milyon ton civarında olduğu ve hatta toprak ve bazı atıklar dışarıda tutulduğunda inşaat ve yıkım atıklarının 180 milyon ton olduğu, nüfusun yaklaşık 370 milyon kişi olduğu dikkate alınır, kişi başına düşen yıllık atık üretiminin yaklaşık 480 kg olduğu görülmektedir. Çoğu AB ülkesi geri dönüşümü %50'den %90 oranlarına çıkarmayı hedeflemektedir. Avrupa Birliği sınırları içerisinde, Avrupa Agrega Birliği'nin açıkladığı rakamlara göre yıllık 3 milyar ton agrega üretimi yapılmaktadır. Yapım ve yıkım atığı ise yarım milyar tona yaklaşmaktadır. Adı geçen Birliğin çalışmaları sonucunda, oluşan yapım ve yıkım atığından toprak ve diğer katı atıkları çıkarılınca tahmini 180 milyon ton beton atığı olduğu belirtilmiştir. Son yıllarda nüfusun ve yerleşim yerlerinin hızlı artışı bu rakamın daha da artabileceğinin göstergesidir. Önemli bir geri kazanılma potansiyeli olmasına rağmen, yaklaşık olarak bu atıkların %75'i katı atık sahasına atılmaktadır. İtalya'da her yıl 20 milyon tondan fazla yapım ve yıkım atığı oluşmaktadır. 1999 yılı verilerine göre Avrupa Birliği

ülkelerinde oluşan inşaat ve yıkıntı atığının yaklaşık %28'i geri kazanılırken %72'si ya yakılmakta ya da depolanmaktadır (Tüfekçi 2011).

Geri dönüşüm materyalleri genellikle doğal materyallerden daha ucuzdur ve Almanya, Hollanda, Danimarka gibi ülkelerde de geri dönüşüm daha az maliyetlidir. 1999'da Taiwan merkezde meydana gelen depremde yüz bin civarında konutun hasar görmesiyle geniş kapsamlı inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümüyle ilgili bir program düzenlenmiştir. Kalite kontrol programlarıyla da desteklenen geri dönüşüm planı neticesinde atıkların %80'i boş alanların doldurulmasında %20'si de yol temellerinde kullanılmıştır. Hong Kong ve Taiwan inşaat atıklarının yeni beton üretiminde tekrar kullanılması için programlar başlatarak her yıl yaklaşık 14 milyon ton inşaat yıkıntı atığını değerlendirmektedir (Poon and Chan 2006). Şekil 2.2'de Hong Kong'daki bir geri dönüşüm tesisinin genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.2. Hong Kong'da geri dönüşüm fabrikası (Poon and Chan 2006)

Türkiye'de ise bu konu ile ilgili olarak Nisan 2002'de yürürlüğe giren TS EN 206-1 (Anonim 2002) ve Nisan 2003'de yürürlüğe giren TS 706 EN 12620 (Anonim 2003) standartlarında geri kazanılmış agreganın tanımı yapılarak, bu tip agregalar için doğal

agrega deneylerinde nelere dikkat edileceği bildirilmiştir. Ayrıca geri kazanılmış agregaların beton agregası olabilmeleri için yapılan agrega deney sonuçlarında hangi sınır değerler olması gerektiği de bildirilmiştir (Demir 2009). İstanbul Büyükşehir Belediyesi inşaat ve yıkıntı atıklarının kontrolünü sağlamak amacıyla bünyesinde İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme AŞ (İSTAÇ)'yi kurarak 2008 yılından beri inşaat atıklarını geri kazanmaktadır (Öztürk 2005).

2.1.3. Geri kazanılmış agregaların kullanım alanları

Geri kazanılan agregaların günümüzde en yaygın kullanım sahaları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir (Arioğlu vd 1996);

- i. 80-200 mm beton agregaları, dolgu malzemesi olarak hidrolik işlerinde,
- ii. 0-80 mm beton agregaları, standartları yerine getirmek şartı ile beton imalatında, yol inşaatlarında zemin malzemesi olarak, toprak dolgu malzemesi olarak ve sertleşmemiş zemin oluşturmak için park sahalarında,
- iii. geri kazanılmış kum, çok az kullanılmaktadır. Çoğunlukla yol kaplamalarının altında ya da yol alt temel yapılarında,
- iv. 0-56 mm geri kazanılmış kargir, zemin dolgusu olarak ve sertleşmemiş zemin oluşturmak için park sahalarında,
- v. Asfalt agregaları, yollar ve park alanları kaplamalarında, yeni asfalt üretiminde kullanılmaktadır.

2.1.4. Geri kazanılmış agrega kullanımını engelleyen faktörler

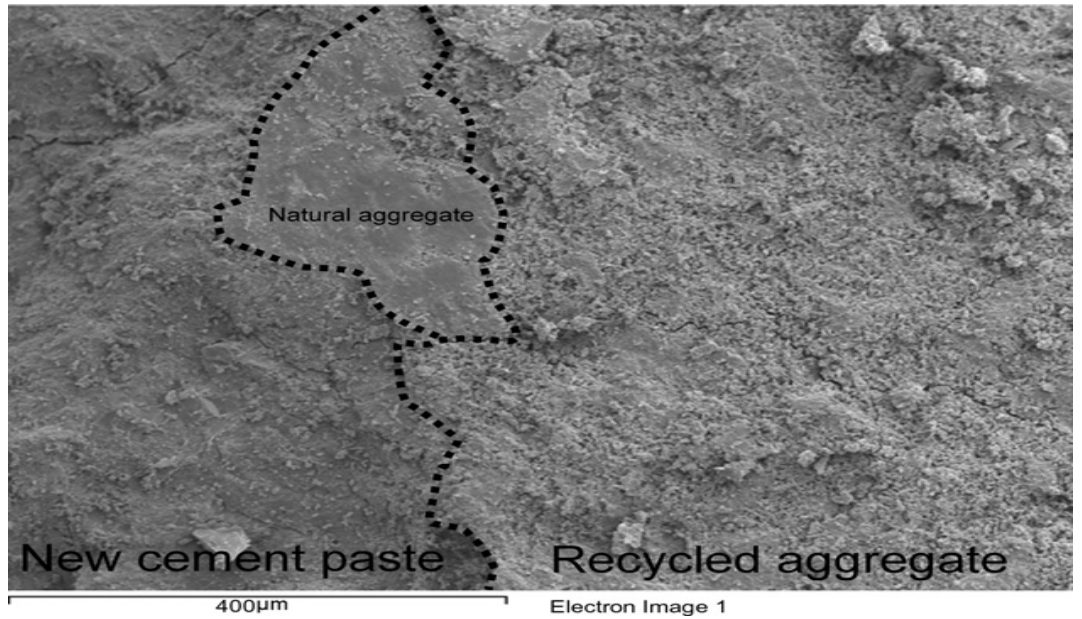
Kullanımının inşaat sektörüne önemli faydalar sağlayacak olan geri kazanılmış agrega önündeki engelleri şöyle sıralayabiliriz (Silva *et al.* 2014);

- i. Müşteri ve müteahhitlerin güven eksikliği,
- ii. Çevresel yararları hakkında yeterli farkındalığın bulunmaması,

- iii. Gerekli standartların ve yönetmeliklerin eksikliği,
- iv. Atıkların geri dönüşümünün düzenli bir şekilde yapılmaması dolayısıyla ortaya çıkan düşük kalitedeki ürünler,
- v. Geri dönüşüm tesisleri ve atık depolama alanları arasındaki mesafe,
- vi. Kaliteli geri kazanılmış agrega üretiminin sürekliliğinin sağlanamaması.

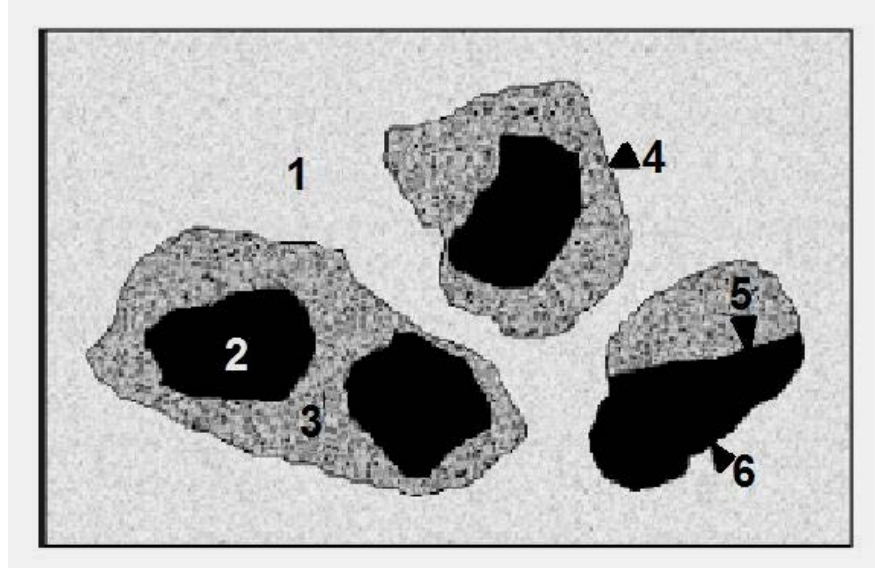
2.1.5. Geri kazanılmış agregaların normal agregadan farkları

Thomas *et al.* (2012)'de verilen şekli ile geri kazanılmış agrega (GKA) ile normal agrega⁴ (NA)'nın birlikte kullanıldığı bir betondan alınan SEM görüntüsü Şekil 2.3'de, geri kazanılmış agrega içeren betonun içeriği ise Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Geri kazanılmış agregalı beton görüntüsü (Thomas *et al.* 2012)

⁴ Tezde “normal agrega” terimi ile her hangi bir geri kazanma sürecine uğramadan nehir yatakları, deniz ve göl kenarları, taş ocakları gibi doğal kaynaklardan elde edilmiş fakat konkasörde kırma, eleme ve yıkama işlemleri dışında doğadaki yapılarında değişiklik oluşturacak hiçbir işlen uygulanmamış olan “doğal agregalar” kast edilmiştir.



Şekil 2.4. Geri kazanılmış agrega içeren betonun içeriği (Çelik 2007)

(1-Yeni çimento hamuru, 2- Normal(doğal) iri agrega, 3-Yapışmış çimento hamuru, 4-Yeni çimento hamuruyla önceki çimento hamuru arası ara yüzey, 5-Yapışmış çimento hamuru ile normal iri agrega arasındaki ara yüzey ve 6-Yeni çimento hamuru ile normal agrega arasındaki ara yüzey)

Literatürden hareketle belirlenen geri kazanılmış agregaların normal agregalardan farklı olan yönleri ise aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

i. Geri kazanılmış agregaların, kırma taş agregalara göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olduğu ve daha yüksek aşınma yüzdesi değerlerine sahip olduğu belirtilmektedir. Geri dönüştürülmüş agregaların yüksek poroziteye sahip olmasından kaynaklanan bu durum aynı zamanda yeni üretilen betonun işlenebilirliği ve diğer özellikleri üzerinde de etkilidir (Erdal 2011).

ii. Birçok araştırmacının belirttiği gibi GKA ile üretilen betonların işlenebilirliği geleneksel betonlara göre düşüktür. Özellikle de kullanılan GKA miktarı %50 oranına ulaşmış ise bu oranı işlenebilirliği geliştirmek için belli önlemler alınmalı ve GKA'nın nem içeriği değiştirilmelidir (Tüfekçi 2011).

iii. (Katz 2003) tarafından yapılan çalışmada %100 GKA ile üretilen betonların hava içeriği NA ile üretilen betonlara göre %4-%5,5 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Bu artışa GKA'nın sahip olduğu yüksek porozite neden olmaktadır.

iv. Geri kazanılmış agregalar üzerinde yapışık olan çimento harcı nedeniyle yüksek su emme kapasitesine sahiptirler. Fakat süper akışkanlaştırıcıların geciktirici ve işlenebilirlik üzerindeki olumlu etkilerinden yararlanılarak poroz agregaların yüksek su tutma kapasitesi azaltılabilir ve dolayısıyla GKA kullanılarak üretilen betonların rijitlikleri de geliştirilebilir.

v. Doğal agrega yüzeyine yapışık eski harç yüzdelerinin %30 ile %60 arasında değiştiği bu harçların eski beton agregasının elastisite, sünme ve rötne gibi deformasyon özelliklerini etkileyeceği ve agrega emme suyuna ilaveten %10 daha fazla suya gereksinim olduğu belirlenmiştir (Rao *et al.* 2007).

vi. Araştırmacılar işlenebilirliğin çok kısa sürede azalma gösterdiğini ve çökme kaybının oldukça hızlı olduğunu saptamışlardır. GKA'nın basınç mukavemetlerinin ve elastisite modüllerinin eski betonun su/çimento oranına bağlı olduğu şayet eski betonun s/ç oranı eşit ve daha düşükse GKA ile yapılan betonun basınç mukavemeti ve elastisite modülü de eşit veya daha yüksek değerler alabileceği de belirtilmiştir (Topçu and Günçan 1995).

vii. Çimento tipi dikkate alınmaksızın NA ile üretilen betonun kütle yoğunluğu 2400 kg/m³ civarında iken GKA ile üretilen betonun kütle yoğunluğu 2150 kg/m³ civarındadır (Topçu and Günçan 1995).

viii. Bu agregalarda su emme oranı iri ve ince agregalar için %3 ile %12 arasında olup bu değer su emme oranı %0,5-%1 arasında olan normal agregaya göre oldukça yüksektir (Katz 2003).

2.1.6. Geri kazanılmış agregalı betonun mekanik ve durabilite özellikleri

GKA kullanılarak üretilmiş olan betonların sertleşmiş özellikleri üzerinde oluşturdukları etkiler aşağıda verilmiştir:

- i. GKA ile üretilen betonlarda da su/çimento (w/c) oranı basınç dayanımı üzerinde oldukça etkili bir faktördür. Ayrıca betonun üretildiği GKA'nın tipi (yüksek, orta, düşük dayanımda olması) ve nem içeriği de önemli parametrelerdir. GKA ile üretilen betonda w/c oranı 0,40 seviyesine indirildiğinde NA ile üretilen betonun basınç dayanımının %75'ini gösterebildiği görülmüştür. Ayrıca w/c oranına ve kullanılan GKA miktarına bağlı olarak GKA içeren betonunun elastisite modülünün normal betonun %50-%70'i oranında olduğu görülmüştür (Rao *et al.* 2007).
- ii. Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002) tarafından yapılan çalışmada, 28 günlük geri kazanılmış agregalı betonun çekme dayanımının referans betonun çekme dayanımından %10 düşük olduğu ve silis dumanı gibi mineral katkı maddelerinin geri kazanılmış agregalı betonun özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olduğu belirtilmiştir. (Rao, *et al.* 2007)'da ise %100 GKA kullanılan bir betonun eğilme ve çekme dayanımının NA kullanılan betondan %15-20 daha düşük olduğu ifade edilmiştir.
- iii. GKA'lı beton uygulamalarında elastisite modülü bulmak veya gerilme-şekil değiştirme diyagramını kesin sonuçlarla çizilebilmek için birçok deneysel veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmada beton numunelerin iri agregasının %30'unun geri kazanılmış agrega olarak kullanılması durumunda elastisite modülünün %15 azaldığı görülmüştür (Valeria 2010).
- iv. GKA üzerinde yapılan durabilite çalışmaları GKA kullanımının etkilerinin anlaşılmasında önemli bir yere sahiptir. GKA, NA'ya göre daha geçirgen bir yapıda olduğundan durabilite özelliklerini iyileştirmek için uçucu kül, silis dumanı gibi katkıların eklenmesi tavsiye edilmektedir (Dilbas *et al.* 2014).
- v. Betonda GKA kullanımı, sahip olduğu yüksek absorpsiyondan dolayı, geniş rötre değerlerine ulaşmasına neden olur. GKA üzerine yapılan bazı çalışmalar 90 gün sonunda rötre değerinin 0,55-0,8 mm olduğunu göstermiştir oysa normal agrega ile üretilen betonda 0,3 mm olarak ölçülmüştür. Bir yılın sonunda ölçülen sünme değerinin ise NA ile üretilen betona göre %20 daha düşük olduğu görülmüştür (Katz 2003).

vi. Genel olarak geri kazanılmış agrega içeriği arttığı zaman karbonatlaşma derinliği azalmaktadır. Geri kazanılmış agrega oranı %20 ve %50 olan betonların karbonatlaşma derinliğinin geleneksel betona göre daha iyi çıktığı görülmüştür. GKA oranı %100 olduğunda ise karbonatlaşma derinliği doğal agrega ile üretilen referans betonuna göre çok az daha düşük çıkmıştır. Geri kazanılmış agrega oranının artması ile birlikte su emme oranlarında da artış gözlemlenmiştir (Levy and Helene 2004).

vii. GKA ile üretilen betonlarda beton- donatı aderansı ile ilgili sınırlı çalışma vardır. Yine de belirtmelidir ki GKA kullanımının etkileri kullanılan donatının özellikleri (düz veya nervürlü olması gibi) yanında çok küçük bir değere sahiptir. %100 oranında GKA kullanılmasıyla üretilen bir betonda NA ile üretilen betona göre sıyrılma direncinde %10 oranında azalma görülmüştür. (Ajdukiewicz and Kliszczewicz 2002).

viii. Literatürde geri dönüşümlü agreganın donma-çözülme direnci üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Agregaya yapışmış olan harç içeriği donma-çözülme direnci üzerinde önemli etkiye sahiptir. Kaliteli moloz betonun donma-çözülme direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca hava sürükleyici katkılı betonların da donma-çözülme direnci yüksektir. Bu tür betonların donma-çözülme direnci agregaya önceden yapışmış olan çimento pastasının boşluk yapısıyla da ilgilidir (Rao *et al.* 2007). Çelik (2007)'de 50 çevrimlik donma çözülme deneyleri sonucunda geri kazanılmış agregalı betonların donma çözülme-dirençlerinin normal agregalı betonlara göre oldukça yüksek performanslı sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Petkoviç *et al.* (2003), tarafından Norveç'te yapılan çalışma; bu agregalarla üretilen betonların donma-çözülme dirençleri açısından uygun olduğunu gösterse de eritici tuzlara maruz bırakılan betonların donma-çözülme dayanımları gibi zor şartlarda yeterli olmadığını göstermiştir. Zaharieva *et al.* (2004) tarafından yapılan çalışmada ise geri kazanılmış agregaların düşük donma çözülme dirençleri nedeniyle değişken iklimlerde kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır.

2.2. Geri Kazanılmış Agregalı Betonlarla İlgili Literatür Çalışmaları

Topçu and Günçan (1995), 28 günlük basınç dayanımı 16 MPa olan betonlardan elde edilen agregaların tekrar kullanılarak üretilen betonların bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Su/Çimento oranını 0,60, geri kazanılmış agrega oranlarını %0, %30, %50, %70 ve %100 ve maksimum tane çapını 31,5 mm olarak taze ve sertleşmiş beton deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Geri kazanılmış agrega kullanım oranı arttıkça betonun yoğunluğu düştüğünü belirlemişlerdir. Geri kazanılmış agregaların su emme oranlarının yüksek olması işlenebilirliği azaltmakta ayrıca GKA kullanım oranının artması ile doğru orantılı olarak betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde düşüşler olduğunu gözlemlenmişlerdir.

Xiao and Falkner (2005), tarafından yapılan çalışmada %0, %50 ve %100 oranlarında iri geri dönüşüm agregası ve düz ve nervürlü olmak üzere iki çeşit donatı kullanılmıştır. Beton tipi, donatı geometrisi, yükleme şartları ve imalat teknikleri donatıların çekip çıkarılma dirençlerini etkileyen önemli parametrelerdir. Geri dönüşümlü agregalar Shanghai havaalanının pist betonundan Çin standartlarına göre maksimum tane boyutu 12,5 mm olacak şekilde elde edilmiştir. Düz ve nervürlü donatılar ise akma dayanımı 300 MPa ve 420 MPa olarak ve ankraj boyu normal agregayla üretilen betonlarla yapılan deneylerdeki standartlarda olduğu gibi seçilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde ise geri dönüşümlü agrega ile üretilen betonarme elemanlar normal agregayla üretilenlerle kıyaslandığında, %50 ve %100 oranlarında kullanılan geri dönüşümlü agregalı numunelerin %6 ve %12 oranlarında daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür.

Oikonomou (2005), Yunanistan'da %30 oranında 4.75 mm den büyük iri geri dönüşümlü agrega kullanılarak yapılan pilot bir bina üzerinde uygulanan test sonuçlarına göre bu oranda kullanılan geri dönüşümlü agregaların betonun basınç, çekme dayanımları, elastisite modülü ve dağılma direnci üzerinde önemli bir etki yapmadığını belirlemiştir. Bu agregaların poroz yapısı nedeniyle su emme oranları yüksek çıktığı için süper akışkanlaştırıcıların kullanılması tavsiye edilmiştir

Evangelista and Brito (2006), tarafından yapılan çalışmada 28 günlük basınç dayanımı 30 MPa olan geleneksel betonlar kırıcı ile kırılıp geri dönüşüm agregası olarak elde edilen ince agregalar 0.074 mm–1.19 mm aralığı boyutlarında olup %10, %20, %30, %50 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş agregaların yoğunluklarının, yüksek porozitelerinden dolayı, normal agregalardan daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde normal agregalı betonlarla kıyaslandığında %30 oranından daha fazla geri dönüşüm agregası kullanımının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve aşınma direnci üzerinde olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Kılıç (2006), tarafından yapılan tez çalışması yapıların deprem veya imar nedeniyle yıkılması sonucu ortaya çıkan eski betonların atık durumdan çıkarılarak agrega olarak tekrar kullanılma olanakları ile silis dumanı, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkıların bu agregalarla üretilen betonlara etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada uçucu külün, atık beton agregasından elde edilen betonların özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Uçucu kül; betona çimento ağırlığının %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmıştır. Uçucu külün, basınç dayanımı ve ultra ses hızı geçiş değerlerinde azalmaya neden olduğu, çökme değerini ise artırdığı tespit edilmiştir. Uçucu külün, atık beton agregasıyla elde edilen betonlarda su gereksinimini azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak amaçlı kullanılabileceği tespit edilmiştir. Geri dönüştürülmüş atık betonlarda kullanılacak uçucu külün, karışıma %10-%20 oranlarında katılması gerektiği belirlenmiştir. Elde edilen agregaların uygun granülometreye sahip olmadıkları taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılabilmesi için normal agrega ile karıştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Basınç dayanımının normal agregalardan daha düşük değerler verdiği tespit edilmiştir.

Tam *et al.* (2006), tarafından yapılan çalışma geri kazanılmış agregaların %0, %20 ve %100 oranlarında betona katılarak iki aşamada oluşturulan rötre, sünme ve hava, su, klor geçirgenliği özellikleri üzerine bir araştırma niteliği taşımaktadır. Deneysel çalışmalarda ilk aşamada agrega ve su karıştırılmış diğer yandan da çimento ve su karıştırılarak daha sonra bu iki karışım birbirine karıştırılarak oluşan karışımın

özellikleri bir kerede çimento, su ve agreganın karıştırılmasıyla oluşturulan karışımın özellikleriyle kıyaslanmıştır. Geri kazanılmış agregaların olumsuz özelliklerini (düşük yoğunluk, yüksek porozite, yüksek su emme oranı...) iyileştirerek yerel kullanım alanlarını artırmayı hedeflemektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre geri kazanılmış agregaya kullanılan betonlarda %10 basınç ve çekme dayanım kaybı, %30 elastisite modülünde azalma, neredeyse %100 kuruma rötresinde ve permabilitede artma gözlenmiştir. Sonuç olarak geri kazanılmış agregaya ile üretilen betonların durabilitelerinin normal agregaya ile üretilen betonlardan kötü olduğu vurgulanmıştır.

Rao *et al.* (2007) ise birincil kırma işlemi neticesinde 50 mm boyutlarına indirgenen geri dönüşümlü agregalar elektromıknatıslar yardımıyla içerdikleri metal parçacıklarından arındırıldıktan sonra ikincil kırma işlemi uygulanarak 14-20 mm boyutlarına getirilip kullanılmışlardır. Geri dönüştürülmüş agregaya üzerinde agregaya deneyleri ve bu agregalarla üretilen betonlarda taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Dünya genelinde geri dönüşümlü agregaya kullanımının önemi ve tarihçesi üzerinde geniş biçimde yer verilen çalışmada geri dönüşümlü agregaya kullanmanın olumlu ve olumsuz yönleri üzerinde durulmuştur. Düşük oranlarda geri dönüştürülmüş agregaya kullanılmasının gerekliliği vurgulanırken normal yapı betonlarında kullanılması içinde silis dumanı ve uçucu kül gibi katkı maddeleriyle birlikte kullanılması tavsiye edilmiştir.

Çelik (2007) doktora tez çalışmasında geri kazanılmış agregaya miktarı %25, %50, %75 ve %100 olan beton karışımları hazırlanmıştır. Deney numuneleri 250°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra mekanik özellikleri basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarma çekme dayanımı testleri ile saptanmış olup dayanıklılık özellikleri ise su emme testi, hızlı klor geçirgenlik testi ve kılcal su emme testi gibi geçirimsizlik testleri ve cıva sürüklemeli boşluk testi ile taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş fotoğraflar üzerinde imaj analizi ile boşluk ölçümü ve de çatlak gözlemleri yapmıştır. Deneyler neticesinde mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen ana etkenin su/çimento oranı olduğu ve kaynak beton kalitesinin önemli bir etkisinin bulunmadığı ortaya çıkmıştır. Geri kazanılmış agregaya miktarı, dayanıklılık özelliklerini

mekanik özelliklerden daha fazla etkilemiştir. Ölçülen özelliklerde yaş faktörü genel olarak olumlu katkı sağlarken, oda sıcaklığı ile 250°C arasındaki sıcaklık artışı farklı sonuçlar göstermiştir. Yüksek sıcaklıkların özellikle betonun dayanıklılık özelliğine etkisi normal betonlara göre geri kazanılmış agrega ile üretilen betonlarda çok daha fazladır.

Topçu and Sarıdemir (2007) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise otoklavlanmış beton atıkları (AAC) kırma taş agrega olarak kullanılarak üretilen betonlarda birim ağırlık, silindirik basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı ve dinamik elastisite modülünün hesaplanması deneyleri yapılmış aynı zamanda yapay sinir ağırları yöntemiyle de bulunan sonuçlar kıyaslanarak betonun bu özelliklerinin deney yapılmadan bulunabileceği gösterilmiştir. Sonuçta kullanılan AAC miktarı arttıkça birim ağırlığın ve basınç dayanımının azaldığı hatta öyle ki bu azalma AAC'nin iri agrega yerine kullanıldığı zaman daha fazla olduğu görülmüştür. Uygulanan yapay sinir ağırları metodunda da bulunan deneysel verilere çok yakın sonuçlar bulunmuş sonuçta deney yapılmadan da bu sonuçların bulunabileceği gösterilmiştir.

Durmuş vd (2008) tarafından yapılan çalışmada iri agrega yerine %0, %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 oranlarında iri geri dönüşüm beton agregası (İGDBA) kullanılarak dökülen C30 betonun özellikleri irdelenmiştir. Sonuç olarak %30 oranına kadar İGDBA'nın beton üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. Agregada, taze ve sertleşmiş betonda bütün deneyler yapılmış sonuçları tablolar üzerinde gösterilerek kıyaslamalar yapılmıştır.

