



**GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALI TAŞIYICI
HAFİF BETONLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mustafa USLU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı
Doç. Dr. İlker TEKİN
2019
(Her hakkı saklıdır)**

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALI TAŞIYICI HAFİF BETONLARIN MEKANİK
VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Physical And Mechanical Properties of
Expanded Clay Aggregate Structural Lightweight Concrete)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa USLU

Danışman: Doç. Dr. İlker TEKİN

Bayburt
Ağustos, 2019

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

..... danışmanlığında,
numaralı tarafından hazırlanan
“.....”
.....” adlı bu çalışma tarihinde aşağıdaki jüri
tarafından Anabilim Dalı,
..... Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....

İmza:

Jüri Üyesi :.....

İmza:

Jüri Üyesi :.....

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Genleştirilmiş Kil Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

29 / 08 / 2019

Mustafa USLU



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezinin tüm süreçlerinde, değerli bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. İlker TEKİN'e,

Laboratuvar çalışmalarım sırasında başta OYAK Beton Merkez Laboratuvar çalışanlarına,

Tezimin yazım aşamasında ve formatındaki düzeltelerde desteklerinden dolayı değerli hocalarıma ve bölüm arkadaşlarıma,

Çalışmalarım sırasında bana desteklerinden dolayı eşime ve çocuklarıma,

Ayrıca tezin bu aşamaya gelmesine kadarki tüm desteklerinden dolayı Prof. Dr. Fahri ÖZBAYOĞLU hocama teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALI TAŞIYICI HAFİF

BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK

ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa USLU

2019, 86 Sayfa

Bu tez çalışmasında, genişletilmiş kil agregasının hafif yapısal betonlarda kullanımı araştırılmıştır. Beton karışımlarında agrega olarak genişletilmiş kil, kireçtaşı ve doğal kum kullanılmıştır. Karışım granülometrileri her grup için aynı tutulmuştur. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5R çimentosu kullanılmıştır. Tasarımlarda çimento yerine 2 tip mineral katkı ikamesi ile 300 kg/m^3 ve 500 kg/m^3 dozajlı hibrit bağlayıcılar kullanılmıştır. Bu amaçla farklı içeriklere sahip toplam 40 karışım hazırlanmıştır. Numuneler sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kür havuzunda 28 gün muhafaza edilmiştir. Taze beton karışımları üzerinde çökme, birim hacim ağırlık, hava miktarı ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri olarak 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ile 28. günde yarmada çekme dayanımı deneyi yapılmıştır.

Sonuç olarak en yüksek dayanım hedefi doğrultusunda % 100 hafif genişletilmiş kil agregası ile 1346 kg/m^3 birim ağırlıkta $26,4 \text{ MPa}$ basınç dayanımı ve $2,5 \text{ MPa}$ yarmada çekme dayanımında yapısal hafif beton üretilmiştir. İnce agrega olarak kireçtaşı kumu ve iri agrega olarak genişletilmiş kil agregası ile 1813 kg/m^3 birim hacim ağırlıkta $36,5 \text{ MPa}$ basınç dayanımı ve $2,6 \text{ MPa}$ yarmada çekme dayanımında yapısal hafif beton elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Genleştirilmiş kil, yapısal hafif beton, cüruf, uçucu kül, agrega

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EXPANDED CLAY AGGREGATE STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE

Mustafa USLU

2019, 86 pages

In this study, use of expanded clay in lightweight concrete production was investigated. With this purpose, expanded clay, limestone and natural river sand were used as aggregates in concrete mixtures. Mixture gradations were kept constant for each group. CEM I 42.5R type cement as well as fly ash and ground granulated furnace slag as a replacement material with cement was used as a binder. In mixture design parameters, binder dosage was selected as 300 kg/m³ and 500 kg/m³ in hybrid binders. Therefore, totally 40 mix batches were prepared in different contains. Specimens were cured in water tank for 28 days long period at 20±2 °C. Slump, unit weight, air void measurement and temperature from surface were examined on fresh concrete mixes. Moreover, compressive strength tests at 1st, 3rd, 7th and 28th days and tensile strength tests at 28th day were performed on hardened concrete specimens.

According to the results, lightweight structural concrete was produced that its unit weight, compressive strength and tensile strength were obtained as 1346 kg/m³, 26.4 MPa and 2.5 MPa, respectively. When the expanded clay used with river sand and limestone as aggregate, it is observed that the unit weight, compressive strength and tensile strength were found 1813 kg/m³, 36,5 MPa and 2,6 MPa, respectively.

Keywords: Expanded clay, structural lightweight concrete, slag, fly ash, aggregate

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. <i>Genleştirilmiş Kil Agregalarının Fiziksel Özellikleri</i>	10
Tablo 2. <i>Genleştirilmiş Kil Agregası Betonun Taze ve Mekanik Özellikleri</i>	18
Tablo 3. <i>Ortalama Basınç Dayanımı ve Çimento İçeriği Arasındaki İlişki (ACI Committee 213)</i>	22
Tablo 4. <i>Çimento ve Mineral Katkıların Kimyasal Özellikleri</i>	29
Tablo 5. <i>Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri</i>	29
Tablo 6. <i>Agregaların Kimyasal Özellikleri</i>	31
Tablo 7. <i>Tane Büyüklüğü Dağılımı</i>	32
Tablo 8. <i>Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı</i>	32
Tablo 9. <i>Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri</i>	32
Tablo 10. <i>Mineral Katkıların Fiziksel Özellikleri</i>	33
Tablo 11. <i>Mineral Katkıların Basınç Dayanımları</i>	33
Tablo 12. <i>300 Kg/M³ Karışım Tasarımları (Malzeme Miktarları)</i>	35
Tablo 13. <i>500 Kg/M³ Karışım Tasarımları (Malzeme Miktarları)</i>	36
Tablo 14. <i>Karışım Tipleri</i>	37
Tablo 15. <i>Kireç Taşı İle Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları</i>	42
Tablo 16. <i>G. Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları</i>	43
Tablo 17. <i>Kireçtaşı Kumu+G. Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları</i> ...	44
Tablo 18. <i>Dere Kumu+G.Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları</i>	45
Tablo 19. <i>Kireç Taşı Agregası ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_b)</i>	46

Tablo 20. <i>Genleştirilmiş Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i> (Σ_b)	48
Tablo 21. <i>Kireçtaşı Kumu+G. Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i> (Σ_b).....	50
Tablo 22. <i>Dere Kumu+Genleştirilmiş Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i> (Σ_b)	52
Tablo 23. <i>Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları</i> (Σ_y)	54
Tablo 24. <i>Su Emme Deneylerinin Toplu Sonuçları</i>	55



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Birim ağırlıklarına göre hafif agrega betonlarının kullanım sınıflandırması (ACI Committee 213).....	7
Şekil 2. Hafif, geliştirilmiş kil agregasının iç ve dış görünümü.....	11
Şekil 3. Farklı yoğunlukta geliştirilmiş kil agregalarının optik mikroskobu görüntüsü (büyütme:x40).	12
Şekil 4. Hafif agrega betonu ve normal beton için kuru birim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	15
Şekil 5. Dış ve iç kür.....	18
Şekil 6. Basınç dayanımı testinden sonra hafif geliştirilmiş kil agregalı beton numunesinin çatlak deseni (Payam vd., 2014).....	20
Şekil 7. Hafif agrega betonu ve geleneksel beton için basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	20
Şekil 8. Bir yıl sonraki büzülme değerleri (ACI Committee 213).....	24
Şekil 9. 7 Gün basınç dayanımı ile yoğunluk ilişkisi (Rossignola vd., 2003).....	26
Şekil 10. Çekme dayanımı ve 7 gün basınç dayanımı ilişkisi (Rossignola vd., 2003).....	26
Şekil 11. Elastisite modülü ile 7 günlük basınç dayanımı ilişkisi (Rossignola vd., 2003).....	26
Şekil 12. Geliştirilmiş kil	30
Şekil 13. Malzemenin görünümü (soldaki: kuru, sağdaki: yaş).....	38
Şekil 14. Taze beton numunesi alımı.....	38
Şekil 15. Çökme deneyi	39
Şekil 16. Betonda hava ölçümü öncesi ve taze birim hacim ağırlık ölçümü.....	39
Şekil 17. Hava ölçümü sonrası.....	39

Şekil 18. Kür havuzu ve numunelerin görünümü	40
Şekil 19. Karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı-kuru yoğunluk grafiği.....	57
Şekil 20. Karışımlara ait yarmada çekme dayanımı-kuru yoğunluk grafiği	57
Şekil 21. Karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı korelasyonları	58
Şekil 22. Karışımlara ait su emme ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki korelasyon eğrileri grafiği.....	58



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

dm³	:Desimetreküp
g	:Gram
MPa	:Mega Paskal
kg/dm³	:Kilogram/Desimetreküp
kg/m³	:Kilogram/Metreküp
ton/m³	:Ton/Metreküp
kgf/cm²	:Kilogramkuvvet / Santimetrekare
lt	:Litre
MPa	:Mega Paskal
m³	:Metreküp
µm	:Mikrometre
mm	:Milimetre
°C	:Santigrad Derece
cm	:Santimetre
cm²	:Santimetrekare
ACI	:American Concrete Institute
ASTM	:American Society for Testing and Materials
DIN	:Deutsches Institut für Normung
BHA	:Birim Hacim Ağırlık
DKY	:Doygun Kuru Yüzey
MTA	:Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
PÇ	:Portland Çimentosu
MgO	:Magnezyum Oksit
Ca(OH)₂	:Serbest Kireç
SiO₂	:Silisyum Dioksit
NaOH	:Sodyum Hidroksit
NaCl	:Sodyum Klorür
Fe₂O₃	:Demir Oksit
Al₂O₃	:Alüminyum Oksit
Na₂CO₃	:Sodyum Karbonat
Na₂O, K₂O	:Alkaliler
Al₂O₃	:Alüminyum Oksit

CAH	:Kalsiyum Alüminat Hidrat
CH	:Kalsiyum Hidroksit
CaCO₃	:Kalsiyum Karbonat
CaO	:Kalsiyum Oksit
C-S-H	:Kalsiyum Silikat Hidrat
Cl	:Klorür
S	:Kükürt
S/B	:Su/Bağlayıcı Oranı
S/Ç	:Su/Çimento Oranı
SO₃	:Sülfat
C₄AF	:Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
C₃A	:Trikalsiyum Alüminat
C₃S	:Trikalsiyum Silikat
C₂S	:Dikalsiyum Silikat
UK	:Uçucu kül
ÖYFC	:Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
SD	:Silis Dumanı
NA	:Normal Akışkanlaştırıcı
SA	:Süper Akışkanlaştırıcı
KT	:Kireçtaşı Agregası Kullanılan Karışımlar
GK	:Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanılan Karışımlar
GK/KK	:Genleştirilmiş Kil agregası ve Kireç Taşı Kumu Kullanılan Karışımlar
GK/DK	:Genleştirilmiş Kil Agregası ve Doğal Kum Kullanılan Karışımlar
LECA	:Light Expanded Clay Aggregate
G. Kil	:Genleştirilmiş kil

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	I
TEŞEKKÜR	II
ÖZ	III
ABSTRACT	IV
TABLolar DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	IX
İÇİNDEKİLER	XI
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	2
Beton	2
Betonu Oluşturan Bileşenler	2
Çimento.....	2
Agregalar.	2
Su.	4
Mineral Katkılar.....	4
Kimyasal Katkılar.....	5
Yapısal Hafif Beton.	6
Hafif betonun tarihçesi.....	8
Hafif Agregalar.	8
Genleştirilmiş kil agregası.	9
Diğer hafif agregalar.	13
Genleştirilmiş kil agrega içeren hafif taşıyıcı beton.	14
Genleştirilmiş Kil Agregası İçeren Betonların Mekanik Özellikleri.....	19
Yapısal Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	22
Basınç dayanımı.....	22

Birim ağırlık.....	22
Elastisite modülü ve poisson oranı.	23
Yarma çekme dayanımı.	23
Kuruma büzülmesi.....	23
Yapısal Hafif Beton Kullanım Alanları.....	24
Literatürde Genleştirilmiş Kil Üzerine Yapılmış Çalışmalar	25
MATERYAL VE YÖNTEM	29
Materyal	29
Çimento.....	29
Agregalar.	30
Genleştirilmiş kil.....	30
Kireçtaşı.	30
Kum.	31
Kimyasal katkı.	32
Mineral katkı.....	33
Yöntem.....	33
Hafif Betonların Tasarımı.	33
Karışımların hazırlanması.....	37
Taze Beton Deneyleri	38
Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	40
ARAŞTIRMA BULGULARI	42
Taze Beton Deney Sonuçları.....	42
Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	46
<i>Basınç dayanımı deneyi sonuçları.</i>	<i>46</i>
<i>Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.</i>	<i>53</i>
<i>Su emme deneyi sonuçları.....</i>	<i>55</i>

SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	70



BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Genleştirilmiş kil agregaların teknik özellikleri diğer birçok endüstriyel ham maddelere kıyasla çok daha avantajlı olduğu için farklı sanayi sektörlerinde kullanılabilir. Genleştirilmiş kil, yüksek basınç dayanımı olan hafif agrega malzemelerinden biridir ve yapısal taşıyıcı hafif beton üretiminde uzun süredir kullanılmaktadır. Genleştirilmiş kil agregalarından yapılan binalar, donatı çeliğinin % 20'sine ve ısıtma soğutma maliyetlerinin % 50'sine kadar tasarruf sağlayabilir (Payam, Lee, Mahmud, & Mohammad, 2018). Hafif genleştirilmiş kil agregaları petek yapısı sayesinde, yüksek ezilme direncine, uygun yangın dayanımına ve mükemmel termal ve ses yalıtımı özelliklerine sahiptir (Corinaldesi, & Moriconi, 2015). Normal ağırlıkta beton yerine hafif beton kullanımı binaların yapısal verimliliğini artırabilir. Hafif beton, normal betona göre daha iyi bir termal performans gösterir ve kullanımı binalarda enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir (ASTM C330, 2005). Avrupa'da yapısal hafif agrega betonu kullanımı, binalardaki ısıtma enerjisi tüketimini normal ağırlıktaki betona göre % 15 azaltmaktadır. (Markus, Harald, & Hilde, 2014).

Yapısal amaçlı olarak üretilen beton içerisinde kullanılan ve doğal malzemelerden elde edilen hafif agregalardan biride Genleştirilmiş kil agregasıdır. Genleştirilmiş kil agregası hafif yapı malzemeleri içerisinde basınç mukavemeti en yüksek olanlarından biridir. İngilizce de "expanded clay" Almandaca ise "blahton" olarak ifade edilmektedir. Sinterleşme süreci çabuk olan ve 1100-1300°C dereceleri arasında belirli bir hacim artısına uğrayan kil, killi şist ve şeyllere, genel olarak genişleyen killer adı verilmektedir

Bu çalışmada 2 farklı tip mineral katkı ikamesi ile oluşturulan ve farklı eşdeğer bağlayıcı miktarları içeren kireçtaşı agregası ile genleştirilmiş kil agregalı farklı ince agrega kombinasyonları oluşturulmuş karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda çalışmanın hipotezi “ **Genleştirilmiş kil agregası kullanılan tasarımlarda harç kalitesinin artırılması taşıyıcı hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini artırır**” olarak kurulmuştur.

İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Temeller

Beton

Beton, çimento hamurunda birbirine bağlanmış çeşitli büyüklükteki kaba ve ince agregalardan oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Beton üretiminde, özelliklerini geliştirmek, değiştirmek veya daha ekonomik bir beton elde etmek için çeşitli kimyasal katkıları ve/veya ince öğütülmüş mineral katkıları sıklıkla kullanılmaktadır. Çimento hamuru, çimento ve su ilk karıştırıldığında plastik bir malzeme olduğundan, betona dahil edilen malzemelerin karışımı da plastiktir. Çimento hamuru zaman geçtikçe katılaşıp sertlik kazandığından (çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle), aynı şekilde plastik beton karışımı zamanla katılaşıp sertlik kazanmaktadır. Bu nedenle, plastik beton karışımını istenen şekilde ve büyüklüğe sahip bir kalıba yerleştirilerek, beton sertleştiğinde istenen şekilde ve büyüklüğe sahip kaya benzeri bir malzeme elde edilmektedir. Beton girdi malzemelerinin karıştırıldığı andan itibaren yeterli sertlik kazanana kadar olan plastik hali “taze beton” olarak, betonun sertlik kazandıktan sonraki hali “sertleşmiş beton” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 2002).

Betonu Oluşturan Bileşenler

Çimento.

Çimento, tüm bağlayıcılara uygulanabilecek genel bir ifadedir. Yapısal amaçlı veya özel amaçlar için inşaat endüstrisinde kullanılan çok çeşitli çimentolar vardır. Bu çimentoların kimyasal bileşimi oldukça çeşitlilik gösterebilir; ancak günümüzde kullanılan betonlar Portland çimentosu ile yapılır (Mindess, Young, & Darwin, 2003) PÇ kireçli ve killi malzemelerin uygun bir birleşimini pişirmekle elde edilen PÇ klinkeri ile az miktarda alçıtaşını ile birlikte üretilen hidrolik bağlayıcıdır (Erdoğan, 2002).

Agregalar.

Agregalar genellikle beton hacminin %70-80'ini kaplar ve bu nedenle betonun özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Agregalar, çoğu zaman doğal kayadan (kırmı taşı veya doğal çakıllar) ve kumlardan elde edilen granüler malzemelerdir; ancak cüruf ve

genleştirilmiş kil veya şist gibi sentetik malzemeler çoğunlukla hafif betonlarda kullanılmaktadır. Ayrıca ekonomik dolgu malzemesi olarak kullanılmalarına rağmen, agregalar genellikle betona daha iyi boyutsal stabilite ve aşınma direnci sağlar (Mindess, Young, & Darwin, 2003). Agregaların sınıflandırmaları agreganın kaynağına, özgül ağırlığına veya birim ağırlığına, taneciklerinin büyüklüğüne, şekillerine, yüzey yapılarına, metotlarına, jeolojik kökenine, mineral kompozisyonu ve agreganın reaktivitesine göre yapılmaktadır (Erdoğan, 2002). Agregalar genellikle mineralojilerine göre sınıflandırılmaz, en basit ve en kullanışlı sınıflandırmalar kaynak ve özgül ağırlık temelindedir.

Agregalar, kaynaklarına göre doğal ve yapay agregalar olarak sınıflandırılmaktadır.

Doğal Agregalar: Ezilme, granülometrisi veya yıkama haricinde üretim sırasında doğal hallerinde bir değişiklik olmadan doğal tortulardan alınan agregalardır. Kum, çakıl, kırma taş, pomza doğal agrega örnekleridir.

Yapay Agregalar: Bir endüstriyel işlemin atıkları olarak veya ısı işlemi gibi özel bir üretim işlemiyle elde edilen malzemeler veya partiküllerdir. Yüksek fırın cürufu, atık agregalarının tipik bir örneğidir; genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş vermikülit, genleştirilmiş kil ve uçucu kül agregası ısı işlemiyle üretilen agrega örnekleridir.

Özgül ağırlıklarına veya birim ağırlıklarına göre, beton agregaları şöyle sınıflandırılmaktadır:

Normal ağırlıktaki agregalar, 2,4 ton/m³ ila 2,8 ton/m³ arasında özgül ağırlıklara sahiptir. 2,4 ton/m³ 'ten daha az özgül ağırlığı olan agregalara hafif agregalar, 2,8 ton/m³ 'den daha fazla özgül ağırlığı olan agregalara ağır agregalar denir (Erdoğan, 2002).

Beton oluşturmak için, tek başına çimento hamuru kullanmak yerine, agregaların çimento hamuru ile karıştırılmasının üç ana nedeni vardır. İlk ve en eski sebep, agreganın çimentodan daha ucuz olmasıdır, bu şekilde agreganın kullanımı karışımı artırır ve maliyetleri düşürür. İkincisi, agrega daha iyi hacim stabilitesi sağlamanın yanı sıra büzülme ve sünmeyi azaltır. Üçüncüsü, agrega betona daha fazla dayanıklılık kazandırır.

