



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI HARÇLARINDA GENLEŞTİRİLMİŞ CAM AGREGASI
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

BURAK AKTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA DAYI**

DÜZCE, 2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

01 Ağustos 2019

Burak AKTÜRK

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek, özveri ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI'ya, Doç. Dr. Rıfat AKBIYIKLI hocama ve Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ hocama en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

01 Ağustos 2019

Burak AKTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. AGREGA.....	3
2.1.1. Doğal ve Yapay Agregas	4
2.2. HAFİF AGREGALAR	4
2.2.1. Hafif Agreganın Oluşumu	4
2.2.2. Hafif Agregaların Tarihçesi	5
2.2.3. Hafif Agregaların Avantajları	5
2.2.4. Hafif Agregaların Çeşitleri.....	6
2.2.5. Hafif Agregaların Beton Ve Harçtaki Yeri.....	7
2.2.6. Hafif Agregaların Diğer Kullanım Alanları	8
2.2.7. Bazı Hafif Agregalar ve Elde Ediliş Yöntemleri	8
2.2.8. Hafif Agregalar İle Yapılan Önceki Bilimsel Çalışmalar.....	10
2.3. HARÇ.....	14
2.3.1. Tarihçe	15
2.3.2. Harç Çeşitleri.....	15
2.3.3. Harcın Kullanım Alanları	17
2.3.4. Harçlardan Beklenen Özellikler.....	17
2.3.5. Harcın İşlevi Ve Karışım Oranları.....	17
3. MALZEME VE YÖNTEM	19
3.1. MALZEME	19
3.1.1. Genleştirilmiş Cam Küre.....	19
3.1.2. Doğal Agregas	21
3.1.3. Çimento ve Kireç.....	22
3.1.4. Karma Suyu.....	23
3.2. YÖNTEM	24
3.2.1. Harç Karışım Oranlarının Belirlenmesi	24
3.2.1.1. Agregas ve GCK'nın Birim Hacim Ağırlıklarının Hesaplanması	24

3.2.1.2. Kullanılacak Kum ve GCK Miktarının Hesaplanması	25
3.2.2. Deney Ön Hazırlıkları ve Deney Programı.....	27
3.2.3. Taze Harç Deneyleri	28
3.2.4. Sertleşmiş Harç Deneyleri	29
3.2.4.1. Birim Hacim Ağırlık (Görünür Yoğunluk)	30
3.2.4.2. Birim Ağırlık	30
3.2.4.3. Özgül Ağırlık (Gerçek Yoğunluk).....	31
3.2.4.4. Porozite Deneyi.....	32
3.2.4.5. Kütlece ve Hacimce Su Emme, Deneyleri	32
3.2.4.6. Kılcal Yolla Su Emme (Kapilarite) Tayini	33
3.2.4.7. Su Buharı Geçirgenlik Direnç Faktörü Tayini.....	34
3.2.4.8. Isı İletkenlik Katsayısı Tayini.....	37
3.2.4.9. Ultrases Hızı Tayini	38
3.2.4.10. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER.....	43
4.1.1. Birim Hacim Ağırlık	43
4.1.2. Birim Ağırlık.....	44
4.1.3. Özgül Ağırlık	45
4.1.4. Porozite.....	45
4.1.5. Kütlece ve Hacimce Su Emme	46
4.1.6. Kılcal Yolla Su Emme (Kapilarite).....	47
4.1.7. Su Buharı Geçirgenlik Direnç Faktörü.....	48
4.1.8. Isı İletkenlik Katsayısı	49
4.1.9. Ultrasonik Hız Ölçümü.....	50
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	50
4.2.1. Eğilmede Çekme Dayanımı	51
4.2.2. Basınç Dayanımı.....	52
4.2.3. Elastisite Modülü.....	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
5.1. SONUÇLAR.....	55
5.2. ÖNERİLER.....	57
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Harç üretimde kullanılan geliştirilmiş cam küre agregası..	20
Şekil 3.2. Geliştirilmiş cam kürenin üretim aşamaları..	20
Şekil 3.3. Doğal kum gradasyonuna ait görsel..	21
Şekil 3.4. Doğal kuma ait granülometri eğrisi..	22
Şekil 3.5. Harç serilerinin hazırlanması ve kullanılan harç mikseri..	27
Şekil 3.6. Yayılma tablası deney aleti..	28
Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan üçlü prizmatik harç kalıbı..	29
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan a) Şok masası. b) Kalıpta bekletilen numuneler..	29
Şekil 3.9. a) Kürde bekletilen numuneler b) Etüvde kurutulan harç numuneleri..	29
Şekil 3.10. a) Harç numunesi b) Suda bekletilen numuneler c) Arşimet terazisi..	30
Şekil 3.11. a) Toz numunenin öğütülmesi. b) La Chatelier balonu..	32
Şekil 3.12. Parafin kaplanarak deneye hazırlanan numuneler..	33
Şekil 3.13. Belirli aralıklarla tartılan numuneler..	34
Şekil 3.14. Su buharı geçirgenliği ve termal iletkenlik deneyi disk kalıpları..	35
Şekil 3.15. Disk formunda taze harç numuneleri..	35
Şekil 3.16. Disk formunda sertleşmiş harç numuneleri..	35
Şekil 3.17. Su buharı geçirgenlik deneyi için hazırlanan numuneler..	36
Şekil 3.18. Su buharı geçirgenliliği numune tartım düzeneği..	37
Şekil 3.19. Termal iletkenlik deneyi çalışma prensibi..	38
Şekil 3.20. Termal iletkenlik deney aleti ve ölçüm düzeneği..	38
Şekil 3.21. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği..	39
Şekil 3.22. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı..	40
Şekil 3.23. Eğilmelerde çekme dayanımı deneyi yapılışı..	41
Şekil 3.24. Basınç dayanımı deneyi yapılışı..	41
Şekil 4.1. Harç serilerine ait birim hacim ağırlık değerleri..	44
Şekil 4.2. Harç serilerine ait birim ağırlık değerleri..	44
Şekil 4.3. Harç serilerine ait özgül ağırlık değerleri..	45
Şekil 4.4. Harç serilerine ait porozite değerleri..	46
Şekil 4.5. Harç serilerine ait kütlece su emme değerleri..	46
Şekil 4.6. Harç serilerine ait hacimce su emme değerleri..	47
Şekil 4.7. Harç serilerine ait kapilarite değerleri..	48
Şekil 4.8. Harç serilerine ait su buharı difüzyon direnç katsayıları..	49
Şekil 4.9. Harç serilerine ait ısı iletkenlik katsayısı değerleri..	49
Şekil 4.10. Harç serilerine ait ultrases geçiş hızı grafiği..	50
Şekil 4.11. Harç serilerine ait eğilmelerde çekme dayanımı grafiği..	51
Şekil 4.12. Harç serilerine ait basınç dayanımı grafiği..	52
Şekil 4.13. Harç serilerine ait elastisite modülü grafiği..	53

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Hafif agregalar ile üretilen betonlara ait teknik özellikler.....	7
Çizelge 2.2. Yapı harçlarının hacimsel karışım oranları..	18
Çizelge 3.1. GCK'ya ait teknik özellikler.....	21
Çizelge 3.2. Bir seri için gerekli kum miktarı.....	22
Çizelge 3.3. Pozolanik çimento ve kirece ait teknik özellikler.....	23
Çizelge 3.4. Düzce şehir şebeke suyuna ait kimyasal özellikler.	23
Çizelge 3.5. Kum agregası birim hacim ağırlık hesabı.....	24
Çizelge 3.6. GCK agregası birim hacim ağırlık hesabı..	25
Çizelge 3.7. Kum agregası hacim hesabı.....	25
Çizelge 3.8. Kum ve GCK agregasının hacim ve ağırlık değerleri.	25
Çizelge 3.9. Harç serilerine ait malzeme kullanım oranlarına ilişkin kodlama..	26
Çizelge 3.10. Harç serilerine ait ağırlıkça karışım miktarları.....	26
Çizelge 3.11. Harç serilerine uygulanan deney programı.....	27

KISALTMALAR

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
Ç25	Çimento + %75 D + %25 GCK
Ç50	Çimento + %50 D + %50 GCK
Ç100	Çimento + %0 D + %100 GCK
D	Doğal agrega (kum)
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
EN	Avrupa Standartları
GCK	Genleştirilmiş Cam Küre
KÇ25	Kireç + Çimento + %75 D + %25 GCK
KÇ50	Kireç + Çimento + %50 D + %50 GCK
KÇ100	Kireç + Çimento + %0 D + %100 GCK
ŞÇ	Şahit çimento + kum
ŞKÇ	Şahit kireç + çimento + kum
TS	Türk Standardı

SİMGELER

μ	Su buharı difüzyonu direnç faktörü
Ω_h	Havanın su buharı difüzyon direnci
Ψ	Nem miktarı
δ	Gerilme
ε	Deformasyon
b	Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu
D_h	Birim hacim ağırlık
D_o	Özgül ağırlık
E	Elastisite modülü
F	Kırılmadaki en büyük yük
F_f	Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük
F_{ort}	Numunelerin iki ölçüm arası su ağırlık farkları
G	Su buharı miktarı
m_0	Numunenin tam kuru ilk ağırlığı
m_l	Belirtilen süreler sonundaki suda bekletilmiş ağırlık
N	Kılcallık katsayısı
P	Porozite
P_o	Normal atmosfer basıncı
R	Basınç dayanımı
RB	Su buharı gaz sabiti
R_f	Eğilme dayanımı
S_k	Kütlece su emme oranı
S_h	Hacimce su emme oranı
T	Hava sıcaklığı
v	Ultrases geçiş hızı
V_0	Gaz yağı hacmi
V_1	Toz numunenin katılmasıyla okunan hacim değeri
W_o	Kuru numune kütlesi
W_1	Suya doymun numune kütlesi
W_2	Su içerisine batırılmış numune kütlesi

ÖZET

YAPI HARÇLARINDA GENLEŞTİRİLMİŞ CAM AGREGASI KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Burak AKTÜRK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI

Ağustos 2019, 62 sayfa

Bu çalışmada, atık camdan üretilmiş olan geliştirilmiş cam küre agregası (GCK) ikame edilmiş harçların mekanik ve fiziksel performansları araştırılmıştır. Bu amaçla agrega olarak geliştirilmiş cam küre agregası ve doğal kum, bağlayıcı olarak çimento ve kirecin kullanıldığı harç karışımları tasarlanmıştır. Karışımlarda 1-2 mm ve 2-4 mm boyutlarında geliştirilmiş cam küre agregası aynı gradasyondaki kum ile hacimce %0, %25, %50 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek sekiz seri harç üretilmiştir. Harç karışımları 40x40x160 mm ebatlı çelik kalıplara dökülmüş, ardından 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Kür sonunda harç numuneleri üzerinde fiziksel olarak; taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlık, birim ağırlık, özgül ağırlık, porozite, kütlece ve hacimce su emme, kapilarite, su buharı geçirimsizliği, ısı iletkenliği, ultrasonik hız ve mekanik olarak; elastisite modülü, eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak; atık camların geri dönüştürülmesiyle elde edilen geliştirilmiş cam küre agregasının harç içerisinde kullanılmasıyla düşük yoğunluklu, yüksek poroziteli, ısıl performansı yüksek ve yeterli dayanıma sahip kompozit bir malzeme elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bu bağlamda geliştirilmiş cam küre ikamesi ile elde edilen harçların ince ve kaba sıvada, tesviye harcında ve duvar örgü harcında kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harç, Geliştirilmiş cam küre agregası, Agrega, Atık cam.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF EXPANDED GLASS AGGREGATE IN BUILDING MORTARS

Burak AKTÜRK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa DAYI

August 2019, 62 pages

In this study, mechanical and physical performances of mortar samples with expanded glass bead substitution produced from waste glass were examined. For this purpose, first mortar mixtures were prepared using expanded glass beads and natural sand as the aggregates and cement and lime as binders. Eight series of mortars were produced by replacing the aggregate of expanded glass beads of 1-2 mm and 2-4 mm dimensions with sand of the same grade at 0%, 25%, 50%, and 100% by volume. Mortar mixtures were poured into 40x40x160 mm molds and cured for 7, 28, and 56 days. At the end of the curing, physical and mechanical tests were performed on mortar samples in their fresh and hardened states: physical tests included measuring the unit volume weight, unit weight, specific gravity, porosity, water absorption by mass and volume, capillarity, water vapor permeability, thermal conductivity, and ultrasonic velocity and the mechanical tests included elastic modulus, tensile strength at bending and compressive strength. It was concluded that a composite structure with low density, high porosity, high thermal performance, and sufficient strength can be obtained by using a mortar aggregate of expanded glass beads made of recycled glass. This demonstrates that mortars obtained with expanded glass bead substitution can be used in roughcast and finishing coat plasters, in bedding mortar, and masonry mortar.

Anahtar Kelimeler: Mortar, Expanded glass bead, Aggregate, Waste glass.

1. GİRİŞ

Dünyada en çok tüketilen yapı malzemelerinden biri; bağlayıcı, ince ve/veya iri agrega, su ve katkı maddelerinin bir araya gelmesiyle elde edilen betondur. Ortaya çıkan kompozit malzemenin hacimce yaklaşık %75'i agregadan oluşmaktadır. Günümüz teknolojileriyle agreganın elde edilmesi için genellikle maden yatakları kullanılmakta ve bu süreçte çevresel zararlar ortaya çıkmaktadır.

Son yıllarda geleneksel agregalar yerine geri dönüşümlü agrega ve hafif agregaların harç ve betonda kullanımı üzerine birçok çalışma yürütülmektedir. Her iki agrega türünün kullanılmasıyla; çevresel zararlar azaltılmakta, atıklar bertaraf edilmekte, doğal kaynaklar korunmakta ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Hafif agregalar; düşük yoğunlukta ve yapısında yer alan boşluklar sayesinde termal ve ses izolasyonuna sahip olup, yapı malzemelerinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde doğal hafif agreganın birçok çeşidi bulunmakta olup yüksek rezerv hacmine sahiptir. Yapay hafif agregalar ise, hammaddenin yüksek ısı altında işlenmesiyle farklı gradasyonlarda elde edilebilmektedir.

Yapı malzemelerinin kendi öz ağırlığını azaltabilmek için son yıllarda birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Yapı zati yükünü azaltabilmek için çözüm olarak taşıyıcı sistemin ve taşıyıcı olmayan sistem elemanlarında kullanılan yapı malzemelerinin özellikle düşük yoğunluğa sahip agregalardan tercih edilmesi gün geçtikçe artmaktadır.

Bu tez çalışmasında yapay hafif agregalardan biri olan geliştirilmiş cam küre agregası kullanılmıştır. Geri dönüşümle kazanılan atık camların yüksek ısı altında özel kimyasallar yardımıyla boşluklu ve kapalı hücreli yapıda bir malzeme elde edilir. Geliştirilmiş cam küre agregasının kullanımı üzerine son yıllarda birçok çalışma yapılmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması, Geliştirilmiş Cam Küre ince agregasının (GCK) harç içerisine ikame edilmesi sonucunda harçta meydana gelecek fiziksel ve mekanik özelliklerin etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, bağlayıcıları farklı iki grup üzerinde farklı oranlarda GCK agregası ikame edilmiş serilerin taze ve sertleşmiş

özellikleri belirlenmiştir. Deneysel kısımda; taze harcın yayılması, sertleşmiş harcın birim ağırlığı, yoğunluğu, su emme miktarı, su buharı difüzyon direnci, kapilerite katsayıları, eğilmede çekme ve basınç dayanımları ile ısı iletkenlik özellikleri ve elastisite modülleri tespit edilmiştir.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tezin amaç ve kapsamından bahsedilmektedir. İkinci bölümde konuyla ilgili genel bilgiler ve literatür taramaları yer almaktadır. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde ise, deneysel çalışma metodolojisi, kullanılan yöntemler ve elde edilen bulguların irdelenmesi bulunmaktadır. Sonuçlar bölümünde ise, elde edilen deneysel sonuçlar kısa ve öz şekilde verilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI

Eski çağlardan günümüze değin insanoğlunun en önemli sorunlarından biri barınmadır. Barınma ihtiyacı gün geçtikçe gelişip değişmiş ve bununla birlikte yapılarda kullanılan yapı malzeme teknolojileri ve yapım teknikleri de değişim göstermiştir. Geçmişten günümüze yapı harç sistemlerinde bağlayıcı maddeler başta olmak üzere, hammaddelerin de malzeme bütününde önemli rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Agreganın çeşitliliği veya ulaşılabilirliği, tarihsel süreç içinde sürekli bir değişim göstermiştir [1,2].

2.1. AGREGA

Agregalar; doğal ve yapay nitelikteki değişik özelliklere sahip taşlardan, seramiklerden, metallere, organik maddelerden elde edilen yapı malzemeleridir. Üretiminde kullanılacakları karışımın özellikleri dikkate alınarak farklı granülometrik boyutlandırmalarına göre karışım içerisinde kullanılırlar. Uygulamada bir kompozit malzeme bileşeni olarak, taneli malzemenin en yaygın kullanıldığı alan beton ve harç üretimidir [3].

İnce ve iri agregalar, betonun hacimce %60 ile %75'ini (Kütlece %70-85) oluşturmaktadır. Betondaki agrega fazı; betonun işlenebilirliği, dayanım ve durabilite özellikleri, karışım oranları ve maliyeti üzerinde etkili olmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan agregalar; kum, çakıl, kırmataş, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufudur. Bu tip agregalar ile üretilen betonların birim hacim ağırlıkları 2200-2400 kg/m³ arasında yer almaktadır. Genleştirilmiş şeyl, kil, arduvaz ve cüruf agregaları, yaklaşık 1350 ile 1850 kg/m³ arasında değişen yoğunluğa sahip yapısal hafif beton üretmek için kullanılmaktadır. Pomza, perlit, vermikülit ve diatomit gibi diğer hafif malzemeler, yoğunluğu yaklaşık 250-1450 kg/m³ arasında değişen yalıtıcı hafif betonlar üretmek için kullanılmaktadır. Ağır beton ve radyasyon koruyucu beton üretmek için barit, limonit, manyetit, ilmenit, hematit, demir gibi ağır malzemelerden faydalanılmaktadır [4].

Agregaların yapısının, granülometrisinin ve sertliğinin betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Agregaları elde edilişlerine ve tane yoğunluklarına göre sınıflandırabilmek mümkündür. Elde edilişlerine göre agregalar “doğal agregası, yapay agregası ve geri kazanılmış agregası” olmak üzere üç sınıfta toplanabilir. Tane yoğunluklarına göre agregalar ise “hafif agregası, normal agregası, ağır agregası” olmak üzere üç sınıfta toplanabilir.

2.1.1. Doğal ve Yapay Agregası

Doğal agregaların kaynağını volkanik orijinli kayalar oluşturmaktadır. Patlama sırasında yüzeye çıkarak soğuyan lav, sinterize boşluklu ve gözenekli bir malzeme oluşturmaktadır. Magma eriğinin, kristal yapı oluşturmamadan ani soğuması sonucu amorf yapıli camsi bir malzeme oluşmaktadır. Eğer magma eriyiğı yavaş soğursa kristal yapıli bir malzeme oluşur. Lav kaynayan bir sıvı olduğu için içerisinde hava ve gaz bulunmaktadır. Lavın soğuması sonucu gazın ve havanın etkisiyle boşluklu ve süngerimsi bir yapı oluşmaktadır. Başka bir deyişle lavın soğuması sonucu boşluklu, hafif ve reaktif yapıda bir malzeme oluşmaktadır. Bu tür malzemeler, volkanik agregası veya pomza, scoria ve perlit agregası gibi isimler almaktadır [5].

Yapay agregalar yüksek sıcaklığa maruz bırakılan doğal agregaların genişletilmesiyle oluşan agregalardır. Buna örnek olarak yüksek fırın cürufu gösterilebilir. Doğal agregalar genellikle 2,4-2,8 g/cm³ arasında değışen tane yoğunluğuna sahipken, hafif agregaların yoğunluğu 0,8-2,0 g/cm³ aralığında değışir.

