
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GERİ DÖNÜŞÜM AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet DADA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet DADA

...../……./……

GERİ DÖNÜŞÜM AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet DADA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, ekonomik gelişmeler, artan nüfus yoğunluğu ve buna bağlı artan yaşam standartları ve kentlerin büyümesi sebebiyle büyüme gösteren inşaat endüstrisi çevrenin korunması ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı açısından ekolojik faktörleri ciddi şekilde etkilemektedir. Beton endüstrisinde yenilikçi ve sürdürülebilir gelişmeler sunmakta olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), vibratör kullanılmadan kendi ağırlığı altında akarak kalıbı doldurabilmesi ve buna bağlı ilave işçilik ve enerji maliyetlerini azaltması ve gürültü kirliliği yaratmaması, inşaat süresini azaltması, ayrılmadan ve segregasyon olmadan tam sıkışma elde edilebilmesi gibi özellikleri sayesinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılan özel bir beton türüdür. KYB'nin özelliklerini belirlemenin temelini Kendiliğinden Yerleşen Harcın (KYH) özelliklerini belirlemek oluşturur. Bu çalışmada, inşaat yıkıntılarının geri dönüştürülmesi ile elde edilen Geri Dönüşüm Agregalarının (GDA) KYH üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. 0-2 mm aralığındaki Normal Agrega (NA) ile KYH üretilmiştir. Üretilen bu karışımlardaki 0-0,125 mm, 0-1 mm ve 0-2 mm boyutlarındaki NA miktarları ağırlıkça %25, 50, 75 ve 100 oranında azaltılmış ve yerine GDA ilave edilmesi suretiyle toplamda 13 adet seri üretilmiştir. Üretilen harç numuneleri üzerinde bir dizi deney yapılmış olup, elde edilen sonuçlara göre, GDA miktarının artışının KYH'ların taze ve sertleşmiş özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. GDA oranının artması ile birlikte, numunelerin basınç ve eğilme dayanımları azalmış, kılcallık katsayı değerleri ve su emme kapasiteleri artmıştır. Sonuç olarak, GDA'ların KYH'larda kullanımı ile ilave işçilik ve enerjiden tasarruf sağlanarak, çevremiz ve doğamız için sürdürülebilir yönde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91127
Anahtar Kelimeler	:	Kendiliğinden yerleşen harç, geri dönüşüm agregası
Sayfa Adedi	:	87
Danışman	:	Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTARS MANUFACTURED USING RECYCLED AGGREGATE

(M. Sc. Thesis)

Ahmet DADA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

Especially in developing countries, the construction industry, which is growing due to economic developments, increasing population density and increasing living standards and the growth of cities, seriously affects ecological factors in terms of environmental protection and sustainable use of natural resources. Self-Compacting Concrete (SCC), which offers innovative and sustainable developments in the concrete industry, is able to fill the formwork by flowing under its own weight without using a vibrator, thus reducing additional labor and energy costs, not creating noise pollution, reducing construction time, obtaining full compaction without separation and segregation. Thanks to its properties, it is a special type of concrete that is widely used all over the world. The basis for determining the characteristics of the SCC is to determine the properties of the Self-Compacting Mortar (SCM). In this study, the usability of Recycling Aggregates (RA) obtained by recycling construction debris in SCM production was investigated. SCM was produced with Normal Aggregate (NA) in the range of 0-2 mm. The amounts of NA in sizes 0-0,125 mm, 0-1 mm and 0-2 mm in these produced mixtures were reduced by 25, 50, 75 and 100 percent by weight, and a total of 13 series were produced by adding RA. A series of experiments were carried out on the produced mortar samples, and according to the results obtained, it was observed that the increase in the amount of RA adversely affected the fresh and hardened properties of SCMs. With the increase in the RA ratio, the compressive and flexural strengths of the samples decreased, the capillarity coefficient values and water absorption capacities of the samples increased. As a result, it has been seen that the use of RAs in SCMs has positive effects on our environment and nature in a sustainable way, by saving additional labor and energy.

Science Code	:	91127
Key Words	:	Self compacting mortar, recycled aggregate
Page Number	:	87
Supervisor	:	Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

TEŞEKKÜR

Bugüne kadar desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen annem, babam ve kardeşime ve her koşulda pozitif enerjisiyle yanımda hep güç olan eşim Begüme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimle…

Ve yine, tez konusunun belirlenmesinde, araştırma aşamasında, yön tayininde ve tamamlanmasında destek olan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, bu süreçte yardımları yadsınamayacak çalışma arkadaşlarım, yöneticilerim ve hocalarıma teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TERİMLER VE KAYNAK TARAMASI 5

2.1. Harç 5

2.2. Beton 8

2.2.1. Betonun bileşenleri 8

2.2.2. Betonun özellikleri 7

2.3. Geri Dönüşüm 22

2.3.1. İnşaat endüstrisinde geri dönüşümün önemi 24

2.3.2. İnşaat yıkıntı atıklarının Dünya ve Türkiye'deki durumu 25

2.4. Geri Dönüşüm Agregası 26

2.5. Geri Dönüşüm Agregası Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar 34

2.6. Kendiliğinden Yerleşen Harç 41

2.7. Kendiliğinden Yerleşen Harçlar Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar 43

3. MATERYAL VE METOT 47

3.1. Materyal 47

3.1.1 Agrega 47

Sayfa

3.1.2. Çimento 48
3.1.3. Akışkanlaştırıcı 49
3.1.4. Karışım suyu 49
3.1.5. Harç karışımı 50
3.2. Metot 51
3.2.1 Agrega deneyleri 51
3.2.2. Harç tasarımı 53
3.2.3. Taze harç deneyleri 54
3.2.4. Taze harcın deney kalıplarına yerleştirilmesi 56
3.2.5. Sertleşmiş harç deneyleri 57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 61
4.1. Taze Harç Özellikleri 61
4.2. Sertleşmiş Harç Özellikleri 65
4.2.1. Basınç dayanımı özellikleri 65
4.2.2. Eğilmede çekme dayanımı özellikleri 67
4.2.3. Kılcal su emme özellikleri 69
4.2.4. Ultrasonik ses özellikleri 72
4.2.5. Birim hacim ağırlık ve su emme oranı tayini 73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 77
5.1. Sonuçlar 77
5.2. Öneriler 61
KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ 87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. İnşaat endüstrisinin sebep verdiği çevre problemleri ve önerilen çözümler 2

Çizelge 2.1. Harçların gruplandırılması 6

Çizelge 2.2. Harçların sınıflandırılması 6

Çizelge 2.3. Karma oksitlerin hidratasyon ısısı miktarı 14

Çizelge 2.4. F ve C sınıfı uçucu küllerin bileşenleri 20

Çizelge 2.5. Uçucu küllerin beton özelliklerine etkisi 21

Çizelge 2.6. Farklı standartlarda yapısal betonların geri dönüşüm agrega kullanım oranı ve beton basınç dayanımı sınır değerleri 27

Çizelge 3.1. Çimentonun teknik özellikleri 48

Çizelge 3.2. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi teknik özellikleri 49

Çizelge 3.3. Harç karışım kodları ve agrega içerikleri 50

Çizelge 3.4. Geri dönüşüm agregaları ve normal agregaların bazı özellikleri 52

Çizelge 3.5. Geri dönüşüm agregalarının tane dağılımı 52

Çizelge 3.6. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları 54

Çizelge 4.1. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma ve mini v hunisi deneyleri değerleri 62

Çizelge 4.2. Harç karışımlarının basınç dayanım değerleri 66

Çizelge 4.3. Harç karışımlarının eğilmede çekme dayanım değerleri 68

Çizelge 4.4. Harç karışımlarının kılcallık katsayıları (cm^2/s) x 10^{-6} 70

Çizelge 4.5. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri (km/s) 72

Çizelge 4.6. Harç karışımlarının birim hacim ağırlık ve su emme değerleri 74

Çizelge 5.1. GDA oranının artmasının bazı özelliklere etkisi 78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çimento inceliği – basınç dayanımı ilişkisi 13

Şekil 2.2. Basit yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi 31

Şekil 2.3. Kombine yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi 32

Şekil 2.4. Yoğun iş makineli yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi 32

Şekil 3.1. Geri dönüşüm ve normal agrega gruplarının granülometri eğrileri 53

Şekil 3.2. Mini çökme-yayılma aleti 55

Şekil 3.3. Mini v hunisi deney aleti 56

Şekil 4.1. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma deneyi değerleri 62

Şekil 4.2. Harç karışımlarının mini v hunisi deneyi değerleri 63

Şekil 4.3. Harç karışımlarının basınç dayanım değerleri 65

Şekil 4.4. Harç karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri 67

Şekil 4.5. Harç karışımlarının kılcallık katsayıları (cm^2/s) x 10^{-6} 69

Şekil 4.6. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri (km/s) 72

Şekil 4.7. Harç karışımlarının birim hacim ağırlık değerleri (kg/m^3) 75

Şekil 4.8. Harç karışımlarının su emme oranı (%) 75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Uçucu külün SEM görüntüsü 19

Resim 2.2. Yüksek fırın cürufu 21

Resim 2.3. Silis dumanı 22

Resim 2.4. Geri dönüşüm agregasının üretim adımları 33

Resim 3.1. Agregaların konkasörde kırılması işlemi 47

Resim 3.2. Agrega grupları 48

Resim 3.3. Hiper akışkanlaştırıcı 49

Resim 3.4. Harç karışımlarının hazırlanması 50

Resim 3.5. Mini v hunisi deneyi 56

Resim 3.6. Harçların kalıplara yerleştirilmesi 57

Resim 3.7. Basınç dayanımı deneyi 57

Resim 3.8. Eğilmede çekme dayanım deneyi 58

Resim 3.9. Kılcal geçirgenlik deneyi 59

Resim 3.10. Ultrasonik ses deneyi 59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
%	Yüzde
cal	Kalori
cm^3	Santimetreküp
dm^3	Desimetreküp
g	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
MPa	Megapascal
sn	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
GDA	Geri dönüşüm agregası
KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
KYH	Kendiliğinden yerleşen harç
NA	Normal agrega
PÇ	Portland çimentosu

1. GİRİŞ

Farklı uygulamalarda kullanılan beton, agrega, çimento, karışım suyu ve mineral ve/veya kimyasal katkılardan oluşur. Beton, inşaat malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılan, diğer yapısal malzemelere kıyasla birçok avantaja sahip bir malzemedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, ekonomik gelişmeler, artan nüfus yoğunluğu ve buna bağlı yükselen yaşam standartları ve kentlerin büyümesi sebebiyle inşaat endüstrisi de büyüme göstermektedir. İnşaat endüstrisinde çevre ve sürdürülebilirlik, ekolojik faktörleri ciddi şekilde etkilemekte olup, dünya kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle çevre ve sürdürülebilirlik insanlık için çok önemlidir. İnşaat endüstrisinin sebebiyet verdiği çevre problemleri (gürültü, CO_2 salınımı vb.) ve bu problemlere önerilen çözümler Çizelge 1.1'de verilmektedir [1].

Beton endüstrisinde yenilikçi ve sürdürülebilir gelişmeler sunmakta olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), vibratör kullanılmadan kendi ağırlığı altında akarak kalıbı doldurabilmesi ve buna bağlı ilave işçilik ve enerji maliyetlerini azaltması ve gürültü kirliliği yaratmaması, inşaat süresini azaltması, ayrılmadan ve ayrışma (segregasyon) olmadan tam sıkışma elde edilebilmesi gibi özellikleri sayesinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir beton türüdür [1].

Kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerini belirlemenin temelini Kendiliğinden Yerleşen Harcın (KYH) özelliklerini belirlemek oluşturur.

Bu çalışmada, inşaat endüstrisinin sürdürülebilir olması için inşaat yıkıntılarının geri dönüştürülmesi suretiyle elde edilen geri dönüşüm agregalarının kendiliğinden yerleşen harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Çizelge 1.1. İnşaat endüstrisinin sebep verdiği çevre problemleri ve önerilen çözümler

Çevre Problemleri	Önerilen Çözümler
Gürültü	Kendiliğinden Yerleşen Beton
Vibrasyon	
Toz	
İşçi Sağlığı ve Kazalar	
CO_2	Katkı Maddeleri
Yeşil Gaz Salınımı	
Küresel Isınma	
İnşaat ve Yıkıntı Atıkları	Geri Dönüştürülmüş Kaba Agrega Geri Dönüştürülmüş İnce Agrega
Yenilenemeyen Doğal Kaynak	
Su Kıtlığı	Su Azaltıcı Katkı Maddeleri, S/Ç Oranı Azaltma

İnşaat endüstrisinin yarattığı çevresel problemlerin diğer çözüm yöntemleri, Portland çimentosu (PÇ) için ikame mineral katkı maddesi kullanımıdır. Bunlar puzolanlar ve volkanik tüflerdir. Endüstriyel atıkların inşaat endüstrisinde kullanımı aşağıdaki faydaları sağlamaktadır [1];

- CO_2 salınımını azaltmak
- Enerji tüketimini azaltmak
- Atık maddeleri azaltmak ve geri dönüştürmek
- Beton özelliklerin iyileştirilmesi (işlenebilirlik, dayanıklılık vb.)
- Üretim maliyetini düşürmek [2]

Türkiye'nin özellikle büyük şehirlerine insanların önlemez göçleri ve buna bağlı nüfus artışı yaşanması konut ihtiyacını arttırmaktadır. Bu ihtiyaç gecekondulaşmayı beraberinde getirmekte olup, depreme dayanıksız, sağlıksız yapılaşmanın ve çarpık kentleşmenin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [3].

Yüksek deprem riskinin olduğu bölgede yer alan ülkemiz yüz ölçümünün yaklaşık olarak %92'si deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır [4]. Türkiye'deki toplam yapı stoğunun yaklaşık olarak 5 milyonu 99'da yaşanan depremden sonra inşa edilmiştir [5]. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY, 1997) 1997 yılında yayımlanarak, 1998 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik 2007 yılında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) olarak güncellenmiştir [6]. 2018 yılında ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) yayımlanmış olup, 01/01/2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Söz konusu yönetmeliklerin güncellenmesine bakıldığında, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1997) öncesi tasarlanan yapılar günümüz standartlarının çok uzağındadır ve birçok yetersizlikler içermektedir.

Ülkemizdeki yapı stoğunda bulunan ve 1997 yılından evvel tamamlanmış yapıların olası bir yer sarsıntısında ağır hasar alma ihtimalinin fazla olduğu söylenebilir. Dolayısıyla hâlihazırdaki yapı stokumuz hızlı bir şekilde deprem performansı açısından değerlendirilmeli ve riskli olarak tespit edilen yapıların ivedi bir şekilde yıktırılarak yerine depreme dayanıklı, güncel yönetmelik şartlarını haiz yapıların yapılmasının sağlanması gerekmektedir. Ülkemizde yapı stoğunun kötü olmasının yanı sıra altyapı eksikliği, sosyal donatı eksikliği ve tarihin bıraktığı izlerin büyük bir özen gösterilerek koruma altına alınması gibi nedenler de dönüşümü zorunlu kılan faktörlerdir. Bu bağlamda, 16/05/2012 tarihinde 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun çıkartılarak kentsel dönüşüm çalışmaları başlatılmıştır. Bu Kanun kapsamında yapıların münferit dönüşümünün yanında alan bazlı dönüşüm de yer almaktadır [7].

6306 sayılı Kanun'da Riskli Alan, "Zemin yapısı veya üzerindeki yapılaşma sebebiyle can ve mal kaybına yol açma riski taşıyan, Cumhurbaşkanı kararına istinaden belirlenen alanı" Riskli Yapı ise "Riskli alan içinde veya dışında olup ekonomik ömrünü tamamlamış olan ya da yıkılma veya ağır hasar görme riski taşıdığı ilmî ve teknik verilere dayanılarak tespit edilen yapı" olarak tanımlanmaktadır. 6306 sayılı Kanun'a göre riskli yapıların tespiti, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca hazırlanacak yönetmelikte belirlenen usul ve esaslara göre masrafları kendilerine ait olmak üzere, ilk olarak yapı malikleri veya kanunî temsilcileri tarafından, yine Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nca lisanslandırılmış kurum ve kuruluşlara yaptırılır ve tespit sonucu Bakanlığa veya İdareye bildirilir. Bakanlık, riskli yapıların tespitini belirli bir süre vererek maliklerden veya kanuni

temsilcilerinden talep edebilir. Bakanlıkça verilen süre içinde yaptırılmadığı takdirde, tespitler Bakanlıkça veya İdarece yapılır veya yaptırılır. Bakanlık, belirlediği alanlardaki riskli yapıların tespitini süre vererek İdareden de isteyebilir. Bakanlıkça veya İdarece yaptırılan riskli yapı tespitlerine karşı maliklerce veya kanuni temsilcilerince on beş gün içinde itiraz edilebilir. İtirazlar, Bakanlığın talebi üzerine üniversitelerce, ilgili meslek disiplini öğretim üyeleri arasından görevlendirilecek dört ve Bakanlıkça, Bakanlıkta görevli üç kişinin iştiraki ile teşkil edilen teknik heyetler tarafından incelenip karara bağlanır. 6306 sayılı Kanun kapsamında riskli yapı tespiti kesinleşen yapılar ya yıktırılır ya da güçlendirilir [8].

Kentsel dönüşüm çalışmaları da inşaat yıkıntı atığı problemini beraberinde getirmiştir. Özellikle, beton üretiminde beton matrisinin büyük bir bölümünü oluşturan agrega tedarikinde sorun yaşanmakta olup, bu sebeple inşaat yıkıntı atıklarının geri kazanımı, içindeki yabancı malzemelerin ayrıştırılarak geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması önem arz etmektedir.

Dünyada ortaya çıkan inşaat, yıkım ve kazı atıkları 2020'de Avrupa Birliği'nde (AB) yaklaşık 520 milyon ton tahmin edilmekte olup, bu AB'deki toplam atık üretiminin %31'idir. Danimarka, Almanya, İrlanda ve Hollanda inşaat yıkıntı atığının %80'inden fazlasını geri dönüştürürken, Çekya, Finlandiya, Macaristan ve Polonya %15 ile %30 arasında inşaat yıkıntı atığının geri dönüşümünü yapmaktadır. İnşaat yıkıntı atığının geri dönüşüm oranları Avrupa'da farklılıklar göstermekte olup, örneğin Hollanda'da inşaat yıkıntı atığının %95'i geri kazanılırken, Avrupa ortalaması yaklaşık %30-60 arasındadır [9].

GDA kullanımının önemli olmasının sebepleri aşağıda sıralanmıştır;

- Atık yönetimi için arazi problemleri
- Depolama maliyetlerinin çok yüksek olması
- Ekolojik denge ve çevrenin korunması
- Doğal agrega kaynaklarının korunması [10]

2. KURAMSAL TERİMLER VE KAYNAK TARAMASI

2.1. Harç

Bağlayıcı matrisine (kireç, çimento ya da başka bir malzemeden üretilen) ince agrega ve karışım suyunun ilave edilmesiyle elde edilen yapı malzemesi harç olarak adlandırılmaktadır. Harçlar; dış duvarların yapımı, iç bölme duvarları ve nemsiz bölgeler, restorasyon, dekorasyon ve tamir işlerinde kullanılır. Harçlar, üzerlerine gelen yatay ve düşey yükü iyi bir şekilde aktarabilmeli, durabilitesi iyi olmalı ve iyi yapışmalıdır [11].

Çimento harçları, 0-4 mm aralığındaki ince agrega ile üretilir. Yapılarda duvarları koruyucu kaplama malzemesi (sıva) ve duvar malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, harçların aderansının iyi olması ve dış etkenlere karşı dayanıklı olmalıdır.

Harçlar genelde içeriğine ilave edilen bağlayıcının ismi ile anılmaktadır.

1- Kum, kireç ve su ile oluşturulan harca, kireç harcı denilmektedir.
2- Kum, çimento ve su ile oluşturulan harca çimento harcı denilmektedir.
3- Kum, alçı ve su ile oluşturulan harca alçı harcı denilmektedir.

Ayrıca, iki bağlayıcının da birbirinden farklı oranlarda kullanıldığı harç türleri de bulunmaktadır.

1- Kum, kireç, az çimento ve su ile oluşturulan harçlara melez harç veyahut da takviyeli harç denilmektedir.
2- Kum, çimento, az kireç ve su ile oluşturulan harçlara temditli harç denilmektedir.

Alçı harcı ve kireç harcının 21. yüzyıla kadar taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapısal elemanlarda kullanılmaktadır. Uzun yıllardan bu yana sadece örgü ve sıva harcı olarak sadece kireç harcı kullanılmaktadır. Ancak, son zamanlarda kireç harcı kullanımı yerini çimento harcına ya da temditli harçlara bırakmıştır. Bu bağlamda, atmosfer etkilerine açık alanlarda veya ıslak hacimlerde örgü ve sıva harcı olarak genellikle çimento harcının veya takviyeli ve temditli harçların tercih edildiği görülmektedir. Ayrıca, bina iç duvarlarında örgü harcı ve sıva harcı olarak takviyeli ve temditli harçlar kullanılmaktadır. Öte yandan

nemli olmayan mahallerde, ekonomi sağlamak amacıyla doğrudan alçı harcı ile duvarın sıvandığı uygulamalar da bulunmaktadır. Öte yandan, tarihi yapılara bakıldığında, bağlayıcı olarak yüksek kalsiyumlu kireç veya hidrolik özelliklere sahip kireçlerin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Kireç ve çimento; tamir, duvar örgü ve sıva harcı olarak, farklı haçların imalatında beraber kullanılmaktadır [12].

Diğer taraftan, elyaf veya çelik liflerin çimento, kireç, alçı vb. harçlarının içine belirli oranlarda ilave edilmesiyle lifli harçlar elde edilmektedir. Lifli harçlar çoğunlukla tamir harcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, tarihi yapılarda horasan harcı kullanılmakta olup, kireç ve tuğla parçacıklarının beraber kullanımıyla elde edilir [13].

Harçların gruplandırılması muhteviyat ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki Çizelge 2.1.'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Harçların gruplandırılması

Bağlayıcı Çeşidi	Karışım Muhtevası	Kullanım Alanı
Alçı	Alçı + su	Dekorasyon
Kireç	Kum + Kireç + su	Nemsiz Bölgelerde Duvar
Çimento	Çimento + 0-4 mm agrega + su	Dış Duvar
Lif Takviyeli	Lif + çimento + kireç	Tamir
Horasan	Tuğla parçacıkları + kireç	Restorasyon

Harçların dayanım ve dayanıklılığının iyi olması gerekmektedir. Çizelge 2.2.'de harçların sınıfları ve bu sınıflara göre sağlaması gereken minimum basınç dayanım değerleri gösterilmektedir [13].

Çizelge 2.2. Harçların sınıflandırılması

Harç sınıfı	kg/cm^2
A	150
B	110
C	50
D	20
E	5

Harç özellikleri

İşlenebilme

Harçların işlenebilirliği taze betonun, kalıbı istenen pompalama, yayma, dökme özellikleri ile ve betonun kalitesinde herhangi bir kayıp olmadan istenen ve düzgün bir şekilde doldurma yeteneğidir. İşlenebilirlik su muhtevasına, agreganın şekil ve boyut dağılımına, çimentolu içeriğe ve betonun hidrasyon seviyesine bağlıdır. İşlenebilirliği etkileyen faktörlerden birisi agrega tipi seçimidir. Yuvarlak agregalar yüzey alanları az olacağından işlenebilirliği arttıracaktır. Yassı, açısal ve sivri uçlu agregalar işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyecektir. Katkı maddesi kullanılarak, harcın işlenebilirliği arttırılabilir. Su-çimento oranının arttırmadan, süper akışkanlaştırıcı ya da hiper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanımıyla harçların işlenebilme özelliği arttırılabilir. Ayrıca, puzolanik katkı maddelerinin kullanımıyla da harçların işlenebilirliği arttırılabilir. Çimentonun inceliğinin artması, işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyecektir.

Dayanım

Harçların basınç dayanımı, eksenel yük etkisinde kırılmadan gösterebileceği direnme yeteneğidir. Genellikle dayanım değeri yapı malzemesi için araştırılan en önemli özelliktir. Ayrıca, sertleşmiş harcın basınç dayanım değeri ile eğilme dayanım değeri arasında yaklaşık bir oran bulunmaktadır. Bu bağlamda, sertleşmiş harcın basınç dayanım değeri bilindiğinde eğilme dayanım değeri de yaklaşık olarak bilinmektedir.