Köken vd (2008) tarafından yürütülen çalışmada beton basınç mukavemeti 20 MPa olan atık betonlardan elde edilen geri dönüşüm agregalarının fiziksel ve mekanik incelenmeleri anlatılmıştır. Sonuç olarak GKA kullanılarak üretilen betonda GKA oranı arttıkça beton basınç mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Agregalar ve bu agregalar kullanılarak üretilen beton numuneler üzerinde deneyler yapılarak sonuçları normal agregayla ve normal agrega ile üretilen betonlarla kıyaslanmıştır.

Köroğlu ve Köken (2008) yaptıkları çalışmada, 28 günlük beton basınç mukavemeti 10 MPa olan beton atıkları öğütülerek agregaya haline getirilerek mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiş ve 300 dozlu kırmataş agregadan üretilen beton karışımına %0, %50 ve %100 oranında geri dönüşüm agregası katılarak üretilen beton numunelerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, geri dönüşüm agregalarının her boyutta normal agregaya göre birim ağırlığının daha düşük olduğu, özellikle ince agregalı geri dönüşüm agregalarının su emme kapasitelerinin çok yüksek olduğu görülmüştür. Geri dönüşüm agregalarını kullanarak üretilen betonlarda geri dönüşüm agregası oranı arttıkça taze betonun işlenebilirliğinin azaldığı, işlenebilirliği arttırmak için geri dönüşüm agregalarının betondaki kullanım oranına göre akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Betonda kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça 7 günlük ve 28 günlük beton basınç mukavemetinin düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte betonda geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça betonun yarmada çekme dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. 10 MPa silindir basınç mukavemetine sahip kötü betonlardan elde edilen geri dönüşüm agregalarının taşıyıcı olmayan betonlarda kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Demir (2009) yaptığı çalışmada geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının hem doğanın korunması hem de doğal kaynakların ekonomik kullanımının sağlanmasının yeni kuşaklarda çevre koruma bilinci kazandırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada geri kazanılmış agregaların teknik özellikleri, kullanım alanları, GKA ile yapılmış betonların özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar araştırılmıştır. Çok sayıda istatistiksel veriden yola çıkılarak geri kazanılmış agregaya kullanımının önemi vurgulanmıştır.

Durmuş vd (2009) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise C20, C25, C30, C35 sınıflarındaki betonlarda geri kazanılmış beton agregası üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde yapılan deneyler neticesinde betonların mühendislik değerleri bir alt sınıftaki betonun mühendislik değerine yaklaştığı görülmüştür. GKA kullanılmak istendiğinde tasarlanan beton sınıfının bir üst sınıfa göre karışım hesabı yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Morales *et al.* (2011) çalışması üretim süreçlerinden sonra elde edilen geri dönüşümlü agregaların karakteristik özelliklerinin açıklar. Bu agregalar içerdikleri tuğla kırıkları, seramik parçaları ve alçı taşı nedeniyle saf değildirler. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar bu standarttakilerle kıyaslandığında geri dönüşümlü agregaların belli oranlarda kullanılabilceği görülmüştür. Su emme oranı, sülfat içeriği ve klor içeriği açısından GKA kullanımı olumsuzken gradasyon dağılmaya karşı direnç ve yoğunluk gibi özelliklerinin standartlarla uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Kou *et al.* (2010) tarafından yapılan bir çalışmada ise geri dönüşüm agregası ilk olarak granit, mermer gibi doğal taşların kırılmasıyla ikinci olarak da beton molozlarının kırılmasıyla iki şekilde elde edilebileceği belirtilmiştir. Çalışmada 10 mm–20 mm aralığında %100 oranında iri geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonlar üzerinde yapılan basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri 28 gün, 1 yıl ve 5 yıl süresince tekrarlanmış ve neticede normal agrega ile üretilen betonlardan daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yang and Bao (2010) kırılmış kil tuğlalarının da kullanıldığı çalışmada geri dönüşüm agregalarının hem iri hem ince olarak kullanılabilceğini belirtmiştir ve %0, %50, %80 ve %100 oranlarında GKA kullanarak deneyler yapmıştır. Düşük işlenebilirliğe sahip olan bu agregalarla yapılan deneyler sonucunda dayanım ve durabilite özelliklerinin referans alınan normal agregalı betona göre, poroz yapısından dolayı daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Geri dönüşümlü agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde durulan bu makalede birinci derece önem arz eden yapılarda kullanılması durumunda bazı sınırlamalara dikkat edilerek kullanılması tavsiye edilmiştir.

Erdal (2011) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında inşaat moloz atıklarının beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması için doğal agrega ile üretilen geleneksel betonda kullanılan iri agrega inşaat moloz atıklarından elde edilen iri agrega ile %0, %50 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek beton numuneler üretilmiştir. Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral katkı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu %0, %1, %5 ve %30 oranında hacimce çimento ile yer

değiştirilerek ve hacimce %0,1 oranında polipropilen lifli ve lifsiz beton serileri incelenmiştir. Çok kapsamlı bir şekilde beton ve agregası hakkında bilgiler verildikten sonra yapılan deneylerin sonuçları irdelenmiştir.

Akbari *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış agreganın betonun özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Taze ve sertleşmiş beton üzerinde yaptıkları deneylerde s/ç oranı 0,60, 0,52 ve 0,43 olmak üzere 3 değerde alınarak ve %0, %15, %30 ve %50 oranlarında geri kazanılmış agregası kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda kullanılan geri kazanılmış agregası oranındaki artışa bağlı olarak %25 basınç dayanımı kaybı, %23 çekme dayanımı kaybı, işlenebilirlik kaybı ve yüksek su emme oranları gözlemlenmiştir.

Kou *et al.* (2011) tarafından yılında yapılan diğer bir çalışmada normal ve geri kazanılmış agregası ile üretilen betonlara farklı minerallerin (silis dumanı, uçucu kül, metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu) etkileri incelenmiştir. Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kuruma rötresi, klor etkisi ve ultra ses deneyleri yapılmıştır. Su/Çimento Oranı 0,50 alınmıştır. %0, %50 ve %100 oranlarında geri kazanılmış agregası, %10 silis dumanı, %15 metakaolin, %35 uçucu kül ve %55 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullandıkları çalışmada; normal ve geri kazanılmış betonlarda deney sonuçları, silis dumanı ve metakaolin betonların mekanik ve durabilite özelliklerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu da mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmiştir. Ayrıca Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu geri kazanılmış agregalı betonların durabilite özelliklerinde önemli gelişmeler göstermiştir.

Xiao *et al.* 2011) çalışmalarında %20, %30, %50, %60, %70 ve %100 oranlarında iri geri dönüşüm agregası kullanılmıştır. Çalışmada çok kapsamlı olarak beton ve agregası deneyleri yapılmıştır. Geri dönüşümlü agregaların mikro yapısı normal agregalardan daha karışık olduğundan bu agregalarla üretilen betonların basınç, çekme ve kesme dayanımları geleneksel betonlara göre daha düşük olup, kullanılan geri dönüşümlü agregası miktarındaki artışa bağlı olarak elastisite modülünde azalma ve karbonasyon

direnci ve klor geçirimsizliğinde de olumsuz sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Neticede geri dönüşümlü agregalar ile yapılan çalışmalarda daha dikkatli çalışılması gerektiği vurgulanmıştır.

Butler *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmanın amacı normal agregaya yerine geri dönüşümlü agregaya kullanılarak üretilen betonlarla donatı çeliği arasındaki aderans mukavemetinin ölçülmesidir. Çalışmada iki yöntem tercih edilmiştir. Birincisinde %100 geri dönüşümlü agregaya kullanılarak üretilen numuneler üzerinde ölçümler yapılırken diğerinde hedeflenen 30 MPa ve 50 MPa basınç dayanımlarını sağlayabilecek oranlarda geri dönüşümlü agregalar kullanılarak sonuçlar incelenmiştir. Maksimum tane çapı 19 mm olan geri dönüşümlü agregalar alınarak nitrik asit solüsyonu, donma çözünme çevrimine maruz bırakma ve yüksek ısı uygulama yöntemleri kullanılarak agregalara yapışmış olan çimento pastası uzaklaştırılmaya çalışılmıştır ve neticede agregaya boyutları küçülmüştür. En etkili yöntemin yüksek ısı uygulama olduğuna karar verilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde ise normal agregayla üretilen numunelerin geri dönüşümlü agregayla üretilen numunelere göre çelik donatı ile beton arasındaki aderans mukavemetinde %9-%19 oranlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tüfekçi (2011)'nin yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında ise normal agregaya ve geri kazanılmış agregaya %0, %25, %50 ve %100 oranlarında karıştırılmış betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için mineral katkı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu %0, %30 ve %60 oranında çimento ile karıştırılarak fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Beton ve agregaya için genel bilgiler detaylı bir biçimde verildikten sonra geri kazanımın önemi üzerinde durulmuştur.

Kumar and Dhinakaran (2012) yaptıkları çalışmada 5, 10 ve 15 yıllık betonlardan elde edilen geri kazanılmış agregalar kullanarak, silis dumansız, silis dumanı katkılı ve silis dumanı+süper akışkanlaştırıcı katılarak elde edilen betonların mekanik özellikleri incelenmiştir. Agregaya deneyleri, taze beton deneyleri, aşınma dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı deneylerinin yapıldığı sonucunda kullanılan geri kazanılmış agregaların elde edildiği betonların yaşı arttıkça, geri kazanılmış agregaya ile

üretilen betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımlarında azalmalar tespit edilmiştir. Ayrıca silis dumanı miktarının artışı ile betonların mekanik özellikleri arasında dikkate değer bir değişme olmadığı gözlemlenmiştir.

Kou *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada doğal ve geri dönüşümlü iri agregalar 10-20 mm boyutlarında, hacimsel olarak %0, %20, %50 ve %100 oranlarında kullanılmış ve %0, %25 ve %35 oranlarında uçucu kül katılarak dayanım ve durabilite özellikleri irdelenmiştir. Basınç dayanımı, kuruma rötresi, sünme değeri, klor ve su geçirimsizliği, karbonasyon derinliği gibi özelliklerinin normal agregalı betonlardan daha olumsuz olduğu görülmüştür. Geri kazanılmış agregaların zayıf olan özelliklerinin, ekonomik olarak da uygun olan uçucu kül gibi katkıların katılmasıyla iyileştiği görülmüştür.

Thomas *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada geri kazanılmış agregaların sahip oldukları yüksek poroziteden dolayı düşük durabilite özelliklerine sahip oldukları vurgulanmıştır. Fakat düşük tutulan su/çimento oranıyla bu olumsuzluklar azaltılabilir. %0, %20, %50 ve %100 oranlarında yapısal atıkların kırılmasıyla elde edilen geri kazanılmış agregalarla 25-50 MPa basınç dayanımı hedeflenerek üretilen betonlara çeşitli kimyasal ve mineral katkıların eklenmesi tavsiye edilmiştir. 150x300 mm boyutlarına sahip toplam 768 silindir numune incelenerek yoğunluk, emme kuvveti, porozite, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, karbonasyon, basınç altında penetrasyon, oksijen permabilitesi, beton mikro yapısı gibi özellikler araştırılmıştır.

Kou and Poon'un (2012) yapmış olduğu çalışmada %0, %50 ve %100 oranlarında iri geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonlara uçucu kül eklenerek durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Basınç dayanımı, rötre, sünme, kapilerite, permabilite, karbonasyon derinliği, klorid penetrasyonu... gibi dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda %25, %35 oranlarında F sınıfı uçucu kül kullanılarak düşük kaliteli geri kazanılmış agregaların özellikleri iyileştirilmiştir.

Zhao *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış agregaların sosyal, ekonomik ve çevresel faydalarını gözler önüne sermişlerdir. Ancak GKA'nın yapısal olmayan amaçlar için kullanılması, performans olarak normal betona göre hem kısa vadede hem uzun vadede olumsuz sonuçlar vermiştir. Varolan çalışmalar, çelik veya propilen lif kullanımının bu agregaların basınç dayanımlarını artırdığını ispat etmiştir. Fakat FRP kullanımı, üzerinde yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu nedenle bu çalışmada GKA ve FRP kullanılması ile üretilen betonların gerilme-şekil değiştirme davranışını anlamak ve geliştirmek için yapılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme diyagramı modeli tasarlanmıştır. Hem normal agregalı hem GKA'lı betonların FRP etkisiyle ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme diyagramları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda %20 oranına kadar GKA kullanılması, normal agregaya kullanılmasıyla aynı sonuçlar verdiği fakat %100 kullanılması dayanımı azalttığı görülmüştür.

Literatürde bulunan çok sayıda yerli ve yabancı kaynak incelendiğinde geri dönüştürülmüş agregaya kullanımının ekonomik ve çevresel faydaları üzerinde ortak bir kanıya varıldığı görülmüştür. Ancak geri dönüşümlü agregaların mikro yapısı normal agregalardan daha karışık olduğundan bu agregalarla üretilen betonların basınç, çekme ve kesme dayanımları geleneksel betonlara göre daha düşük olup, kullanılan geri dönüşümlü agregaya miktarındaki artışa bağlı olarak elastisite modülünde azalma ve karbonasyon direnci ve klor geçirimsizliğinde de olumsuz sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Neticede geri dönüşümlü agregalar ile yapılan çalışmalarda daha dikkatli çalışılması gerektiği vurgulanmıştır.

Yine bir çok çalışmanın birleştiği ortak nokta ise %30 dan fazla GKA kullanımının betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilediğidir. Ayrıca betonun dayanımını artıran katkı maddelerinin (silis dumanı, uçucu kül, vs..) kullanılması GKA'lı betonlarda olumlu etkiler yapmıştır. Geri dönüştürme aşamasında dayanımı yüksek olan beton atıklarından üretilen agregaların kullanıldığı betonlarında dayanımlarının da yüksek olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülmüş beton agregasının kırma agregalara göre daha düşük özgül ağırlığa ve daha yüksek aşınma yüzdesine sahip olduğu belirtilmektedir. Ayrıca doğal agregaya yüzeyine yapışık eski harçların beton

agregasının elastisitesi, sünme ve rötre gibi deformasyon özelliklerini etkileyeceği sonucuna varılmış ve agrega emme suyuna ilaveten %10 daha fazla suya gereksinim olduğu belirlenmiştir.

2.3. Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Donma-Çözülme Dirençleri ile İlgili Literatür Çalışmaları

Gökçe *et al.* (2003) tarafından yapılan çalışmada laboratuvar ortamında üretilen betonların çeneli kırıcı yardımıyla kırılarak elde edilen geri kazanılmış agregalarla üretilen betonların donma çözünme dirençleri araştırılmıştır. %0, %25, %50 ve %100 oranlarında geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonlara hava sürükleyici katkı, silis dumanı ve metakaolin gibi katkıları eklenerek donma-çözülme dirençleri artırılmaya çalışılmıştır. Başlangıçta hava sürükleyici katkı eklenerek üretilen betonların kırılmasıyla elde edilen agregalarla dökülen betonlara hava sürükleyici katkı eklenmesiyle 500 çevrimde araştırılan donma çözünme dirençleri oldukça iyi sonuçlar vermiştir; öyle ki normal agrega ile üretilen betonlardan daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Geri kazanılmış agrega ile üretilen betonlar yüksek su emme oranına sahip olmasına rağmen sahip oldukları gözenekli yapı nedeniyle donma-çözülmeye karşı daha dayanıklıdır. Hava sürükleyici katkı olmadan üretilen betonlardan elde edilen agregaların az miktarda katılmasıyla donma çözünmeye daha dayanıklı betonlar üretilirken geri kazanılmış agrega miktarı arttıkça bu dayanıklılığın azaldığı görülmüştür.

Petkoviç *et al.* (2003) tarafından Norveç'te yapılan çalışma geri kazanılmış agrega ile üretilen betonların durabilite özellikleri üzerine bir özet niteliği taşımaktadır. Yıllık yaklaşık 1,5 milyon ton olan inşaat atığının tahmini 1,1 milyon tonu beton ve briket agregası olarak değerlendirilmekte olduğunu vurgulayan çalışmanın en önemli odak noktaları donma-çözünme dayanımları ve su drenajından kaynaklanan degradasyondur. Test sonuçları bu agregalarla üretilen betonların donma çözünme dirençleri açısından uygun olduğunu gösterse de eritici tuzlara maruz bırakılan betonların donma-çözünme dayanımları gibi zor şartlarda yeterli olmadığını göstermiştir. Su drenajından

kaynaklanan degradasyon geri kazanılmış agregalı betonların durabilitesi açısından hendekler, yol temelleri gibi bağlayıcısız uygulamalarda büyük önem arz etmektedir. Çalışmada beton kırıkları ve karışık materyaller olmak üzere iki tip agrega kullanılmıştır. Donma-çözünme dirençlerini araştırmak için NaCl içeren karışımda kür edilen numunelerde oldukça yüksek kütle kayıpları ölçülmüştür. Sudan kaynaklanan bozulmaları simule etmek için hızlandırılmış deney ekipmanları kurulmuştur. Geri kazanılmış agregalar sürekli akan suya maruz bırakılmış ve akan suyun malzemede oluşturduğu değişimler gözlemlenmiştir. Suyun ph seviyesi 4 ve 7 olmak üzere iki seviyede tutulmuştur. Makalenin yayınlandığı tarihte deneylerin henüz tam olarak sonuçlanmadığı geri kazanılmış agregaların durabilite özelliklerinin araştırılmasına devam edildiği belirtilmiştir.

Zaharieva *et al.* (2004) geri kazanılmış agrega içeren betonların durabilite özelliği olarak donma çözünme dirençlerini normal agregalı betonlarla kıyaslayarak ölçmeyi hedeflemişlerdir. Geri kazanılmış agregalı betonların donma-çözülme dirençlerinde olan çelişkiler onları bu konuda çalışma yapmaya teşvik etmiştir. 0-6 mm ince ve 6-20 mm iri agrega olarak kullanılan geri kazanılmış agregalarla üretilen betonlar bu agreganın yüksek su emme özelliğine sahip olması nedeniyle süperakışkanlaştırıcı karıştırılarak dökülmüştür. 3 sınıf örnek oluşturmuşlardır. İlk grupta iri agrega olarak geri kazanılmış, ince olarak doğal kum kullanmışlardır (RAC1). İkinci grupta tamamen geri kazanılmış agregalar suya doygun olarak kullanılmış (RAC2), üçüncü grupta ise yine tamamen geri kazanılmış agrega fakat suya doygun olmadan kullanılmış (RAC3). Yapılan deneyler sonucunda RAC1 grubunun diğer gruplara göre donma çözünmeye daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ancak yine de geri kazanılmış agregaların düşük donma-çözülme dirençleri nedeniyle değişken iklimlerde kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır.

Levy and Helene (2004) tarafından yapılan çalışma atık betonların ve kil tuğlalarının çeneli kırıcılarla kırılmasıyla elde edilen geri kazanılmış iri ve ince agregalarla üretilen betonların durabilite özellikleri incelenmiştir. %0, %20, %50 ve %100 oranlarında geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonların su absorpsiyonu, toplam boşluk hacmi, basınç dayanımları ve karbonasyon değerleri araştırılmıştır. Yeni ve kullanışlı

bir yöntem olan 'mix design nomogram' yönteminin kullanıldığı bu çalışma araştırmacıların üretilen betonun özelliklerini diğer beton aileleriyle kıyaslayabilmeleri için tercih edilmiştir. İnce ve iri geri dönüşüm agregaları basınç dayanımları 25 MPa olan betonların 6 ay bekletildikten sonra ve kil bloklarının 1 yıl bekletildikten sonra kırılmalarıyla elde edilmiş ve iri agregada 25 mm ince agregada 2,4 mm maksimum tane boyutu seçilmiştir. 20-40 MPa civarlarında beton üretilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça durabilite özelliklerinin kötüleştiği görülmüş ve yaklaşık %20 oranlarında kullanılması tavsiye edilmiştir.

Topçu and Şengel (2004) C14 dayanımına sahip atık betonların kırılmasıyla elde ettikleri geri kazanılmış agregaları kullanarak 28 günlük silindirik basınç dayanımı 20 MPa ve 16 MPa olan beton numuneler üretmeyi hedeflemişlerdir. Karışımlarda %30, %50, %70 ve %100 oranlarında geri kazanılmış agregalar kullanmışlardır. Elde ettikleri numunelerin dayanımlarını Schimdt test çekici yöntemiyle bulduktan sonra numuneleri 8 gün boyunca donma-çözünme çevrimlerine maruz bırakılmışlardır. Deneyle sonuçunda GKA miktarındaki artışa bağlı olarak dayanım (basınç, çekme), işlenebilirlik, birim ağırlık değerleri azalırken donma-çözülme direncinin fark edilebilir derecede düşmediği gözlemlenmiştir. Kullanılacak geri kazanılmış agrega miktarı %30 u geçmediği takdirde C16 betonu üretilebileceği ve durabilite değerlerini de sağladığı görülmüştür. Ayrıca çevreye ve ekonomiye olan yadsınamaz katkıları da göz önüne alındığında geri dönüştürülmüş agreganın beton üretiminde kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Debieb *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışmada kirletilen betonların kırılmasıyla elde edilen agregaların kullanılmasıyla üretilen betonların mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Doğal agregayla üretilen betonların bir kısmı suda kür edilerek çeneli kırıcılarla kırılarak geri dönüşüm agregası elde edilirken bir kısmı da deniz suyunda, klor solüsyonunda, sülfat solüsyonunda 1 yıl boyunca kür edilerek kirletilmiş geri dönüşüm agregaları elde edilmiştir. %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonların analizi neticesinde klora ve sülfata karşı daha hassas, su emmelerinin ise

daha yüksek olduğu görülmüş ve agregaların kullanım oranlarına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. 100x100x100 mm boyutlarında numunelere, -15°C-+15°C'de 24 saatte bir uygulanan 14 donma çözünme çevrimi neticesinde %1 den fazla kütle kaybının olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu agregalarla üretilen betonların yüksek porozitesine rağmen donma çözünmeye karşı direncinin oldukça iyi olduğu belirtilmiştir.

Richardson *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış agrega ile üretilen betonların donma-çözülme dirençlerini ağırlık kaybı ve son basınç dayanımı testlerinin yapılmasıyla bulmuşlardır. Çalışmada bu agregaların olumsuz özelliklerini iyileştirmek için hava sürükleyici katkı ve polipropilen lif katkısı kullanmışlardır. Basınç dayanımı bilinmeyen betonları kırarak elde ettikleri geri kazanılmış agregaları yıkanmış olarak ve doygun kuru yüzey durumuna getirdikten sonra maksimum tane çapı 20 mm olacak şekilde kullanmışlardır. Ürettikleri 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneleri 56 donma çözünme çevrimine maruz bırakmışlardır ve sonuçta geri kazanılmış agregalı betonların normal agregalı betonlara nazaran donma-çözülme çevrimlerine daha dirençli olduğu görülmüş ve eklenen katkılarında bu direnci olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir.

Paekh and Modhera (2011) tarafından Hindistan'da yapılan çalışma geri kazanılmış agrega kullanımının sürdürülebilir kalkınma için ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştır. Basınç dayanımı çekme dayanımı, işlenebilirlik gibi temel özelliklerini dikkate alarak normal agregalarla kıyaslamışlardır. %20 ince, %30 iri geri kazanılmış agrega içeren betonların dayanımları %40'lara kadar düşük çıkmıştır. Kullanılan agrega miktarı arttıkça bu düşüş de orantılı biçimde artmaktadır. Fakat durabilite çalışmalarında durum böyle değildir. Geri kazanılmış agregalı betonlar normal betonlardan daha iyi bir karbonasyon direncine sahiptir. Hava sürükleyici katkılı %100 geri kazanılmış agregalı betonların donma-çözülme dayanımı (56 günde) normal agregalı betonlarla hemen hemen aynı değerdedir. Sülfat ataklarında da herhangi bir olumsuzluk tespit edilmemiştir.

Medina *et al.* (2013) mikro çatlaklara sebep olduğu için donma-çözülme çevrimlerinin betonu etkileyen en zararlı aktivitelerden olduğunu vurgulamaktadırlar. Bu çatlakların oluşumu malzemelerin mekanik davranışlarını etkilemeleri ile birlikte zararlı maddelerin betonun içerisine sızmasına ve durabilitesinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Bu çalışma %0, %20 ve %25 oranlarında kullanılan ve banyo seramik malzemelerini içeren endüstriyel atıkların çeneli kırıcılar yardımıyla kırılmasıyla elde edilen agregalarla üretilen betonların 56 donma-çözülme çevrimi neticesinde durabilite özelliklerini incelemektedir. 50x150x150 mm³ boyutlarında oluşturulan numuneler donma-çözülme çevrimi ve magnezyum sülfat solüsyonu olmak üzere iki yöntemle araştırılmıştır. Çalışmalar neticesinde kullanılan geri kazanılmış agrega miktarı arttıkça donma çözülme direncinin azaldığı gözlemlenmiştir. Fakat bu atıkların esaslı bir teknikle geri dönüşümü yapıldığı takdirde sürdürülebilir kalkınmada ekonomik ve çevresel yararlarının yadsınamayacağı vurgulanmıştır.

Hwang *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeren betonların özellikleri incelenmiştir. Geri kazanılmış agregalı betonların olumsuz özelliklerini gidermek için geleneksel portland çimentosu yerine %30 toz yakıt külü(uçucu kül) (PFA) ve %60 granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) kullanılmıştır. Bu betonların 180 günlük basınç dayanımları ve klor, donma-çözülme ve sülfat etkilerine karşı dirençleri ölçülmüş sonuç olarak basınç dayanımının azalmasına rağmen klor, sülfat ve donma ataklarına karşı direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Hatta PFA ve GGBS içeren betonların basınç dayanımları normal agregalı betonlardan daha yüksek çıkarken klor geçirgenliği de daha düşük çıkmıştır. 91 gün süren kür şartlarından sonra. %30 PFA içeren betonların donma-çözülme direnci diğerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca sülfat ataklarına karşı da yine uçucu kül ve fırın cürufu içerene GKA'lı betonların normal agregalı betonlara göre daha yüksek direnç gösterdiği görülmüştür.