2.2. HAFİF AGREGALAR

TS EN 13055’te hafif agregalar, tane yoğunluğu 2,0 g/cm³ veya gevşek yığın yoğunluğu 1,2 g/cm³ ‘ü aşmayan mineral kökenli agregalar olarak tanımlanmaktadır [6]. Agregası tanelerindeki boşluklar; normal ağırlıklı agregalarda, agregası katı hacminin %0 ile %20 si arasında değışirken hafif agregalarda ise bu oran %30- %50 kadardır [7].

2.2.1. Hafif Agregasının Oluşumu

Hafif agregalar, hücreli gözenekli yapısından dolayı düşük tane yoğunluğuna sahiptirler. Agregası tanelerinin hücreli boşluklu yapısı, genellikle ısı işlem sırasında piroklastik kütlelden genişlemeye sebep olan gaz salınımı ile oluşur [8].

Dayanımı ve dayanıklılığı yüksek hafif agregalar, düşük yoğunluklu, hücreli veya gözenekli bir iç yapıya sahiptirler. Hafif agregalarda bu gözenekler nispeten çatlaksız ve yapı içinde 5 µm ile 300 µm arasında homojen bir şekilde dağılmıştır. Agregaların dış yüzey gözenekleri açıktır ve nemli ortamda bırakıldığında gözenekler suyla dolmaktadır. İç gözenekler ise daha az geçirgen oldukları için boşluklarda suyun birikmesi daha uzun zaman almaktadır [9].

2.2.2. Hafif Agregaların Tarihçesi

Dünyada hafif agrega kullanımı Babil'in inşasına kadar uzanmaktadır. Antik Yunan ve Roma'da Bims (Pomza), hem hafif agrega olarak hem de öğütülerek hidrolik bağlayıcıya katılmış; amfityatro, tapınak, su kemeri gibi muhtelif yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan hafif agregalar, doğal malzemelerin fırınlarda yüksek sıcaklıkta genişletilmesi ile üretilen yapay hafif agregalar olup; ilk üretim çalışmaları 1900'lerin başlarında başlamış, ilk ticari kullanımları ise I. Dünya Savaşı sırasında, çelik kıtlığı nedeniyle, "ferrocement" ticari gemilerin üretimi ile olmuştur [10].

Genleştirilmiş yapay agrega üretimi ilk olarak 1920 yılında Kansas'ta gerçekleştirilmiştir. 1923'te ise Dan Servey tarafından hafif agrega kullanılarak hafif beton bölme duvar üretimine başlanmıştır. 1929 yılında ise taşıyıcı hafif betonlar tasarlanmış ve yüksek katlı yapılarda kullanılmıştır. Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren çok katlı binalar taşıyıcı hafif betonlar kullanılarak inşa edilmiştir. Döşemelerinde taşıyıcı hafif betonun kullanıldığı 42 katlı Prudential Life Building-Chicago ile hafif betonun çerçeve sisteminde ve döşemesinde kullanıldığı 18 katlı Statler Hilton Hotel-Dallas bu tür inşa edilmiş yapılara birer örnek mahiyetindedir [9].

2.2.3. Hafif Agregaların Avantajları

Hafif agregalar yüksek boşluk oranlarına sahip olduklarından düşük birim hacim ağırlıkları olup, normal agregalara göre daha yüksek su emme, daha az ısı iletimi ve daha düşük mukavemet gibi özellikleri bulunmaktadır [11].

Betonun birim ağırlığını azaltmak ve betona ses ve ısı yalıtım özelliği kazandırmak için ya da atık maddeleri değerlendirmek amacıyla kullanılan agregalardır. Genellikle gözenekli bir yapıya sahiptirler, su emmeleri ve boşluk oranları yüksektir, basınç, çarpma ve aşınma dayanımı oldukça düşüktür [12].

Bu gibi özelliklerinden dolayı hafif agregaların yapılarda beton ve/veya harç içerisinde kullanımıyla yapı zati ağırlığı azaltılarak etkiyecek deprem kuvveti indirgenir, yapı ağırlığı azaldığı için taşıyıcı elemanların kesit boyutları küçültülebilir, yapı elemanlarındaki donatı miktarı azaltılır, ısı yalıtım özelliklerinden dolayı enerji tasarrufu sağlanır, ses yalıtkanlığı sağlanır. Aynı zamanda yangına karşı geleneksel betonlara kıyasla daha dirençli ve soğuk iklim bölgelerindeki donma-çözünme etkisine karşı da daha dayanıklıdır.

2.2.4. Hafif Agregaların Çeşitleri

Hafif agregalar genellikle doğal volkanik kökenli veya ısı işlem görmüş yapay hafif agrega olarak üretilmektedir. Yapay agregalar, birçok üstün özelliklere sahip olan malzemelerin ısı işlemi tabii tutulmasıyla üretilmektedir. Bu malzemeler üç gruba ayrılabilir; perlit, vermikülit, kil, şeyl ve kayrak gibi doğal malzemeler, cam gibi endüstriyel ürünler ve uçucu kül, genişlemiş demir cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir. Genleştirilmiş killerden üretilen en yaygın hafif agrega türleri; Leca ve Liapor olarak bilinir ve uçucu külden yapılanlar ise Lytag olarak inşaat ve birçok sektörde kullanılmaktadır. Hafif agregaların yoğunlukları, hammaddelere ve bunların üretimi için kullanılan işlemlere bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir [13].

Piyasada pek çok çeşit hafif agrega kullanılmaktadır. Bunlar arasında hem doğada kendiliğinden meydana gelen pomza, cüruf, volkanik küller, diatomit gibi düşük yoğunluklu malzemeler, hem de kil, şist, silisli kayalar, arduvaz gibi ısı işlem uygulanarak elde edilen kayalar vardır. Hafif agregalar ayrıca uçucu kül, kağıt fabrikası atığı, kanalizasyon atığı, genişleştirilmiş yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerden de elde edilmektedir. İngiltere’de en fazla üretilen hafif agrega olan Lytag, enerji santrallerinde yakılan kömür cürufunun toz haline getirilerek sinterleştirilmesiyle elde edilmektedir [14].

Ancak, hafif yapı elemanı üretmek için gerekli olan genişleştirilmiş kil ve genişleştirilmiş şist gibi bazı yapay hafif agregaların kullanımı ülkemizde henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır [15].

Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [16].

Çizelge 2.1. Hafif agregalar ile üretilen betonlara ait teknik özellikler [16].

Agrega Türü	Agreganın Kuru Birim Ağırlığı (kg/m ³)	Betonun Kuru Birim Ağırlığı (kg/m ³)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenliği (W/mK)	Su Emme (%)
Genleştirilmiş kil	550-1050	110-1850	14-42	0,26-0,43	5-15
Köpük cürufu	500-1000	110-1850	14-42	0,17-0,34	5-25
Sinterlenmiş uçucu ktl	600-1000	1350-1900	14-42	0,17-0,51	14-24
Mikalı vermikülit	65-250	400-950	0,67-3	0,07-0,10	20-35
Genleştirilmiş perlit	65-250	550-800	0,6-3,5	0,07-0,10	10-50
Pomza	-	800-1300	4-5	0,15-0,30	-
Genleştirilmiş cam	250-500	1200	9	0,28	5-10
Genleştirilmiş polyester boncuk	30-150	300-900	0,7-12,5	0,07	-
Briket molozu	750	1750-1900	7,7-21	0,40-0,51	19-36
Kırmataş	1450-1750	2250-2400	21-50	1,0-3,0	0,5-2,0

2.2.5. Hafif Agregaların Beton ve Harçtaki Yeri

Günümüzde hafif betonları üretiminde en sık kullanılan yöntem hafif agregalarla beton üretmektir. Tüm gözenekli agregaların taşıdığı kendine has yapısal özellik farklılığı, bu agregalardan elde edilmiş hafif betonların özelliklerine de yansımaktadır.

Yapı teknolojisinde statik ve dinamik açıdan yapıda hafifliğin sağlanmasının yanı sıra yapıya bu hafifliği sağlayacak olan yapı elemanlarının da olabildiğince hafif ve standartlara uygun özellik gösteren malzemelerden seçilmeleri son derece önem arz etmektedir.

Hafif agregalar birim hacim ağırlıklarının normal agregalara nazaran az olmasından dolayı beton ve harç içerisinde kullanılarak inşaattaki sabit yükler azaltılır, etkiyecek deprem kuvveti indirgenmiş olur, dolayısı ile taşıyıcı elemanların kesitleri küçülür ve maliyette ciddi oranda azalmalar meydana gelir.

Günümüzde sıva, harç, tuğla, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı blokları ve beton içerisinde hafif agrega kullanılarak hafif modern yapı malzemeleri üretilmektedir. Yapı malzemelerinin hafifliğinin yanı sıra teknolojik özelliklerinin de geliştirilmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Konutlarda kullanılan enerji miktarının önemli bir bölümü bina ısıtılmasında tüketilmektedir. Enerjide dışa bağımlılık ve hava kalitesinin gün geçtikçe azalıyor olması ısı yalıtımı için alınacak tedbirlerin gerekliliğini göz önüne sermektedir.

2.2.6. Hafif Agregaların Diğer Kullanım Alanları

Hafif agregaların kullanıldığı diğer alanlar ise hafif geoteknik dolgu maddesi, yalıtım ürünleri, zemin mekaniği, hidro-kültür, drenaj, çatı bahçesi ve filtrasyon ürünleri olarak sıralanabilir [14].

2.2.7. Bazı Hafif Agregalar ve Elde Ediliş Yöntemleri

Klinker cürufu, kömürün evsel veya endüstriyel yakma sistemlerinde yandıktan sonra elde edilmiş halidir. Bu malzeme, bir dizi kırma ve eleme işleminden sonra, bazen hafif agrega olarak kullanılmaktadır. Agregalar çoğunlukla, sinterlenmiş veya cüruf görünümünde, sert ve koyu bir renge sahiptir. Bunlar, aşırı yanmış kireç, magnezyum, sülfür ve sülfat gibi zararlı bileşenler içermemelidir. Malzemenin yüksek oranda bir homojeniteye sahip olması için, bazı fiziksel ve kimyasal işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu yüzden bu tip agregalar, hafif beton yapımında oldukça kısıtlı bir kullanım alanı bulabilmektedirler [17].

Yüksek fırın cürufu, pik demirin yüksek fırında üretiminden sonra elde edilen bir yan üründür. Cürufun 1400-1500 °C'deki erimiş pozisyonunda, yüksek fırın atığı, hafif agrega haline dönüşür. Yüksek fırın cürufu, kaba bir yüzey dokusuna sahip, gözenekli ve bal peteği şeklinde, az veya çok koyu gri bir renge sahiptir. Malzemenin kuru yoğunluğu 600-900 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu ürün, besleme malzemesinde ayrıca bir ısıtma zorunluluğu bulunmamasından dolayı oldukça ekonomiktir. Bu yolla elde edilen agrega halindeki üründe, oldukça kararlı bir yapıya sahiptir [18].

Sinterlenmiş ve pulverize edilmiş yakıt külü (PFA), pulverize kömürün termal güç istasyonlarında yakıt olarak yakılmasından sonra elde edilen bir artıktır. PFA tozu, dönen bir kap içerisinde su ile birlikte pelletlenir. Elde edilen pelletler, 1200-1300 °C arasında yatay ızgaralar içerisinde yakılır. Daha sonra bunlar soğutulur ve farklı tane boyu fraksiyonlarında depolanır. Kuru yığın yoğunluğu, pelletlerin tane boyuna bağlı olarak 650-850 kg/m³ arasında değişir. PFA, Almanya ve İngiltere'de halen hafif agrega üretiminde kullanılmaktadır [19].

Genleştirilmiş kil, şeyl veya arduvaz da, dünyada hafif agrega amaçlı olarak yaygın biçimde kullanılan suni agrega türlerindedir. Üretim prensibi 1918'den beri bilinmekle birlikte, endüstriyel üretimi 1928 yılında başlamıştır. Üretim prosesi, tesisin özelliğine göre değişim göstermektedir. Kuru proseste öncelikle kil, çok ince toz boyutuna indirgenerek kuru partiküller elde edilir. Bu çok ince boyutlu toz, 2-4 metre çapında sabit

hızda dönen düz tabanlı bir kap içerisinde su ilavesi ile pelletlenir. Elde edilen pelletler, merkezkaç kuvveti etkisiyle yüksek derecede sıkışmış ve kompaktlaşmış durumdadır. Sulu prosesde ise ocaktan gelen kil, homojenize edilerek kırılır ve öğütme değirmenlerine aktarılır. Daha sonra su ve genleştirici katkıları ilave edilerek elde edilen ince ve plastik malzeme, sızdırma (extrusion) prosesi içerisinde delikli levhalar içerisinde geçirilir. Kullanılan deliklerin çapı, elde edilmek istenen agrega çapına göre belirlenir. Daha sonra deliklerden geçirilerek sızdırılmış macun durumundaki kil, istenilen uzunluklarda kesilir. Elde edilen silindirik pelletler, ilk önce döner fırınlarda kurutularak yuvarlak şekil kazandırılır. Daha sonra, yine aynı fırınlar içerisinde yakma işlemi uygulanır. Yakma sıcaklığı, 1150 °C ile 1200 °C arasında gerçekleştirilir. Döner fırın çıkışından genellikle saatte 10-50 ton arasında malzeme elde edilir. Daha sonra elde edilen agregalar elenir ve farklı tane boyu fraksiyonlarına ayrılır. Agregalar, kahverengiden kırmızıya doğru bir renk aralığına sahiptirler. Farklı tane boyu fraksiyonlarına göre yığın yoğunlukları 350-750 kg/m³ arasında değişir [20].

Perlit, %70'den fazla SiO₂ içeren volkanik, alüminyum silikatlı kayalardan (riyolitik) gelmektedir. Kayaç, kum şeklinde kırılır ve daha sonra 1000 °C'lik hızlı bir ısıtma işleminin ardından hafif agrega olarak elde edilir. Burada sağlanan genişleme, kayacın içerdiği bünye suyu sayesinde gerçekleşmektedir. Elde edilen malzeme, griden beyaza doğru değişen renk aralığında ve küresel şekillidir. Katı, küresel taneciklerin tane boyu, 0.1-3 mm arasında değişmekte olup, yığın yoğunluğu ise 50-100 kg/m³ civarındadır. Perlit çoğunlukla, İtalya, Yunanistan, Macaristan, İspanya, Fransa, Almanya, Belçika, Hollanda ve Türkiye'de yaygın şekilde bulunmaktadır. Perlitin endüstriyel üretimine 1946 yılında başlanmıştır [17].

Vermikülit, silis, magnezyum, demir ve alüminyum gibi hidrate olmuş bileşenler içeren, yapraksı yapıya sahip doğal bir malzemedir. Bu küçük ve ince levha plakalar, malzeme 900 °C'lik bir sıcaklığa tabi tutulduğunda, birbirinden ayrılarak bir mikroakordiyon yapısı gösterir. Vermikülit agregalarının eşdeğer çapları 0,1-10 mm arasında değişirken, yığın yoğunluğu 70-130 kg/m³ civarındadır. Vermikülit, perlite benzer şekilde gevrek ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Endüstriyel üretimi 1915'te başlamıştır ve su an Avrupa'daki üretimi oldukça sınırlı durumdadır [21].

Bir başka suni hafif agrega ise cüruf pelletidir. Bu prosesin orijini Kanada'dır. Cüruf pelletleri, yüksek fırınlardan elde edilen artık durumundaki ergimiş cürufun, farklı su enjeksiyonları vasıtasıyla, döner fırınlarda mekanik dispersiyon (ayırım)'a tabi tutulması

sonucunda elde edilir. Ergimiş cüruf, hava içerisine fırlatılır. Su enjeksiyonu, içsel genişmeyi sağlayan su buharının oluşumuna bir etkidir. Bu işlemi takiben oluşan pelletler, hava içerisinde hızlı bir şekilde soğuyarak, camsı (vitrös) dış kabuk oluşumu sağlanır. Tane boyutlarına göre yığın yoğunlukları $650-1000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Cüruf pelletlerinin 48 saat sonraki su emme oranı hacimce % 4, erime sıcaklığı ise $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ civarındadır [21].

Pomza volkanik bir kayaç türü olup, asidik ve bazik karakterli volkanik faaliyetlerle oluşmuştur. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanım türü olan asidik pomza, beyaz kirli, beyazımsı renkte olanıdır. Bazik pomza ise, kahverengi olarak bilinen, siyahımsı renkteki daha çok bazaltik bileşimli pomza türüdür [22]. Asidik pomzaların yoğunluğu, bazik olanlara göre daha az olup $0,5$ ile $1,0 \text{ gr/cm}^3$ değerlerinde olmaktadır. Koyu renkteki bazik pomzaların yoğunluğu 1 ile 2 gr/cm^3 arasında değişmektedir. Bünyelerinde kristal suyu olmayıp, kimyasal olarak %75'e ulaşan değerlerde silis içeriğine sahip olduğundan, aynı zamanda puzolanik özelliğe de sahip olmaktadır [23].

Diyatomit, su yosunları sınıfından olan tek hücreli, mikroskopla görülebilecek kadar küçük olan

diyatomların silisli kavkılarının birikerek fosilleşmiş kavkılarında meydana gelen organik tortul bir kayaçtır. Diyatomit, yüksek gözenekliliği, hafifliği, ısı, ses ve elektriği az geçirmesi, erime noktasının $1400-1600 \text{ }^\circ\text{C}$ olması, kimyasal maddelere karşı dayanıklılığı ve yoğunluğunun az olması gibi fiziksel özellikleri nedeni ile filtre yardımcı malzemesi, dolgu maddesi, izolasyon maddesi, absorbent, cila maddesi, katalizör ve katalizör taşıyıcısı, hafif yapı malzemesi, refrakterler ve sentetik silikat imali gibi birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. Dünya çapında çok geniş kullanım alanına ve eşsiz özelliklere sahip olmasına rağmen diyatomit henüz ülkemizde ana hammadde olarak yerli endüstriye girmemiştir [24-27].

2.2.8. Hafif Agregalar İle Yapılan Önceki Bilimsel Çalışmalar

Kantarcı ve Türkmen tarafından yapılan çalışmalarda farklı kür şartlarında normal agrega ve geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen betonların basınç mukavemeti ve geçirimsizlik katsayıları zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Betonun bağlayıcı oranı (çimento+silis dumanı) 450 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Su/bağlayıcı dozajı 0.35 alınmıştır. Üretilmiş olan beton örnekleri, deney gününe kadar 5 farklı ortamda bekletilmiştir. Yapılan deney sonucunda geliştirilmiş perlit agregası oranı arttıkça

numunelerin birim ağırlıkları oranında ters orantı olduğu yani azaldığı sonucuna varılmıştır. Ortamın nem durumuna ve geliştirilmiş perlit agregası oranına bağlı olarak beton numunelerin geçirimsizlik katsayısı değişmiştir. Genel olarak Kantarcı ve Türkmen tarafından yapılan çalışma sonucunda geliştirilmiş perlit agregası oranı arttıkça sertleşmiş beton numunelerin geçirimsizlik katsayısının artmış olduğu ve basınç mukavemetlerinin ise azaldığı sonucuna varılmıştır [28].