Birçok bozulma fazı esas olarak çimento hamurunu etkiler. Beton karışımında agregaları büyük ölçüde kullanmanın ve mümkün olduğunca az çimento kullanmanın belirgin ekonomik ve teknik nedenleri vardır. Agreganın betonun temel bileşenidir ve agreganın özellikleri betonun özelliklerini etkiler. Parçacık büyüklüğü dağılımının kıvamını, taze betonun özellikleri için önemlidir. Sertleşmiş betonun özellikleri üzerinde daha küçük bir etkisi vardır. Daha büyük maksimum boyut hafif betona fayda sağlar; ancak normal beton için optimum

boyut yaklaşık 20 mm'dir. Eş boyutlu şekiller en iyisidir. Şekil ve dokusu agrega-çimento hamuru bağıını etkiler. Agregası, bozulma olmadan karıştırma, taşıma ve sıkıştırma işlemlerine dayanabilecek kadar güçlü olmalıdır. Çoğu agrega beton büzülmesini engeller. Birkaç agrega ıslatma ve kurutmada büyük hacimli değişikliklere maruz kalır ve betonun düşük hacimsel stabiliteye sahip olmasına neden olabilir. Bazı agregalar çevre koşullarından kaynaklanan strese diğer agregalardan daha dirençlidir. Donmaya duyarlı agrega donma ve çözme döngülerinden sonra parçalanabilir. Betonun ısıl genleşme katsayısı büyük ölçüde agregalara bağlıdır. Tüm agregalar yangına dayanıklı beton üretir, ayrıca hafif agregalar genellikle en iyi yangına dayanıklı betonu oluşturur. Betondaki agrega içeriği, yapışmayı ve betonun yüzey şeklini etkiler. Aşırı ince agrega içerikleri su talebini artırır ve agrega-çimento hamuru bağıını etkileyebilir. Bazen, safsızlıklar agrega ile ilişkilidir. Normal olarak, kirlilikler betona fayda vermez, eğer yeterli miktarda mevcutsa, etkileri zararlı olabilir. (Newman, & Choo, 2003)

Su.

Su, beton üretiminde çok önemli bir bileşendir. Kalitesi belli olmayan bir su uygunluk kontrolü yapılmadan beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılmamalıdır. Yeterli dayanım gelişimi birincil derecede önemli olmakla birlikte, karışım suyunda bulunan yabancı maddeler kür süresini, kuruma büzülmesini ve dayanıklılığı etkileyebilir veya çiçeklenmeye neden olabilir. Çok miktarda askıda katı madde, aşırı miktarda çözünmüş katı madde veya dikkate değer miktarda organik madde içeren sudan kaçınılmalıdır. (Mindess, Young, & Darwin, 2003)

Mineral Katkılar.

Mineral katkıları, çimento harcı ve betonun özel mühendislik özelliklerini elde etmek için eklenen ince öğütülmüş malzemeleri ifade etmektedir. Betonda mineral katkıların kullanılması için eşit derecede önemli olan diğer hedefler arasında ekonomik yararlar ve endüstriyel ve diğer atık yan ürünlerin çevreye zarar vermeden geri dönüştürülmesi sayılabilir. Kimyasal katkıların aksine, mineral katkıları betonda çimento ve/veya ince agreganın ikamesi olarak nispeten büyük miktarlarda kullanılmaktadır (Ramachandran, 1995).

Puzolanlar, kendiliğinden az bağlayıcı değere sahip olan veya hiç olmayan silisli ve alüminyumlu materyallerdir ancak, ince öğütülmüş halde ve nemin varlığında, normal sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşikler oluştururlar (Ramachandran, 1995). Volkanik kül, tuf ve volkanik camlar, pomza, kalsine kil veya şist, diyatome toprağı, uçucu kül, silika dumanı ve pirinç kabuğı külü

puzolanik özellikler gösteren ve yaygın olarak bilinen malzemelerdir (Erdoğan, 1997). Puzolanlar, PÇ ile birlikte kullanıldığında, PÇ'nin hidrasyonundan serbest kalan kalsiyum hidroksit, puzolanlarda bulunan alümino silikatlarla reaksiyona girerek, bağlayıcı özelliklere sahip bağlayıcı bileşikler oluşturur (Ramachandran, 1995). Puzolanın ana bileşeni olan amorf veya camı silika, kalsiyum silikatların hidrasyonundan oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer.

Puzolanlar ve endüstriyel atıklar genellikle PÇ'den önemli ölçüde daha düşük maliyetlerde bulunur. Genellikle çimentodan daha incedirler, puzolanik ve bazen de çimento özelliklerine sahiptirler. Bu nedenle, çimento için kısmi ikame olarak kullanımları, iyileştirilmiş işlenebilirlik, düşük kuma ve hidrasyon ısı, artan nihai dayanım, geçirimsizlik, kimyasal etkilere dayanıklılık ve termal çatlamaya karşı arttırılmış direnç gibi olası faydaların yanı sıra önemli maliyet tasarruflarına yardımcı olabilirler (Ramachandran, 1995).

Kimyasal Katkılar.

Beton katkıları gerçek anlamda kimyasal olsalar bile, beton teknolojisinde konvansiyonel olarak "kimyasal katkı" terimi, hava sürükleyen ajanlar hariç suda çözünür bileşiklerle sınırlandırılmıştır. Temel olarak taze betonun priz süresini hızlandırmak veya geciktirmek veya su gereksinimlerini azaltmak için kullanılırlar (Erdoğan, 1997).

Kimyasal katkıları şu şekilde gruplandırılmıştır:

- a) Su azaltıcı katkıları,
- b) Priz Geciktirici katkıları,
- c) Priz Hızlandırıcı katkıları,
- d) Su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları,
- e) Su azaltıcı ve priz hızlandırıcı katkıları,
- f) Yüksek oranda su azaltıcı katkıları
- g) Yüksek oranda su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları

Su azaltıcı bir katkı, belirli bir çökmeye ulaşmak için gereken suyu azaltır. Yani, betonun su ihtiyacını azaltır. Bu özellik, çeşitli şekillerde avantaj sağlamak için kullanılır. Sabit çimento içeriğinde daha az su ile istenen çökmeyi elde etmek S/Ç oranını etkili bir şekilde düşürmek anlamına gelir. Genel olarak mukavemet, geçirimsizlik ve dayanıklılığın iyileştirilmesine neden olur. Alternatif olarak, istenen çökme, çimento içeriğini düşürerek S/Ç oranını değiştirmeden elde edilebilir. Bu ekonomik nedenlerden veya teknik nedenlerden

dolayı yapılabilir. Son olarak, uygulamada yerleştirme işlemlerini kolaylaştırmak için çimento ve su içeriğini arttırmadan çökmeyi arttırmak için su azaltıcı bir katkı kullanılabilir (Mindess, Young, & Darwin, 2003). Su azaltıcılar, lignosülfonik asit, Na, NH₄ veya trietanolamin tuzları hidroksikarboksilik asit ve karbonhidratlardan Ca, Na veya NH₄ tuzlarından oluşur. (OH), (CaOH) ve (SO₃H) grupları içeren lignosülfonatlar diğerlerinden daha yaygın olarak kullanılır. Normal su azaltıcılar, betonun su gereksinimini yaklaşık yüzde 10 ila 15 azaltır, oysa süper akışkanlaştırıcılar su gereksinimini yaklaşık % 30 azaltabilir. Süper akışkanlaştırıcıların çoğu, sülfonatlanmış melamin formaldehit, sülfonatlanmış naftalin formaldehit ve değiştirilmiş lignosülfonatlardan oluşur (Ramachandran, 1995). Hem normal aralıktaki hem de yüksek aralıktaki su azaltıcı katkı maddelerinin bileşikleri, katı-su ara yüzünde adsorbe edilir ve bunlar, çimento parçacıklarının dağılmasıyla işlev görür. Normal ve yüksek orandaki su azaltıcı katkı maddeleri arasındaki en büyük fark, yüksek orandaki su azaltıcı katkı maddelerinin, priz süresi veya hava içeriği miktarı üzerinde herhangi bir etkisi olmadan yüksek dozaj oranlarında eklenebilmesidir. Formaldehit kondensatlarının naftalen ve melamin molekülleri, priz geciktirmeye neden olan hidroksil grupları içermez (Erdoğan, 1997).

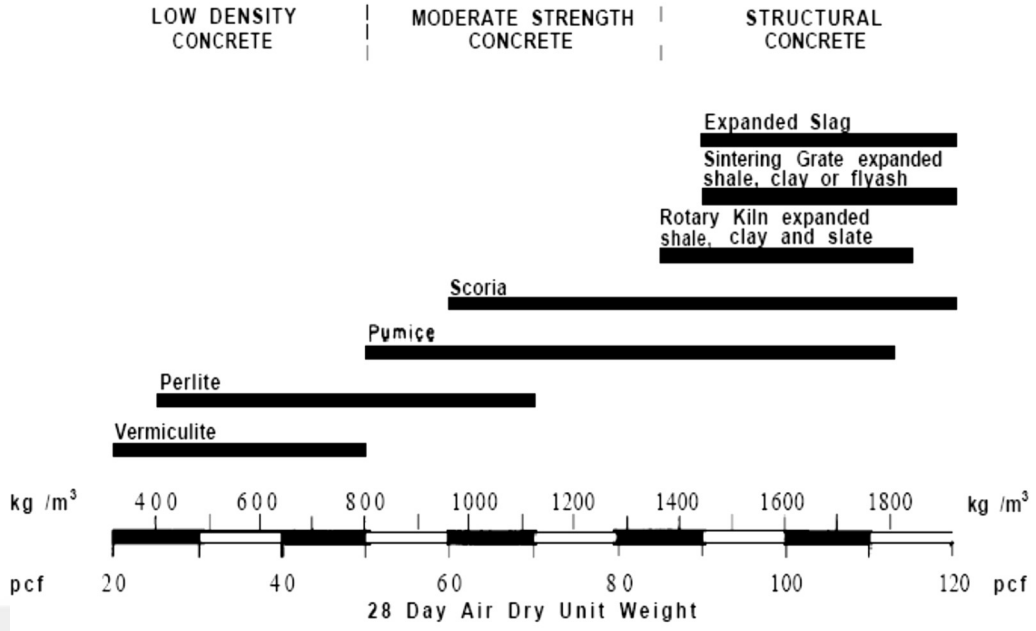
Yapısal Hafif Beton.

Betonlar birim ağırlıklarına göre üçe ayrılır:

1. Ağır beton: Birim ağırlık 3200 kg/m³ - 4000 kg/m³ aralığındadır ve bu tür beton esas olarak nükleer reaktörlerde radyasyon zırlaması amacıyla kullanılır.
2. Normal beton: Birim ağırlık 2300 kg/m³ - 2500 kg/m³ aralığındadır ve yapısal betonların büyük çoğunluğunda normal ağırlıkta beton kullanılır
3. Hafif beton: Birim ağırlık 2000 kg/m³'ten azdır.

Hafif betonlar iki gruba ayrılabilir. Yapısal hafif betonlar ve yapısal olmayan amaçlar için ultra hafif betonlar. (ACI Committee 213) dayanım ve birim ağırlık temelinde üç bölüm oluşturur (*Şekil 1*).

- İzolasyon için kullanılan düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı hafif beton,
- Beton bloklar ve dayanım istenen diğer uygulamalar için kullanılan orta dayanımlı hafif beton,
- Yapısal hafif betonlar,



Şekil 1. Birim ağırlıklarına göre hafif agrega betonlarının kullanım sınıflandırması (ACI Committee 213).

Düşük yoğunluklu hafif betonlar, bunlar çok hafif yapısal olmayan betonlar ve temel olarak izolasyon amaçlı kullanılırlar. Düşük birim ağırlıklarda, nadiren 800 kg/m^3 'ü aşan ısı iletkenliği düşük beton çeşididir. Basınç dayanımları 1.0 MPa ile 7.0 MPa arasında değişir.

Orta dayanımlı hafif betonlar, oldukça düşük bir basınç dayanımı gerektirirler ve bu nedenle yapısal ve düşük yoğunluklu betonların arasında yer alırlar. Bunlar bazen dolgu betonları olarak tasarlanır. Basınç dayanımı yaklaşık $7,0 \text{ MPa}$ ile $17,0 \text{ MPa}$ arasındadır ve yalıtım özellikleri orta düzeydedir.

Yapısal hafif betonlar, ölçeğin diğer ucuna düşen ve genellikle genişletilmiş şistler, killer, kayraklar, cürufklar, süngerler ve scorialardan yapılan agregalar içerir. Minimum basınç dayanımı, tanımı gereği, 17.0 MPa 'dır. Çoğu yapısal hafif agrega ile 35.0 MPa 'dan daha fazla basınç dayanımlı betonlar üretebilir ve bunlardan birçoğuyla 40.0 MPa 'dan çok daha büyük dayanımlarla beton yapılabilir. Yapısal hafif agrega betonlarının birim ağırlıkları, düşük yoğunluklu betonlarınkinden oldukça fazla olduğundan, yalıtım verimliliği düşüktür. Bununla birlikte, yapısal hafif beton için ısı iletkenlik değerleri normal ağırlıkta betona göre daha iyidir. ACI 213'e göre yapısal hafif agrega betonu hafif agrega ile yapılan yapısal betondur. 28 günde hava ile kurutulmuş birim ağırlık genellikle 1440 kg/m^3 ile 1850 kg/m^3 aralığındadır ve basınç dayanımı 17.2 MPa 'dan fazladır. Bununla birlikte, ACI 213 tanımı bu tanımın bir

şartname olmadığı şekilde devam eder. İş spesifikasyonları bazen hacmin 1900 kg/m³'e kadar ağırlıklarına izin verebilir.

Hafif betonun tarihçesi.

Hafif agregalı beton, beton teknolojisinde yeni bir buluş değildir. Eski zamanlardan beri bilinmektedir, bu nedenle Hafif Agregalı Beton kullanımıyla ilgili olarak çok sayıda referans bulmak mümkündür. Ponza, cüruf vs. gibi volkanik kökenli doğal agregalar kullanılarak yapılmıştır. Sümerler tarafından Babil'i inşa etmek için kullanılmıştır. Yunanlılar ve Romalılar tarafından bina inşaatlarında pomza kullanılmıştır. Bu muhteşem antik yapıların bazıları, İstanbul'da, St. Sofia Katedrali veya Ayasofya gibi halen mevcuttur. 4. yüzyılda İmparator Justinian tarafından görevlendirilen Milet İsidore ve Tralles Anthemiuslar adında iki mühendis tarafından inşa edilmiştir.

Hafif Agregalı Beton talebindeki artış ve agregaların bulunmaması, hafif agregalı üretim teknolojisini geliştirmiştir (Chandra, & Berntsson, 2003) ABD'de hafif beton kullanımı 1900'lere dayanmaktadır. Genleştirilmiş killer ve şistler ticari olarak S.H. Hayde ve 1. Dünya Savaşı sırasında gemi yapımında kullanılmıştır. St. Louis 'deki Park Plaza Hotel, 1920'lerde hafif beton yapının erken bir örneğidir. 1950'lerden beri, çok katlı binalarda ve diğer büyük yapılarda hafif beton düzenli olarak kullanılmaktadır. Daha dikkat çekici yapılardan bazıları, Bank of America Şirket Merkezi, Charlotte, Watergate Apartments, Washington D.C. ve Chicago'daki Lake Point Kuleleridir. Hafif betonlar ayrıca otoyol köprüleri ve açık deniz sondaj platformları gibi çeşitli uygulamalar için de kullanılmaktadır (Mindess, Young, & Darwin, 2003).

Hafif Agregalar.

ACI 213'e göre, yapısal hafif agregalar ikiye ayrılır.

1. Doğal olarak oluşan ve işlenmemiş agregalar
2. İşlenmiş yapay agregalar.

Doğal hafif agregalar çoğunlukla volkanik kökenlidir ve bu nedenle dünyanın yalnızca belirli bölgelerinde bulunur. Ponza ve cüruf bilinen en eski hafif agregalardır. Roma döneminde çok kullanılmışlardır. Bunlar, doğal hallerinde kullanılacak kadar hafif ve güçlüdür, ancak özellikleri değişkendir (Chandra, & Berntsson, 2003). Hidratlanmış bir volkanik cam olan perlit, yaygın olarak kabuk kırılmalarının yoğunlaştırılması ile karakterize olan incili, camsı bir parlaklığa sahiptir. %2 - %5'lik nispeten yüksek bir su içeriği perlit,

obsidiyen, hidratlanmış volkanik kül ve pumisitler gibi diğer sulu volkanik camlardan ayırır. Hızlı ısıtmanın ardından perlit, düşük kütle yoğunluğuna sahip hücresel bir malzemeye dönüşür. Perlit içinde tutulan kimyasal su, genellikle 900°C-1000°C aralığındaki sıcaklıklarda kaynar hale geldiğinde, ortaya çıkan buhar, yumuşak bir yapı oluşturmak için yumuşatılmış kaya içinde kabarcıklar oluşturur. Bu kabarcıkların oluşumu perlitin orijinal hacminin 15-20 katına kadar genişlemesini sağlar. Bu yeni malzeme “genleştirilmiş perlit” olarak adlandırılmaktadır. Olumlu fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, genleştirilmiş perlit çeşitli uygulamalarda farklı kullanım alanları bulur. (Chandra, & Berntsson, 2003). Her durumda, yapısal betonda kullanılan hafif agregalar, ayrı agrega parçacıklarının hücresel yapısı nedeniyle hafif ağırlıktadır. Tanecik ebadı içindeki bu hücresel yapı, aşağıdaki işlemlerden bir veya daha fazlası olan yüksek sıcaklıklarda, genellikle 1000°C veya daha yüksek bir sıcaklıkta oluşturulur.

- Hammadedeki bazı bileşenlerde ısının reaksiyona girmesi nedeniyle gazların oluşumu, mineralin yeni füzyonuyla çakışır, böylece gazların şişirilmesi veya genişlemesine neden olan bir viskoz, proplastik kütle içinde tutulması sağlanır.
- Isıtmadan sonra, yumuşamış kütle, kontrollü miktarda su veya buhar ile karışmasına maruz bırakılması, böylece hücresel bir yapı, sıkışmış buhar ve başka bir gaz tarafından üretilir ve kütle soğutulması üzerine tutulur.
- Agregada partikülünde ki hücreler, makroskobik boyutta değişebilir ve esas olarak birbirine bağlı veya ayrık olabilir.

Genleştirilmiş kil agregası.