Geçirimsizlik

Çevredeki su ve diğer yabancı maddelerin beton içerisine kolay bir şekilde girerek olumsuz etki yaratmaması için yeterince geçirimsiz ve durabilitesi yüksek olmalıdır. Harç matrisindeki boşlukların yapısı ve miktarı ile doğrudan alakalı olan geçirimsizlik, yapının dış etkenlere karşı dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Durabilite (geçirimsizlik) sağlanabilmesi adına, harçların mümkün olduğunca geçirimsiz forma getirilmesi (kullanılan çimento türü, katkı maddeleri ve kürü) oldukça önemlidir. Burada belirtmek gerekir ki, her zaman boşluklu yapı geçirimlilik belirtisi olmayacaktır. Boşlukların türü, birbiri ile bağlantılı olması, miktarı ve yoğunluğu geçirimliliği doğrudan etkilemektedir. Geçirgenliği

yüksek harçlarda çoğunlukla çiçeklenme, karbonatlaşma, donma çözülme, sülfat-klor atakları, alkali-silika reaksiyonları ve bunlara bağlı deformasyonlar gözlemlenir.

Rötre

Beton içindeki suyun terleme, kusma, hidratasyon vb. olaylar ile betondan uzaklaşması sonucunda betonun boyunda ve hacmindeki küçülmeye rötre denilmekte olup, beton hem tazeyken hem de sertleşmiş durumdayken rötre olayı gerçekleşebilmektedir.

Çimentonun inceliği, kimyasal bileşimi, ortam şartlarının etkisi, rutubet, sıcaklık, çimento dozajı ve suyun buharlaşmasını kolaylaştıran her sebep rötrenin oluşmasında etklidir. Rötrenin, plastik rötre, karbonatlaşma rötresi, hidratasyon (bünyesel) rötresi, hidrolik (kuruma) rötre, şişme (negatif) rötre ve termik rötre gibi çeşitleri vardır.

2.2. Beton

Beton, çimento, karışım suyu, agrega ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen, ilk olarak plastik kıvamda olan, sonrasında hidratasyon reaksiyonu ile priz alan, kompozit bir yapı malzemesidir.

Taze beton, basit bir şekilde karıştırılabilir, sıkıştırılabilir, taşınabilir, yerleştirilebilir ve perdahlanabilir, terleme olayı mümkün olduğu kadar az, priz süresi yönetilebilir olması uygun olacaktır. Sertleşmiş beton, herhangi bir yaş (7, 28 ve 90 günlük) için belirlenen minimum basınç mukavemetinden daha az bir dayanım göstermemeli, kalıcılığı (durabilite) ve geçirimsizliği iyi olmalıdır, rötre veya genleşme göstermemelidir [14].

Betonun bileşenleri

Agrega

Agregalar, çeşitli boyutlarda yapay ve doğal olarak elde edilebilen kum, çakıl, kırma taş gibi yoğun mineral içeren malzemelere genel olarak verilen addır. Beton matrisinin yaklaşık %75-80'ini oluşturan agregalar, beton imalatında çimento ve su ile birlikte kullanılan, çakıl, kırmatal, kum gibi taneli malzemelerdir. Beton yapımında kullanılan temel malzemeler (agrega, çimento ve su) arasında en maliyetli olanı çimentodur. Agreganın maliyeti,

diğerlerinin maliyetine göre çok düşüktür. Hedeflenen kalitedeki betonu elde edebilmek şartıyla, betonda mümkün olabildiği kadar çok miktarda agrega kullanılması, betonun daha az maliyetli olmasını sağlamaktadır. Betonda agrega kullanımının tek amacı elbette ekonomi değildir. Agreganın, çimento hamurunun zamanla kuruyarak büzülmesi sonucu hacim değişikliğini kontrol altında tutmak, buna bağlı çatlak oluşumunu engellemek, betonun dayanımına önemli ölçüde katkıda bulunmak, aşınmaya ve çevreden gelebilecek yıpratıcı etkenlere karşı daha dayanıklı olmak gibi betonun teknik özelliklerine önemli katkıları bulunmaktadır. Beton yapımında kullanılacak agreganın gradasyon, maksimum tane büyüklüğü, tane şekli, yüzey dokusu, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, agregadaki zararlı yabancı maddelerin türü ve miktarı, aşınmaya dayanıklılık, dona dayanıklılık, dayanım, elastisite modülü ve ısıl özellikleri gibi farklı farklı özellikleri araştırılmaktadır. Beton malzemelerinin karışım oranlarının belirlenebilmesi için yapılan hesaplarda bilinmesi gereken agrega özellikleri (gradasyon, maksimum agrega tane boyutu, agregadaki mevcut su durumu ve agreganın su emme kapasitesi, birim ağırlık ve özgül ağırlık) iyi bilinmelidir [14].

Agrega çeşitleri elde ediliş şekillerine göre, birim ağırlıklarına göre ve tane boyutlarına göre üç farklı şekilde gruplandırılabilir.

Elde ediliş şekillerine göre agregalar; doğal agregalar ve yapay agregalar olarak sınıflandırılmaktadır.

Doğal agregalar genel olarak yamaçlardaki taş parçalarının bir şekilde koparak yamaç dibinde toplanmasıyla ya da akarsu, dere gibi su kaynaklarının içindeki taş parçalarının suyun görece olarak durgun olduğu yerlerinde toplanmasıyla oluşurlar. Doğal agregalar yuvarlanma, taşınma, yüzme, diğer doğal oluşumlara çarpması sonucu aşınması sebebiyle sürtünmeye maruz kalır ve bu nedenle genellikle yuvarlak yapıdadırlar. Aşınma sonucunda agrega tanelerinin zayıf kısımları kopmakta ve geriye sağlam kısmı kalmaktadır. Çakıl, kum, pomza, magnetit, barit gibi agregalar doğal agregalar olarak sayılabilir. Su kaynaklarından elde edilen agregalar içerisinde tuz vb. maddeler barındırdığından dolayı donatıda korozyona sebebiyet vermektedir. Doğal agregalar yapısal elemanlarda kullanılmadan önce iyice yıkanmalıdır. Doğal agregaların genellikle dayanım değerlerinin düşük olması, poroz yapıda olması gibi sebeplerle hafif beton üretiminde ya da yalıtım gerektiren bölme imalatlarında kullanılmaktadırlar.

Yapay agregalar, endüstriyel ürünlerden yan ya da atık madde olarak oluşan malzemelerin ikinci bir işlem sonucu beton üretiminde kullanılır hale getirilmesiyle oluşturulurlar.

Birim hacim ağırlıklarına göre agregalar hafif agregalar ve ağır agregalar olarak iki gruba ayrılabilir.

Hafif agregalar; betonun birim ağırlığını azaltmak amacıyla kullanılır ve birim ağırlıkları yaklaşık 2 kg/dm³ olan agregalardır. Genellikle poroz yapıya sahiptirler ve ses, ısı yalıtımı özelliği olan agregalardır. Hafif agregaların özellikleri aşağıdaki gibi sayabiliriz.

1- Hafif agregaların dayanımları düşük, su emme ve boşluk oranları ise yüksektir.
2- Hafif agregalar doğal olarak elde edilebilir, ayrıca yapay olarak da elde edilebilir.
3- Hafif agrega kullanılarak üretilen betonlar genellikle yalıtım amaçlı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında kullanılabilir.

Ağır agregalar, ağır beton elde etmek amacıyla kullanılmakta olup, birim ağırlığı yaklaşık 3,20 kg/dm³'den büyük olan agregalar olarak adlandırılabilir. Ağır agregalar kullanılarak imal edilen ağır beton, radyasyon yayan, zararlı ışınlar saçan makinelerin bulunduğu mahallerde kullanılabilir. Genel olarak nükleer santrallerde ve hastanelerin röntgen cihazlarının bulunduğu odalarında kullanılabilir. Ağır agregalar doğal olarak bulunabildiği gibi yapay olarak da bulunabilir. Barit, manyetit, limonit doğal ağır agrega türüne, çelik ve demir hurdası gibi atık maddeler ise yapay ağır agrega türüne örnek verilebilir.

Tane boyutlarına göre agregalar ince, iri ve tüvenan (karışık) agrega olarak iki grupta sınıflandırılabilir.

İnce agregalar, 4 mm'lik kare gözlü elekten geçen agregalar olup, kum bu agregalara örnek olarak verilebilir.

İri agregalar, 4 mm'lik geçemeyen agregalar olup, çakıl ve kırma taş bu agregalara örnek olarak verilebilir.

Karışık (tüvenan) agregalar, kaynağından çıkarıldığı halde bulunan, herhangi bir eleminasyon işlemi görmemiş, ince ve iri agregayı bir arada karışık olarak bulunduran

agrega türüdür. Bu agregalar genellikle dolgu malzemesi olarak kullanılmakta olup, zorunlu olmadıkça kullanılmaması önerilmektedir.

Mineral esaslı bağlayıcılar

Bağlayıcılar hidrokarbonlu ve mineral esaslı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Hidrokarbonlu bağlayıcılar bitümler ve katranlar olup, asfalt yapımında ve izolasyon işlerinde kullanılmaktadır. Mineral esaslı bağlayıcılar ise kireç, alçı ve çimentodur. Kireç ve alçı suda çözünebilen bağlayıcılar olup, hidrolik olmayan bağlayıcı sınıfına girmektedir. Çimento ise hidrolik bağlayıcıdır.

Kireç

Bilinen en eskiye dayanan bağlayıcı türü olup, priz süresi çok uzundur. Kireçle bağlanan malzemenin nihai dayanımı oldukça düşüktür. Su içerisinde kolayca ayrışabilmektedir. Sadece sıva, badana işlerinde kullanılmakta olup, genellikle nemsiz mahallerde tercih edilir.

Alçı

Alçının hammaddesi, alçıtaşıdır. Çok hızlı priz alan alçıtaşı suya dayanıklı olmayıp, daha çok kompozit olarak yapı elemanlarında tercih edilir.

Çimento

Çimento; taş, agrega gibi malzemelerin bağlanmasına yarayan, nem varlığında priz alan, bir yapı malzemesi olarak tanımlanabilir. Doğadaki her malzemede olduğu gibi çimentolar da kullanıldığı yere bağlı olarak katkı maddeleri ile ya da muhteviyatındaki malzemelere göre farklı tiplerde olabilir. Yani, en iyi çimento diye bir kavram olmayıp, çimentoların farklı yapı türleri, farklı kullanım amaçları vb. özelliklere bağlı olarak farklı özellikleri haiz olması beklenir. Dolayısıyla, en uygun çimentoyu seçmek önemlidir. Çimentonun hangi tür yapılarda kullanılmaya uygun olduğuna ya da hangi tür yapılarda kullanıma uygun olmadığına ancak çimentoların özelliklerinin incelenmesiyle karar verilir [15]. Çimentolar, TS EN 197-1 [16] beş farklı şekilde sınıflandırılabilir.

1- Portland çimentosu (CEMI)
2- Portland kompoze çimento (CEMII)
3- Yüksek fırın cüruflu çimento (CEMIII)
4- Puzolonik çimento (CEMIV)
5- Kompoze çimento (CEMV)

Portland çimentosu, içeriğinde en az %95 oranında klinker bulunan çimento türüdür. Portland çimentoları çok yaygın olarak kullanılmakta olup, tek başına kullanılabildiği gibi diğer çimento türlerinin içeriğinde de bulunabilmektedir. Portland çimentoları, yüksek yapılar, ön germeli betonlar, köprüler, tünel kalıp uygulamaları, su depoları, yer betonları gibi birçok yerde kullanılabilmektedir.

Portland kompoze çimento (CEMII), içeriğindeki klinkere ek olarak puzolonik malzemeler barındırmaktadır. CEMII tipi çimento, altı ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar, portland cüruflu çimento (S), portland silis dumanlı çimento (D), portland puzolanlı çimento (Q), portland uçucu küllü çimento (V), portland pişmiş şistli çimento (T) ve portland kompoze çimento (M) olarak sıralanabilir. CEMII tipi çimento türlerinin kendi içinde kullanım alanlarına göre olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır. Beton veya betonarme kanalizasyon boruları, yüksek yapılar, yüksek dayanım gerektiren özel proje yapıları bu çimento türlerinin kullanım alanları olarak sayılabilir.

Yüksek fırın cüruflu çimento (CEMIII), klinker ve granüle yüksek fırın cürufundan oluşan çimento türüdür. CEMII çimento türünün alt başlıklarından oluşan portland-cüruflu çimentonun klinker ve granüle yüksek fırın cürufundan oluştuğu yukarıda ifade edilmiştir. İki çimento türünün de ham maddesinin klinker ve yüksek fırın cürufu olmasına karşılık olarak, CEMIII çimento tipinin matrisinde yüksek fırın cürufu yüzdesi daha fazladır. CEMII tipi çimentonun bileşiminde ise klinker oranı fazladır.

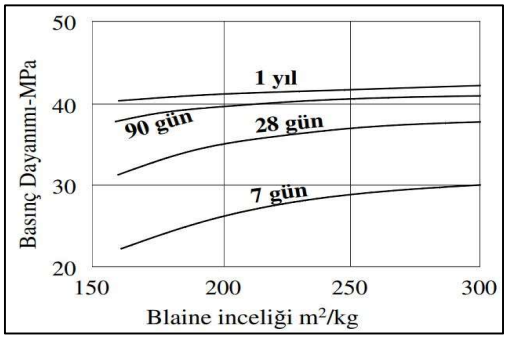
Puzolonik çimento (CEMIV) klinkerin puzolanik maddelerle ve biraz alçı taşıyla birlikte öğütülmesiyle elde edilir. Alçı taşı bilindiği üzere priz süresini ayarlamak için kullanılmaktadır. CEMIV içeriğindeki puzolanik madde miktarına göre A ve B grubu olmak üzere ikiye ayrılır. A grubu ağırlıkça %12-36 puzolanik madde içerirken, B grubu ise %37-56 oranında puzolanik madde içermektedir.

Kompoze çimento (CEMV) klinkerin yüksek fırın cürufu, puzolanik madde ve eser miktarda alçı taşıyla birlikte harmanlanmasıyla elde edilir.

Çimentoların inceliği

Çimentoların su ile etkileşimi neticesinde daha yüksek dayanım verebilmesi inceliğine bağlıdır. Bilindiği üzere, çok ince öğütülmüş tanelerin yüzey alanı daha fazla olacağından kimyasal tepkimeler daha iyi ve daha hızlı gelişir. Çimentolarda tane boyutları genellikle 6,5 – 90 μm aralığındadır. Çimentoların incelik özelliği farklı yöntemlerle saptanabilir [15].

TS EN 196-6 [17] standardına göre çimento incelik özelliği, 90 μm aralıklı elekten çimentoların elenmesi ve sonrasında bu çaptan büyük olan tanelerin miktarının belirlenmesi ile saptanmaktadır [17]. Diğer yöntem ise yine TS EN 196-6 [17] standardına göre "özgül yüzey alanı" metodu olup, m^2/kg veya cm^2/g olarak gösterilir. Çimento tanelerinin kısmen toplanarak dağılmaması özgül yüzey alanının önemli derecede düşmesine sebebiyet vermekte olup, bu gibi durumlarda Blaine deney yönteminin kullanılmaması gerekmektedir. ASTM C 115-93'te izah edilen Wagner yönteminin kullanılması daha uygun olabilmektedir. Çimento ve su arasındaki tepkime olan hidratasyon tepkimesi çimento tanelerinin yüzeyinde dıştan içe doğru gelişmektedir. Çap büyükse iç kısımların uzun süre hidrate olamaz ve priz alamaz dolayısıyla istenen dayanım elde edilemez. Yüksek dayanım isteniyor ise taneler çok ince öğütülmelidir. Aşağıdaki Şekil 2.1.' de görüleceği üzere çimento tanelerinin inceliğinin artması erken yaşlardaki dayanımı önemli derecede arttırırken, ilerleyen yaşlarda dayanıma çok fazla etkisi olmamaktadır [18].



Şekil 2.1. Çimento inceliği – basınç dayanımı ilişkisi [15]

Çimentoların prizi ve priz sürelerinin belirlenmesi

Hidratasyon olayının ilerlemesi sonucunda çimento hamurunun plastiklik özelliği azalma, viskoz özelliğinde artma meydana gelmektedir. Çimentonun su ile birleştiği andan itibaren katılaştığı ana kadar olan süreye priz alma süresi denir. Priz özelliğine bağlı olarak çimentoların kullanım yerleri de farklılık göstermektedir. Çimentoların priz süresi sıcaklık, karışım suyu miktarı ve çimentonun bekletilme süresinin etkisindedir. Çimentoların inceliğinin hidratasyon ısısını etkilemesinin yanında karma bileşenlerinin de hidratasyon ısısı üzerinde önemli etkisi vardır [15].

Çimentoların hidratasyon ısısı

Hidratasyon tepkimesi devam ettikçe hidratasyon ısısının açığa çıkması da devam eder. Hidratasyon olayının bu ısıveren (ekzotermik) davranışı özellikle kütle betonlarının imalatında önemli bir sorun olabilmektedir. Çimentonun bileşenlerinin hidratasyon ısısı miktarları Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Karma oksitlerin hidratasyon ısısı miktarı [18]

Karma Bileşen	İlk 48 saatte çıkan ısı (cal/g)	Toplam ısı (cal/g)
C_3A	150	207
C_3S	100	120
C_2S	10	62
C_4AF	40	100

Yukarıdaki tabloya göre hidratasyon ısılarının yüksekliği ve düşük sıcaklıktan en az zarar görme bakımından çimentolar, alüminli çimentolar (düşük sıcaklıktan en az etkilenen), yüksek dayanımlı portland çimentosu, normal portland çimentosu ve cüruflu çimento ve diğer puzolanik katkılı çimentolar (soğuktan en fazla etkilenen) olarak sıralanabilir [15].

Karışım suyu

Beton karışım suyunun beton özellikleri üstünde önemli etkisi vardır. Karışım suyu, kirli olmamalıdır. Fazla miktarda organik madde, yağ, şeker, alkol, tuz içeren sular karışım suyu olarak kullanılamaz [19]. Yani, beton karışım suyu içilebilir özellikte olmalıdır. Diğer bir

deyişle, şehir şebeke suları beton üretimi için istenilen özellikte sulardır. Beton karışımında su-çimento oranına dikkat edilmelidir. Karışımdaki su miktarı arttıkça betonun dayanımında azalmalar görülür. Ayrıca, karışım suyu betonun işlenebilirliğini de etkiler.

Karışım suyunda en tehlikeli faktör olarak değerlendirilebilecek (olmaması gereken) sülfat iyonlarının varlığıdır. Karışım suyunda magnezyum sülfat varsa, bu bileşik çimentonun serbest kireciyle tepkimeye girerek magnezyum hidroksit ve jibs oluşturmaktadır. İçerisinde %1 ve daha fazla sülfat iyonu var ise bu su karışım suyu olarak kullanılmamalıdır. Ayrıca %3'ten fazla sodyum klorür içeren sular korozyona sebep olup, dolayısıyla durabilite ve dayanımı olumsuz olarak etkileyeceğinden karışım suyu olarak kullanılmamalıdır.

Su ile beton arasındaki ilişki, üretim, kür aşamaları ve kullanım ömrü boyunca değişkenlik göstermekte olup, örneğin su/çimento oranının fazla olması betonun dayanım ve durabilitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca, buna karşın hidratasyon reaksiyonunun devamlılığı için de beton bünyesinde yeterli miktarda su bulunmasının gerektiği unutulmamalıdır. İlerleyen yaşlarda su betonunu dayanıklılığını azaltan önemli etkenlerden birisidir [15].

Karışım suyunun beton içerisinde iki temel görevi vardır. Bunlar;

1. Karışım suyu çimento ile hidratasyon tepkimesine girerek bağlayıcı hamuru oluşturur. Bu hamur priz alarak betonun mukavemet kazanmasını sağlar.

2. Karışım suyu, agrega ve çimento taneciklerini nemlendirerek beton matrisine işlenebilirlik ya da akıcılık sağlar.

Çimentonun hidratasyonundan sonra suyun bir kısmı buharlaşır ve betonda gözenekler oluşur. Bunun sonucu olarak da beton dayanımında azalmalar gözlenir. Diğer taraftan, karışım suyunun fazla olması da dayanımı düşürmektedir. Su-çimento oranı arttıkça beton dayanımında azalmalar olur. Benzer şekilde su çimento oranı azaldığında da buharlaşma sonucu betonda boşluklu yapı oluşacağından durabilite, dolayısıyla dayanım düşecektir [19].

Katkı Maddeleri

Beton katkı maddeleri, betonun çoğu özelikliğini iyileştirerek performansını arttırabilmek ve/veya betonun daha az maliyetli olmasını sağlayabilmek, sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını, taze betonun işlenebilirliğini arttırmak, priz sürelerini değiştirmek gibi hedefler doğrultusunda kullanılmaktadır [20].

Beton katkı maddeleri; kimyasal ve mineral katkı maddeleri olarak iki gruba ayrılmaktadır [21].

Kimyasal katkı maddeleri

Kimyasal katkı maddeleri genellikle su içerisinde eriyen katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. Betonun priz almasını geciktiren veya hızlandıran ve betonun karışım suyunu azaltan maddeler kimyasal katkı maddelerine örnek olarak verilebilir. Kimyasal katkılar, doğru kullanılmadıklarında betonun özelliklerine olumsuz etkileri olur. Akışkanlaştırıcılar, su/çimento oranı azaltılmadan aynı kıvamı elde etmek, daha yüksek dayanım kazanabilmek ve çimentonun azalmasını sağlayarak hidratasyon ısısını düşürmek ve ekonomi sağlamak amaçlarıyla kullanılabilir. Betonun dökületeceği yere taşınması için geçen zamandan dolayı oluşan işlenebilirlik kaybının su kullanılarak iyileştirilmesinin betonun özeliklerine olumsuz etkileri olduğundan, çimento miktarını değiştirmeden (basınç dayanımı düşmeksizin) üretilen betonun, akıcı ve kolay yerleşebilir olmasının sağlanması gerekmektedir. Taze betonda akıcılığın sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmakta olup, katkı kullanımı, beton karışımında kullanılacak su/çimento oranını sabit tutarak, su ve çimento miktarını azaltıp ekonomik yararlar da sağlamaktadır. Akışkanlaştırıcının miktarı doğru belirlenmezse işlenebilme (ya çok akışkan ya da çok katı kıvamda olur) ve segregasyon problemleri oluşmaktadır. Betonun donma çözülmelere karşı dayanıklılığını arttırmak için hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ayrıca, korozyonu önlemek için de katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleri kullanılarak daha az geçirgenli bir beton üretilir ve betonun içinde dışarıdan nem girişi engellenerek korozyon oluşumu önlenmiş olur. Priz hızlandırıcı ve geciktirici katkı maddeleri betonun priz süresini ayarlayarak, soğuk/sıcak havalarda dökülen betonun özelliklerini iyileştirir. Soğuk havalarda priz hızlandırıcı kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Renklendirici katkı

maddeleri ise prizi geciktirir, işlenebilmeyi çok az arttırabilir, eğilme dayanımını arttırırken rötreyi ve basınç dayanımını azaltmaktadır [20].

Mineral katkı maddeleri

Betonun hidratasyon ısısını ve su geçirgenliğini düşüren, kimyasal etkilere karşı dayanımını arttıran, ekonomiklik sağlayan mineral katkılar, %5'den başlayıp, %95'e kadar çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilirler [21]. Kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan veya çok az olan fakat ince öğütüldüklerinde nem ile bağlayıcılık özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemelere puzolan denir. Mineral katkı maddeleri de puzolanik özellik göstermektedirler [22].

Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlıyor olması gerekmektedir;

1. Çimentonun içeriğindeki silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki "SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3" miktarının en az %70 olması gerekmektedir).
2. Düzensiz (amorf) yapıya sahip olmalıdır.
3. İnce taneli olmalıdır.
4. Ortamda nem olmalıdır.

Mineral katkı maddeleri beton karışımına diğer malzemelerden sonra karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma işlemi esnasında katılır [23]. Volkanik kül, volkanik tüf, diatomlu toprak, pişirilmiş kil, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü beton yapımında kullanılan başlıca mineral katkılardır. Portland çimentosu ile puzolonik katkı maddesinin bağlayıcı malzeme olarak bulunduğu karışımlarda öncelikle portland çimentosu hidratasyon tepkimesine girmektedir. Portland çimentosunun hidratasyonundan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum-silika-hidrat (asıl bağlayıcılık özelliğini yaratan C-S-H jeli) ürünleri meydana gelmektedir. Puzolonik malzeme ise portland çimentosunun hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcı özellikli yeni C-S-H jelini ortaya çıkarmaktadır. Puzolonik katkılı betonlarda çimento ağırlığından azaltma yapılarak yerine puzolonik malzeme kullanıldığından daha büyük hacimli bağlayıcı hamur elde edilmektedir. Ayrıca, taze betondaki ince agreganın

hareketini arttırarak, işlenebilmeyi arttırmaktadır. Puzolan katkılı betonlarda ince tanelerin fazla olması sebebiyle suyu absorbe ederek terlemenin daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, portland çimentosu miktarının az olması sebebiyle betonda trikalsiyum alüminat anabileşeni ve alkaliler de daha az olmaktadır. Böylece, betonun sülfat dayanıklılığının artmasına ve betondaki alkali-agrega reaksiyonunun yaratacağı genleşme olasılığının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, çok ince taneli katkı maddeleri, betondaki boşlukların azalmasına, dolayısı ile betonun su geçirgenliğinin daha az olmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak durabiliteyi (kalıcılık) olumlu yönde etkilemektedir. Portland çimentosunun az olması hidratasyon ısısını da düşüreceğinden kütle betonlarda (baraj vb.) puzolan kullanımı önem arz etmektedir [22].