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan her bir malzemeyle ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Deneylede Aşkale Çimento Fabrikası (Erzurum) üretimi olan Normal Portland Çimentosu (CEM I 42,5R) kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özellikleri kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelgelerde belirtilen analizler üretici firma tarafından yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Standart değeri	Sonuçlar (%)
Toplam SiO ₂	-	18,72
Çözünmeyen Kalıntı	max 5,0	0,95
Al ₂ O ₃	-	4,54
Fe ₂ O ₃	-	3,43
CaO	-	62,25
MgO	-	3,34
SO ₃	max 4,0	2,98
Kızdırma Kaybı	max 5,0	3,24
Na ₂ O	-	0,19
K ₂ O	-	0,68
Cl ⁻	max 0,1	0,0098
Toplam	-	100
Serbest CaO	-	0,78
Toplam Katkı	-	-

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Karakteristikler		Standart değeri	Sonuçlar (%)
45 mikron elekte kalıntı(%)		-	8,19
90 mikron elekte kalıntı(%)		-	-
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)		-	3812
Özgül Ağırlık (g/cm ³)		-	3,13
Priz süresi (Vikat) Dakika	Başlangıç	min 60	140
	Bitiş	-	186
Su İhtiyacı(%)		-	29,90
Hacim Genleşmesi(mm) (Le Chatelier)		max 10	1
Basınç Dayanımı (MPa)	1. gün	-	-
	2. gün	Min 20,0	25,7
	7. gün	-	-
	28. gün	Min 42,5 Max 62,5	57,9

3.1.2. Su

Deneylerde Atatürk Üniversitesi şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.3. Agregası

Deneylerde normal iri agregası olarak kalker esaslı 8, 16 ve 22,4 mm boyutlarında kırma taş ve 31,5 mm boyutlu dere malzemesi, ince agregası olarak dere kumu, filler malzeme olarak 0-0,125 mm boyutlu kalker tozu kullanılmıştır. Bu malzemeler Korkmaz Beton A.Ş. (Erzurum)'den temin edilmiştir. 4-31,5 mm boyutlarındaki geri kazanılmış agregası ise İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme AŞ (İSTAÇ)'a ait geri kazanım tesisinden temin edilen moloz atıklarından elde edilmiş agregaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların sınıf ve cinsleri Çizelge 3.3'te görüntüleri ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Agregaların genel özellikleri TS 706 EN 12620+A1 (Anonim 2009a)'e göre belirlenmiştir. Agregaların tane yoğunluğu, yüzey nemi, su emme oranı deneyleri TS EN 1097-6 (Anonim 2013)'ya göre yapılmış parçalanma direnci tayini ise TS EN 1097-2 (Anonim 2010a)'ye uygun olarak yapılan Los Angeles deneyi ile belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan agrega sınıfları

Tane boyutu (mm)	Agrega çeşidi	Agrega Cinsi
0-0,250	Filler Malzeme	Kalker
0-0,250	İnce Agregası	Dere Malzemesi
0,250-0,50		
0,50-1		
1-2		
2-4		
4-8	İri Agregası	Kırma Taş (Kalker) + GKA
8-16		
16-22,4		Dere Malzemesi + GKA
22,4- 31,5		

Deneylerde kullanılan agregaların özellikleri 3.3.1. Agregası deneyleri bölümünde verilmiştir.



22,4-31,5 mm GKA



16-22,4 mm GKA



4-8 mm GKA



Şekil 3.1. Deneşlerde kullanılan agregaların resimleri

3.1.3.a. Geri kazanılmış agrega içerisindeki çeşitli maddeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan geri kazanılmış agregalar üzerinde yapılan ön incelemelerde bir kısmı inorganik olmayan maddeler (ahşap gibi) olmak üzere farklı türden malzemeler içerdiği tespit edilmiştir. Yıkıntı artıklarında bulunması doğal olan bu maddeler aşağıdaki resimlerde (Şekil 3.2) gösterilmiştir.



Şekil 3.2. GKA içerisindeki çeşitli maddeler ve GKA'ların genel görüntüleri

3.1.4. Katkı malzemeleri

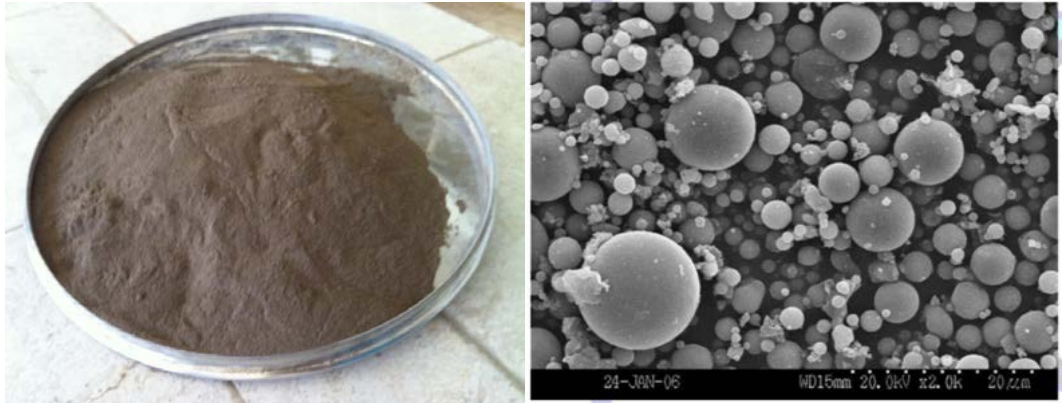
Deneysel çalışmalarda mineral katkı malzemesi olarak uçucu kül, kimyasal katkı olarak süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

3.1.4.a. Uçucu kül

Çalışmalarda Kütahya Çimento Kü-Blok ve Pülverize Uçucu Kül Tesisinden temin edilen ve aşağıda özellikleri (Çizelge 3.4.) verilen uçucu kül kullanılmıştır. Çizelgeden görüleceği üzere deneylerde kullanılan uçucu kül ASTM C 618 (Anonymous 2008)'e göre F sınıfı ve “düşük kireçli” uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün resmi ve üretici firmadan alınan SEM görüntüsü (Anonim 2014d) Şekil 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)							
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	K.Kaybı
53,69	3,40	20,29	11,83	4,09	0,99	2,53	2,01
Fiziksel özellikler							
Özgül Ağırlık							1,98
Özgül Yüzey (cm ² /gr)							4020



Şekil 3.3. Uçucu külün görünüşü ve SEM görüntüsü

3.1.4.b. Süper akışkanlaştırıcı

Deneysel çalışmalarda GRACE ADVA Flow140 ticari markasıyla piyasada satılan modifiye sentetik karboksilat polimer esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Üretici firma, ADVA Flow 140'ın yüksek işlenebilirlikteki betonların slump koruma özelliklerinin geliştirilmesi için tasarlandığını belirtmektedir. Bu katkı maddesinin içeriği ve özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Süperakışkanlaştırıcı içeriği ve özellikleri

İçeriği	Modifiye sentetik karboksilat polimeri
Yapı	Homojen sıvı
Renk	Koyu kahverengi
Yoğunluk (20°C)	$1.085 \pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ (TS 781 ISO 758)
Ph (20°C)	5.0 ± 1.0 (TS 6365 EN 1262)
Toplam Klorür Miktarı	< 0.10 M. -(TS 1116 EN ISO 1158)
Suda Çözünen Klorür Miktarı	<0.10 M. -(TS EN 480-10)
Alkali Miktarı	<7.0 M. -(TS EN 480-12)
Önerilen dozaj	Toplam çimento miktarının %0.6-%1.5'i

3.1.4.c. Hava sürükleyici katkı maddesi

Hava sürükleyici katkı maddesi olarak GRACE Darex AE3 ticari isimli hava sürükleyici beton katkısı kullanılmıştır. Darex AE3, hava sürüklenmiş betonlar, bloklar ve çimentolu bileşimlerin üretiminde kullanılan sıvı hava sürükleyici katkı maddesidir. Özellikleri aşağıdaki tabloda (Çizelge 3.6) verilmiştir.

Çizelge 3.6. Hava sürükleyici katkı maddesi içeriği ve özellikleri

İçeriği	Sodyum tuzları karışımı
Yapı	Homojen sıvı
Renk	Koyu kahverengi
Yoğunluk (20⁰C)	1.010 ± 0.010 g/cm ³ (TS 781 ISO 758)
Ph (20⁰C)	7.0 ± 1.0 (TS 6365 EN 1262)
Toplam Klorür Miktarı	< 0.10 M. -(TS 1116 EN ISO 1158)
Suda Çözünen Klorür Miktarı	<0.10 M. -(TS EN 480-10)
Alkali Miktarı	<7.0 M. -(TS EN 480-12)
Önerilen dozaj	Toplam çimento miktarının %0,06-%0,2'si

3.2. Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama

Karışımlarda su/çimento oranı(0,53), bağlayıcı dozajı (350 kg/m³), uçucu kül oranı (%15) ve süperakışkanlaştırıcı miktarı (%1,5) sabit tutulmuştur. Geri kazanılmış agrega oranı, maksimum agrega tane çapı ve hava sürükleyici katkı oranı ise parametre olarak seçilmiştir.

Geri kazanılmış agrega (GKA) oranı; %0, %15, %30, %45 ve %60 olarak beş seviyede incelenmiştir. Maksimum tane çapı (d_{max}); 16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm olarak üç seviyede, hava sürükleyici katkı miktarı da (AEA) %0,06, %0,13 ve %0,20 olmak üzere üç seviyede incelenmiştir. Hava sürükleyici katkı oranının seviyeleri Çizelge 3.6'da önerilen dozajın alt ve üst sınırları ile bu iki değer ortası olacak şekilde seçilmiştir. Belirtilen şekilde seçilen parametre ve seviyelerinden hareketle üretilen 45 farklı karışım Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Karışımları oluşturan parametreler ve seviyeleri

GKA Oranı (%)	Maksimum Agrega Tane Çapı (d_{max})(mm)		
	16	22,4	31,5
0	%0,06 AEA	%0,06 AEA	%0,06 AEA
	%0,13 AEA	%0,13 AEA	%0,13 AEA
	%0,20 AEA	%0,20 AEA	%0,20 AEA
15	%0,06 AEA	%0,06 AEA	%0,06 AEA
	%0,13 AEA	%0,13 AEA	%0,13 AEA
	%0,20 AEA	%0,20 AEA	%0,20 AEA
30	%0,06 AEA	%0,06 AEA	%0,06 AEA
	%0,13 AEA	%0,13 AEA	%0,13 AEA
	%0,20 AEA	%0,20 AEA	%0,20 AEA
45	%0,06 AEA	%0,06 AEA	%0,06 AEA
	%0,13 AEA	%0,13 AEA	%0,13 AEA
	%0,20 AEA	%0,20 AEA	%0,20 AEA
60	%0,06 AEA	%0,06 AEA	%0,06 AEA
	%0,13 AEA	%0,13 AEA	%0,13 AEA
	%0,20 AEA	%0,20 AEA	%0,20 AEA

Deneyler esnasında numune kodlamalarında aşağıdaki yol izlenmiştir: ilk üç karakter maksimum agrega çapını, ondan sonraki üç (kontrol numunelerinde iki) karakter GKA oranını (yüzde olarak), en son iki ya da üç karakter ise hava sürükleyici katkı maddesi oranını (on binde olarak) göstermektedir. Buna göre;

16D0G6A: 16 mm maksimum agrega çapı, %0 GKA oranı ve %0.06 oranında hava sürükleyici katkı içeren KONTROL betonunu,

31D60G20A: 31,5 mm maksimum agrega çapı, %60 GKA oranı ve %0.20 oranında hava sürükleyici katkı içeren betonu göstermektedir.

3.3. Deneysel Çalışma

GKA ile üretilen betonların donma-çözülme dirençlerinin araştırıldığı bu çalışmada geleneksel beton üretimi için kullanılan normal agregaya ile inşaat yıkıntı atığından elde edilen GKA'lar yukarıda belirtilen oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen 15x15x15 cm³'lük küp beton numunelerde taze beton deneyi olarak birim ağırlık, çökme ve hava içeriği tayini deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri olarak ise; birim ağırlık, hacimce su emme, kılcal su emme, basınç dayanımı ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır.

Çalışmada geri kazanılmış agregaya (GKA) oranı parametresi beş seviyeli, maksimum tane çapı (d_{max}) ve hava sürükleyici katkı miktarı (AEA) parametreleri ise üç seviyeli olarak belirlenmiştir. Deneye tabi tutulacak numune sayısı ise Tam Faktoriyel Deney Tasarımı yöntemine göre planmış olup bu yöntemle göre $5^1 \times 3^2 = 45$ adet karışım üretilmiştir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme A.Ş. (İSTAÇ)'tan temin edilen molozlardan elde edilen GKA'lar, geleneksel beton üretiminde kullanılan doğal agregaya ile aynı granülometriye getirmek amacı ile çeneli kırıcı ile kırılmıştır. Doğal agregaya ile üretilen beton serileri ile aynı işlenebilmeye sahip, geri kazanılmış agregalı beton serileri üretilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 90 adet 15x15x15 cm boyutlu küp numune ve 90 adet de 15x15x7,5 cm boyutlu donma-çözülme numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler, CDF yönteminde belirtildiği gibi deneye tabi tutulan beton numune yüzeyi için kalıp görevi yapacak hidrofobik yüzeye sahip fiberglas malzemeler küp beton kalıplarının ortasına yerleştirilerek elde edilmiştir.

3.3.1. Agregaya deneyleri

Deneyde kullanılan agregalar üzerinde yoğunluk, su emme, yüzey nemi, donma-çözülme ve Los Angeles deneyleri yapılmıştır.

3.3.1.a. Yoğunluk, su emme, yüzey nemi deneyi

Çalışmada TS EN 1097-6 (Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini) (Anonim 2013)'de belirtilen yöntemler izlenerek agregaların yoğunluk, su emme ve yüzey nemleri belirlenmiştir. Aşağıda her bir deneyde yararlanılan bağıntılar verilmiştir.

i) Yüzey nemini tayini için:

$$N = [(M_0 - M_1) / M_1] * 100 \quad (3.1)$$

Burada;

N: Agreganın yüzey nemi oranı (%)

M_0 : Deney numunesi deney başlangıcındaki ağırlığı (g)

M_1 : Deney numunesinin doymuş kuru yüzey halindeki ağırlığı (g)

ii) Doymuş ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu için:

$$\rho_{ssd} = M_1 / [M_1 - (M_2 - M_3)] \quad (3.2)$$

Burada;

M_1 : Doymuş ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g)

M_2 : Doymuş agrega numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi (g)

M_3 : Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g)

iii) Su emme oranının tayini için:

$$W_{A24} = 100 * (M_1 - M_4) / M_4 \quad (3.3)$$

M_4 : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g)

Bu formüldeki M_1 notasyonu yukarıdaki ile aynıdır.

Yukarıda belirtilen formüller kullanılarak doğal ve geri kazanılmış agregalar üzerinde TS EN 1097-6(Anonim 2013)'ya uygun olarak yapılan deneylerde bulunan agregaların yüzey nemi, doygun kuru yüzey tane yoğunluğu ve su emme oranı değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Agregaların yüzey nemi, tane yoğunluğu ve su emme oranları

Tane sınıfı (mm)	Deney adı		
Normal iri agrega	Yüzey Nemi (%)	DKY Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	Su Emme (%)
22,4 – 31,5	-0,90	2,71	1,75
16-22,4	-0,25	2,68	0,96
8 – 16	-0,10	2,68	1,59
4 – 8	-1,23	2,63	1,89
2 – 4	-2,34	2,44	4,49
0 – 2	-0,99	2,44	4,99
Geri kazanılmış agrega			
22,4 – 31,5	-2,65	2,33	7,80
16 - 22,4	-2,76	2,37	6,94
8 – 16	-2,69	2,43	6,02
4 – 8	-6,19	2,22	10,40

3.3.1.b. Los Angeles deney metodu ile aşınma direncinin tayini

İri agregaların aşınma direncinin tayini için yapılan bu deney TS EN 1097-2 (Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar) (Anonim 2010a)'ye göre gerçekleştirilmiştir. . Deneyde, agrega numunesi, dönen tamburda çelik bilyeler ile birlikte döndürülmüş, dönme işlemi (500 devir) tamamlandıktan sonra da malzeme, 1,6 mm'lik elek kullanılarak TS EN 933-1'e göre yıkanıp elenmiştir. Daha sonra da 1,6 mm elekte kalan kısım

(110±5)°C'deki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Agregaların aşınma deneyi öncesine (Şekil 3.4) ve sonrasına (Şekil 3.5) ait görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.4. Aşınma (Los Angeles) deneyi öncesi agregalar



Şekil 3.5. Los Angeles deneyi sonrası agregalar

Los Angeles kat sayısı (LA) aşağıdaki eşitlik (4) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$LA=(5000-m)/50$$

(3.4)

Formüldeki m: 1,6 mm lik elek üzerinde kalan agrega (g)'dir

Geri kazanılmış agregalar ve normal agregalar üzerinde yapılan Los Angeles deney sonuçları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Aşınma deneyi sonuçları

Agrega türü	Aşınma oranı (%)
Kırma taş (Kalker)	15,4
Geri kazanılmış agrega	38,04

Aşınma yüzdesi ne kadar küçükse, agreganın parçalanmaya karşı direnci o kadar yüksektir. Genel olarak bu kayıp yüzdesinin beton agregasında %50'yi geçmemesi istenir (Baradan vd 2012). Çizelge 3.9'dan da görüleceği üzere her iki agrega türünün aşınma oranları da literatürde belirtilen oranının altındadır. Bununla birlikte GKA'nın kalker kökenli kırmataş agreganın aşınma değerinin iki katından daha fazla bir aşınma oranına sahip olduğunu da belirtmek gerekir (Topçu and Şengel 2004) ve (Erdal 2011) da GKA'ların aşınma oranlarının normal agregalardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

3.3.1.c. Agregaların donma çözülme dirençleri

Agregaların donma-çözülme dirençleri TS EN 1367-1 (Agregaların ısıl ve bozunma özelliklerini tayin için deneyler-Bölüm 1: Donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini) (Anonim 2009c)'e göre yapılmıştır.

Deney için kırma taş agregalar ile geri kazanılmış agregalardan alınan 8-16 mm boyutlarındaki 2000 gr'lık numuneler (+20°C)-(-20°C) sıcaklık aralığında 16 saatte dondurulup 8 saatte tekrar çözdürülerek günde bir çevrim olacak şekilde 10 çevrim uygulanmıştır. Onuncu döngünün tamamlanmasından sonra her iki kabın içindeki malzeme, deney numunesini hazırlamak için kullanılan alt elek büyüklüğünün yarısı

kadar göz açıklığına sahip (4 mm) bir deney eleğinin üzerine boşaltılıp elenmiştir. Elek üzerinde kalan agregaya (110±5)°C'ta sabit kütleye kadar kurutulmuş, daha sonra da ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş tartılmıştır (M₂). Donma-çözülme deneyi sonucundaki kütle yüzde kaybı (F), aşağıdaki eşitlik (5) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.5)$$

Burada;

M₁: Üç deney numunesinin toplam ilk kuru kütlesi(g),

M₂: Belirtilen elekte tutulan üç deney numunesinin toplam nihai kuru kütlesi (g),

F: Donma-çözülme döngüsünden sonra üç deney numunesinin kütlece yüzde kaybıdır.

Normal agregaya ve geri kazanılmış agregaların donma-çözülme deneyi sonucunda yüzde kütle kaybı değerleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Agregaların donma-çözülme deneyi sonuçları

Agrega türü	Kütle kaybı (%)
Kırma taş	0,95
Geri kazanılmış agregaya	13,75

Çizelge 3.10'dan da anlaşılacağı üzere donma çözülme çevrimleri sonucu kalker kökenli kırma taş agregaya %0,95 kütle kaybına uğrarken geri kazanılmış agregalar %13,75 kütle kaybına uğramıştır. Parçalanmış agregaya oranının %4'ün altında olmaması tavsiye edilmektedir (Baradan vd 2012). Buna göre kullanılan kalker kırma taş agregaların donma-çözülme karşı dirençli olduğu söylenirken geri kazanılmış agregaların donma-çözülme dirençlerinin düşük olduğu söylenebilir. Durmuş vd (2009)'da da paralel sonuçlar elde edilmiştir.

3.3.2. Beton karışım hesapları ve numune üretimi

Beton karışım hesapları TS 802 (Beton karışım tasarımı hesap esasları) (Anonim 2009b) standardına göre yapılmıştır. Beton üretimi ise TS EN 206 (Beton-Özellik, performans, imalât ve uygunluk) (Anonim 2014e)'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol betonu (16D0G6A)'na ait bir karışım hesabı örneği Çizelge 3.10'da, en yüksek oranda GKA kullanılan betona (31D60G20A) ait karışım hesabı ise Çizelge 3.11'de verilmiştir. Karışımlarda başlangıçta çimento dozajı 350 kg/m^3 olarak alınmış, ancak çimento miktarının %15'i kadar (52,5 kg) kullanılan uçucu kül çimento miktarından düşülmüştür. Bu nedenle net çimento dozajı $297,5 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplarda verilmiştir.

Çizelge 3.11. 16D0G6A kodlu betonun karışım hesapları

Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Özgül ağırlık	Yüzey nemi (%)	Düzeltilmiş ağırlıklar
Çimento	297,5	95,05	3,13		297,5
Su	185,5	185,5	1,00		207,4
Uçucu kül (%15)	52,5	22,5	2,33		52,5
Super Akış. (%1.5)	5,3	4,8	1,09		5,3
Hava (%1)	0,0	10,0	-		
Hava Sürükleyici (%0,06)	0,2	0,2	1,01		0,2
Agrega					
Filler (%5)	93,42	34,09	2,74		93,4
0/2 mm (%25)	391,9	161,9	2,42	-1,2	387,3
2/4 mm (%25)	408,1	161,9	2,52	-2,0	400,3
4/8 (NA) (%25)	425,9	161,9	2,63	-1,2	420,7
8/16 (NA) (%25)	434,0	161,9	2,68	-0,1	429,7
TOPLAM	2294,3	1000,0			2294,3

Çizelge 3.12. 31D60G20A kodlu betonun karışım hesabı

Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Özgül ağırlık	Yüzey nemi (%)	Düzeltilmiş ağırlıklar
Çimento	297,5	95,05	3,13		297,5
Su	185,5	185,5	1,00		207,4
Uçucu kül (%15)	52,5	22,5	2,33		52,5
Super Akış. (%1.5)	5,3	4,8	1,09		5,3
Hava (%1)	0,0	10,0	-		
Hava Sürükleyici (%0,20)	0,7	0,7	1,01		0,7
Agrega					
Filler (%5)	93,3	34,1	2,74		93,4
0/2 mm (%25)	391,6	161,8	2,42	-1,2	387,0
2/4 mm (%25)	407,8	161,8	2,52	-0,16	407,2
4/8 (NA)(%25)	170,2	64,7	2,63	-1,23	168,2
8/16 (NA) (%8,3)	57,8	21,6	2,68	-0,10	57,3
16/22,4 (NA) (%8,3)	57,8	21,6		-0,25	56,4
22,4/31,5 (NA) (%8,3)	58,4	21,6		-0,90	58,0
4/8 (GKA, NA*%60)	218,5	97,1	2,25	-6,96	204,3
8/16 (GKA, NA*%60)	74,4	32,4	2,30	-6,5	69,9
16/22,4 (GKA, NA*%60)	76,7	32,4	2,37	-6,72	71,9
22,4/31,5 (GKA,NA*%60)	76,1	32,4	2,35	-6,77	71,2
TOPLAM	2071,5	1000,0			2076,4

Karışım hesaplarından da anlaşılacağı üzere; uçucu kül çimentoya ikame edilerek kullanılırken iri ve ince agregası oranı %50 olarak korunmuştur. Çimento dozajının belirlenmesinde TS EN 206 (Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk) (Anonim 2014e)'e göre XF4 türü çevresel etkiye (buz çözücü madde içeren su veya deniz suyu ile yüksek derecede doygun) maruz kalacak betonlar için önerilen çimento dozajından (340 kg/m^3) biraz fazla bir dozaj değeri (350 kg/m^3) seçilmiştir. Su/çimento oranı belirlenirken de aynı yaklaşımla numarası verilen standartta XF4 için verilen 0,45 oranı seçilmiş ise de ön denemelerde betonun işlenebilme sorunu yaşadığı tespit edildiğinden s/ç oranı 0,53 olarak belirlenmiştir. Agregalar karışıma doğal nem durumlarında

katılmış fakat karışım hesapları DKY durumuna göre yapıldığından çok sık olarak yüzey nemi ölçümleri yapılarak hesaplarda düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 3.12’de dökülen beton numunelerin karışım hesapları detaylı biçimde gösterilmiştir. Çizelgede verilen değerler agregaların DKY durumuna göre hesaplanmış olup beton üretimi esnasında bileşenler yüzey nemine göre düzeltilerek konulmuştur.

Agrega oranları ise kontrol betonlarında toplam agrega hacminin %5’i oranında filler malzeme hesaplandıktan sonra kalan agrega hacminin %25’i 0/2, %25’i 2/4, %25’si 4/8, %25’u ise 8/31,5 olarak belirlenmiştir. Çalışmada 16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm olmak üzere 3 farklı maksimum tane çapının seçildiği belirtilmiştir. GKA katılan betonların karışım hesaplarında ince agregalar %25 oranında 0-2 mm ve %25 oranında 2-4 mm olarak hesaplamalar yapılırken; iri agrega karışım oranları aşağıdaki gibi seçilmiştir;

Değişmeyen sınıf: 4-8 mm=%25 (bütün serilerde)

Değişen sınıflar:

8-16 mm = %25 (d_{max} :16 mm olan serilerde)

8-22,4 mm = %25 (8-16 mm ve 16-22,4 mm eşit oranlarda ve iki grubun toplam oranı %25 olacak şekilde)

8-31,5 mm = %25 (8-16 mm, 16-22,4 mm, 22,4-31,5 mm yaklaşık eşit oranlarda ve üç grubun toplamı %25 olacak şekilde).

Buna göre belirlenen maksimum tane çapları için TS 802 (Anonim 2009b)’e göre agrega tane büyüklüğü 16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm olan beton için belirlenen agrega tane büyüklüğü dağılımı granülometri eğrileri kullanılarak beton serileri oluşturulmuştur.