Genleştirilmiş kil agregası, üretilmiş ve yapay bir hafif agregadır. Döner fırında 1150 °C'de ısıtıldıktan sonra, kil orijinal boyutunun yaklaşık dört ila beş katı kadar genişleyerek topak haline gelir. Bu işlem ilk olarak 1930'da İskandinavya'da hafif küpler üretmek için kullanılmıştır (Corinaldesi, & Moriconi, 2015). Dış yüzeyde sert bir sinterlenmiş kabuk oluşturulurken, gözenekli klinker benzeri yapıya sahip çok hafif ve çok dayanıklı bir agrega üretilir (ASTM C330/330M). Üretilen genleştirilmiş kil agregası 160-850 kg/m³lük bir kütle ağırlığına ve yaklaşık 0,78–14,4 MPa'lık basınç dayanımına sahiptir. Dolgu olarak azerit'ten yapılan beton normal betondan daha hafiftir ve normal betondan en az iki kat daha az ısı iletkenliğine sahiptir. (Bonabi vd. 2014). Genleşme testleri, farklı parametrelerin üretimi nasıl etkilediğini belirlemek için üç ayrı alandan örnekler kullanılarak yapılmıştır. Kil boyutunun genişleme üzerinde olumlu bir etkisi olurken, topak boyutunda düşüş üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Ayrıca, fırında sıcaklık ve kilin fırında kaldığı süre, ortaya çıkan

agrega kalitesi için kritik değerlerdir. Genleştirilmiş kil agregasının üretim sürecindeki etken mekanizmalar aşağıda sıralanmıştır.

a. Katkı Maddelerinin Etkisi: Kil tane büyüklüğünün azaltılması, genişlemede artışa neden olur (Miguel, & Pedro, 2014)). Na_2CO_3 , cam fazın topakların yüzeyindeki viskozitesinin düşmesine neden olmuş, ancak düşük genişleme, düzensiz şekil ve topakların birbirine yapışmasıyla sonuçlanmıştır. Demirin hafif agrega özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Fe_2O_3 ilavesi, orta kısmında daha büyük gözeneklere neden olmaktadır. Topakta, metalik demir tozu ilavesi genişlemede büyük bir artış sağlamakla birlikte hem parçacık yoğunluğu hem de mekanik mukavemet azalmaktadır. Demir tozu potansiyel olarak düşük yoğunluğun kuvvetten daha önemli olduğu uygulamalarda hafif genleştirilmiş kil agregasının yoğunluğunu azaltmak için etkili bir katkı maddesidir.

b. Pelet Boyutunun Etkisi: Pelet boyutu arttıkça genişleme de artar. Agregaların istenen bir boyutta üretilmesinde daha düşük bir yoğunluğa ihtiyaç duyulursa, bu pelet boyutu aralığındaki maksimum noktaya yakın bir pelet boyutu ile sağlanabilmektedir (Toth, & Csaky, 1989).

c. Sıcaklığın Etkisi: Fırın içindeki sıcaklık, sağlanması gereken en önemli parametredir. Sıcaklık erime noktasına yaklaştıkça genişleme artar, bu kil tipine göre değişmektedir. Bu nedenle, kil tipine göre en uygun sıcaklık belirtilmelidir. Birim imalat maliyetini azaltmak ve istenen agrega yoğunluğunu elde etmek için imalatta mümkün olan en düşük sıcaklık kullanılmalıdır (Toth, & Csaky, 1989)

Tablo 1. Genleştirilmiş Kil Agregalarının Fiziksel Özellikleri

Özgül Ağırlık (Kg/m^3)	Gevşek BHA (Kg/m^3)	Sıkışık BHA (Kg/m^3)	Su Emme* (%)	Kırılma Dayanımı (MPa)	İncelik Modülü
0.66	-	273	26.5	-	5.96
1.15	613	1068	12.3	6.80	-
0.89	720	-	20.0	-	-
-	488	1002	24.5	3.49	-
-	700	1100	29.9	-	-
-	738	1290	12.1	-	-
1.21	621	-	16.2	-	-
-	358	-	26.2	-	5.77
1.35	681	1092	12.6	5.70	-
-	334	603	18.4	1.40	-
-	800	1480	2.65*	8.34	-

* 1 saat su emme

Genleştirilmiş Kil Agreganın Fiziksel Özellikleri

Betonda, agrega özellikleri ile performans arasındaki ilişki henüz birçok yönden tam olarak anlaşılmamıştır. Agreganın özellikleri, betonun özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir ve bunların doğru bir şekilde anlaşılması, yüksek kaliteli betonun geliştirilmesi için çok önemlidir. Yoğunluk, güç ve su emme, Genleştirilmiş kil agregalarının temel özellikleridir. (Alexandra *vd.*, 2016) Hafif Genleştirilmiş kil agregalarının mekanik özelliklerinin, bağlayıcı tipinden ve dozajından oldukça etkilendiği açıktır, bir başka önemli parametre de sinterleme sıcaklığı ve süresidir.

Şekil ve doku.

Agreganın şekli, partikül dolgusunu ve agrega matrisindeki birbirine kenetlenmesini önemli ölçüde etkiler (Alexandra *vd.*, 2016). Genleştirilmiş kil agregaları küresel bir şekle, kahverengi bir renk ve siyah bir iç çekirdeğe sahiptir, Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu, karbon içeriğine ve demirin oksidasyon durumuna bağlıdır. Mikro yapı pürüzsüzdür, ancak mikro ölçekte açık gözeneklerle oldukça pürüzlüdür. Gözeneklerin yapısı yaklaşık 10–200 µm büyüklüğündedir ve Şekil 3'de gösterildiği gibi dağıtılır. Son araştırmalar, agrega “Şekil Dizini”nin, hafif agrega kilinin mekanik özelliklere önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Cui, Lo, Memon, & Xu, 2012). Küresel agregalar genellikle köşeli agregalara göre daha düşük bir “Şekil Dizini” ne sahiptir. Agreganın mukavemeti benzer olsa da, daha yüksek şekil indeksine sahip olan agrega, betonda daha yüksek mukavemet gösterebilir (Cui *vd.*, 2012). Agreganın yüzey dokusu, bir karışımın yüzey sürtünme özelliklerini etkileyebilir ve sonuç olarak taze durum sırasında karışımın sertliği de etkilenir. Ayrıca, gözenekli agregalar veya pürüzlü bir yüzeye sahip agregalar için, çimento hamuru veya çimento hidratasyon ürünlerinin agrega yüzeyi üzerinde oyuklara veya büyük gözeneklere girebileceğine inanılmaktadır. Bunlar çoklu “Kancalar” gibi davranır ve böylece agrega fazını ve pasta fazını birbirine bağlar.

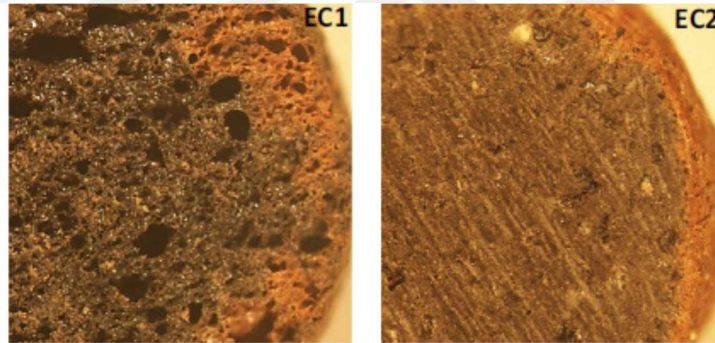


Şekil 2. Hafif, genleştirilmiş kil agregasının iç ve dış görünümü

Özgül ağırlık ve su emme.

Sinterlenmiş agregaların özgül ağırlıkları 0.66 ile 1.65 arasında değişir. Özgül ağırlık normal agregalardan % 20-45 daha azdır. Kömür ilavesi arttıkça özgül ağırlık değerleri azalır, Sinterleme sıcaklığı arttıkça özgül ağırlık artar. Bağlayıcının varlığında, özgül ağırlığın daha yüksek sinterleme sıcaklığında (1200 ° C) azaldığı bulunmuştur. Bu sinterleme işlemleri sırasında daha fazla gaz üretiminin neden olduğu şişkinlik etkisine bağlı olabilir (Arizon *vd.*, 2008). Yüksek sinterleme sıcaklıklarındaki aşırı cam oluşumu, yoğun yapı oluşumuna ve daha yüksek özgül ağırlıklara neden olabilir (Real, Gomes, Rodrigues, & Bogas, 2016).

Hafif Genleştirilmiş kil agregalarının önemli özelliği su emilimidir ve beton karışımlarının oranlanmasında önemli rol oynamaktadır. Agreganın gözenekli yapısı, yüksek emiliminin nedenidir (Hubertova, & Hela, 2013). Bu yüksek emilim, uygun karşı önlemler alınmadığı sürece iyi betonun gelişimini olumsuz etkiler. Tüm gözeneklerin kapatılması, emilimini azaltmak için uygun bir uygulama değildir, çünkü agrega yoğunluğunun artmasına nedeni olacaktır. Hafif Genleştirilmiş kil agregaların su emme değerleri% 20 ile% 78 arasında değişmektedir.



Şekil 3. Farklı yoğunlukta genleştirilmiş kil agregalarının optik mikroskobu görüntüsü (büyütme:x40).

Yoğunluk:

Sinterlenmiş agregaların gevşek kütle yoğunluğu 1640 ila 2050 kg/m³ arasında değişir. Peletin boyutu arttıkça, kütle yoğunluğu azalır, bu, agrega kuvvetlerinin azalmasına neden olur (Miguel, & Pedro, 2014). Agregaların yığın yoğunluğu, bir beton matris için gereken hamuru hacmini belirler ve böylece karışımın zenginliğini ve ekonomisini ortaya koyar (Alexander, & Mindess, 2005). EN 206 Avrupa Standardı, mineral kökenli bir agreganın fırında kuru parçacık yoğunluğunu 2000 kg/m³'ten fazla veya 1200 kg/m³'nin üzerinde gevşek kuru yığın yoğunluğunu geçmemesi gerektiğini belirtir. Agregaların boyutuna bağlı olarak,

ASTM C 33023'e göre yapısal beton üretimi için 880–1120 kg/m³'lük gevşek kuru kütle yoğunluğuna izin verilir.

Diğer hafif agregalar.

Betonun özelliklerini etkileyebilecek agregaların spesifik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Parçacık şekli ve doku yüzeyi.

Farklı kaynaklara sahip veya farklı yöntemlerle üretilen hafif agregalar, partikül şekli ve dokuda önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Şekil, kübik olabilir ve makul şekilde düzenli olabilir, temel olarak yuvarlanmış veya açısız ve düzensiz olabilir. Yüzey dokusu, küçük açık gözeneklerle nispeten pürüzsüz olandan küçük ve büyük açık gözenekli düzensizliğe kadar değişebilir. Hem ince hem de kaba agreganın parçacık şekli ve yüzey dokusu, işlenebilirlik, ince-kaba agrega oranı, çimento içeriği ve su gereksinimi gibi faktörlerde karışımların oranını etkiler.

Kütle (Döküm) özgül ağırlık:

Hücreli yapıları nedeniyle, hafif ağırlıktaki agregaların özgül ağırlığı normal ağırlıktaki agregalarınkinden daha düşüktür. Hafif agrega kütlelerinin özgül ağırlığı da, ince parçacıklar için en yüksek ve kaba parçacıklar için en düşük olan parçacık boyutuna göre değişir. Farklılıkların büyüklüğü ile işleme yöntemlerine bağlıdır. Kaba hafif ağırlıktaki agregaların kütleli özgül ağırlıklarının pratik aralığı, normal ağırlıktaki agregalarınkinden yaklaşık 1/2, 1/3'ü kadardır.

Birim ağırlık.

Hafif ağırlıktaki agrega birim ağırlığı, hücreli yapı nedeniyle, normal ağırlıktaki agregalardan daha düşüktür. Aynı derecelendirme ve partikül şekli için, agrega birim ağırlığı esasen yerçekimi ile orantılıdır.

Maksimum boyut:

Genel olarak mevcut olan hafif agregaların maksimum boyut derecelendirme tanımları 19 mm, 13 mm, 10 mm'dir. Maksimum agrega boyutu, işlenebilirlik, ince-kaba agrega oranı, çimento içeriği, optimum hava içeriği, potansiyel maksimum dayanımı ve kuruma büzülmesi gibi faktörleri etkiler.

Hafif agregaların dayanımı.

Agrega partiküllerin dayanımı tip ve kaynağa göre değişir ve sadece kalitatif bir şekilde ölçülebilir. Bazı parçacıklar güçlü ve sert, diğerleri zayıf ve kırılabilir olabilir. Agreganın dayanımı ile beton dayanımı arasında güvenilir bir korelasyon yoktur ve düşük partikül dayanımı, agreganın yapısal betonda kullanılmasını engellemez.

Nem içeriği ve absorpsiyon.

Hafif agregalar, hücreli yapılarından dolayı normal ağırlıktaki agregalardan daha fazla su emme yeteneğine sahiptir. 24 saatlik emme testine dayanarak, hafif agregalar, agreganın gözenek yapısına bağlı olarak genellikle ağırlıkça % 5 ila 20 oranında su emer. ACI 213'e göre önemli fark, hafif agregalardaki nem içeriğinin büyük ölçüde parçacıkların içine emilmesi, normal ağırlıktaki agregalarda ise büyük ölçüde yüzey nemi olmasıdır.

Mekanik özellikleri.

Hafif agregaların ezilme mukavemeti sadece poroziteye bağlı değildir. Mineralojik bileşimde değişiklik, bağlayıcıların erime sıcaklığı, sinterleme sırasında meydana gelen yoğunlaşma marjı, agreganın şişmesi ve ısıl gerilmeler nedeniyle oluşan iç kusurlar gibi bazı ilişkili faktörler de ezilme mukavemetinde önemlidir (William, Gregor, & Klaus, 2016). Normal yoğunluktaki agregaların ezilme mukavemeti, genellikle 'toplam ezilme değeri' olarak ifade edilir. Daha küçük boyuta sahip olan genişletilmiş kil agregalarının bireysel ezilme mukavemeti, büyük boydan daha yüksek bulunmuştur (Sergey, Aleksandr, Galina, & Roman, 2016). Tablo 1'de Agregaların ezilme değerinin 1.4 ila 8.34 arasında değiştiği görülmektedir. Bağlayıcılarla üretilen agreganın, sıcaklık 1150 °C'ye yükseldikçe, ezilme mukavemetinde artış göstermiştir. Bunun nedeni şişkinlik nedeniyle büyük gözeneklerin oluşması olabilir (Arizon, 2007). Agregalar üzerindeki ısı ve polimer muamelesinin, agregaların ezilme mukavemetini arttırdığı da açıktır (Liu, Farzana, Ravindra, & Veena, 2017).

Genleştirilmiş kil agregası içeren hafif taşıyıcı beton.

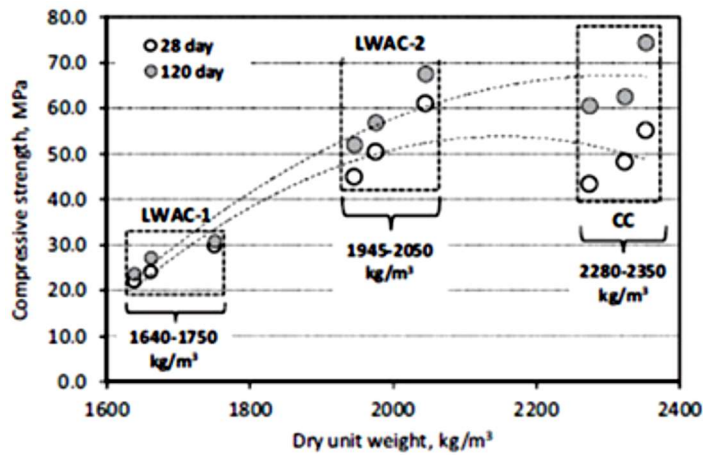
Beton karışımı tasarımı.

Hafif Agregalı betonun geliştirilmesi için önerilen beton karışım tasarımı prosedürleri tamamen normal beton karışım tasarımından farklı değildir. Beton karışım tasarımının dayanım özelliklerini ve dayanıklılığını vurguladığı bilinen bir gerçektir. Hafif agreganın gözenekli özelliği, basınç dayanımı kapasitesinde bir azalmaya neden olur ve hamurun matrisinden serbest suyu azaltır. Bu nedenle, uygun işlenebilirlik ve dayanıklılık elde etmek

için büyük miktarda çimento hamuru gerektirir (Kvande, 2001). Bu, yapısal betonlar için dayanıklılık gereksinimini etkileyebilir. Çimento hamurundaki azalma, herhangi bir beton tipinin hem şekil stabilitesinde hem de dayanıklılık performansında kritik öneme sahiptir. Daha düşük macun muhtevasında, agrega sarılması yoğunlaşır; bu, çimentonun mukavemet verimliliğini ve dayanıklılığı arttırmayı kolaylaştırır ve hafif agrega betonun klorür iyonu geçirgenlik kapasitesini düşürür (Chang, Liang, Libo, & Yan, 2016). Herhangi bir betonun karışım tasarımında dikkate alınan temel parametrelerden bazıları: su çimento oranı, çimento içeriği ve agrega içeriğidir. (Bogas, & Gomes, 2013). Agrega sınıflandırma, beton matrisin içine uygun agrega sarılmasını sağlar. Bu, çimento içeriğini azaltmayı ve sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirmeyi sağlayacaktır. Çimento muhtevası 375 kg/m³ ve s/c 0.49 olduğunda, 60 MPa'ya kadar basınç dayanımına sahip olan geliştirilmiş hafif agrega kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton üretmek de mümkündür.

S/C Oranı.

Beton karışım tasarımında su-çimento oranı önemli bir parametredir, betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Normal beton için su / çimento oranını düşürerek, basınç dayanımında artış mümkündür. Aynı ilişki hafif agrega betonu için de geçerlidir. Birçok deneysel araştırma, 0.25 ila 0.58 arasındaki su / çimento oranını kullanmıştır. Aynı su-çimentolu malzeme oranını karşılaştırarak, Hafif agrega betonun dayanım gelişiminin, daha düşük su bağlayıcı oranlarda normal agrega betonundan daha düşük olduğu fark edilebilir (Bogas, Augusto, & Pereira, 2012). Şekil 4'te gösterildiği gibi. Hafif agrega betonunun karışım tasarımı için, dayanım ve su / çimento oranı ilişkisi arasında standart bir ilişki yoktur.



Şekil 4. Hafif agrega betonu ve normal beton için kuru birim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Agrega.

Agrega, beton matrisindeki en ekonomik bileşendir. Ekonomik fayda dışında Beton matris içindeki hafif agreganın hacmini maksimize ederek ölü yükün azaltılmasını da sağlar. Genleştirilmiş kil agregalarının ince fraksiyonu sadece daha kalın kil agregalarının ezilmesiyle elde edilebilir. Bu su talebini artırabilir ve sonuç olarak betonun işlenebilirliğini azaltabilir. İri hafif agreganın kombinasyonu ve normal yoğunluklu kum bu olumsuz davranışı en aza indirmeye yardımcı olur. Karıştırma işlemi sırasında su emilimindeki belirsizlik, hafif agreganın betonun gelişimi için en büyük problemdir. Suya doymuş agreganın kullanımı, bu sorunu çözmek için yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır (Yang, Kim, & Choi, 2014). Ayrıca, hava ile kurutulmuş veya önceden ıslatılmış agregalar kullanılarak hazırlanan betonun işlenebilirliği ve basınç dayanımı arasında fark yoktur (Bonabi vd., 2014).

Çimento.

Ekonomik bir beton karışımını geliştirmek için çimento içeriği optimize edilmelidir. Bu amaçla uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi tamamlayıcı çimentolu malzemeler kullanılır. ACI 213R-03'e göre, normal yoğunluklu beton seçimine uygulanan çimento tipi ve diğer mineral katkı kriterleri, hafif agreganın için de uygulanabilir. Benzer mukavemet elde etmek için hafif agreganın beton normal betondan daha fazla miktarda çimento veya bağlayıcı gerektirir. Daha zayıf agreganın, gerekli mukavemeti elde etmek için daha güçlü harç ve yüksek çimento içeriği gerektirir. Daha fazla toz içeriğinin taze beton özelliklerini iyileştirebileceği iyi bilinmektedir, ancak dayanıklılık özelliklerini ters yönde etkileyebileceği bilinmektedir. DIN 4219, betonarme yapılarda kullanılan hafif agreganın için minimum 300 kg / m³ çimento içeriği önermektedir (Newman, 1993).

İşlenebilirlik.

Çökme değeri, beton kütlenin kendi ağırlığının bir fonksiyonudur. Bu, betonların aynı çökme olmasına rağmen, ancak hafif agreganın kullanarak, normal yoğunluklu agreganın betonundan daha yüksek işlenebilirlik gösterebileceğini gösterir. Hafif, genleştirilmiş kil agreganın betonları, normal ağırlıktaki granit betonundan daha düşük çökme değerlerine sahiptir. Test sonuçları, aynı su ve akışkanlaştırıcı içeriğinde, hafif genleştirilmiş kil agreganın betonunun diğer hafif agreganın betona kıyasla daha yüksek bir çökme değerine sahip olduğunu göstermektedir. Diğer hafif agregalara kıyasla Bu, hafif genleştirilmiş kil agregalarının yuvarlak şekli ve bunların sınırlı yüzey porozitesinden kaynaklanabilir (ASTM C330-05). Ayrıca,

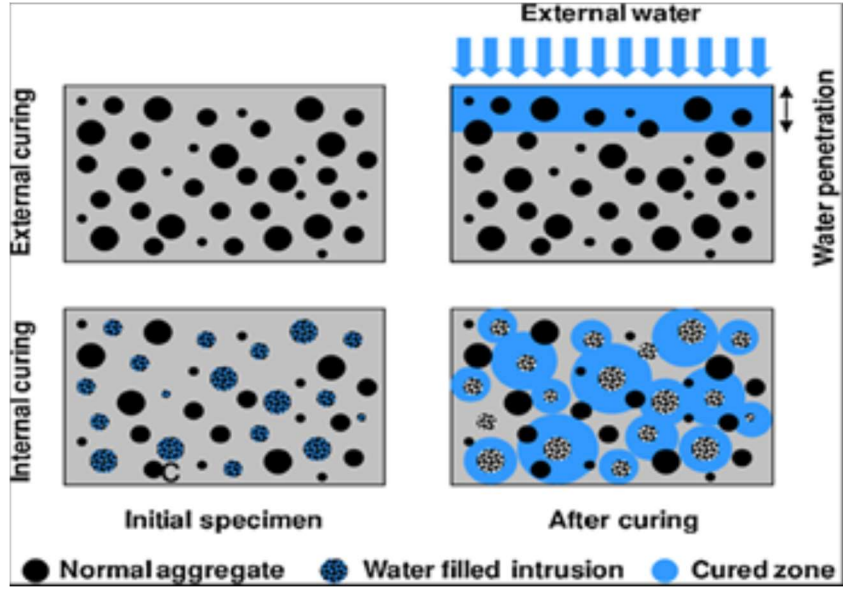
hafif beton karışımındaki, geliştirilmiş kil agregaların çok hafif olması nedeniyle yüzen bir fenomen gösterdiği gözlenmiştir. Hafif beton karışımındaki süper akışkanlaştırıcı madde içeriği ayrışmayı önlemek için optimize edilmelidir (William *vd.*, 2016).