Puzolanik madde kullanılarak üretilen betonların erken yaş dayanımları düşük olur ancak puzolonik aktiviteye bağlı olarak nihai dayanım yüksek olmaktadır. Ayrıca, maliyet açısından da puzolonik malzeme kullanımı daha avantajlıdır.

Özetle puzolonik malzemelerin beton özelliklerine olumlu etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Betondan su çıkışını (terleme) ve agregaların bir araya yığılmasını (segregasyon) azaltmaktadır.
2. İşlenebilirliği artırmaktadır.
3. Hidratasyon sonucu açığa çıkan ısısını azaltmaktadır.
4. Durabiliteyi (su ve diğer yabancı madde geçirgenliğini azaltır) arttırmaktadır.
5. Sülfat hücumlarına karşı dayanıklılığı artırmaktadır.
6. Alkali-agrega reaksiyonunu azaltmaktadır.
7. Ekonomi sağlamaktadır.
8. Nihai basınç dayanımının yeterince yüksek olmasına yol açmaktadır.

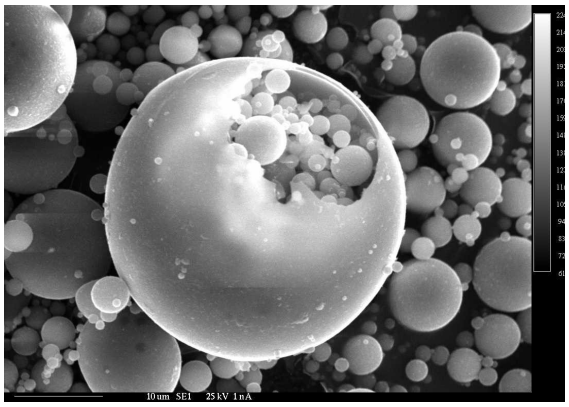
Diğer taraftan, puzolanik katkıların soğuk ve nemli havalarda kullanımına prizi geciktireceğinden ve ilk günlerdeki dayanımı azaltabileceğinden dikkat edilmelidir.

Puzolanik katkılar yapay ve doğal olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Doğal puzolanlar; doğal olarak bulunan puzolanik özelliğe sahip malzemeler, yapay puzolanlar ise; endüstriyel üretim esnasında ya da sonrasında yan ürün olarak ortaya çıkan puzolanik özelliğe sahip malzemelerdir. Silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ve en yaygın kullanılan yapay puzolanlardır [22].

Uçucu kül

Termik santrallerde kullanılan kömürün (elektrik enerjisi üretmek için) yakılması sonucu oluşan yan ürüne uçucu kül denir. Uçucu külün SEM görüntüsü Resim 2.1'de verilmektedir.



Resim 2.1. Uçucu külün SEM görüntüsü

Uçucu küller çimento üretiminde klinkere katılarak da beton üretiminde kum yerine kullanılarak da değerlendirilebilir. Puzolanik özelliğinden dolayı çimento yerine kullanımı daha doğru olacaktır. Daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip oldukları için bağlayıcı hacminde artış ve ekonomi sağlamaktadır. Uçucu küller, betonun nihai basınç dayanımında artışa; erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımlarında düşüşe sebep olmakta ve prizi geciktirmektedir. Uçucu küllerin küçük tanelerden oluşması sebebiyle, uçucu kül katkılı betonlar daha düzgün yüzeye sahip olur ve dolayısıyla yerleştirilmesi ve perdahlama işlemi daha kolay olur. Ayrıca, hidratasyon ısısı düşük olacağından rötre ve çatlak oluşmaz. Uçucu küllerin küresel bir yapıya sahip olmaları sebebiyle su ihtiyacı azdır ve düşük su/çimento oranıyla yüksek işlenebilirlik gösterir. Uçucu küller nemli ortamda kireci tutması sebebiyle daha boşluksuz bir beton tasarımı sağlar ve buna bağlı olarak betonun durabilitesi olumlu yönde etkileneceğinden beton dış etkilere karşı daha dayanıklı hale gelir [24].

Yüksek puzolanik aktiviteye sahip uçucu küller her tür beton yapımında kullanılabilmekte olup, uçucu küllerle yapılan betonların hidratasyon ısısı düşük olduğundan, özellikle kütle

beton yapımında kullanılmaktadır. Puzolanik aktiviteye ek olarak, uçucu külün kimyasal özelliklerinin (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, SO_2, kızdırma kaybı, nem, alkaliler) ve fiziksel özelliklerinin (incelik basınç dayanımı, büzülme, su alma kapasitesi, çimento alkalinitesi ile şişme) de bilinmesi gerekmektedir [25].

Uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılmaktadır. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu kül ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 yüzdesi %50'den fazla olan uçucu küldür. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [27]. F ve C sınıfı uçucu güllerin bileşenleri Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. F ve C sınıfı uçucu küllerin bileşenleri

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Li_2O	TiO_2
F Sınıfı	42-54	16,5-29	16-24	1,3-3,8	0,3-1,2	2,1-2,7	0,2-0,9	0,5-1,8	1,2-5	1-1,5
C Sınıfı	46-59	14-22	5-13	8-16	3,2-4,9	0,6-1,1	1,3-4,2	0,4-2,3	0,1-2,3	<1

Uçucu küllerin beton özelliklerine etkileri şunlardır;

İşlenebilme

Çimento tanelerinin arasına girerek topaklanmayı önler, serbest suyun kılcal boşluklardaki hareketini önleyerek taze betondaki kusmayı engeller, küresel uçucu kül tanecikleri sayesinde işlenebilmeyi arttırır [26].

Priz süresi

Uçucu küller, priz süresini uzatır. Uçucu küllerin beton özelliklerine etkileri Çizelge 2.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.5. Uçucu küllerin beton özelliklerine etkisi [27]

Özellik	Su İhtiyacı	Segregasyon	İşlenebilirlik	Priz Süresi	Terleme	Erken Dayanım	Geçirgenlik
Etki	Azaltır	Azaltır	Arttırır	Arttırır	Azaltır	Azaltır	Azaltır

Yüksek fırın cürufu

Demir elde edebilmek için yüksek fırın olarak adlandırılan bir fırının içerisine kok kömürü, kalker taşı ve cevher yerleştirilmekte ve kok kömürünün yakılması için yaklaşık 1600 ºC sıcaklık verilmektedir. Kok kömüründeki karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbondioksit ve/veya karbonmonoksit olarak ortamı terk ettikten sonra geriye eriyik durumdaki demir ve yabancı maddeler topluluğu (cüruf) kalır. Yan ürün olarak elde edilen amorf yapıdaki cürufun içerisinde yüksek miktarlarda silika, alümina ve kalsiyum oksit bulunduğundan, ince hale getirildiğinde puzolanik özellik göstermektedir [22]. Yüksek fırın cürufu görseli Resim 2.2'de gösterilmektedir.



Resim 2.2. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu içeren betonların işlenebilmesi, perdahlanması daha iyi ve kohezyonu daha yüksek olmaktadır. Ayrıca, yüksek fırın cürufunun tanecikleri daha pürüzsüz ve sert olduğundan karışım suyunu emmeleri sayesinde terleme az olur ve işlenebilme yüksek olur [26]. Yüksek fırın cürufu portland çimentosundan daha sert bir malzeme olduğundan, çimentoyla birlikte öğütüldüğünde yüksek fırın cürufu klinker kadar ince olmamaktadır. Yüksek fırın cürufu ne kadar ince olursa puzolanik özelliğini o kadar iyi yansıtmaktadır. Bu sebeple, çimentoyla yüksek fırın cürufu ayrı ayrı öğütüldüğünde daha verimli bir karışım elde edilmektedir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu depolanma aşamasından nemden kaynaklı

ön hidratasyon yapmadığından portland çimentosuna kıyasla daha iyi depolanma yeteneğine sahiptir.

Silis dumanı

Yüksek saflıktaki kuvarsın 2000 ^{o}C'de sıcaklık altında indirgenmesi sonucu silikon metali oluşur. Bu işlem sonucu ortaya çıkan SiO gazı fırının nispeten soğuk bölgesinde havayla temas eder ve SiO_2'ye dönüşür. Bu şekilde %85-95 arası silika içeren ve amorf yapıya sahip olan silis dumanı denilen atık malzeme oluşur. Yüksek miktarda silika içeren, amorf yapıya sahip ve çok ince taneli olan silis dumanı yüksek aktiviteye sahip bir puzolandır. Çimento üretiminde de kullanılabilen silis dumanı, genelde beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır ve beton dayanımını önemli derecede arttırmaktadır [22]. Silis dumanı görseli Resim 2.3'de gösterilmektedir.



Resim 2.3. Silis dumanı

2.3. Geri Dönüşüm

İnsanların yaşamsal faaliyetleri sonucu ekonomik ömrü ve kullanım süresi dolmuş ve artık doğal yaşam için zarar verir hale gelmiş her çeşit maddeye atık denir. Kağıt, cam, metal, plastik, organik, yiyecek, ilaç, inşaat atığı ve inşaat yıkıntı atığı, petrol gibi maddeler atık sınıfında yer alabilir [27].

Yeniden kullanılabilme imkânı olan atıkların doğal kaynaklarımızı tüketmeden bir takım fiziksel ve kimyasal işlemden geçirilerek ikincil maddeye dönüştürülmesi ve yeniden üretime dâhil edilmesine geri dönüşüm denilmektedir [28].

Doğal kaynakların bilinçsiz tüketim ve kullanım ile bir gün tükeneceği gerçeği hiçbir zaman unutulmamalıdır. Bu durumun bilincinde olan toplumlar kaynak israfının önüne geçmek ve ileride karşılaşılabilecek enerji, su, doğal kaynak, ekonomi krizleri ile baş edebilmek için geri dönüşüme önem vermişlerdir [29].

Ülkemizde geri dönüşüme önem verilmekte olup, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca Sıfır Atık Projesi yürütülmektedir.

Sıfır atık

Sıfır Atık, israfın önlenmesini, kaynakların daha verimli kullanılmasını, oluşan atığın miktarının azaltılmasını, etkin toplama sisteminin kurulmasını, atıkların geri dönüştürülmesini kapsayan atık önleme yaklaşımı olarak tanımlanan hedeftir. Atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım süreci içinde değerlendirilmeden bertaraf edilmesi hem maddesel hem de enerji olarak ciddi kaynak kayıpları yaşanmasına neden olmaktadır. Dünya üzerindeki nüfus ve yaşam standartları artarken tüketimde de kaçınılmaz şekilde bir artış yaşamakta ve bu durum doğal kaynaklarımız üzerindeki baskıyı arttırarak dünyanın dengesini bozmakta, sınırlı kaynaklarımız artan ihtiyaçlara yetişememektedir. Bu durum göz önüne alındığında, doğal kaynakların verimli kullanılmasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır. Bu nedenledir ki, son yıllarda tüm dünyada sıfır atık uygulama çalışmaları hem bireysel hem kurumsal hem de belediye genelinde yaygınlaşmaktadır.

Sıfır Atık Projesi'nin hedefleri; temiz ortam kaynaklı olarak performansın ve verimliliğin artmasının, israfın önüne geçildiğinden maliyetin azalmasının, tasarrufun ve ekonomik kazancın, duyarlı tüketici duygusuna sahip olunmasının ve çevresel risklerin azaltılmasının sağlanması olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda yürütülen Sıfır Atık Projesi ile 1 ton kağıdın geri dönüşümü ile 17 ağacın kesilmesi, 12400 m^3 kadar sera gazının oluşumu engellenir ve 2.4 m^3 atık depolama alanında tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca, yeni üretime kıyasla metal ve plastik geri kazanımı ile %95 enerji, geri dönüştürülen her 1 ton cam için yaklaşık 100 litre petrol tasarrufu sağlanabilir. Atık camlar tekrar cam ürünlerine, plastik elyaf ve dolgu malzemesi gibi birçok malzemeye, metaller ise tekrar metal ürünlerine dönüşebilir. Organik atıklardan elde edilebilecek kompost ile topraklarımız daha verimli hale gelmektedir [27].

2.3.1. İnşaat endüstrisinde geri dönüşümün önemi

Nüfus artışıyla birlikte artan tüketime paralel olarak azalan hammadde miktarı atık maddelerin artmasına, doğal dengenin bozulmasına ve dolayısıyla çevre kirliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Deprem gibi afetlerden sonra ya da kentsel dönüşüm kapsamında eski yapıların yıktırılması sonucu ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesi bu atıkların depo edildikleri yerlerde oluşturacağı çevresel kirliliklerini ve bununla birlikte atıkların taşınması ve depolanması için yapılan giderleri de azaltacaktır. Ayrıca nakliye işleminde kullanılacak yakıttan dolayı oluşacak hava kirliliği de azalacaktır [21].

Günümüzde en çok tercih edilen yapı türü betonarme yapı türüdür. Kentsel dönüşüm çalışmaları ile yıktırılan yapıların çoğunluğunu ise yığma, ahşap ve karma türü yapılardır. İnşaat yıkıntı atıklarının bileşenleri yapıda kullanılan malzemelere bağlı olarak değişmekte olup, kentsel dönüşüm kapsamında yıktırılan yapıların yıkıntılarında çoğunlukla ahşap, harman tuğlası, briket ve elle ya da eski tip mikserle karılmış düşük basınç dayanımına sahip betonarme yapı elemanlarına rastlanmaktadır [3].

Büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir özellikte olan inşaat yıkıntı atıkları iki gruba ayrılabilir. Birinci grubu, tuğla, kiremit gibi seramik malzemeler ile beton, kum, agrega gibi malzemeler; ikinci grubu ise tahta, cam, plastik, metal, kağıt ve kauçuk gibi malzemeler oluşturmaktadır. Çoğu ülke geri dönüştürülebilir tüm atık maddenin tekrar kazanılması ve kullanılması için yatırımlar yapmakta ve geri dönüşümle ilgili yapılan araştırma ve çalışmaları desteklemektedir. Araştırmalar, geri dönüştürülebilir atık maddenin her ne kadar yeniden ikincil hammadde olarak üretime katılmasının maliyetli olduğunu söylese de doğal kaynakların tükeniyor olması, enerji tasarrufu sağlanması, atık miktarların azaltılması, geleceğe ve ekonomiye yatırım yapmak gibi nedenler geri dönüşümü zorunlu kılmaktadır [29].

Ülkemizde 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında riskli yapılar Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı öncülüğünde, hızla, içinde yaşayanların can ve mal güvenliğini koruyan, sağlıklı yapılara dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sonucunda birinci ve ikinci gruba giren malzemeleri içeren inşaat yıkıntı atığı ortaya çıkmaktadır. Miktarı her gün kümülatif olarak artan inşaat

yıkıntı atıklarından kaynaklı çevre sorunlarının ve bu atıkların nakliyesi ve depolanması için yapılan harcamaların azaltılması amaçlanmalıdır [3].

2.3.2. İnşaat yıkıntı atıklarının Dünya ve Türkiye'deki durumu

Bina ve altyapı inşaatı ve yıkım atığı, ulaşımla ilgili inşaat, yıkıntı ve tamirat atığı, yol temizleme atığı ve fırtına, sel, deprem gibi doğal afet atığı ve diğer insan yapımı işler sonucu Avrupa ülkelerinde yılda 180 milyon ton, ABD'de 136 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşmaktadır. ABD'de inşaat ve yıkıntı atıklarının %43'ü konutlardan (58 milyon ton) ve %57'si (78 milyon ton) diğer kaynaklardan oluşmaktadır. Bu atıkların %8'i yeni inşaat yapımından, %44'ü yenileme ve %48'i yıkıntı atıklarıdır. Avustralya Sydney şehrinde oluşan inşaat ve yıkıntı atığı miktarı toplam katı atığın %60'nı oluşturmaktadır. Hong Kong'da 1998 yılı verilerine göre günde üretilen inşaat ve yıkıntı atığı miktarı 32710 tondur. İngiltere'de yılda 53,5 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşmaktadır. Bu atıkların 27,4 milyon tonu (%51,2) depolanmakta, 21,2 milyon tonu (% 39,6) inşaat esnasında arazi kazanımında kullanılmakta ve 5 milyon tonu (%9,2) yeni ürün kazanmak üzere değerlendirilmektedir [30].

Hollanda ve Belçika'da, inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) depolanması yasak olup, %90 oranında geri kazanım yapılmaktadır. İngiltere'de İYA'nın bedel karşılığında bertaraf edilmesi işlemi uygulandığından dolayı İYA tesisleri kurulmuştur. İngiltere'deki BS 6543 standardı, İYA'nın yol ve kaldırım yapımında nasıl kullanılacağını ifade etmektedir. Danimarka'da İYA ayrı toplanmaktadır. Bu ülkede İYA'nın %82'si geri dönüştürülmektedir. Almanya ise depolama sahasına gidecek İYA miktarını %50 oranında azaltmayı planlamıştır. Avustralya'da İYA'nın %30'u geri kazanılmakta veya tekrar kullanılmaktadır. ABD'de 1800 adet İYA depolama tesisi, 3500 adet İYA geri kazanım tesisi bulunmaktadır. ABD, %30 oranında İYA'yı geri kazanmakta ve tekrar kullanmaktadır. İspanya, İtalya, Portekiz, Yunanistan gibi ülkelerde ise İYA daha az oranda geri kazanılmaktadır. Çünkü bu ülkelerde yeteri kadar doğal agrega bulunmakta ve orta maliyetle temin edilmektedir. Ülkemizde ise inşaat yıkıntı atıkları (İYA) karışık olarak bulunmakta ve az miktarlarda yol dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [31]. İYA'nın farklı alanlarda daha fazla kullanılması için araştırmalar yapılmaktadır. İYA hakkında en kapsamlı çalışma, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü ile Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü

tarafından yürütülen “İnşaat ve Yıkıntı Atıklarından Geri Kazanılan Ürünlerin Kullanım Kriterlerinin Belirlenmesi Projesi” ile gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde halen inşaat ve yıkıntı atıklarının büyük bir kısmı atık yönetim ilkelerine uygun şekilde bertaraf edilmemektedir. Dolayısıyla; İYA projesi kapsamında geri kazanım odaklı bir yönetim ve yıkım esnasında asbestli ürünlerin, diğer zehirli malzemelerin ayıklanması, çalışmaların yaygınlaştırılması (bilgilendirme toplantıları, eğitim, çalıştay vs.) gerekmektedir.

2.4. Geri Dönüşüm Agregası

Normal beton kütlece yaklaşık olarak %12 çimento, %80 agrega ve %8 karışım suyu içermektedir. Dünya çapında yılda yaklaşık 10 milyar ton betonun büyük bölümünü oluşturan agrega kullanılmaktadır [32].

İnşaat ve beton endüstrisi için kullanılan agrega miktarının çok olması ve bunun ekolojik dengeye zararları göz önünde bulundurulduğunda agregaların geri dönüştürülmesi büyük önem kazanmaktadır.

Geri dönüşüm agregasının tarihçesi

Yapı malzemelerinin yeniden kullanımı çok eski tarihlere dayanmakta olup, beton yapıların yıkıntı atıklarının tekrar kullanılması fikri, İkinci Dünya Savaşı enkazının geri kazanılmış agrega olarak kullanılması ile Almanya tarafından ortaya atılmıştır. 1990’lı yıllarda başta Avrupa ülkeleri sürdürülebilirlik adına geri dönüştürülmüş agregaları beton üretiminde kullanmıştır. Ülkemizde maalesef geri dönüştürülmüş agrega kullanımı yaygınlaşamamıştır [11].

Geri dönüşüm agregasının kullanım amacı

Sürdürülebilirlik açısından enerji ve doğal hammadde tüketiminin ve atık madde miktarının azaltılması çevrenin korunması ve ekolojik denge için büyük önem taşımaktadır. Artan nüfus artışı inşaat sektörünün de hızla gelişmesine ve bu da atık maddelerin oluşmasına, enerji ve doğal hammadde sarfiyatına sebep olmaktadır. Agrega kaynaklarının her geçen gün azalması, çevre kirliliğinin artması ve maliyet yeni araştırmaların yapılmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, atık betonların kırılarak agregasının geri dönüşüm agregası olarak kullanımı ekolojik dengenin korunması açısından son derece önemlidir. Yapı sektöründe

kullanılan malzemelerin yaklaşık %50'sinin doğal kaynaklardan karşılandığı araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır. Bu çerçevede, beton için çimento yerine mineral katkılar, agrega için ise atık betonlardan elde edilen agregaların kullanımı araştırılmalıdır [33].

Geri dönüşüm agregası ile ilgili standartlar

İlk olarak 2003 yılında geri dönüşüm agregası konusu Avrupa Standartlar Komitesi (European Committe for Standardization: CEN) tarafından Avrupa Agrega Şartnamesi ile standartlaştırılmıştır [34]. Fransa RILEM, Almanya DIN 4226-100, Birleşik Krallık BS 8005-2, Portakal E471: 2006, İsviçre OT70085 ve İspanya EHE-08 standartlarında geri dönüşüm agregası hakkında standartlara yer verilmiştir [35]. Geri dönüşüm agregası kullanım oranı ve geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımı için uluslararası standartlarda belirtilen sınır değerleri Çizelge 2.4'te yer almaktadır [36].

Çizelge 2.6. Farklı standartlarda yapısal betonların geri dönüşüm agrega kullanım oranı ve beton basınç dayanımı sınır değerleri [36]

Standart	İri geri dönüşüm agregası türü ve ikame oranı	Basınç dayanımı (MPa)
RILEM	Tip II (%100)	50
	Tip III (≤%20)	Sınır yok
Hong Kong	100%	20
	≤%20	25-35
Belçika	Tip II (%100)	30
	≤%20	Sınır yok
Hollanda	%100 ve 40 kg/m3 çimento artışı	17,5-22,5 (küp)
	%100 ve 40 kg/m3 çimento artışı	27,5-45 (küp)
	≤%20	Sınır yok
Birleşik Krallık	100%	40
	≤%20	Sınır yok
Japonya	I	18-24
	II	16-18
	III	<16
	≤%20	Sınır yok
Avusturalya	100%	40
(Yapısal Olmayan)	≤%20	Sınır yok

EHE-08 standardına göre geri dönüşüm agregasının yapı betonlarında kullanılabilmesi için geri dönüşüm agregalarının sadece iri agrega ile yer değiştirebilir ve geri dönüşüm agregasının miktarı iri agrega miktarının toplamının sadece %20'si kadar olabilmektedir.

Ayrıca, EHE-08 standardına göre, geri dönüşüm agregaları dayanımı 40 MPa'dan fazla olan betonlarda (ön germeli beton hariç) kullanılmamalıdır ve geri dönüştürülmüş iri agreganın 4 mm'den geçen miktarının %5'ten fazla, su emme oranının ise %7'den fazla olmaması gerekmektedir [37].

2005 yılında Brezilya tarafından yayımlanan NBR 15.116 sayılı "Yapım ve Yıkım Atığından Elde Edilen Geri Kazanılmış Agregalar" isimli standartta geri dönüştürülmüş agregaların yapısal olmayan betonlarda ince ve iri olarak kullanımına olanak verilmiştir. Ayrıca bu standart geri dönüştürülmüş agregayı iki sınıfa ayırmıştır;

1. Geri dönüştürülmüş agrega miktarı beton karışımında kullanılan doğal kaynakların %90'ından daha fazla ise "geri dönüştürülmüş beton agregası".

2. Geri dönüştürülmüş agrega miktarı beton karışımında kullanılan doğal kaynakların %90'undan az ise "karışık agrega" olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu standart ile harç molozu kullanımının (yapısal olmayan üretimlerde) su emme probleminin çözümü için sınırlandırılmasını zorunlu kılmaktadır [38].

2002 yılında Almanya tarafından yayımlanan DIN 4226-100 sayılı "Harç ve Beton için Agregalar - Geri Kazanılmış Agregalar" [39] isimli standartta geri kazanılmış agregalar kaynağına göre 4'e ayrılmıştır;

1. Beton molozu
2. Enkaz molozu
3. Duvar molozu
4. Karışık moloz

Geri dönüştürülmüş agreganın ilk olarak iri ve ince agrega olarak kullanımına izin verilmiştir ancak daha sonra yapılan araştırmalar neticesinde geri dönüştürülmüş ince agreganın kullanımına müsaade edilmemiştir. DIN 4226-100 [39] sayılı standarda göre beton molozu ve enkaz molozu yapı betonlarında, duvar molozu ve karışık moloz ise yapısal olmayan betonlarda kullanılabilir [38].

2002 yılında Hong-Kong tarafından yayımlanan standartta geri dönüştürülmüş agregaların betonda kullanılmasında iki farklı şart vardır.

1. %20 geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen yapı betonlarının basınç dayanımı 35 MPa'dan fazla olmalıdır.