Çizelge 3.13. Karışım Hesapları

NUMUNE KODU	ÇİMENTO (kg)	SU (kg)	UÇUCU KÜL (kg)	SÜPER AKIŞKANLAŞTIRICI (kg)	HAVA (lt)	HAVA SÜRÜKLİYİCİ (kg)	FİLLER MALZ. (kg)	NORMAL AGREGA						GERİ KAZANILMIŞ AGREGA			
								0-2 (kg)	2-4 (kg)	4-8 (kg)	8-16 (kg)	16-22,4 (kg)	22,4-31,5 (kg)	4-8 (kg)	8-16 (kg)	16-22,4 (kg)	22,4-31,5 (kg)
16D0G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	425,9	434,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16D0G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	425,8	433,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16D0G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	425,6	433,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16D15G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	362,0	368,9	0,0	0,0	54,7	55,9	0,0	0,0
16D15G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	361,9	368,8	0,0	0,0	54,6	55,9	0,0	0,0
16D15G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	361,8	368,7	0,0	0,0	54,6	55,8	0,0	0,0
16D30G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	298,1	303,8	0,0	0,0	109,3	111,7	0,0	0,0
16D30G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	298,0	303,7	0,0	0,0	109,3	111,7	0,0	0,0
16D30G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	297,9	303,6	0,0	0,0	109,3	111,7	0,0	0,0
16D45G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	234,3	238,7	0,0	0,0	164,0	167,6	0,0	0,0
16D45G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	234,1	238,6	0,0	0,0	164,0	167,6	0,0	0,0
16D45G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	234,1	238,5	0,0	0,0	164,0	167,6	0,0	0,0
16D60G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	170,4	173,6	0,0	0,0	281,6	223,5	0,0	0,0
16D60G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	170,3	173,5	0,0	0,0	281,6	223,5	0,0	0,0
16D60G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	170,2	173,5	0,0	0,0	281,6	223,5	0,0	0,0
22D0G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	425,9	217,0	217,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22D0G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	425,8	216,9	217,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22D0G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	425,6	216,9	216,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Çizelge 3.13. (devam)

22D15G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	362,0	184,5	184,5	0,0	54,7	27,9	28,8	0,0
22D15G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	361,9	184,4	184,4	0,0	54,6	27,9	28,8	0,0
22D15G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	361,8	184,3	184,3	0,0	54,6	27,9	28,8	0,0
22D30G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	298,1	151,9	151,9	0,0	109,3	55,9	57,6	0,0
22D30G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	298,0	151,9	151,9	0,0	109,3	55,9	57,6	0,0
22D30G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	297,9	151,9	151,9	0,0	109,3	55,9	57,6	0,0
22D45G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	234,3	119,4	119,4	0,0	164,0	83,8	86,4	0,0
22D45G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	234,2	119,4	119,4	0,0	164,0	83,8	86,4	0,0
22D45G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	231,1	119,4	119,4	0,0	164,0	83,8	86,4	0,0
22D60G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	170,4	86,8	86,8	0,0	218,6	111,7	115,1	0,0
22D60G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	170,3	86,8	86,8	0,0	218,6	111,7	115,1	0,0
22D60G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	170,,2	86,8	86,8	0,0	218,6	111,7	115,1	0,0
31D0G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	425,9	144,7	144,7	146,3	0,0	0,0	0,0	0,0
31D0G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	425,8	144,7	144,7	146,3	0,0	0,0	0,0	0,0
31D0G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	425,6	144,7	144,7	146,3	0,0	0,0	0,0	0,0
31D15G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	363,8	123,0	123,0	124,4	53,1	18,6	19,2	19,0
31D15G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	363,7	123,0	123,0	124,4	53,1	18,6	19,2	19,0
31D15G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	361,8	123,0	123,0	124,4	53,1	18,6	19,2	19,0
31D30G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	298,1	101,3	101,3	102,4	109,3	37,2	38,4	38,1
31D30G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	298,0	101,3	101,3	102,4	109,3	37,2	38,4	38,1
31D30G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	297,9	101,3	101,3	102,4	109,3	37,2	38,4	38,1
31D45G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	234,3	79,6	79,6	80,5	164,0	55,9	57,6	57,1
31D45G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	234,2	79,6	79,6	80,5	164,0	55,9	57,6	57,1
31D45G20A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	234,1	79,6	79,6	80,5	164,0	55,9	57,6	57,1
31D60G6A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,2	93,4	391,9	408,1	170,4	57,9	57,9	58,5	218,6	74,5	76,8	76,1
31D60G13A	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,5	93,4	391,8	408,0	170,3	57,9	57,9	58,5	218,6	74,5	76,8	76,1
31D60G20	297,5	185,5	52,5	5,3	10,0	0,7	93,4	391,6	407,8	170,2	57,9	57,9	58,5	218,6	74,5	76,8	76,1

Beton numuneler 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dk karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi mikserle karıştırılarak elde üretilmiştir. Uzun süren ön deneylerden sonra karışıma önce iri agregalar ve toz maddeler (çimento, uçucu kül, filler) eklenerek bir ön karıştırma işlemi yapılmıştır. İnce agregaların da eklenmesiyle oluşan karışım 1dk kuru olarak karıştırıldıktan sonra suyun yaklaşık %60'lık kısmı eklenerek 1,5dk daha karıştırılmaya devam edilmiştir. Ardından kalan suyun yaklaşık %70'lik kısmına süperakışkanlaştırıcı eklenerek 1,5dk ve kalan yaklaşık %30'luk kısma da hava sürükleyici eklenerek 1dk daha karıştırılmıştır. Karışım 1dk dinlendirildikten sonra 2 dk. daha karıştırılarak beton üretimi tamamlanmıştır. Çalışmada yüksek dayanım hedeflenmediğinden ve geri kazanılmış agregaların yüksek poroziteleri de göz önüne alınarak işlenebilirlik açısından uygun olan akıcı kıvamda bir beton elde edilmeye çalışılmıştır.

3.3.3. Taze beton deneyleri

3.3.3.a. Birim ağırlık deneyi

Taze beton numunelerin birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 (Anonim 2010c)'ya uygun olarak yapılmıştır. Deneylerde kütlesi (M_2 , kg) ve hacmi (V , m³) belli olan bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak beton ile doldurulmuş olan kap tartılarak (M_1 , kg), taze betonun birim ağırlıkları (D , kg/m³) bağıntı (6) ile bulunmuştur.

$$D = \frac{M_1 - M_2}{V} \quad (3.6)$$

3.3.3.b. Çökme (slump) deneyi

Bu deney, TS EN 12350-2 (Anonim 2010b)'ye uygun olarak yapılmış olup deney için standarda da belirtildiği gibi 20 cm taban çapı, 10 cm üst çapı olan, 30 cm yüksekliğinde metalden yapılmış kesik koni (slump konisi) ve boyu 60 cm, çapı 1,6 cm

olan ucu yuvarlatılmış bir çelik çubuk kullanılmıştır. Koni betonla 3 seferde doldurulup, her seferde beton 25 defa şişlenerek iyice yerleştirilmiştir. Bu işlemden sonra slump konisi, 5 saniye içerisinde, hafif bir burgu yapılarak çekilmiş ve içindeki betonun çökme miktarı ölçülmüştür. Şekil 3.6'da çalışmada yapılan çökme deneylerinden bir görüntü verilmiştir.

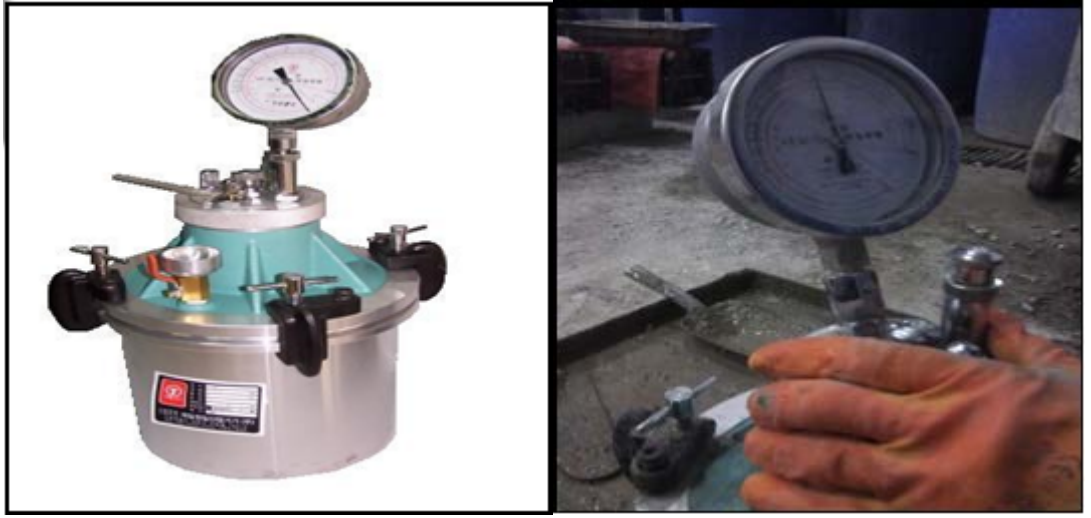


Şekil 3.6. Taze betonda çökme deneyi

3.3.3.c. Hava içeriği tayini deneyi

Taze betonda hava içeriği tayini deneyi TS EN 12350-7 (Anonim 2010d)'ye uygun olarak yapılmıştır. Şekil 3.9'da gösterilen hava ölçer kabına beton eşit hacimlerde 3 (üç) tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her bir tabaka için önce kenarlar ve daha sonra merkeze doğru olmak üzere 25 kez şişleme yapılmış ve her tabakanın şişlenmesinden sonra ölçüm kabı tokmaklanmıştır. Şişlenerek yerleştirilmiş olan beton yüzeyi, ölçüm kabı üst seviyesinde olmalıdır. Bu nedenle sıyırma çubuğu ile önce kap kenarlarına bastırılarak fazla betonlar sıyrılmış, ardında da, özellikle conta ile temas edecek tüm yüzeyler nemli bir bez ile temizlenerek bağlantının tam olarak gerçekleşmesi sağlanmıştır. Üst kapak ve ölçüm kabı kilitlendikten sonra ana hava musluğu kapatılmış ve tahliye muslukları açılmıştır. Bu sırada cihaz hafifçe sallanarak, ölçüm kabı içindeki havanın tamamen

dışarıya çıkması sağlanmıştır. Hava tahliye muslukları kapatılarak, manometre göstergesi basınç çizgisi başlangıcına ulaşana kadar hava pompalanmış daha sonra da kapaktaki boşaltma muslukları kapatılmıştır. Sonrasında ana hava tahliye musluğu açılıp kap kenarlarına süratlice vurulduktan sonra göstergede (manometre) sabitleşen değer okunmuştur. Okunan değer yüzde cinsinden hava miktarı (A) değeridir. Şekil 3.7’de deneylerde kullanılan cihaz ve deney esnasına ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.7. Hava içeriği tayini cihazı ve deney anına ait bir görüntü (sağda)

3.3.4. Numunelerin kürü

Deneyle esnasında bütün numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış ve deney gününe kadar laboratuvar ortamında standart kür havuzunda $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kirece doymun su içinde kür edilmiştir. Üretilen beton numunelerden donma-çözülme deneyleri için kullanılacak olan $15\times 15\times 7,5\text{cm}$ 'lik numuneler 7 gün süreyle kür edilirken diğer deneylerde kullanılacak $15\times 15\times 15\text{ cm}$ 'lik küp numuneler 28 gün süreyle kür edilmişlerdir. Donma-çözülme deneyleri için kullanılacak numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra 21 gün saklanmak üzere TSE EN 12390-2 (Anonim 2010e) standardında belirtilen iklim kontrollü kabinde ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $45\pm 15\text{ g/m}^2\text{h}$ buharlaşma hızında) tutulmuştur. Şekil 3.8’de kür havuzu ve iklim kontrollü kabin resimleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Kür havuzu ve iklim kontrollü kabin (sağda)

3.3.5. Sertleşmiş beton deneyleri

Çalışmada sertleşmiş beton deneyleri olarak yoğunluk tayini, hacimce su emme, kılcal su emme, basınç dayanımı ve donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Her deneyin yapılışı ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.3.5.a. Yoğunluk tayini

Sertleşmiş beton numunelerinde yoğunluk tayini deneyi, 15x15x15 cm'lik küp numuneler kür havuzunda 28 gün bekletildikten sonra TS 12390-7 (Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini) (Anonim 2010g)'ye göre yapılmıştır. Numuneler suya doymun yüzey kuru konumdayken hassas terazi ile kütlesi (m, g) belirlenmiş ve düzgün hacimli olduğu kabul edilerek numune kütlesini hacmine (V, m³) oranlayarak sertleşmiş betonun yoğunluğu (D, g/cm³) aşağıda verilen bağıntı ile tayin edilmiştir.

$$D = m / V \quad (3.7)$$

3.3.5.b. Hacimce su emme deneyi

Beton numunelerin hacimce su emme deneyi 15x15x15 cm boyutlardaki küp numunelerde yapılmıştır. Deney numuneleri etüvde 105±5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra ortam sıcaklığında soğutulmuş ve etüv kurusu ağırlıkları tartılmıştır. (W). Bu numuneler 24 saat sıcaklığı 20±3 °C olan su içinde bekletildikten sonra suya doymuş hale getirilmiş ve suya doymuş numunenin havadaki ağırlığı (W_{SH}) ile sudaki ağırlığı (W_{SS}) belirlenmiştir. Tartımlar 0,1 gr hassasiyetli dijital terazide yapılmış olup hacimce su emme oranları (H_s, %) aşağıda verilen bağıntı (8) yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da numunelerin etüvde kurutulması, suda ve havada tartılmalarını gösteren resimler verilmiştir.

$$H_s = (W_{SH} - W_0)/(W_{SH} - W_{SS}) \quad (3.8)$$



a

Şekil 3.9. (devam)



Şekil 3.9. Numunelerin etüvde kurutulması (a), suda (b) ve havada(c) tartılması

3.3.5.c. Kılcal su emme katsayısı belirlenmesi deneyi

TS EN 13057 (Beton yapılar-Koruma ve tamir için mamul ve sistemler-Deney metotları-Kılcal su emmeye direncin tayini) (Anonim 2004) ve ASTM 1585 (Anonymous 2007)'e göre yapılan beton numunelerde kılcal su emme deneyi 15x15x15 cm boyutlardaki küp numunelerde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri etüvde 105±5°C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra, ortam sıcaklığında soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (W_0). Numunelerin su ile temas eden yüzey alanının (F , cm²) boyutları kumpas ile ölçülerek belirlenmiştir. Numuneler içinde 20±3°C'de su bulunan bir kap içerisinde Şekil 3.11'de görüldüğü gibi takozların üzerine 5mm'lik kısmı su içerisinde kalacak şekilde suya bırakılmıştır. Her birinin 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalardaki (t , dk) su emme miktarı 0,1 gr duyarlılıktaki dijital terazide tartılarak kütle artışları belirlenmiştir (Q , cm³). Kılcal su emme katsayısı ise (K , cm²/sn) aşağıdaki bağıntı yardımı ile belirlenmiştir. 64 dakikalık süre sonundaki kütle artışları baz alınarak da hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.10'de kılcal su emme deneyine ait bir resim görülmektedir.

$$K = Q^2 / (F^2 \times t) \quad (3.9)$$



Şekil 3.10. Kılcal su emme deneyi

3.3.5.d. Basınç dayanımı deneyi

Beton numunelerde basınç dayanımını belirlemek amacıyla 27. gün sonunda kür havuzundan çıkarılan 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numuneler bir gün süreyle laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra kırılmıştır. TS EN 12390-3 (Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini) (Anonim 2010f)'e uygun şekilde basınç deneyi yapılarak kırma yükü (F, kN) belirlenmiştir. Basınç deneyinde Şekil 3.11'de resmi verilen 3000 kN kapasiteli ELE Marka Auto Test 3000 pres kullanılmıştır. Deneyler yapılırken yükleme hızı 0,4 MPa/s alınmıştır.



Şekil 3.11. Beton presi ve deney anından bir görünüm

3.3.5.e. Donma-çözülme deneyi

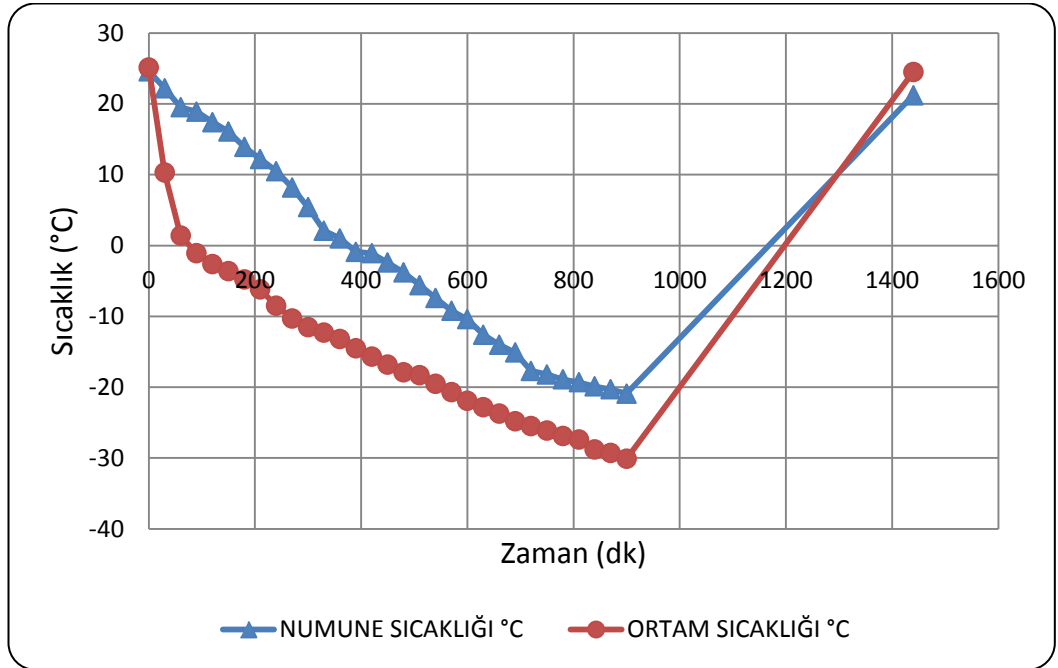
Donma çözülme deneyleri için dondurucu ortam olarak 6 adet ticari amaç için üretilmiş olan UĞUR marka derin dondurucu kullanılmıştır. Donma-çözülme çevrimleri için dondurucular kademeli olarak soğutulmuş ve kademeli olarak ısıtılmıştır. Şekil 3.12’de kullanılan dondurucu ortam resmi, Şekil 3.13’de ise dondurucu ortamın ve numunenin soğuma-ısınma grafiği (dondurma-çözdürme rejimi) verilmiştir. Şekil 3.14’deki grafikler dondurucu ortam tam dolu iken ve numune ile %3’lük NaCl çözeltisinin temas yüzeyine konulan bir termoçift yardımıyla okunan sıcaklıkları göstermektedir.

Şekil 3.14’ten görüldüğü gibi dondurucu ortamın iç sıcaklığı ile numunenin çözeltiliye temas ettiği yani donma-çözülme etkisi ile yüzeysel kabuk atmaların beklendiği

yüzeydeki sıcaklıklar birbirinden farklıdır. Öyle ki 16 saat sonu itibari ile ortam sıcaklığı -35°C 'ye inmişken numune sıcaklığı ancak -20°C 'ye inebilmiştir.



Şekil 3.12. Dondurucu Ortam



Şekil 3.13. Dondurucu ortam ve numune merkezindeki sıcaklık değişimi (dondurma-çözdürme rejimi)

GKA ile üretilen betonların donma-çözülme direncinin araştırıldığı bu çalışmada donma- çözülme deneyleri TSE CEN/TS 12390-9 (Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: Donma çözülme direnci-Yüzeysel kabuk atma (yüzeysel yıpranma))(Anonim 2012)'e göre yapılmıştır. Bu standartta betonun donma-çözülmesi için Referans Yöntem ve Alternatif Yöntemler olmak üzere iki farklı ana metottan bahsedilmektedir. Bu çalışmada Alternatif Yöntemlerden CDF deneyi esas alınmıştır. Bu yöntem; numune üretim yönteminin kolaylığı, deney süresinin kısalığı ve de uluslararası bilinirliği nedeniyle seçilmiştir. CDF yönteminde 15cmx15cmx15cm küp kalıbın içine merkezlenmiş politetrafloroetilen (PTFE, teflon) plakasının ikiye böldüğü (15cmx15cmx7,5 cm) numunelerin %3'lük NaCl çözeltisi içine kısmen batırılması sonucu oluşan hasarın incelenmesi ile betonların donma-çözülme dirençlerinin tayininin yapılması istenir. Bu yöntemde donma-çözülme etkisiyle betonun yüzeysel yıpranması 28 donma-çözülme döngüsü sonunda kabuk atma yoluyla uzaklaşan kütlenin ölçülmesiyle değerlendirilir. Her numunenin deneye tabi tutulan yüzeyi yaklaşık 140mmx150mm'dir.

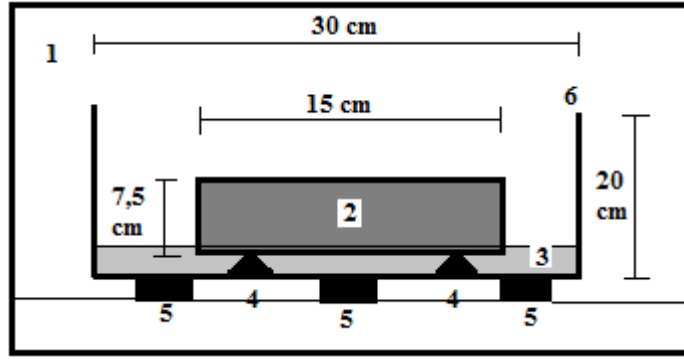


Şekil 3.14. CDF Yöntemi'ne göre oluşturulan donma-çözülme deney düzeneği

Deneyler esnasında taze beton, küp kalıplara yerleştirildikten sonra kalıplar polietilen örtü ile kaplanarak 1 gün süreyle kurumaya bırakılmıştır. Numuneler kalıplardan çıkarılıp $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip kirece doymuş suyu ile doldurulmuş bir kür havuzuna

yerleştirilmiştir. Küp numuneler 7 günlük olduğunda kür havuzundan çıkarılıp ve donma-çözülme deneyi başlayana kadar 21 gün süreyle yüzey kuruması için saklandıkları iklimlendirme kabineye konulmuştur (Şekil 3.8). Taze betonun kalıplara yerleştirilmesinden itibaren geçen 21. ve 26. günler arasında, yanal yüzeyler, çözücüsüz epoksi reçinesi ile kaplanarak yalıtılmıştır. Bu işlemde hemen sonra numuneler iklimlendirme kabineye geri konulup donma-çözülme deneyine kadar bekletilmiştir.

Donma-çözülme deneyi, deney numunesi doymuş hale getirilip 28 günlük olunca başlatılmıştır. Kuru halde saklamayı müteakip numuneler Şekil 3.16'da gösterildiği gibi ($5\pm 0,1$) mm yükseklikteki takozlar üzerinde deney yüzeyleri aşağıya gelecek şekilde deney kaplarına yerleştirilmiştir. Daha sonra donma sıvısı, numunenin üst yüzeyleri ıslatılmadan (10 ± 1) mm yüksekliğine kadar deney kabı içine dökülmüştür. Donma-çözülme çevrimlerine başlanmadan önce numuneler kapalı kapiler emme kaplarına yerleştirilmiş olup (20 ± 2)°C sıcaklıkta 7 gün bekletilmiştir. Bu süre zarfında düzenli aralıklarla kapiler emme esnasında malzemenin emme kapasitesine bağlı olarak üstteki sıvı seviyesi kontrol edilip ayarlanmış ve numunelerin kütle artışları ölçülmüştür. Kapiler emme işleminden sonra numuneler donma-çözülme çevrimleri için donduruculara yerleştirilmiştir. Numune sıcaklığını ölçmek için numune ile donma sıvısı arasına yerleştirilen termoçiftlerden faydalanılmıştır. Şekil 3.14'de verilen donma-çözülme rejimini gösteren grafikten de görülebileceği gibi 16 saat süren dondurma işleminden sonra numuneler donduruculardan çıkarılarak 8 saatlik çözülmeye bırakılmışlardır. Deneysel çalışmada CDF yöntemine göre her bir numune için hazırlanan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.15'da, deney esnasında yapılan dondurma ve çözdürme görüntüleri Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16(b)'den görülebileceği üzere dondurma ortamı havadır.



Şekil 3.15. CDF yöntemi için geliştirilmiş olan deney düzeneği

Şekilde gösterilenlerden;

1. Dondurucu ortam
2. Numune
3. Donma sıvısı (%3 NaCl)
4. Takoz (5 mm)
5. Kapların üzerine oturtulduğu mesnetler
6. Numunenin ve donma sıvısının konulduğu kap



a

b

Şekil 3.16. Numunelerin dondurulma (a) ve çözdürülme (b) işlemleri

(4±1), (6±1), (14±1) ve 28 donma-çözülme döngüsünden sonra sıcaklık 15°C'nin üzerinde iken her numune için aşağıda verilen işlemler gerçekleştirilmiştir:

- a) Donma-çözülme işleminden sonra numune yüzeyinden kopan parçalar basınçlı su püskürtülerek toplanmıştır.
- b) Kabuk atarak uzaklaşan malzemeyi içeren çözelti filtreden geçirilmiştir.
- c) Kâğıt filtre daha sonra 24 saat süreyle (110±10)°C'ta kurutulmuş ve (20±2)°C sıcaklıkta, %(65±5) bağıl nemli ortamda (60±5) dakika süreyle soğutulmuştur.
- d) Kurutulmuş kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemeyi içeren filtrenin kütlesi (m_{s+f}) 0,1 g hassasiyetle tartılıp boş filtrenin kütlesi (m_f) aynı hassasiyetle daha önceden belirlenmiştir. Kabuk kütlesi ($m_{s,n}$) ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmiştir:

$$m_{s,n} = m_{s,\text{önce}} + (m_{s+f} - m_f) \quad (3.10)$$

Burada,

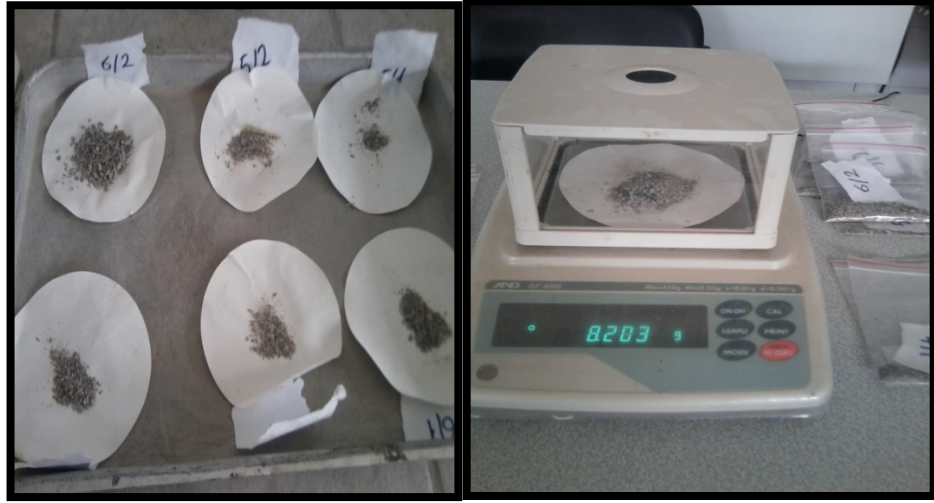
$m_{s,n}$: n adet donma-çözülme döngüsü sonunda kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemenin 0,1 g'a yuvarlatılarak belirlenen kurutulmuş yığışımli kütlesini,

$m_{s,\text{önce}}$: Bir önceki donma-çözülme döngüsünde hesaplanan kurutulmuş kabuk atarak uzaklaşan malzemenin yığışımli kütlesini göstermektedir.

Yukarıda belirtilen ölçümlerden sonra ve sonraki donma-çözülme döngüsü başlamadan önce, donma sıvısı numunenin üst yüzeyleri ıslatılmadan (10±1) mm yüksekliğine kadar deney kabı içine dökülerek deney kabı, kabin içerisine tekrar konulmuştur. Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19'da yukarıda belirtilen işlemlere ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.17. Donma çözülme çevrimlerinden sonra numunelerden kopan parçalar



Şekil 3.18. Kopan parçaların etüvde kurutulması ve hassas terazide tartılması



a



b

Şekil 3.19. En çok kabuk atan karışım (16D0G6A) (a) ile en az kabuk atan karışımın (22D30G20A) (b) kabuk atmalarının karşılaştırılması

Her ölçüm işlemi ve her numune için, n döngü sonunda, birim alan başına kg/m², kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemenin yığılımlı kütlesi (S_n) ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \times 10^3 \quad (11)$$

Burada;

S_n : n adet donma-çözülme döngüsü sonunda deneye tabi tutulan beton numune yüzeyinden kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemenin kütlesi, kg/m².

$m_{s,n}$: Bağıntı (10) ile belirlenen n adet donma-çözülme döngüsü sonunda kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemenin yığılımlı kuru kütlesi.