Yoğunluk.

Yoğunluk terimi, hafif agrega betonunu tanımlayan en önemli özelliktir. Plastik durum sırasında, hafif agrega betonu, taze yoğunluk ve kalıp sökme yoğunluğu olmak üzere iki farklı yoğunluğa sahiptir. Taze yoğunluk, mümkün olan minimum hava içeriğine sahip tamamen sıkıştırılmış taze betonun yoğunluğudur. Kalıptan çıkarma yoğunluğu normal bir şekilde sıkıştırılmış betonun 24 saat kapalı bir durumda kür yapılmasından sonra yoğunluğudur (Nadesan, & Dinakar, 2017). Normal ağırlıkta betonda geliştirilmiş kil agrega kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında her türlü yoğunluğu azaltabilir (Zhutovsky, Kovler, & Bentur, 2004). Hafif Geliştirilmiş kil agrega beton karışımının fırında kuru yoğunluğu, geleneksel betondan yaklaşık% 25 ve% 34 daha düşüktür. BS EN 206-1'e göre, hafif beton bir fırın kuru yoğunluğu 1320 kg / m³ ila 2044 kg / m³ arasındadır (Tablo 2). Kuru birim ağırlıkları ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler 28 günlük ve 120 günlük beton numuneleri için *Şekil 4*'te gösterilmiştir. Genel olarak, betonların birim ağırlığı arttıkça, karışımların basınç dayanımı da artar (Deividas, Darius, Edmundas, & Adas, 2017).

Agreganın nem durumu.

Hafif agregaların su emilimi, normal ağırlıktaki agregalardan çok daha fazladır. Hafif agrega betonda, su ile doyurulmuş bir durumda kullanılır, hafif agreganın içindeki su karışım suyunda dikkate alınmaz. Hafif agregadan gelen bu su, çevreleyen matrise birkaç milimetreye kadar olan bir mesafeye girebilir. İlk yedi gün içerisinde doymuş pomzadan hafif agregadan 0.3 w / c oranındaki sertleştirici çimento hamuruna kadar su taşınması ölçülmüş. Dökümden sonraki ilk günlerde, hafif agregadan taze beton çimento hamuruna önemli miktarda su taşındığını bildirmişlerdir. İç kürlenmenin faydaları, hidrasyonun ve dayanımın artmasıdır (Lura *vd.*, 2006). Nem kaybını telafi etmenin yanı sıra, bu absorbe edilmiş suyun varlığı da betonun “içsel kürlenmesine” katılır. Hafif özelliğinden dolayı, hafif agrega betonu prekast endüstri için uygun bir malzemedir. Bu, nakliye ve taşıma maliyetlerini azaltacaktır. Prekast endüstrisi, döküm elemanların kaldırılması için erken dayanım gerektirir. Yüksek sıcaklıkta kürlenme, normal kürlenmeyle karşılaştırıldığında yüksek erken dayanım sağlayan çözümlerden biridir. Hafif agreganın düşük termal iletkenliği nedeniyle, betonda hidrasyon sıcaklığında bir artış meydana gelebilir (Nadesan, & Dinakar, 2017).



Şekil 5. Dış ve iç kür.

Tablo 2. Genleştirilmiş Kil Agrega Betonun Taze ve Mekanik Özellikleri

Bağlayıcı / Katkı (Kg/m ³)	Gevşek BHA (Kg/m ³)	İnce Agrega (Kg/m ³)	S/Ç	Çökme (mm)	Yoğunluk (Kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
560 SA-8 UK-112 Fiber-0.9	226	-	0.43	-	1320	44.7	1.66	2.96	13.1
480 SA-4	210	851	0.32	50	1550	15.1	2.24	3.25	16.8
451 UK-80 KST-0.8-6 SD-326-330	180	414- 426	0.34 -0.5	150- 180	1638- 2044	60	-	-	20- 23
550 SA-2.75	180	720	0.26	145	1854	30.8	2.77	3.81	-
450	256	591	0.35	140	1290	35.4	1.86	2.3	14.5
384 NA-3.6 SD-36 UK-60	427	514	0.35	-	1500	21	-	-	-

UK-Uçucu Kül, SD- Silis Dumanı, KST- Kireç/Silis tozu, SA-Süper Akışkanlaştırıcı, NA-Normal Akışkanlaştırıcı

Genleştirilmiş Kil Agregalı İçeren Betonların Mekanik Özellikleri.

Herhangi bir kompozit malzemenin mekanik özellikleri, her fazın mekanik özellikleri ve fazlar arasındaki etkileşim değerlendirilerek belirlenir. Hafif agreganın davranışı geleneksel agregalardan farklı olmasına rağmen, genleştirilmiş kil hafif agregalı betonunun mekanik özelliklerini değerlendirmek çok önemlidir. Önceki çalışmaların mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Basınç Dayanımı.

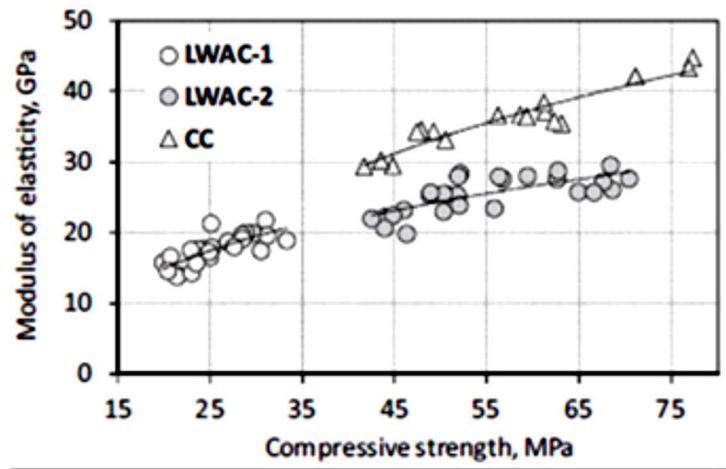
Beton basınç dayanımı temel olarak hem agregalı hem de hamur matrisinin dayanımı ile ilgilidir. Agregalı kuvveti düşük olmasına rağmen, matrisin dayanımı ve agregalı üzerindeki yayılma etkisinin miktarı betonun dayanımını belirler (Zhutovsky *vd.*, 2004). Üretilen betonun basınç dayanımı sadece agregalı dayanımı ile belirlenmez Ara yüzey geçiş bölgesi, hafif agregalı betonun dayanımının belirlenmesinde de önemli bir role sahiptir (Payam, Hafez, Hilmi, & Jumaat, 2014). Ayrıca hafif agregalı betonu ve normal beton için silindirik ve küp dayanımı arasındaki korelasyonun farklı olduğu da bilinmektedir (Yliniemi, Ferreira, & Tiainen, 2017). Agregalı dayanımı dışında, Beton dayanımındaki değişimin, ara yüzey bölgesinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal etkilerle ilgili olabileceği bulunmuştur. Fiziksel reaksiyon, suyun erken aşamalarda agregalar tarafından emilmesi nedeniyle, ara yüzey geçiş bölgesinin yoğunlaştırılması ile bağlantılıdır. Kimyasal reaksiyon, agregalı dış kabuğunda kalsiyum hidroksit kristallerinin birikmesi nedeniyle oluşur (Payam *vd.*, 2014). Ara yüzey geçiş bölgesinin farklı hafif agregalar için betondaki işlevi dikkate alınmalıdır. Şekil, basınç dayanımı testinden sonra iki tip betonun iki silindirik numunesinin bir parçasını göstermektedir, çimento matrisi ile Genleştirilmiş kil arasında bir ayrım yoktur. Genleştirilmiş kil durumunda, çimento hamuru, hafif agregalı ile çimento hamuru ve agregalı arasındaki ara yüz yoluyla agregalı kabuğuna yayılır (ASTM C330-05). Normal agregalı betonlarında olduğu gibi, silis dumanı gibi ilave malzemelerin dahil edilmesi basınç dayanımını artırır. Hafif agregalı betonunun nihai dayanımı şu anda silis dumanı ilavesiyle yaklaşık 100 MPa olarak rapor edilmektedir. Liflerin dahil edilmesi, basınç dayanımını arttırmak için yeterli değildir (Corinaldesi, & Moriconi, 2015). Bu gözlemler, hafif agregaların dayanımının, hafif agregalı betonun dayanım özelliklerini belirleyen tek faktör olmadığını açıklanmaktadır. Daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar da bu gözlem ile uyumludur. Hafif agregalı hacim içeriği, basınç mukavemeti ve şekil endeksi, hafif agregalı betonunun basınç dayanımını büyük ölçüde etkiler (Alexander, & Mindess, 2005).

Yarmada çekme dayanımı.

Sadece bir basınç dayanımı testinin yapılması, yapısal dereceli bir hafif betonun kalitesini yeterince değerlendiremez. ASTM: C330 tarafından belirtildiği gibi, yapısal hafif agrega betonunun minimum gerilme dayanımı 2,0 MPa olmalıdır. Hafif Genleştirilmiş kil agrega betonlarının gerilme dayanımı, minimum ASTM: C330 gerekliliğinden% 38 daha fazladır (Tablo 2). Azalan bir oranda olmasına rağmen, Basınç dayanımı arttıkça çekme dayanımı da artar. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı hafif agrega betonu, basınç dayanımı oranının% 6-7 arasında değişen bir yarmada çekme oranına sahiptir. Hafif genleştirilmiş kil agrega betonu için gerilme / basınç dayanımı oranı, yaklaşık% 9'dur (Payam vd., 2014). Hafif beton ayrıca normal ağırlıktaki betona göre daha düşük bir eğilme / basınç dayanımı oranına sahiptir.



Şekil 6. Basınç dayanımı testinden sonra hafif genleştirilmiş kil agregalı beton numunesinin çatlak deseni (Payam vd., 2014)



Şekil 7. Hafif agrega betonu ve geleneksel beton için basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki

Elastisite Modülü.

Betonun Elastisite Modülü tahmini, yapısal tasarım açısından önemlidir. İri agreganın miktarının ve türünün, büzülme ve elastik davranış gibi sertleşmiş beton özelliklere, önemli etkiye sahip olduğu iyi bilinmektedir (Payam vd., 2014). Genel olarak, basınç dayanımı arttıkça, betonların elastisite modülü 'nün de arttığı doğrulanabilir. Agreganın tipi ayrıca betonların elastisite Modülü üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. (Şekil 7). Hafif Genleştirilmiş agreganın betonunun Elastisite değeri normal ağırlıktaki betondan % 37 daha azdır. Beton elastisite modülünün tahmini, sadece basınç dayanımı dikkate alındığında tatmin edici değildir. Daha kesin tahmin modellerini elde etmek için, agreganın tipi ve sertleşmiş betonun yoğunluğu gibi faktörlerin tahmin modeline uyarlanması gerekir. Birim ağırlık ve basınç dayanımı dikkate alınarak elastisite modülünü tahmin etmek için yeni bir model geliştirilmiştir (Murat, Atahan, & Engul, 2015).

Bağ.

Çelik ile beton arasındaki kuvvet aktarımının kimyasal ve mikro mekanik fiziksel yapışma, sürtünme, betonun çelik donatılarının yakınında ezilme dayanımı (Kama hareketi) ve kaba agregaların birbirine kenetlenme etkisi ile sağlandığı iyi bilinmektedir (Gjorv, Monteiro, & Mehta, 1990). Bu mekanizmalar farklı yükleme aşamalarında aktive edilir. Yapışma bileşeni, hafif betonlarda daha iyi olmalıdır, çünkü genellikle eşit basınç dayanımlı normal ağırlıktaki betonlara göre daha düşük su/çimento oranlarına sahiptirler. Öte yandan, mikro çatlama, Hafif Agregalar ve çevresindeki harç arasındaki elastik uyumluluk ile en aza indirgenerek, hafif betondaki çelik-beton yapışmasını geliştirir. Hafif agregalar tarafından sağlanan iç sertleştirme, çevre hamurunun kalitesine de katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, birbirine kenetlenme ve kama etkisi daha düşük olma eğilimindedir, çünkü hafif agregalar daha düşük ezilme dayanımı sahiptir ve normal ağırlık agregalarından daha az katıdır. Genel olarak, hafif agreganın düşük dayanımı, hafif betonun normal ağırlıktaki betonda karşı daha düşük çekme ve ezilme dayanımı sahip olmasına neden olur. Bu nedenle, ACI 213R-03'te de belirtildiği şekilde hafif betonun, kısıtlama olsun ya da olmasın bağlanma mukavemeti, eşit bileşimde normal ağırlıkta betondan daha düşük olmalıdır.

Genleştirilmiş Kil Agregası İçeren Betonun Kırılma Özellikleri.

Hafif genleştirilmiş kil agreganın betonunda, çimento matrisi ile genleştirilmiş kil arasında hiçbir ayırım yoktur. Hafif agreganın beton matrisi içerisinde bulunan mükemmel agreganın

hamuru bağı nedeniyle agregayı atlamak yerine, kırılma düzlemi *Şekil 6*'da gösterildiği gibi içinden geçer. Oysa geleneksel betonlarda kırılma düzlemi agregaları atlar ve böylece agregaların çevresinde bir düzlem meydana gelir (Clarke, 2005). Agregada betonun büyük bir bölümünü kapladığından, agreganın özellikleri, bulunduğu betonun performansını büyük ölçüde etkiler. Çimento macunu, hafif agregalar ve çimento hamurunu ve agregalar arasındaki ara yüzey vasıtasıyla agrega kabuğuna yayılır (Payam vd., 2014). Hafif, genişletilmiş killi agregadan yapılan betonlarda, mikro çatlaklar nedeniyle hiçbir güç kaybı yaşanmamıştır.

Yapısal Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Basınç dayanımı.

Yerinde döküm, ön döküm veya ön gerilmeli betonun olağan tasarım dayanımları için inşaat endüstrisinin ihtiyaç duyduğu basınç dayanım seviyeleri, günümüzde kullanılan yapısal hafif agregalarla ekonomik olarak elde edilebilir. 20.0 MPa ile 35.0 MPa arasındaki tasarım dayanımları yaygındır (Tablo 3). Prekast ve ön germe tesislerinde, 35.0 MPa'lık tasarım dayanımları olağandır. Hafif agregalar ile dayanım, kaba agreganın maksimum boyutunu azaltarak aynı çimento içeriğinde artırılabilir. Hafif agrega betonun basınç dayanımı genellikle su-çimento oranından ziyade belirli bir kıvamdaki çimento içeriği ile ilgilidir. Hafif beton karışımlarında işlenebilirliği arttırmak ve yerleştirmeyi ve bitirmeyi kolaylaştırmak için su azaltıcı veya akışkanlaştırıcı katkı maddeleri sık sık kullanılır.

Tablo 3. Ortalama Basınç Dayanımı ve Çimento İçeriği Arasındaki İlişki (ACI Committee 213)

Compressive strength psi (MPa)	Cement content lb/yd ³ (kg/m ³)	
	All-lightweight	Sand-lightweight
2500 (17.24)	400-510 (237-303)	400-510 (237-303)
3000 (20.68)	440-560 (261-332)	420-560 (249-332)
4000 (27.58)	530-660 (314-392)	490-660 (291-392)
5000 (34.47)	630-750 (374-445)	600-750 (356-445)
6000 (41.37)	740-840 (439-498)	700-840 (415-498)

Birim ağırlık.

ACI 213'e göre yapısal kalitede beton için ağırlık azaltma, hafif betonun birincil avantajıdır. Malzemenin kaynağına bağlı olarak, yapısal sınıf hafif beton, 1440 kg/m³ ila 1840 kg/m³ arasında bir kuru ağırlık aralığında elde edilebilir. Betonun yoğunluğu, agregaların

granülometrisine, nem içeriğine, karışım oranlarına, çimento içeriğine, su-bağlayıcı oranına, kimyasal ve mineral katkılara vb. bağlıdır. Malzemelerin yanı sıra, aynı zamanda sıkıştırma yöntemine, kür koşullarına vs. de bağlıdır (Chandra, & Berntsson, 2003)

Elastisite modülü ve poisson oranı.

Betonun elastisite modülü göreceli miktarda hamura, agrega miktarına ve her bir bileşenin modülüne bağlıdır. Kum ve çakıl betonu daha yüksek bir E_c değerine sahiptir çünkü kum ve çakıl modülü yapısal hafif agrega modülünden daha büyüktür. Genel olarak, yapısal hafif agrega beton için elastisite modülünün, aynı dayanımlı kum ve çakıl betonunun $\frac{1}{2}$ ile $\frac{3}{4}$ arasında değiştiği düşünülmektedir. Hafif agrega granülometrisindeki değişikliklerin, göreceli çimento hamuru ve agrega hacimlerinin oldukça sabit kalması durumunda genellikle elastisite modülü üzerinde çok az etkisi vardır.

Poisson hafif beton oranını rezonans yöntemleriyle belirleme testi, kullanılan yaş, dayanım veya agrega ile sadece bir miktar değiştiğini ve değerlerin ortalama 0,16 ile 0,25 arasında değiştiğini göstermiştir. Pratik tasarım amaçları için genellikle 0,20'lik bir değer varsayılabilir (ACI Committee 213).

Yarma çekme dayanımı.

Sürekli nemli sertleştirilmiş hafif betonlar için çekme dayanımı temel olarak basınç dayanımı ile ilişkilidir ve eşit basınç dayanımlı normal ağırlıktaki betonunkine eşit olarak kabul edilebilir. Kurumaya maruz kalan hafif betonların gerilme dayanımı, betonun yapılarındaki davranışı bakımından daha önemlidir. Betonun kurutulması sırasında, nem kaybı, beton elemanların iç kısmına yavaş bir şekilde ilerler ve dış yüzeylerde gerilmelerinin gelişmesine ve hala nemli iç bölgelerde sıkıştırma gerilmelerinin dengelenmesine neden olur. Böylece kuruma hafif betonun dış yüklenmesine karşı çekme direnci sürekli nemli kürlenmiş beton ile belirtilenden daha az olacaktır. Karşılaştırmalar eşit basınç mukavemeti yapıldığında tüm hafif betonların yarma çekme dayanımı, normal ağırlık referans betonunun yaklaşık % 70 ila %100'ü arasında değişir (ACI Committee 213)

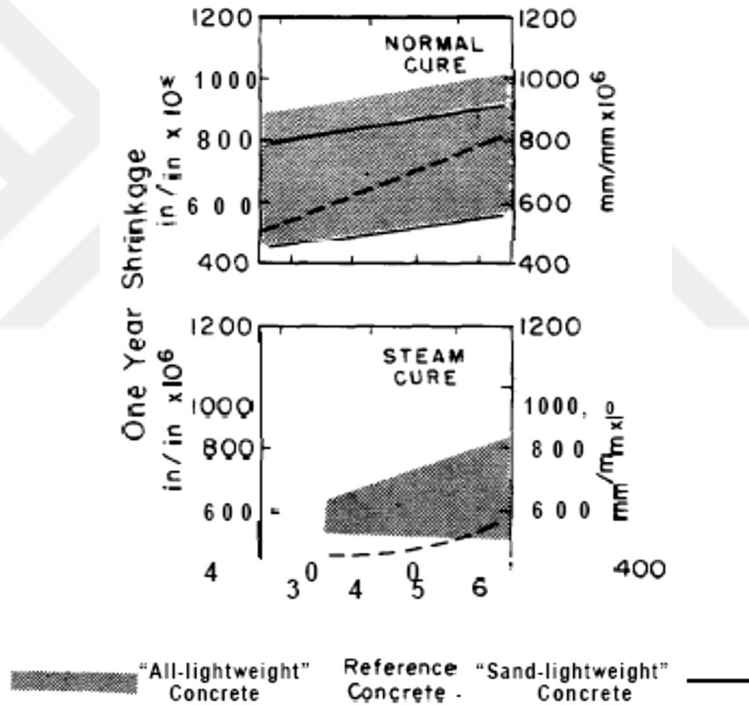
Kuruma büzülmesi

Kuruma büzülmesi çatlama, ön gerilim kaybı, etkili gerilme dayanımı ve bükülme derecesini etkileyen önemli bir özelliktir. Büyük boyutlu beton elemanlarının veya yüksek

bağıl neme sahip olanların % 50 bağıl nemde depolanan küçük laboratuvar numunelerinin gösterdiğinden çok daha az büzülme yaşayabileceği kabul edilmelidir.