2. %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen yapısal olmayan betonların basınç dayanımı 20 MPa'dan fazla olmalıdır.

Bu özellikler betonlardan 4 adet numune alınarak, 7 ve 28 günlük dayanımlarına bakılarak kontrol edilmektedir [38].

2002 yılında Japonya tarafından yayımlanan BCSJ, 1977 sayılı standartta duvar malzemelerinin geri dönüştürülmüş agrega olarak kullanılmasında herhangi bir limit konulmamıştır ancak, geri dönüştürülmüş agreganın kuru yoğunluğunun belirlenen bir sınırın altında olması istenmiştir. Sadece geri dönüştürülmüş iri agrega kullanımında beton dayanımın en az 18 MPa, iri ve ince agrega kullanılarak üretilen betonların beton dayanımının ise en az 12 MPa olması gerekmektedir. Japonlar'a göre geri dönüştürülmüş agregalı betonlar H, L ve N olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. L sınıfı agrega ile üretilen betonların alkali-silika reaksiyonu için reaktivitesine ayrıca bakılmalıdır [38].

1. H sınıfı, 2005'te yayımlanan JIS A 5021 standardına göre beton için yüksek kaliteli geri dönüştürülmüş agrega.

2. L sınıfı, JIS A 5023'e göre dolgu ve tesfiye beton agregası olarak düşük kaliteli geri dönüştürülmüş agrega.

3. N sınıfı, JIS A 5022'e göre doğal geri dönüştürülmüş agrega olarak tanımlanmaktadır.

2002 yılında İngiltere tarafından yayımlanan BS EN 206-1 sayılı standartta geri dönüştürülmüş agrega içeriğine göre ikiye ayrılmaktadır,

1. Geri dönüştürülmüş beton agregası.

2. Geri dönüştürülmüş agrega.

BS EN 206-1 sayılı standartta ince agrega kullanımı, su emme ve yoğunluk ile ilgili bir limit belirlenmemiştir. Ancak, hafif çevresel etkiye maruz kalan yerlerde kullanılan geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonların sınıfının C16/20, yüksek çevresel etkiye maruz kalan yerlerde kullanılan geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonların sınıfının ise C40/50 olması istenmektedir [38].

2006 yılında Portekiz tarafından yayımlanan LNEC, E 471 sayılı standartta ARC, ARB1 ve ARB2 olmak üzere geri dönüştürülmüş agregalar 3 sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan ARC sınıfı geri dönüşüm agregasının yapısal betonlarda kullanımı engellenmiştir. ARB1 ve ARB2 sınıfı geri dönüşüm agregaları %20-25 doğal agregaya ikame olarak maksimum basınç dayanımı 35-40 MPa olan yerlerde kullanılmalıdır.

2003 yılında Belçika tarafından yayımlanan PTV, 406 sayılı standartta geri dönüştürülmüş agregalar 3'e ayrılmaktadır;

1. Betondan elde edilen agrega.
2. Duvar molozu.
3. Duvar ve beton moloz agregası.

2002 yılında RILEM tarafından yayımlanan TC,121-DRG sayılı raporda geri dönüştürülmüş iri agrega farklı sınıflara ayrılmış, geri dönüştürülmüş iri agrega ile üretilen betonun uygulamasının kapsamı ve dayanım sınıfları ve maruz kalacağı çevresel etki sınıfları belirtilmiştir. Geri dönüştürülmüş iri agrega 3'e ayrılmaktadır;

1. tip I : Duvar malzemesinden oluşan geri dönüşüm agregası.

2. tip II : Beton malzemesinden oluşan geri dönüşüm agregası.

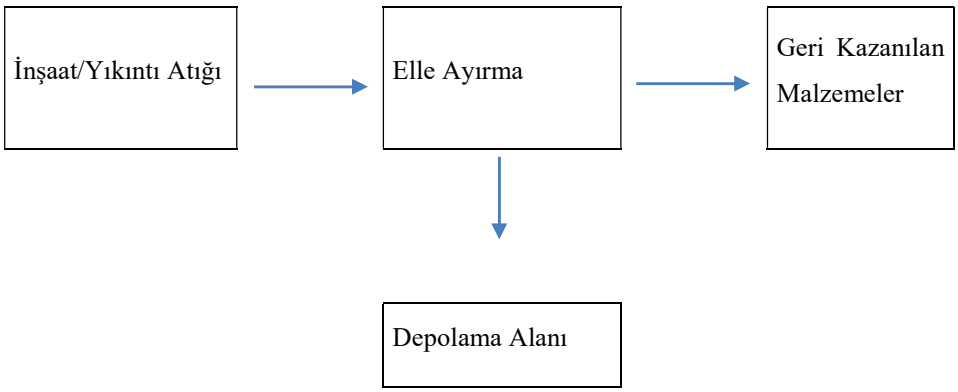
3. tip III : Doğal agrega ve geri dönüştürülmüş agrega karışımından oluşan geri dönüşüm agregası [38].

2009 yılının Nisan ayında Türkiye tarafından TS 706 EN 12620+A1 sayılı "Beton Agregaları" isimli standart yayımlanmıştır.

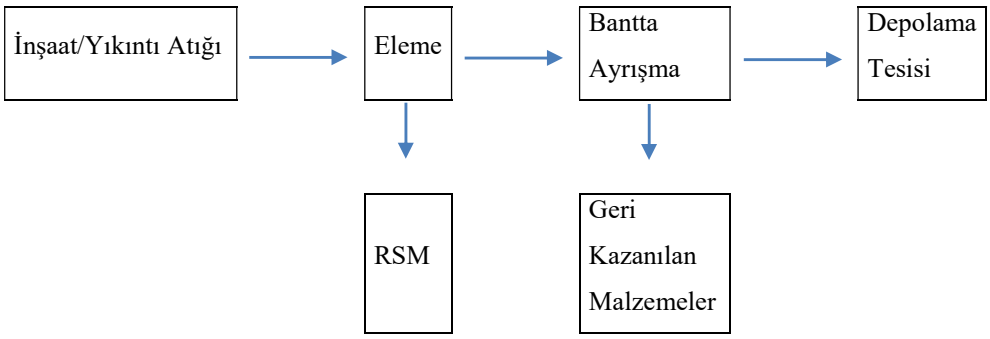
Geri dönüşüm agregasının üretimi

İnşaat yıkıntı atıklarından kaynakta ayrıştırma ve geri dönüşüm tesislerinde ayrıştırma yöntemleri ile malzemeler geri dönüştürülebilmekte olup, bunlardan malzemenin kaynakta ayrıştırılması daha az maliyetlidir. Malzemelerin kaynakta ayrıştırılması yönteminde, ayrıştırma işlemi yapıldıktan sonra şantiyede konteynırlarda malzemeler saklanmaktadır. Böylece malzemelerin geri dönüşüm tesisine götürülmesi gerekmez ancak fazla iş gücü ve farklı malzemeler için çok sayıda depolama alanı gerekmektedir [40]. Geri dönüşüm tesisinde ayrıştırma ise, atıkların geri dönüşüm tesisine götürülmesi, her bir malzemenin ayrıştırılması (beton, donatı, ahşap, alçı, plastik vs.) ve agregaların istenilen boyutlarda kırılması ile yapılır. İnşaat yıkıntı atıkları kazı sırasında oluşan toprak, kum, çakıl, kaya parçaları, kil ve kazıdan tüm malzemeler; yol yapımı ve bakımı çalışmasından oluşan asfalt, metal, beton ve yol kazısından gelen tüm malzemeler; yıkıntı atıklarından oluşan beton parçaları, kireçli sıva, briket, kaplama malzemeleri, alçıtaşı, işlenmiş taş ve porselen gibi malzemeler; çalışma bölgesi atık malzemeleri, genişletme, büyütme, yenileme çalışmaları sonucu oluşan tahta, plastik, kağıt, cam, boya, emaye, tutkal gibi malzemelerdir [11].

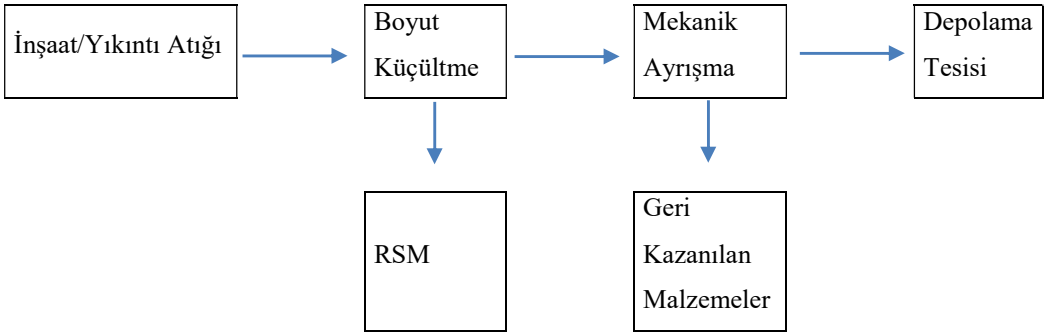
Geri dönüşüm tesisinde atıkların ayrıştırılıp geri dönüştürülmesi için 3 farklı yaklaşım vardır. Basit yaklaşım Şekil 2.2'de, kombine yaklaşım Şekil 2.3'de ve yoğun iş makineli yaklaşım Şekil 2.4'de gösterilmektedir;



Şekil 2.2. Basit yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi

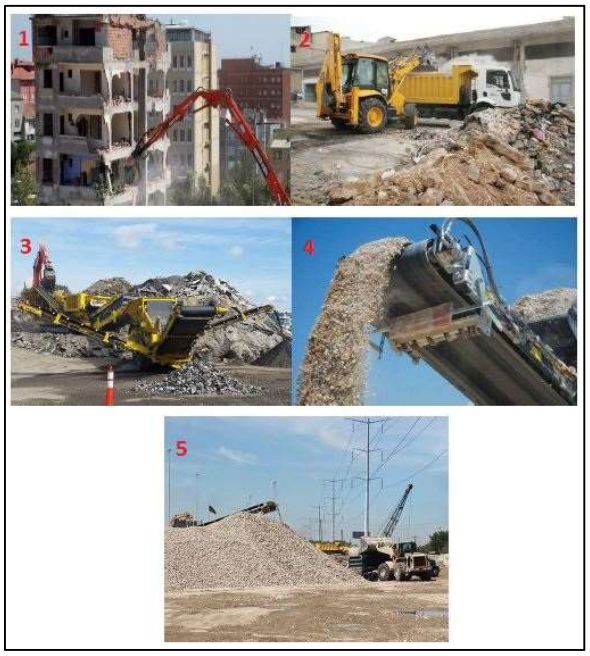


Şekil 2.3. Kombine yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi



Şekil 2.4. Yoğun iş makineli yaklaşım ile geri dönüştürülmüş agrega üretimi

İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi, yapının yıktırılması, yıkım yerinden malzemelerin alınarak geri dönüşüm tesisine taşınması ve atıkların ayrıştırılarak parçaların kırılması işlemlerinden geçerek yapılmaktadır. İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi sürecine ilişkin görsel Resim 2.4.'te gösterilmektedir.



Resim 2.4. Geri dönüşüm agregasının üretim adımları

Geri dönüşüm agregasının kullanım alanları

Ekonomik ömrünü tamamlamış, doğal afet sonucunda veya olası afet sonrası ağır hasar görmesi ilmi ve teknik verilere göre tespit edilmiş yapılar yıktırıldıktan sonra oluşan atıklar ayrıştırıldıktan sonra temizlenip, onarılan agregalar çeşitli deneylere tabii tutularak yeni yapıların inşasında kullanılabilmektedir. İnşaat yıkıntısında oluşan malzemeler geri dönüştürülebilir ve kullanılabilir. İnşaat teknolojisinde kullanılan hammaddelerin birçoğu bu şekilde karşılanabilmektedir. Ancak, bu geri dönüşüm ve kullanılabilirlik belirli kurallara bağlanmalıdır. İnşaat yıkıntı atıkları ayrıştırılıp, temizlendikten sonra örneğin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca, inşaat donatısı diğer malzemelerden ayrıştırılıp temizlendikten sonra altyapı malzemesi olarak kullanılabilir. Benzer şekilde, ayrıştırılıp, kırılarak elde edilen betonlar kaldırım yapımında, drenaj sistemlerinde, su, kanalizasyon inşaatında, çakıl yollarda, açık garaj yapımında kullanılabilir. Agregaların geri dönüştürülmesi ile enerji ve hammadde tasarrufu yapılmış olur [11].

Geri dönüştürülmüş agreganın betonda kullanımını engelleyen nedenler

İnşaat yıkıntılarının imha edilme maliyetinin gelişmiş ülkelerde az olması ve geri dönüştürülmüş atıklarla üretilen malzemelere karşı güvensizlik dünyada geri dönüşüm sonucu elde edilen ürünlerin yapı sektöründe kullanılabilirliğine engel olmuştur [42]. Geri

dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların elastisite modülü, basınç dayanım ve dayanıklılık değerleri normal agrega ile üretilen betonlarınkinden düşük olduğundan bu konuda araştırma yapanlar tarafından geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonun taşıyıcı elemanlarda kullanılması önerilmemektedir. Ayrıca, sülfat etkisi, sodyum etkisi vb. veya suya maruz bölgelerde kullanımında deneylere tabii tutularak performansının belirlenmesi gerekmektedir [39].

Beton matrisinin yaklaşık %70-80'ini agreganın oluşturduğu bilinen bir gerçektir. Buna rağmen geri dönüştürülmüş agreganın beton üretiminde kullanılmasını engelleyen bazı faktörler aşağıda listelenmiştir;

1. Genel olarak geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen ürünlere karşı güvensizlik düşüncesi geri dönüştürülmüş agrega kullanımını engellemektedir. Geri dönüştürülmüş agrega düşük dayanımlı betonlarda veya taşıyıcı olmayan elemanlarda kullanılarak bu düşüncenin değiştirilmesi sağlanabilir.

2. Atıkların çokluğu ile geri dönüşüm tesisleri kıyaslandığında geri dönüşüm tesislerinin yetersiz olduğu görülmektedir. Bu da geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını azaltmaktadır.

3. İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi konusunda çalışan özel sektör kuruluşlarının sayısının az olması da inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek kullanılmasına engel teşkil etmektedir.

4. Standart eksikliği de geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını engellemektedir.

2.5. Geri Dönüşüm Agregası Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar

Geri dönüşüm agregasının yüzeyinin iyi temizlenmemesi halinde agreganın su emmesinin fazla olmasından kaynaklı beton özelliklerinde bazı olumsuzlar oluşabilmektedir. Geri dönüşüm agregası ile üretilen betonlar hakkında yapılan çalışmalarda geri dönüşüm agregasının Los Angeles aşınma değeri ve su emmesinin doğal agregalara kıyasla çok fazla olduğu, geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonların kapiler su emme katsayısı ve hacimce su ihtiyacının arttığı, elastisite modülü, basınç ve çekme dayanımı, kuruma rötresi, aderans, ıslanma kuruma döngüsü ve dayanıklılığı normal agregalı betonlara kıyasla daha

olumsuz olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonların taşıyıcı elemanlarda kullanımı tavsiye edilmemektedir [21].

Kadiroğlu, Öz, Tezcan ve Kuru (2017)'nun yaptığı çalışmada %0'dan %25'e kadar artan oranlarda geri dönüştürülmüş agrega ile doğal agrega ikame edilerek üretilen beton karışımlarının taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan geri dönüşüm agregası iki ayrı sınıfa ayrılmıştır. Birinci grup çalışmada sadece doğal agrega ile geri dönüşüm agregaları kullanılmış olup, ikinci grup çalışmada ise geri dönüşüm agregalarının yanında inşaat yıkıntı atıkları da kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda karışım dizaynında çok büyük değişiklik yapılmadan %5 oranında geri dönüşüm agregası kullanılabileceği belirlenmiştir [43].

Sefidehkhan ve Şimşek (2018) tarafından yapılan çalışmada atık betonlardan üretilen agregalar ve bu agregalar kullanılarak üretilen betonların mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Geri dönüşüm agregasının su emme oranının kırmataş agregasından daha fazla olmasından kaynaklı kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça taze betonun çökme değerinde düşüş tespit edilmiş ve geri dönüşüm agregalı betonların kontrol betonuna kıyasla her yaşta basınç dayanımının daha az olduğu sonucunu varılmıştır. Ayrıca, geri dönüşüm agregalı betonların aderans dayanımının ve ıslanma kuruma sonrası basınç dayanımının kontrol betonuna kıyasla daha az olduğu anlaşılmıştır [44].

Demirel, Toklu ve Şimşek (2015) tarafından yaşı ve sınıfı önceden bilinen beton atıklardan elde edilmiş ince ve iri agregaların geri dönüşüm agregası olarak betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geri dönüşüm agregası oranının artması su ihtiyacını arttırıp, çökmenin azalmasına sebep olduğu görülmüştür. İri geri dönüşüm agregası ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları geri dönüşüm agregasının miktarının artışıyla azaldığı, geri dönüştürülmüş iri, geri dönüştürülmüş ince ve geri dönüştürülmüş iri ve ince agregalı karışımlardan en avantajlısının geri dönüştürülmüş iri agregalı beton karışımlarının olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, kırmataş agregasının sonuçlarının literatürden farksız olduğu, geri dönüşüm agregasının yoğunluğunun literatürden farksız olduğu ancak su emme oranının literatüre kıyasla fazla olduğu, ilgili standartlara uygun kırmataş agregası, geri dönüşüm agregası ve uçucu kül kullanımında işlenebilirlik için akışkanlaştırıcı kimyasal maddelere ihtiyaç duyulduğu, geri dönüşüm agregasının karışım için gerekli suyun miktarını arttırdığı, iri, ince ve iri ile ince agregalı karışımlar kıyaslandığında en iyi sonucun iri

agregalı karışımların verdiği, atıkların kullanımının çevreye ve sürdürülebilirliğe katkı sağlayacağı sonucuna varılmıştır [45].

Döndüren ve Şişik (2016) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş atık beton agregaları üzerinde yapılan deneyler yer verilerek, geri dönüştürülmüş atık beton agregalarının beton agreası olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan araştırmalarda geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı, deformasyonu ve elastisite modülü normal betonlara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonun donma-çözülme olayı sonucunda ağırlık kaybının normal betona kıyasla daha fazla olduğu, geri dönüştürülmüş agregaların yüksek geçirgenlik ve su tutma özelliğinden dolayı su emme oranının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların özelliklerinin normal betonların özelliklerine hemen hemen yakın olması sebebiyle inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş agrega kullanımının mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır [46].

Durmuş, Can ve Şimşek (2009) tarafından yapılan çalışmada farklı sınıflarda beton numuneleri üretilerek bu numunelerden geri dönüşüm agregası elde edilmiştir. Geri dönüşüm agregaları ile 10x20 cm boyutunda beton numuneleri üretilerek, bu numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, özgül ağırlıkları tayin edilip ultra ses deneyi yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega ile beton üretilmek istendiğinde yapılacak karışım hesabının bir üst sınıfa göre yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada kırma agrega ile üretilen farklı sınıflardaki taze betonların gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve aşınma değerleri literatürdeki araştırmalar ile uyumluluk gösterdiği ve geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonların sınıfları bir alt sınıftaki dayanıma denk geldiği görülmüştür [47].

İpekçi, Coşgun ve Esin (2015) tarafından inşaat sektöründe oluşan atıkların tekrar kullanımının yapı malzemelerinin sürdürülebilirliği ve doğal kaynakların korunumunun yanı sıra atıkların oluşturacağı çevre sorunları ve ekonomik problemlerin giderilmesi açısından olumlu yönlerinin olacağı sonucuna varılmıştır [48].

Dilbas, Şimşek ve Çakır (2015) tarafından oluşan ya da oluşacak inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek, geri dönüştürülmüş agregalı betonda silis dumanı kullanımı araştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega kullanım miktarı arttıkça betonun elastisite

modülünde azalmalar olduğu, doğal agrega ile geri dönüştürülmüş agreganın yer değiştirmesiyle betonun basınç dayanımında azalmalar olduğu, numunelerin kırılmaları incelendiğinde daha çok geri dönüştürülmüş agregalı kısımlarda kırılmalar olduğu, silis dumanı kullanımı beton dayanımını önemli ölçüde arttırdığı, geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların hedef basınç dayanımları bir alt sınıfa denk geldiği, geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonların elastisite modülü değerleri normal agregalı betonların elastisite modülü değerlerinden düşük olduğu, basınç dayanımında olduğu gibi silis dumanı kullanımı elastisite modülü değerinde de olumlu sonuçlar verdiği, çalışmada irdelenen standartların (Türk Standartları Enstitüsü (Şubat 2000), Amerikan Beton Enstitüsü (2010), Avrupa Standardizasyon Komitesi (2004)) önerdikleri teorik formüllere bakıldığında tüm sonuçlara göre deneysel verilere göre en yakın sonucu ACI 318M-05 verdiği, geri dönüştürülmüş agrega kullanımıyla betonun su emme oranı artmış ve buna bağlı olarak da yoğunluğu azaldığı, sonuç olarak, %30 oranında geri dönüştürülmüş agrega ve %5-10 oranında silis dumanı kullanılmasıyla C30/37 sınıfı betonlar, %100 doğal agrega kullanılarak C30/37 sınıfı betonlar, %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak C25/30 sınıfı betonlar elde edildiği, geri dönüştürülmüş agrega kullanım miktarı arttıkça yoğunluğun azaldığı, su emme oranının arttığı sonucuna varılmıştır [49].

Batman (2018) tarafından yapılan çalışmada, 3-7-28 günlük beton numunelerinin kırılarak geri dönüştürülmesiyle elde edilen geri dönüşüm agregasının çeşitli oranlarda kullanılmasıyla elde edilen beton numuneleri ile kırmataş agregası kullanılarak üretilen beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları, eğilmede çekme dayanımı, su emme oranı ve kılcal geçirimlilik özellikleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, kılcal geçirimlilik ve su emme oranı belirleme deneylerine bakıldığında geri dönüştürülmüş agrega ikameli numunelerin sonuçlarının referans numunelere kıyasla çok fazla fark olmadığı görülmüştür. Bu çalışma sonucunda, %15 geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen numunelerin çökme değeri ile %100 kırmataş agregası kullanılarak üretilen numunelerin çökme değerinin aynı olduğu, %30 geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen numunelerin çökme değeri de %15 geri dönüştürülmüş agregayla ve %100 kırmataş agregasıyla üretilen numunelerin çökme değerine yakın çıktığı görülmüştür. Geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen numunelerin su emme miktarının fazla olduğu görülmüştür. Karışımlarda kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Geri dönüşüm agregaların su emme miktarlarının fazla olması sebebiyle geri dönüşüm

agregası kullanılarak üretilen beton karışımlarının su/çimento oranının 0,5 veya daha fazla olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ayrıca, kullanılan geri dönüşüm agregası miktarının %50'nin üstüne çıkmasıyla betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirdiğini göstermiştir. Geri dönüşüm agregası ikame oranı arttıkça basınç dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir [50].

Tüfekçi (2011) tarafından yapılan geri kazanılmış agregaların beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaların %0-25-50-100 oranında doğal agrega ile yer değiştirilerek üretilen betonun özellikleri araştırılmıştır. Karışımda kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı ve yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça numunelerin yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Doğal agrega kullanılarak üretilen mineral katkısız beton numunelere kıyasla geri dönüştürülmüş agrega ve yüksek fırın cürufu kullanıldığında en fazla % 5 azaldığı sonucuna varılmıştır. Geri dönüşüm agregası miktarının artışıyla çökme miktarının ve işlenebilmenin azaldığı görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agregaların yoğunluğunun normal agregadan daha az olması sebebiyle numunelerde kullanılan geri dönüşüm agregası miktarı ve yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça numunelerin yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde yüksek fırın cürufu katkısı olmayan geri dönüştürülmüş agregalı betonların geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega miktarı ve yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça betonun hacimce su emme oranının arttığı görülmüştür. Yine aynı şekilde yüksek fırın cürufu katkısız geri dönüştürülmüş agregalı betonların geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça numunelerin su emme oranının arttığı görülmüştür. Ayrıca, geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen beton numunelerde yüksek fırın cürufu oranı arttıkça, 7. günde kılcal su emme katsayısı daha fazla arttığı ancak 28. ve 56. günlerde azaldığı görülmüştür. Yüksek fırın cürufu katkısız numunelerde geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça ultrases geçiş hızında artış olmuştur. 7, 28 ve 56. günlerdeki beton basınç dayanımlarına bakıldığında, 28. günde yüksek fırın cürufu katkılı olmayanlar hariç geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça basınç dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega kullanım miktarı arttıkça numunelerin çekip çıkarma dayanımlarında artış olduğu görülmüştür [11].