A: Deneye tabi tutulan beton numune yüzeyinin mm² olarak alanı, (en az iki ölçümün ortalaması olarak doğrusal boyut ölçümlerinden 0,5 mm yaklaşımla yuvarlanarak hesaplanan alan)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME

Çalışmada taze beton (yoğunluk, hava içeriği ve çökme (slump) deneyleri), sertleşmiş beton (yoğunluk, hacimce su emme, kılcal su emme, basınç dayanımı) ve CDF yöntemine göre gerçekleştirilen donma-çözülme deneylerinden elde edilen bulgular ve bu bulgulara istinaden yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

4.1. Taze Beton Özellikleri

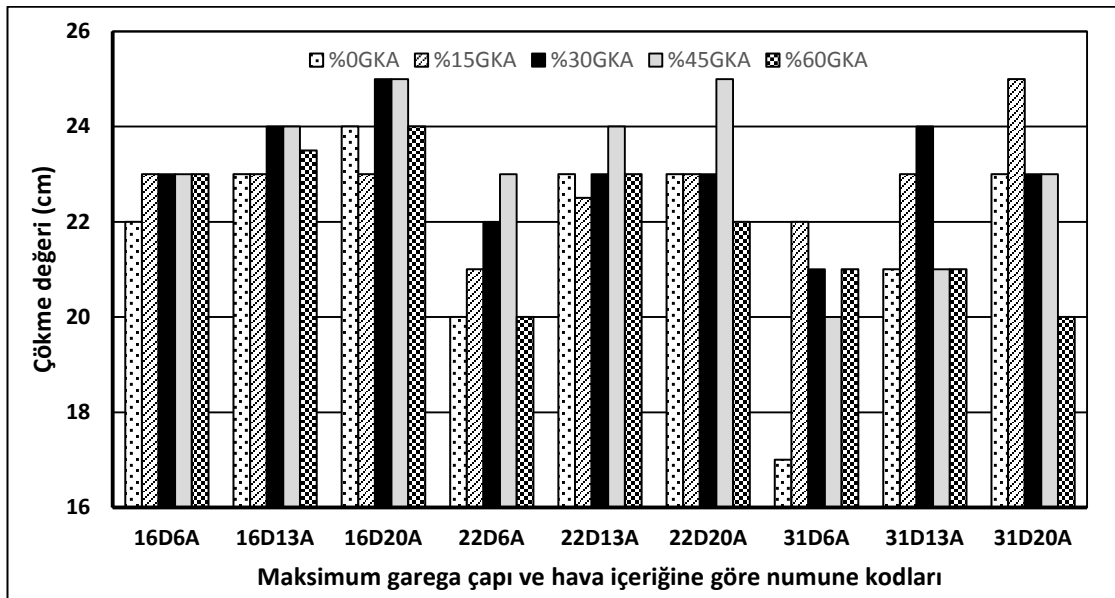
Taze beton deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Taze betonda hava içeriği, birim ağırlık ve çökme deneyi sonuçları

KOD	Hava içeriği (%)	Birim ağırlık (g/cm ³)	Çökme (cm)	KOD	Hava içeriği (%)	Birim ağırlık (g/cm ³)	Çökme (cm)
16D0G6A	0,9	2,31	22	22D30G20A	10,5	2,03	23
16D0G13A	1,15	2,30	23	22D45G6A	8,5	2,05	23
16D0G20A	5,3	2,20	24	22D45G13A	13	1,94	24
16D15G6A	6,5	2,15	23	22D45G20A	13	1,95	25
16D15G13A	12	2,00	23	22D60G6A	8	2,06	20
16D15G20A	10	2,08	23	22D60G13A	10	1,99	23
16D30G6A	10	2,07	23	22D60G20A	8,5	2,02	22
16D30G13A	10,5	2,04	24	31D0G6A	8	2,06	17
16D30G20A	13	1,91	25	31D0G13A	12	1,97	21
16D45G6A	10	1,99	23	31D0G20A	12	1,99	23
16D45G13A	11,5	1,97	24	31D15G6A	11	2,01	22
16D45G20A	13	1,90	25	31D15G13A	13	1,95	23
16D60G6A	9,2	2,03	23	31D15G20A	12	1,97	25
16D60G13A	12	1,94	23,5	31D30G6A	8,5	2,01	21
16D60G20A	12	1,99	24	31D30G13A	13	1,93	24
22D0G6A	5,3	2,20	20	31D30G20A	10,5	1,99	23
22D0G13A	11	2,04	23	31D45G6A	9	2,06	20
22D0G20A	10,5	2,06	23	31D45G13A	9	2,06	21
22D15G6A	9	2,07	21	31D45G20A	11	1,99	23
22D15G13A	13	1,97	22,5	31D60G6A	10	2,01	21
22D15G20A	12	1,98	23	31D60G13A	10,5	2,00	21
22D30G6A	9	2,08	22	31D60G20A	8,5	2,03	20
22D30G13A	13	1,97	23				

4.1.1. Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

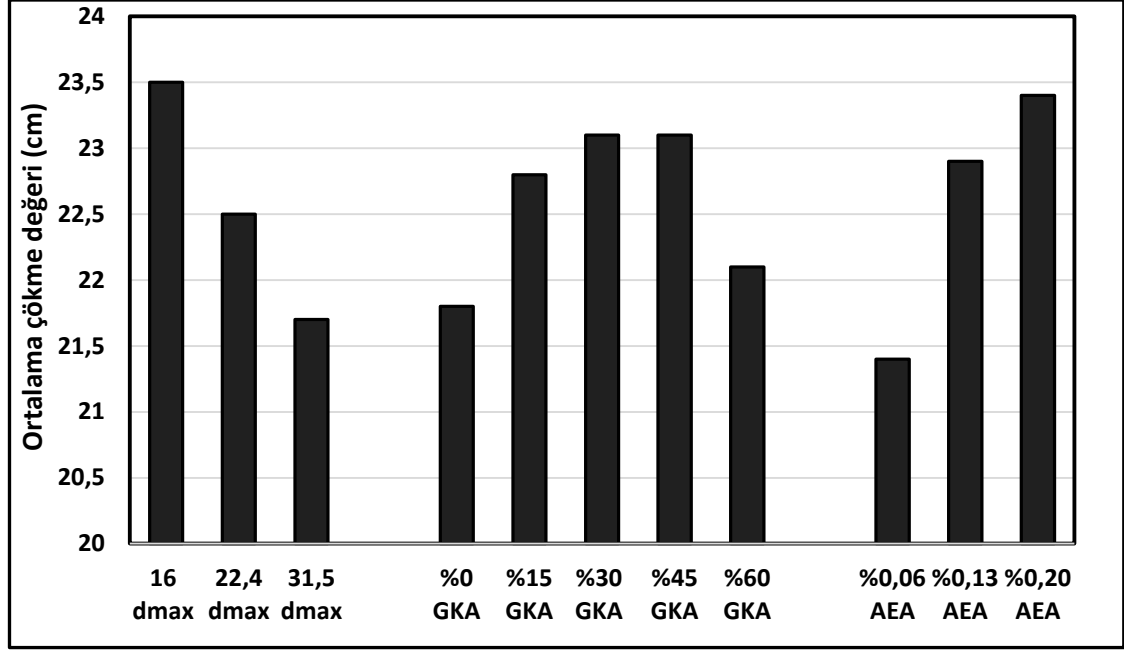
Doğal ve geri kazanılmış agrega kullanılarak oluşturulmuş beton serilerinde yeterli işlenebilirlik kıvamını yakalayabilmek için karışımlara %1,5 oranında süperakışkanlaştırıcı katkı katılmıştır ve geri kazanılmış agregaların su emmeleri göz önüne alınarak su/çimento oranı ön deneylerden sonra 0,53 olarak sabit tutulmuştur. Dolayısıyla oldukça akıcı kıvamda beton serileri elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de de görüldüğü üzere çökme deney sonuçlarına göre beton serileri TS EN 206-1(Anonim 2014e)'e göre S4 ve S5 (16-21 cm ve ≥ 22 cm) sınıflarında çıkmıştır. Çizelge 4.1'de verilen değerlerden hareketle çizilen ve karışımlardaki GKA miktarının çökme değeri üzerindeki etkilerini gösteren grafik Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Taze betonların çökme değerlerin deney parametrelerine göre değişimi

Şekil 4.1'de de görüleceği gibi, karşıma GKA katmakla , agreganın maksimum tane boyutu ve betonun hava içeriğine bağlı olarak, farklı çökme değerleri elde edilmiştir. En düşük çökme değeri (17 cm) maksimum tane çapı 31.5 mm olan ve %0.06 oranında hava sürükleyici katkı içeren betonlarda görülmüşken en yüksek değer (25 cm) ise agrega çapından bağımsız olarak %0.20 oranında hava sürükleyici katkı içeren

karışımlarda elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen ortalama çökme değerlerinin parametrelere göre değişimini gösteren grafik ise Şekil 4.2’de verilmiştir.

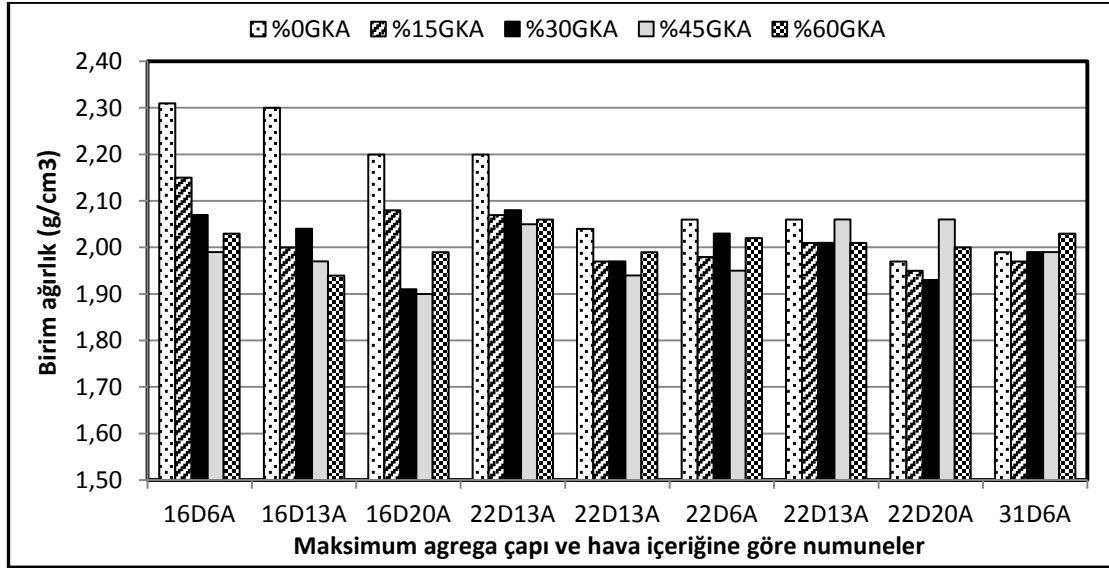


Şekil 4.2. Ortalama çökme değerlerinin her bir parametreye göre değişimi

Yukarıdaki grafiklerden betondaki maksimum agrega tane çapının artmasıyla çökme miktarının, dolayısıyla işlenebilmenin de, azaldığı görülmektedir. Karışımlara GKA katılması ise %30 oranına kadar çökmeyi artırmış, %30-%45 arasında sabit kalmasına yol açmış bu orandan yüksek değerde (%60) ise çökmenin düşmesine yol açmıştır. Karışımlardaki hava sürükleyicinin oranının artması ise betonun çökmesinin artmasına yol açmıştır. Bu bulgular literatür ile de büyük ölçüde uyumludur. Nitekim konu üzerinde çalışmış olan bir çok araştırmacı (Evangelista and Brito 2006; Kou 2006; Movassaghi 2006; Abbas 2007; Durmuş vd 2009; Behera *et al.* 2014) %30 oranına kadar GKA kullanımının işlenebilmeyi olumlu yönde etkilemişken %30’dan fazla kullanılmasının ise çökme miktarını olumsuz yönde etkilediğini hava sürükleyici katkı maddesinin artmasının ise işlenebilmeyi yüksek oranlarda artırdığını belirtmiştir.

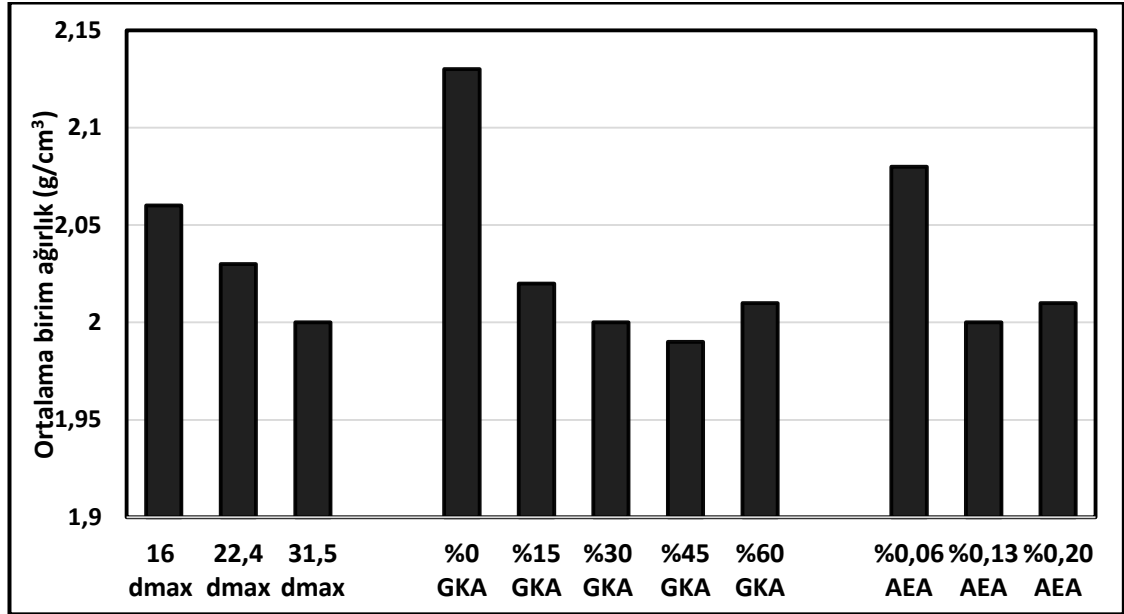
4.1.2. Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Taze betonda TS EN 12350-6 (Anonim 2010c) ya uygun olarak yapılan birim ağırlık deneyinden tüm karışımlar için elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te grafize edilmiştir.



Şekil 4.3. Betonların birim ağırlıklarının parametrelere göre değişimi

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi karışımların birim ağırlık değerleri tüm serilerde 1,90-2,31 g/cm³ arasında değişmiştir. Bu değişikliğe başta karışıma GKA katılıp katılmama olmak üzere parametrelerin hepsi etkili olmuştur. Aşağıdaki grafikte ortalama birim ağırlık değerlerinden hareketle her bir parametrenin betonların birim ağırlığı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

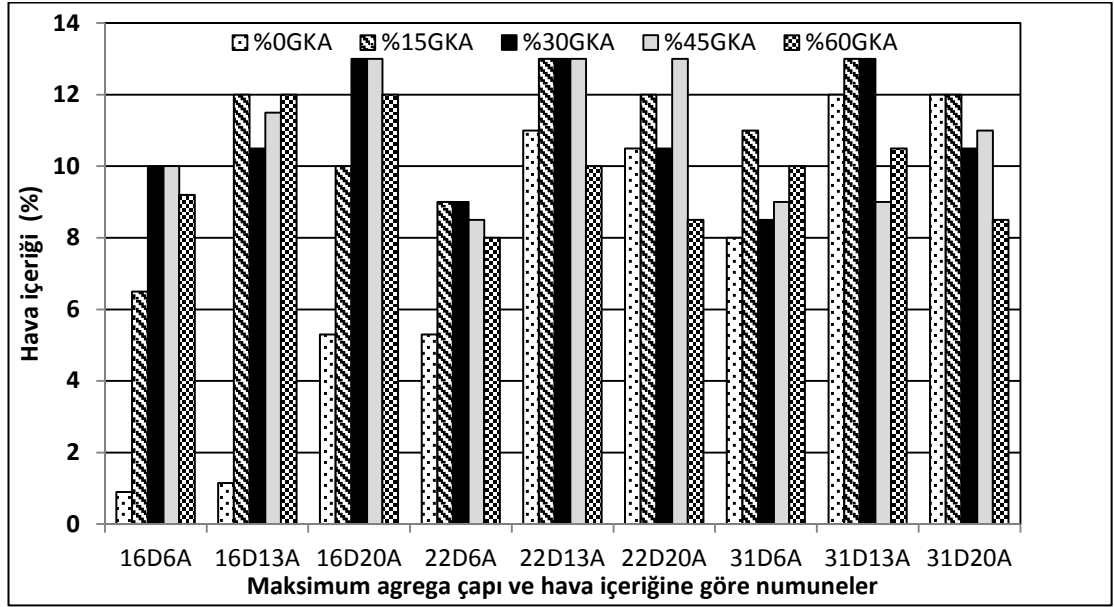


Şekil 4.4. Ortalama birim ağırlık değerlerinin parametrelere göre değişimi

Şekil 4.4'deki grafikten de görüldüğü üzere karışımlardaki maksimum tane çapının artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmuştur. Çalışmada en yüksek birim ağırlık değerleri (ortalama 2.13 gr/cm^3) ise GKA katılmayan karışımlarda elde edilmiştir. Karışıma GKA katmakla betonların birim ağırlıklarında bariz düşüşler olduğu belirlenmiştir. Ancak GKA oranının artmasıyla birim ağırlıktaki düşüşler devam etmişken %60 oranında GKA içeren karışımların birim ağırlıklarının az da olsa artması ilginç bulunmuştur. Hava sürükleyici katkı maddesi de GKA'ya paralel özellik göstermiş olup bu katkının miktarındaki artışla orantılı olarak taze betonun yoğunluğu da azalmıştır. Ancak bu azalma %0,13 ve %0,20 arasında AEA içeren karışımlarda görülmemiştir. Bu sonuçlar Şahin 2003, Evangelista and Brito 2006, Pedro *et al.* 2014, Beltran *et al.* 2014'da varılan sonuçları teyid eder niteliktedir.

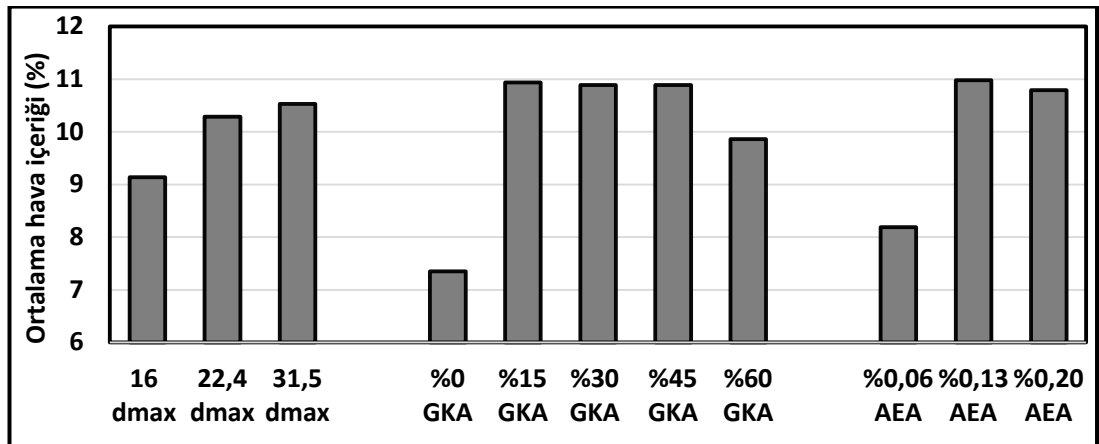
4.1.3. Hava içeriği deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.1'de verilen karışımların ölçülen hava içerikleri ile ilgili sonuçlar Şekil 4.5'te grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Betonların hava içeriklerinin parametrelere göre değişimi

Şekil 4.5'den görülen en açık sonuç GKA katılmamış karışımların hava içeriklerinin diğerlerine göre daha az olmasıdır. Diğer taraftan, bazı parametrelerin etkisi ile taze betonun hava içeriğinin %13'lere varan oranlara çıktığı yine aynı şekilde görülmektedir. Normal betonlar için oldukça yüksek değer olan bu oranda hava içeriğine çalışmada seçilen parametrelerin değişik derecelerde etkisi olmuştur. Şekil 4.6'da ortalama hava içeriği değerlerinden hareketle her bir parametrenin etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.6. Ortalama hava içeriği değerlerinin parametrelere göre değişimi

Şekil 4.6'daki grafikten de görüldüğü üzere maksimum agrega tane çapının artmasıyla taze betonun hava içeriği de artmıştır. Movassaghi 2006'da benzer sonucu ifade etmiştir. GKA katılmamış betonlarda nispeten düşük olan hava içeriği değeri ise karışımlara %15, %30 ve %45 oranlarında GKA kullanılması ile bariz bir şekilde artmış ancak bu üç GKA oranı arasında bir farklılık gözlenememiştir. %60 oranında GKA katılan karışımlarda ise hava içeriğinin bir miktar azalmış olması ilginç bulunmuştur. Karışımlardaki hava sürükleyici katkı maddesinin oranının artırılması ise, beklenildiği üzere, betonun hava içeriğini artırmıştır. Ancak, %0,20 oranında hava sürükleyici katkı katılmış olan betonların %0,13 oranında katkı içeren karışımlarla hemen hemen aynı oranda hava içeriğine sahip oldukları da bu deneyde ilginç bulunan bir başka husustur. Beton içerisine katılan hava sürükleyici katkı maddesinin betonun hava içeriğini artırması doğaldır, geri kazanılmış agreganın betonun hava içeriğini artırmasına ise onların yüksek porozitelerinin yol açtığı söylenebilir.

4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Çalışma kapsamında üretilen beton serilerinde 28 gün sonunda yapılan sertleşmiş beton deney sonuçları aşağıda (Çizelge 4.2) verilmiştir. Çizelgede verilen tüm sonuçlar iki numune ortalamasıdır. Çizelge 4.2'de çalışmanın ana eksenini oluşturan donma-çözülme deneyleri sonuçları verilmemiş olup bu sonuçlar ayrı bir bölümde değerlendirilecektir.

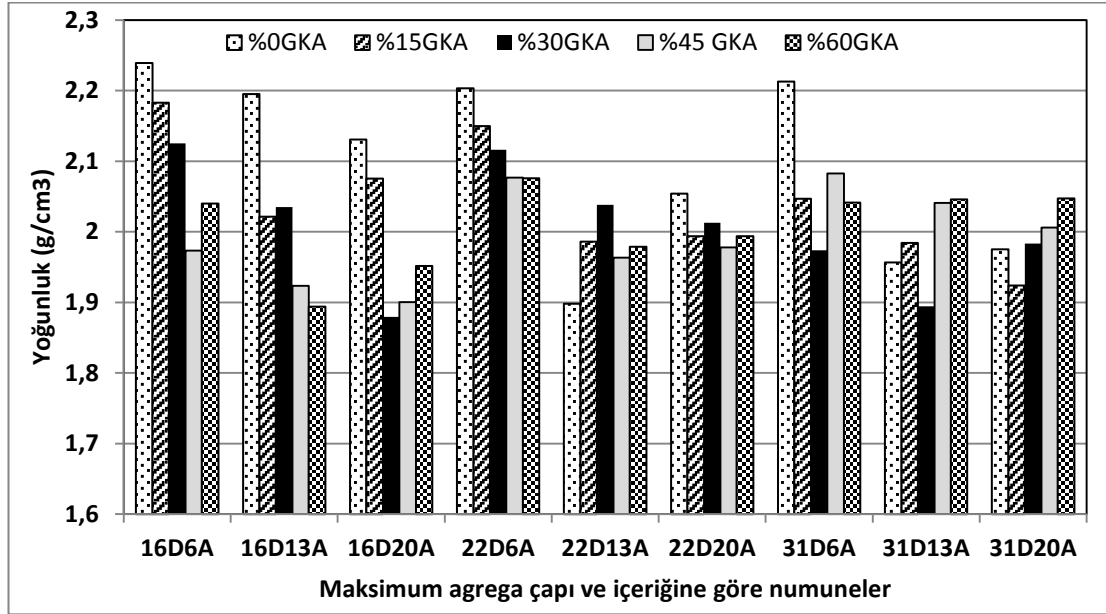
Çizelge 4.2. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları

KOD	Y (g/cm ³)	H (%)	Kx10 ⁻⁷ (cm ² /sn)	B (MPa)	KOD	Y (g/cm ³)	H (%)	Kx10 ⁻⁷ (cm ² /sn)	B (MPa)
16D0G6A	2,24	12,09	18,67	34,7	22D30G20A	2,01	16,88	7,11	14,1
16D0G13A	2,19	9,57	12,00	29,4	22D45G6A	2,08	15,46	16,44	25,7
16D0G20A	2,13	10,22	15,78	27,4	22D45G13A	1,96	16,00	12,22	16,0
16D15G6A	2,18	12,92	22,67	32,2	22D45G20A	1,98	14,46	9,78	16,8
16D15G13A	2,02	13,93	21,78	20,7	22D60G6A	2,08	13,79	15,11	25,6
16D15G20A	2,08	14,37	22,89	23,5	22D60G13A	1,98	15,50	10,44	16,6
16D30G6A	2,13	13,88	17,78	28,2	22D60G20A	1,99	15,23	12,22	18,9
16D30G13A	2,04	14,98	16,89	23,0	31D0G6A	2,21	12,21	12,67	25,4
16D30G20A	1,88	17,30	15,56	12,9	31D0G13A	1,96	14,10	10,89	13,7
16D45G6A	1,97	16,68	24,00	21,2	31D0G20A	1,98	15,85	9,11	14,0
16D45G13A	1,92	16,88	23,78	15,9	31D15G6A	2,05	13,15	7,33	20,4
16D45G20A	1,90	17,13	10,44	15,1	31D15G13A	1,98	14,27	5,56	15,7
16D60G6A	2,04	17,68	16,44	20,4	31D15G20A	1,92	15,58	6,89	12,3
16D60G13A	1,89	18,02	14,89	13,4	31D30G6A	1,97	15,46	7,33	16,0
16D60G20A	1,95	17,12	16,00	17,1	31D30G13A	1,89	16,38	6,44	10,6
22D0G6A	2,20	15,05	14,67	27,9	31D30G20A	1,98	14,46	12,89	17,6
22D0G13A	1,99	11,18	16,89	19,0	31D45G6A	2,08	11,77	7,33	17,3
22D0G20A	2,05	16,05	15,78	21,8	31D45G13A	2,04	13,67	5,78	18,3
22D15G6A	2,15	14,96	17,33	28,2	31D45G20A	2,01	14,27	5,78	14,7
22D15G13A	1,99	15,06	12,00	18,2	31D60G6A	2,04	13,40	8,00	21,1
22D15G20A	1,99	15,58	13,33	15,3	31D60G13A	2,05	14,79	6,89	19,7
22D30G6A	2,12	14,65	10,89	21,4	31D60G20A	2,05	14,77	7,33	19,6
22D30G13A	2,04	15,25	11,33	17,9					

Y: Yoğunluk; H: Hacimsel su emme oranı; K: Kılcal su emme katsayısı; B: Basınç dayanımı

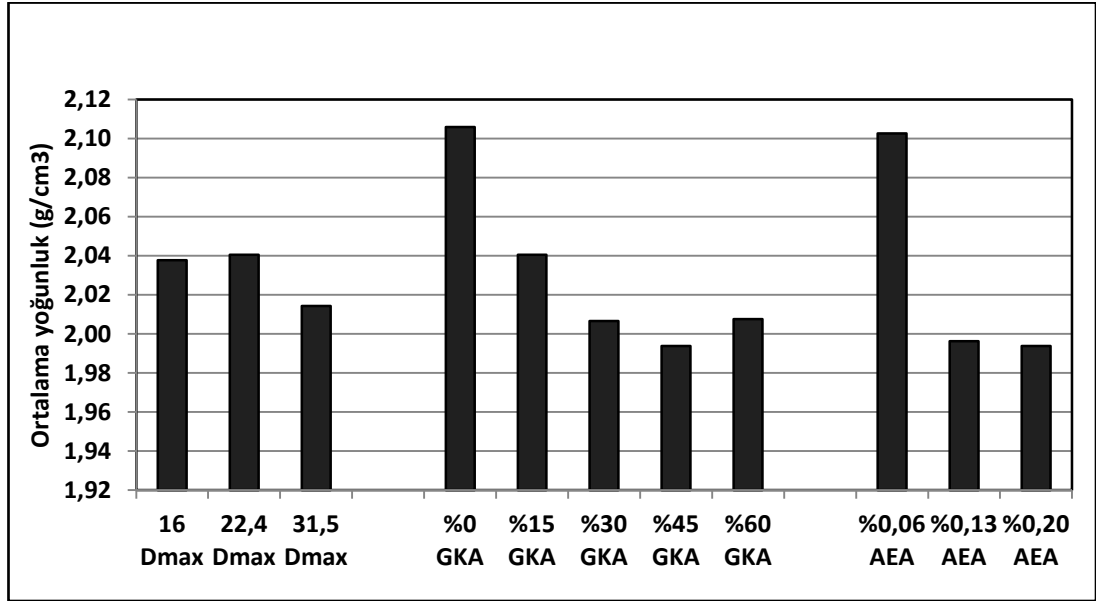
4.2.1. Yoğunluk tayini deney sonuçlarının incelenmesi

TS 12390-7 (Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini) (Anonim 2010g)'e göre yapılan yoğunluk tayini deneyi sonuçları Şekil 4.7'de karışıma GKA katılma oranına göre verilmiştir.