Normal olarak kürlenmiş beton. Şekil 8 tüm hafif betonların kuruduktan sonraki bir yıl içindeki çeşitli büzülme değerlerini göstermektedir. Düşük dayanımlı hafif betonun genellikle referans betondan daha fazla kuruma büzülmeye sahip olduğu görülmektedir. Ancak, daha yüksek dayanımlarda, bazı hafif betonlar daha düşük büzülme göstermektedir. Hafif ince agregaların doğal kum ile kısmen veya tamamen değiştirilmesi, çoğu hafif agrega ile yapılan betonlar için büzülme azaltır.

Atmosferik buharla kürlenmiş beton. Buhar kürü uygulandığında kuruma büzülme azalması yüzde 10 ila 40 arasında değişebilir. Bu aralığın alt kısmı, normal ağırlıktaki beton referansı için olandan çok farklı değildir (ACI Committee 213).



Şekil 8. Bir yıl sonraki büzülme değerleri (ACI Committee 213).

Yapısal Hafif Beton Kullanım Alanları.

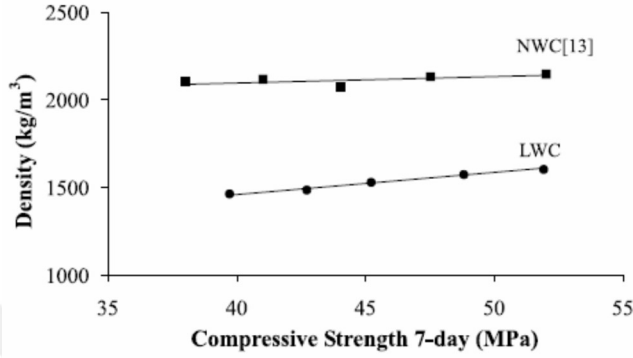
Normal ağırlıklı beton yerine yapısal hafif agrega betonun kullanımı, örneğin çok katlı bir binada zemin döşemesi olarak, daha düşük bir malzemenin kullanılmasıyla ortaya çıkabilecek potansiyel tasarruflara ve göreceli maliyetlere bağlıdır. Yapısal hafif agrega betonu normal betondan yaklaşık %28 daha hafiftir ve ölü yükün canlı yüke eşit olduğu bir tasarımda %14 enerji yoğun çelik takviyesinden tasarruf sağlayabilir. Kolonlarda ve temelde

eşit veya daha fazla tasarruf elde edilir. Uzun açıklıklı köprüler için, canlı yük toplam yükün küçük bir parçasıdır ve yoğunluktaki azalma sadece kütlede değil, aynı zamanda kesit boyutunda da azalmaya çevrilir. Bu, özellikle ön gerilmenin, yapısal hafif agrega betonun normal ağırlıklı betona kıyasla azaltılmış modülünü telafi eden yük dengeleme etkileri getirebileceği durumlarda geçerlidir. Düşük kütle ve yoğunluk, sismik bölgelerde son derece önemlidir. Normal olarak, bir mineral daha yüksek gözeneklilik geliştirdiğinden, güç ve sertlik hızla azalır ve bu hafif agregalarda da aynıdır. Bununla birlikte, normal agregalar hafif agrega ile değiştirildiğinde, sadece mütevazı bir dayanım azalması meydana gelir. Normal ağırlıktaki agregalar çimento hamuru matrisinden çok daha katıdır ve agregalar lokal stres konsantrasyonlarına neden olur. Düzenli agregalar, matristen çok daha güçlü olan, strese karşı dirençli değildir, ancak, agrega-çimento hamuru ara yüzünde, kompozitin erken bozulmasına neden olan bir zayıflık bölgesi vardır. Yapısal hafif agrega beton ile agrega sertliği, hamurun sertliği ile yakından eşleşir ve normalde beklenenden daha yüksek bir dayanıma yol açan çok homojen bir gerilme dağılımı ile sonuçlanır. Ayrıca, çimento hamuru matrisi genişletilmiş agregalara çok etkili bir şekilde yapışır, böylece düşük dayanımlı ara-yüz katmanı yoktur. Bu iki faktör, yapısal hafif agrega betonunun çok yüksek dayanıklılık geliştirmesini sağlar ve böylece yapısal bir malzeme olarak önemli bir rol oynar. Hafif agrega betonu, başka bir yapıya ve başka bir dayanım sınıfına sahip olsa da çekici bir yapı malzemesidir. Hafif agregaların düşük dayanımı, bunlarla yapılan betonun yüksek dayanımlı olmayacağına inanılmasına neden olur, ancak agregaların düşük dayanımı, yüksek dayanımlı çimento hamuru ile telafi edilebilir. Bugün 50 MPa, 15 cm, küp basınç dayanımı olan ve 100 MPa 'ya kadar özel oranlarda Yapısal hafif agregalı beton üretmek olasıdır (Chandra, & Berntsson, 2003).

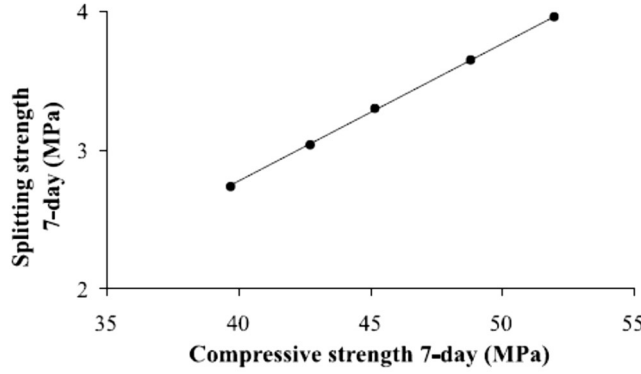
Literatürde Genleştirilmiş Kil Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Joao A. Rossignolo et. Al. (Rossignola., Agnessi, & Morais, 2003) Brezilya hafif agrega (genleştirilmiş kil) kullanarak yüksek performanslı betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Beş karışım hazırlanmış ve çimento (erken dayanımı yüksek portland çimentosu) oranı 440 kg/m^3 ile 710 kg/m^3 arasında değişmiştir. Silika dumanı çimento (ağırlıkça) yerine % 10'luk dozajda kullanılmış ve s/c oranı 0.37 ile 0.54 arasında değişmiştir. Tüm karışımlarda çimento ağırlığının % 1.5 oranında hızlandırıcı süper akışkanlaştırıcı vardır. Karışımlar için kıvam $200 \pm 10 \text{ mm}$ aralığındadır. 7 günlük basınç dayanımı ve kuru birim ağırlık, sırasıyla 39.7 MPa ile 51.9 MPa ve 1460 kg/m^3 ile 1605 kg/m^3 arasında değişmiştir.

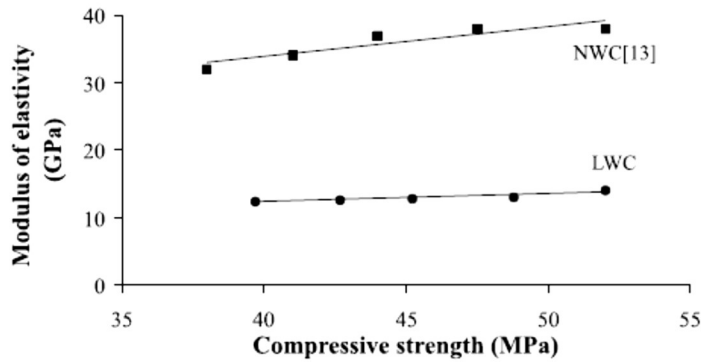
Yüksek dayanımlı hafif betonun basınç dayanımı sonucu, normal ağırlıktaki betondan daha düşüktür (Şekil 7). Ancak, hafif beton, yüksek malzeme verimlilik oranı göstermiştir. Eğilme ve çekme gerilme mukavemeti 3.1 MPa ila 5.3 MPa ve 2.7 MPa ila 4.0 MPa arasında değişmiştir. Ancak, yüksek performanslı hafif beton için gerilme/basınç dayanımı oranı, yüksek performanslı normal ağırlıktaki betona göre daha düşüktür (Şekil 9). Hafif betonun elastisite modülü aynı dayanımlı normal ağırlıktaki betondan çok daha düşüktür (Şekil 7) (Rossignola *vd.*, 2003).



Şekil 9. 7.gün basınç dayanımı ile yoğunluk ilişkisi (Rossignola *vd.*, 2003)



Şekil 10. Çekme dayanımı ve 7.gün basınç dayanımı ilişkisi (Rossignola *vd.*, 2003)



Şekil 11. Elastisite modülü ile 7 günlük basınç dayanımı ilişkisi (Rossignola *vd.*, 2003)

Ergül Yaşar ve diğerleri (Yasar, Atis, Kılıç, & Gulsen, 2003) bir yapının ölü ağırlığında bir azalma avantajı sağlayacak olan cüruf (bazaltik pomza) kullanımı ile yapısal hafif beton tasarımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Uçucu kül kullanımıyla daha ekonomik ve daha yeşil bir yapısal hafif agregalı beton karışımı elde ettiğini bulmuşlar. Yaklaşık Portland çimentosu miktarı 500 kg/m^3 ve uçucu kül yapısal hafif ağırlıklı agregada Portland çimentosu değişiminde % 20 uçucu kül kullanılarak beton karışımı yapılmıştır. Hava ile kurutulmuş birim ağırlıklar 1860 kg/m^3 ve 1850 kg/m^3 (% 20 uçucu kül) ve 28 günde 28 MPa ve 29 MPa'da (% 20 uçucu kül) basınç dayanımıdır. Hafif agregada kullanılarak 25 MPa silindir basınç dayanımlı yapısal hafif agregada betonun üretilebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca, uçucu kül kullanımıyla ekonomik bir Yapısal Hafif agregada beton üretilebilmektedir (Yasar vd., 2003).

Ergül Yaşar ve diğerleri (Kılıç, Atiş, Yaşar, & Özcan, 2003) mineral katkı olarak uçucu kül ve silika dumanını birlikte ve ayrı ayrı kullanarak yüksek dayanımlı yapısal hafif beton tasarımı için yapısal hafif betonu cüruf ile incelemeye devam etmişlerdir. Altı beton karışımı üretilmiştir. Çimento içeriği 500 kg/m^3 olan kontrollü hafif cüruf betonu, uçucu kül yapısal hafif agregada betonu, çimento yerine % 20 uçucu kül kullanılarak, çimento yerine %10 silis dumanı kullanarak ve çimento yerine % 20 uçucu kül, %10 silis dumanı şeklinde yapılmıştır. Hafif betonun s/ç oranı 0.55'te sabit tutulmuştur. Ayrıca su/çimento oranını 0.55 ve 0.45 ile karşılaştırmak için iki normal ağırlık betonu üretilmiştir. Araştırma sonuçlarına dayanarak, hafif agregada kullanılarak 30 MPa'lık silindir basınç dayanımlı bir yapısal hafif agregada betonun üretilebileceği sonucuna varılabilir. Ayrıca, 30 MPa silindir dayanıma sahip ekonomik yapısal hafif agregada betonu, uçucu kül ile üretilebilmektedir. Ayrıca, 40 MPa silindir basınç dayanımına sahip SLWHSC silika dumanı ile üretilebilir (Kılıç vd., 2003).

Khandaker M. ve AnwarHossain (Khandaker, & Hossain, 2004) hafif beton üretiminde volkanik pomzanın kaba agregada olarak uygun olduğunu bildirmişlerdir. Çalışma, hafif betonda harmanlanmış çimento ve volkanik pomza agregalı volkanik pomza tozu üzerinde yapılan araştırmalar olarak iki bölümden oluşmaktadır. Ayarlanan zaman ve harmanlanmış çimentonun basınç dayanımı,%0-%25 arasında farklı oranlarda volkanik pomza tozu kullanılarak incelenmiştir. Priz sürelerinin değişme eğilimi, volkanik pomza tozu içeriğinin artmasıyla her iki ayar süresinin de artışı göstermektedir. Volkanik pomza tozu muhtevasının artmasıyla harmanlanmış çimentonun basınç dayanımı azalmıştır. Ayrıca, farklı volkanik pomza agregada yüzdelere dayanım, elastisite modülü, büzülme ve geçirgenlik üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi test yapılmıştır. Volkanik pomza agregası artışıyla

aynı 0.45 su/çimentodaki çökme değerlerinin azaldığı bulunmuştur. Normal dayanımlı ezilmiş çakıl agregalarının nispeten zayıf pomza agregaları ile değiştirilmesinden dolayı volkanik pomza agrega yüzdesindeki artış ile basınç dayanımı azalır. Çekme mukavemeti değişimi aynı zamanda basınç mukavemeti ile aynı eğilimi gösterir. Betonun Elastisite modülü, basınç dayanımının bir işlevidir ve normal olarak basınç dayanımının azalmasıyla azalır. (Khandaker, & Hossain, 2004)

Chao-LungHwang ve Meng-Feng Hung (Hwang, & Hung, 2005) hafif betonun performansını farklı w/c oranı ve farklı çimento hamuru içeriği ile karşılaştırmıştır. Yoğunlaştırılmış karışım tasarım algoritması yöntemi ile karışım oranları tasarlanmıştır. Bu yöntem, fiziksel yoğunluğun yüksek olduğu durumlarda fiziksel özelliklerin optimum olacağı hipotezinden geliştirilmiştir. Bu yöntemde, agrega fazı, gözenekliliği en aza indirmek ve katı malzemelerin yoğunluğunu arttırmak için kaba taneciklerin ince taneciklerle doldurulması ve böylece katı madde yoğunluğunun artırılması için ana iskeleti oluşturur. Bu yöntemde hamur fazı beton işlenebilirliği sağlamak için gözenekleri yağlamak ve doldurmak içindir. Bu araştırmada, yerel fabrikalarda üretilen hafif ağırlıklı cüruf kullanılmıştır. Uçucu kül mineral katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, yapısal hafif betonun, karışım tasarım algoritması yöntemiyle yüksek mukavemet, akış kabiliyeti ve mükemmel dayanıklılık sağlayabildiğini göstermektedir. Yüksek s/ç oranı ve düşük su içeriği erken basınç dayanımını etkileyebilir, ancak karışım tasarım algoritması yöntemi uygulanırsa çimentonun dayanım verimliliği daha iyi hafif beton değeri elde edilir. Agreganın fiziki yapısı sayesinde suyun ve çimento içeriklerinin azaltılması, hafif betonun daha düşük geçirgenliğine ve daha yüksek elektriksel direncine neden olacaktır (Hwang, & Hung, 2005).

Kok SengChia ve Min-Hong Zhang (Chia, & Zhang, 2002) yüksek dayanımlı hafif agrega betonun su geçirgenliğini ve klorür geçirgenliğini araştırmış ve yüksek dayanımlı normal ağırlıklı betonun silika dumanı ile olan veya olmayanları ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada hafif agrega geliştirilmiş kil ve ince agrega doğal kum kullanılmıştır. W/c oranları 0.55 ve 0.35 ve w/c oranı 0.35 ile çimento değişimi olarak %10 silis dumanı ile üç seri beton karışımı hazırlanmıştır. Sonuçlar, normal ağırlıklı betonun geçirgenliğinde 0.55'ten 0.35'e indirgenmiş su/çimento nedeniyle yaklaşık 40 MPa'dan 80 MPa'ya kadar kuvvetli bir artış olduğunu hafif betonların diğer geçirgenliği farklı su/çimento oranlarında benzer olmuştur. Çimento değişimi olarak %10 silis dumanının kullanılması, betonun su geçirgenliğini azaltmıştır. Bu geçirgenlik azalması, eşdeğer su/çimento içeren kontrol betonundan çok daha iyi sonuç vermiştir. (Chia, & Zhang, 2002)

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Materyal

Çimento.

Deneylerde, OYAK Bolu Çimento K.Kazan çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. CEM I 42,5 R tipi çimento' da %95-100 arasında klinker ve %0-5 minör ilave bileşen bulunmaktadır. Kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri Tablo 4, fiziksel özellikleri ve mekanik mukavemetleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Çimento ve Mineral Katkıların Kimyasal Özellikleri

Oksitler (%)	CEM I 42,5 R	ÖYFC	UK
CaO	65,95	29,12	7,31
SiO ₂	18,51	36,63	40,44
Al ₂ O ₃	4,58	11,77	10,01
Fe ₂ O ₃	2,81	0,83	7,31
Na ₂ O	0,45	0,54	3,92
K ₂ O	0,60	0,61	1,38
MgO	1,94	7,26	15,26
SO ₃ (%)	3,06	1,12	6,15
Kızdırma Kaybı (%)	4,25	0,74	0,65

Tablo 5. Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Fiziksel Özellikler	CEM I	TS EN 197-1
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,02	
Özgül Yüzey-Blaine (cm ² /gr)	3806	
Hacim Genleşmesi (mm)	1	≤ 10
Priz Başlangıcı (dk)	142	≥ 60
2 gün Basınç Dayanımı (N/mm ²)	29,1	≥ 20,0
28 gün Basınç Dayanımı (N/mm ²)	50,7	≥ 42,5 ve ≤ 62,5

Agregalar.

Deneysel çalışmalarda toplam 4 farklı agrega kombinasyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada Yapısal Hafif beton üretiminde farklı ince agrega kökeninin etkisi de incelenmiş olup, detayları aşağıda verilmiştir.



Şekil 12. Genleştirilmiş kil

Genleştirilmiş kil.

Genleştirilmiş kil (Şekil 12), doğal killerin, 1200 ° C'de termal genleşme ve klinkerleştirme işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen granül bir hafif agregadır. Genleştirilmiş kil granülleri boşluklu hafif bir iç hücre yapısına sahiptir. Bu yapı mükemmel bir ağırlık/güç oranı sağlayan kompakt ve güçlü bir dış kabuk içine yerleşmiş haldedir. Genleştirilmiş kil ayrıca yangına ve dona dayanıklı, termal olarak yalıtkan ve ses emici ve yanıcı olmayan bir malzemedir. Deneysel çalışmada kullanılan Genleştirilmiş kil agregası farklı elek boyutlarında yurt dışından temin edilmiştir. Tablo 6'te de genleştirilmiş kilin kimyasal özellikleri verilmiştir. Genleştirilmiş kil agregasına ait fiziksel analizler OYAK Beton Merkez Laboratuvarında yapılmıştır. 3 farklı tane boyut aralığında kullanılan genleştirilmiş kil agregalarının granülometrik bileşimleri Tablo 7'de, tane yoğunluğu ve su emme değerler Tablo 8'da verilmiştir.

Kireçtaşı.

Deneysel çalışmada kullanılan kireçtaşı agregası Ayaş agrega ocağından temin edilmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından yapılan mineralojik ve petrografik analizlere göre Kireçtaşı bej gri, masif dokulu ve küçük tanelidir. Karbonat grubu minerallerden oluşmakta olup dolomit mineralleri taneselsel olarak gözlenmekte ayrıca öz şekilli olarak gözlenen dolomit mineralleri ince taneli kalsit minerallerine nazaran daha baskın

olarak gözlenmektedir. Damar ve boşluk sistemleri mevcut olup süreksizlikler olası jips ve karbonat mineralleri dolguludur. Ana bileşenleri, kalsit ve dolomit gibi karbonat grubu minerallerden oluşmaktadır. Kireç taşının kimyasal özellikleri de aşağıda Tablo 6'de verilmiştir. Kireçtaşı Agregasının Mineral Bilesimi, Kalsit, Dolomit, jipsten oluşmaktadır. 3 farklı tane boyut aralığında kullanılan Kireç taşı agregalarının granülometrik bileşimleri Tablo 7'de tane yoğunluğu ve su emme değerleri Tablo 8'da verilmiştir. Kireçtaşı agregaları üzerinde, çok ince malzeme muhtevası (0,063 mm geçen) % 10,7 (f₁₆), çok ince malzemenin kalitesi (metilen mavisi) 1,0 gr boya/kg numune, yassılık %9,0 (FI₁₅), Los Angeles (parçalanma direnci) %22 (LA₂₅) tespit edilmiştir.