Amjadi, Monazami, Mohseni, Balgouri ve Ranjbar (2016)'ın yaptığı, geri dönüştürülmüş tuğla, beton, seramik ve kiremit gibi atık malzemelerin kendiliğinden yerleşen harçların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Atık malzemeyi çimentoya ikame olarak %5,

%10 ve %15 oranında kullanılmıştır. Taze harç sonuçları ve ayrıca basınç dayanımı ve su emme özellikleri değerlendirilmiştir. Atık malzeme miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı ancak, bu azalışın %3 ile %17 arasında olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, atık malzemenin artmasıyla su emmenin de arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, geri dönüştürülmüş malzemenin kullanımının numunelerin özelliklerini çok fazla olumsuz etkilemediği ve geri dönüştürülmüş malzemenin betonda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [42].

Singh, Duan, Xiao ve Liu (2019)'nın yaptığı kendiliğinden yerleşen betona geri dönüştürülmüş agregasının ilave edildiği çalışmada, geri dönüştürülmüş ince agreganın kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerindeki olumsuz etkisinin, geri dönüştürülmüş kaba agreganın etkisinden belirgin olduğu sonucuna varılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerindeki iyileşme, çimento esaslı malzemelerin kullanımının artmasıyla ve kimyasal katkı malzemelerinin kullanılmasıyla sağlanabileceği görülmüştür [51].

Jagadesh ve diğerlerinin (2021) yaptığı, geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonun tasarım parametrelerinin basınç ve yarmada çekme özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmada, su/çimento oranının artmasıyla kendiliğinden yerleşen betonun basınç ve yarmada çekme dayanımında azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde ince agrega oranı/kaba agrega oranının 1 ile 3 arasında olduğunun görüldüğünün belirtildiği bu çalışmada, beton mukavemeti ile ince agrega/kaba agrega oranında sabit bir ilişkinin olmadığı belirtilmiştir. Ancak, kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinde ince agrega/kaba agrega oranının hayati bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Su/çimento oranı düşük olduğunda basınç ve yarmada çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Normal ince agrega ile geri dönüştürülmüş ince agrega %100 değiştirildiğinde basınç dayanımının 40 MPa ile 65 MPa arasında, yarmada çekme dayanımının ise 2,5 MPa ile 3,5 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Normal kaba agreganın %100 oranında geri dönüştürülmüş kaba agrega ile değiştirilmesi sonucunda basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Normal kaba agrega miktarının geri dönüştürülmüş kaba agrega miktarına göre artmasıyla yarmada çekme dayanımının azalmasına sebep olduğu görülmüştür [52].

Pereira-de-Oliveira, Nepomuceno, Castro-Gomes ve Vila (2013)'nın geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen kaba beton ve kendiliğinden yerleşen betonun geçirgenlik özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmada, biri doğal iri agrega ile üretilen kontrol numunesi, diğerleri

%20, %40 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş iri agrega ile üretilmiş dört adet numune hazırlanmıştır. Taze ve sertleşmiş beton özelliklerinden elde edilen sonuçlara göre kendiliğinden yerleşen harçların geçirgenlik özelliklerine herhangi bir zarar vermemesi sebebiyle, doğal iri agregaların geri dönüştürülmüş iri agregalarla değiştirilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaların yüksek su emme özelliğinden kaynaklı süper akışkanlaştırıcı miktarının yüksek oranda kullanılacağı görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega miktarının artmasıyla sertleşmiş haldeki numunenin yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Maksimum geri dönüştürülmüş agrega miktarı kullanımıyla basınç dayanım kaybının %3 olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, geri dönüşüm agrega katılımının kendiliğinden yerleşen betonun su geçirgenliğini önemli ölçüde etkilemediğinin görüldüğü ifade edilmiştir. Nihayetinde, geri dönüşüm agrega miktarının beton üretiminde kullanımının artmasıyla çevresel ve ekonomik anlamda büyük fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır [53].

Sainz-Aja ve diğerlerinin (2019) yaptığı çalışmada, hizmet dışı demiryolu üst yapı atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregaları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen beton isimli çalışmada, hizmet dışı kalan balast ve traversleri kırarak yeniden kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, kendiliğinden yerleşen geri dönüştürülmüş betonun erken yaş özelliklerinin, geri dönüştürülmüş agregaların geometrisine güçlü bir şekilde bağlı olduğu sonucuna varılabildiği ifade edilmiştir. Özellikle, geri dönüştürülmüş balast agregasının kullanımı, geri dönüştürülmüş beton agregasından daha yüksek su/çimento oranına sahip daha akışkan bir çimento hamuru gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Balastın geri dönüştürülmesiyle elde edilen agreganın sertliğinden ötürü, en sert betonun geri dönüştürülmüş balast ile üretilen beton olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, demiryolu atıklarından elde edilerek üretilen geri dönüşüm agregalarının yeniden kullanımının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır [54].

Santos, Silva ve Brito (2017)'nun yaptığı, prekast endüstrisinden elde edilen ince ve iri geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen kendiliğinden yerleşen betonun mekanik performansının değerlendirildiği çalışmada, geri dönüştürülmüş ince agrega oranının geri dönüştürülmüş kaba agrega oranı %0, %25, %50 ve %100 olacak şekilde prekast kaynaklı beton numuneleri üretilmiştir. Beton yoğunluğunun geri dönüşüm agregasının ilave edilmesiyle çok fazla değişmediği sonucuna varılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun geri dönüştürülmüş agrega miktarının artmasıyla mukavemetinde azalmalar görüldüğü anlaşılmıştır. Geri

dönüştürülmüş agrega miktarının fazla olmasıyla su/çimento oranını da arttırdığı görülmüştür. Mekanik özelliklerin çoğu için %25 ve %50 geri dönüştürülmüş agregası kullanımının ve %100 geri dönüştürülmüş kaba agrega kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır [55].

Garcia-Troncoso, Li, Cheng, Mo ve Ling (2021) tarafından çeşitli geri dönüştürülmüş agrega türleri ile kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri ve yüksek sıcaklık dayanımı üzerine karşılaştırmalı yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş beton agregası, geri dönüştürülmüş tuğla agregası ve geri dönüştürülmüş beton blok agregası olmak üzere üç farklı türde geri dönüştürülmüş agrega kullanılmıştır. Sonuçlara göre, geri dönüştürülmüş beton agregası ve geri dönüştürülmüş tuğla agregası ile üretilen betonların yüksek sıcaklıkta (400-600 ^{o}C) normal agrega ile üretilen betondan daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda geri dönüştürülmüş tuğla agregasının normal agreganın yerini kısmen alabileceği görülmüştür. 200 ^{o}C sıcaklığa kadar, geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı, dayanım azalmasının büyüklüğünün %10 (geri dönüştürülmüş tuğla agregası ile üretilen beton) ile %30.93 (geri dönüştürülmüş beton agregası ile üretilen beton) arasında değiştiği normal agregalı kendiliğinden yerleşen betondan daha düşüktür [56].

2.6. Kendiliğinden Yerleşen Harç

Kendi ağırlığıyla sık donatılar ve derin kesitlere yerleşebilen, ilave vibrasyon gerektirmeyen, bu özelliğini yaparken terleme, ayrışma göstermeyen, kohezyonunu koruyan akışkan beton türüdür [57]. Kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) normal beton türünden farkı; akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, viskozite düzenleyici katkı ve mineral (puzolonik) katkıları barındırmasıdır. Burada dikkat edilmesi gereken her akıcı betonun kendiliğinden yerleşen beton olarak adlandırılamayacağıdır. KYB yüksek akıcılığa sahipken aynı zamanda viskozitesini korur ve stabil bir şekilde akışkan özellik gösterir. Akışkanlığın yanında stabiliteyi korumak için ince malzeme miktarının arttırılması veya viskozite düzenleyicilerin kullanılması gerekmektedir. KYB'de kullanılan akışkanlaştırıcı katkı maddeleri sayesinde su/çimento çimento oranında azalmalar oluşur ve bu da yüksek dayanıma neden olmaktadır. KYB'lerin taze haldeki bu avantajlarının yanında sertleşmiş halde de normal betona benzer özellikler gösterir. KYB'lerin geleneksel betonlara kıyasla daha az boşluklu yapıda olması sebebiyle dış etkenlere karşı dayanıklılığı daha yüksektir [58].

KYB'lerin özelliklerinin harç fazı incelemeden de belirlenebilmesi mümkündür [59]. Ancak, beton matrisindeki agregalar reolojik özellikleri büyük ölçüde etkilemekte ve önemli değişimlere sebep olduğundan, harçlar kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirlik özelliğinin temelini oluşturmakta ve işlenebilirlik, viskozite vb. özellikler kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) özelliklerinin incelenmesiyle değerlendirilebilmektedir. Bu bağlamda, KYH'lerin özelliklerinin belirlenmesi KYB'lerin özelliklerinin değerlendirilmesinin temelini oluşturduğu belirtilmektedir [60].

KYH'ler, KYB'lere kıyasla daha fazla ince agrega içermektedir. KYB'lere kıyasla KYH'lerin özelliklerinin araştırılmasının daha az maliyetli olabileceği değerlendirilmektedir. KYH'lerin tercih edilmesi için birçok özelliği vardır. KYH'leri tercih edilebilir kılan bu özellikler, ince agrega ve yüksek hacimli çimentolar ile sağlanabilmektedir. Puzolanik katkılar ile çimento miktarı azaltılarak, taze reolojik özellik, mekanik özellik ve ekonomik anlamda birçok özellik iyileştirilebilir. KYH'lerin sadece ince agregalar, çimento, su ve akışkanlaştırıcı maddeler ile üretilmesi sayesinde çok özel bir ürün olduğu söylenebilir. Herhangi bir yapının taşıyıcı elemanlarının güçlendirilmesinde dar kesitlerden geçirilebilmesi sayesinde tamir harcı olarak kullanılabilir.

Kendiliğinden yerleşen harçların bazı temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır;

1- Yüksek viskozite
2- Ayrışma direnci
3- Yüksek akışkanlık
4- Geliştirilmiş dayanıklılık
5- Geliştirilmiş işlenebilirlik
6- Artan mekanik mukavemet
7- İş gücünün azaltılması
8- Daha kolay yerleştirme
9- Daha az boşluk (içeriğindeki ince malzemenin fazla olmasından dolayı)
10- İnşaat süresinin azaltılması
11- Yerleştirme için ilave vibratör gerekmediğinden azaltılmış gürültü
12- Yüksek stabilite

Kendiliğinden yerleşen harçlar çeşitli yerlerde kullanılabilmektedir.

1- Güçlendirme
2- Dar yerleri doldurma
3- Derz dolgu
4- Betonarme yapıların onarımı

Mini çökme yayılma testi ve mini v hunisi deneyi KYH'lerin taze haldeki özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemlerdir. Mini çökme yayılma testi, KYB'lerde kullanılan çökme testinin değiştirilmiş şeklidir. Ayrıca, mini v hunisi testi ise KYB'lerde kullanılan V funnel testinin değiştirilmiş şeklidir.

KYH'lerde akışkanlık açısından yüksek çimento oranı ve ince malzeme içeriği gerekli olup, taze harçların reolojik özellikleri ve viskozitesi, örneğin alçı, uçucu kül, cüruf, kireç ve silis dumanı gibi ek bağlayıcıların eklenmesiyle iyileştirilebilir. Kendiliğinden yerleşen harçlarla ilgili ülkemizde ve dünyada çalışmalar yapılmıştır.

2.7. Kendiliğinden Yerleşen Harçlar Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar

Balun (2013) tarafından yapılan genleştirilmiş perlit ve pomza gibi hafif agregalar ile üretilen puzolanik malzeme katkılı kendiliğinden yerleşen harçların taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada pomza ve genleştirilmiş perlit gibi hafif agregalar kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların birim hacim ağırlıklarının önemli derecede azaldığı görülmüştür. 40x40x160 mm prizmatik kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin 3, 28 ve 90. günlük eğilme deneyinden elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerine bakılmış olup, kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının agregaların özelliklerine göre değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Birim hacim ağırlık düştükçe, porozite arttıkça eğilmede çekme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Tüm numune serilerinin basınç dayanımının artmasıyla eğilme dayanımlarında aynı oranda azalma görülmüştür [58].

Uygunoğlu (2008) tarafından yapılan çalışmada, normal agrega kullanılarak üretilen betonların agregalarının dayanımları harçların dayanımından fazla, hafif agrega kullanılarak üretilen betonlarda ise agregaların dayanımlarının harçların dayanımından düşüktür. Normal

agregalı betonlarda gelen yükü harçlar agregalara iletmektedir. Hafif agregalı betonlarda ise gelen yük agregalar ile harca iletilmektedir. Bu sebeple hafif agrega kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımları, normal agrega kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımından daha düşüktür [61].

Altan (2014) tarafından yapılan, kendiliğinden yerleşen hafif harçların bazı mühendislik özelliklerinin incelendiği çalışmada doğal agregalar ile hafif uçucu kül agregaları ikame edilerek kendiliğinden yerleşen hafif harç numuneleri üretilmiş ve bu numunelerin taze ve sertleşmiş bazı özellikleri araştırılmıştır. Hafif uçucu kül ince agregalarının miktarının artmasıyla poroz yapısından kaynaklı geçirgenlik katsayısı da artmıştır. Bununla birlikte, hafif uçucu kül ince agrega içeren numune serilerinin 56 günlük geçirgenlik katsayısının 28 günlük geçirgenlik katsayısına kıyasla daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Bu olay hafif uçucu kül ince agregalarının puzolanik özelliğinden kaynaklı ilerleyen yaşlardaki aktivitesiyle açıklanabileceği sonucuna varılmıştır [62].

Öz (2017) tarafından yapılan, atık cam tozu ve yüksek fırın cürufu içeren kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özelliklerinin incelendiği çalışmada, mineral katkı olarak, atık cam tozu ve yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılarak kendiliğinden yerleşen harç üretilmiştir. Sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen harçlarda çimento yerine kullanılan atık cam tozunun kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirdiği anlaşılmıştır. Cam tozu ile yüksek fırın cürufu karışımlarının atık cam tozunun yüksek fırın cürufuna göre daha faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek fırın cürufu yerine kullanılan cam tozu miktarının artmasıyla, kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir [63].

Türedi (2020) tarafından yapılan başka bir çalışmada, kalsiyum alüminatlı çimento ile kendiliğinden yerleşen harç numuneleri üretilmiş ve bazı mühendislik özellikleri incelenmiştir. Çalışma neticesinde kalsiyum alüminatlı çimentolar ile kendiliğinden yerleşen harç üretilebildiği, alçı kullanımının priz süresini hızlandırdığı, silis dumanının ise taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri iyileştirdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre tane boyutu optimizasyon yöntemi kullanılmış ve bağlayıcı ve toz malzemelerin optimum oranları bulunarak kalsiyum alüminatlı çimentoların dayanım kayıpları engellenmiş ve daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. Kendiliğinden yerleşen

harçlar kalsiyum alüminatlı çimento kullanılarak hem dayanımı yüksek hem de kolayca tamir harcı olarak üretilebilindiği sonucuna varılmıştır [64].

Tuaum, Shitote ve Oyawa (2018) tarafından yapılan, geri dönüştürülmüş cam agrega dâhil edilerek üretilen kendiliğinden yerleşen harcın deneysel çalışmasının yapıldığı çalışmada, çimento miktarını azaltmak için toz hacminin %20'sini oluşturan kireçtaşı tozu dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Deneysel test sonuçları, geri dönüştürülmüş cam agrega içeriği arttığında karışımların çökme akışının azaldığını ve V-hunisi akış süresini arttırdığını gösterdiği sonucuna varılmıştır. Karışımlarının yığın yoğunluğu, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su absorpsiyonu ve emiciliği, geri dönüşüm agregası içeriği arttıkça azalmıştır. Ayrıca, hızlandırılmış harç çubuğu test sonuçları, tüm karışımların genleşmesi kabul edilebilir sınırlar içinde ve potansiyel olarak zararsız olmasına rağmen, geri dönüşüm agregası içeriği arttıkça karışımlarının alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genleşmenin arttığını göstermiştir. Sonuç olarak, geri dönüşüm agregasının %30'a kadarı, karşılaştırılabilir güç performansı, emicilik geliştirme ve uzun vadeli zararlı alkali silika etkisi olmaksızın karışımlara başarıyla entegre edilebilir ve böylece sürdürülebilir katı atık yönetimine, doğal kaynakların korunmasına ve çevrenin korunmasına katkıda bulunulabilir sonucuna varılmıştır [65].

Benabed, Kadri, Azzouz ve Kenai (2012) tarafından yapılan çeşitli kum türleri ile yapılan kendiliğinden yerleşen harcın özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, kırma kum, nehir kumu, kumul kumu ve bir karışım olan çeşitli kum türleri ile yapılan kendiliğinden yerleşen harçların reolojik ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Reolojik özelliklerin ve mukavemetin, kırma ve nehir kumu karışımları ile arttığını, ancak özellikle daha yüksek kum içeriği için kırma ve kumul kumu karışımları ile azaldığını gösterdiği anlaşılmıştır. İyi reolojik ve mukavemet özelliklerine sahip kendiliğinden yerleşen harç üretiminde (%10-15) ince kalker içeren kırma kumun başarıyla kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Ancak ikili ve üçlü kumlu harçlarda kumul kum içeriğinin artmasıyla (%50'ye kadar) basınç dayanımında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Kireçtaşının artmasıyla çökme ve mini v hunisi akış süresinin azaldığı anlaşılmıştır. Kireçtaşı içeriğinin %10-15'e kadar arttırılması, harcın basınç dayanımı arttırdığı görülmüştür. Daha yüksek kireçtaşı oranları için basınç dayanımının kademeli olarak azaldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek kumul kumu içeren (% 50'ye kadar) kendiliğinden yerleşen harç karışımı kumul kumu içermeyen

veya sadece %25 kumul kumu içeren harca kıyasla daha küçük akış çapı ve daha uzun akış süresi sergilediği sonucuna varılmıştır [66].

Belaidi, Azzouz, Kadri ve Kenai (2012) tarafından yapılan, doğal puzolan ve mermer tozunun kendiliğinden yerleşen betonların özelliklere etkisinin araştırıldığı çalışmada, portland çimentosu ile puzolan ve mermer tozu yer değiştirilerek mekanik ve reolojik özellikler araştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, puzolan ve mermer tozu kullanımı ile kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğinde bir iyileşme olduğu görülmüştür. İkili ve üçlü kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı, doğal puzolan ve mermer tozu içeriğinin artmasıyla azaldığı, ancak 28 ve 90 günlük dayanım, %40 (doğal puzolan+mermer tozu) ile bile uygun dayanımın sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır [67].

Safi ve diğerleri (2015) tarafından, deniz kabuklarının ince agrega olarak kullanılması (kum ikamesi ile) ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların bazı özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ezilmiş deniz kabuklarının (0/5 mm sınıfı), harcın temel özelliklerini etkilemeden kendiliğinden yerleşen harç için ince agrega olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Ancak, %100 deniz kabuğu ile üretilen harçların akışkanlığının daha iyi olduğu ve akışkan bir beton için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kumun ezilmiş deniz kabukları ile %100'e varan oranda değiştirilmesi, incelenen harçların basınç dayanımında ve elastik modülünde hafif bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ara yüzey bölgesinin (deniz kabuğu-bağlayıcı) optik mikroskobuyla yapılan makro yapısal çalışması, deniz kabuğu ve çimento hamuru arasında iyi bir yapışma olduğunu ve deniz kabuklarının açısal biçiminin, çimento esaslı matriste bunun dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [68].

Khotbehsara, Mohseni, Yazdi, Sarker ve Ranjbar (2015) tarafından yapılan çalışmada, Nano-CuO ve uçucu külün kendiliğinden yerleşen harcın özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, çimentonun %3 CuO nano parçacıkları ve %25 uçucu kül kombinasyonu ile değiştirilmesini içeren numunelerin mekanik özelliklerinde önemli bir gelişme gösterdiği, uçucu kül ile harmanlanmış karışımların klorür geçirgenliği ve elektrik direnci, nano-CuO içeriğinin %4'e kadar artmasıyla iyileştiği görülmüştür. SEM mikrografları, nanopartiküller içeren kendiliğinden yerleşen harçların mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmaya yol açabilecek daha az poroz gözenek yapısı olduğunu gösterdiği belirlenmiştir [69].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada, geri dönüşüm agregaları dayanım sınıfı bilinmeyen betondan elde edilmiştir. Geri dönüşüm beton agregaları elde edebilmek için öncelikle hilti ile beton kütlesi küçük parçalara ayrılmış, sonrasında çekiç yardımıyla agregalar betondan ayrıştırılmıştır. Geri dönüşüm beton agregaları dışındaki harç katmanı olabildiğince agregadan sıyrılmaya çalışılmıştır. Geri dönüşüm beton agregaları konkasörde birden fazla kez kırılarak, ince agrega formuna getirilmiştir. Geri dönüşüm agregaları normal agregaya ikame edilmiştir. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi çimentosu, karışım suyu olarak Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ayrıca akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

3.1.1 Agrega

Geri dönüşüm agregaları ve normal agregalar TS EN 933-1 [63] ‘e göre tane büyüklüğü elek analizi yapılarak, 0-0,125, 0-1 ve 0-2 mm aralığında, normal agrega ve geri dönüşüm agregaları ayrı ayrı gruplandırılmıştır. Agregaların konkasörde kırılması işlemine ait görsel Resim 3.1’de verilmektedir. Ayrıca, agregaların gruplandırılmasına ilişkin görsel Resim 3.2’de verilmektedir.



Resim 3.1. Agregaların konkasörde kırılması işlemi



Resim 3.2. Agrega grupları

3.1.2. Çimento

TS EN 197-1 [27] standardına uygun olarak üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun içeriğinin belirlenebilmesi için yapılan analiz neticesinde çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun teknik özellikleri

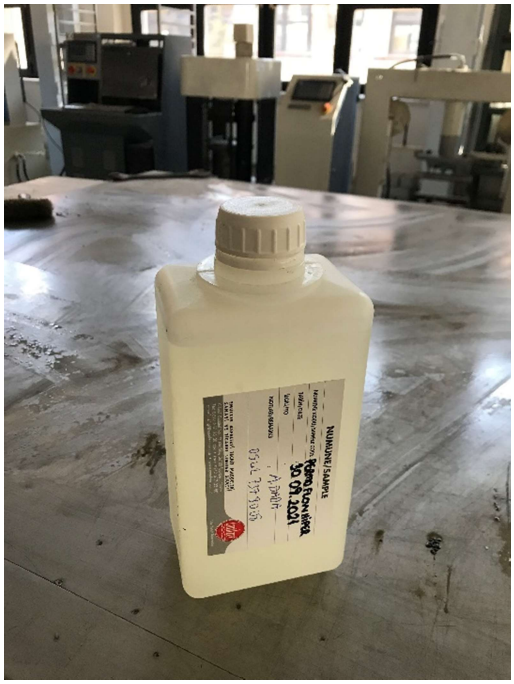
Kimyasal İçerik		Fiziksel Özellikler	
Bileşen	%	Hacimsel Genleşme (mm)	≤ 1
SiO_2	20,63	İncelik (90mm, %)	0,1
Al_2O_3	4,71	İncelik (200mm, %)	1,1
Fe_2O_3	3,41	Özgül Yüzey Alanı (cm^2 /g)	3340
CaO	63,64	Priz Başlangıcı (dak)	185
MgO	1,24	Priz Sonu (dak)	120
SO_3	2,2	Özkütle (g/cm^3)	3,12
Na_2O	0,23	Mekanik Özellikler	
K_2O	0,91	7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	5,8
Cl-	0,0357	28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	7,2
Serbest CaO	1,26	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	39,3
Kızdırma Kaybı	2,63	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	51

3.1.3. Akışkanlaştırıcı

Kendiliğinden yerleşen harç elde edebilmek adına yeterli akışkanlığı sağlamak amacıyla akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi olarak Emülzer markasının, Emülzer Permo Flow Hiper ürünü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı katkı maddesine ait teknik özellikler Çizelge 3.2'de verilmektedir. Ayrıca, kullanılan akışkanlaştırıcı maddesinin görseli Resim 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi teknik özellikleri [40]

Kimyasal Yapı	Polikarboksilat esaslı
Renk	Koyu kahverengi
Görünüm	Sıvı
Katı Madde Oranı	20 ± %2 EN 480-8
Klorid İyonu İçeriği	< %1 EN 480-10
pH (25 °C)	5.5 ± 0,5 ISO 4316
Özgül Ağırlık	1,05 g/cm^3 ± 0,05
Alkali İçeriği	<%6



Resim 3.3. Hiper akışkanlaştırıcı

3.1.4. Karışım suyu

Karışım suyu olarak Ankara musluk suyu kullanılmıştır.

3.1.5. Harç karışımı

Karışımlarda 0-2 mm aralığındaki normal agreganın 0-0,125 mm, 0-1 mm ve 0-2 mm aralığındaki kısmı geri dönüşüm agregası ile yer değiştirerek 13 adet numune üretilmiştir. Harç karışımlarının hazırlanmasına ilişkin görsel Resim 3.4'de verilmektedir. Her bir numunenin karışım oranları Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.