Chandra ve Berntsson' nun yaptığı araştırmalar sonucunda Japonya'da perlit agregasından yeni bir hafif agrega elde edilmiş olup, düşük su emmeye ve yüksek dayanıma sahip olması ASL denilen bu agreganın doğalından farkını ortaya çıkarmıştır. Silikon-karbit (SiC) denilen köpüklü bir sıvı ve bentonit denilen bir bağlayıcı ile karıştırılması sonucu doğal perlit agregası olan bu yeni malzeme oluşturulmuştur. Yapılan işlemler sonucunda elde edilen yeni agreganın birim ağırlığı 600 ile 1500 kg/m³ arasında değişmiş ve 24 saat sonrası su emme oranı %5 veya daha az, yoğunluğu ise 1210 kg/m³ olmuştur. Perlit agregası kullanarak birim ağırlığı 1700 ile 2000 kg/m³ ve basınç dayanımı ortadan yükseğe değişen hafif beton üretimi mümkün olduğu sonucuna varılmıştır [5].

Agrega olarak hacimce %100 perlit agregası kullanılarak üretilen hafif agregalı betonlar yalıtım betonları olarak kullanılmaktadır. Bu belirtilen sebeplerden dolayı son zamanlarda yüksek dayanımlı hafif betonlar üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalardan çok iyi sonuçlar alınmasına rağmen, bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmuştur. Çünkü normal agregaların tersine, farklı hafif agregalar çok farklı davranışlar sergilemektedir [29].

Topçu v.d. çalışmalarında hafif ağırlıklı agregaların hava boşlukları sayesinde bu malzeme ile üretilmiş betonun daha yüksek dayanım/ağırlık oranına, daha az yarmada çekme dayanımı kapasitesine, düşük ısıl genleşme katsayısına, yüksek nitelikli ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Buna ek olarak betonda hafif ağırlıklı agrega kullanılmasıyla yapının ölü ağırlığının ve kullanılacak demir donatı miktarının azalacağını ortaya koymuşlardır [30-33].

Subaşı yapmış olduğu çalışmasında beton içerisinde farklı oranlarda geliştirilmiş kil agregası kullanarak 1,7 kg/m³ gibi düşük bir yoğunlukta ve basınç dayanımı 41,27 MPa olan taşıyıcı hafif beton elde etmenin mümkün olduğunu belirlemiştir. Üretimi gerçekleştirilen hafif beton karışımlarında 450 dozlu betonların en yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerine sahip olduğunu tespit etmiştir [34].

Yapılan başka bir çalışmada ince agrega yerine %25 GPA (genleştirilmiş perlit agrega) kullanıldığında ısı iletkenlik katsayısının azaldığını, ayrıca %10, %20 CT (cam tozu) içeren 28 günlük harç numunelerinin ısı iletkenlik değerlerinde sırasıyla %1, %4 azalma olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte %25 GPA'lı ve mineral katkıların bütün seviyelerinde harçların ısı iletkenlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kuru birim ağırlık değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir [35].

Aytekin çalışmasında çimento harç numunelerinde sepiyolit ikamesinin artmasıyla genel olarak numunelerin su emme miktarlarının arttığı, bulk ve dky yoğunluklarının azaldığı, porozitenin arttığı belirlenmiştir. Çimento harç numunelerinin mekanik özellikleri incelendiğinde, eğilme ve basınç dayanımlarında en yüksek değerleri referans numunesi verirken, en düşük değerleri %15 sepiyolit oranlı numunenin verdiğini tespit etmişlerdir [36].

Gadea ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada poliüretan atıklarının harç içerisinde kullanarak hafif agregalı harç elde etmişlerdir. Harç içerisindeki poliüretan miktarının artmasıyla, işlenebilirlik, geçirgenlik ve porozitenin arttığını, yoğunluk ve mekanik özelliklerin azaldığını tespit etmişlerdir [37].

Bartolini yaptığı çalışmada, epoksi ile bir araya toplanmış genleştirilmiş kil agregalarının ses yalıtım performanslarını incelemiştir. Bartolini sesleri absorbe edici yeni bir malzeme üretmenin yanı sıra, ürettiği malzemenin iyi mekanik özelliklere sahip olmasını ve ucuza mal edilebilir olmasını amaçlamıştır. Çalışmanın sonucunda, epoksi ile birleştirilen genleştirilmiş kil agregası bloklarının üst düzeyde ses yalıtım performansı gösterdiği ortaya çıkmıştır. Üretilen blokların, piyasada ticari olarak sunulan birçok ses yalıtım ürününden daha hafif olduğu gösterilmiştir. Malzemenin ayrıca çekme ve basınç dayanımları da iyi seviyededir [38].

Uglyanitsa yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla üretilmiş donatılı betonlarda korozyon varlığını ve oluşma şartlarını araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda donatılı yapılarda minimum paspayı kalınlığının 25 mm olması, karışımlara sodyum nitrat veya sodyum tetraborat gibi korozyon inhibitörleri eklenmesi, uçucu kül kullanılması ve çimento dozajının ise minimum 220 kg/m^3 olması önerilmiştir [39].

Bogas yaptığı çalışmada, genleştirilmiş kil agregasıyla kendiliğinden yerleşen beton tasarımı yapmış, $490 - 599 \text{ kg/m}^3$ dozajlı ve D1.8 ve D2.0 sınıfı birim ağırlıklı hafif betonlarda $37,4 - 60,8 \text{ MPa}$ aralığında basınç dayanımı sonuçları elde etmiştir. Çalışmada,

kendiliğinden yerleşen hafif betonların, vibrasyonla yerleştirilen hafif betonlara göre mekanik özellikler anlamında daha üstün performans gösterdiği ortaya koyulmuştur. Kendiliğinden yerleşen hafif betonların elastik modül değerlerinin vibrasyonla yerleştirilen betonlara göre daha yüksek çıktığı gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca kendiliğinden yerleşen hafif beton karışımının kaba agregaya hacminin segregasyon olmayacak şekilde 325 kg/m^3 'e kadar çıkarılabileceği gösterilmiştir [40].

Yang ise yaptığı çalışmada, genişletilmiş kil agregalı hafif betonların karışım hesapları üzerinde araştırmalar yapmıştır. Çalışmada, hedeflenen çökme değerini, basınç dayanımını, kuru birim ağırlığını ve hava muhtevasını yakalamak için ampirik formüller geliştirmiştir. Çalışmada ayrıca ilk deneme karışımlarında doğru karışım oranlarının oluşturulmasındaki zorluklara vurgu yapılmış, halihazırda mevcut olan benzer özellikli malzemelerle yapılmış karışım hesaplarından yola çıkılmasının önemine değinilmiştir. Çalışmadaki hesaplamalar, basınç dayanımı 18 – 50 MPa, kuru birim ağırlık 1200 – 2000 kg/m^3 , maksimum agregaya boyutu 19 – 25 mm olacak şekilde optimize edilmiştir [41].

Lo tarafından yürütülen çalışmada ise, genişletilmiş kil agregalarının su emme kapasitelerinin, agregaya-çimento hamuru ara yüzündeki boşluk boyutu dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, su emme kapasiteleri %8,9, %9,4 ve %11 olan üç farklı genişletilmiş kil agregası kullanılmış 0,4, 0,44 ve 0,48 olmak üzere üç farklı su/bağlayıcı oranlı karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada, su/bağlayıcı oranının, agregaya – çimento hamuru ara yüzündeki boşluk yapısına önemli ölçüde etki etmediğine değinilmiş, asıl etkinin su emme kapasiteleriyle ortaya çıktığı savunulmuştur. Su emme kapasitesi en yüksek olan genişletilmiş kil agregasıyla üretilmiş betonların agregaya-çimento hamuru ara yüzünde, su emme kapasitesi en düşük olan agregaya göre boşluk alanlarının %51 oranında daha fazla oluştuğu gösterilmiştir [42].

Hafif agregalı beton blok elemanlar ile ilgili yapılan bir çalışmada farklı dayanım sınıflarında üretilen betonlarda diatomit agregası kullanılmıştır. Diatomit agregalı, 250-400 dozlu üretilen blokların ısı iletkenlik değerlerinin 0,23-0,233 arasında, birim hacim ağırlıklarının ise 910-1070 kg/m^3 arasında olduğunu tespit etmişlerdir [43].

Kramar ve arkadaşının yaptığı çalışmada, çimentolu harçlarda birim ağırlığın yarı statik yüklenme altında mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Hacimsel olarak farklı oranlarda genişletilmiş perlit agregası kullanımıyla yoğunlukları 1000 ile 2000 kg/m^3 olan harçlar elde edilmiştir. Bazı harç karışımlarına polimer mikro lif-elyaflar ilave

edilmiştir. Üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımı değerleri, harcın yoğunluğundaki düşüşle ve ayrıca lif takviyesinde de azaldığını saptamışlardır [44].

Geri dönüştürülmüş cam agregalarının harç veya beton içinde kullanımını hacimsel genişlemeden dolayı sınırlandırılmıştır. Çimento hamurunda bulunan alkaliler (Na ve K tuzları) ve genellikle atık camda bulunan reaktif amorf silika arasında beton için tehdit oluşturan alkali-silika reaksiyonu (ASR) oluşmaktadır. Bu reaksiyon, matris yapısını zayıflatır ve malzemenin kullanım ömrünü kısaltır [45].

Melek Emiroğlu yapmış olduğu hafif agregası içeren benzer çalışmada beton ve içerisine belirli oranlarda sepiyolit ikame ederek sertleşmiş birim ağırlık değerlerini; kontrol numunesi, %5; %10; %30; %50 ve %100 sepiyolit katkı numunelerde sırasıyla, 2,36; 2,30; 2,24; 2,15; 2,00; 1,85 kg/m³ bulmuştur. Karışımlardaki azalmaları sertleşmiş beton numunelerde, %2.54, %5.08, %8.9, %15.25 ve %21.61 olarak hesaplamıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan betona sepiyolit ilavesiyle basınç ve yarma-çekme dayanımının doğru orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Sepiyolitin betonun yapısında hafif, boşluklu ve su tutucu malzeme özelliği göstermesi dayanımların azalmasına neden olmuştur. 28 günlük basınç dayanımları, normal betonda 37,80 MPa iken, %5, %10, %30, %50 ve %100 sepiyolit ilaveli beton numunelerinde sırasıyla 34,10; 27,40; 18,20; 12,50 ve 8,20 MPa değerlerine düşmüştür. 28 günlük yarma-çekme dayanımları, normal betonda 7,40 MPa iken, sepiyolit ilaveli beton numunelerinde sırasıyla 7,00; 5,90; 3,50; 2,20 ve 1,45 MPa dayanımları vermiştir.

Bu sonuçlar ışığında, sepiyolit ilavesi yüksek olan numunelerde eğilme ve basınç dayanımlarındaki düşüş sepiyolitin yapısının yumuşak, poroz, dayanımsız olmasının yanı sıra fazla su emmesinden kaynaklanmıştır. Dayanımlardaki azalmalarda sepiyolitin kendi özelliklerinin yanı sıra beton karışımları hazırlanırken S/Ç oranının sabit tutulmayıp, karışımların akıcı plastik kıvamına göre hazırlanması da göz önüne alınmalıdır. Sepiyolitin fazla su emme özelliği düşünüldüğünde, dayanımlardaki azalmada karışım suyunun fazlalığı da etkindir [46].

2.3. HARÇ

Dolgu malzemesi, bağlayıcı malzeme ve karışım suyunun belirli oranlarda karışımı ile elde edilen, yapıda taş, tuğla, bims ve gaz beton gibi blok biçimli elemanların birbirine bağlanmasını sağlamak amacıyla kullanılan, katılaşma özelliğine sahip yapı hamurlarına

“harç” denir. Kargir yüzeyleri biçimlendirmek ve korumak için duvar ve tavan yüzeylerinin kaplanması amacıyla kullanılan harca da sıva harcı denir. Harçların ve sıvaların doğal veya yapay kimyasal katkı maddeleri içeren ya da içermeyen türleri de bulunmaktadır. Ancak harç ve sıvalar çoğunlukla üretimlerinde kullanılan bağlayıcıların niteliğine göre sınıflandırılır. Bunlar çimento harç ve sıvaları, kireç harç ve sıvaları, alçı harç ve sıvalarıdır [47]

Harcın yapıda kullanımının temel amacı, yapı bileşenlerini meydana getiren elemanların birbiriyle bağlantısını sağlayarak, bir yapı bütünü oluşturmak ve bu bileşenlere gelen basınç yükünü dağıtmaktır. Ayrıca, yapı elemanlarını dış ortam koşullarına karşı korumak içinde harç uygulaması yapılmaktadır [48, 49].

2.3.1. Tarihçe

Milattan önce 4. yy’de, bazı volkanik toprakları sönmüş kireçle karıştıran Grekler, suya dayanıklı olan ve güçlü nem koşullarında bile sertleşebilen harçlar geliştirmişlerdir. Romalılar ise çok etkili bir hidrolik reaksiyona neden olan, Pouzzoles yakınlarındaki Napoli tüflerini bularak bu gelişmeye katkıda bulunarak bu maddenin karıştırıldığı harca “Pouzzolone” adını vermişlerdir. Nihayet Romalılar öğütülmüş pişmiş toprak ve kirecin bir karışımını kullanarak başka bir hidrolik harç keşfettiler. Günümüzde “Cocciopesto” adı altında bilinen bu harç Romalılara, imparatorluklarının her yerinde bu malzemeyi üretmeye olanak sağladı. Elde edilen bu hidrolik harçla Romalılar yeni bir inşaat tekniği ortaya koydular. Aynı zamanda harç karışımlarında pomza taşını da kullanarak birim ağırlığı düşük betonu (hafif beton) ürettiler. Böylece yapıya etkiyen yükü de azaltmış oldular. Kireç kullanılarak elde edilen harç ve sıvalar, eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerden çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşasında kullanılmıştır [50].

2.3.2. Harç Çeşitleri

İnşaat sektöründe kullanılmakta olan harç çeşitleri karışımda kullanılan bağlayıcının ismi ile anılmaktadır. Genel olarak yapılarda kullanılmakta olan harç çeşitleri şunlardır:

a) Çimento Harçları:

Hidrolik harçların en iyisi olan bu harçlarda bulunan su ve çimento miktarları, yapılacak işin önemine ve yerine göre değişiklik göstermektedir. Gereğinden fazla su harcın direncini azaltırken, gereğinden az kullanılan su ise katılaşmanın beklenilenden daha kötü bir şekilde gerçekleşmesine sebep olur. Çimento harçları örgü ve sıva harcı olarak, şap ve

mozaik harcında kullanılmaktadır.

b) Kireç Harçları:

Bağlayıcının katılma özelliğine göre havada sertleşen kireç harcı ve suda sertleşen hidrolik kireç harçları olarak ikiye ayrılırlar. Hava kireci harçları su ve rutubete dayanıksızdır ve çok kalın duvarlarda da kullanılmaması gerekir. Çünkü duvarların içerisinde kalan harç karbondioksit alamayacağı için sertleşemez. Diğer bir yandan sertleşme süreci ağır ilerlediğinden dayanım istenen yerlerde kullanılmamalıdır. Hidrolik kireç harçları ise 6-7 saatlik bir zaman diliminde katılmaya başlarlar. Kolon, kemer, kemerli döşemeler ve su içerisindeki yapılarda ve temellerde kullanılabilirler. Hava sıcaklığının sıfır derecenin altında olduğu durumlarda ise kullanılması uygun değildir. Çünkü katılma sağlıklı gerçekleşmeyerek çatlama ve dökülme gibi problemler ortaya çıkar. Bu tür harçlar genellikle dış sıvalarda ve perdah işlerinde kullanılabilir.

c) Alçı Harçları:

Alçı harçları kalsiyum sülfat alçıları olarak da literatürde yer almaktadır. Piyasada susuz ve yarı hidrat olarak toz halde bulunan alçıya su ilavesi ile harç elde edilir. Harcın kıvam derecesine göre malanın işlemediği yerlerde şerbet veya hamur olarak, tavan sıvası olarak ve tuğla ile duvar derzlerini doldurmak için kullanılırlar. Alçı harçlarının en büyük sorunu su ve rutubete karşı dayanıksız olmalarıdır. Bu nedenle alçı harçları dış sıvada ve taş duvarlarda harç olarak kullanılmamalıdır. Alçı, genellikle yapıların iç kısımlarındaki sıva işlerinde kullanılmaktadır.

d) Melez Harçları:

Birden fazla bağlayıcının kum ile karıştırılmasından elde edilen harçlardır. Kireç harcına katılan çimento, o harcın hem direncini hem de katılma hızını artırır. Bu harçlarda kullanılacak kirecin iyi sönmüş olması ve karışımının homojen olması gerekir. Melez harçlar temel duvarlarında, yük taşıyacak duvarlarda, kolonlarda ve dış sıvada kullanılır. Kirecin yağlılığı ve aderansı çimentodan daha fazla olduğundan melez harçla sıva yapmak, çimento harcı ile sıva yapmaktan daha kolay ve zahmetsizdir.

e) Kil Harçları:

Su ile iyice karıştırılarak yoğrulması kolay hale getirilen az yağlı kil ile, bu kilin çatlamasını önleyen samanın karıştırılmasıyla elde edilen harçlardır. Kil harçları, içerisindeki fazla suyun buharlaşmasından dolayı kuruyarak sertleşir. Bu nedenle mekanik harçlar sınıfına girer. Rutubete karşı dayanıksız olan kil harçları, ahır ve samanlık gibi çok fazla önem arz etmeyen yapılarda kullanılır [51].

2.3.3. Harcın Kullanım Alanları

Genel olarak harçlar, yapıda kullanım yerine göre üç farklı şekilde adlandırılmaktadır. Duvarı oluşturan elemanların birbirine bağlanması ve duvarın yatay ve düşey boşluklarının doldurulması amacıyla kullanılan harçlara “duvar harçları” denilmektedir. Duvarı meydana getiren elemanların birlikte çalışmasını sağlayan, duvarın yatay ve düşey kuvvetlere karşı direncini arttıran harçlar ise “sıva harçları” olarak adlandırılmaktadır. Duvarın sıvalı olması, yarattığı sargılama etkisiyle kendini bırakmasını engellemekte ve duvarın rijitlik kazanmasını sağlamaktadır. Suyula ilişkili alanlarda, suyun sızmasını engellemek için yüksek dozajda çimento karıştırarak elde edilen harçlara ise “şap” denilmektedir [52].

2.3.4. Harçlardan Beklenen Özellikler

Harç yapımı sırasında dikkat edilmesi gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Öncelikle harcın kullanılacağı yere göre bağlayıcı cinsi (çimento, kireç, alçı) seçilmelidir.
- Bağlayıcı malzeme miktarı iyi ayarlanmalıdır. Bağlayıcı malzeme az olursa harcın dayanımı az olmaktadır. Miktar fazla olduğu takdirde ekonomik açıdan uygun olmamasının yanında işlenebilirliği zorlaşmakta ve yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır,
- Karışım suyu hemen akmayacak şekilde iyi ayarlanmalıdır,
- Harçta işleme kolaylığı ve kopmaların az olması için plastik halde iken yeterli kohezyon sağlanmalıdır,
- Plastik halde ve sertleşme halinde serildiği birimlerde yeterli adezyonu sağlaması,
- Yapılan iş açısından sertleştiğinde beklenen dayanımı sağlaması,
- Yapılan işe uygun olarak kuruma büzülmesine ve nem hareketlerine izin verecek nitelikte olması,
- Dolgu maddesi olarak kullanılacak kum ve benzeri malzemeler, temiz ve dayanıklı olmalı, cinsi ve menşei belli olmalıdır.
- Harç karışımına ilave edilecek su, içerisinde tuz, seker, yağ, asit ve benzeri maddeler ihtiva etmemeli, içilebilir nitelikte olmalıdır. Gereğinden fazla su kullanımı da hazırlanacak harcın mukavemetini etkileyeceği için su oranına dikkat edilmelidir [52, 53].