Tablo 6. *Agregaların Kimyasal Özellikleri*

Oksitler (%)	Genleştirilmiş Kil	Kireçtaşı	Doğal Kum
CaO	3,04	54,13	0,45
SiO ₂	57,59	1,56	89,32
Al ₂ O ₃	19,37	0,34	2,07
Fe ₂ O ₃	7,17	0,42	0,45
Na ₂ O	1,49	0,05	0,17
K ₂ O	3,04	0,10	0,03
MgO	3,24	0,38	3,33
SO ₃ (%)	0,52	0,01	0,05
Kızdırma Kaybı (%)	0,19	42,74	3,45

Kum.

Bu çalışmada kullanılan Doğal kum Çatalca maden ocaklarından temin edilmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Doğal kuma ait mineralojik ve petrografik analiz sonuçlarına göre Kumun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'da verilmiştir. Doğal kum üzerinde, çok ince malzeme muhtevası (0,063 mm geçen) % 0,8 (f₃), çok ince malzemenin kalitesi (metilen mavisi) 0,7 gr/kg tespit edilmiştir. Agregaların tane büyüklüğü dağılımları TS 3530 EN 933-1'e göre yapılmıştır ve Tablo 7'de verilmiştir. Tane yoğunluğu ve su emme oranı deney sonuçları TS EN 1097-6'e göre yapılmıştır.

Tablo 7. Tane Büyüklüğü Dağılımı

Elekler % geçen (mm)	22	11	8	4	2	1	0,5	0,250	0,063
0/4 mm Genleştirilmiş kil	100	100	100	97	69	47	33	24	4,2
3/8 mm Genleştirilmiş kil	100	100	90	6	3	0	0	0	0
8/20 mm Genleştirilmiş kil	100	69	33	14	0	0	0	0	0
0/4 mm Kireçtaşı kumu	100	100	100	99	68	49	33	21	10
4/11mm Kireçtaşı	100	97	66	9	0	0	0	0	0
11/22 mm Kireçtaşı	99	14	1	0	0	0	0	0	0
0/3 mm Doğal kum	100	100	100	100	90	77	53	10	1

Tablo 8. Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı

Elek Göz Açıklığı	Tane Yoğunluğu (kg/dm ³)	Su Tutma/Emme
0/4 mm G.kil	0,95	15
3/8 mm G.kil	0,73	22
8/20 mm G.kil	0,70	31
0/4 mm Kireçtaşı	2,64	0,8
4/11mm Kireçtaşı	2,65	0,6
11/22 mm Kireçtaşı	2,67	0,5
0/3 mm Doğal kum	2,56	1,1

Kimyasal katkı.

Beton karışım tasarımlarında polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı / yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır (SİKA, 2019). Bu kimyasal SİKA firmasına ait hi-tech serisi olarak adlandırılmış olup, polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan yüksek performanslı beton üretimi için geliştirilmiş yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkı malzemesidir. Katkının teknik özellikleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Opak
Yoğunluk	1,08-1,12 kg/litre
Klor içeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-12)	< 3,0
Katı madde miktarı g.	29,4

*+20 °C’de, %50 bağıl nem koşullarında elde edilmiştir.

Mineral katkı.

Deneylerde, OYAK Bolu Çimento Ereğli fabrikasından temin edilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve Kütahya – Tunçbilek'ten temin edilen Uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan mineral katkıların fiziksel özellikleri Tablo 10, kimyasal özellikleri Tablo 4 de ve aktivite indeksleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10. *Mineral Katkıların Fiziksel Özellikleri*

Fiziksel Özellikler	ÖYFC	UK
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,86	2,23
Priz Başlangıcı, Referans (dk.)	140	
Priz Başlangıcı, Karışım (dk.)	188	245
Özgül Yüzey-Blaine (cm ² /gr)	4512	2452
45 µm elek kalıntısı (%)	0,8	41,30

Tablo 11. *Mineral Katkıların Basınç Dayanımları*

Aktivite indeksi (%)	ÖYFC	TS EN 15167-1	UK	TS EN 450-1
7 gün	52,3	> 45		
28 gün	71,7	> 70	76	> 75
90 gün			89	> 85

Yöntem

Hafif Betonların Tasarımı.

Hafif beton tasarımlarında 2 farklı tip mineral katkı ikamesi ile oluşturulan farklı bağlayıcı miktarları (300 kg/m³ ve 500 kg/m³) belirlenmiştir. Genleştirilmiş kil agregasına kireç taşı kumu ve doğal kum ikamesiyle farklı agrega kombinasyonları oluşturulmuş referans kireç taşı agregasıyla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla farklı içeriklere sahip toplam 40 karışım hazırlanmıştır.

Agrega karışımları TS 706 EN 12620 standardında verilen B eğrisi esas alınarak belirlenmiştir.

Beton tasarımlarında çökme miktarı en az 22 ± 1 cm hedeflenmiştir. Kimyasal katkı kullanım oranı toplam bağlayıcı malzeme miktarına göre 300 kg/m³ olan tasarımlarda kütlece %1,4'ü ve s/b oranı 0,55 olarak, 500 kg/m³ olan tasarımlarda kütlece %1,6'sı ve s/b oranı 0,33 olarak sabit tutulmuştur.

Karışımlarda eş değer bağlayıcı dozajı 300 kg/m³ ve 500 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Puzolanik karışımlarda uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılan tasarımlarda

CEM I 42,5 R “çimentosu kullanıldığı için sırasıyla k katsayısı 0,4 ve 0,8 olarak seçilmiştir. Puzolanlı karışımlarda eş değer bağlayıcı miktarı (çimento miktarı + k x Mineral katkı miktarı) formülü ile belirlenmiştir. Beton bileşimleri Tablo 12 ve

Tablo 13’te verilmiştir.

Karışım tasarımı için malzemede rutubet yüzdeleri ve su emme değerleri hesaplanmıştır. Bu arada agregayı doygun kuru yüzey (DKY) haline getirmek için rutubet miktarından su emme değerleri düşülmüştür. Tane yoğunluğu ve elek analizi değerlerine göre beton karışımında malzemelerin % cinsinden miktarları hesaplanarak 40 dm³ beton karışımları hazırlanmıştır.

Laboratuvar çalışmaları, OYAK Beton Merkez Laboratuvarında yapılmıştır. Karışımlar düşey eksenli karıştırıcı tipli, kendi eksenini etrafında ortalama 1,5 devir/saniye hızla dönen 40 dm³ kapasiteli karıştırma makinesi (betonyer) kullanılarak yapılmıştır. Betonyer içerisine sırasıyla kırma taş, kırma kum, bağlayıcı ve üzerine doğal kum eklenerek karışım kuru olarak eklenmiştir.

Tasarımlarda kullanılacak karışım suyunun % 70’i karışıma eklenerek malzeme 1 dakika karıştırılmıştır. Sonra katkı hassas terazide tartılarak ve kalan su ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiştir. Yaklaşık 5 dakikalık toplam karışım süresinin ardından taze beton deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada taze beton harçları üzerinde sıcaklık, çökme, birim hacim ağırlık (BHA), hava içeriği, verileri elde edilmiştir.

10 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler kalıplanmıştır. (Şekil 14) Sertleşmiş beton numuneleri 20±2 °C sıcaklıkta standart küre bırakılmıştır. 1,3,7 ve 28 gün yaşlarındaki silindir numunelerde alt ve üst yüzeyleri aşındırma makinesi ile silme işlemine tabi tutulduktan sonra silindir numuneler üzerinde doğrudan basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

Tablo 12. 300 Kg/M³ Karışım Tasarımları (Malzeme Miktarları)

Karışım No	CEM I 42,5 R	UK (kg/m ³)	ÖYFC (kg/m ³)	S/B	Doğal kum (kg/m ³)	0/4 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	4/11 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	11/22 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	0/4 mm G.kil (kg/m ³)	3/8 mm G.kil (kg/m ³)	8/20 mm G.kil (kg/m ³)	K.Katkı Miktarı (kg/m ³)	Teorik BHA (kg/m ³)
KL1	300			0,55		1033	210	670				4,2	2382
KL2	270	75		0,55		975	210	670				4,2	2369
KL3	240	150		0,55		917	210	670				4,2	2356
KL4	240		75	0,55		1015	210	670				4,2	2379
KL5	180		150	0,55		998	210	670				4,2	2377
GK1	300			0,55					486	90	190	4,2	1235
GK2	270	75		0,55					462	90	190	4,2	1256
GK3	240	150		0,55					439	90	190	4,2	1280
GK4	240		75	0,55					481	90	190	4,2	1245
GK5	180		150	0,55					472	90	190	4,2	1251
GK/KK1	300			0,55		1106				90	190	4,2	1855
GK/KK2	270	75		0,55		1054				90	190	4,2	1848
GK/KK3	240	150		0,55		985				90	190	4,2	1824
GK/KK4	240		75	0,55		1095				90	190	4,2	1859
GK/KK5	180		150	0,55		1067				90	190	4,2	1846
GK/DK1	300			0,55	984					90	190	4,2	1733
GK/DK2	270	75		0,55	928					90	190	4,2	1722
GK/DK3	240	150		0,55	873					90	190	4,2	1712
GK/DK4	240		75	0,55	966					90	190	4,2	1730
GK/DK5	180		150	0,55	952					90	190	4,2	1731

Tablo 13. 500 Kg/M³ Karışım Tasarımları (Malzeme Miktarları)

Karışım No	CEM I 42,5 R	UK (kg/m ³)	ÖYFC (kg/m ³)	S/B	Doğal Kum (kg/m ³)	0/4 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	4/11 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	11/22 mm Kireçtaşı (kg/m ³)	0/4 mm G.kil (kg/m ³)	3/8 mm G.kil (kg/m ³)	8/20 mm G.kil (kg/m ³)	K.Katkı Miktarı (kg/m ³)	Teorik BHA (kg/m ³)
KL6	500			0,33		853	210	670				8,0	2406
KL7	450	125		0,33		757	210	670				8,0	2385
KL8	400	250		0,33		662	210	670				8,0	2365
KL9	400		125	0,33		825	210	670				8,0	2403
KL10	300		250	0,33		795	210	670				8,0	2398
GK6	500			0,33					375	90	190	8,0	1328
GK7	450	125		0,33					331	90	190	8,0	1359
GK8	400	250		0,33					288	90	190	8,0	1391
GK9	400		125	0,33					362	90	190	8,0	1340
GK10	300		250	0,33					348	90	190	8,0	1351
GK/KK6	500			0,33		882				90	190	8,0	1835
GK/KK7	450	125		0,33		787				90	190	8,0	1815
GK/KK8	400	250		0,33		693				90	190	8,0	1796
GK/KK9	400		125	0,33		853				90	190	8,0	1831
GK/KK10	300		250	0,33		825				90	190	8,0	1828
GK/DK6	500			0,33	850					90	190	8,00	1803
GK/DK7	450	125		0,33	756					90	190	8,00	1784
GK/DK8	400	250		0,33	667					90	190	8,00	1770
GK/DK9	400		125	0,33	821					90	190	8,00	1799
GK/DK10	300		250	0,33	796					90	190	8,00	1799

Karışımların hazırlanması

Karışım tasarımları için malzemede rutubet yüzdeleri ve su emme değerleri hesaplanmıştır. Bu arada agregayı doygun kuru yüzey (DKY) haline getirmek için rutubet miktarından su emme değerleri düşülmüştür. Tane yoğunluğu ve elek analizi değerlerine göre beton karışımında malzemelerin % cinsinden miktarları hesaplanarak 40 dm³ beton karışımları hazırlanmıştır. 22 ± 1 cm çökme için ilk karışım tasarımında betonier içerisine sırasıyla kırma taş, kırma kum, çimento ve üzerine doğal kum eklenerek betonier içerisinde malzemeler homojen şekilde karıştırılmıştır.

Tablo 14. Karışım Tipleri

Bağlayıcı Miktarı	Bağlayıcı Tipleri	Agrega Kombinasyonu
300 kg/m ³	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kireçtaşı (0-4 mm, 4-11 mm, 11-22 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	G.kil (0-4 mm, 3-8 mm, 8-20 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kireçtaşı (0-4 mm) G.kil (3-8 mm, 8-20 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kum (0-2 mm) G.kil (3-8 mm, 8-20 mm)
500 kg/m ³	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kireçtaşı (0-4 mm, 4-11 mm, 11-22 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	G.kil (0-4 mm, 3-8 mm, 8-20 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kireçtaşı (0-4 mm) G.kil (3-8 mm, 8-20 mm)
	CEM I CEM I + UK CEM I + ÖYFC	Kum (0-2 mm) G.kil (3-8 mm, 8-20 mm)

Karışımında çimentonun tozuma ile etrafa saçılışını engellemek için en son doğal kum eklendi. Beton karışım suyunun %70'i karışıma eklenerek malzemeler karıştırılmıştır. Sonra katkı hassas terazide tartılarak ve kalan su ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiştir. Yaklaşık 5 dakikalık toplam karışım süresinin ardından taze beton deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Numuneler sıcaklığı 20 ± 2 °C olan kirece doymun su içinde muhafaza edilmiştir. Taze betonun mikserde görüntüsü Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 13. Malzemenin görünümü (soldaki: kuru, sağdaki: yaş)



Şekil 14. Taze beton numunesi alımı

Taze Beton Deneyleri

Çökme deneyi.

Tasarımlar laboratuvar tipi karıştırıcıyla karıştırıldıktan sonra TS EN 12350-2 standardına uygun şekilde kesik huni şekilli kalıp içerisine sıkıştırılarak doldurulmuştur. (Şekil 14) Kalıbın yukarı doğru çekilerek alınmasından sonra, taze beton kütleindeki çökme mesafesi, betonun kıvam ölçüsü olarak ölçülmüştür.



Şekil 15. Çökme deneyi

Hava miktarı deneyi ve taze betonda birim hacim ağırlığı tayini

Üretilen karışımlarda Şekil 16 ve Şekil 17’de görülen 8 lt kapasiteli hava ölçer ekipmanı kullanılarak TS EN 12350-7 standardına göre hava %’si ölçümleri yapılmıştır. Bunun için çökme deneyi yapıldıktan sonra taze beton 8 lt kapasiteli kaba yerleştirilerek 8 lt hacme giren malzeme miktarları Şekil 17’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 16. Betonda hava ölçümü öncesi ve taze birim hacim ağırlık ölçümü



Şekil 17. Hava ölçümü sonrası

Beton Sıcaklığı

Beton karışım yapıldıktan 15 dk. sonra metal problu termometre ile beton sıcaklıkları ölçülmüştür. Termometrenin probu harçlar numune kaplarına yerleştirildikten sonra kalıpların tam ortasına batırılıp değer sabit hale gelene kadar bekledikten sonra ölçümler alınmıştır.

Sertleşmiş Beton Deneyleri

Basınç dayanımı deneyi

Numuneler 24 saat numune kalıpları içinde bekletildikten sonra sökülmüştür. Ardından *Şekil 18*'de gösterildiği gibi sıcaklığı 20 ± 2 °C olan kür havuzunda bulunan kirece doymun su içinde bekletilmiştir. 1, 3, 7 ve 28 gün yaşlarında ayrı ayrı kür tankından çıkarılan numunelere basınç dayanımı deneyleri tek eksenli 300 ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. Kür havuzu ve numunelerin görünümü

Yarmada çekme deneyi

Sertleşmiş betonlarda yarmada çekme deneyi TS EN 12390-6 standardına göre yapılmıştır. Deneye tabi tutulan numuneler 28.gün sonunda havuzdan çıkarılarak üzerindeki fazla su silinmiştir. Sabitleme aleti kullanılarak, basınç dayanım presine tam merkezlenmek suretiyle yerleştirilen numunelerin yükleme hızı sabit kalacak şekilde kırım yapılarak okunan en büyük değer kaydedilmiştir.

Birim hacim ağırlık ve su emme deneyi

Betonların Birim Hacim Ağırlık (BHA) ve SE oranlarının bulunması TS EN 12390-7 standardına göre yapılmıştır. Numuneyi havada ve su içerisinde tartabilecek bir düzeneği olan

en az 0.5 g ölçebilen terazi kullanılmıştır. Numunelerin kurutma işlemi sıcaklığını 105 ± 5 °C'de sabit tutabilen etüvde yapılmıştır. Deney gününe kadar kür havuzunda bekletilen sertleşmiş beton numuneleri sudan çıkarılıp yüzeyleri kurulanmıştır. Doymun kuru yüzey haline getirilen beton numuneleri havada tartma işlemi yapıldıktan sonra, tel sepet içerisinde su içerisindeki tartma işlemi yapılmıştır. Su içerisinde numunelerin tartma işlemi bittikten sonra, numuneler 24 saat boyunca etüvde bekletilerek etüv kurusu haline getirilmiştir. Aşağıda verilen formüller kullanılarak numunelerin doymun birim hacim ağırlık ve su emme oranı hesaplanmıştır

$$\rho_d = M_1 / (M_1 - M_2)$$

$$w = (M_1 - M_3) / M_3$$

ρ_d : doymun birim hacim ağırlık, g/cm³

w : su emme oranı, %

M₁ : numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı, g

M₂ : numunenin su içerisindeki ağırlığı, g

M₃ : numunenin etüv kurusu ağırlığı, g

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

Bölüm 3'te anlatılmış olan taze beton deneylerinin ve sertleşmiş beton deneylerinin sonuçları bu bölümde belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda üretilen betonlar için taze halde çökme, taze halde birim ağırlık, birim hacim ağırlık, hava miktarı ölçümleri ve beton sıcaklığı tayinleri yapılmıştır. Sertleşmiş halde ise beton numuneler üzerinde 1, 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı, yarmada çekme, sertleşmiş birim hacim ağırlık ve su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları alt başlıklarda verilmiş ve tartışılmıştır.

Taze Beton Deney Sonuçları

Tablo 15'te tamamı kireçtaşı agregası ile üretilmiş normal ağırlıklı betonların, Tablo 16'da tamamı genişletilmiş kil agregası ile üretilmiş hafif betonların, Tablo 17'de ince kısmı kireçtaşı kumu ve kabası genişletilmiş kil agregası ile üretilmiş hafif betonların ve Tablo 18'de ince kısmı doğal kum ve kabası genişletilmiş kil agregaları ile üretilmiş hafif betonların taze haldeki deneylerine ilişkin sonuçları verilmiştir. Tablolarda çökme (cm), taze haldeki ağırlık (kg/m^3), birim hacim ağırlık (BHA) (kg/m^3), hava miktarı (%) ve beton sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$) deney sonuçları verilmiştir. Tablolarda kolaylık oluşturması için tasarımlarda esas kriter olan bağlayıcı miktarları ve s/ç oranları da verilmiştir.

Tablo 15. Kireç Taşı İle Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları

No	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5	KT6	KT7	KT8	KT9	KT10
s/ç	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Çimento (kg/m^3)	300	270	240	240	180	500	450	400	400	300
ÖYFC k:0.8	0	0	0	75	150	0	0	0	125	250
UK k:0.4	0	75	150	0	0	0	125	250	0	0
Çökme (cm)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Ağırlık (kg/m^3)	2382	2369	2356	2379	2377	2406	2385	2365	2403	2398
BHA (kg/m^3)	2378	2372	2357	2365	2361	2410	2395	2375	2401	2400
Hava (%)	2.4	2.8	3	3	3	2.5	2.2	2.4	2	2
Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17

Tablo 15’te verilen deney sonuçlarına göre beton numunelerde kullanılan agregaların tümü kireçtaşı olduğunda;

- Mevcut tasarımlarla S5 tipi kıvamında akıcı pompalanabilir beton üretilmiştir. Tüm beton tasarımlarında yaklaşık aynı çökmeler elde edilmiştir. Bu da malzeme ve tasarımların homojen olduğunun göstergesidir.
- Üretilen tüm betonların BHA’ları 2300 – 2500 kg/m³ arasında elde edilmiştir. Böylece normal BHA’lı betonlar üretilmiştir.
- Taze halde tasarımlar %2 hava oranına göre yapılmış ve taze haldeki beton numunelerin hava miktarları %2 – 3 arasında olmuştur. Bu fark üretilen betonların yeterince homojen olduğunun göstergesidir.
- Çimento dozajı ve s/ç oranı taze beton özelliklerini önemli oranda etkilememiştir.