Resim 3.4. Harç karışımlarının hazırlanması

Çizelge 3.3. Harç karışım kodları ve agrega içerikleri

Harç Kodu	Agrega		Geri Dönüşüm Agregası (%)	Normal Agrega (%)
	Kullanılan GDA Tane Çapı Aralığı (mm)	Kullanılan NA Tane Çapı Aralığı (mm)		
S1	-	0-2	0	100
S2	0-2	0-2	25	75
S3	0-2	0-2	50	50
S4	0-2	0-2	75	25
S5	0-2	-	100	0
S6	0-1	0-2	25	75
S7	0-1	0-2	50	50
S8	0-1	0-2	75	25
S9	0-1	1-2	100	0
S10	0-0,125	0-2	25	75
S11	0-0,125	0-2	50	50
S12	0-0,125	0-2	75	25
S13	0-0,125	0,125-2	100	0

Harç karışım kodları, her bir agrega grubu için maksimum tane çapını ve kullanılan normal agrega ve geri dönüşüm agregası oranlarını gösterecek şekilde belirlenmiştir. Örneğin, S1 0-2 mm aralığında, %100 normal agrega, %0 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen karışımı, S9 0-0,125 mm aralığında NA'ya ağırlıkça ikame olarak %25 oranında GDA kullanılarak üretilen karışımı, S11 0-0,125 mm aralığında NA'ya ağırlıkça ikame olarak %75 oranında GDA kullanılarak üretilen karışımı göstermektedir.

3.2. Metot

Normal agregalar ve geri dönüşüm agregaları 0-2 mm aralığında gruplara ayrılmıştır. Geri dönüşüm agregaları üzerinde tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmıştır. Bu agregalar ile üretilen taze harç üzerinde mini V hunisi ve çökme yayılma deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde ise basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, kılcal su emme deneyi, ultrasonik ses hızı deneyleri ve porozite, yoğunluk ve su emme tayini yapılmıştır.

3.2.1 Agrega deneyleri

Tane yoğunluğu ve su emme oranının belirlenmesi deneyi

0-0,125, 0-1 ve 0-2 mm aralığındaki geri dönüşüm agregalarının TS EN 1097-6 [41] standardına göre piknometre yöntemi tane yoğunluğu ve su emme oranları belirlenmiştir. Tane yoğunlukları ve su emme oranı aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

Görünür tane yoğunluğu: $\rho a = \rho w * \frac{M4}{M4-(M2-M3)}$

Etüvde kurutulmuş haldeki tane yoğunluğu: $\rho rd = \rho w * \frac{M4}{\mathrm{M1}-(\mathrm{M2}-\mathrm{M3})}$

Doygun ve yüzeyi kuru haldeki tane yoğunluğu: $\rho sd = \rho w * \frac{M1}{\mathrm{M1}\ \ (\mathrm{M2}-\mathrm{M3})}$

24 saat suda bekletilen agregaların su emme oranı (WA24), aşağıdaki formül ile hesap edilir;

$WA24 = \rho w * 100\ \frac{(M1-M4)}{M4}$

ρw: Deney sıcaklığındaki su yoğunluğu (mega gram/metreküp)

$M1$: Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

$M2$: Doygun agrega numunelerini ve su içeren piknometrenin kütlesi (g),

$M3$: Yalnızca su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

$M4$: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının havadaki kütlesi (g)'dir.

Geri dönüşüm agregalarının tane yoğunluğu ve su emme oranı deney sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir;

Çizelge 3.4. Geri dönüşüm agregaları ve normal agregaların bazı özellikleri

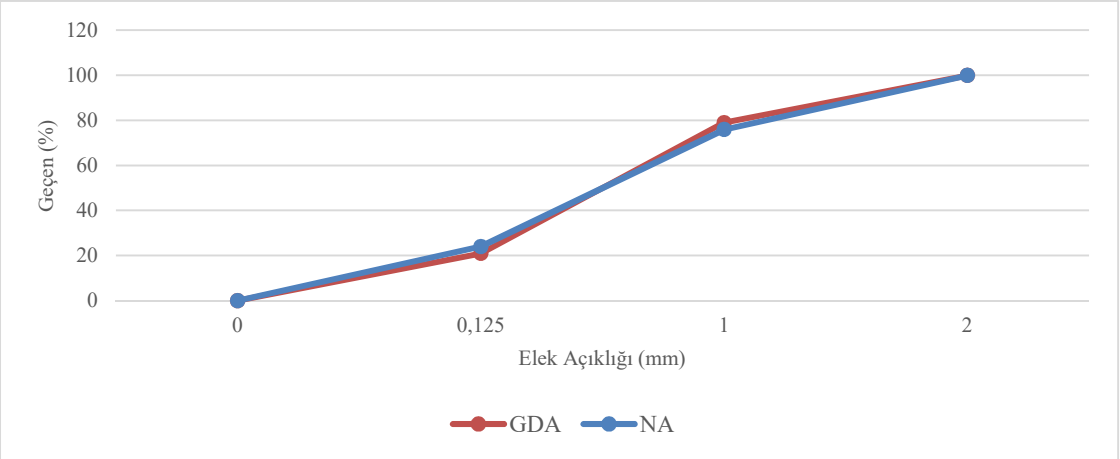
Özellik	GDA			NA		
Agrega Tane Aralığı (mm)	0-0,125	0-1	0-2	0-0,125	0-1	0-2
Yoğunluk (g/cm^3)	1,58	1,56	1,53	1,71	1,69	1,65
Su Emme (%)	6,09	5,47	5,11	2,26	2,02	1,93
Gevşek Birim Ağırlık	1005	998	995	1058	1042	1035
Sıkışık Birim Ağırlık	1254	1247	1238	1321	1305	1296

Elek analizi deneyi

Geri dönüşüm agregaları ve normal agregalar TS EN 933-1 [70]'e göre tane dağılımı elek analizi yapılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.5'te geri dönüşüm agregalarının ve normal agregaların tane dağılımı verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.1'de geri dönüşüm agregalarının ve normal agregaların granülometri eğrileri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Geri dönüşüm agregalarının tane dağılımı

Elek Açıklığı (mm)	Agrega Grupları Geçen (%)		Ağırlıkça Geçen (g)	
	GDA	NA	GDA	NA
2	100	100	1000	1000
1	79	76	790	760
0,125	21	24	210	240
0	0	0	0	0



Şekil 3.1. Geri dönüşüm ve normal agrega gruplarının granülometri eğrileri

3.2.2. Harç tasarımı

Kendiliğinden yerleşen harç tasarımında kullanılacak malzemelerin miktarı EFNARC [60] standardındaki işlenebilirlik sınırlarına göre deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur. Üretilen kendiliğinden yerleşen harçta çimento miktarı 550 kg/m^3, agrega miktarı 1050 kg/m^3, S/Ç oranı 0,38 olarak sabit tutulmuştur. Geri dönüşüm beton agregaları ve normal agregalar doygun kuru yüzey hale getirilerek harç tasarımları yapılmıştır. Agrega tipi (normal agregaya ikame olarak geri dönüşüm agregası) ve akışkanlaştırıcı miktarı değişken olmuştur.

Normal agregaya ikame olarak geri dönüşüm agregası kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.6'da hazırlanan her 1 litrelik (1dm^3) numune için kullanılan malzeme miktarları gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

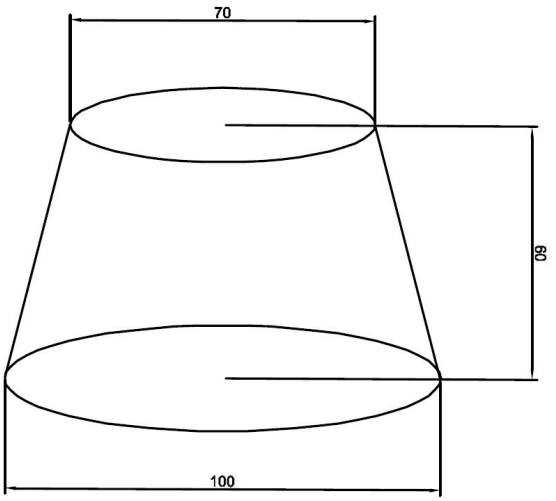
Harç No	Çimento	S/Ç	GDA İkame Oranı (%)	GDA			NA			HA (%)
				0-0,125 (g/dm^3)	0,125-1 (g/dm^3)	1-2 (g/dm^3)	0-0,125 (g/dm^3)	0,125-1 (g/dm^3)	1-2 (g/dm^3)	
S1	550	0,38	0	-	-	-	252	606,48	191,52	1,1
S2	550	0,38	25	63	151,62	47,88	189	454,86	143,64	1,2
S3	550	0,38	50	126	303,24	95,76	126	303,24	95,76	1,5
S4	550	0,38	75	189	454,86	143,64	63	151,62	47,88	1,6
S5	550	0,38	100	252	606,48	191,52	-	-	-	2,0
S6	550	0,38	25	63	151,62	-	189	454,86	191,52	1,2
S7	550	0,38	50	126	303,24	-	126	303,24	191,50	1,3
S8	550	0,38	75	189	454,86	-	63	151,62	191,52	1,7
S9	550	0,38	100	252	606,48	-	-	-	191,52	1,8
S10	550	0,38	25	63	-	-	189	606,48	191,52	1,2
S11	550	0,38	50	126	-	-	126	606,48	191,52	1,3
S12	550	0,38	75	189	-	-	63	606,48	191,52	1,3
S13	550	0,38	100	252	-	-	-	606,48	191,52	1,4

3.2.3. Taze harç deneyleri

Kendiliğinden yerleşen harç deneyleri; mini çökme-yayılma ve mini V hunisi deneyleridir. Bu deneyler sonucunda el edilen değerlen EFNARC [60] standardına belirlenen değerler ile kıyaslanmıştır.

Mini çökme-yayılma deneyi

Bu deney üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm, yüksekliği 60 mm olan kesik koni ile yapılmakta olup, harcın akışkanlık ve doldurma kabiliyetini ölçmektedir. Koni düz ve emici özelliği olmayan bir yüzey üzerinde yapılır. Harç koniye kendi ağırlığınca doldurulur ve kesik koni kaldırılır. Şekil 3.2'de deneylerde kullanılan mini-çökme yayılma aletinin çizimi gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Mini çökme-yayılma aleti

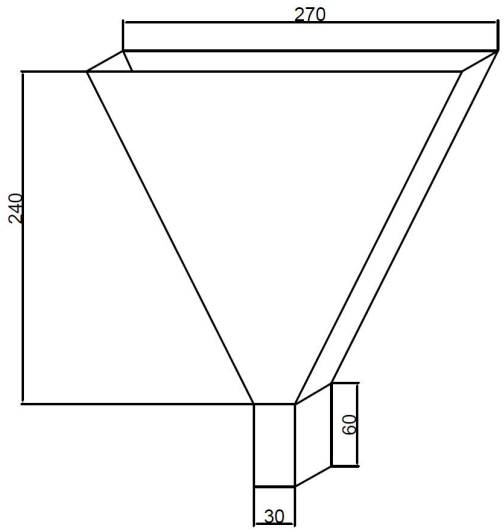
Koni kaldırılır ve harç yüzeyde yayılır. Yayılan harcın birbirine dik iki yönde çapı ölçülür ve ölçülen bu çapların aritmetik ortalaması son çap değeri olarak alınır. EFNARC [60] bağıntısına göre bağıl çökme-yayılma değeri bulunur.

$$Tm = [d/do\,]2 - 1$$

Bu denklemdeki d_o kesik koninin alt çapı olan 100 mm, d ise deney sonunda elde edilen ortalama çap değeridir. EFNARC'a [60] göre çökme-yayılma değeri 240-260 mm aralığında olmalıdır.

Mini v hunisi deneyi

Kendiliğinden yerleşen harçlar için mini v hunisi deneyi EFNARC [60] tarafından tarif edilmiştir. Mini v hunisi deneyi, alt ağzı 30 mm, üst ağzı 270 mm, yüksekliği 300 mm ve genişliği 30 mm olan huni ile yapılmaktadır. Mini v hunisi deneyinde harcın huninin alt ağızdan geçme süresi hesaplanır. EFNARC [60]'a göre bu süre 7-11 saniye aralığında olmalıdır. Şekil 3.3'te deneylerde kullanılan mini v hunisi deneyi aletinin çizimi gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Mini v hunisi deney aleti

Huni üst taraftan kendiliğinden yerleşen harç ile huninin ağzına kadar doldurulur. Alt kapak bu aşamada kapalıdır. Sonrasında alt kapak açılır ve hunideki harcın tamamen akması için geçen süre hesaplanır. Bu deney ile harcın viskozite değeri, akıcılık ve segregasyon direnci ile ilgili bilgi vermektedir. Resim 3.5'te mini v hunisi deneyine ilişkin görsel yer almaktadır.



Resim 3.5. Mini v hunisi deneyi

3.2.4. Taze harcın deney kalıplarına yerleştirilmesi

Her bir seri için üretilen kendiliğinden harç numuneleri herhangi bir vibrasyon ve sıkıştırma işlemi uygulanmadan 40x40x160 mm dikdörtgen prizmatik ve 50 mm küp kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen numuneler 48 saat üzeri kapalı şekilde kuru ortamda bekletilmiştir. Daha sonra kalıptan çıkartılarak, deney anına kadar 20 ºC suda küre bırakılmıştır. Resim 3.6'da harçların kalıplara yerleştirilmesine ilişkin görsel yer almaktadır.



Resim 3.6. Harçların kalıplara yerleştirilmesi

3.2.5. Sertleşmiş harç deneyleri

Kür sonucunda numunelere basınç dayanım testi, eğilme dayanım testi, kılcal su emme testi, ultrasonik ses hızı deneyi, porozite, yoğunluk tayini ve su emme deneyi yapılmıştır.

Basınç dayanımı

7 ve 28 gün kür yapılan 5 mm'lik küp numunelere TS EN 12390-3 [71] standardına göre basınç dayanım testi yapılmıştır. Resim 3.7'de basınç dayanımı belirlenmesine ilişkin görsel yer almaktadır.



Resim 3.7. Basınç dayanımı deneyi

Eğilmede çekme dayanımı

7 ve 28 gün kür yapılan 40x40x160 mm'lik prizmatik numunelere TS EN 12390-5 [72] standardına göre üç noktalı eğilmede çekme deneyi yapılmıştır. Resim 3.8'de eğilmede çekme dayanımına ilişkin görsel yer almaktadır.



Resim 3.8. Eğilmede çekme dayanım deneyi

Kılcal su emme deneyi

28 gün suda bekletilen 5 mm'lik küp numuneler ağırlığı değişmeyecek hale gelene kadar 105±5 ºC etüvde kurutulmuştur. Yan yüzeyleri izole edilen numuneler yüksekliği numune tabanından 5 mm olacak şekilde suya yerleştirilmiştir. 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde, numunelerin üzerindeki serbest su alınarak 0,01 gr hassasiyetle tartılmıştır. Kılcal su emme katsayıları en küçük kareler yöntemi ile aşağıdaki bağıntı ile hesap edilmiştir. Resim 3.9'da kılcal geçirgenlik deneyine ilişkin görsel yer almaktadır.

$$Q/A = k\sqrt{t}$$

Q : Emilen su miktarı (cm^3)

k : Kılcal su emme katsayısı ($cm/s^{1/2}$)

t : Geçen zaman (s)

A : Su ile temas eden alan (cm^2)



Resim 3.9. Kılcal geçirgenlik deneyi

Ultrasonik ses hızı deneyi

Basınç ve eğilme deneyinden önce tahribatsız yöntemlerle numunelerin basınç dayanımlarının belirlenebilmesi için ultrasonik ses hızı deneyi TS EN 12504-4 [73]'a göre yapılmıştır. Her bir seriden hazırlanmış 5x5x5 cm boyutlarındaki küp numunelerin iki kenarına deney aletinin uçları karşılıklı olarak birleştirilerek, ultrasonik ses dalgasının geçiş süresine göre harç numunelerinin dayanımları bulunmuştur. Ayrıca, bu deney yöntemi ile numunelerin yapısı (boşluk, çatlak vs.) hakkında da değerlendirmeler yapılmıştır. Resim 3.10'da ultrasonik ses deneyine ilişkin görsel yer almaktadır.



Resim 3.10. Ultrasonik ses deneyi

Birim hacim ağırlık ve su emme yüzdesi deneyi

Her bir karışım serisinden 5x5x5 cm boyutlarında küp numuneler, TS-EN 12390-7 [74]'a göre 24 saat boyunca suda bekletilmiştir. Sonrasında suya doygun halde havada ve su içerisindeki asılı ağırlıkları belirlenmiştir. Etüvde 105±5 ^{o}C sıcaklıkta kurutulmuş numunelerin etüv kurusu ağırlıklarının ölçülmesi suretiyle aşağıdaki denklemlere göre tüm numunelerin etüv kurusu yoğunluk, doygun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, su emme ve poroziteleri belirlenmiştir.

$$D = Md / V$$

$$W = (M2 - M1 / M1) * 100$$

D = Harç numunesinin yoğunluğu, g/cm³

M_d = Harç numunesinin suya doygun kütlesi, (g)

V = Harç numunesinin hacmi, cm³

W = Su emme oranı, (%)

M_1 = Etüve kurutulmuş harç numunesinin kuru yüzey ağırlığı, (g)

M_2 = Harç numunesinin su içerisindeki ağırlığı, (g)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Harç Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen harç üretimi harç matrisindeki malzemelerin belirli oranlarda seçilerek, büyük bir titizlik ve özen gösterilerek üretilmesi gerekmektedir. Herhangi bir harcın kendiliğinden yerleşen harç olabilmesi için EFNARC [60]'ta belirtilen sınırları sağlaması gerekmektedir.

Kendiliğinden yerleşen harç herhangi bir vibrasyon, sıkıştırma ve sarsma gerektirmeden kendi ağırlığı altında yerleşmesi gerekmektedir. Kendiliğinden yerleşen harç akışkanlık özelliği yüksek olmasının yanında aynı zamanda ayrışmamalıdır. Bunun için optimum viskozite değerine sahip olması gerekmektedir. Kendiliğinden yerleşen harçta akışkanlık su oranı arttırılmadan akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlandığından geleneksel betona göre mukavemeti çok fazla düşürmeden yüksek akıcılık sağlanabilmektedir. Geleneksel betonda akıcılığın sağlanabilmesi için su oranının arttırılması betonun stabil olmasını engellemektedir. Bu bağlamda, kendiliğinden yerleşen harçta taze özellik çok önemlidir.

Kendiliğinden yerleşen harçta kullanılan agreganın özellikleri (agreganın köşeli olması, su emme oranı vb. özellikler) harcın akışkanlığını doğrudan etkilemektedir.

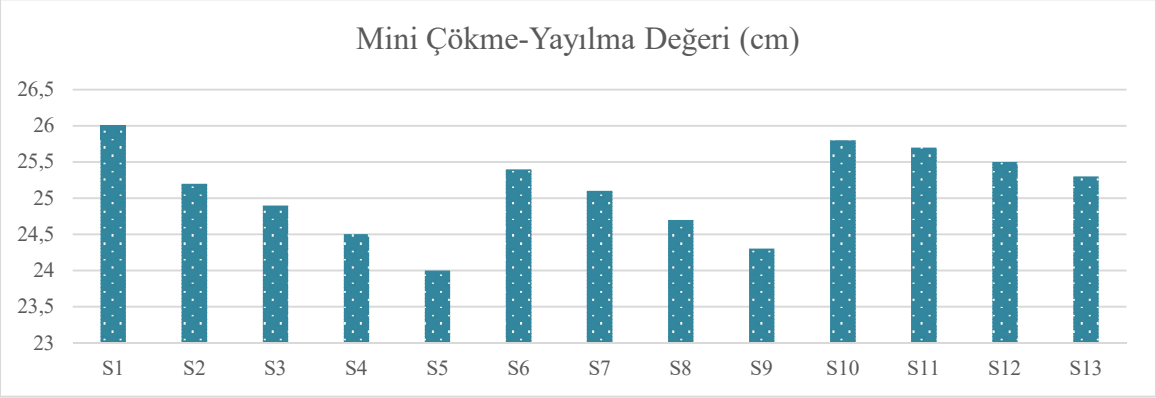
Bu çalışmada üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerinde çimento miktarı, S/Ç oranı sabit tutularak, agrega tipinin kendiliğinden yerleşen harçtaki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan kendiliğinden yerleşen harç karışımlarında S/Ç oranı sabit tutularak EFNARC [60] standardında verilen çökme yayılma ve mini v hunisi değerlerinin sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilmiştir. Çizelge 4.1'de GDA-NA miktarı ve agrega boyutlarına göre mini çökme yayılma deneyi ve mini v-hunisi deneyi sonuçları gösterilmiştir. Laboratuvar ortamında, EFNARC [60] sınırlarının sağlanabilmesi için çok sayıda deneme yanılma yapılmıştır. EFNARC [60] sınırlarını sağlayan miktarlar için karışım oranları belirlenmiştir.

Buna göre üretilen serilerdeki mini çökme-yayılma ve mini v hunisi değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca, mini çökme-yayılma değeri Şekil 4.1'de, mini v hunisi değeri Şekil 4.2'de verilmiştir.

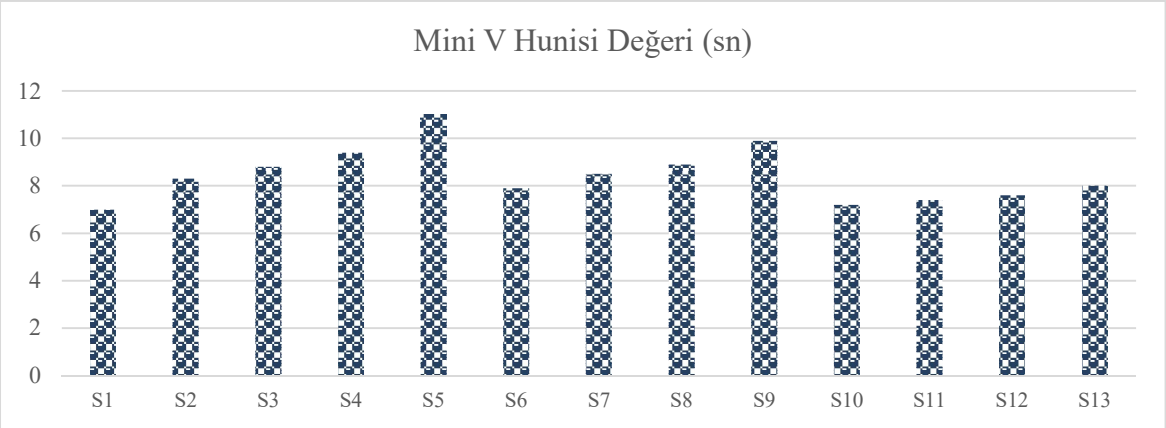
Çizelge 4.1. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma ve mini v hunisi deneyleri değerleri

Harç No	Mini Çökme-Yayılma Değeri (cm)	Mini V Hunisi Değeri (sn)
S1	26	7
S2	25,2	8,3
S3	24,9	8,8
S4	24,5	9,4
S5	24	11
S6	25,4	7,9
S7	25,1	8,5
S8	24,7	8,9
S9	24,3	9,9
S10	25,8	7,2
S11	25,7	7,4
S12	25,5	7,6
S13	25,3	8
EFNARC	24-26 cm	7-11 sn

Çizelge 4.1'den anlaşılacağı üzere tüm seriler EFNARC sınırlarını sağlamıştır.



Şekil 4.1. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma deneyi değerleri



Şekil 4.2. Harç karışımlarının mini v hunisi deneyi değerleri

Hazırlanan harç karışımlarındaki GDA miktarının artmasıyla, harçların işlenebilme özelliğinin azaldığı ve dolayısıyla yayılma çaplarının küçüldüğü gözlemlenmiştir. GDA miktarının artması, harç numunelerinin kıvamını istediğimiz akışkanlıktan uzaklaştırmıştır. GDA yüzeyindeki beton kalıntıları, GDA'nın konkasör ile elde edilmesine bağlı olarak agrega yüzeyinin sivri ve keskin olması, GDA'nın NA'ya kıyasla daha fazla suya ihtiyaç duyması gibi unsurlara bağlı olarak GDA ile çimento matrisindeki sürtünmenin artması işlenebilirlik oldukça zor olmuştur.

Mini v hunisi deneyi ile belirlenen akış süresi kıyaslandığında; tüm karışım serileri için geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının akış hızı, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının akış hızından daha yavaş (akış süresinin daha uzun) olduğu görülmüştür. Yani, geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımları için mini v hunisinin üst kısmından alt ucuna bakıldığında ışığın görülme süresi, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarına göre daha uzun olduğu anlaşılmıştır.