2.3.5. Harcın İşlevi ve Karışım Oranları

Harçların duvar bloklarını birbirine yapıştırma işlevinin yanında blokların temas eden yüzeylerinin pürüzlü olmasını giderme işlemi de vardır. Üst üste duran iki tuğla ya da

taşın yüzeylerinin tümü birbirine değmez. Sınırlı temas alanı ise aktarılan yükün kısıtlı temas alanında gerilme birikimi oluşturarak düşey yük taşıma gücünün azalmasına neden olacaktır. Araya konulan harç her iki taraftaki bloklarda çıkıntı, girintileri ve pürüzleri doldurarak blokların birbirine bütün alanlarından kuvvet aktarmasını sağlar. Sınırlı temas alanı ile daha düşük bir yük düzeyinde kırılma harç ara katmanı ile önlenebilir [54].

Günümüzde binaların yapımı sırasında ısısal konfor sağlayan yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Duvar inşasında yalıtım amacıyla yapı malzemesi olarak yalıtım malzemeleri kullanılsa da bina iskeletini oluşturan kolon, kiriş ve yapı elemanlarını birleştiren örgü harçlarının yapımında kullanılan normal agregalar yalıtımı sağlamamaktadır. Bunlar binada ısı köprülerini meydana getirmektedir. Bunu önlemenin yolu ise beton ve örgü harçlarının yapımında ısı yalıtımı sağlayacak hafif agregalar kullanmaktır [55].

Harçlarda karışım oranlarının hacime göre belirlenmesi oldukça yaygındır. Örgü harcı ince bir katman olarak serildiğinden karışım oranlarını belirlemede hava şartları çok az dikkate alınır. Burada önemli olan husus, kullanılan taşın gözenekliliği ve dayanımıdır. Örneğin kuvvetli harçlar sadece yoğunluğu ve dayanımı yüksek taşlarda uygulanabilir. Kaplama harçlarında kullanılan kum ise çoğunlukla duvar örgü birimleri ile aynı türdür ve örgüde beyaz veya renkli çimento kullanılmaktadır.

Duvar örülürken harç akıcı kıvamda olmalıdır. Kolay ve kopmadan istenen biçim verilebilmelidir. Taze harcın kıvamının ölçülebilmesi oldukça zordur. Harçta istenilen kıvam; harcın tuğlanın üstünde kolayca dağıtılabilir olması, düşey yüzeylere kolayca yapışabilme ve tuğlaların konulması sırasında akmaya karşı dirençli oluşu gibi özellikler taşımasıdır. Aşağıdaki çizelgede uygulamada sıkça kullanılan hacimsel harç karışım oranları verilmiştir [54].

Çizelge 2.2. Yapı harçlarının hacimsel olarak karışım oranları [54].

Çimento	Kireç	Kum	1m ³ kuma eklenecek çimento(Torba)	1m ³ kuma eklenecek kireç(Teneke)
1	1	6	4	4
1	1	9	3	5
1	3	12	2	6
1	-	3	8	-
-	1	3	-	8
1	4	12	2	8

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölüm, materyal ve yöntem kısımlarından oluşmaktadır. Materyal bölümünde çalışma kapsamına yönelik; GCK (genleştirilmiş cam küre), çimento, kireç, karma suyu ve kullanılan deney aletleri hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise üretilecek harç serilerine ait karışım oran ve miktarları ile seriler üzerinde yapılacak fiziksel, mekanik, termal ve mikro yapı deneyleri verilmiştir.

Bu çalışmada üretilen harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Beton laboratuvarı ve Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

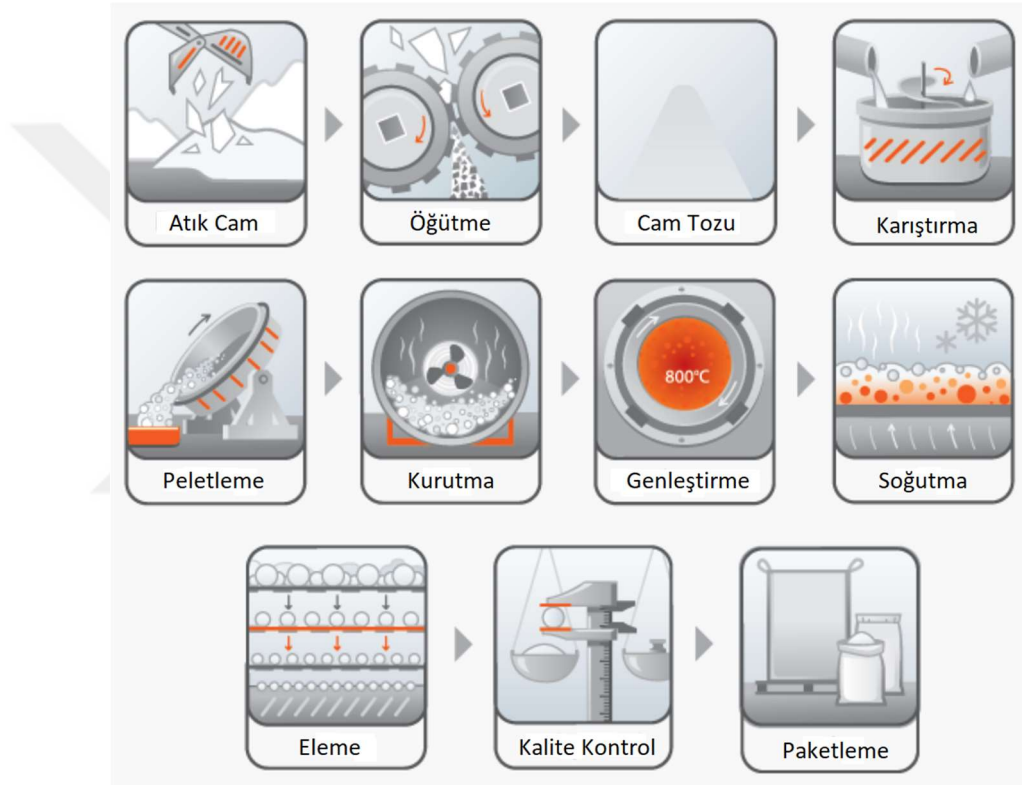
3.1. MALZEME

3.1.1. Genleştirilmiş Cam Küre

Genleştirilmiş Cam Küre Agregası (GCK) yapay hafif agregalar sınıfında yer almaktadır. Geri dönüşümle kazanılan hurda camın, özel patentli teknoloji ile küçük hücreli bir yapıya dönüştürülmesi sonucu elde edilen genleştirilmiş cam kürecikler, özel bir termal izolasyon malzemesi görevi yapmaktadır. GCK alev direncine sahip A1 sınıfı yanmazlık özelliğinde olup, tamamen su içerisine batırılabilir gözenekli yapısı sayesinde %10'dan fazla emilimi engellemektedir. Her türlü organik ve inorganik kimyasala karşı tamamen dirençli bir yapıda olan kürecikler ekolojik, çevre dostu bir üründür (Şekil 3.1). Hafif agrega olması nedeniyle hafif beton ve harç üretiminde kullanılabilir ideal bir malzemedir [56].



Şekil 3.1. Harç üretimde kullanılan genleştirilmiş cam küre agregası [56].



Şekil 3.2. Genleştirilmiş cam kürenin üretim aşamaları [56].

Hurda olarak açığa çıkan atık cam, mekanik öğütme işlemine tabi tutulduktan sonra cam tozu halini alır. Sonrasında mikser yardımı ile karıştırılan cam tozu, rutubet, sıcaklık ve basınçla birlikte mekanik peletleme işleminin ardından kurutulur. Daha sonra 800°C'ye kadar sıcaklığa tabi tutularak genleştirilen kürecikler, soğutma işleminin ardından tanecik çaplarına göre elenir ve kalite kontrol sonrasında paketlenir.

GCK, Stikloporas firmasının Litvanya fabrikasında üretilmiş ve ülkemizdeki distribütörü olan Omnis Kompozit Ltd. firmasından karışıma uygun aralıklarda hazır olarak temin edilmiştir.

Çizelge 3.1. GCK'ya ait teknik özellikler [56].

Özellikler	1-2 mm	2-4 mm
Görünür Yoğunluk (g/cm ³)	230	200
Basınç Dayanımı (MPa)	2	1,4
Termal İletkenlik (W/mK)	0.0663	0,0639
pH Değeri	9-11	
Kütlece Su Emme (%)	20	23
Basınç Dayanımı (MPa)	2	1,4

3.1.2. Doğal Agrega

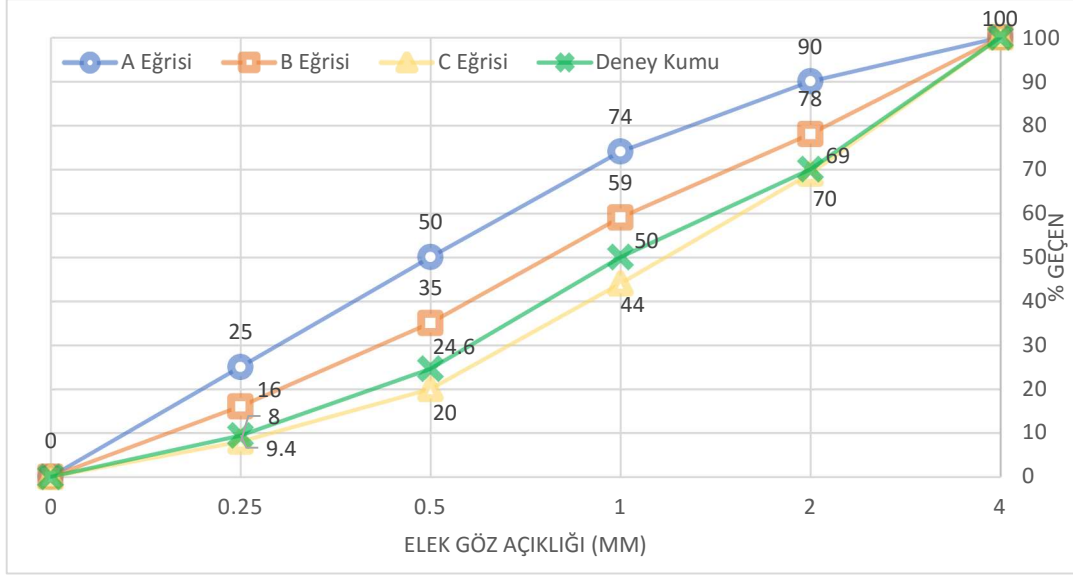
Üretilen harç numunelerinin tümünde en büyük dane boyutu 4 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan doğal kum için Düzce il sınırlarında çıkarılan dere agregaları araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan doğal kum TS 802'de belirtilen sınır değerlere uygun ve en yakın gradasyona sahip olan Sakarya il sınırlarındaki ocaktan temin edilmiştir [57].

Çalışmada kullanılan ve ocağından temin edilen kum, laboratuvar ortamında etüv fırınında 105±5°C de kurutulmuş ve farklı elek aralıklarında elenerek gradasyonları belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.3. Doğal kum gradasyonuna ait görsel.

Elek analizi yapabilmek için 500 g ağırlığında dere kumu; 4, 2, 1, 0.5, 0.25 ve 0.125 mm'lik eleklerden geçirilmiştir. Eleklerin üstünde kalan kumların ağırlıkları ölçülmüştür ve % geçen değerleri hesaplanarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Doğal kuma ait granülometri eğrisi.

Deneysel kum granülometri grafiği incelendiğinde, ağırlıkça kumun %30'u 2-4 mm arasında, %20'si 1-2 mm arasında ve %50'si de 0-1 mm arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ön deneylerde, üçlü prizmatik çelik kalıbı dolduracak kum miktarının yaklaşık 1200 g olduğu belirlenmiştir. Çizelge 3.2'de bir seri için ağırlıkça gerekli kum miktarı verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bir seri için gerekli kum miktarı.

Elek Aralığı (mm)	Ağırlıkça (%)	Miktar (g)
0 – 1	50	600
1 – 2	20	240
2 – 4	30	360

3.1.3. Çimento ve Kireç

Deneysel çalışmada bağlayıcı olarak puzolanik çimento ve sönmüş toz kireç kullanılmıştır. Çimento, Oyak Çimento A.Ş.'nin TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak ürettiği CEM IV/B (P) 32,5 R-Puzolanik (Doğal) Çimento kullanılmıştır [58]. Kireç olarak ise Paksan-Adapazarı firmasının TS EN 459-1 standartlarında ürettiği CL 80S sönmüş kalsiyum toz kireci kullanılmıştır [59]. Çimento ve sönmüş toz kirece ait teknik özellikler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Puzolanik çimento ve kirece ait teknik özellikler.

Özellikler	CEM IV/B(P)	CL80S
Ca(OH) ₂	-	85
CaO	39,43	-
SiO ₂	33,95	1,29
Al ₂ O ₃	9,22	0,26
Fe ₂ O ₃	4,12	0,49
MgO	1,85	3,25
Na ₂ O	0,90	
K ₂ O	0,74	
SO ₃	2,36	0,65
Kızdırma Kaybı	5,77	
7. gün basınç d. (MPa)	22,9	
28. gün basınç d. (MPa)	35,2	
Özgül yüzey (cm ² /g)	5459	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,88	
İncelik <45µm (%)	1,80	

3.1.4. Karma Suyu

Bu çalışmada karışım suyu olarak Düzce şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento, hidrasyon ve katılma süreçlerinin ardından sertliğini kazanarak dayanımını elde eder. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda çimentonun hidrasyonu gerçekleşir. Beton veya harç yapımı esnasında çimento, agrega ve su karıştırılırken, suyun miktarı, kalitesi ve bileşimi son derece önemlidir.

Çizelge 3.4. Düzce şehir şebeke suyuna ait kimyasal özellikler [60].

Element/Parametre	Kimyasal Özellikler (mg/L)
Florür	-
Nitrat	-
Nitrit	0.05
Alüminyum	<0.10
Demir	0.17
Mangan	-
pH	7.6
Sülfat	-
Klorür	-
Amonyum	0.08
Bulanıklık (NTU)	Uygun
İletkenlik (mS/cm)	464 (17.6 °C)
Renk (birim)	Normal
Koku	Normal
Tat	Normal
Serbest Klor	0.32

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Harç Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Günümüz inşaat uygulamalarında yapıların dış kısmında kullanılan kaplamalarda bağlayıcı olarak yalnızca çimento kullanılırken, iç mekanlarda ise çimentonun yanında kireç ilavesi yapılmaktadır. Bu sebeple GCK ikameli harç üretiminde iki farklı grup karışım hazırlanmıştır. İlk grupta bağlayıcı olarak %100 çimento, ikinci grupta ise bağlayıcı olarak ağırlıkça %66,67 çimento ve %33,33 kireç içeren iki farklı harç karışımı tasarlanmıştır. Her iki grup karışımında, 1-2 mm ve 2-4 mm arası kum agregası hacimsel olarak %0, %25, %50 ve %100 oranlarında GCK agregası ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Her bir grup için referans seriler dâhil dört seri olmak üzere toplamda sekiz seri harç ve 72 adet prizma harç numunesi üretilmiştir.

3.2.1.1. Agregası ve GCK'nın Birim Hacim Ağırlıklarının Hesaplanması

Agregası ve GCK'nın birim hacim ağırlıklarının hesaplanabilmesi için; öncelikle kullanılacak kabın darası alınarak içine koyulan suyun ağırlığı 145 g olarak ölçüldü. Suyun yoğunluğu 1 g/cm³ olduğundan suyun hacmi, kütlesine eşit olarak 145 cm³ hesaplanmış oldu. Kabın iç hacmi ise aldığı suyun hacmine eşit olacağından 145 cm³ olarak belirlendi. Daha sonra kabın darası alınarak sırası ile elek aralıklarına göre kumlar tartıldı. Kaba koyulan kumların hacmi, kabın hacmine eşit olduğundan, buradan kullanılan kumların birim hacim ağırlıkları (BHA) hesaplanmıştır. Daha sonra aynı yöntem kullanılarak tane çaplarına göre GCK agregalarının BHA'ları hesaplanmıştır. Hesaplamalara ilişkin veriler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

$$d = m / V \quad (3.1)$$

Burada;

d : birim hacim ağırlık (g/cm³),

m : kütle (g),

V : hacim (cm³).

Çizelge 3.5. Kum agregası birim hacim ağırlık hesabı.

Elek Aralığı (mm)	Miktar (g)	BHA (g/cm ³)
0 – 1	217	1.50
1 – 2	205.20	1.42
2 – 4	213.25	1.47

Çizelge 3.6. GCK agregası birim hacim ağırlık hesabı.

Elek Aralığı (mm)	Miktar (g)	BHA (g/cm ³)
1 – 2	34.80	0.24
2 - 4	30.10	0.21

3.2.1.2. Kullanılacak Kum ve GCK Miktarının Hesaplanması

Bir seri için gerekli kum miktarı Çizelge 3.2’de 1-2 mm (240 g) ve 2-4 mm (360 g) olarak verilmiştir. GCK yalnızca 1-2 mm ve 2-4 mm kum malzemesi ile hacimce %100, %50, %25 ve %0 oranlarında ikame edileceği için; karışımlarda kullanılan kumun hacmi, BHA’larından faydalanılarak hesaplanmış ve elde edilen veriler Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Kum agregası hacim hesabı.

Elek Aralığı (mm)	Miktar (g)	BHA (g/cm ³)	Hacim (cm ³)
1 – 2	240	0.24	169
2 – 4	360	0.21	245

Çizelge 3.8. Kum ve GCK agregasının hacim ve ağırlık değerleri.

		KUM (%100)	KUM (%)	KUM (%50)	KUM (%75)
		GCK (%0)	GCK (%100)	GCK (%50)	GCK (%25)
HACİM (cm ³)	Kum ₁₋₂	169	0	84.5	127
	GCK ₁₋₂	0	169	84.5	42
	Kum ₂₋₄	245	0	122.5	184
	GCK ₂₋₄	0	245	122.5	61
AĞIRLIK (g)	Kum ₁₋₂	240	0	120	180
	GCK ₁₋₂	0	41	20	10
	Kum ₂₋₄	360	0	180	270
	GCK ₂₋₄	0	51	26	13

Karışım hesabı ağırlık üzerinden yapılacağı için GCK taneleri aynı elek aralığındaki kumlar ile hacimce %100, %50, %25 ve %0 yer değiştirdiğinden, bu hacimlere karşılık gelen GCK’ların ağırlıkları hesaplanmış ve Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Harç karışımlarında bağlayıcı/agrega (b/a) oranı literatür verileri ışığında 1/3 olarak

seçilmiştir. İlk grup harçların üretiminde bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılırken, ikinci grupta ise kireç/çimento oranı ağırlıkça 1/2 olarak alınmıştır. Harç serilerine ait kullanılan malzeme oranlarına ilişkin yapılan kodlama işlemi Çizelge 3.9’da verilmiştir. Yapılan ön deneme harçlarında her bir seri için kullanılacak agrega miktarının 1200 g olacağı tespit edilmiştir. Tercih edilen b/a oranı göz önünde bulundurularak harç serilerine ait karışım miktarları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Harç serilerine ait malzeme kullanım oranlarına ilişkin kodlama.

Numune Kodu	Malzeme İçeriği
ŞÇ	Ç + D
Ç25	Ç + %75 D + %25 GCK
Ç50	Ç + %50 D + %50 GCK
Ç100	Ç + %0 D %100 GCK
ŞKÇ	K + Ç + D
KÇ25	K + Ç + %75 D + %25 GCK
KÇ50	K + Ç + %50 D + %50 GCK
KÇ100	K + Ç + %0 D %100 GCK

D:Doğal agrega, Ç: Çimento, K: Kireç, GCK: genleştirilmiş cam küre

Çizelge 3.10. Harç serilerine ait ağırlıkça karışım miktarları.