Tablo 16. G. Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları

No	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	GK6	GK7	GK8	GK9	GK10
s/ç	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Çimento (kg/m ³)	300	270	240	240	180	500	450	400	400	300
ÖYFC k:0.8	0	0	0	75	150	0	0	0	125	250
UK k:0.4	0	75	150	0	0	0	125	250	0	0
Çökme (cm)	0	0	0	0	0	0	22	22	22	22
Ağırlık (kg/m ³)	1211	1232	1254	1221	1227	1328	1359	1391	1340	1351
BHA (kg/m ³)	1195	1220	1234	1200	1206	1311	1346	1390	1330	1328
Hava (%)	10	10	10	10	10	9.5	8	6	8	7
Sıcaklık °C	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17

Tablo 16’da verilen deney sonuçlarına göre beton numunelerde kullanılan agregaların tümü geliştirilmiş kil olduğunda;

- Mevcut tasarımlarla sadece 500 kg/m³ dozajlı ve mineral katkı beton numunelerde S5 tipi kıvamında akıcı pompalanabilir beton üretilmiştir. Ancak diğer tüm 300 kg/m³ dozajlı üretimlerin hiçbirinde çökme elde edilememiştir.
- Üretilen tüm betonların BHA’ları 1190 – 1400 kg/m³ arasında elde edilmiştir. Böylece tüm geliştirilmiş kil agregalı betonlar hafif beton sınıfında üretilmiştir. Çimento miktarındaki artış BHA’nın %10 mertebelerinde artmasına sebep olmuştur.
- Taze halde tasarımlar %2 hava oranına göre yapılmış olmasına rağmen taze haldeki beton numunelerin hava miktarları %6 – 10 arasında olmuştur. Bu farkın iki sebebi olabilir. Bunlardan biri üretilen betonların yeterince homojen olmadığını gösterebilir.

Diğeri beton üretimi sırasında agrega suya doyurulmamış olduğundan içindeki hava boşlukları suyla dolmuş ve bu su hava olarak görülmüştür.

Tablo 17. Kireçtaşı Kumu+G. Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları

No	GK/ KK1	GK/ KK2	GK/ KK3	GK/ KK4	GK/ KK5	GK/ KK6	GK/ KK7	GK/ KK8	GK/ KK9	GK/ KK10
s/ç	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Çimento (kg/m ³)	300	270	240	240	180	500	450	400	400	300
ÖYFC k:0.8	0	0	0	75	150	0	0	0	125	250
UK k:0.4	0	75	150	0	0	0	125	250	0	0
Çökme (cm)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Ağırlık (kg/m ³)	1849	1842	1818	1853	1840	1835	1815	1796	1831	1828
BHA (kg/m ³)	1823	1840	1805	1830	1829	1818	1801	1781	1813	1813
Hava (%)	6.2	5	5.4	5.4	6.5	5.6	5.4	3.9	4.6	4.8
Sıcaklık °C	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Tablo 17’de verilen deney sonuçlarına göre beton numunelerde kullanılan agregaların ince kısmı kireçtaşı ve kaba kısmı genleştirilmiş kil olduğunda;

- Mevcut tasarımlarla çimento dozajına ve s/ç’ye bakılmaksızın tüm serilerde S5 tipi akıcı kıvamda pompalanabilir özellikte beton üretilmiştir.
- Üretilen tüm betonların BHA’ları 1780 – 1850 kg/m³ arasında elde edilmiştir. Böylece tüm betonlar hafif beton sınıfında üretilmiştir. Çimento miktarındaki artış ve s/ç oranındaki değişim BHA üzerinde önemli değişikliklere sebep olmamıştır. Böylece bu serilerde BHA üzerinde agreganın etkili olduğu söylenebilir.
- Taze halde tasarımlar %2 hava oranına göre yapılmış olmasına rağmen taze haldeki beton numunelerin hava miktarları yaklaşık %4 – 6 arasında olmuştur. Yine benzer şekilde üretilen betonların yeterince homojen olmadığı söylenebilir. Ancak beton üretimi sırasında agrega suya doyurulmamış olmasının hava miktarı üzerinde olumsuz etkileri bilinmektedir. Bu sebeple homojenliğin yanı sıra hafif agregaların boşluklarının bu sonucu etkilediği düşünülmektedir.
- Tüm deney gruplarında ortam sıcaklığı ile beton sıcaklıkları eşit olduğu belirlenmiştir.
- Betonların taze ağırlıkları ile birim hacim ağırlıkları arasında az da olsa bir fark oluşmuştur. Burada taze haldeki ağırlığa bağlı BHA %3 mertebelerinde yüksek elde edilmiştir. Bunun az da olsa deneysel hataya bağlı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 18. *Dere Kumu+G.Kil ile Üretilmiş Betonların Taze Haldeki Deney Sonuçları*

No	GK/ DK1	GK/ DK2	GK/ DK3	GK/ DK4	GK/ DK5	GK/ DK6	GK/ DK7	GK/ DK8	GK/ DK9	GK/ DK10
s/ç	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Çimento (kg/m ³)	300	270	240	240	180	500	450	400	400	300
ÖYFC k:0.8	0	0	0	75	150	0	0	0	125	250
UK k:0.4	0	75	150	0	0	0	125	250	0	0
Çökme (cm)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Ağırlık (kg/m ³)	1729	1718	1708	1726	1727	1803	1784	1770	1799	1799
BHA (kg/m ³)	1700	1699	1691	1709	1704	1760	1760	1762	1780	1774
Hava (%)	7.5	5.8	7.5	5.6	6	5.5	6	5	5.6	4
Sıcaklık °C	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Tablo 18’de verilen deney sonuçlarına göre beton numunelerde kullanılan agregaların ince kısmı dere kumu ve kaba kısmı genişletilmiş kil olduğunda;

- Mevcut tasarımlarla çimento dozajına ve s/ç’ye bakılmaksızın tüm serilerde S5 tipi akıcı kıvamda pompalanabilir özellikte beton üretilmiştir.
- Üretilen tüm betonların BHA’ları 1690 – 1780 kg/m³ arasında elde edilmiştir. Böylece tüm betonlar hafif beton sınıfında üretilmiştir. Çimento miktarındaki artış ve s/ç oranındaki değişim BHA üzerinde önemli değişikliklere sebep olmamıştır. Böylece bu serilerde BHA üzerinde agreganın etkili olduğu söylenebilir.
- Taze halde tasarımlar %2 hava oranına göre yapılmış olmasına rağmen taze haldeki beton numunelerin hava miktarları yaklaşık %4 – 7,5 arasında olmuştur. Yine benzer şekilde üretilen betonların yeterince homojen olmadığı söylenebilir. Ancak beton üretimi sırasında agrega suya doyurulmamış olmasının hava miktarı üzerinde olumsuz etkileri bilinmektedir. Bu sebeple homojenliğin yanı sıra hafif agregaların boşluklarının bu sonucu etkilediği düşünülmektedir.

Tüm sonuçlara göre genişletilmiş kil agregalı beton karışımlar taze halde hafif beton sınıflandırmasına dahil olmuştur. Bunun yanı sıra genişletilmiş kil agregasının aşırı boşluklu olması ve karışımdan önce suya doyurulmaması sebebiyle taze hava miktarlarının tasarıma göre oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre genişletilmiş kil agregalı hafif beton üretiminde pompalanabilir ve akıcı kıvam elde edilmek isteniyorsa mutlaka yüksek miktarda çimento yada tüvenan (karışık yada kompoze) agrega kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Sertleşmiş Beton Denev Sonuçları

Basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Tablo 19’da tamamı kireçtaşı agrega ile üretilmiş normal ağırlıklı betonların, Tablo 20’de tamamı genleştirilmiş kil agrega ile üretilmiş hafif betonların, Tablo 21’de ince kısmı kireçtaşı kumu ve kabası genleştirilmiş kil agregası ile üretilmiş hafif betonların ve Tablo 22’de ince kısmı doğal kum ve kabası genleştirilmiş kil agregaları ile üretilmiş hafif betonların 1, 3, 7 ve 28 gün yaşlarındaki basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Tablolarda çökme (cm), taze haldeki ağırlık (kg/m^3), birim hacim ağırlık (BHA) (kg/m^3), hava miktarı (%) ve beton sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$) deney sonuçları verilmiştir. Tablolarda kolaylık oluşturması için tasarımlarda esas kriter olan bağlayıcı miktarları ve s/ oranları da verilmiştir.

Tablo 19. Kireç Taşı Agregası ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_b)

No	n	Yaş (Gün) – Basınç dayanımı (MPa)				Standart Sapma $\sigma_{28\text{gün}}$	Eşdeğer beton sınıfı	28 gün yaşına göre dayanım gelişimleri (gün - %)		
		1	3	7	28			1	3	7
KT1	2	15,6	34,2	41,5	49,8	0,28	C30	31,33	68,67	83,33
KT2	2	10,4	31,2	39,3	49,1	0,42	C30	21,18	63,54	80,04
KT3	2	8,30	26,6	34,2	46,5	0,42	C30	17,85	57,20	73,55
KT4	2	9,70	24,7	32,3	46,6	0,71	C30	20,82	53,00	69,31
KT5	2	4,50	14,9	24,1	43,1	0,85	C25	10,44	34,57	55,92
KT6	2	29,9	47,8	58,3	70,2	0,57	C45	42,59	68,09	83,05
KT7	2	17,9	54,2	61,9	71,3	0,99	C45	25,11	76,02	86,82
KT8	2	11,6	51,0	61,3	72,1	0,42	C50	16,09	70,74	85,02
KT9	2	25,9	47,6	59,1	72,8	0,57	C50	35,58	65,38	81,18
KT10	2	11,3	37,3	54,1	72,4	1,41	C50	15,61	51,52	74,72

Tablo 19’a göre sadece kireçtaşı agregası kullanılarak üretilen betonlarda;

- Eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m^3 olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi KT1 nolu mineral katkısız tasarımda 15,6 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı KT5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 4,5 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi KT1 nolu mineral katkısız tasarımda 49,8 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı KT5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 43,1 MPa olarak elde

edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında en fazla %20 mertebesinde fark olduğu gözlenmiştir.

- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %30, %70 ve %85 olmuştur. Bu dayanım gelişimlerinin literatürde belirtilenlere göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Normal Portland çimentosuyla üretilen betonlarda 3 ve 7 günlük dayanım gelişiminin %35 – 45 ve %65 – 70 arasında olduğu bilinmektedir. Elde edilen bu dayanım gelişimlerine göre çimentoların C₃S ağırlıklı olmasının bu davranışta etken olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde UK katkısının basınç dayanımı gelişimine daha az katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir. Bunun sebebi puzolanik aktivite ve bağlayıcılık etkisi ile açıklanabilir. Mineral katkılar ancak çimentonun reaksiyon ürünleriyle etkileşime girdiklerinde bağlayıcılık özeliğine sahiptir. Bundan dolayı geç süreçlerde dayanım gelişimine olumlu etkileri olduğu da bilinmektedir.
 - Eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi KT6 nolu mineral katkısız tasarımda 29,9 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı KT10 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 11,3 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi KT10 nolu mineral katkısız tasarımda 72,8 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı KT6 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 70,2 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında önemli farklar olmadığı gözlenmiştir.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %40, %70 ve %85 olmuştur. Çimentonun yüksek miktarda olmasının dayanım gelişiminde sadece erken dayanımlar (1 gün yaş) üzerinde etken olduğu söylenebilir. Bu dayanım gelişimlerinin literatürde belirtilenlere göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Elde edilen bu dayanım gelişimlerine göre çimentoların C₃S ağırlıklı olmasının bu davranışta etken olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde UK katkısının basınç dayanımı gelişimine daha az katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir. Yüksek oranda eşdeğer bağlayıcı kullanımının 300 doz çimentodan daha etkin olduğu söylenebilir.

Çünkü 7 günlük basınç dayanımı gelişmelerinin 1 ve 3 günlük basınç dayanımları gelişmelerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

300 kg/m³ çimento dozajı ile C30 sınıfı, 300 kg/m³ çimento dozajı ve yüksek miktarda çürüf ile C25 sınıfı, 500 kg/m³ çimento dozajı ve düşük oranda UK ile C45 sınıfı, 500 kg/m³ çimento dozajı ve çürüf, çimento ve yüksek oranda UK ile C50 sınıfı betonlar üretilmiştir.

Tablo 20. Genleştirilmiş Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_b)

No	n	Yaş (Gün) – Basınç dayanımı (MPa)				Standart Sapma $\sigma_{28\text{gün}}$	Eşdeğer beton sınıfı	28 gün yaşına göre dayanım gelişimleri (gün - %)		
		1	3	7	28			1	3	7
GK1	2	-	10,1	12,2	15,2	1,98	LC12/13	0,00	66,45	80,26
GK2	2	-	9,9	12,1	15,1	2,26	LC12/13	0,00	65,56	80,13
GK3	2	-	9,0	11,9	15,4	2,69	LC12/13	0,00	58,44	77,27
GK4	2	-	8,8	11,4	14,8	2,97	LC12/13	0,00	59,46	77,03
GK5	2	-	5,4	7,8	13,2	2,12	LC8/9	0,00	40,91	59,09
GK6	2	-	19,4	21,7	25,1	2,83	LC18/20	0,00	77,29	86,45
GK7	2	-	18,6	21,2	26,4	2,97	LC20/22	0,00	70,45	80,30
GK8	2	-	18,4	21,4	24,2	2,83	LC18/20	0,00	76,03	88,43
GK9	2	-	17,0	20,3	24,2	2,26	LC18/20	0,00	70,25	83,88
GK10	2	-	14,1	17,5	21,3	1,98	LC16/18	0,00	66,20	82,16

Tablo 20'ye göre sadece genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen betonlarda;

- Eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan karışımlar içerisinde;
- ✓ 1 gün yaşında dayanım elde edilememiştir.
- ✓ Erken basınç dayanımı (3 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK1 nolu mineral katkısız tasarımda 10,1 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 5,4 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir. Mineral katkı erken dayanımı olumsuz etkilemiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK3 nolu yüksek oranda UK'li tasarımda 15,4 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı GK5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 13,2 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında önemli farklar olmadığı gözlenmiştir.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %70 ve %80 olmuştur. Bu dayanım gelişmelerinin literatürde belirtilenlere göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Normal betonda olduğu gibi elde

edilen bu dayanım gelişimleri çimentoların C₃S ağırlıklı olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde cüruf katkısının basınç dayanımı gelişimine daha az katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir.
 - Eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan karışımlar içerisinde;
 - 1 gün yaşında dayanım elde edilememiştir.
- ✓ Erken basınç dayanımı (3 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK6 nolu mineral katkısız tasarımda 19,4 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK10 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 14,1 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında en fazla %25 oranında farklar olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi KT10 nolu yüksek oranda ÖYFC'li tasarımda 72,8 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı KT6 nolu sadece çimento kullanılan tasarımda 70,2 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında %20 oranında farklar olduğu gözlenmiştir. Bağlayıcı ve agrega ilişkisinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %77 ve %86 olmuştur. Çimentonun yüksek miktarda olmasının dayanım gelişiminde sadece erken dayanımlar (3 gün yaş) üzerinde etken olduğu söylenebilir. Normal dayanımlı betonlardaki davranışla benzer gelişim göstermiştir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde UK katkısının basınç dayanımı gelişimine daha fazla katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir. Yüksek oranda eşdeğer bağlayıcı kullanımının 300 doz çimentodan %20'ye yakın daha etkin olduğu söylenebilir. Çünkü 7 günlük basınç dayanımı gelişimlerinin 3 günlük basınç dayanımları gelişimlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

300 kg/m³ çimento dozajı ile en yüksek LC12/13 sınıfı hafif beton üretilirken, 500 kg/m³ çimento dozajı ile LC20/22 sınıfı yapısal hafif beton üretilebilmiştir.

Tablo 21. Kireçtaşı Kumu+G. Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_b)

No	n	Yaş (Gün) – Basınç dayanımı (MPa)				Standart Sapma $\sigma_{28\text{gün}}$	Eşdeğer beton sınıfı	28 gün yaşına göre dayanım gelişimleri (gün - %)		
		1	3	7	28			1	3	7
GK/KK1	2	9,2	15,8	17,5	24,1	0,85	LC16/18	38,17	65,56	72,61
GK/KK2	2	5,3	18,7	20,3	25,9	1,13	LC16/18	20,46	72,20	78,38
GK/KK3	2	4,2	14,9	17,2	21,1	0,42	LC16/18	19,91	70,62	81,52
GK/KK4	2	5,3	16,0	18,1	24,5	0,57	LC16/18	21,63	65,31	73,88
GK/KK5	2	2,4	8,8	14,3	20,4	0,85	LC16/18	11,76	43,14	70,10
GK/KK6	2	14,2	27,3	30,5	34,2	0,71	LC25/28	41,52	79,82	89,18
GK/KK7	2	10,5	23,2	27,3	33,1	0,71	LC25/28	31,72	70,09	82,48
GK/KK8	2	8,6	22,5	27,6	33,5	0,57	LC25/28	25,67	67,16	82,39
GK/KK9	2	9,8	28,0	32,6	35,6	1,13	LC25/28	27,53	78,65	91,57
GK/KK10	2	2,4	22,6	27,4	36,5	0,57	LC25/28	6,58	61,92	75,07

Tablo 21'e göre kireçtaşı kumu ve genişletilmiş kil agregası kullanılarak üretilen betonlarda;

- Eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m^3 olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/KK1 nolu mineral katkısız tasarımda 9,2 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK/KK5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 2,4 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir. Mineral katkı erken dayanımı olumsuz etkilemiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/KK2 nolu UK'li tasarımda 25,9 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı GK/KK5 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 20,4 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında %20 oranında farklar olduğu gözlenmiştir. Mineral katkılar yüksek oranda olduğunda bu farklar meydana gelmiştir. Ancak beton sınıfları bakımından mineral katkıya bakılmaksızın aynı sınıf betonların üretildiği gözlenmiştir.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %40, %65 ve %75 olmuştur. Tek tip agrega ile üretilen betonlarda dayanım gelişimlerinin daha yüksek oranda olduğu söylenebilir. Ancak değişimler anlamlı değildir.

- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde 7 günlük dayanım gelişiminde cüruf katkısının basınç dayanımı gelişimine daha az katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir.
 - Eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m^3 olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/KK6 nolu mineral katkısız tasarımda 14,2 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK/KK10 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 2,4 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir. Bu farklar mineral katkıdan kaynaklanmaktadır.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/KK10 nolu yüksek oranda ÖYFC'li tasarımda 36,5 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı GK/KK7 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 33,1 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında önemli fark yoktur. Bu agrega kompozisyonunda nihai basınç yönünden bağlayıcı ve agrega ilişkisinin önemli olmadığı anlaşılmaktadır.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %40, %80 ve %90 olmuştur. Çimentonun yüksek miktarda olmasının dayanım gelişiminde etken olduğu söylenebilir. Normal dayanımlı betonlardaki davranışla benzer gelişim göstermiştir. İnce kireçtaşı tozunun basınç dayanımlarını olumlu etkilediği literatürde belirtilmektedir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde düşük oranda ÖYFC katkısının basınç dayanımı gelişimine daha fazla katkısı olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha yüksek dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir. Yüksek oranda eşdeğer bağlayıcı kullanımının, 300 doz çimentoya göre daha yüksek dayanım gelişimine sebep olduğu gözlenmiştir.

300 kg/m^3 çimento dozajı ile en yüksek LC16/18 sınıfı hafif beton üretilirken, 500 kg/m^3 çimento dozajı ile LC25/28 sınıfı yapısal hafif beton üretilebilmiştir.