Mini çökme yayılma deneyi ile belirlenen kıvam kabiliyeti kıyaslandığında; tüm seriler için geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının kıvamının, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının kıvamından daha yoğun olduğu görülmüştür. Yani, geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımları için mini çökme yayılma deneyi ile belirlenen yayılma çapının, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının mini çökme yayılma deneyi ile belirlenen yayılma çapına göre daha küçük olduğu anlaşılmıştır.

Kadiroğlu ve diğerlerinin (2017) yaptığı çalışmada GDA kullanıldığında kıvam kayıplarının arttığının görüldüğü belirtilmiştir [43]. Ayrıca, Sefidehkhan ve Şimşek (2018)'in yaptığı çalışmada, GDA'nın su emme oranının kırmataş agregasının su emme oranından fazla olması sebebiyle GDA miktarı arttıkça taze betonun çökme değerlerinde azalma tespit edildiği belirtilmiştir [44]. Yine, Demirel ve diğerlerinin (2015) yılında yaptığı çalışmada, GDA oranının artmasının su ihtiyacını arttırdığı ve bundan kaynaklı çökmenin azaldığına sebep olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir [45]. Gümüşsoy (2019) tarafından yapılan çalışmada, GDA'nın işlenebilirliği azaltmasının nedenini sürtünmeye bağlanabileceği, GDA'nın NA'ya göre daha pürüzlü bir yüzeye sahip olması ve ayrıca daha köşeli bir yapıya sahip olması sebebiyle, GDA miktarının artmasıyla yayılma çapında azalmaların olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir [13].

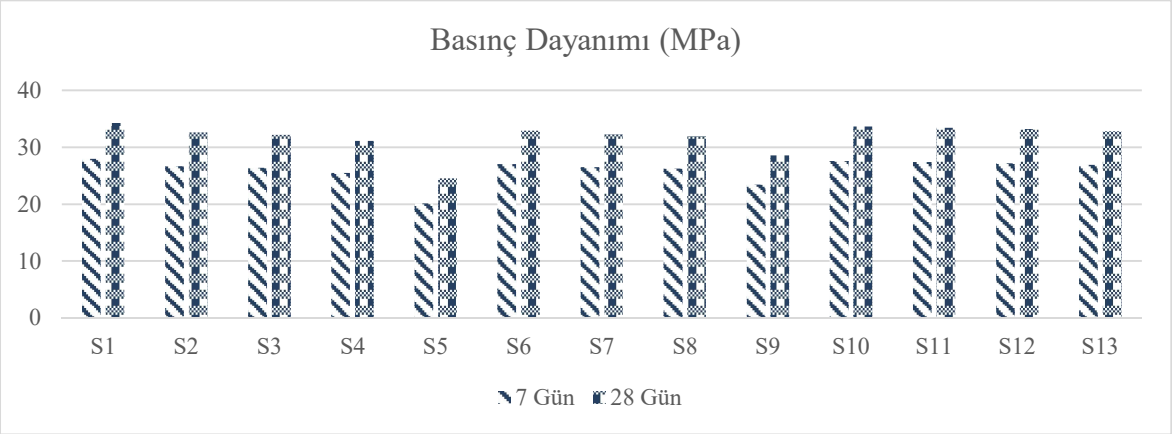
Bu çalışmada yapılan mini v hunisi ve mini çökme yayılma deneyleri neticesinde elde edilen sonuçların genel olarak literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, literatüre ilave olarak, 0-0,125 mm aralığındaki geri dönüşüm agregasının su emme oranının, 0-1 ve 0-2 mm aralığındaki geri dönüşüm agregalarının su emme oranından, 0-1 mm aralığındaki geri dönüşüm agregasının su emme oranının, 0-2 mm aralığındaki geri dönüşüm agregalarının su emme oranından fazla olmasından kaynaklı 0-0,125 mm ve 0-1 mm aralığındaki normal agregaların, aynı aralıktaki geri dönüşüm agregaları ile yer değiştirme oranı arttıkça harç serilerinin kıvamının azaldığı eklenebilir. 0-0,125 mm aralığındaki normal agreganın %100 oranda geri dönüşüm beton agregası ile yer değiştirmesi ile üretilen serinin, hiç geri dönüşüm beton agregası kullanılmadan (%100 normal agregalı karışım) üretilen seriden daha kıvamlı olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, 0-1 mm aralığındaki normal agreganın %100 oranda geri dönüşüm beton agregası ile yer değiştirmesi ile üretilen serinin, hiç geri dönüşüm beton agregası kullanılmadan (%100 normal agregalı karışım) üretilen seriden daha kıvamlı olduğu görülmüştür. 0-0,125 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen harç serisinin (S13) kıvam değerlerinin, 0-1 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S9) kıvam değerlerinden az olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme miktarlarına bakıldığında, S9 serisinin, S13 serisinden ağırlıkça daha fazla miktarda geri dönüşüm beton agregası içermesine bağlanabilir. Benzer şekilde, 0-1 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S9) kıvam değerlerinin, 0-2 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S5) kıvam değerlerinden az olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme

miktarlarına bakıldığında, S5 serisinin, S9 serisinden ağırlıkça daha fazla miktarda geri dönüşüm beton agregası içermesine bağlanabilir.

4.2. Sertleşmiş Harç Özellikleri

4.2.1. Basınç dayanımı özellikleri

Harç numuneleri için 7 gün ve 28 gün sonunda bulunan basınç dayanımları Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Harç karışımlarının basınç dayanım değerleri

Yapılan basınç dayanım deneyine göre, GDA miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. GDA'nın poroz yapısı ve su emme miktarının yüksek olması sebebiyle GDA miktarı artan karışımlarda basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Burada, ayrıca, agrega boyutunun artmasıyla beton basınç dayanımının arttığı görülmüştür.

7 günlük basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında, hiç GDA kullanılmadan üretilen karışımların (S1) basınç dayanım değerinin, 0-2 mm aralığında %100 GDA ikame edilerek üretilen karışımların (S5) basınç dayanım değerinin %80,73'üne tekabül ettiği görülmüştür. Karışımların basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Harç karışımlarının basınç dayanım değerleri

Harç No	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 Gün	28 Gün
S1	28	34,2
S2	26,7	32,6
S3	26,4	32,2
S4	25,5	31,1
S5	20,1	24,5
S6	27	32,9
S7	26,5	32,3
S8	26,2	32,0
S9	23,4	28,5
S10	27,6	33,7
S11	27,4	33,4
S12	27,2	33,2
S13	26,9	32,8

Basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında; geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların basınç dayanım değeri, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların basınç dayanım değerinden ekseriyetle daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, geri dönüşüm agregası ve normal agreganın boyutlarının artması, basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Geri dönüşüm agregasının basınç dayanımını düşürmesinin sebebi, agreganın zamanla aşınmış olmasına, boşluklu yapısına, üzerindeki çimento kalıntılarına, geri dönüşüm agregasının işlenebilirliğinin az olmasından kaynaklı üretilen harç numunelerinin daha poroz bir yapısının olmasına, daha az sıkıştırılabilir ve kıvamsız olmasına bağlanabilir.

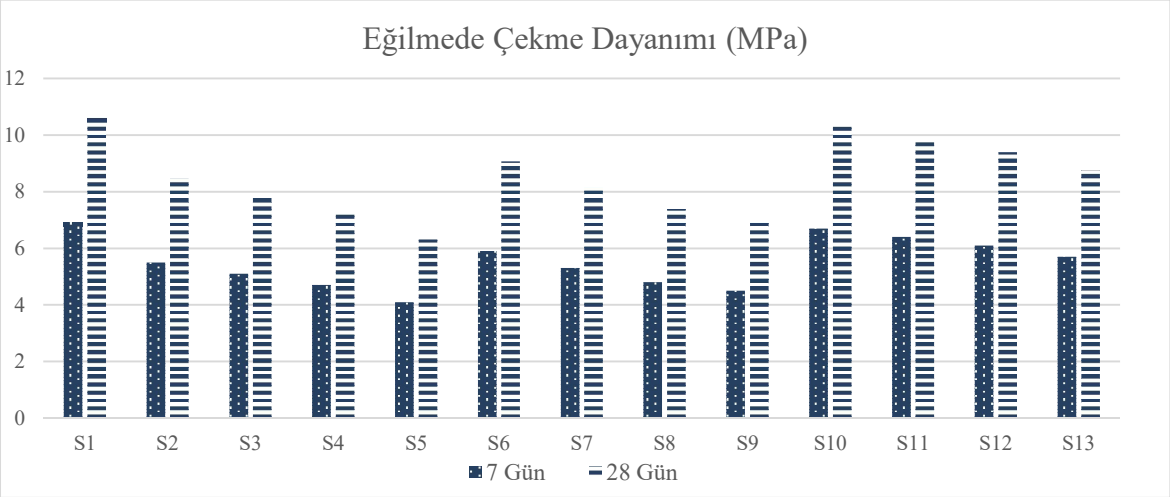
Sefidehkhan ve Şimşek (2018) tarafından yapılan çalışmada, GDA kullanılarak üretilen betonların kontrol betonuna kıyasla bütün yaşlarda basınç dayanımının daha az olduğu sonuna varıldığı belirtilmiştir [44]. Demirel ve diğerlerinin (2015) yaptığı çalışmada, iri GDA ile üretilen betınların 28 günlük basınç dayanımının GDA miktarının artmasıyla azaldığı, GDA iri, GDA ince ve GDA iri ve ince agregalı karışımların beton basınç dayanımı açısından bakıldığında en uygununun GDA iri agregalı beton karışımı olduğunun görüldüğü belirtilmiştir [45]. Döndüren ve Şişik (2016) tarafından yapılan çalışmada, GDA kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımının normal betonlara kıyasla daha düşük olduğunun görüldüğü belirtilmiştir [46]. Durmuş ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, GDA ile üretilecek betonun karışım hesabının bir üst sınıfa göre yapılması gerektiği belirtilmiştir [47]. Dilbaş ve diğerlerinin (2015) yaptığı çalışmada, doğal agrega ile GDA'nın yer

değiştirmesiyle betonun basınç dayanımında azalmalar olduğunun görüldüğü, numunelerin daha çok GDA'lı kısımlarında kırılmalar olduğunun görüldüğü belirtilmiştir [49].

Bu çalışmada yapılan basınç dayanım deneyleri neticesinde elde edilen sonuçların genel olarak literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, kendiliğinden yerleşen harç üretiminde polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı kullanımı ile su/çimento oranının düşük tutulmasından kaynaklı kendiliğinden yerleşen harç serilerinin 7 günlük beton basınç dayanımlarının 20,1 MPa ile 28 MPa aralığında olduğu tespit edilmiş olup, harç serilerinin geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilmiş olmasına rağmen basınç dayanım değerinin belirli bir sınıfta kaldığı görülmektedir.

4.2.2. Eğilmede çekme dayanımı özellikleri

Harç numuneleri için 7 gün ve 28 gün sonunda yapılan eğilmede çekme dayanımı deneyi sonucu bulunan değerler Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Harç karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri

Yapılan eğilmede çekme dayanım deneyine göre, GDA miktarının artmasıyla eğilmede çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. GDA'nın poroz yapısı ve su emme miktarının yüksek olması sebebiyle GDA miktarı artan karışımlarda basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

7 günlük sonuçlara bakıldığında; hiç GDA kullanılmadan üretilen karışımların eğilmede çekme dayanım değerinin, 0-2 mm aralığında %100 GDA ikame edilerek üretilen

karışımların eğilmede çekme dayanım değerinin %59,42'si olduğu görülmüştür. Karışımların eğilmede çekme dayanım değerleri Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Harç karışımlarının eğilmede çekme dayanım değerleri

Harç No	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	
	7 Gün	28 Gün
S1	5,9	7,38
S2	4,5	5,63
S3	4,1	5,13
S4	3,7	4,63
S5	3,1	3,88
S6	4,9	6,13
S7	4,3	5,38
S8	3,8	4,75
S9	3,5	4,38
S10	5,7	7,13
S11	5,4	6,75
S12	5,1	6,38
S13	4,7	5,88

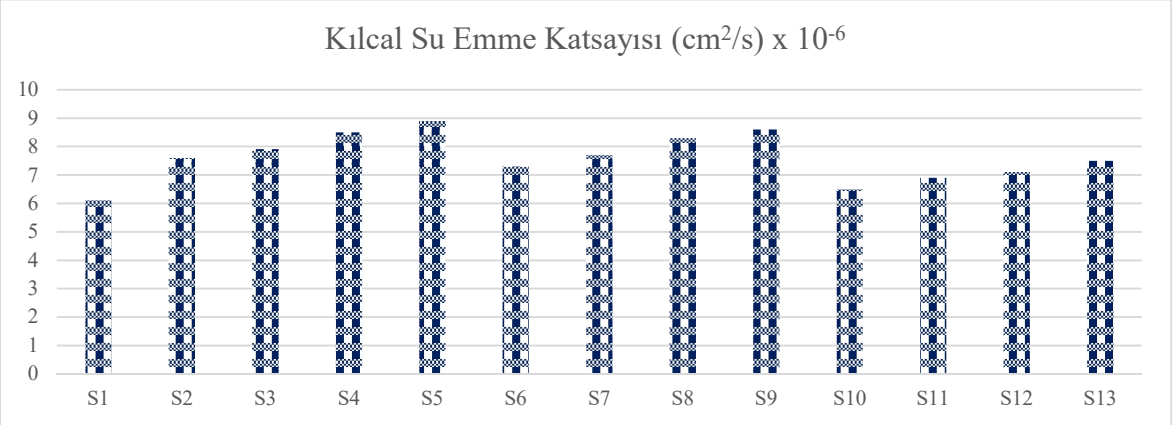
Eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında; geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların eğilmede çekme dayanım değeri, normal agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların eğilmede çekme dayanım değerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Karışımlardaki geri dönüşüm agregası ve normal agreganın boyutlarının artması, eğilmede çekme dayanımını olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır. Kendiliğinden yerleşen harç karışımlarındaki geri dönüşüm agregası oranının artmasının, eğilmede çekme dayanımını düşürmesi, agreganın zamanla aşınmış olmasına, boşluklu yapısına, üzerindeki çimento kalıntılarına, geri dönüşüm agregasının işlenebilirliğinin az olmasından kaynaklı üretilen harç numunelerinin daha poroz bir yapısının olmasına, daha az sıkıştırılabilir ve kıvamsız olmasına bağlanabilir.

Gümüşsoy (2019) tarafından yapılan çalışmada, GDA oranının artmasıyla eğilmede çekme dayanımının azaldığını görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca, daha önceki yapılan çalışmalarda GDA'nın yıkanarak kullanılması halinde eğilmede çekme dayanımının artabileceğine ilişkin bulguların olduğu belirtilmiştir [13].

Bu çalışmada yapılan eğilmede çekme dayanım deneyleri neticesinde elde edilen sonuçların genel olarak literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Eğilmede çekme dayanım değerleri için de basınç dayanım değerleri için yukarıda zikredilenlerin söylenmesi mümkündür.

4.2.3. Kılcal su emme özellikleri

Hazırlanan harç numunelerinin kılcal su emme oranlarına bakılmıştır. Her bir harç numunesinin kılcal su emme oranı değerleri aşağıdaki Şekil 4.5'te verilmektedir.



Şekil 4.5. Harç karışımlarının kılcallık katsayıları (cm^2/s) x 10^{-6}

Çalışma kapsamında üretilen karışımlar için yapılan deneylerin sonuçları yukarıdaki Çizelge 3.3'te verilmiş olup, karışımların kılcallık katsayıları değerlerinin 6,1 (cm^2/s)x10^{-6} ile 8,9 (cm^2/s)x10^{-6} mertebesinde olduğu görülmüştür. Burada, GDA'ların NA'lara göre kılcallık katsayısının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında, hazırlanan harç karışımlarının da kılcallık katsayısının yüksek olmasını beklemek tesadüf olmayacaktır. Nitekim kılcallık katsayısı tayini sonuçları incelendiğinde; numunelerdeki GDA miktarının artmasıyla numunelerin kılcallık katsayısının da benzer şekilde arttığı gözlemlenmiştir. %100 GDA ile üretilen numunelerin kılcal su emme katsayısının, %100 NA ile üretilen numunelerin kılcal su emme katsayısının %68,54'ü olduğu görülmüştür.

GDA miktarının artmasıyla kılcallık katsayısının artmasının GDA'nın yüzeyinde yer alan eski çimento parçalarının bulunması ve zamanla kullanıma bağlı olarak agreganın iç yapısındaki boşluklardan kaynaklı poroz bir yapısının olması şeklinde izah edilebilir. Numunelerdeki GDA miktarının artması, harç numunelerinin işlenebilme yeteneğini de azaltmıştır. Ayrıca, numunelerdeki kullanılan agrega boyutlarının artmasıyla kılcallık katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir. GDA miktarının artmasıyla azalan işlenebilme kabiliyetine bağlı olarak oluşan boşluklu yapı kılcallık katsayısını arttırmaktadır. Karışımların kılcallık katsayıları Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Harç karışımlarının kılcallık katsayıları (cm^2/s) x 10^{-6}

Harç No	Kılcal Su Emme Katsayısı (cm^2/s) x 10^{-6}
S1	6,1
S2	7,6
S3	7,9
S4	8,5
S5	8,9
S6	7,3
S7	7,7
S8	8,3
S9	8,6
S10	6,5
S11	6,9
S12	7,1
S13	7,5

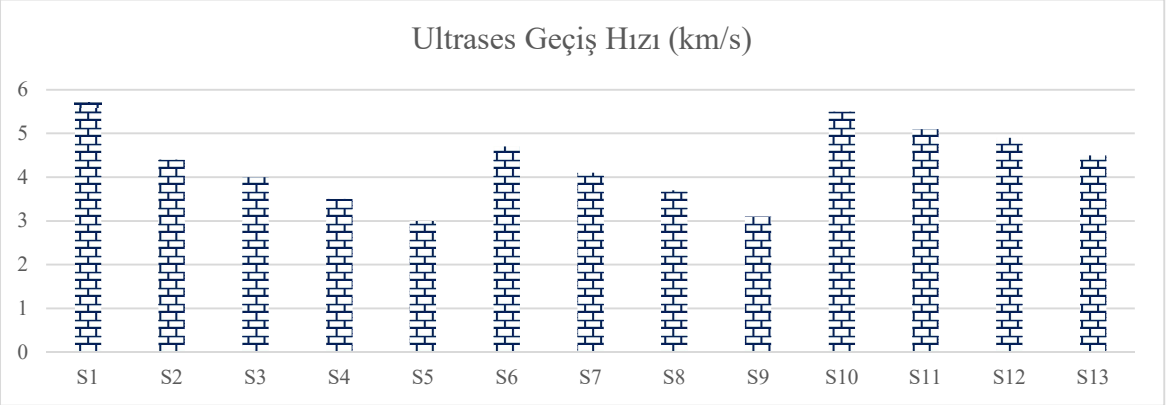
Kılcal su emme katsayısı tayini sonuçlarına bakıldığında; kendiliğinden yerleşen harç numunelerinde kullanılan geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla kılcal su emme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Geri dönüşüm agregasının boşluklu yapısının olması ve ayrıca, geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının işlenebilirliğinin az ve kıvamının yoğun olması sebebiyle harç matrisinin boşluklu olması sebebiyle, kılcal geçirgenliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Burada, agrega boyutunun artması, daha boşluklu bir kendiliğinden yerleşen harç matrisi oluşturduğundan kılcal geçirgenliğin fazla olduğu sonucuna varılabilir.

Pereira-de-Oliveira ve diğerlerinin (2013) yaptığı çalışmada, GDA'ların yüksek su emme özelliğinden kaynaklı süper akışkanlaştırıcı miktarının yüksek oranda kullanılabileceği belirtilmiştir [53]. Amjadi ve diğerlerinin (2016) yaptığı çalışmada, atık malzemenin artmasıyla su emmenin arttığı belirtilmiştir [42]. Tüfekçi (2011) tarafından yapılan çalışmada, GDA miktarının artmasıyla su emme oranının arttığı belirtilmiştir [11]. Batman (2018) tarafından yapılan çalışmada, GDA'ların su emme miktarlarının fazla olması sebebiyle geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen beton karışımlarının su/çimento oranının 0,5 veya daha fazla olması gerektiği belirtilmiştir [50].

Bu çalışmada yapılan kılcal su emme katsayısı tayini deneyi neticesinde elde edilen sonuçların genel olarak literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Geri dönüşüm beton agregası miktarının artmasıyla kılcal su emme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. 0-0,125 mm aralığındaki normal agreganın %100 oranda geri dönüşüm beton agregası ile yer değiştirmesi ile üretilen serinin kılcal su emme katsayısı değerinin, hiç geri dönüşüm beton agregası kullanılmadan (%100 normal agregalı karışım) üretilen serinin kılcal su emme katsayısı değerinden fazla olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, 0-1 mm aralığındaki normal agreganın %100 oranda geri dönüşüm beton agregası ile yer değiştirmesi ile üretilen serinin kılcal su emme katsayısı değerinin, hiç geri dönüşüm beton agregası kullanılmadan (%100 normal agregalı karışım) üretilen serinin kılcal su emme katsayısı değerinden fazla olduğu görülmüştür. 0-0,125 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen harç serisinin (S13) kılcal su emme katsayısı değerinin, 0-1 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S9) kılcal su emme katsayısı değerinden az olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme miktarlarına bakıldığında, S9 serisinin, S13 serisinden ağırlıkça daha fazla miktarda geri dönüşüm beton agregası içermesine bağlanabilir. Benzer şekilde, 0-1 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S9) kılcal su emme katsayısı değerinin, 0-2 mm aralığında %100 geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen haç serisinin (S5) kılcal su emme katsayısı değerinden az olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme miktarlarına bakıldığında, S5 serisinin, S9 serisinden ağırlıkça daha fazla miktarda geri dönüşüm beton agregası içermesine bağlanabilir.

4.2.4. Ultrasonik ses özellikleri

Her bir harç serisinde yapılan ultrasonik ses hızı deneyi sonuçları aşağıdaki Şekil 4.6.'da verilmektedir.



Şekil 4.6. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri (km/s)

Çalışmada kullanılan GDA'ların poroz yapısı sebebiyle, harç numunelerinde GDA miktarının artmasıyla ses hızının azalacağı beklenmektedir. Nitekim yapılan çalışmada, GDA miktarı fazla olan harç numunelerinin ultrases geçiş hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, agrega boyutları arttığında, harç numunelerinin boşluk oranı da arttığından, ultrases geçiş hızının azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.5. Harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri (km/s)

Harç Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
S1	5,7
S2	4,4
S3	4
S4	3,5
S5	3
S6	4,7
S7	4,1
S8	3,7
S9	3,1
S10	5,5
S11	5,1
S12	4,9
S13	4,5

Ultrasonik ses hızı deneyi sonuçlarına bakıldığında; geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla, ses hızının düştüğü görülmüştür. Burada, sesin boşlukta yayılmadığı bilimsel gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, geri dönüşüm agregası miktarının artmasının kendiliğinden yerleşen harç matriksinde boşluklu bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Ultrasonik ses dalgaları ile kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin dayanımı hakkında da fikir edinebiliriz. Agrega boyutunun artmasının kendiliğinden yerleşen harç matrisinin dayanımını olumlu yönde etkilediği sonucuna varılabilir.

Gümüşsoy (2019) tarafından yapılan çalışmada, harç numunelerinde GDA miktarının artmasıyla ultrases geçiş hızında azalmalar olduğu, içeriğinde hiç GDA bulunmayan harç numuneleri ile içeriğinde %100 oranında GDA bulunan harç numunelerinin ultrases geçiş hızı arasında çok fazla bir fark olmadığı, GDA kullanımının bu bağlamda iyi bir alternatif olacağı belirtilmiştir [13].

Bu çalışma kapsamında yapılan ultrases geçiş hızı değerlerine bakıldığında, genel olarak literatürle benzer sonuçların bulunduğu anlaşılmaktadır. 0-0,125 mm aralığında %100 geri dönüşüm beton agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin (S13) ultrases geçiş hızı değerinin, hiç geri dönüşüm agregası içermeyen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin (S1) ultrases geçiş hızı değerinden daha az olduğu görülmektedir. 0-0,125 mm aralığında, %25 oranda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serisinin (S10) ultrases geçiş hızı değerinin, 0-1 mm aralığında %25 oranda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serisinin (S6) ultrases geçiş hızı değerinden fazla olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme miktarlarına bakıldığında, S10 serisinin, S6 serisinden daha az miktarda geri dönüşüm agregası içermesine bağlanabilir. Benzer şeyler, S2 ve S7, S3 ve S8, S4 ve S9 serileri için de söylenebilir.

4.2.5. Birim hacim ağırlık ve su emme oranı tayini

Üretilen karışımların birim hacim ağırlıkları ve su emme oranları belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık tayini yapılırken, numunelerin gerçek boyutları dikkate alınmıştır. 5x5x5 cm^3 boyutlarında küp numunelerin birim hacim ağırlık ve su emme değerleri aşağıdaki Çizelge 4.6'da verilmektedir.