Şekil 4.7. Betonların yoğunluklarının deney parametrelerine göre değişimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi sertleşmiş betonların yoğunlukları 1.88 g/cm^3 ile 2.24 g/cm^3 arasında değişmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.3’de verilen taze betonların birim ağırlık değerleri ($1.90\text{-}2.31 \text{ g/cm}^3$) ile hemen hemen aynıdır. Tüm serilerde en yüksek yoğunluk değeri 2.24 g/cm^3 ile 16D0G6A numunesinde ondan sonra ise, 2.21 g/cm^3 ile 31D0G6A numunesinden elde edilmiştir. GKA katılan karışımlardan ise 2.18 g/cm^3 ile 16D15G6A grubunda elde edilmiştir. En düşük yoğunluk değeri ise 1.88 g/cm^3 ile 16D30G20A grubundan ardından da 1.89 g/cm^3 ile 16D60G13A ve 31D30G13A numunelerinden elde edilmiştir. Seçilen parametrelerin sertleşmiş betonların ortalama yoğunluğu üzerindeki etkisi ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

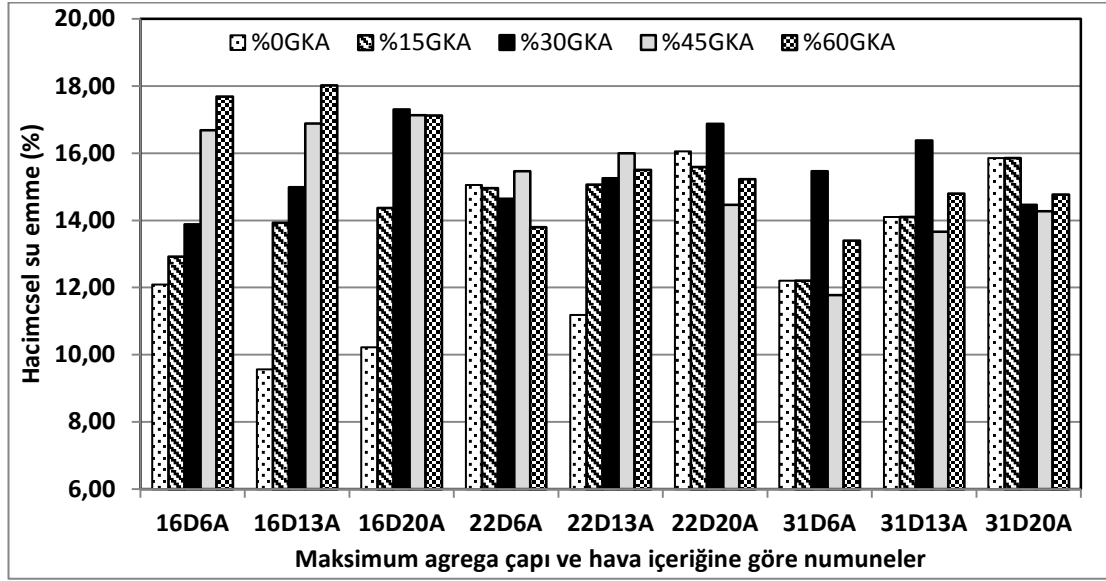


Şekil 4.8. Ortalama yoğunluk değerlerinin parametrelere göre değişimi

Şekil 4.8’de verilen grafikten de görüldüğü üzere maksimum agrega tane çapının 22.4 mm’den 31,5 mm’e çıkarılması ile betonların yoğunluklarında az da olsa düşüş olmuştur. Taze betonda olduğu gibi kullanılan GKA miktarı ile hava sürükleyici katkı malzemesinin artmasıyla da sertleşmiş betonun yoğunluğu da azalmıştır. Literatürde benzer birçok sonuç bulunmaktadır (Erdal 2011; Tüfekçi 2011; Beltran 2014). Ancak, GKA oranının %60’a çıkarılması ile yoğunlukta çok az oranda bir artış görüldüğünü ve AEA’nın %0,13 oranı ile %0,20 oranının yoğunluk üzerine bir etkisi olmadığını dea belirtmek gerekir. GKA oranının artması ile yoğunluğun azalmasının bu agregaların tane yoğunlukları ile ilişkilidir. Nitekim Çizelge 3.8’de verilen agrega özelliklerinden normal agregaların 2,44-2,71 g/cm³ arasında değişen yoğunluklara sahip oldukları buna karşın GKA yoğunluklarının ise 2,22-2,43 g/cm³ arasında değiştiği görülmektedir.

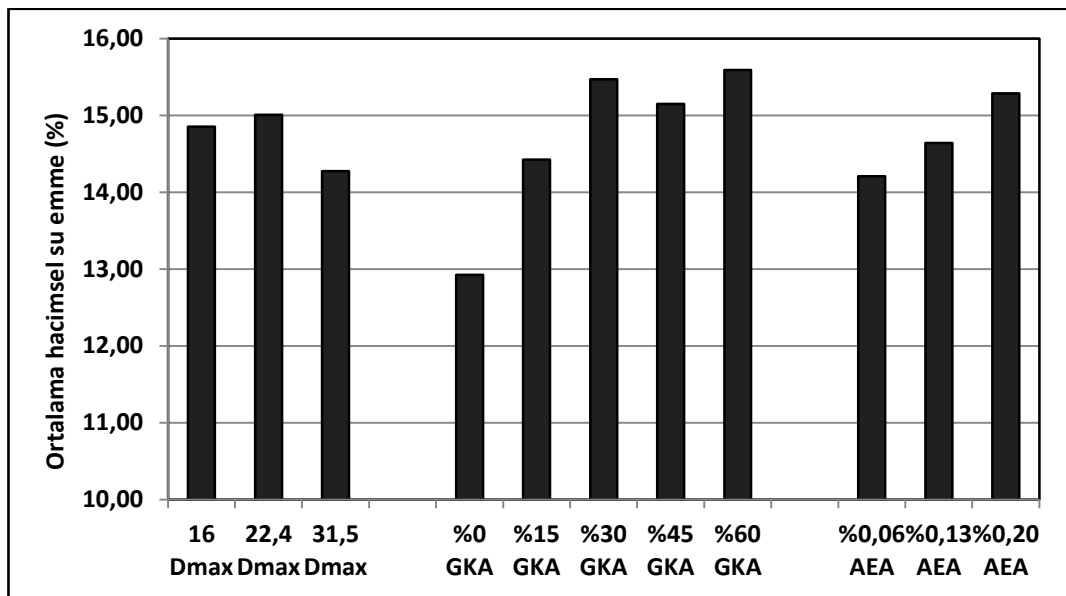
4.2.2. Hacimsel su emme oranı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.2’de verilen sertleşmiş betonların hacimsel su emme oranların karışıma katılan GKA oranına göre değişimi tüm seriler için aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.9. Hacimsel su emme oranının deney parametrelerine göre değişimi

Şekil 4.9'dan da görülebileceği üzere GKA içermeyen betonların su emme oranları genel olarak diğerlerine göre daha düşüktür. Ancak, maksimum agrega çapı ve hava içeriğine göre farklılık arz etmektedir. Bu durumu daha ayrıntılı inceleyebilme amacıyla hazırlanmış olan parametrelerin ortalama su emme değerleri üzerindeki etkisini gösteren grafik aşağıda Şekil 4.10'da verilmiştir.

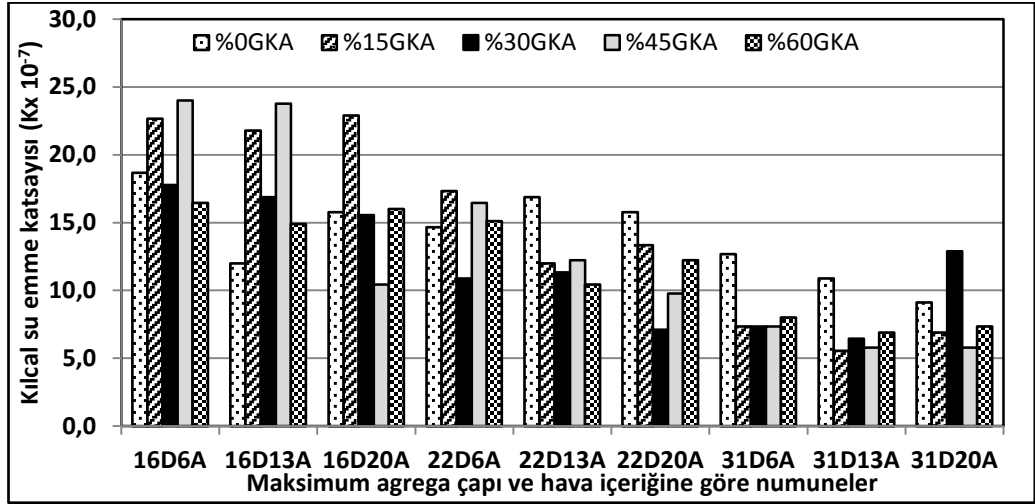


Şekil 4.10. Seçilen parametrelerin ortalama su emme değerleri üzerindeki etkisi

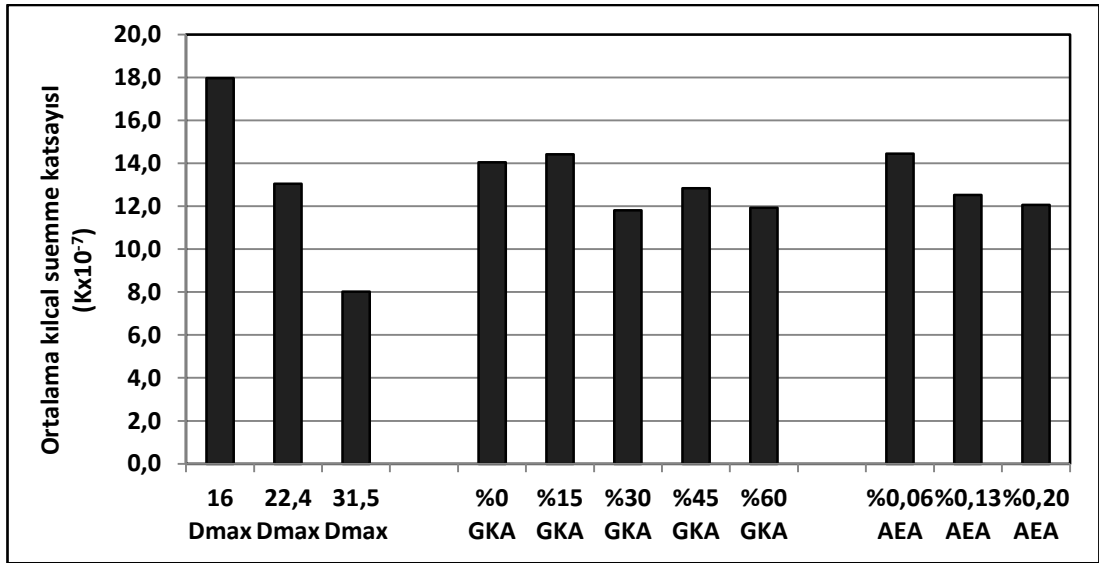
Grafikten de anlaşılacağı üzere maksimum agrega tane çapının artışı su emme üzerinde belirgin bir artma ya da azaltma oluşturmamıştır. GKA oranındaki artış ise betonun hacimce su emme değerini artırmıştır. Hacimsel su emmenin ancak bu artış %30 değerine kadar devam etmişken bu değerden sonra sabit kaldığı söylenebilir. Yine hava sürükleyici katkının artışı da betondaki boşluk miktarını artırdığından hacimsel su emme değerlerinde de artışa neden olmuştur. Literatürde örneğin Erdal (2011), Tüfekçi (2011) de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Karışımlardaki GKA oranının betonun hacimsel su emmesini artırması bu agregaların su emme değerleri ile açıklanabilir. Nitekim normal iri agregaların %0,96-%1,89 arasında değişen oranlarda su emdikleri buna karşın GKA'ların su emmelerinin ise %6,02-%10,40 arasında değiştiği Çizelge 3.8'den görülebilir.

4.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Kılcal su emme deneyi sonucunda bulunan kılcallık katsayısı (K) değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre çizilen ve kılcal su emme katsayısının karışımların GKA içreğine göre değişimini gösteren grafik ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere betonların kılcal su emmeleri ile hacimsel su emmeleri arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. En yüksek kılcallık katsayısı düşük maksimum agrega çapına sahip ve az miktarda hava sürükleyici katkı içeren karışımlarda görülmüştür. Parametrelerin betonların ortalama kılcallık katsayıları üzerindeki etkileri ise Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Kılcal su emme katsayısının karışımların parametrelere göre değişimi



Şekil 4.12. Seçilen parametrelerin ortalama kılcal su emme katsayısı üzerindeki etkisi

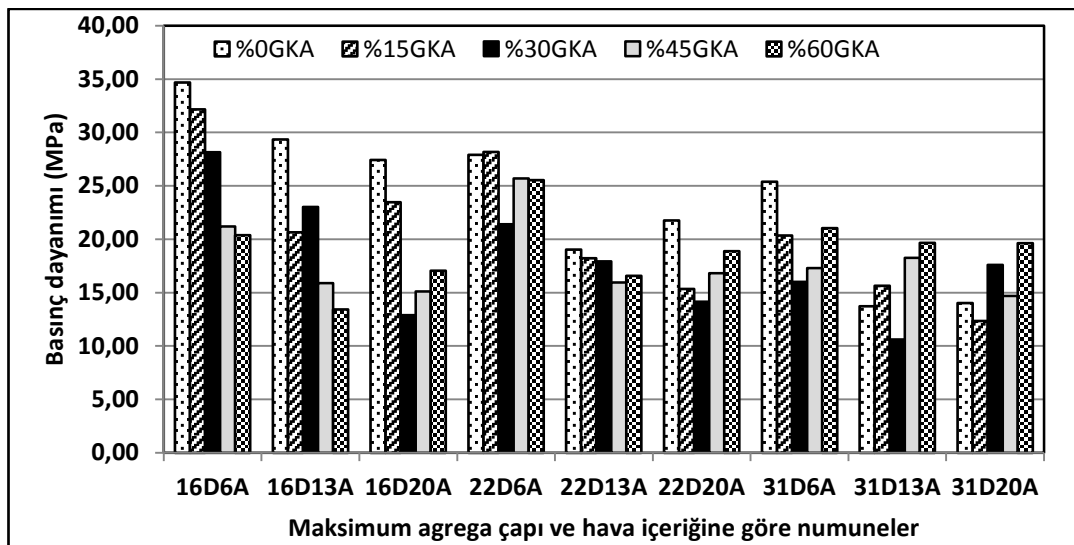
Şekilden görülebileceği üzere maksimum agrega tane çapının artması ile sertleşmiş betonların kılcallık katsayıları bariz bir şekilde düşmüştür. Benzer durum hava sürükleyici katkı maddesinin artırılmasında da görülmüştür. Agrega maksimum tane çapının artması ile betondaki kılcal boşluklarının çapının arttığı, çap artışının ise kılcallığı azalttığı (Jurin Yasası) ile açıklanmıştır. Hava sürüklenme yolu ile oluşturulan boşluklar ise birbirinden bağımsız ve küresel şekilli olduğundan (Şahin 2003) bu

boşlukların kılcal boşlukları keserek suyun ilerlemesine engel oldukları ya da ilerleme hızını azalttığı için betonların kılcal geçirimsizliklerinin düştüğü söylenebilir.

Diğer taraftan, Şekil 4.12'den de görüldüğü üzere, GKA oranındaki değişimin betonların kılcal geçirimsizlikleri üzerindeki etkisi için kesin bir yargıya varılamaz. Karışımlara GKA katılması ile hacimsel su emme oranının artmasına rağmen aynı sonuç kılcal su emme için geçerli olmamıştır. Bunun nedeninin de kılcallık kuralı ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Dışa açık boşluk miktarları fazla, dolayısı ile hacimsel su emmeleri yüksek olan, bu agregaların betonda kullanılması durumunda kılcal su emmeleri için aynı etkiyi göstermedikleri belirlenmiştir. Yani, GKA'ların içerdikleri boşluklar da kılcal su emme hızını artırıcı yönde değil, çok az da olsa, azaltıcı yönde etki ettiği söylenebilir.

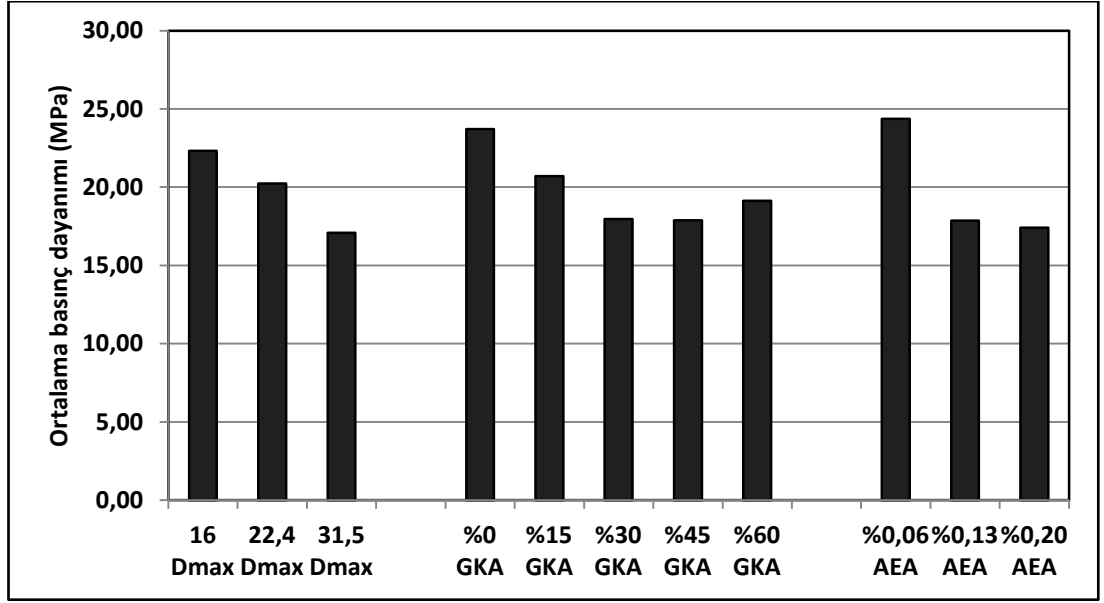
4.2.4. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Basınç dayanımı deneyi neticesinde bulunan sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.13'de ise betonların basınç dayanımlarının içerdikleri GKA miktarına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Basınç dayanımı üzerinde seçilen parametrelerin etkisi

Şekil 4.13'ten betonların dayanımları üzerinde içerdikleri GKA oranı, maksimum agrega çapı ve hava içeriğinin etkilerinin olduğu görülmektedir. Bu değişiklikleri daha net olarak belirleyebilmek için aşağıdaki grafik (Şekil 4.14) oluşturulmuştur.



Şekil 4.14. Parametrelerin ortalama basınç dayanımı üzerindeki etkileri

Şekil 4.14'den de görüldüğü gibi maksimum tane çapının ve hava sürükleyici katkı miktarının artması betonların basınç dayanımını düşürmüştür. Hava sürükleyici katkı maddelerinin artması ile betonun basınç dayanımının düşmesi beton teknolojisinde beklenen bir sonuçtur. Ancak, agregaların maksimum tane çapının artması ile beton dayanımında görülen düşüşler ilginç bulunmuştur.

Karışımlardaki GKA oranının artması ile de betonların basınç dayanımlarında düşmelerin olduğu yine Şekil 4.14'den görülmektedir. Bu düşüş özellikle %30 oranına kadar daha bariz bir şekilde gözlemlenmiştir. Betondaki GKA oranının %30'un üzerine çıkması ise dayanımında kayda değer değişikliklere yol açmamış sadece %60 oranında GKA içeren karışımların basınç dayanımları %30 ve %45 oranında GKA içerenlere göre çok az bir miktar artış göstermiştir. Literatürdeki birçok çalışmada örneğin Topçu and Günçan (1995); Rao *et al.* (2006); Akbari *et al.* (2011); Saravanakumar and

Dhinakaran (2012) GKA miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığını söylerken dikkate değer bir etkisi olmadığını söyleyen çalışmalar örneğin Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002), Soares *et al.* (2014) da vardır. Deney sonuçlarına göre tüm serilerde en yüksek basınç dayanımı 34,7 MPa değeri ile 16D0G6A kodlu numunelerde elde edilmiştir. GKA kullanılan gruplarda ise en yüksek basınç dayanımı 32,2 MPa değeri ile 16D15G6A kodlu numunelerden en düşük basınç dayanımı ise 10,6 MPa değeri ile 31D30G13A kodlu numunelerden elde edilmiştir.

4.2.5. Donma-çözülme deneyleri sonuçları

Çalışmada üretilen beton numuneler üzerinde CDF Yönetimi'ne göre gerçekleştirilen donma-çözülme deneylerinden elde edilen bulgular Çizelge 4.3'de bu bulgulara istinaden yapılan değerlendirmeler ise ilerleyen alt başlıklarda verilmiştir.

Çizelge 4.3. Betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi

KOD	Çevrim Sayısı				S_n^* (kg/m ²)	KOD	Çevrim Sayısı				S_n (kg/m ²)
	4	8	14	28			4	8	14	28	
16D0G6A	2,76	15,16	33,60	141,1	8,58	22D30G20A	0,91	1,44	0,43	1,58	0,19
16D0G13A	2,11	4,91	7,18	26,06	1,79	22D45G6A	0,13	0,99	1,53	2,87	0,25
16D0G20A	2,09	2,64	3,31	7,70	0,70	22D45G13A	0,10	0,37	1,12	1,30	0,13
16D15G6A	1,27	1,88	3,03	6,86	0,58	22D45G20A	0,19	0,15	0,21	0,29	0,04
16D15G13A	0,58	0,87	1,00	1,52	0,18	22D60G6A	0,32	0,23	0,98	1,43	0,13
16D15G20A	2,61	3,08	4,62	7,42	0,79	22D60G13A	1,71	1,81	2,94	3,53	0,44
16D30G6A	0,50	0,87	1,32	1,95	0,21	22D60G20A	0,31	0,28	1,09	1,46	0,14
16D30G13A	0,51	1,34	1,94	2,65	0,29	31D0G6A	1,83	2,15	3,89	6,26	0,63
16D30G20A	0,46	0,72	0,75	0,82	0,12	31D0G13A	1,50	0,79	1,07	4,40	0,34
16D45G6A	0,81	0,84	1,21	1,99	0,22	31D0G20A	0,78	1,05	0,65	1,47	0,18
16D45G13A	0,46	0,77	0,71	0,90	0,13	31D15G6A	0,64	0,98	2,01	5,62	0,41
16D45G20A	0,69	1,03	0,31	1,25	0,15	31D15G13A	0,19	0,81	0,81	1,37	0,14
16D60G6A	0,35	0,81	0,45	1,21	0,13	31D15G20A	0,74	1,17	1,74	4,68	0,37
16D60G13A	0,38	0,81	0,89	1,38	0,15	31D30G6A	0,28	0,60	1,33	4,94	0,32
16D60G20A	0,51	0,69	0,72	2,72	0,21	31D30G13A	0,62	1,27	3,76	4,97	0,47
22D0G6A	0,31	0,53	0,58	3,20	0,21	31D30G20A	0,88	1,65	3,67	4,37	0,47
22D0G13A	0,41	0,51	0,65	0,83	0,11	31D45G6A	0,54	2,33	4,16	5,16	0,54