Numune Kodu	Bağlayıcı (g)		Kum (g)			GCK (g)		Su (g)
	Çimento	Kireç	Elek Aralıkları (mm)					
			0-1	1-2	2-4	1-2	2-4	
ŞÇ	400	-	600	240	360	-	-	250
Ç25	400	-	600	180	270	10	13	250
Ç50	400	-	600	120	180	20	26	250
Ç100	400	-	600	-	-	41	51	250
ŞKÇ	267	133	600	240	360	-	-	250
KÇ25	267	133	600	180	270	10	13	260
KÇ50	267	133	600	120	180	20	26	270
KÇ100	267	133	600	-	-	41	51	270

3.2.2. Deney Ön Hazırlıkları ve Deney Programı

Harç karışımında kullanılacak malzemeler 1g hassasiyetli ve 2000 g kapasiteli Svoock marka terazide tartıldıktan sonra ayrı bir kapta harmanlanmış ve yaklaşık 2 dk süreyle UTEST marka harç mikserinde 125 rpm hız düzeyinde karıştırılmıştır. Kabin kenarlarına yapışan malzemelerin harmanlanması için harç karışımı 3 periyotta 30 saniye süresince ara verilerek karıştırılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.5. Harç serilerinin hazırlanması ve kullanılan harç mikseri.

Üretilen harç serileri üzerinde 7, 28 ve 56 gün yaşlarında farklı deneyler uygulanmıştır. Seriler üzerinde gerçekleştirilen deneyler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Harç serilerine uygulanan deney programı.

Yapılan Deneyler	Numune yaşı (gün)		
	7	28	56
FİZİKSEL ÖZELLİKLER			
Yoğunluk		+	
Birim Hacim Ağırlık		+	
Porozite - Su Emme		+	
Kılcal Yolla Su Emme		+	
Ultrases Geçiş Hızı	+	+	+
Isıl İletkenlik		+	
Su Buharı Geçirgenliği		+	
MEKANİK ÖZELLİKLER			
Eğilmede Çekme	+	+	+
Basınç Dayanım	+	+	+

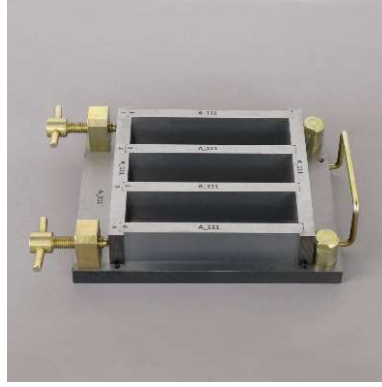
3.2.3. Taze Harç Deneyleri

Harç serilerinin yayılma çapı değerleri istenilen kıvamda ve işlenebilecek nitelikte sabit tutularak, karışım suyu miktarları değiştirilmiştir. ASTM C 109C 109M-98'e göre yayılma tablası ve kalıbı yardımı ile yayılma çapları mm olarak ölçülmüştür [61]. Deneye başlamadan önce yayılma tablasının üzeri hafif nemli bir bez ile temizlenmiş ve kesik koni tablanın ortasına Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Daha sonra kesik koni kalıbının içine iki aşamada harç doldurulmuş ve her aşamada 10 defa tokmaklanarak harcın kalıp içerisine yerleştirilmesi sağlanmıştır. Ardından koni kalıp kaldırılmış ve yayılma tablası 1.27 cm yükseklikten 15 kez düşürülmüştür. Yayılan harcın çapı ölçülerek 135 ± 5 mm yayılma değerini sağlayan harç karışımları için karışım su oranları belirlenmiştir. Yani bütün serilerdeki su miktarları, harçların kıvamını sabit tutacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Yayılma tablası deney aleti.

Yayılma tablası deney sonucu 135 ± 5 mm olan harç numuneleri $40\times 40\times 160$ mm ebatlı üçlü çelik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Numuneler kalıplardan kolayca çıkarılabilmesi için, kalıpların içi zeytinyağı ile yağlanmıştır. Üretilen taze harçlar önce yarısına kadar doldurulan kalıplar üzerinde 60 düşüş yaptırılarak iyice yerleşmesi sağlandıktan sonra geriye kalan kısmı da doldurularak tekrardan 60 düşüş daha yaptırılmıştır. Yayılan harçlardan arındırılarak üzerleri temizlenen kalıplar, nem kaybını önlemek için üzerleri cam ile kapatılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 3.7). Numuneler kalıpta bir gün bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve deney gününe kadar suda kürlenmiştir (Şekil 3.8). Her grubun numuneleri 5, 26 ve 54 gün kürede kaldıktan sonra çıkarılarak bir gün laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra (Şekil 3.8) sırasıyla 7, 28 ve 56 günlük deneylere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan üçlü prizmatik harç kalıbı.



a)



b)

Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan a) Şok masası b) Kalıpta bekletilen numuneler.



a)



b)

Şekil 3.9. a) Kürde bekletilen numuneler b) Etüvde kurutulan harç numuneleri.

3.2.4. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Harç serilerinde birim ağırlık, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık (yoğunluk), porozite, kütlece ve hacimce su emme, kılcal su emme, su buharı geçirgenliği, ısıl iletkenlik, ultrasonik ses geçiş hızı, eğilmeye çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.1. Birim Hacim Ağırlık (Görünür Yoğunluk)

Bir cismin birim hacim ağırlığı, kuru numune kütesinin görünür hacmine oranıdır. Görünür hacim ise boşlukları dahil numunenin dış yüzeyi ile sınırlı hacmidir. Şekilleri düzgün olmayan cisimlerde birim hacim ağırlık su emme deneyinden faydalanılarak yapılabilmektedir [62].

$$D_h = \frac{W_o}{W_1 - W_2} \quad (3.2)$$

Burada;

D_h : Birim hacim ağırlık (g/cm³),

W_o : Kuru numune kütesi (g),

W_1 : Suyu doymuş numune kütesi (g),

W_2 : Su içerisinde batırılmış numune kütesi (g),

$W_1 - W_2$: Görünür hacim (cm³)

Harç serilerine ait birim hacim ağırlık deneyleri TS 699 standardına göre 28 günlük basınç deneyinden ortaya çıkan numune parçaları üzerinde yapılmıştır [63]. Numune parçaları etüvde 70±5 °C'de kurutulup 15 kg tartım kapasiteli ±0,1 g hassasiyetle ağırlık ölçümü yapabilen terazide tartımı yapılarak 24 saat süreyle su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.9). Daha sonra tartımları yapılarak doymuş kuru yüzey ağırlıkları belirlenen numuneler ardından Arşimet terazisinde tartılmış ve su içindeki ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen değerler Denklem (3.2)'de yerine konularak hesaplamalar yapılmıştır.



a)

b)

c)

Şekil 3.10. a) Harç numunesi b) Suda bekletilen numuneler c) Arşimet terazisi.

3.2.4.2. Birim Ağırlık

Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde 7, 28 ve 56 günlük kür vaktinden sonra birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Bunun için deney gününden 1 gün öncesinde kürden çıkarılan numuneler hava dolaşımli etüvde 24 saat 105 ± 5 °C’de bekletilip, laboratuvar sıcaklığına ininceye kadar bekletildikten sonra tartılmıştır. Daha sonra kumpas yardımıyla hassas bir şekilde ölçüleri alınan prizmatik numunelerin hacimleri hesaplanmış ve ağırlıkların hacime bölünmesiyle numunelerin kuru birim ağırlıkları tespit edilmiştir.

3.2.4.3. Özgül Ağırlık (Gerçek Yoğunluk)

Bu deney piknometre prensibi ile TS 699 standardına göre yapılmıştır [63]. 28 günlük basınç deneyinden ortaya çıkan parçalar seramik havanda öğütülmüş ve 90µ’luk elek altında kalan toz malzeme tartılmıştır. Sonrasında La Chatelier balonuna gaz yağı doldurularak V0 hacmi cam üzerinden okunarak belirlenmiş, ardından yaklaşık 30-40 g öğütülerek elenen toz numune gaz yağı içeren La Chatelier balonuna dikkatlice boşaltılarak V1 hacmi cam üzerinden okunmuştur (Şekil 3.10). Daha sonra özgül ağırlık aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_o = \frac{W_o}{V_1 - V_0} \quad (3.3)$$

Burada;

D_o : Özgül ağırlık (g/cm^3),

W_o : Toz haline getirilen numune kütlesi (g),

V_0 : Gaz yağı hacmi (cm^3),

V_1 : toz numunenin katılmasıyla okunan hacim değeri (cm^3),

$V_1 - V_0$: W_o tarafından yeri değiştirilen sıvı hacmi (cm^3)’dir.



a)

b)

Şekil 3.11. a) Toz numunenin öğütülmesi. b) Le Chatelier balonu.

3.2.4.4. Porozite Deneyi

Porozite, numunenin açık gözenek hacminin numunenin görünür hacmine oranı şeklinde ifade edilmektedir. Birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığı deneysel metotla hesaplanmış harç numunelerinin, gözeneklilik derecesi yüzde olarak TS 699 standardına göre aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanmıştır [63].

$$P = \left(1 - \frac{D_h}{D_o}\right) \times 100 \quad (3.4)$$

Burada;

D_h : Birim hacim kütlesi (g/cm^3),

D_o : Özgül ağırlık (g/cm^3),

P : Porozite (%)’dir.

3.2.4.5. Kütlece ve Hacimce Su Emme, Deneyleri

Su emme deneyinde TS 699 standardı uyarınca harç numunelerinin önce kuru ağırlığı (W_o) ölçülmüştür [63]. Numuneler suda doymun hale gelinceye kadar 24 saat bekletildikten sonra 0.1 g hassasiyetiyle tartılmıştır (W_1). Bu işlemden sonra harç numuneleri Arşimet terazisinde tartılmıştır (W_2). Daha sonra aşağıdaki bağıntılar yardımı ile kütlece ve hacimce su emme oranları yüzde olarak hesaplanmıştır.

$$Sk = \left(\frac{W_1 - W_o}{W_o}\right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$Sh = \left(\frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Burada;

W_0 : Kuru kütle (g),

W_1 : Doygun kuru yüzey ağırlık (g),

W_2 : Su içindeki kütle (g),

S_k : Kütlece su emme oranı (%),

S_h : Hacimce su emme oranı (%)’dır.

3.2.4.6. Kılcal Yolla Su Emme (Kapilarite) Tayini

Kılcal yolla su emme tayini TS EN 1925 standardına göre yapılmıştır [64]. Taban çevresi 2-3 cm kalınlığında parafin kaplanarak su geçirmez bir şerit hale getirilen 28 günlük harç numuneleri, kare tabanlarından suyla temas edecek şekilde yerleştirilmişlerdir (Şekil 3.11). Yalnızca alt yüzeyleri su ile temas eden numuneler bir kronometre yardımı ile süre tutularak 1’den 13’e kadar her dakikanın katları şeklinde zaman dilimlerinde tartılmıştır (Şekil 3.12). Denklem (3.7) bağıntısı kullanılarak bu süreler boyunca ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak harç numunelerin kılcallık katsayısı bulunmuştur.



Şekil 3.12. Parafin kaplanarak deneye hazırlanan numuneler.



Şekil 3.13. Belirli aralıklarla tartılan numuneler.

$$N = \frac{m_1 - m_0}{A \times \sqrt{t}} \quad (3.7)$$

Burada;

N : Kılcallık katsayısı (kapilarite) (cm^2/dk),

m_0 : Numunenin tam kuru ilk ağırlığı (g),

m_1 : Numunenin belirtilen süreler sonundaki suda bekletilmiş ağırlığı (g),

A : Numunenin su ile temas eden taban alanı (cm^2),

t : Numunenin su ile temas süresi (dk)'dir.

3.2.4.7. Su Buharı Geçirgenlik Direnç Faktörü Tayini

Su buharı geçirgenlik deneyi, DIN 52615 standardında tanımlanan kuru kap yöntemine göre 28 günlük harç numuneleri üzerinde yapılmıştır [65]. Deney için 5 cm çapında, 2 cm kalınlığında, plastik disk formu kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.14). Öncelikle hazırlanan taze harç karışımı disk formu kalıplara dökülüp üzerleri düzleştirilmiştir (Şekil 3.14). Daha sonra 28. gün deney gerçekleştirilmek üzere kürede bekletilen numuneler 26. gün sudan çıkarılarak etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.15). Ardından yüksekliği 59.40 mm olan plastik kaplara 29.70 mm su koyulduktan sonra sertleşmiş harç numuneleri bu plastik kabın üzerine ortalanarak yerleştirilmiştir. Disk harç numuneleri ile plastik kap arasında hava alışverişini engellemek için bu bölgeler titizlikle parafin kaplanarak geçirimsiz hale getirilmiştir (Şekil 3.16). Sadece üst kısmından su buharı geçişine uygun hale getirilen harç numuneleri için su buharı geçirgenlik deneyi 20-23°C sıcaklıkta ve %60-65 bağıl neme sahip ortamda yapılmıştır. Deneyde mikrogram duyarlıklı hassas terazi kullanılmıştır. Harç numunelerinin ağırlık ölçümleri 17 gün boyunca, her gün aynı saatte,

aynı terazi ile yapılmıştır. Deney ölçüm süresinin 17 gün seçilme sebebi 17. günde su geçirgenlik miktarı değişiminin sabit hıza eriştiğinin tespit edilmesidir. Su buharı geçirgenlik direnç katsayısı (μ) Denklem (3.8) ile hesaplanmıştır. Bağlıdaki büyük parantez içinde yer alan bölümden elde edilen değer, su buharı difüzyonu bakımından eşdeğer hava tabakası kalınlığını metre cinsinden ifade etmektedir.



Şekil 3.14. Su buharı geçirgenliği ve termal iletkenlik deneyi için kullanılan disk kalıplar.



Şekil 3.15. Disk formunda taze harç numuneleri.



Şekil 3.16. Disk formunda sertleşmiş harç numuneleri.



Şekil 3.17. Su buharı geçirgenlik deneyi için hazırlanan numuneler.

$$\mu = \frac{1}{dort} \left(\Omega h \times A \times \frac{Pa}{G} - dH \right) (-) \quad (3.8)$$

Bağıntıda;

μ : su buharı difüzyonu direnç faktörü (-),

$dort$: Numunenin kalınlığı (m),

Ωh : Havanın su buharı difüzyon direnci (kg/msaat(N/m²)),

A : Su buharının geçtiği numune alanı (m²),

Pa : su buharı basınç değeri (N/m²),

G : Kararlı koşullarda numuneden geçen su buharı miktarı (kg/saat)'dir.

$$G = Fort / \text{Geçen süre (saat)} \quad (3.9)$$

$Fort$: numunelerin iki ölçüm arası su ağırlık farkları (kg),

dH : Numune altında kalan havanın kalınlığı (m)'dir.

$$\Omega h = \frac{0,083}{RBxT} \times \left(\frac{Po}{Ph} \right) \times \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (3.10)$$

Bağıntıda;

Ωh : Havanın su buharı difüzyon direnci (kg/msaat(N/m²))'dir

T : Hava sıcaklığı (°K),

Ph : Klima odasının deney sırasındaki ortalama hava basıncı (N/m²),

Po : Normal atmosfer basıncı (N/m²),

RB : su buharı gaz sabiti'dir.

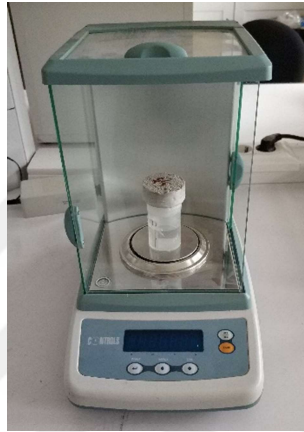
T : Ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

$\Psi(\%)$: nem miktarı,

Pa : su buharı basınç değeri (N/m^2),

Çizelge 3.12. Sıcaklığa ve neme bağlı doymun su buharı ve basınç değeri.

$T_{dış}(^{\circ}\text{C})$	$\Psi(\%)$	$P(\text{Pa})$	ωh
23	94	2808.4	7.026E-07

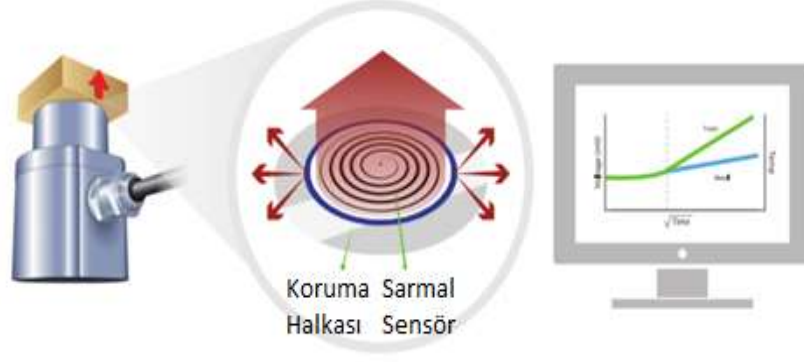


Şekil 3.18. Su buharı geçirimsizliği numune tartım düzeneği.

3.2.4.8. Isı İletkenlik Katsayısı Tayini

Harç numunelerinin termal iletkenlik katsayısı MTPS (Modified Transient Plane Source) tekniği ile ASTM D7984 standardına göre Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde C-THERM TCi marka termal iletkenlik cihazı ile tayin edilmiştir [66]. Deney için 5 cm çapında, 2 cm kalınlığında, plastik disk formu kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.14).

Ölçümü yapılacak malzemenin uygun bir yüzeyi (düz ve pürüzsüz) cihazın sensörü ile temas ettirilir ve cihaz sensör ile numune arasındaki sıcaklık etkileşiminden yola çıkarak malzemenin termal iletkenlik katsayısını (k) W/mK cinsinden belirler (Şekil 3.18). Cihaz modifiye edilmiş geçici düzlem kaynak (Modified Transient Plane Source-MTPS) tekniği prensibine göre çalışmaktadır [67].



Şekil 3.19. Termal iletkenlik deneyi çalışma prensibi.

Numune ölçümleri için kullanılan sarmal sensörün yapısı paslanmaz çelik gövde ve alüminyum malzemedendir. Aktif algılama bileşeni platin alaşımından yapılmış ve dielektrik cam ile kaplanmış durumdadır (Şekil 3.19).



Şekil 3.20. Termal iletkenlik deney aleti ve ölçüm düzeneği.

3.2.4.9. Ultrases Hızı Tayini

İnsanların duyabileceği ses titreşimleri 16-16.000 Hz arasında yer almaktadır. Frekansı 16.000'in üzerinde olan ve kulakla duyulamayacak ses dalgalarına "ultrases" denilmektedir. Bu dalgaların yayılabilmesi için cismin katı, sıvı veya gaz halde olması gerekmekte, aksi halde ultrases dalgaları boşlukta yayılmamaktadır [68].

Ultrases hızını saptayabilmek için; prizma şeklinde ve belirli bir L uzunluğunda numunenin bir ucuna ultrases üreten verici prob, diğer ucuna ise cismin içinden geçen ses dalgalarını toplayan alıcı prob yerleştirilmektedir. Alıcı prob tarafından toplanan ses dalgaları, cihaza aktarılarak, sesin iki uç arasından geçiş süresi mikrosaniye cinsinden hesaplanır (Şekil 3.20). Ultrases geçiş sürelerinin hesabı için TS EN 14579 standardına göre Denklem (3.11) kullanılmıştır [69].

$$v = l/t \quad (3.11)$$

Burada;

v : Ultrases geçiş hızı (km/s),

l : Ses hızının geçtiği numune boyu (mm),

t : Ses geçiş süresi (μ s)'dir.

Ultrases hızı deney metodu uygulanırken bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Bunların en önemlisi, alıcı ve verici problemlerin malzemeye temas ettikleri yüzeylerde boşluk kalmamasıdır. Ara yüzeyde bir boşluk bulunması durumunda ultrases dalgaları yansıyacağı için ses dalgalarının numunenin içine girmesi mümkün olmayacaktır. Bu nedenle boşluk kalmasını engellemek için alıcı ve verici ile malzeme yüzeyi arasına boşluğu dolduracak vazelin, sıvı sabun ve makine yağı gibi malzemelerin sürülmesi gerekmektedir [68-70].