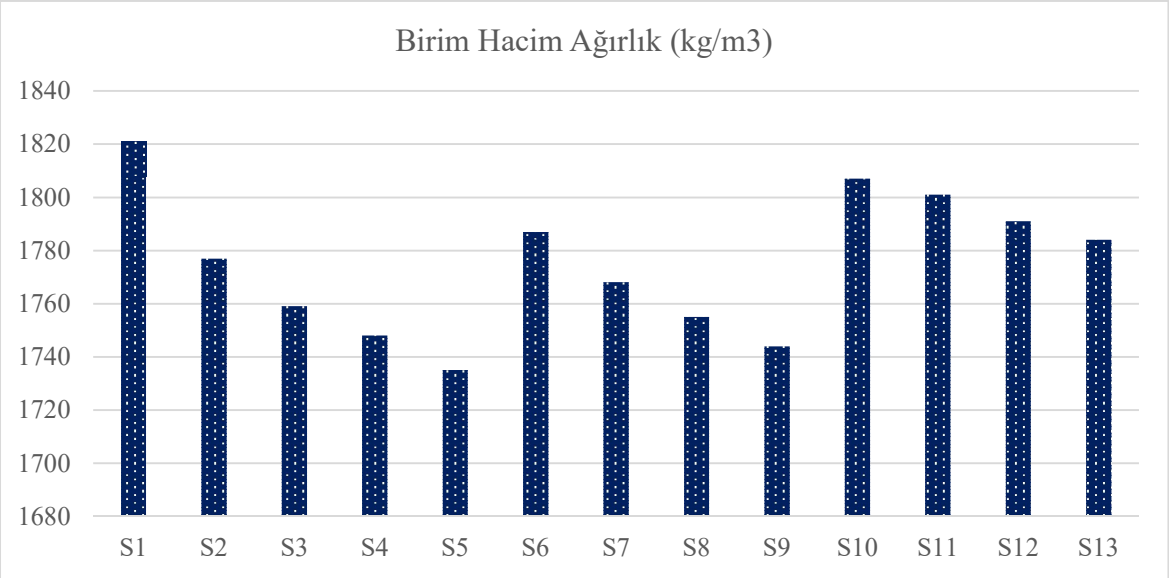
Çizelge 4.6. Harç karışımlarının birim hacim ağırlık ve su emme değerleri

Harç Kodu	Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Su Emme Oranı (%)
S1	1821	3
S2	1777	4,1
S3	1759	4,7
S4	1748	5,2
S5	1735	5,9
S6	1787	3,8
S7	1768	4,4
S8	1755	4,8
S9	1744	5,6
S10	1807	3,2
S11	1801	3,3
S12	1791	3,5
S13	1784	3,9

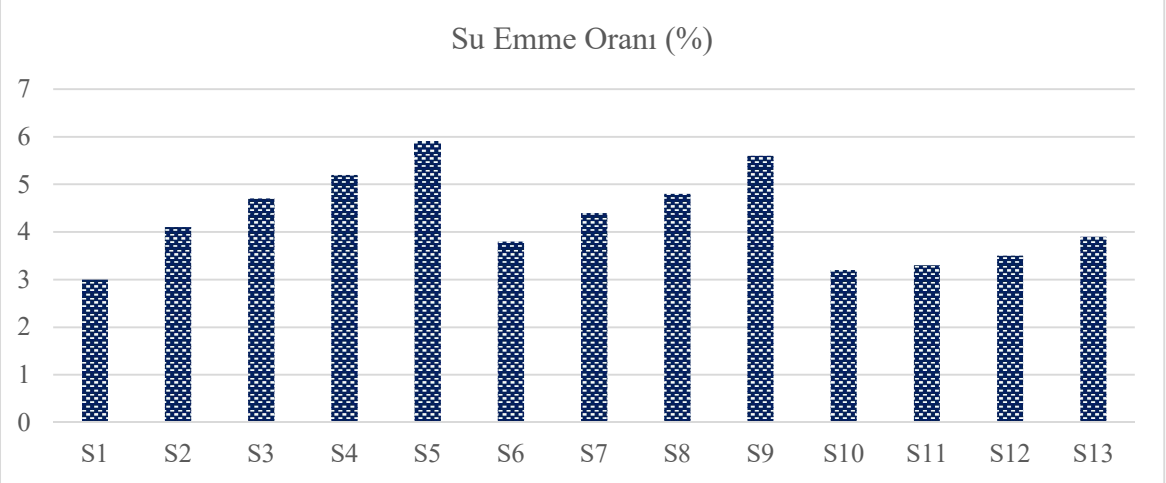
Üretilen farklı seriler için yapılan deneyler sonucunda, GDA oranının artması, birim hacim ağırlığını azalttığı görülmektedir.

Su emme oranlarına bakıldığında, GDA miktarının artmasıyla su emme oranının da arttığı görülmüştür.

GDA miktarının artmasıyla birim hacim ağırlığının azalmasının nedenini GDA'nın birim hacim ağırlığının, NA'ya kıyasla daha az olmasına bağlayabiliriz. Ayrıca, buna NA ile üretilen harç numunelerinin daha işlenebilir olmasından kaynaklı GDA ile üretilen numunelere kıyasla daha az boşluklu yapıya sahip olmasının da sebep olduğu söylenebilir. Karışımların birim hacim ağırlık değerleri Şekil 4.7'de, su emme oranı değerleri Şekil 4.8'de verilmektedir.



Şekil 4.7. Harç karışımlarının birim hacim ağırlık değerleri (kg/m^3)



Şekil 4.8. Harç karışımlarının su emme oranı (%)

Yoğunluk ve su emme oranı tayini sonuçlarına bakıldığında, kendiliğinden yerleşen harç numunelerindeki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla yoğunluğun azaldığı, su emme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen harç numunelerinde kullanılan geri dönüşüm agregalarının birim hacim ağırlığının, normal agreganın birim hacim ağırlığından az olması, kullanılan geri dönüşüm agregası oranının artmasıyla yoğunluğun azalmasını açıklayabilir. Ayrıca, geri dönüşüm agregasının daha poroz yapıda olması ve eski kullanımdan kaynaklı agrega taneleri üzerinde kalan çimento parçacıkları su emme oranını yükseltmektedir. Geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçlarda, su ihtiyacının fazla olması da buna bağlanabilir. Kendiliğinden yerleşen harç üretiminde hiper akışkanlaştırıcının özelliği bu aşamada büyük önem arz etmektedir.

Gümüşsoy (2019) tarafından yapılan çalışmada, GDA miktarının artmasıyla birim hacim ağırlığın azaldığının görüldüğü belirtilmiştir. GDA miktarının artmasıyla birim hacim ağırlığın azalmasını, GDA'nın NA'ya göre daha hafif olmasına bağlanabileceği ifade edilmiştir [13].

Bu çalışma kapsamında yapılan birim hacim ağırlık ve su emme oranı tayini deneylerine ilişkin sonuçların literatürle benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, 0-0,125 mm aralığında %100 geri dönüşüm beton agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin (S13) birim hacim ağırlık değerinin, hiç geri dönüşüm agregası içermeyen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin (S1) birim hacim ağırlık değerinden daha az, su emme oranının daha fazla olduğu görülmektedir. 0-0,125 mm aralığında, %25 oranda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serisinin (S10) birim hacim ağırlık değerinin, 0-1 mm aralığında %25 oranda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harç serisinin (S6) birim hacim ağırlık değerinden fazla, su emme oranı değerinin az olması, Çizelge 3.6.'da yer alan malzeme miktarlarına bakıldığında, S10 serisinin, S6 serisinden daha az miktarda geri dönüşüm agregası içermesine bağlanabilir. Benzer şeyler, S2 ve S7, S3 ve S8, S4 ve S9 serileri için de söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yaptığımız çalışmada; geri dönüşüm agregalarının kendiliğinden yerleşen harçların taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Harç numuneleri üretilirken su/çimento oranı sabit tutulmuş, geri dönüşüm agregası 0-0,125 mm, 0,125-1 mm ve 0-2 mm aralığında gruplara ayrılmış ve her bir serideki geri dönüşüm agregası %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında normal agregayla yer değiştirilmiştir.

Kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının taze haldeki özellikleri için EFNARC [60] sınırlarının sağlanabilmesi için hiper akışkanlaştırıcı miktarı her bir seri için değiştirilmiştir. EFNARC [60] sınırları sağlanana dek tekrar tekrar karışım yapılmış, çok sayıda yapılan deneme yanılma sonunda bulunan karışım oranlarına göre kendiliğinden yerleşen harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan kendiliğinden yerleşen harç karışımları 4x4x16 cm ve 5x5x5 cm boyutlarında kalıplara yerleştirilmiştir. Sertleşen kendiliğinden yerleşen harç karışımları bir dizi deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler ışığında, üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının kıyaslanması neticesinde edinilen bilgiler ve bu bilgilerin yorumlanması aşağıda listelenmiştir.

- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarı arttıkça karışımların akışkanlığının azaldığı görülmüştür.
- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla basınç dayanım değerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca, puzolonik katkıların kullanımı ile geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların dayanım özelliklerini iyileştirilebilir. Bu kapsamda ilave çalışmalar yapılması suretiyle literatüre katkıda bulunulabilir.
- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla eğilmede çekme dayanım değerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca, puzolonik katkıların kullanımı ile geri dönüşüm agregası ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların eğilmede çekme dayanım özelliklerini iyileştirilebilir. Bu kapsamda ilave çalışmalar yapılması suretiyle literatüre katkıda bulunulabileceği değerlendirilmektedir.
- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla kılcal su emme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı oranda kullanılması şartıyla, agrega boyutunun artmasının kılcal geçirgenliği arttırdığı görülmüştür. Puzolanik madde kullanımı ile durabilitesi

yüksek kendiliğinden yerleşen harç üretiminin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla, ses hızının düştüğü görülmüştür. Burada, aynı oranda kullanılması şartıyla kendiliğinden yerleşen harç numunelerindeki agrega boyutunun artmasıyla ultrasonik ses hızının arttığı görülmüştür. Agrega boyutunun artmasının kendiliğinden yerleşen harçla üretilen numunelerin basınç dayanım değerini arttırdığı görülmüştür.
- Karışımlardaki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla birim hacim ağırlığın azaldığı, su emme oranının arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada yapılan bütün deneyler sonucunda el edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında üretilen tüm kendiliğinden yerleşen harç serileri için yapılan taze ve sertleşmiş özellik belirleme deneyleri sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.1.'de tablo haline getirilmiştir.

Çizelge 5.1. GDA oranının artmasının bazı özelliklere etkisi

Özellik	Deney Adı	NA'ya Göre GDA İkame Oranının Artmasıyla
Taze	Mini Çökme Yayılma Deneyi	Yayılma çapı azalmıştır.
	Mini V Hunisi Deneyi	Harcın huniden geçiş süresi uzamıştır.
Sertleşmiş	Basınç Dayanımı	Basınç dayanımı azalmıştır.
	Eğilmede Çekme Dayanımı	Eğilmede çekme dayanımı azalmıştır.
	Kılcal Geçirgenlik (Kapilarite)	Kılcal geçirgenlik artmıştır.
	Ultrasonik Ses Hızı	Ultrasonik ses hızı azalmıştır.
	Yoğunluk ve Su Emme Oranı	Yoğunluk azalmış, su emme oranı artmıştır.

5.2. Öneriler

İnşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan betonun yaklaşık %70-80'ini oluşturan agregaların elde edilebilmesi için doğaya ve ekolojik faktörlere zararlar verilebilmektedir. Diğer taraftan, özellikle büyük kentlerde nüfus artışlarına bağlı olarak çarpık, depreme dayanıksız ve sağlıksız yapılaşma gelişmektedir. Ülkemiz yüzölçümünün büyük bir bölümünün aktif deprem fay hatları üzerinde yer alması göz önünde bulundurulduğunda, depreme dayanıksız ve sağlıksız yapıların bertaraf edilerek, yerine depreme dayanıklı, sağlıklı yapıların yapılması ihtiyacı duyulmuştur. Gerek yapıların münferiden yıktırılması gerekse de kentsel dönüşüm kapsamında yıktırılması neticesinde ortaya çıkan inşaat yıkıntı atıklarının taşınması ve depolanması hem ekonomik hem de yarattığı çevre kirliliği açısından önümüzde büyük bir sorun olarak durmaktadır.

Diğer taraftan, bilindiği üzere, her geçen gün gelişen inşaat teknolojisinin sunmuş olduğu ürünlerden birisi de kendiliğinden yerleşen betondur. Kendiliğinden yerleşen beton, ilave vibrasyon gerektirmeden, kendi ağırlığı altında kalıbı doldurabilme yeteneği sayesinde enerji ve zamandan kazanç, ilave işçilik gerektirmediğinden, iş kazalarının da bir nebze önüne geçilmesine olanak sağlamaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton matrisinde bulunan kaba agregaların, kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gerçeğiyle, kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik ve kıvam özellikleri hakkında net fikirler edinebilmek için bu çalışmada kendiliğinden yerleşen harçların özelliklerinin geri dönüşüm agregası katıldığında nasıl değiştiği araştırılmıştır.

İnşaat yıkıntı atıklarından seçilen herhangi bir yöntem ile elde edilen geri dönüşüm agregalarının kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanılmasıyla, hem agrega kaynaklarının tahribatının azaltılması hem de kendiliğinden yerleşen harçların özelliklerinin sağlamış olduğu enerji ve zamandan ekonomi gibi avantajların kullanılması mümkün olabilecektir.

Çalışmamız kapsamında yapılan bir dizi deney neticesinde, geri dönüşüm beton ince agregalarının kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Üretilen kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının yapılan deneyler neticesinde kıyaslanması ile edinilen bilgiler ışığında önerilerimiz aşağıda listelenmektedir.

- Geri dönüşüm beton agregasının doğal agregalara göre su emme oranının yüksek olması sebebiyle kendiliğinden yerleşen harç serilerindeki geri dönüşüm agregası miktarının artmasıyla kıvamın azaldığı görülmüştür. Bu bağlamda, geri dönüşüm agregasının dış yüzeyinde bulunan çimento, harç kalıntılarının çok iyi bir şekilde sıyrılması sağlanarak geri dönüşüm beton agregalarının su emme oranı azaltılabilir.

- Ülkemizde yapılacak mevzuat düzenlemeleri ile inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregalarının kullanımı teşvik edilebilir. Bu bağlamda, geri dönüşüm beton agregalarının yeni inşaat imalatlarında kullanımı neticesinde bazı harçlardan muafiyet ve finansal destek gibi yardımların yapılması, geri dönüşüm beton agregalarının kullanımını yaygınlaştırılabilir.

- Geri dönüşüm beton agregaları ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların taşıyıcı olmayan yapı elemanların tamirinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle, yapıların güçlendirilmesi, tamiri ve onarımında dar alanlarda yapılan çalışmaların, kendiliğinden yerleşen harçların kullanımı ile daha kolay bir şekilde yapılabileceği değerlendirilmektedir.

- Geri dönüşüm beton agregaları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçlarda puzolonik maddelerin kullanımı ile dayanım ve dayanıklılık değerleri iyileştirilebilir. Bu bağlamda, ilave çalışmalar yapılarak literatüre katkıda bulunulabilir.

- Geri dönüşüm agregalarının kullanımı ile doğal agrega kaynaklarına verilen tahribat azaltılabilir.

- Geri dönüşüm agregalarının kullanımı ile inşaat yıkıntı atıklarının taşınması, depolanması gibi maliyetlerden kaçınılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yasemin, M.T. (2015). *Hardened properties of self-compacting concretes prepared with recycled aggregates,* Doktora Tezi, University of Gaziantep, Graduate School of Nature & Applied Sciences, Gaziantep.

2. Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*, Jeju, Korea, 31(8), 601-605.

3. Süme, E. (2016). *Geri dönüşüm agregasının beton yol kaplamasında kullanılabilirliği,* Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

4. Birinci, F. (2013). *Türkiye'nin depremselliği ve yapı stoğu yönünden mevzuat ve mali politikaların kentsel dönüşümü zorlaştıran unsurları.* 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay.

5. Türkiye İstatistik Kurumu. (2012). *Ekonomik göstergeler*. *TÜİK.* Ankara.

6. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. (2007). *Afet bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik.* Ankara.

7. Bahşi E. (2017). *Riskli yapıların tespit edilmesine ilişkin esaslar ile birinci ve ikinci aşama değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

8. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2012). *Afet riski altındaki alanların dönüştürülmesi hakkında kanun.* Ankara.

9. Sheen, Y. N., Wang, H. Y., Juang, Y. P., & Le, D. H. (2013). Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials,* 45, 298-305.

10. Poon, C.S. (2007). Management of construction and demolition waste. *Waste Management* 27(2), 159-160.

11. Tüfekçi M.M. (2011). *Geri kazanılmış agregaların beton üretiminde yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

12. Aruntaş, H. Y., Şahinöz, M., & Mustafa, D. A. Y. İ. (2021). Çimento Hamur ve Harçlarında Kireç Kullanımının İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.

13. Gümüşsoy M. (2019), *Geri Dönüştürülmüş Agregaların Harç Özelliklerine Etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.

14. Erdoğan, T. Y. (2013). *Beton.* Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık (Akademik Kitaplar).

15. Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S. (2012). *Beton.* İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.

16. TS EN 197-1 Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*

17. TS EN 196-6 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini. *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü*.

18. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology*. Longman Scientific & Technical. England, (pp. 242-246).

19. İstabulluoğlu, S. (1988). Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Fektörler ve Ramble Betonun Seçimi ile İlgili Bir Çalışma. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 27(3), 19-31.

20. Topçu, İ. B., Canbaz, M., & Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı. *Politeknik Dergisi,* 9(1), 59-63.

21. Pourdghadri Sefidehkhan, P. (2017). *Geri dönüşüm agrega ile üretilmiş betonun mühendislik özelliklerinin incelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

22. Erdoğan, S. T. & Erdoğan, T. Y. (2007). *Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri.* 2. yapılarda kimyasal katkılar sempozyumu, Ankara.

23. Ma, R. (2008). *A counter example to the hodge conjecture,* Yüksek Lisans Tezi, Tsinghua Üniversitesi Matematik Bilimleri Enstitüsü, Pekin.

24. Topçu, İ. B., & Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 14(2), 11-23.

25. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. (2005). *Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları.* Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 19, 419-423.

26. Tokyay, M. (2013). *Betonda uk, gyfc ve sd'nin rolü: mevcut bilgi birikimi.* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, Ankara, 201-238.

27. İnternet: Sıfır atık. (2022). web: https://www.sifiratik.gov.tr/ Erişim Tarihi: 02/06/2022.

28. İnternet: Çevre online. (2022). web: https://cevreonline.com/ Erişim Tarihi: 02/06/2022.

29. Ölmez, E., & Yıldız, Ş. (2008). *İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli.* Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, İstanbul, 02-06.

30. İnternet: T.C. Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü. İnşaat ve yıkıntı atıklarından ilk endüstriyel uygulama ile yeşil tuğla ve yeşil çimento üretilmesi. (2014). web: https://altyapi.csb.gov.tr/insaat-ve-yikinti-atiklarindan-ilk-endustriyel-uygulama-tamamlanarak-yesil-tugla-ve-yesil-cimento-uretildi-.-haber-13871 Erişim Tarihi: 02/06/2022.

31. DIN 4226-100, *Aggregates for concrete and mortar - part 100: recycled aggregates.* German Institute for Standardisation.

32. Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, 24(7), 23-28.

33. Demirel, C., Şimşek, O. (2014). C30 sınıfı atık betonun geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği. *S.Ü. Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi,* 2(2), 45-54.

34. Collins, R. J. (1996). *Increasing the use of recycled aggregates in construction.* In International Conference on Concrete In The Service of Mankind*,* Scotland*,* (pp. 73-80).

35. Agrela, F., De Juan, M. S., Ayuso, J., Geraldes, V. L., & Jiménez, J. R. (2011). Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3950-3955.

36. Pacheco-Torgal, F., & Ding, Y. (Eds.). (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste.* (47). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

37. EHE-08. (2016). *Code on Structural Concrete.* Ministerio de Fomento Gobierno de Espana.

38. Gonçalves, P., & Brito, J. D. (2010). Recycled aggregate concrete (RAC)–comparative analysis of existing specifications. *Magazine of Concrete Research,* 62(5), 339-346.

39. Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225.

40. Öztürk, M. (2005). İnşaat Yıkıntı Atıkları Yönetimi. Çevre ve orman bakanlığı, Ankara.

41. TS EN 1097-6. (2022). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü*.

42. Amjadi, R., Monazami, M., Mohseni, E., Azar Balgouri, H., & Ranjbar, M. M. (2016). Effectiveness of different recycled materials in self-compacting mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering,* 21(12), 1485-1501.

43. Kadiroğlu, İ., Öz, E., Tezcan O., & Kuru, E. B. *Geri Dönüşümlü Agreganın Beton Üretiminde Kullanılabilirliği*. Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 86-94.

44. Sefidehkhan P.H., Şimşek O. Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi,* 21(1), 83-91.

45. Demirel, Ö. G. C., Toklu, A. G. K., Şimşek, O., Okulu, P. M. Y. *Geri dönüşüm agregasının beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi.* 2nd International Sustainable Buildings Symposium, Ankara.

46. Döndüren, M. S., & Şişik, Ö. (2016). Geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen betonların özellikleri. *Selçuk-Teknik Dergisi,* 15(2), 125-137.

47. Durmuş, G., Can, Ö., Şimşek, O. (2009) *Geri dönüşüm agregalardan üretilen farklı sınıflardaki betonun mühendislik özelliklerinin belirlenmesi.* 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.

48. İpekçi, C. A., Coşgun, N., Karadayı, T. T. (2017). İnşaat sektöründe geri kazanılmış malzeme kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(2), 43-50.

49. Dilbas, H., Çakır, Ö., & Şimşek, M. (2015). *Kentsel dönüşüm sonucu oluşan molozların geri dönüşümle betonda kullanımı–silis dumanı katkılı geri kazanılmış agregalı betonlar.* Ulusal Beton Kongresi, Antalya, 387-98.

50. Batman M. (2018). *Beton deney numune atıklarının geri dönüşüm agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

51. Singh, A., Duan, Z., Xiao, J., & Liu, Q. (2020). Incorporating recycled aggregates in self-compacting concrete: a review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(3), 165-189.

52. Jagadesh, P., Juan-Valdés, A., Guerra-Romero, M. I., Morán-del Pozo, J. M., García-González, J., & Martínez-García, R. (2021). Effect of Design Parameters on Compressive and Split Tensile Strength of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate: An Overview. *Applied Sciences*, 11(13), 6028.

53. Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P., & Vila, M. D. F. C. (2014). Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 51, 113-120.

54. Sainz-Aja, J., Carrascal, I., Polanco, J. A., Thomas, C., Sosa, I., Casado, J., & Diego, S. (2019). Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes. *Journal of Cleaner Production*, 230, 945-955.

55. Santos, S. A., Da Silva, P. R., & De Brito, J. (2017). Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry. *Materials*, 10(8), 904.

56. Garcia-Troncoso, N., Li, L., Cheng, Q., Mo, K. H., & Ling, T. C. (2021). Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, 00678.

57. Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology,* 1(1), 5-15.

58. Balun, B. (2013). *Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen harçların mekanik ve durabilite özellikleri.* Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

59. Gönen, T. (2009). *Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun mekaniksel ve durabilite özelliklerinin araştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

60. EFNARC. (2005) . *European guidelines for self-compacting concrete, specification and production and use.*

61. Uygunoğlu, T. (2008). *Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özelikleri*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

62. Altan İ. (2014), *Some engineering properties of self-compacting leightweight mortars,* Yüksek Lisans Tezi, University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep.

63. Öz, H. Ö. (2017). Atık cam tozu ve yüksek fırın cürufunun içeren kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 20(4), 9-22.

64. Türedi, G., Keskin, Ö. K., & Keskin, S. B. (2020). Self-compacting mortar production by using calcium aluminate cement. *Mugla Journal of Science and Technology*, 6(2), 18-27.

65. Tuaum, A., Shitote, S., & Oyawa, W. (2018). Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. *Buildings*, 8(2), 15.

66. Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1167-1173.

67. Belaidi, A. S. E., Azzouz, L., Kadri, E., & Kenai, S. (2012). Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, 251-257.

68. Safi, B., Saidi, M., Daoui, A., Bellal, A., Mechekak, A., & Toumi, K. (2015). The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM). *Construction and Building Materials*, 78, 430-438.

69. Khotbehsara, M. M., Mohseni, E., Yazdi, M. A., Sarker, P., & Ranjbar, M. M. (2015). Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 94, 758-766.

70. TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*

71. TS EN 12390-3 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*

72. TS EN 12390-5 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*

73. TS EN 12504-4. (2021). Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*

74. TS EN 12390-7. (2019). Beton - sertleşmiş beton deneyleri - bölüm 7: sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, *Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.*



GAZİ GELECEKTİR..