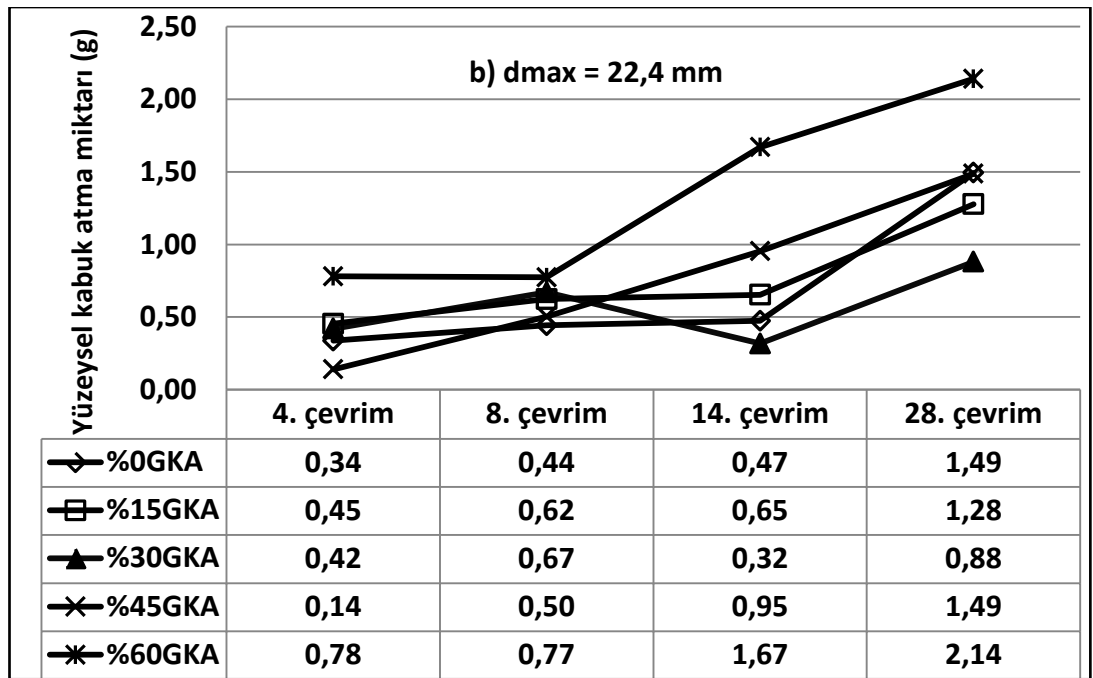
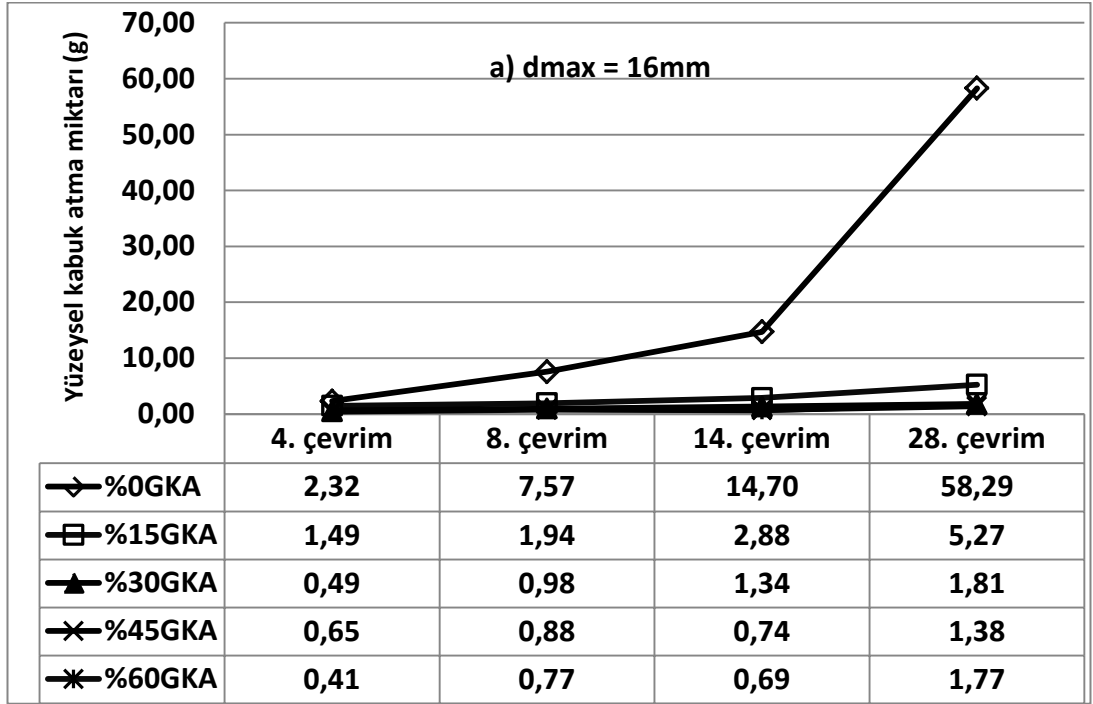
Çizelge 4.3. (devam)

22D0G20A	0,29	0,29	0,19	0,45	0,05	31D45G13A	0,16	1,66	1,15	2,36	0,24
22D15G6A	0,34	0,89	0,73	1,46	0,15	31D45G20A	0,18	0,78	0,87	1,46	0,15
22D15G13A	0,26	0,42	0,54	0,84	0,09	31D60G6A	0,71	0,90	1,05	1,74	0,20
22D15G20A	0,76	0,56	0,69	1,53	0,16	31D60G13A	0,93	1,13	1,33	1,94	0,24
22D30G6A	0,22	0,29	0,27	0,59	0,06	31D60G20A	0,22	0,51	0,85	1,09	0,12
22D30G13A	0,13	0,28	0,25	0,47	0,05	*S_n: Yüzeysel kabuk atma					

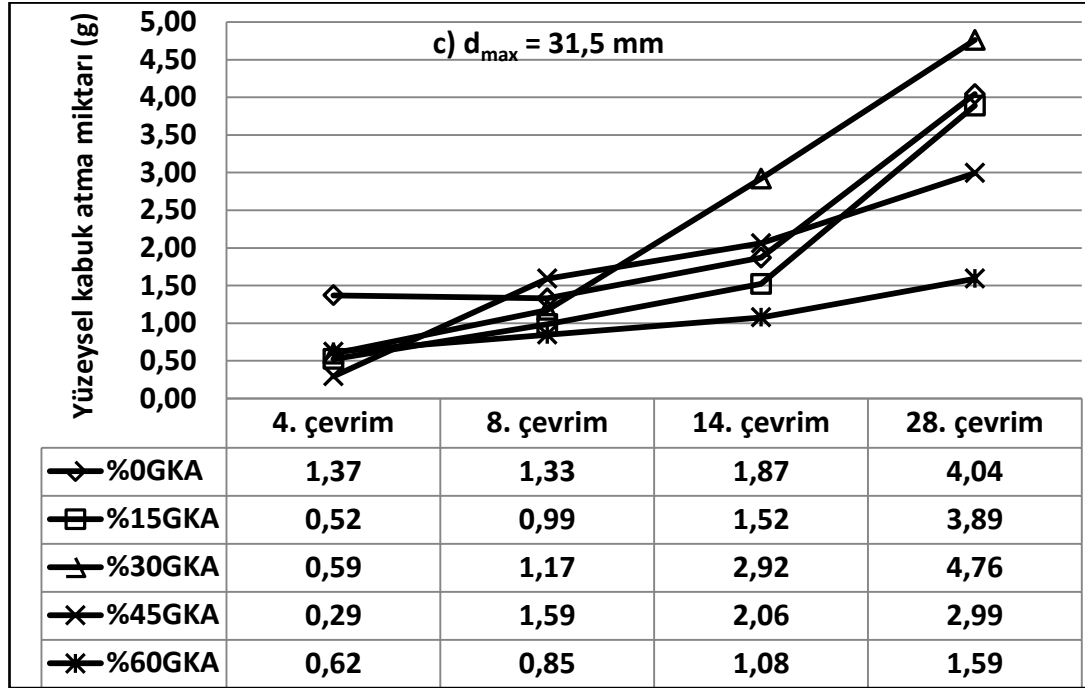
4.2.5.a. Maksimum agrega çapının GKA içeren betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkileri

Çalışma kapsamında seçilen üç farklı (16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm) maksimum agrega çapının beş farklı oranda GKA içeren betonların donma-çözülmeden kaynaklı yüzeysel kabuk atma dirençleri üzerindeki etkileri aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 4.15’de verilen grafiklerden de görülebileceği üzere GKA içeren betonlar maksimum agrega çaplarına bağlı olarak farklı yüzeysel kabuk atma dirençleri göstermişlerdir. Bütün gruplar içinde en fazla kabuk atma miktarının 16 mm maksimum agrega çapına sahip ve GKA içermeyen gruplarda olduğu Şekil 4.15(a)’dan görülmektedir. Bütün çevrimler için geçerli olan bu durum 28. çevrim sonu itibari ile 58.29 g gibi oldukça yüksek sayılabilecek bir değere erişmiştir.



Şekil 4.15. (devam)



Şekil 4.15. Maksimum agrega çapı ve GKA içeriklerine göre betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi

Maksimum tane çapı 16 mm olan gruplarda karşına GKA katılması ile kabuk atma miktarının, %0 oranında GKA içeren kontrol betonuna göre, kayda değer oranlarda azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Öyle ki, genel olarak GKA miktarının artması ile kabuk atmaların da azaldığı söylenebilir. Nitekim 28. çevrim sonu itibari ile %15 GKA katılan betonlardaki kabuk atma miktarı 5.27 g %60 oranında GKA içeren karışımlarda 1,77 g düşmüştür. Bu grupta en az kabuk atma değerleri ise %45 ve %60 oranında GKA içeren karışımlarda görülmüştür.

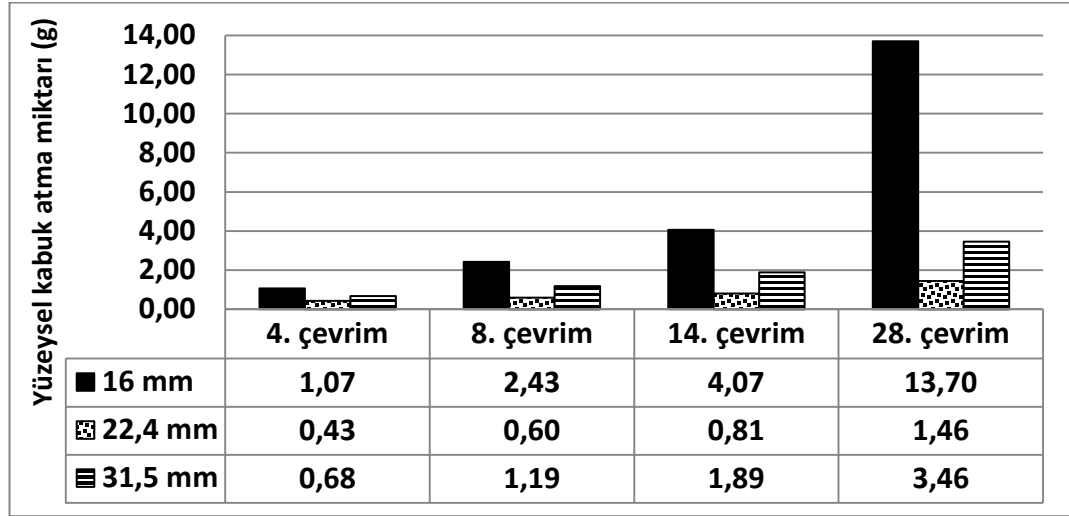
Maksimum agrega tane çapı 22,4 mm olan karşınlar da ise diğer iki tane çapına göre önemli bir ana farklılık göze çarpmıştır. Bu gruptaki kabuk atma miktarlarının diğerlerine göre daha düşük olmasıdır. Nitekim 28. çevrim sonu itibari $d_{max} = 16$ mm ve $d_{max} = 31,5$ mm olan betonlarda, sırasıyla, 58,29 g ve 4,76 g'lik maksimum kabuk atma değerleri ölçülmüş iken bu gruptaki maksimum kabuk atma miktarı 2,14 g'da kalmıştır. Diğer taraftan en fazla yüzeysel kabuk atma $d_{max} = 16$ mm olan betonlarda görülmüş ve gruptaki %60 oranında GKA içeren karışımlarda görülmüştür. %60 GKA içeren grup

hariç tutulacak olursa betona GKA katmakla yüzeysel kabuk atma miktarında görülen değişimin çevrim sayısına göre değiştiği ve 14. ve 28. çevrim itibari ile en az kabuk atmanın %30 oranında GKA içeren karışımlarda olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, bütün gruplarda kabuk atma miktarlarının diğer iki maksimum agrega çapına sahip betonlara göre düşük olduğunu tekrar vurgulamak gerekir. Ayrıca maksimum agrega çapına göre yapılan değerlendirmelerde tüm çevrimlerde bütün seriler içinde en düşük ortalama kabuk atma miktarına da (0,14 g ile %45 GKA'lı karışım) bu grupta rastlandığını belirtmek gerekir.

31,5 mm'lik maksimum agrega tane çapına sahip olan karışımlar ise en fazla yüzeysel kabuk atma miktarı %30 oranında GKA içeren karışımlarda $d_{max}=16$ mm olan karışımlara paralel sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu durum özellikle 14. ve 28. çevrimde bu şekildedir. %30 oranında GKA içerenler hariç çevrim sonu itibari ile yapılan değerlendirmede de karışımdaki GKA oranının artması ile betonların donma-çözülme kaynaklı yüzeysel kabuk atma dirençlerinin düştüğü net olarak görülmüştür. Bu grupta hemen hemen bütün çevrimlerde en iyi sonucu %60 oranında GKA içeren karışımlar vermiştir ki bu durum $d_{max}=22,4$ mm'nin tam aksi durumdur. Ancak ilk dört çevrimde %45 oranında GKA içeren karışımların oldukça az miktarda (0,29 g) kabuk attığı Şekil 4.15 (c)'den görülmektedir.

Deneylerden elde edilen bulgulardan hareketle maksimum agrega tane çapına göre betonların ortalama yüzeysel kabuk atma miktarları da belirlenmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4.16'da verilmiştir.

Şekil 4.16'dan da görülebileceği üzere bütün donma-çözümeye deneyleri boyunca (yani tüm çevrimlerde) en fazla kabuk atma miktarı 16 mm'lik maksimum agrega çapına sahip olan betonlarda görülmüştür. Buna karşın en az kabuk atmanın da 22.4mm'lik maksimum agrega çapına sahip olan betonlarda görüldüğü yine aynı grafikten görülmektedir.

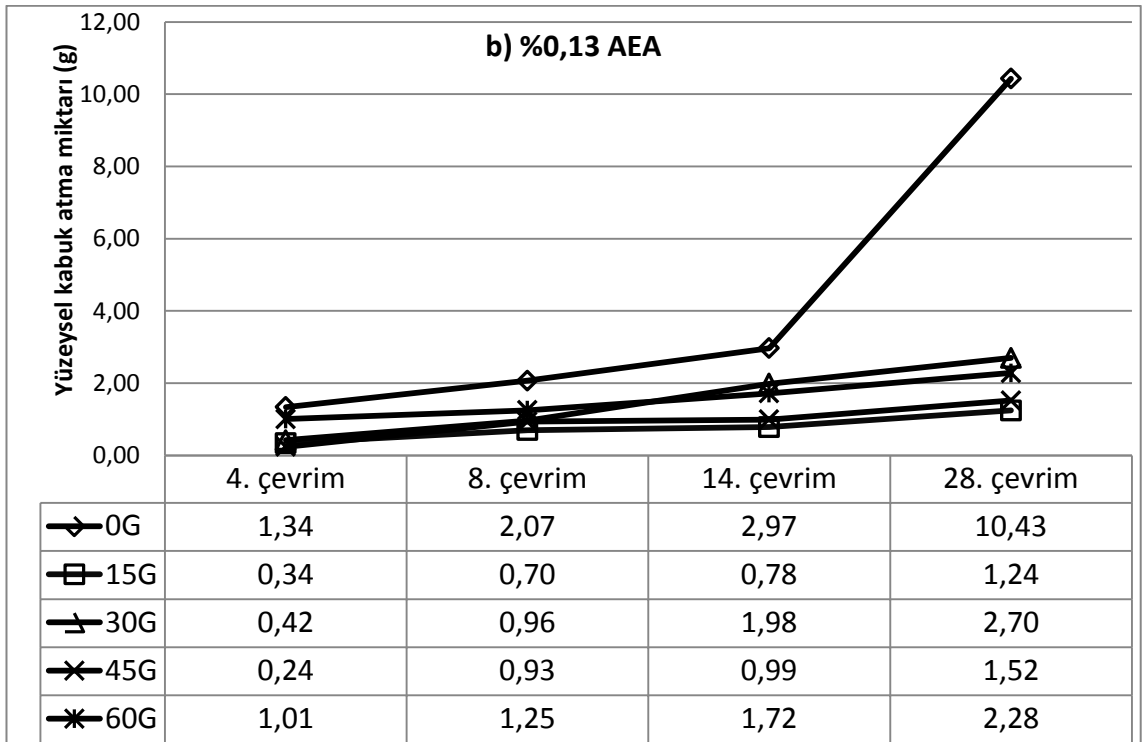
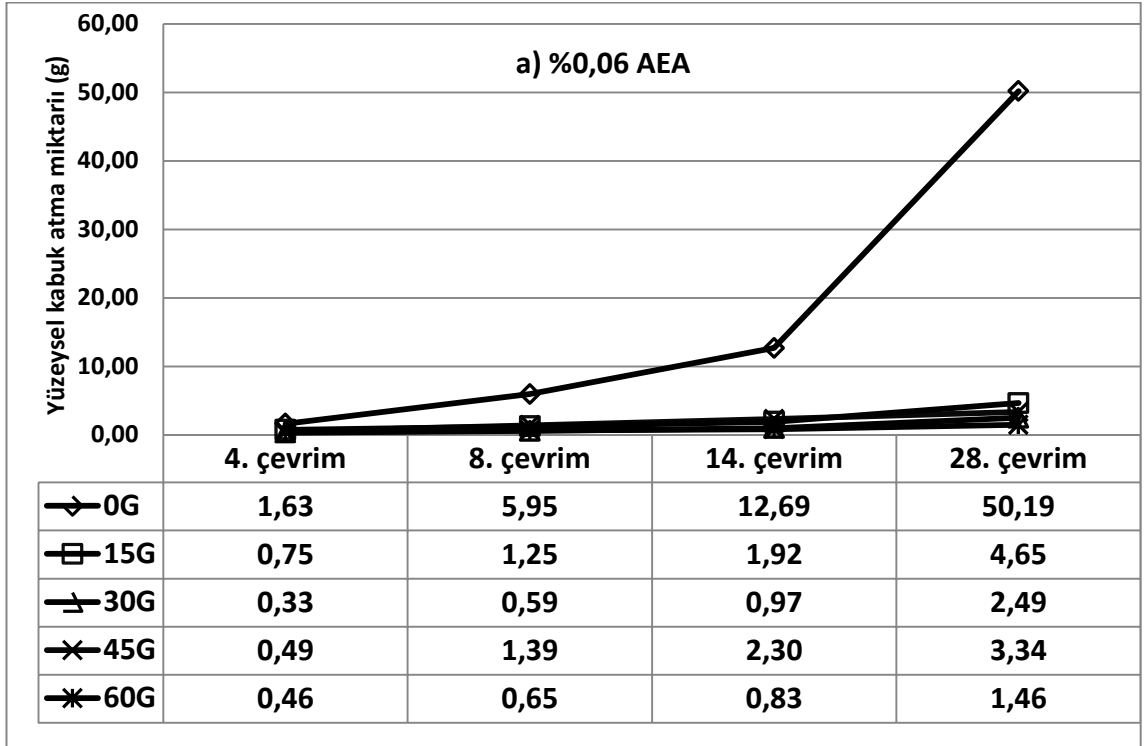


Şekil 4.16. Maksimum agrega tane çapının karışımların yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkisi

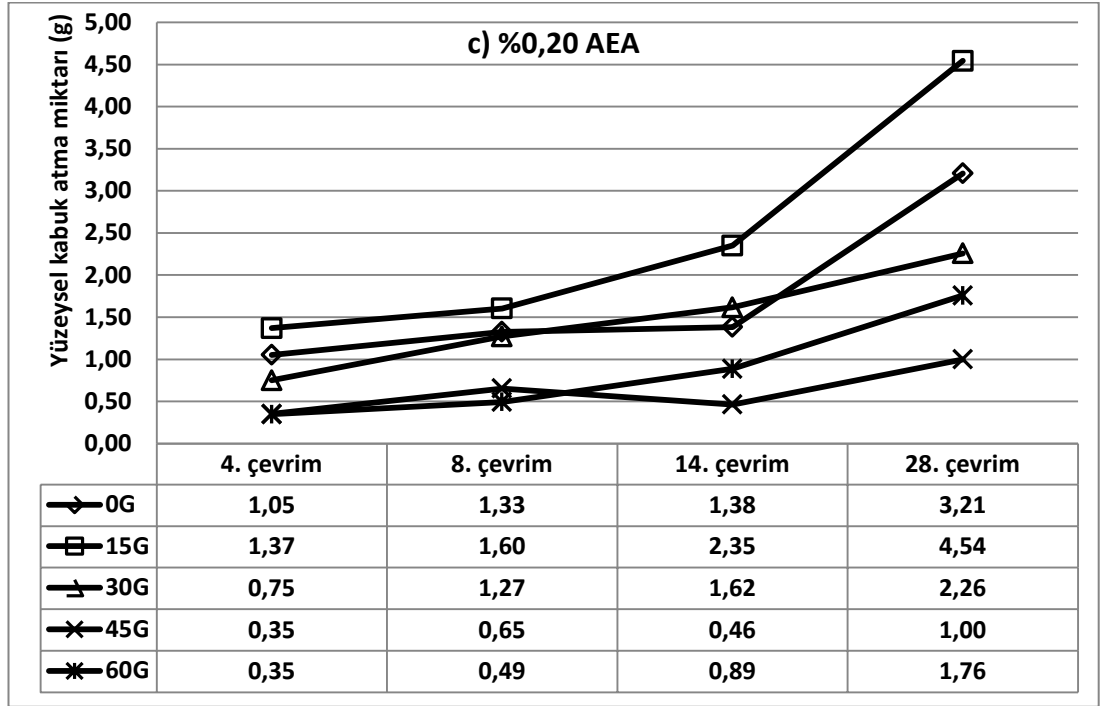
4.2.5.b. Hava sürükleyici katkı maddesi oranının GKA içeren betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkileri

Deneysel çalışma kapsamında üretilen tüm karışımlara üç farklı oranda (%0,06, %0,13 ve %0,20) hava sürükleyici katkı maddesi katılmıştır. CDF Yöntemi'ne göre gerçekleştirilen donma-çözülme deneyleri sonucunda betonların yüzeylerinden olan ortalama kabuk atma miktarları belirlenerek Şekil 4.17'de verilmiştir. Belirtilen şekildeki grafikler, karışımların GKA içerikleri ve çevrim sayısına göre ölçülen ortalama kabuk atma miktarlarını göstermektedir.

Şekil 4.17'de verilen üç grafik incelendiğinde betonların kabuk atma dirençleri üzerinde hava sürükleyici katkı maddesinin miktarının etkisinin olduğu görülmektedir. Bu etki katkı maddesinin oranına göre değişiklik göstermekte olup aşağıda her bir katkı oranının etkisi ayrı ayrı belirtilmiştir.



Şekil 4.17. (devam)

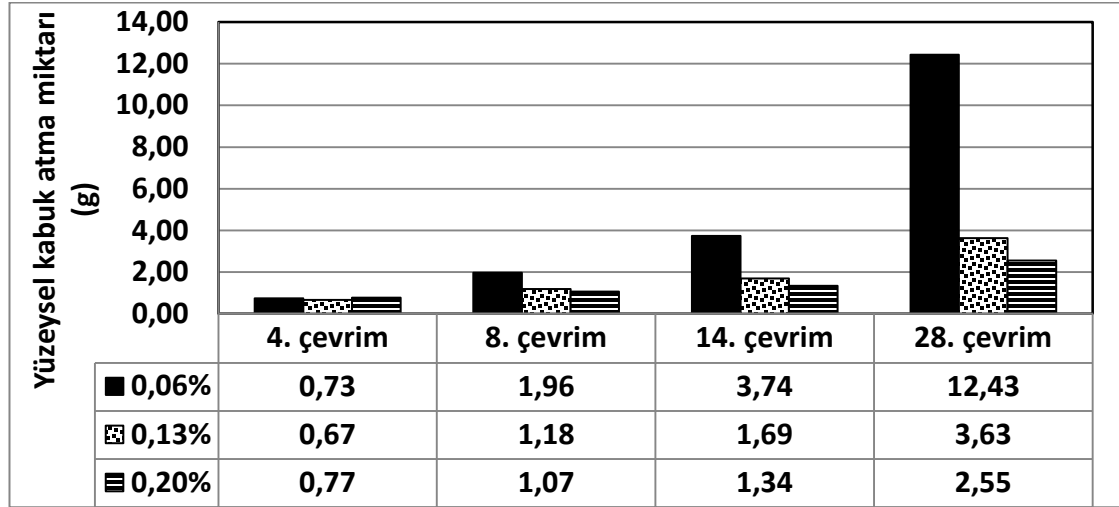


Şekil 4.17. Hava sürükleyici katkı miktarı ve GKA içeriklerine göre betonların yüzeysel kabuk atma miktarlarının çevrim sayısına göre değişimi

%0,06 oranında hava sürükleyici katkı içeren betonlar içinde en fazla kabuk atan (50,19 g) grubun %0 oranında GKA içeren karışımlar olduğu görülmüştür. Bu grup aynı zamanda tüm çevrimler boyunca en fazla kabuk atan gruptur. GKA katılmış betonlar içinde ise en az kabuk atan karışımlar %30 ve %60 oranında GKA içeren karışımlardır. Nitekim 28. çevrim sonu itibari ile %30 ve %60 oranında GKA içeren betonlar, sırasıyla, 2,49 g ve 1,46 g miktarlarında kabuk atmışlardır. Bu iki oran kendi aralarında karşılaştırıldıklarında ise ilk sekiz çevrimde %30 oranında GKA içeren betonlar bu çevrimden sonra ise %60 oranında GKA içeren betonların daha az kabuk attıkları belirlenmiştir. Taze betonda hava içeriği deney sonuçlarına göre de hava sürükleyici katkı miktarının en az olduğu grubun beklendiği üzere hava içeriği miktarlarının da az olduğu görülmüştür (Şekil 4.6). Dolayısıyla bu betonlar yeterli birbirinden bağımsız küresel boşluk hacmine sahip olmadığından suyun donma çözülme çevrimlerinde en fazla hasara uğrayan gruplar olmuşlardır.

%0,13 oranında hava sürükleyici katkı içeren betonlarda ise yine en fazla kabuk atma GKA içermeyen betonlarda (kontrol grubu) görülmüştür. Ancak, bu gruptaki kabuk atma miktarları tüm çevrimler için %0,06 oranında AEA içeren karışımlara oranla çok daha düşüktür. Nitekim bu grupta 28. çevrim sonundaki kabuk atma miktarı bir önce değerlendirilen grubun sadece %20'sine karşılık gelmektedir (10,43 g). Bunun nedeni taze betonun hava içeriği ile açıklanabilir. Nitekim Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere %0,13 oranda AEA içeren karışımlar %0,06 oranda AEA içeren karışımlardan yaklaşık %50 oranda daha fazla hava içermektedirler. Bu grupta en az kabuk atma ise %15 oranında GKA içeren karışımlarda görülmüştür. Bu durum, ilk dört çevrim hariç, kalan tüm çevrimler için geçerlidir. %45 oranda GKA içeren karışımlar ise %15 oranında içerenlere yakın miktarlarda kabuk atmışlardır. Diğer taraftan, %0,06 oranında AEA içeren karışımlarda en az kabuk atan %30 ve %60 oranında GKA içeren karışımların bu grupta, diğer GKA içeren karışımlara göre, daha fazla kabuk atmış olmaları ilginç bulunmuştur.