Ultrases hızı deneyi sonucunda bulunan V hızı, malzemenin cinsi ve yapısal özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Ses dalgaları, yörüngelerinde bir boşluğu bulunması durumunda, bu boşluğu geçemeyerek çevresinden dolanırlar. Bu durum, malzemenin bir ucundan diğer ucuna ses geçiş süresinin uzamasına, dolayısıyla ses geçiş hızının azalmasına neden olmaktadır. Ses geçiş hızının çok düşük değerlerde olması, malzemenin yapısında çok fazla boşluk olduğunun göstergesidir [68].

Bu bilgiler ışığında, 7, 28 ve 56 günlük 4x4x16cm boyutundaki prizmatik numuneler üzerinde ultrases hızı deneyi yapılmıştır. Ölçümler Şekil 3.20 ve 3.21 'de gösterilen James Instruments marka V-Meter Ultrases cihazı yardımıyla 180 kHz'lik problemler ile tespit edilmiştir.



Şekil 3.21. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği.



Şekil 3.22. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı.

3.2.4.10. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Harç serilerinin mekanik özelliklerin belirlenmesi için; 40x40x160 mm boyutlarında üretilen 7, 28, 56 günlük numuneler üzerinde TS EN 196-1 standardına göre tek eksenli yük altında eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir [71]. Her seriden 3 adet numune kullanılmış ve bu sonuçların ortalaması dikkate alınmıştır.

- Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini;

7, 28 ve 56 günlük harç serileri üzerinde TS EN 196-1 standardına göre eğilmede çekme deneyleri yapılmıştır [71]. 100 mm aralığı olan iki noktaya mesnetlenen numunelerin orta kısmından 50 ± 10 N/s sabit hızla yük numune kırılıncaya kadar uygulanarak eğilme dayanımları bulunmuştur. Eğilme deneyinde, kapasitesi 50 kN olan Şekil 3.22’de verilen bilgisayar kontrollü çimento harç test presi kullanılmıştır.

$$R_f = (1,5 \times F_f \times I) / b^3 \quad (3.12)$$

Burada;

R_f : Eğilmede çekme dayanımı (MPa),

b : Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),

F_f : Prizma şekilli numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük (N),

I : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe (mm)’dir.



Şekil 3.23. Eğilmede çekme dayanımı deneyi yapılışı.

- Basınç Dayanımı Tayini;

Eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numunelerin her biri üzerinde TS EN 196-1 standardı uyarınca basınç dayanım deneyi yapılmıştır [71]. Yükleme, deney boyunca 2400 N/s sabit hızla uygulanır. Basınç deneyinde, kapasitesi 200 kN olan Şekil 3.23’de verilen bilgisayar kontrollü çimento harç test presi kullanılmıştır. Basınç dayanımları Denklem (3.13)’e göre hesaplanmıştır.

$$R = F / A \quad (3.13)$$

Burada;

R : Basınç dayanımı (MPa),

F : Kırılmadaki en büyük yük (N),

A : Plakaların yük uyguladığı harç numunesi yüzey alanı (mm^2)’dir.



Şekil 3.24. Basınç dayanımı deneyi yapılışı.

- Elastisite Modülü Tayini;

Bir malzemeye uygulanan kuvvet sonrası kuvvetin kaldırılmasıyla malzemenin eski haline geri dönebilen şekil değiştirmeye uğramasına elastik şekil değiştirme denir. Bu şekilde elastik şekil değiştirme limit değeri aşıldığı zaman ise malzemelerin büyük bir çoğunluğu eski haline dönmeyen plastik şekil değiştirmeye uğrar. Yapı malzemelerinin çoğunda elastik şekil değiştirme gerilmeyle doğru orantılı bir şekilde lineer olarak artar. Betonun sahip olduğu elastisite modülünün hesaplanması ile betonarme elemanların deformasyonları hesaplanabilir. Betonlarda elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında bağıntılar vardır. Bu bağıntılar yardımı ile malzeme deformasyona uğramadan önce yaklaşık olarak betonun dayanımı bulunabilir. Genel olarak elastisite modülü gerilme-deformasyon eğrisi yardımı ile, rezonans frekansı metodu ile ve ultrases metodu ile olmak üzere üç yöntem ile belirlenebilir.

Elastisite modülünün hesaplanmasında en doğru çözüm beton numunesine basınç uygulamak suretiyle numunede meydana gelen gerilme-deformasyonları kayıt etmektir. Daha sonra bu değerlerin kayıt edilmesiyle oluşan gerilme-deformasyon eğrisinde eğimin sabitlendiği herhangi iki nokta arasındaki okunan gerilmeler arasındaki farkın, yine bu iki nokta arasında okunan deformasyonlar farkına oranı ile elastisite modülü hesaplanır.

Harç numuneleri üzerinde 7, 28, 56 gün sonunda yapılan basınç dayanımı deneyi esnasında DOI programı yardımı ile plastik deformasyon öncesi uygulanan kuvvet ile oluşan gerilme ve deformasyon değerleri okunmuş ve excel formatında bu değerler kayıt altına alınmıştır. Daha sonra bu dökümanlardan faydalanarak gerilme deformasyon grafikleri bütün harç grupları için çizdirilmiş ve bu grafiklerde eğimin sabit olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Ardından bu bölge aralıklarında iki nokta seçilerek Denklem (3.14) yardımı ile elastisite modülleri her harç grubu için hesaplanmıştır.

$$E = (\delta_1 - \delta_2) / (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (3.14)$$

Burada;

E : Elastisite modülü (MPa),

$\delta_1 - \delta_2$: seçilen iki nokta aralığında uygulanan gerilme farkı (MPa),

$\epsilon_1 - \epsilon_2$: seçilen iki nokta aralığında meydana gelen deformasyon farkıdır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

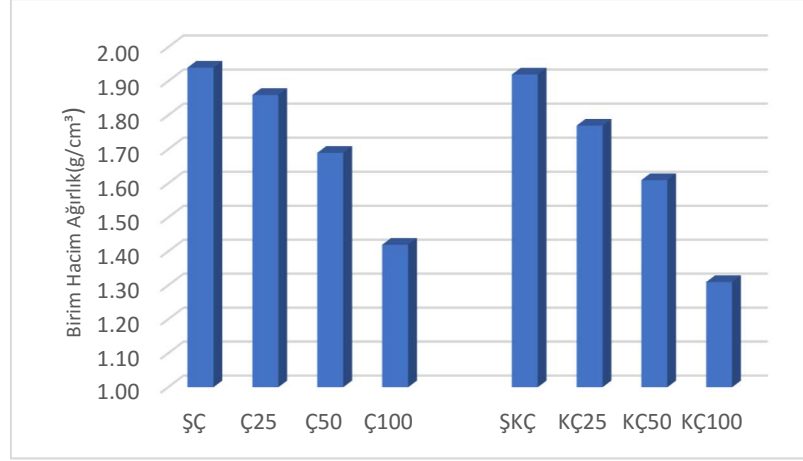
Genleştirilmiş cam küre hafif agregasının, tekli ve ikili bağlayıcı harç serileri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, üretilen harçların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

4.1.1. Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlık deneyleri 28 günlük basınç deneyinden ortaya çıkan parça numuneler üzerinde yapılmış ve elde edilen değerler Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, harç içerisinde GCK oranının artışıyla her iki grubun birim hacim ağırlıklarının belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum GCK’nın birim hacim ağırlığının doğal agregadan daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Ç grubunda en düşük ve en yüksek birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla Ç100 ve ŞÇ serilerinde elde edilmiştir. KÇ grubunda ise en düşük ve en yüksek değerlerin KÇ100 ve ŞKÇ serilerinde olduğu belirlenmiştir.

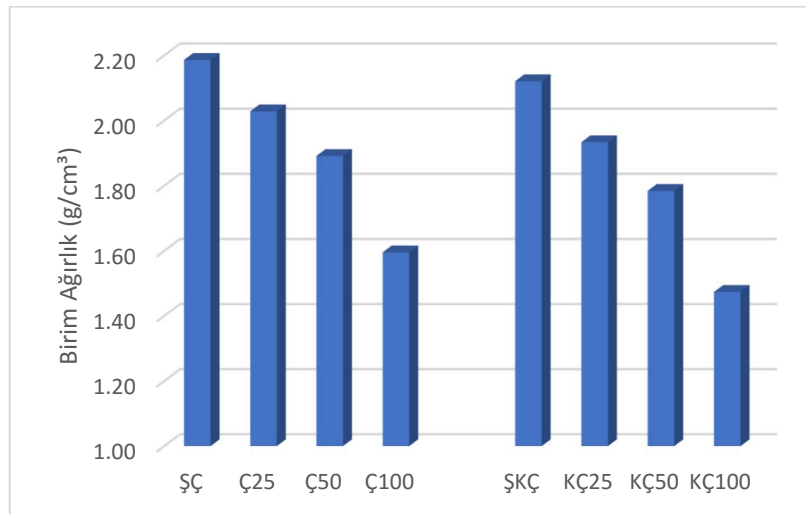
Her iki grup ele alındığında en düşük birim hacim ağırlığın 1.31 g/cm^3 ve en yüksek değer ise 1.94 g/cm^3 olarak sırasıyla KÇ100 ve ŞÇ serilerinde olduğu tespit edilmiştir. Ç grubunda %100 GCK agregalı serilerin (Ç100) birim hacim ağırlığı, referans seriden (ŞÇ) %27 daha az olduğu, KÇ grubunda ise bu değer %31 oranında olduğu tespit edilmiştir. Gruplar içinde aynı orana sahip seriler incelendiğinde, KÇ grubu harç serilerinde birim ağırlığın Ç serilerine göre ortalama %4 oranında daha az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Harç serilerine ait birim hacim ağırlık değerleri.

4.1.2. Birim Ağırlık

Birim ağırlık deneyleri 28 günlük 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde yapılmış ve elde edilen veriler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, harç içerisinde kullanılan GCK oranının artmasıyla tüm ikameli serilerin birim ağırlıklarının azaldığı görülmektedir. Ç grubunda en düşük ve en yüksek birim ağırlık değerleri sırasıyla Ç100 ve ŞÇ serilerinde elde edilmiştir. KÇ grubunda ise en düşük ve en yüksek değerlerin KÇ100 ve ŞKÇ serilerinde olduğu belirlenmiştir. Serilerin birim ağırlıklarındaki bu azalma, GCK’nın birim ağırlığının 0,24 g/cm³ ve doğal agreganın 1,4 gr/cm³ olmasıyla açıklanabilir. Ç grubunda referans seriye kıyasla Ç25, Ç50 ve Ç100 serilerinde birim ağırlıkların sırasıyla %5, %14 ve %27 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. KÇ grubunda ise referans seriye kıyasla KÇ25, KÇ50 ve KÇ100 serilerinde birim ağırlıkların sırasıyla %9, %16 ve %30 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

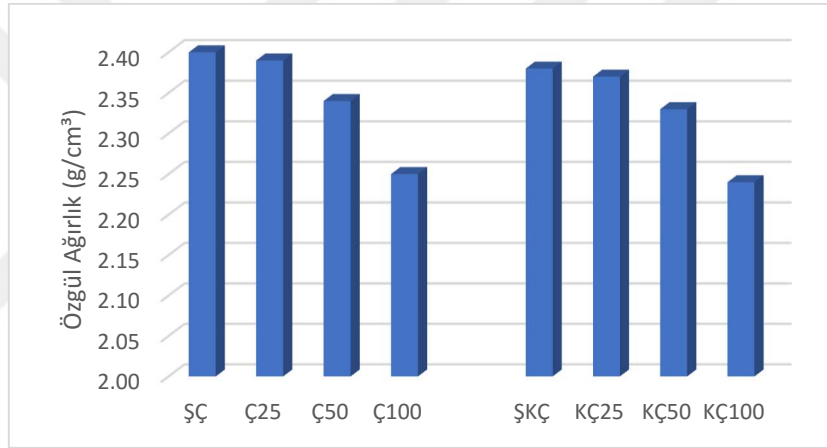


Şekil 4.2. Harç serilerine ait birim ağırlık değerleri.

Beton veya harç içerisinde hafif agregaya ikame edilerek yapılan çalışmalarda da birim ağırlık değerlerinin hafif agregaya miktarının artışıyla, ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir [46].

4.1.3. Özgül Ağırlık

Toz haline getirilen harç serilerinin, Le Chatelier balonu yardımıyla tespit edilen özgül ağırlık verileri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Özgül ağırlık verileri incelendiğinde, GCK'lı serilerin referans seriden daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Ç grubunda referans serisinde özgül ağırlık değerinin 2.40 g/cm^3 ve Ç100 serisinin 2.25 g/cm^3 olduğu, KÇ grubu referans serisinde 2.38 g/cm^3 ve KÇ100 serisinde 2.24 g/cm^3 olduğu saptanmıştır. Grafik incelendiğinde harç serilerinde GCK miktarının artmasıyla, özgül ağırlıkların azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Harç serilerine ait özgül ağırlık değerleri.

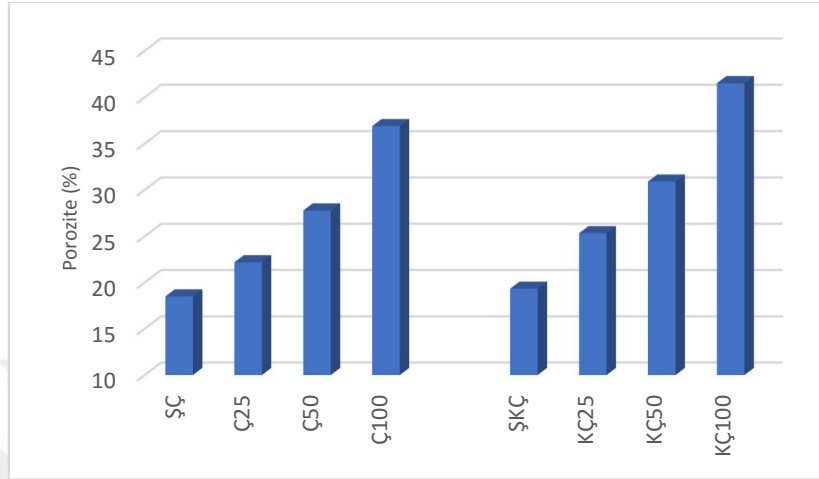
4.1.4. Porozite

Numunelerin boşluk hacminin toplam hacmine bölünmesiyle elde edilen porozite değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Her iki grup için GCK'lı serilerin görünür porozite değerlerinde referans serilere kıyasla belirgin oranda artış gözlenmiştir. Bu artış, yaklaşık %60-70 makro ve mikro boşluk oranına sahip GCK'nın doğal agregaya göre daha poroz bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir.

Ç grubu harçlarda porozite oranlarının %18.5 ile %37 arasında, KÇ grubu harçlarda ise %19 ile %42 arasında olduğu hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde çimento ve kireç bağlayıcılı serilerin porozite değeri sadece çimento bağlayıcısı kullanılan serilere nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum kirecin çimentoya göre daha gözenekli bir yapıya sahip olması ile açıklanabilir. Yapılan benzer çalışmalarda da porozite oranlarının

doğal veya yapay hafif agrega kullanımıyla arttığı görülebilmektedir.

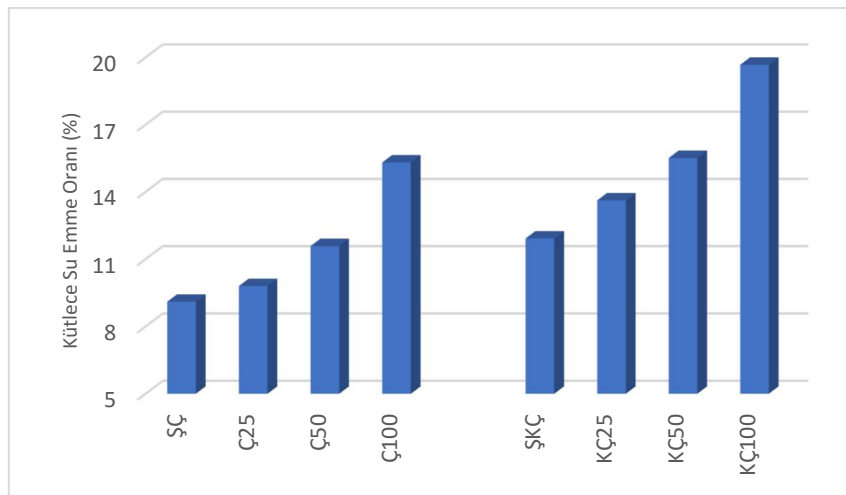
Benzer çalışmalarda da görülmüştür ki; beton veya harç içerisine doğal veya yapay hafif agrega ikamesiyle malzemedeki porozite oranlarının referansa kıyasla yüksek oranda artmaktadır [72].



Şekil 4.4. Harç serilerine ait porozite değerleri.

4.1.5. Kütlece ve Hacimce Su Emme

28 günlük numuneler üzerinde yapılan su emme deneyinin verileri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde harç içerisinde GCK miktarının artmasıyla doğru orantılı bir şekilde kütlece su emme oranının arttığı görülmüştür.

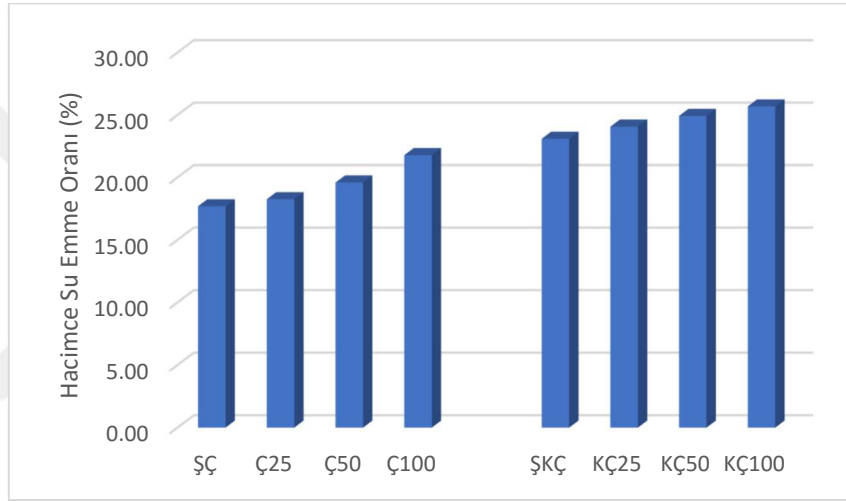


Şekil 4.5. Harç serilerine ait kütlece su emme değerleri.

Ç grubu harçlarda kütlece su emme oranlarının %9 ile %15.5 arasında, KÇ grubu harçlarda ise %12 ile %20 arasında olduğu hesaplanmıştır. GCK'nın harç içerisinde %25 kullanımıyla referans serilerinden Ç grubunda %7, KÇ grubunda ise %13 daha fazla su

emdiği tespit edilmiştir. GCK'nın %100 oranında ikamesinde ise bu oranlar Ç grubunda %41, KÇ grubunda ise %39 olarak hesaplanmıştır. Her iki grupta GCK oranları eşit olan seriler karşılaştırıldığında; %25 GCK içeren serilerde %28, %50 GCK içeren serilerde %25 ve %100 GCK içeren serilerde ise %22 oranında KÇ grubunun daha fazla suyu emdiği tespit edilmiştir.

Hacimce su emme oranları incelendiğinde Ç grubu harçlarda değerlerin %17 ile %22 arasında değiştiği, KÇ grubu harçlarda ise %23 ile %26 arasında yer aldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda gruplardaki aynı seriler karşılaştırıldığında, KÇ grubu harç serilerinin hacimce su emme değerleri Ç grubu harç serilerine oranla yaklaşık %22 oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır.



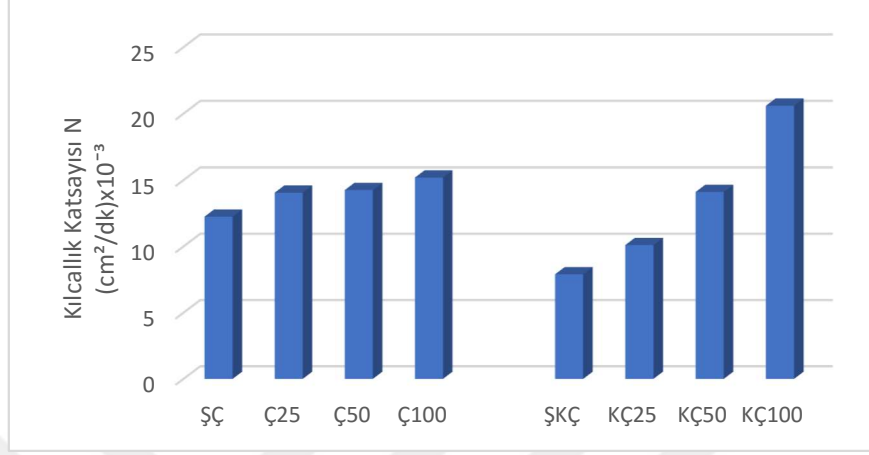
Şekil 4.6. Harç serilerine ait hacimce su emme değerleri.

4.1.6. Kılcal Yolla Su Emme (Kapilarite)

Kılcal yolla su emme davranışı; agrega-bağlayıcı(hamur) ara yüzü ve agregadaki kılcal boşluklar tarafından emilen su olarak belirtilmekte ve betonun veya harcın porozitesinden bağımsız tutulmaktadır. Hafif agregalarla harç veya beton üretilmesinde karşılaşılan en büyük sorun, yüksek poroziteli yapı ve büyük su emme oranlarının ortaya çıkmasıdır [73].

Şekil 4.7'deki grafik incelendiğinde, harç içerisinde kullanılan GCK miktarının artmasıyla doğru orantılı bir şekilde kılcallık katsayısı da artmaktadır. Bunun sebebi olarak tabii yapısındaki makro ve mikro boşluklara sahip genişletilmiş cam küre malzemesi gösterilebilir. Harç içerisinde GCK hafif agregası kullanımıyla, agrega-çimento ara yüzeyindeki hamur yapının porozitesi artmış buna bağlı olarak kapiler su emme de artmıştır.

Kılcallık katsayısının Ç grubunda 12×10^{-3} ile 15×10^{-3} arasında değiştiği KÇ grubunda ise 7.9×10^{-3} ile 20.5×10^{-3} arasında değiştiği belirlenmiştir. Referans seriler birbiriyle kıyaslandığında çimento bağlayıcılı serinin daha yüksek kapilariteye sahip olduğu görülmektedir.



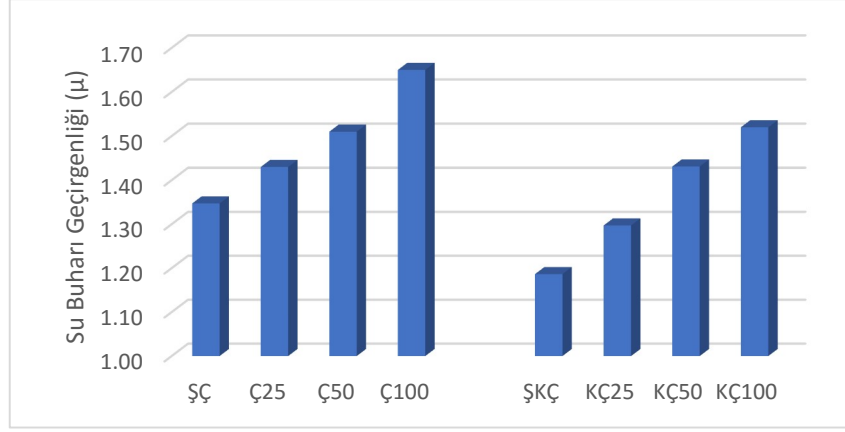
Şekil 4.7. Harç serilerine ait kapilarite değerleri.

Grafikte bir başka dikkat çeken özellik ise bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan grupta GCK miktarının artmasıyla kılcallık katsayısı artmakta, ancak belirgin bir artış gözlenmemektedir. Ancak bağlayıcı olarak kirecin kullanıldığı grupta ise GCK miktarı ile doğru orantılı olarak kılcallık katsayısının daha belirgin bir artış eğiliminde olduğu saptanmıştır.

Hafif agrega olarak pomzanın kullanıldığı bir çalışmada, üretilen betonlarda porozite ve kılcal su emme katsayısı arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki olduğunu ve porozitedeki artışla birlikte kılcal su emme katsayısının da arttığını belirtmiştir [74].

4.1.7. Su Buharı Geçirgenlik Direnç Faktörü

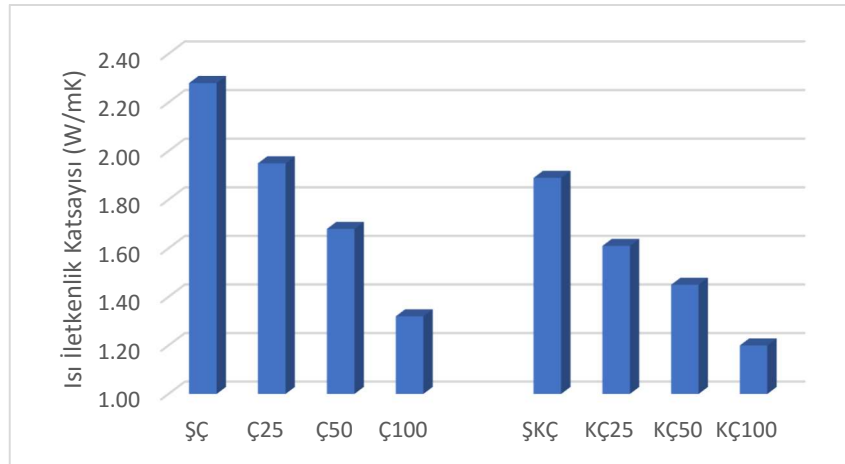
28 günlük disk formundaki numuneler üzerinde yapılan su buharı geçirgenlik deney sonucundan elde edilen veriler ışığında Şekil 4.8'deki grafik elde edilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, harç içerisinde kullanılan GCK miktarı ile doğru orantılı olarak su buharı geçirgenliği de artmaktadır. Aynı zamanda elde edilen bir başka sonuç ise, bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan gruptaki su buharı geçirgenliği bağlayıcı olarak çimento ile kirecin kullanıldığı gruptan belirgin bir şekilde daha yüksek değerler almıştır. Ç grubunda, su buharı geçirgenlik direnç faktörü değerlerinin 1.35 ile 1.65, KÇ grubunda ise 1.19 ile 1.52 arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Harç serilerine ait su buharı difüzyon direnç katsayıları.

4.1.8. Isı İletkenlik Katsayısı

Isı iletkenlik deneyi 28 günlük disk formundaki harç numuneleri üzerinde yapılmış ve elde edilen değerler Şekil 4.9’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde, Ç grubu harçlarda ısı iletkenlik katsayısı 1.3 W/mK ile 2.3 W/mK arasında, KÇ grubu harçlarda ise 1.2 W/mK ile 1.9 W/mK arasında olduğu belirlenmiştir. İki grubun tüm harç numunelerinde GCK miktarının artmasıyla, ısı iletkenlik katsayısı değerinin belirgin oranda azaldığı tespit edilmiştir. Büyük miktarda hapsolmuş hava içeren GCK’nın bu yapısı sayesinde numunelerin yalıtkanlık performansının arttığı görülmüştür. Referans serileri ile GCK miktarının %100 oranda kullanıldığı seriler ele alındığında; Ç grubu harç serilerinde ŞÇ ile Ç100 arasında ısı iletkenlik katsayısı %43 azalırken, KÇ grubu harç serilerinde ise ŞKÇ ile KÇ100 arasında %47’lik bir azalma olduğu hesaplanmıştır. Bağlayıcı olarak kirecin katıldığı harç serilerinin ısı iletkenlik değerlerinin, bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan serilere göre daha iyi ısı yalıtım özelliği gösterebileceği görülmüştür.



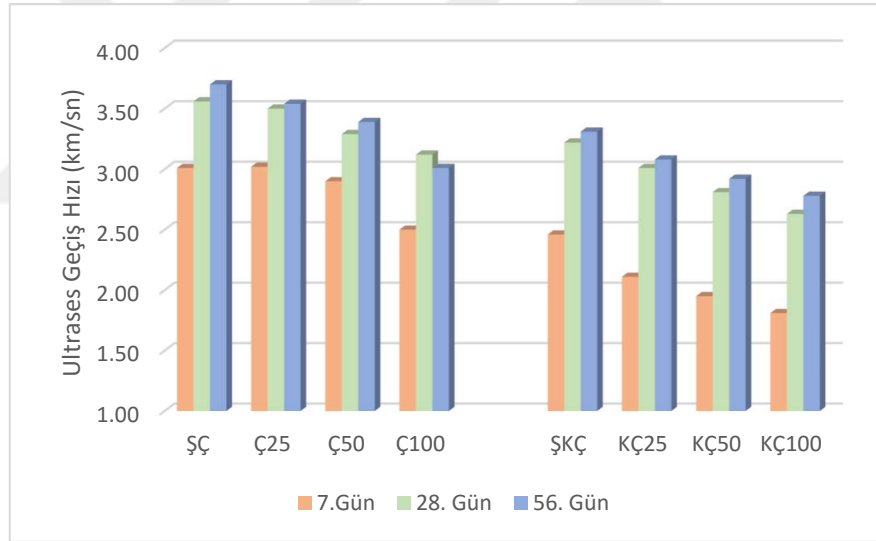
Şekil 4.9. Harç serilerine ait ısı iletkenlik katsayısı değerleri.

4.1.9. Ultrasonik Hız Ölçümü

Prizmatik numuneler üzerinde 7, 28 ve 56 gün yaşlarında gerçekleştirilen ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde harç serilerinde kullanılan GCK miktarının artmasıyla ultrases geçiş hızı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda harç numunelerinin yaşı ilerledikçe ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı ve bu artış eğiliminin 28 günlük harç numunelerinde daha fazla olduğu görülmüştür.

Beton veya harç içerisinde boşluk miktarının artmasıyla iletilen ses dalgaları boşlukların etrafından dolaşarak ilerleyeceğinden, boşluksuz malzeme formuna kıyasla geçiş süresi uzamakta, dolaylı olarak ses geçiş hızı ise azalmaktadır.

Şekil 4.10 incelendiğinde, harç içerisine bağlayıcı olarak kireç ilavesi ile birlikte ultrases geçiş hızı değeri, bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan harç karışımlarına kıyasla azalmıştır.



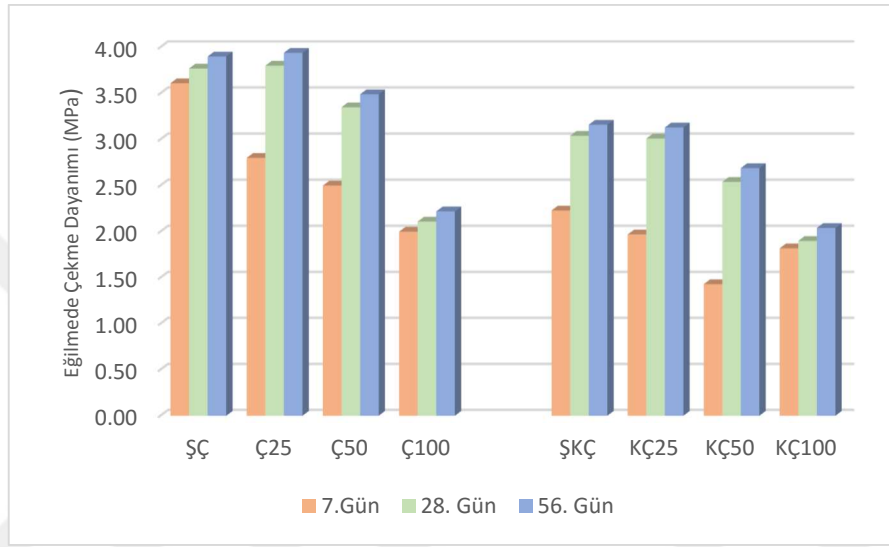
Şekil 4.10. Harç serilerine ait ultrases geçiş hızı grafiği.

4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER

Harç serilerinin mekanik özellikleri 4x4x16 cm prizmatik harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Elde edilen eğilme ve basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.

4.2.1. Eğilmede Çekme Dayanımı

Şekil 4.11'deki eğilmede çekme dayanımı grafiği incelendiğinde, her iki harç grubunda da GCK miktarının artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değeri azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak harç içerisinde kullanılan GCK hafif agregasının sahip olduğu makro ve mikro boşluklar ile hafif agreganın doğal agregaya kıyasla düşük tane dayanımına sahip olması ile açıklanabilir.



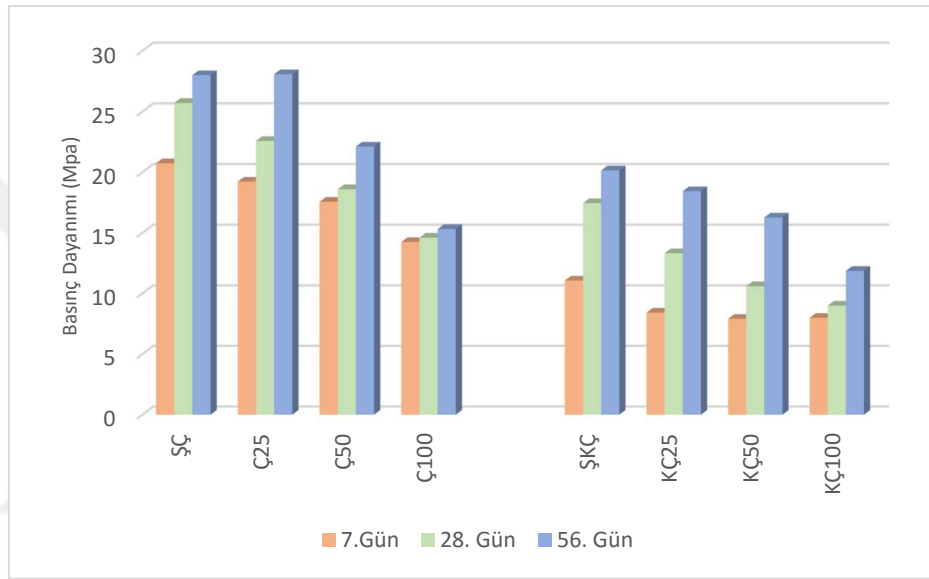
Şekil 4.11. Harç serilerine ait eğilme dayanımı grafiği.

Bununla beraber harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımı kapasitesi 7, 28, 56 gün aralığında artan bir eğilim göstermektedir. KÇ serilerinde Ç serilerine nazaran daha düşük eğilmede çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ancak tüm serilere ait veriler dikkate alındığında %100 GCK kullanılan hem çimentolu (Ç100) hem de çimento ve kireç bağlayıcılı (KÇ100) serilerin sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu bilgiler doğrultusunda harç içerisinde yüksek miktarda GCK kullanımıyla eğilmede çekme dayanımı üzerinde bağlayıcı farklılığının etkisinin az olduğu görülmüştür. Ancak harç içerisinde GCK ikamesinin hacimce %50'den fazla kullanıldığı Ç100 ve KÇ100 serilerinde görüldüğü üzere dayanımdaki düşüşün belirgin derecede arttığı gözlemlenmiştir.

Türkel ve Kadiroğlu pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, pomza katkılı hafif agregalı betonların normal betonlara göre daha düşük eğilme dayanımlarına sahip oldukları ve daha tok bir sesle ve daha gevrek bir şekilde kırıldığını gözlemlemiştir [75].

4.2.2. Basınç Dayanımı

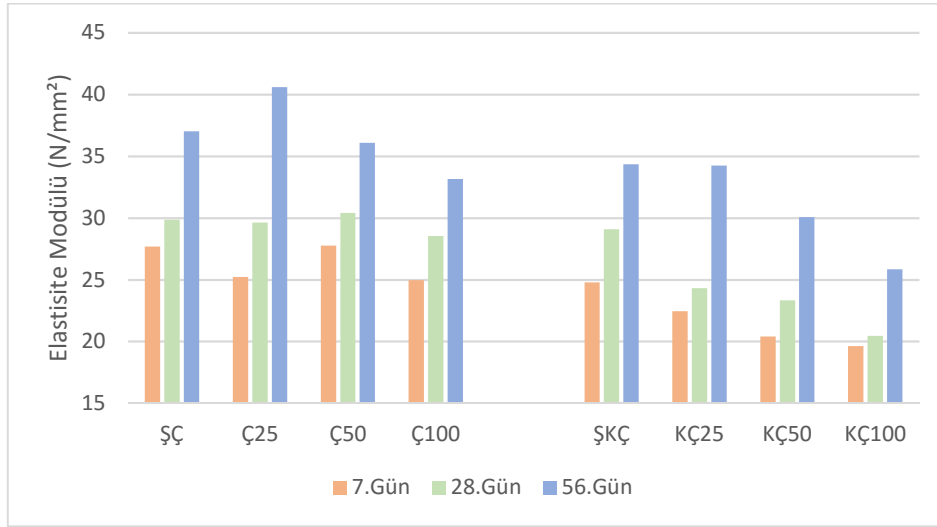
Şekil 4.12’de verilen basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, GCK miktarının artmasıyla ters orantılı olarak her iki harç grubunda da basınç dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte tüm serilerin 7, 28, 56 gün basınç dayanımı değerlerinde artan bir eğilim olduğu saptanmıştır. Harç serilerinin basınç dayanımı değerlerinin bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan serilerde daha fazla olduğu görülmüştür. Harç karışımlarında bağlayıcıda 1/3 oranında kireç kullanılan serilerde, basınç dayanımının da 1/3 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Harç serilerine ait basınç dayanımı grafiği.

Literatür bilgileri ışığında, harç veya beton içerisinde hafif agreganın kullanılmasıyla birlikte eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Hafif agreganın içeren bir çalışmada beton içerisine belirli oranlarda perlit ikame edilmiş ve 28 gün sonunda basınç ve eğilme dayanımlarında azalmalar elde edilmiştir. Bu azalmanın sebebi olarak kullanılan perlit agregasının hafif ve gözenekli yapıya sahip olduğundan dolayı beton içerisinde kullanılmasıyla betonun içindeki boşluk miktarını artırması olarak belirtilmiştir [76].

4.2.3. Elastisite Modülü



Şekil 4.13. Harç serilerine ait elastisite modülü grafiği.

7, 28 ve 56 günlük harç numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi sonrasında ortaya çıkan gerilme deformasyon grafiğinden faydalanılarak bulunan elastisite modülleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan serilerde şahit numunesine (ŞÇ) nazaran en iyi elastisite modülü performansını %25 GCK ikameli numunelerin (Ç25) sergilediğini söyleyebiliriz. ŞÇ ile Ç25 serilerine ait elastisite modülü değerleri incelendiğinde; 28 günlük numunelerde değer eşit çıkmakta, 56 günlük numunelerde ise Ç25 serisi ŞÇ'ye göre %9 daha yüksek değer almıştır. Bununla beraber 7, 28, 56 günlük numunelerin elastisite modülü değerleri ŞÇ ile Ç50 serilerinde hemen hemen aynı değerde hesaplanmıştır. Buradan yola çıkarak bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan serilerde %50 GCK ikamesi ile standart harç numunesine göre hemen hemen aynı elastisite modülü değerleri elde edilebilirken %25 GCK ikamesi ile daha da yüksek elastisite modülü değerleri elde edilebilmektedir.