%0,20 oranında hava sürükleyici içeren karışımlarda ise ilk iki karşımda görülenin aksine en fazla pullanma bütün çevrimler boyunca %15 oranında GKA içeren karışımlarda olmuştur. %0 oranında GKA içeren karışımlar ise ikinci sırada gelmişlerdir. Bu grupta tüm çevrimler için en az kabuk atma öncelikle %45, ondan sonra da %60 oranında GKA içeren karışımlarda olmuştur. 28. çevrim sonu itibari ile en az kabuk atmanın görüldüğü %45 oranında GKA içeren karışımlarda kabuk atma miktarı ise 1,00 g olarak belirlenmiştir. Farklı oranlarda hava sürükleyici içeren betonlarda görülen ortalama kabuk atma miktarlarının hava sürükleyici oranına göre değişimi ise Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Hava sürükleyici katkı oranının karışımların yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkisi

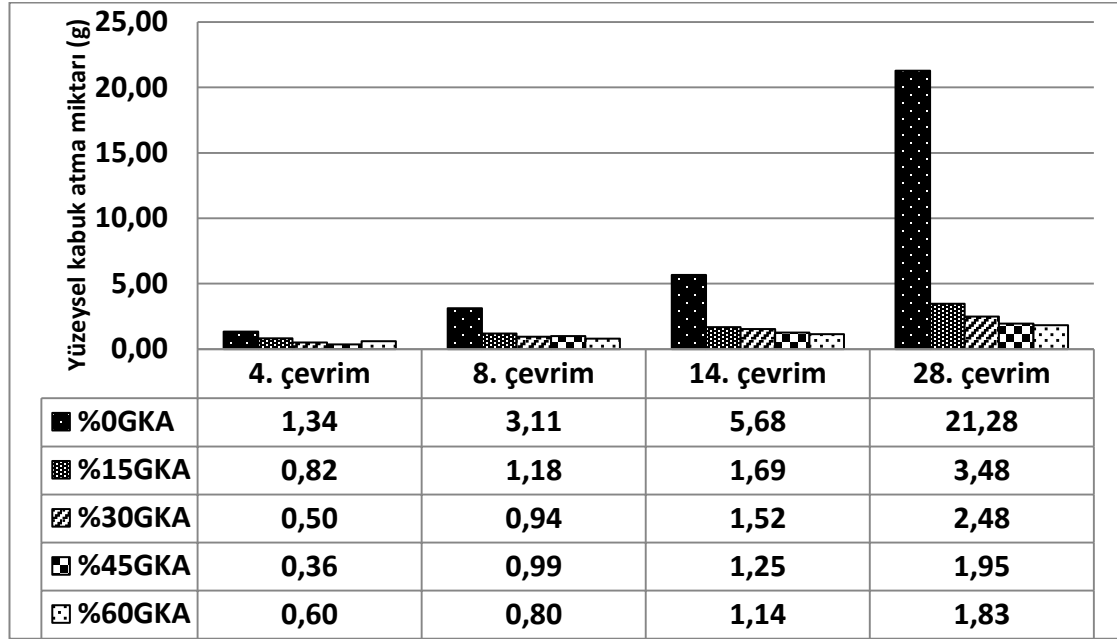
Şekil 4.18'den betonların yüzeysel kabuk atmaları üzerinde hava sürükleyici katkı oranının etkisi net olarak görülmektedir. Çevrim sayısı ilerledikçe hava sürükleyici katkı dozajının artmasının betonun yüzeysel kabuk atma direncinin yükseldiği tespit edilmiştir. Nitekim ilk dört çevrim boyunca örneklerin kabuk atma miktarlarında hemen hemen bir farklılık yokken 8. çevrimden sonra farkın görülmeye başlandığı 14, özellikle de 28. çevrimden sonra etkinin belirgin olarak ortaya çıktığı yine Şekil 4.18'de verilen grafiklerde açıkça görülmektedir. Öyle ki 28. çevrim sonu itibari ile %0,13 ve %0,20 oranında hava sürükleyici katkı içeren betonlarda görülen kabuk atma miktarları %0,06 oranında katkı içeren betonların, sırasıyla, %29 ve %20'si kadar olmuştur. Buradan özellikle tekrar sayısı artıkça hava sürükleyici katkı miktarının artmasıyla betonun donma-çözülme direncinin de artıracığı sonucu çıkmaktadır.

Hava sürükleyici katkı maddeleri ile beton içinde oluşturulan küçük, kapalı ve ayrık haldeki milyarlarca hava boşluğunun; i- malzemeyi daha elastiki yaparak buz basınçlarına karşı dayanımını artırması, ii- kılcal kanalları keserek kılcal su emmeyi azaltması ve iii-suyun kolay boşalmasına dolayısı ile hidrostatik basınçların azalmasına imkân vermesi nedenlerinden dolayı betonların donma-çözülme ve donma-buz çözücü tuz dirençlerini artırdığı belirtilmektedir (Şahin 2003; Baradan vd 2012).

Beton numunelere hava sürükleyici katkı ve GKA katılmasıyla beton içerisinde birbirinden bağımsız boşluklar oluşturulmuş ve donma çözülme çevrimlerine karşı daha dirençli olmuştur. Bu sonuçlar sertleşmiş betonda kılcal su emme deneyi sonuçları ile ilişkilendirilebilir. Nitekim Şekil 4.12'den kılcal su emme katsayısının en fazla olduğu grupların GKA oranı ve hava sürükleyici katkı miktarının da az olduğu görülmektedir. Dolayısıyla GKA ve hava sürükleyici katkı miktarının artmasının kılcal su emme miktarını azalttığı savunulabilir. Kılcal su emmenin azalması ise numuneye temas eden suyun içerilere doğru ilerleyemeyeceği ya da ilerleme hızının azalacağı anlamına gelmektedir. İçerisinde az su bulunan betonlar ise daha düşük doygunluk derecesine sahip olacaklarından donma-çözülme dirençleri de yüksek olacaktır.

4.2.5.c. Geri kazanılmış agregası (GKA) oranının betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkileri

Geri kazanılmış agregalarının normal agregası ile ikame edilerek değerlendirilmesinin betonun donma-çözülme direnci üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada, katılan GKA oranının karışımların ortalama yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkileri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. GKA oranının betonun yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkisinin donma-çözülme çevrimine göre değişimi

Şekilde verilen grafiklerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

i- Betonun donma-çözülme direnci üzerinde geri kazanılmış agreganın olumlu yönde etkisinin olduğu kesindir. Nitekim Şekil 4.18'den de görüldüğü gibi GKA katılmayan karışımların yüzeysel kabuk atma miktarları diğerlerine göre çok daha fazladır.

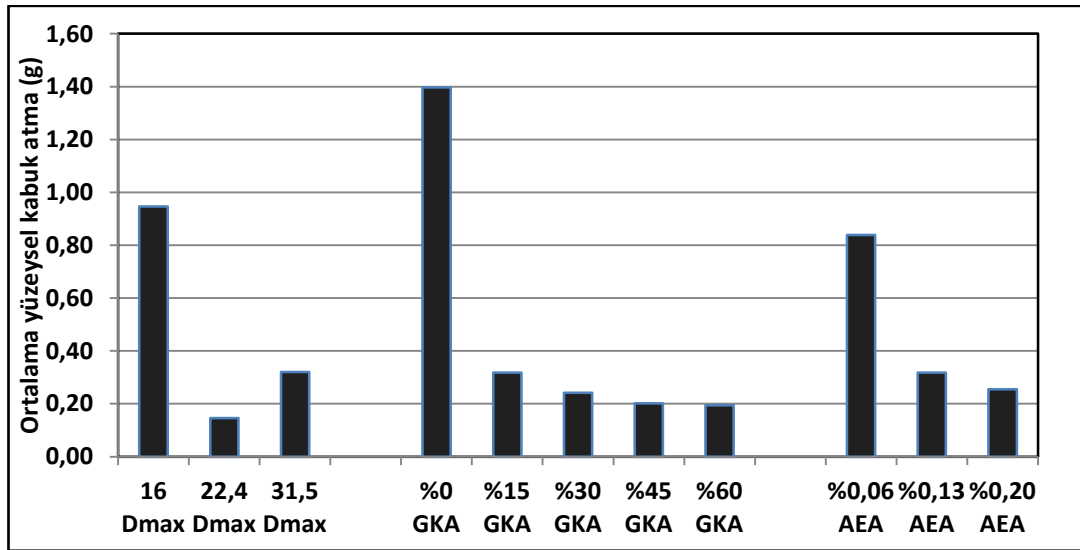
ii- GKA'ların betonların donma-çözülme dirençlerini artırmaları donma-çözülme çevriminin artması ile daha da belirgin hale gelmektedir.

iii- GKA oranının artması ile betonların kabuk atma dirençleri de artmaktadır. Nitekim ilk sekiz çevrimde tam olarak görülemez de, 14 ve 28. çevrimlerden sonra karışımdaki GKA oranı arttıkça kabuk atma miktarının sürekli düştüğü şekildeki grafiklerden net olarak görülmektedir. Bu durum, literatürde belirtilen sonuçlardan farklılık arz etmektedir. Örneğin Topçu and Şengel (2004), Oikonomou (2005), Çakır and Sofyanlı (2014) betonda kullanılacak GKA oranının optimum değeri olarak %30 değerini işaretlemiştir. Ancak, bu çalışmada elde edilen bulgulardan hareketle donma-

çözülme direnci açısından bu oranının çok bağlayıcı olmadığı, %60 gibi, daha yüksek oranların da kullanılabileceği söylenebilir. Bu sonucun çalışmanın ana temasını oluşturan donma-çözülme açısından olduğunu vurgulamak gerekir. Uygulamada ise birçok zaman betonun durabilite özellikleri yanında mekanik özelliklerinin de belli değerlerden yukarıda olması gözetilir. Nitekim Şekil 4.14'ten betona GKA katılması ile basınç dayanımında bir miktar düşüşler olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, bu paragrafta yapılan değerlendirmelerin bu çalışmanın sınırları içinde geçerli olduğunu da belirtmek gerekir. Bu çalışmada GKA ile donma-çözülme direnci üzerinde olumlu etkisi olduğu literatürde açık olarak belirtilen hava sürükleyici katkı maddesinin betonun yüzeysel kabuk atması üzerindeki etkisi birlikte incelenmiştir.

4.2.5.d. Tüm parametrelerin betonların yüzeysel kabuk atma direnci üzerindeki etkileri

Karışımlara katılan GKA oranı ile diğer parametreler olan maksimum agrega çapı ve hava sürükleyici katkı oranının betonların ortalama yüzeysel kabuk atmaları üzerindeki etkileri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Seçilen parametrelere göre ortalama yüzeysel kabuk atma grafiği

Şekildeki grafiklerinden de görüldüğü üzere GKA içermeyen ve hava sürükleyici katkı maddesi en az olan numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonucu yüzeysel kabuk atma miktarları en fazladır. Yukarıda da belirtildiği gibi kullanılan GKA miktarı arttıkça da yüzeysel kabuk atma direnci de artmıştır. Maksimum agrega tane çapı için optimum değer 22,4 mm olarak bulunmuştur.

Nitekim çalışmada yüzeysel kabuk atma direnci en yüksek($0,04 \text{ kg/m}^2$) olan karışımın 22D45G20A kodlu karışım olduğu Çizelge 4.3'den görülmektedir. Bu karışımın maksimum tane çapı 22,4mm, içerdiği GKA oranı %45 ve kullanılan hava sürükleyici katkı maddesi oranı %0,20'dir. Buna karşın, yüzeysel kabuk atma direnci en düşük ($8,58 \text{ olan kg/m}^2$) olan karışım ise 16D0G6A kodlu numune olduğu yine aynı çizelgeden görülebilir. Bu karışımın ise maksimum tane çapı 16 mm, içerdiği GKA oranı %0 ve kullanılan hava sürükleyici katkı maddesi oranı %0,06'dır. Sonuç olarak karışıma %0,20 oranında hava sürükleyici katkı maddesi katılması ile hava içeriğinin değişmediği (Şekil 4.6) ve basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkisi olduğu da göz önünde bulundurularak AEA için optimum oran olarak %0,13 oranı verilebilir. Maksimum agrega çapının optimum değeri ise 22,4 mm'dir. GKA oranının optimum değeri ise %45 olarak belirlenmiştir.

Literatürdeki geri kazanılmış agregalı betonların donma-çözülme direnci konusunda bir biriyle tam örtüşmeyen sonuçlar olduğu çalışmanın amaçları kısmında belirtilmişti. Örneğin Gökçe *et al.* (2003), Topçu and Şengel(2004), Zaharieva *et al.* (2004), Medina *et al.* (2013) ve Tuyan *et al.* (2014) GKA oranındaki artışın donma-çözülme direncini azalttığını savunurken; Petkovic *et al.* (2003), Abbas (2007), Debieb *et al.* (2010), Richardson *et al.* (2011) ve Hwanget *al.* (2012) ise GKA miktarı arttıkça donma-çözülme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları ikinci grup araştırmacıların vardıkları sonuçları destekler niteliktedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

%0, 15, 30, 45 ve 60 oranlarında geri kazanılmış agrega, %0,06, 0,13 ve 0,20 oranlarında hava sürükleyici katkı maddesi ve 16 mm, 22,4 mm ve 31,5 mm maksimum agrega tane büyüklüğü, mineral katkı olarak uçucu kül ikame edilerek oluşturulan beton numunelerin kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına göre;

➤ Agregalarda yapılan deneylerde; geri kazanılmış iri agregaların su emme, aşınma direnci ve donma-çözülme değerlerinin, yüzeyindeki harç kalıntıları ve içeriğindeki çeşitli maddeler nedeniyle aynı granülometriye sahip normal iri agregayla kıyaslandığında daha olumsuz sonuçlar verdiği görülmüştür.

➤ Taze betonda yapılan hava içeriği deney sonuçlarına göre; geri kazanılmış agrega ve hava sürükleyici katkı maddesinin bir arada kullanılması nedeniyle oldukça yüksek değerlerde hava içerikleri elde edilmiştir. Maksimum tane çapının, GKA oranının ve hava sürükleyici katkı miktarının artması hava içeriğini artırmıştır.

➤ Taze betonun çökme değerleri sonuçlarına göre maksimum tane çapını, geri kazanılmış agrega oranının artması çökme değerini azaltmışken; hava sürükleyici katkı maddesi oranının artması ise artırmıştır.

➤ Üretilen beton numunelerin yoğunlukları geri kazanılmış agregaların yoğunluklarının hafif olması ve hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılması nedeniyle normal betonlara göre düşük çıkmıştır. Maksimum tane çapı, kullanılan GKA oranı ve hava sürükleyici katkı miktarının artması betonun yoğunluğunu azaltmıştır.

➤ Geri kazanılmış agrega kullanılması ve oranının artırılması betonda boşluk miktarını artırdığından kılcal su emme katsayısını azaltmıştır. Dolayısıyla butürden betonların kılcal su emme sorununun yaşanabileceği alanlarda kullanılması tavsiye edilebilir.

- GKA oranının artması betonların basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. GKA oranı ve hava sürükleyici katkı miktarının artmasıyla ortaya çıkan boşluklar nedeniyle beton numuneler mekanik etkilere karşı daha dirençsiz hale gelmişlerdir. Basınç dayanımı için geri kazanılmış agregaların maksimum oranı %15 ve hava sürükleyici katkı maddesi %0,06 olarak tavsiye edilebilir. Üretilen GKA oranı yüksek beton numunelerin basınç dayanımları düşük olduğundan dolayı önemli taşıyıcı elemanlarda kullanılması tavsiye edilmemiştir.
- %3'lük NaCl içerisinde CDF yöntemine göre yapılan donma-çözülme çevrimleri sonucu yüzeysel kabuk atma miktarı deney sonuçlarına göre hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmasının, beton içerisinde bağımsız hava boşlukları oluşturduğundan, üretilen beton numunelerin donma-çözülme direncini artırdıkları belirlenmiştir. Buna ek olarak GKA kullanılmasının, beton içerisinde ekstra boşluklar ortaya çıkmasını sağladığı ve kılcal geçirimsizliği düşürdüğü için, betonların yüzeysel kabuk atma direncini artırdığı belirlenmiştir. Buna göre betonların donma-çözülme direnci için en uygun değerler olarak $d_{max} = 22,4$ mm, GKA = %45 ve AEA = %0,13 oranları önerilir. Belirtilen oranlarda üretilen betonların donma-çözülme direncinin oldukça yüksek olacak olması nedeniyle geri kazanılmış agregaların iklim koşullarının sert geçtiği bölgelerdeki yol betonlarında, yol temellerinde, kaldırım kaplamalarında ve dayanım koşulunun öncelenmediği betonarme yapı/elemanlarda kullanılması tavsiye edilebilir.
- Gerek afetler sonucu gerekse kentsel dönüşüm gibi çalışmalar neticesinde ortaya çıkan yıkıntı atıklarının geri dönüşüm agregası olarak kullanılması bu atıkların depo edilmesi nedeniyle oluşan kirliliğini ve bu atıkların ve doğal agregaların taşınması sırasında ortaya çıkan nakliye giderlerini azaltacaktır. GKA kullanımı ile doğal agrega kaynaklarının tüketilmesi önlenerek doğal hayatın korunmasına katkıda bulunulacaktır. Ülkemiz için de geri kazanılmış agregaların kullanımının artması sürdürülebilir kalkınma için çok önemlidir. Yapılan deney sonuçları da göz önüne alındığında bu agregaların kullanılmasının betonun durabilitesi için dezavantaj olmadığı ispatlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbas, A., A., 2007. Durability of Green Concrete as a Structural Material, The Doctor of Philosophy in Civil Engineering is a joint program with the University of Ottawa.
- Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A., 2002. "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", *Cement and Concrete Composites*, 24:269–279.
- Akbari, Y., V., Arora, N., K., Vakil, M., D., 2011. Effect on recycled aggregate on concrete properties. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*,
- Akbulut, H., Gürer, 2006, Atık Asfalt Malzemelerin Agregata Olarak Değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 3943-3960, Yazı 261.
- Anonim, 2004, TS EN 13057, Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler – Deneysel yöntemler - Kılcal su emmeye direncin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonymous, 2007. ASTM C 1585-04, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes. ASTM International, USA.
- Anonymous, 2008, ASTM C618 - 08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete". ASTM International. Retrieved 2008-09-18.
- Anonim, 2009a. TS 706 EN 12620+A1, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2009b. TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2009c. TS EN 1367-1, Agregaların ısı ve bozunma özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010a. TS EN 1097-2, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Yöntemler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim. 2010b. TS EN 12350-2, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010c. TS EN 12350-6, Beton - Taze beton deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010d. TS EN 12350-7, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava muhtevasının tayini - Basınç yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010e. TS EN 12390-2, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010f. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010g. TS EN 12390-7, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

- Anonim, 2012. TS 12390-9, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 9: donma çözülme direnci - yüzeysel kabuk atma (yüzeysel yıpranma), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Anonim, 2013. TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Anonim, 2014a. www.wikipedia.com. (01.11.2014).
- Anonim, 2014b. <http://cevreonline.com/atik2/atikyonedir.htm> (26.10.2014) T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü (2008) Atık Yönetimi Eylem Planı (2008-2012), Ankara.
- Anonim, 2014c. T.C. Resmi Gazete, Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, (25406), 18.03.2004.
- Anonim, 2014d. <http://www.kutahyacimento.com/tr/kutahya-cimento-pulverize-kul-isletmeciligi> (09.06.2014)
- Anonim, 2014e. TS EN 206 (2014), Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Arıoğlu, E., Köylüoğlu, Ö.S. ve Arıoğlu, N., (1996), “Dünyadaki Geri kazanılmış agrega üretim ve politikalarının gözden geçirilmesi ve ülkemiz açısından irdelenmesi”, 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, s.33-52.
- Baradan B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, 825 s, İzmir.
- Bayram, S., Öcal, M., E., Laptalı, Oral, E., 2012, İnşaat atıkları kavramının yasal düzenlenmesi ve hazır beton tesisinde örnek uygulama, ISSN:1306-3111 e-Journal of New World Sciences Academy 2012, Volume: 7, Number: 1, Article Number: 1A0283.
- Behera, M., Bhattacharyya, S.K., Minocha, A.K., Deoliya, R., Maiti, S., 2014, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, Construction and Building Materials 68, 501–516.
- Beltran, M., G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A., 2014, Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.
- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., 2011. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. Cement and Concrete Research.
- Castro, J., Bentz, D., Weiss, J., 2011, Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete, Cement & Concrete Composites 33 (2011) 805–813
- Çakır, Ö., Sofyanlı, Ö., Ö., 2014, Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete, Housing and Building National Research Center.
- Çelik, B., 2007. Recycled aggregate concrete at elevated temperatures. Doktora Tezi. Graduate Program in Civil Engineering Boğaziçi University. İstanbul.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R., 2010, ‘Mechanical and Durability properties of concrete using contaminated recycled aggregate’. Cement & Concrete Composites 32, 421–426.

- Demir, İ., 2009. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi. AKÜ Fen Bilimleri Dergisi 2009-02 105 -114. Afyonkarahisar.
- Dilbas, H., Şimşek, M., Çakır, Ö., 2014, An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume, Construction and Building Materials 61, 50–59.
- Durmuş, G., Can, Ö., Şimşek, O., 2008. Geri Dönüşüm Agregalardan Üretilen Farklı Sınıflardaki Betonun Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- Durmuş, G., Şimşek, O., Dayı, M., 2009. Geri Dönüşümlü İri Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 24, No 1, 183-189, 2009, Ankara.
- Erdal B., 2011. Geri Kazanılmış Agrega ile Üretilen Polipropilen Lif Katkılı Betonların Özellikleri. Y. Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erdoğan, T., Y., 2003. Beton. ODTÜ Yayıncılık, 757 s, Ankara.
- Evangalista, L., de Brito, J., 2006. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites 29, 397–401
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. ve Hisada, M., (2003), “Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete”, Cement and Concrete Research, 34:799–806.
- Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G., 2004. İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi. 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Huda, S., B., 2014, Mechanical and Durability Properties of Recycled and Repeated Recycled Coarse Aggregate Concrete, The College of Graduate Studies (Civil Engineering) The University Of British Columbia (Okanagan)
- Hwang, J., P., Shim, H., B., Lim, S., Ann, K., Y., 2012, ‘Enhancing the Durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials. KSCE Journal of Civil Engineering, 17(1):155-163.
- Katz, A., (2003), Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete., Cement and Concrete Research, 33:703–711.
- Kılıç, İ., 2006. Geri Dönüştürülmüş Atık Betonların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Katkı Kullanımı ile İyileştirilmesi. Y. Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kılıç, N., 2012. Kentsel Dönüşümde Geri Dönüşüm Atağı. İzmir Ticaret Odası, AR-GE Bülten, İzmir.
- Kou S., Poon, C., Agrela, F., 2011, Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, Cem. Concr. Compos. 33, 788–795.
- Kou, S., 2006, Reusing Recycled Aggregates In Structural Concrete, Ph.D. The Hong Kong Polytechnic University, UMI Number: 3241061
- Kou, S., C., Poon, C., S., Etxeberria, M., 2010. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. Cement & Concrete Composites

- Kou, S., C., Poon, C., S., 2012. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials* 35, 69–76.
- Kou, S., C., Poon, C., S., Agrela, F., 2012. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement & Concrete Composites*.
- Köken A., Köroğlu, M., A., Yonar., F., 2008, Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi Cilt 7, Sayı:1-2008. Konya
- Köroğlu, M., A., Köken, A., 2008. Düşük Mukavemetli Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği. Konya
- Kumar, P., S., Dhinakaran, G., 2012. Effect of Admixed Recycled Aggregate Concrete on Properties of Fresh and Hardened Concrete. *American Society of Civil Engineers*.
- Levy, S., M., Helene, P., 2004, Brazil, ‘Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research* 34, 1975–1980.
- Medina, C., Rojas, M., I., S., Frias, M., 2013, ‘Freeze-thaw Durability of recycled concrete containing ceramic aggregate’, Spain, *Journal of Cleaner Production* 40, 151e160
- Morales, M., M., Zamorano, M., Moyano, R., A., Espinosa, I., V., 2011. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*.
- Movassaghi, R., 2006, Durability of Reinforced Concrete Incorporating Recycled Concrete as Aggregate (RCA), The Thesis presented to the University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Oikonomou N., D., 2005. Recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 27. 315–31
- Özdemir, A., 2002, Bazı Yapı Malzemelerin Kapiler Su Emme Potansiyelleri, Selçuk Üniversitesi,, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, *Jeoloji Mühendisliği* 26 (1), Konya
- Öztürk, M., İnşaat/Yıkıntı Atıkları Yönetimi, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara, 2005.
- Parekh, D., N., ve Dr. Modhera, C., D., 2011, ‘Assessment of recycled aggregate concrete’, India, *Journal of Engineering Research and Studies E-ISSN 0976-7916*
- Pedro, D., Brito, J. De, Evangelista, L., 2014, Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete, *Construction and Building Materials* 71 (2014) 141–151
- Petkovic, G., Mehus, J., Myren, S., A., 2003, ‘Recycled concrete aggregate- Durability aspects’ Oslo Norway.
- Poon, C., S., Chan, D., 2006, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, *Resources, Conservation and Recycling* 50, 293–305.
- Rakshvir, M., Barai, S., V., 2006, Studies on recycled aggregates-based concrete, *Waste Management and Research*, 2006: 24: 225–233.
- Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 50, 71–81.

- Richardson, A., Coventry, K., Bacon, J., 2010, ‘Freeze-thaw Durability of concrete with recycled demolition aggregate to virgin aggregate concrete’, UK.
- Saravanakumar, P., Dhinakaran, G., 2012, Strength Characteristics of HVFA based Recycled Aggregate Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, (ASCE) MT.1943-5533.0000645.
- Silva, R., V., Brito, J., de, Dhir, R., K., 2014, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials* 65, 201–217
- Soares, D., Brito, J. De, Ferreira, J., Pacheco, J., 2014, Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance, *Construction and Building Materials* 71, 263–272
- Şahin, R., 2003, Normal Portland Çimentolu Betonların Don Direncinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu ve Hasar Analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tam, V., W., Y., Tam, C., M., Wang, Y., 2006, ‘Assessment of Durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach’, *Construction and Building Materials* 21, 1928–1939, Hong Kong.
- Thomas, C., Setien, J., Polanco, J., A., Alaejos, P., Juan, M., S., 2012, ‘Durability of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 40, 1054–1065.
- Topçu, İ., B., 1997, Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 12, December 1997, Pages 1817–1823.
- Topçu, İ., B., Günçan, N., F., 1995. Using waste concrete as aggregate., *Cement and Concrete Research*, vol.25, No.7. pp.1385-1390.1995
- Topçu, İ., B., ve Sarıdemir, M., 2007, Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science* 42, 74–82
- Topçu, İ., B., ve Şengel, S., 2004, ‘Properties of concretes produced with waste concrete aggregate’ , Eskişehir, *Cement and Concrete Research* 34, 1307–1312
- Tuyan, M., Aghabaglou, A., M., Ramyar, K., 2014, Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials and Design* 53, 983–991
- Tüfekçi, M.M., 2011. Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Y. Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Valeria, C., (2010), “Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates”, *Construction and Building Materials*, 24:1616–1620.
- Xiao, J., Falkner, H., 2005. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and Building Materials*.
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y., Huang, X., 2011. An overview of study on recycled aggregate concrete in China. *Construction and Building Materials*.
- Yang, J., Du, Q., Bao, Y., 2010. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials* 25, 1935–1945
- Zaharieva, R., Bodin, F., B., Wirquin, E., 2004, ‘Frost resistance of recycled aggregate concrete’ , France, *Cement and Concrete Research* 34, 1927–1932

Zhao, J., L., Yu, T., Teng, J., G., 2014, Stress-Strain Behavior of FRP-Confined Recycled Aggregate Concrete, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000513. American Society of Civil Engineers

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Yeşim TOSUN

Doğum Tarihi ve Yeri: 12/02/1988 – ERZURUM

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : yesim.tosun@atauni.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece Alan Okul/Üniversite Mezuniyet Yılı

Lisans: İnşaat Mühendisliği Atatürk Üniversitesi 2010

Lise Fen Bilimleri Nevzat Karabağ Anadolu Öğretmen Lisesi 2006