Bağlayıcı olarak çimentonun yanında kireç kullanılan serilerde şahit numunesine (ŞKÇ) nazaran en iyi elastisite modülü performansını %25 GCK ikameli numunelerin (KÇ25) sergilediğini söyleyebiliriz. ŞKÇ ile KÇ25 serileri incelendiğinde; 7. ve 28. gün sonundaki elastisite modülü değerlerinde ŞKÇ daha yüksek değer alırken, 56. gün sonunda ise elastisite modülü değeri hemen hemen eşitlenmektedir. Bu grupta genel olarak GCK ikamesi oranının artmasıyla elastisite modülü değeri düştüğü söylenebilir, ancak %25 GCK ikamesi ile fazla bir kaybın yaşanmadığı hatta 56 günden sonra eşit performans sergilediği görülmüştür.

Genel olarak bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan grupların elastisite modülü değerinin, bağlayıcı olarak çimentonun yanında kirecin de kullanıldığı gruba göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Genleştirilmiş cam küre (GCK) agregasının ikame edilmesiyle üretilen harç numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda harçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş, elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

5.1. SONUÇLAR

- GCK'nın sahip olduğu düşük yoğunluk ve yüksek poroz yapısından dolayı harç içerisinde kullanım miktarı ile ters orantılı olarak her iki grupta da birim hacim ağırlıkların azaldığı ve referans serilerinden ortalama %30 daha düşük olduğu görülmüştür.
- Harç serileri birim ağırlıkları bakımından ele alındığında ise genleştirilmiş cam küre agregası, yüksek ısıda oluşan gözenekli yapısı sayesinde normal agregalardan daha düşük birim ağırlığına sahiptir. Bu sebepten dolayı harç içerisinde GCK kullanım oranı arttıkça, üretilen harçların birim ağırlıkları lineer olarak azalmaktadır.
- Tüm seriler incelendiğinde, Harç içerisinde GCK kullanım miktarıyla doğru orantılı olarak porozite, kütlece ve hacimce su emme oranlarının artmış olduğu belirlenmiştir. GCK kullanımına bağlı olarak artan porozite değeri, yaklaşık %60-70 makro ve mikro boşluk oranına sahip GCK'nın doğal agregaya göre daha poroz bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir. GCK ikamesi ile yapısındaki boşluk hacmi artan harç numunelerin kütlece ve hacimce su emme oranlarının artması poroziteyle bağlantılı beklenen bir sonuçtur. Hafif agregalarla harç veya beton üretilmesinde karşılaşılan en büyük sorun, yüksek poroziteli yapı ve büyük su emme oranlarının ortaya çıkmasıdır.
- Harç içerisinde kullanılan GCK miktarının artmasıyla doğru orantılı bir şekilde kılcallık katsayısının ve su buharı geçirimsizliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan gruptaki harçlarda GCK oranının artmasıyla kapilarite değerlerinde artış eğiminin doğrusala daha yakın olduğu, diğer grup harçlarda ise bu eğimin daha belirgin olduğu görülmektedir. Su buharı geçirimsizliği

incelendiği zaman, her iki grup harç serilerinde de %100 GCK ikamesi ile referans serilere nazaran yaklaşık %20 daha fazla su buharı geçişi gözlenmiştir.

- GCK ile hazırlanan harç numunelerinde farklı bağlayıcı kullanılan iki grupta da harç içerisinde kullanılan GCK miktarının artmasıyla, ısı iletkenlik katsayısının belirgin oranda azaldığı tespit edilmiştir. Büyük miktarda hapsolmuş hava içeren GCK'nın bu yapısı sayesinde numunelerin yalıtkanlık performansının arttığı görülmüştür.
- Harç numuneleri üzerinde yapılan ultrasonik hız ölçümü değerleri incelendiğinde, GCK miktarının artmasıyla ters orantılı olarak ultrases geçiş hızı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Harç içerisinde kullanılan GCK miktarının artmasıyla harç içerisindeki boşluk miktarının artması sonucu ses dalgaları bu boşlukların içinden geçemeyeceği için boşlukların etrafından dolaşacak şekilde yol izlemektedir. Böylelikle ses dalgalarının aynı mesafeyi kat etmesi için gereken süre uzayacağı için ses geçiş hızı değerleri de dolaylı olarak azalmaktadır. Aynı zamanda harç numunelerinin yaşı ilerledikçe ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı ve bu artış eğiliminin 28 günlük harç numunelerinde daha fazla olduğu görülmüştür.
- Harç içerisinde kullanılan GCK miktarının artışıyla serilerin mekanik dayanımlarında azalmalar saptanmıştır. Mekanik özelliklerdeki bu azalma, harç içerisinde kullanılan GCK hafif agregasının sahip olduğu makro boşluklardan dolayı doğal agregaya kıyasla düşük tane dayanımına sahip olması ile açıklanabilir. Basınç ve eğilme dayanımı verileri incelendiğinde, %25 GCK'lı serilerde belirgin bir azalmanın olmadığı ancak GCK'nın %50 ve %100 kullanımında dayanımların yaklaşık olarak %45 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte tüm serilerin 7, 28, 56 gün eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde artan bir eğilim olduğu saptanmıştır. Bağlayıcının 1/3 oranında kireç ikame edildiği serilerde, basınç dayanımının da 1/3 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Eğilme dayanımlarında da kireç bağlayıcılı grupta yaklaşık aynı oranlarda dayanımda azalma gerçekleşmiştir.
- Bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan serilerde %50 GCK ikamesi ile referans numunesine göre benzer elastisite modülü değerleri elde edilirken, %25 GCK ikamesi ile daha da yüksek elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak çimentonun yanında kireç kullanılan serilerde referans numunesine nazaran en iyi elastisite modülü performansını %25 GCK ikameli numuneler sergilemiştir. Genel olarak harç içerisinde kullanılan kum hacminin %25'i yerine GCK ikamesi ile elastisite modülü performansının etkilenmediği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda

bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan grupların elastisite modülü değerinin, bağlayıcı olarak çimentonun yanında kirecin de kullanıldığı gruba göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.

5.2. ÖNERİLER

- GCK'nın sahip olduğu düşük yoğunluk sebebiyle uygulamada geleneksel harçlardan ziyade GCK ikamesi ile üretilen harçlar kullanılarak yapının zati yükün azaltılabilmesi mümkündür.
- GCK gibi hafif agregalar beton ve harç içerisinde kullanılarak yapıdaki sabit yükler azaltılabilmekte ve yapıya etkiyecek deprem kuvveti indirgenerek taşıyıcı elemanların kesitleri azaltılarak yapı maliyeti düşürülebilecektir.
- GCK'nın harç içerisinde kullanım oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısının azaldığı görülmüştür. GCK'lı harçların üstün ısı yalıtım özelliklerinden dolayı yapılarda yalıtım plakası kullanılmadan doğrudan GCK'lı sıvanın iç ve dış mekanda kullanılmasıyla geleneksel mantolama uygulamalarıyla benzer sonuçlar elde edilebilir.
- GCK oranının yüksek oranda kullanıldığı harç numunelerinde su buharı geçiş hızı da yüksek çıkmıştır. Buradan görüldüğü gibi GCK ikameli harçların kullanılmasıyla yapının yapının nefes alabilirliği geleneksel harçlara kıyasla artmaktadır.
- Geleneksel yalıtım uygulamalarında yalıtım elemanı ile duvar arasında tam bir yapışma sağlanamadığından aradaki boşluklar su ile dolmakta ve zaman içerisinde nem ve küf oluşumuna zemin hazırlamaktadır. GCK'lı harçların kullanıldığı yapı elemanlarında nefes alabilirlik daha yüksek olacağı için bu sorunun ortadan kaldırılacağı düşünülmektedir.
- GCK'lı harçların buhar geçirgenliğinin yüksek olması sebebiyle, kullanımıyla birlikte yapıların iç mekân duvarlarında oluşabilecek yoğuşmanın azalacağı söylenebilir.
- GCK'nın mikro gözenekli yapısından dolayı donma-çözünme olaylarında büzülme ve genişleme potansiyelini kısıtlayacağı öngörülmektedir.
- Ülkemizde GCK agregası ile yapılan çalışmalar sadece asfalt yolların şeritlendirilmesinde cam küreciklerin kullanılmasından ibarettir. Bu çalışma hafif agrega olarak GCK'nın kullanılması konusunda bir yapı taşı niteliğinde olup, ileriye yönelik araştırma geliştirilerek ülke ekonomisine katkı sağlaması düşünülen bir konudur. Bu bağlamda ülkemizdeki cam fabrikalarında bile GCK üretimine öncülük edilebilir nitelik taşıyabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Y. Aruntaş, M. Dayı, İ. Tekin, R. Birgül, O. Şimşek, “Kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine atık mermer tozunun etkisi,” *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Semp.*, Ankara, 2007, ss. 173-180.
- [2] M. U. Toprak, “Agrega tane boyunun betonun yapısal ve ısı özelliklerine etkisi,” *8.Uluslararası Kırmataş Sempozyumu*, Kütahya, Türkiye, 2016, ss. 330-341.
- [3] H. Y. Ersoy, *Kompozit Malzeme*, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayınevi, 2001, ss. 20-21.
- [4] S. H. Kosmatka, M. L. Wilson, “Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials,” Portland Cement Association, 2011.
- [5] S. Chandra and L. Berntsson, *Lightweight Aggregate Concrete*, U.S.A: Noyes Publications, 2003, ss. 430.
- [6] *Hafif Agregalar*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 13055, 2016.
- [7] T. Y. Erdoğan, *Beton*, Ankara, Türkiye: METU Yayınları, 2003.
- [8] ACI Committee Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI, 213R-03, 2003.
- [9] T. A. Holm & T. W. Bremner, “State-of-art-report on high-strength, highdurability structural low-density concrete for applications in severe marine environments,” U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 2000.
- [10] A. E. Fiorato, “Inspection guide for reinforced concrete vessels,” Final Report, Portland Cement Association, Commentary, U.S. Department of Transportation, c. 2, sayı CG-M ss. 11-81, 1981.
- [11] İ. Topçu, “Hafif beton özelliklerinin kompozit malzeme olarak incelenmesi,” Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1988.
- [12] O. Şimşek, *Yapı Malzemesi*, İstanbul, Türkiye: I. Beta Basım Yayım A.Ş., 2000, ss. 146.
- [13] S. Chandra and L. Berntsson, *Lightweight Aggregate Concrete*, William Andrew Publishers, 2002.
- [14] C. R. Cheeseman, G. S. Viridi, “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash,” *Resources, Conservation and Recycling*, sayı 45, ss. 18–30, 2005.
- [15] M. Davraz, L. Gündüz, “Isparta yöresi pomza taşının hafif yapı elemanı olarak değerlendirilmesi üzerine bir analiz,” *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, Isparta, Türkiye, 1997, ss. 61-70.
- [16] S. Mindess, J. F. Young, “Concrete,” *Englewood Cliffs*, NJ: Prentice Hall. 1987.

- [17] N. Şapçı, “Aksaray bölgesi volkanik hafif agrega oluşumlarının incelenmesi ve endüstriyel kullanılabilirliği,” Yüksek lisans tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [18] B. B. Sabir, S. Wild and J. Bai, “Metakaolin and calcined clays as puzzolans for concrete,” *A review, Cement & Concrete composites*, sayı 23, ss. 441-454, 2001.
- [19] Anonim, “Pulverised fuel ash-PFA (Lytag),” Technical Report, USA, ESCSI, ss. 7, 2000
- [20] Anonim, “A technical report on the leightweight expanded clay aggregates (LECA),” *ESCSI, USA*, ss.125, 2000.
- [21] Anonim, “Lightweight aggregates (LWA)-General information,” Technical report. *ESCSI, USA*, ss.7, 2000.
- [22] A. Çevikbas, F. Iğün, “Türkiye pomza yataklarının jeolojisi ve ekonomisi,” *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, Isparta, Türkiye, 1997.
- [23] F. Özbayoglu, A. Gürel, “Nevşehir pomzalarının puzolonik maddeler katkısı ile yol stabilizasyonunda kullanılması,” *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, Isparta, Türkiye, 1997.
- [24] H. Y. Aruntaş, “Diatomit özellikleri kullanım alanları ve inşaat sektöründeki yeri,” *Çimento ve Beton Dünyası*, c. 1, sayı 4, ss. 27-32, 1996.
- [25] N. Açıkalın, *Türkiye’de ve Dünya’da Diatomit*, Ankara, Türkiye: MTA Genel Müd. F.E.D., 1991.
- [26] A. Bircan, *Türkiye Diatomit Envanteri*, Ankara, Türkiye: MTA Yay. No. 138, 1968.
- [27] Z. Mete, “Kimi batı anadolu diatomit yataklarının özelliklerinin incelenmesi ve kullanım alanlarının araştırılması,” Doçentlik tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Müh. Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 1982.
- [28] İ. Türkmen and A. Kantarcı, “Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete,” *Building and Enviroment*, c.46, sayı 6, ss. 2378-2383, 2006.
- [29] O. Kayali and B. Zhu, “Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Lightweight Aggregate High Strength Fly Ash Concrete,” *Construction and Building Materials* sayı 19, ss. 327-336, 2004.
- [30] İ. B. Topcu, “Semi-Lightweight concretes produced by volcanic slags,” *Cement And Concrete Research*, sayı 27, ss. 15-21, 1997.
- [31] H. Al-Khaiat, M. N. Haque, “Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete,” *Cement and Concrete Research*, sayı 28, ss. 859-866, 1998.
- [32] E. Yasar, C. D. Atis, A. Kilic, H. Gulsen, “Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash,” *Materials Letters*, sayı 57, ss. 2267-2270, 2003.
- [33] S. Gökçe ve Ö. Can, “Pomza agregasının farklı zamanlardaki su emmelerinin hafif betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi,” *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, c. 12, sayı 4, 2009.

- [34] S. Subaşı, A. Beycioğlu ve M. Emiroğlu, “Genleştirilmiş kil agregalı hafif betonlarda bulanık mantık yöntemiyle yarmada çekme dayanımı tahmin modeli geliştirilmesi,” *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 22, sayı 3, 2009.
- [35] S. B. Fındık, “Yüksek sıcaklık etkisinde kalan mineral katkı ve genleştirilmiş perlit agregalı harçların bazı özellikleri,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2007.
- [36] M. Aytakin, “Sepiyolit içeren çimento esaslı bağlayıcılarla üretilen harçların işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye, 2018.
- [37] J. Gadea, A. Rodríguez, P. L. Campos, J. Garabito, V. Calderón, “Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam,” *Cement And Concrete Composites*, c. 32, sayı 9, ss. 672-677, 2010.
- [38] R. Bartolini, S. Filippozzi, E. Princi, C. Schenone, S. Vicini, “Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin,” *Applied Clay Science*, c. 48, ss. 460-465, 2010.
- [39] A. V. Uglyanitsa, N. V. Gilyazidinova, A. A. Zhikharev, A. A. Kargin, “Study of reinforcement corrosion in expanded clay concrete,” *HBRC Journal*, c. 11, sayı 3, ss. 307-310, 2014.
- [40] J. A. Bogas and A. Gomes, M. F. C. Pereira, “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate,” *Construction and Building Materials*, c. 35, ss. 1013-1022, 2012.
- [41] K. H. Yang, G. H. Kim, Y. H. Choi, “An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 55, ss. 431-439, 2014.
- [42] T. Y. Lo, H. Z. Cui, W. C. Tang, W. M. Leung, “The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete,” *Construction and Building Materials*, c. 22, ss. 623-628, 2008.
- [43] T. Uygunoğlu, O. Ünal, “Diyatomitin hafif blok üretiminde kullanılması,” *Politeknik Dergisi*, c. 9, sayı 1, ss. 65-70, 2006.
- [44] D. Kramar, V. Bindiganavile, “Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate,” *Materials and Structures*, c. 44, sayı 4, ss. 735-748, 2011.
- [45] S. B. Park and B. Chun, “Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers,” *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 7, ss. 1145-1152, 2004.
- [46] M. Emiroğlu, “Sepiyolit harç ve beton özelliklerine etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2008.
- [47] D. Hasol, *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*, İstanbul, Türkiye: Yem Yayınları, 1988, ss. 296.
- [48] Satongar, L., “İstanbul şehir surları horasan harçları üzerine bir araştırma,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1994.

- [49] Palomo, A., Blanco-Varela, M., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Fortes, C., Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research. (2011, 31 Mayıs). [Online]. Erişim: http://www.arcchip.cz/w09/w09_palomo.pdf.
- [50] Kurugöl, S., “Eski mimarilerde kullanılmış olan kireç harçlarının genel özellikleri,” *Yapı Dünyası*, ss. 19-24, 2006.
- [51] S. Noğay, *Yapı Gereçleri, Tanım, Özellik, Çeşitleri*, Ankara, Türkiye: Uzman Matbaacılık, 1984.
- [52] O. Şimşek, *Yapı Malzemesi II, 1. Baskı*, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2007.
- [53] E.C Adams, *Yapı Bilgisi 3*, Yükseköğretim Kurulu Yayını, 1993, ss. 82-83.
- [54] N. Bayülke, *Yığma Yapılar Taş ve Tuğla*, Ankara, Türkiye: TMMOB İMO Ankara Şubesi, 2013, ss. 27-28.
- [55] N. Şengün, “Pomzanın hafif harç yapımında endüstriyel hammadde olarak kullanımı,” Yüksek lisans tezi, Maden Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2004.
- [56] The Stikloporas website. (2019, 18 Ocak). [Online]. Erişim: <http://stikloporas.lt/eng/Downloads>.
- [57] *Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*, Türk Standartları Enstitüsü, TS 802, 2016.
- [58] *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 197-1, 2002.
- [59] *Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 459-1, 2011.
- [60] Düzce Belediyesi Website. (2019, 14 Nisan). *Düzce Belediyesi Su Kalitesi Raporu Mart 2019*. [Online]. Erişim: <http://www.duzce.bel.tr/detay.asp?id=36860>.
- [61] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C 109C 109M-98, 2016.
- [62] *Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1015-10, 2001.
- [63] *Tabii yapı taşları-Muayene ve deney metotları*, TS 699, 2009.
- [64] *Doğal taşlar- Deney metotları- Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1925, 2000.
- [65] *Testing Of Thermal Insulating Materials; Determination Of Water Vapour Permeability Of Construction And Insulating Materials*, DIN 52615, 1987.
- [66] *Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument*, ASTM D7984 – 16, 2016.
- [67] C-THERM Website. (2019, 04 Ocak). [Online]. Erişim: https://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/how_the_tci_works/mtps/.
- [68] B. Postacioğlu, “*Cisimlerin yapısı ve özellikleri-içyapı ve mekanik özellikler*,” İstanbul, Türkiye: İTÜ Matbaası, 1981, c. 1.
- [69] *Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Ses hızı ilerlemesinin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 14579, 2006.

- [70] J. Bungey, S. Millard, M. Grantham, *Testing of Concrete in Structures*, New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006.
- [71] *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 196-1, 2016.
- [72] B. Balun, “Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen harçların mekanik ve durabilite özellikleri,” Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2013.
- [73] M. Uyan, “Beton ve harclarda kılcallık olayı,” Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye 1975.
- [74] T. Gönen, “Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun mekaniksel ve durabilite özelliklerinin araştırılması,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2009.
- [75] S. Türkel, B. Kadiroğlu, “Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 13, sayı 3, ss. 353-359, 2007.
- [76] R. Doğmuş, “Hafif agregalar kullanılarak yalıtım özelliği yüksek duvar yapı malzemelerinin geliştirilmesi, ısı ve ses performanslarının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Burak AKTÜRK
Doğum Tarihi ve Yeri :20.11.1990 / İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce ve Almanca
E-posta :burakakturk90@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	İnşaat Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Harita Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise		Oğuzkaan Koleji	2009

YAYINLAR

B. Aktürk, M. Dayı, “Genleştirilmiş Cam Küre Agrega Katkılı Harçların Bazı Özelliklerinin İncelenmesi,” *III. International Engineering Research Symposium (INERS)*, sunulmak üzere kabul edildi, Düzce, Türkiye, 2019.