Tablo 22. Dere Kumu+Genleştirilmiş Kil ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_b)

No	n	Yaş (Gün) – Basınç dayanımı (MPa)				Standart Sapma $\sigma_{28\text{gün}}$	Eşdeğer beton sınıfı	28 gün yaşına göre dayanım gelişimleri (gün - %)		
		1	3	7	28			1	3	7
GK/DK1	2	4,1	14,3	17,0	19,4	0,85	LC 12/13	21,13	73,71	87,63
GK/DK2	2	2,2	13,8	16,3	19,8	0,71	LC 12/13	11,11	69,70	82,32
GK/DK3	2	-	12,2	14,1	20,3	0,99	LC 12/13	0,00	60,10	69,46
GK/DK4	2	-	12,8	15,1	20,7	1,13	LC 12/13	0,00	61,84	72,95
GK/DK5	2	-	8,0	11,3	20,5	0,99	LC 12/13	0,00	39,02	55,12
GK/DK6	2	12,8	26,7	29,9	35,1	0,85	LC 25/28	36,47	76,07	85,19
GK/DK7	2	10,8	23,6	26,8	34,1	1,13	LC 25/28	31,67	69,21	78,59
GK/DK8	2	6,0	23,0	25,3	32,6	0,99	LC 25/28	18,40	70,55	77,61
GK/DK9	2	7,0	23,5	27,7	34,2	0,85	LC 25/28	20,47	68,71	80,99
GK/DK10	2	2,1	19,6	24,2	32,8	1,27	LC 25/28	6,40	59,76	73,78

Tablo 22'ye göre dere kumu ve genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen betonlarda;

- Eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m^3 olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/DK1 nolu mineral katkısız tasarımda 4,1 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK/DK3, GK/DK4 ve GK/DK5 nolu mineral katkılı tasarımlarda 0 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir. Mineral katkı erken dayanımı olumsuz etkilemiştir.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/DK4 nolu ÖYFC'li tasarımda 20,7 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı GK/DK1 nolu mineral katkısız tasarımda 19,4 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları önemli oranda fark olmadığı gözlenmiştir.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %21, %74 ve %88 olmuştur. Tek tip agrega ile üretilen betonlarda dayanım gelişimlerinin daha yüksek oranda olduğu söylenebilir. Agreganın basınç dayanımı gelişimini etkilediği söylenebilir. Bunun sebebinin özgül yüzeyle ve agrega tipleriyle orantılı olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde 7 günlük dayanım gelişiminde cüruf katkısının basınç dayanımı gelişimine daha az katkısı

olduğu ve sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük dayanım gelişimlerine sebep olduğu söylenebilir.

- Eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m^3 olan karışımlar içerisinde;
- ✓ Erken basınç dayanımı (1 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/DK6 nolu mineral katkısız tasarımda 12,8 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük erken basınç dayanımı GK/DK10 nolu yüksek oranda ÖYFC kullanılan tasarımda 2,1 MPa olarak elde edilmiştir. Erken basınç dayanımları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir. Bu farklar mineral katkıdan kaynaklanmaktadır.
- ✓ Nihai basınç dayanımı (28 gün yaşında) en yüksek olan beton üretimi GK/DK6 nolu yüksek oranda ÖYFC'li tasarımda 35,1 MPa olarak elde edilmiş olup, en düşük nihai basınç dayanımı GK/DK8 ve GK/DK10 nolu yüksek oranda mineral katkı kullanılan tasarımda 32,6 MPa ve 32,8 MPa olarak elde edilmiştir. Nihai basınç dayanımları arasında önemli fark olmadığı belirlenmiştir. Bu agregata kompozisyonunda nihai basınç yönünden bağlayıcı ve agregata ilişkisinin önemli olmadığı anlaşılmaktadır.
- ✓ Sadece çimento ile üretilmiş betonlarda 1, 3 ve 7 günlük dayanımların gelişimleri sırasıyla yaklaşık %36, %76 ve %85 olmuştur. Diğer agregata kompozisyonlarına göre daha düşük dayanım gelişimi olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Mineral katkı kullanılan betonların dayanım gelişimleri incelendiğinde önemli derecede farkların olmadığı belirlenmiştir. Standart sapma %5 civarlarındadır.

300 kg/m^3 çimento dozajı ile en yüksek LC 12/13 sınıfı hafif beton üretilirken, 500 kg/m^3 çimento dozajı ile LC 25/28 sınıfı yapısal hafif beton üretilmiştir.

Çalışmanın basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek LC 25/28 sınıfı hafif beton üretilmiştir. Bu tip betonlar hem dere kumu hem de kireçtaşı kumu ile üretilmiştir. Ancak sadece genişletilmiş kil ile yapısal betonun üretilmediği belirlenmiştir.

Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.

DeneySEL çalışmadan elde edilen tüm karışımlara ait yarmada çekme dayanımı deney sonuçları 28 gün yaş için Tablo 23'de verilmiştir. Ayrıca tabloda 28 gün yarmada çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranları da verilmiştir.

Tablo 23. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları (Σ_y)

Çimento miktarı (kg/m ³)	300			500			300			500		
	No	28 gün (MPa)	σ_y/σ_b	No	28 gün (MPa)	σ_y/σ_b	No	28 gün (MPa)	σ_y/σ_b	No	28 gün (MPa)	σ_y/σ_b
300	KT1	4,8	12	GK1	2,2	17	GK/KK1	2,4	12	GK/DK1	2,5	15
	KT2	4,7	11	GK2	2,1	17	GK/KK2	3,1	14	GK/DK2	2,5	15
	KT3	4,9	13	GK3	2,2	17	GK/KK3	2,3	13	GK/DK3	2,5	15
	KT4	5,0	13	GK4	1,9	15	GK/KK4	2,5	12	GK/DK4	2,4	14
	KT5	4,9	14	GK5	1,7	15	GK/KK5	2,2	13	GK/DK5	2,5	15
500	KT6	7,3	12	GK6	2,2	11	GK/KK6	3,5	12	GK/DK6	3,2	11
	KT7	7,8	13	GK7	2,5	11	GK/KK7	2,9	11	GK/DK7	3,5	12
	KT8	7,1	12	GK8	2,4	12	GK/KK8	2,8	10	GK/DK8	3,1	11
	KT9	6,9	11	GK9	2,3	11	GK/KK9	2,7	9	GK/DK9	2,8	10
	KT10	6,5	11	GK10	2,0	11	GK/KK10	2,6	9	GK/DK10	2,9	11

Tablo 23'e göre farklı agrega kullanılarak üretilen betonlarda;

- Eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan karışımlar içerisinde;

En yüksek yarmada çekme dayanım 5,0 MPa ile KT4 nolu ÖYFC'li tasarımda elde edilmiş olup, en düşük yarmada çekme dayanımı 1,7 MPa ile GK5 ÖYFC'li geliştirilmiş kil agregalı tasarımda elde edilmiştir.

- Eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan karışımlar içerisinde;

En yüksek yarmada çekme dayanım 7,8 MPa ile KT7 nolu UK'li tasarımda elde edilmiş olup En düşük yarmada çekme dayanımı 2,0 MPa ile yüksek oranda GK10 ÖYFC'li geliştirilmiş kil agregalı tasarımda elde edilmiştir.

Tüm tasarımlar içinde agrega tipine bağlı olarak en yüksek yarmada çekme dayanımları sadece kireçtaşı agregası ile üretilen betonlarda, en düşük dayanımlar sadece geliştirilmiş kil agregalı betonlarda elde edilmiştir.

Yarmada çekme dayanımları ile 28 günlük basınç dayanımları arasında tüm serilerde %10 - %17 arasında oluşan bir ilişki hesaplanmıştır. En yüksek oran geliştirilmiş kil agregalı karışımlarda elde edilirken diğerleri %10-15 arasında elde edilmiştir. Buna göre üretilen betonların yarmada çekme dayanım oranları literatürle eşdeğerdir.

Su emme deneyi sonuçları

Tablo 24’de su emme deney sonuçları verilmiştir. Buna göre tabloda su emme oranı ($=S$ %), görünür özgül ağırlık ($=\gamma_n$), kuru özgül ağırlık ($=\gamma_{dry}$), doymuş kuru yüzey özgül ağırlık ($=\gamma_{sat}$) ve görünür porozite ($=P$ %) hesaplama sonuçları verilmiştir.

Tablo 24. Su Emme Deneylerinin Toplu Sonuçları

Özellik	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5	KT6	KT7	KT8	KT9	KT10
S %	4,79	4,62	4,47	4,23	3,73	3,10	3,48	3,74	3,03	2,95
γ_n	2,59	2,59	2,58	2,58	2,54	2,58	2,58	2,56	2,55	2,54
γ_{dry}	2,31	2,32	2,33	2,33	2,32	2,39	2,37	2,34	2,37	2,36
γ_{sat}	2,42	2,42	2,42	2,42	2,41	2,46	2,45	2,43	2,44	2,43
P %	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,07
Özellik	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	GK6	GK7	GK8	GK9	GK10
S %	28,60	25,14	21,42	24,93	28,15	12,66	12,38	11,42	14,74	13,23
γ_n	1,41	1,47	1,46	1,40	1,39	1,37	1,40	1,47	1,46	1,47
γ_{dry}	1,00	1,07	1,11	1,04	1,00	1,17	1,19	1,26	1,20	1,23
γ_{sat}	1,29	1,34	1,35	1,30	1,28	1,32	1,34	1,38	1,38	1,40
P %	0,29	0,27	0,24	0,26	0,28	0,15	0,15	0,14	0,18	0,16
Özellik	GK/ KK1	GK/ KK2	GK/ KK3	GK/ KK4	GK/ KK5	GK/ KK6	GK/ KK7	GK/ KK8	GK/ KK9	GK/ KK10
S %	10,01	9,15	10,76	9,99	7,88	7,30	7,20	7,57	7,61	6,56
γ_n	1,94	1,95	1,97	1,99	1,87	1,86	1,87	1,91	1,89	1,84
γ_{dry}	1,63	1,71	1,62	1,66	1,63	1,64	1,65	1,67	1,65	1,64
γ_{sat}	1,81	1,87	1,80	1,83	1,80	1,79	1,81	1,79	1,78	1,78
P %	0,16	0,16	0,17	0,17	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,11
Özellik	GK/ DK1	GK/ DK2	GK/ DK3	GK/ DK4	GK/ DK5	GK/ DK6	GK/ DK7	GK/ DK8	GK/ DK9	GK/ DK10
S %	13,93	11,42	13,26	12,56	10,75	7,32	7,81	8,66	6,99	5,97
γ_n	1,96	1,89	1,84	1,92	1,85	1,83	1,86	1,90	1,85	1,84
γ_{dry}	1,54	1,56	1,48	1,55	1,54	1,61	1,63	1,63	1,64	1,66
γ_{sat}	1,76	1,73	1,68	1,74	1,71	1,75	1,75	1,77	1,75	1,76
P %	0,21	0,18	0,20	0,19	0,17	0,12	0,13	0,14	0,11	0,10

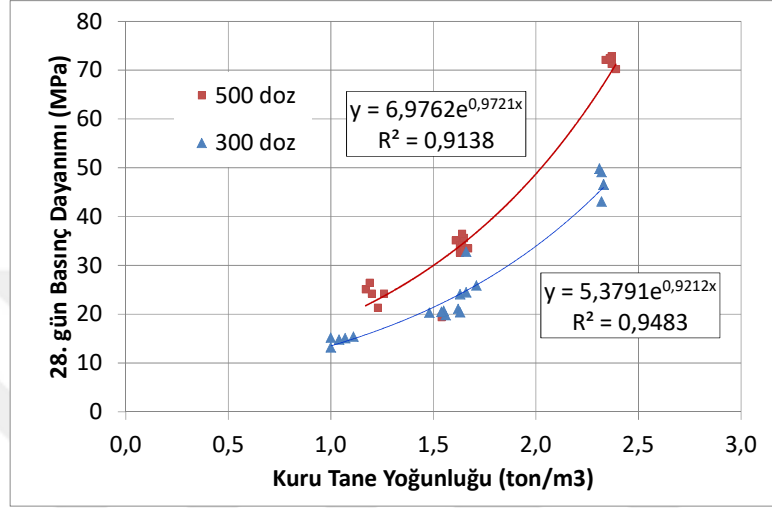
Tablo 24’te verilen deney sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Karışımlar içerisinde en düşük su emme değeri %3,0 ile KT9 ve KT10 nolu % 100 Kireç taşı agregalı ÖYFC’li tasarımlarda, en yüksek su emme değeri ise %28,6 ile GK1 nolu saf çimentolu tasarımda tespit edilmiştir.
- Sadece kireçtaşı agregalı betonlarda Porozite %7 - %11 arasında iken, geliştirilmiş kil agregalı betonların poroziteleri %10 - %29 arasında bulunmuştur.
- 300 kg/m³ çimentolu betonlarda sadece geliştirilmiş kullanılması durumunda poroziteler %24-%29 arasında bulunurken, karışımda ince malzeme yerine kum yada kireçtaşı kullanılması durumunda poroziteler %13-%21 arasında elde edilmiştir.

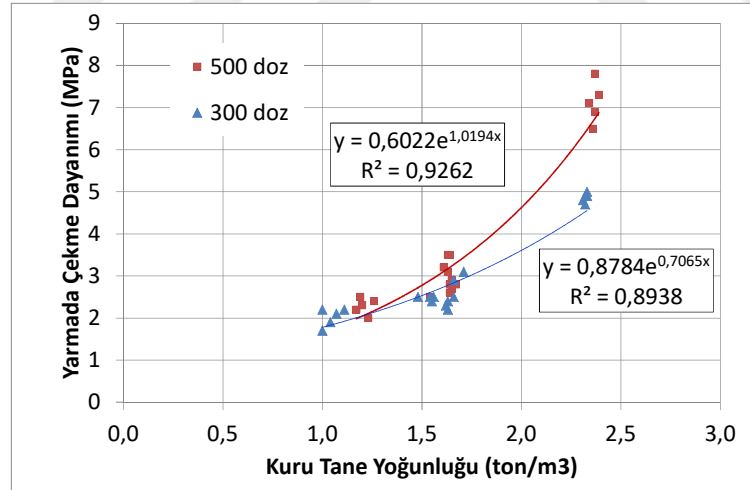
- 500 kg/m³ çimentolu betonlarda sadece genişletilmiş kullanılması durumunda poroziteler %14-%18 arasında bulunurken, karışımda ince malzeme yerine kum yada kireçtaşı kullanılması durumunda poroziteler %10-%13 arasında elde edilmiştir.
- Çimento dozuna göre Porozite verileri incelendiğinde çimento dozunun artırılması ile yaklaşık %14 mertebesinde porozitede azalma meydana gelmiştir. Buna ilaveten mineral katkının çimento yerine kullanılması sonucunda yine %12 oranında porozitede azalma meydana gelmektedir. Her iki bileşenin artması durumunda matris yapının güçlenmesi sebebiyle kapiler gözeneklerin kapanması ve boşlukların da buna bağlı olarak azalması literatürde belirtilmektedir.
- Genleştirilmiş kil agregası tek başına kullanıldığında 300 kg/m³ çimento dozu için %25 - %30, 500 kg/m³ çimento dozu için %14 - %18 porozite oranı belirlenmiştir. Bu durum hafif agregası yoğun sistemlerde çimento dozunun önemli olduğunun bir göstergesidir. Benzer şekilde kompoze edilmiş agregalarda kireçtaşının dere kumuna göre Porozite üzerindeki etkisi daha olumlu olduğu gözlenmiştir.
- Mineral katkılardan UK ile ÖYFC'nin Porozite üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde ÖYFC'nin porozitenin azalmasında olumlu etkilerinin UK'ye göre daha fazla olduğu belirtilebilir. ÖYFC'nin yaklaşık olarak %4 oranlarına kadar avantaj sağladığı görülmektedir.
- Kuru beton yoğunlukları dikkate alındığında, en düşük yoğunluk değeri olarak sadece genişletilmiş kil agrega olarak kullanıldığında yaklaşık 1,00 – 1,26 kg/dm³ değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak yapısal olmayan hafif beton üretilmiştir. Ancak kompoze agrega tasarımlarında 1,50 – 1,70 kg/dm³ değerleri arasında veri elde edilmiştir. Bu tip betonlarda 500 kg/m³ çimento eşdeğer dozajı ile tüm tasarımlarda LC 25/28 yapısal hafif betonu üretilebilmiştir. Ancak 500 kg/m³ çimento eşdeğer dozajı ile LC 16/18 yapısal hafif betonu üretilebilmiştir. Bilindiği gibi ACI kriterlerine göre en fazla 1,8 kg/dm³ kuru yoğunluğa ve en az 17 MPa basınç dayanımına sahip betonlar yapısal hafif beton sınıfında değerlendirilmektedir. Buna göre 500 kg/m³ çimento eşdeğer dozajı ile üretilmiş sadece genişletilmiş kil agregalı betonlar ACI'a göre taşıyıcı hafif beton sınıfında değerlendirilebilir. Bunun dışında yine tüm kompoze agregalı betonlar da ACI'a göre yapısal hafif beton sınıfında yer almaktadır.

Çimento dozuna bağlı olarak Şekil 19'da sertleşmiş betonların kuru özgül ağırlıkları ile 28 günlük basınç dayanımlarına ilişkin korelasyonlar, Şekil 20'de yarmada çekme dayanımı ile kuru yoğunluk arasındaki korelasyonlar, Şekil 21'de 28 günlük basınç dayanım değerleri ile yarmada çekme dayanımı değerleri arasındaki korelasyonlar, Şekil 22'de su emme oranları ile

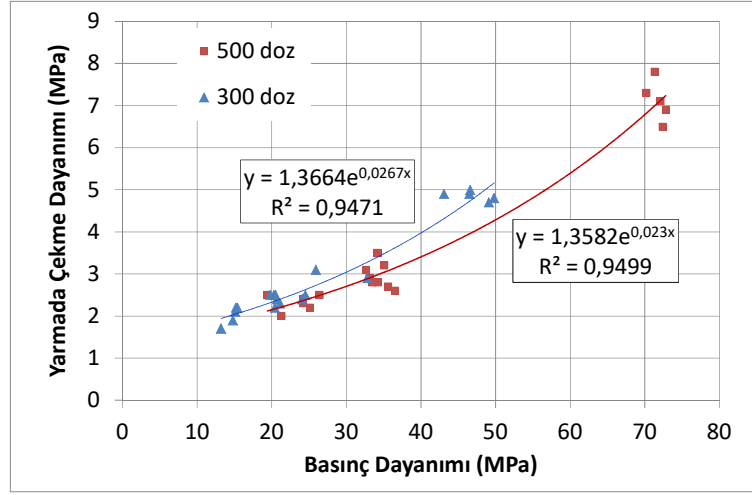
28 günlük basınç dayanımı değerleri arasındaki korelasyon eğrileri verilmiştir. Bu eğrilere göre 300 kg/m³ çimento dozajlı betonların su emme oranları ile 28 günlük basınç dayanımları arasında en az %75 mertebede ilişki bulunduğu, ancak diğer tüm korelasyon eğrilerine göre en az %90 mertebesinde ilişkilerin bulunduğu söylenebilir. Bu ilişkiler üstel ve logaritmik fonksiyonlar ile üretilmiş olup deneysel verilerin hemen hepsi için oluşturulmuştur.



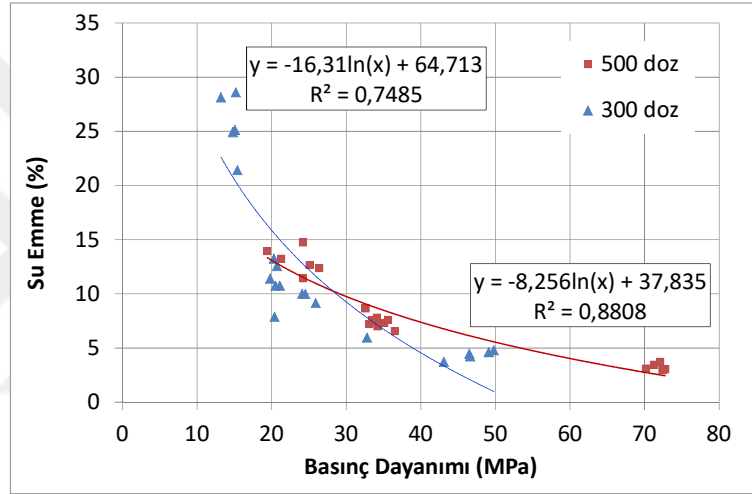
Şekil 19. Karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı-kuru yoğunluk grafiği



Şekil 20. Karışımlara ait yarmada çekme dayanımı-kuru yoğunluk grafiği



Şekil 21. Karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı korelasyonları



Şekil 22. Karışımlara ait su emme ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki korelasyon eğrileri grafiği

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuçlar

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- % 100 Genleştirilmiş kil agregasının kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 1195 kg/m³ birim hacim ağırlıkta saf çimentolu tasarımda en yüksek 12,2 MPa 28 günlük dayanım elde edilmiş, eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlar içerisinde uçucu küllü tasarımda 1346 kg/m³ birim hacim ağırlıkla 28.gün 26,4 MPa dayanım elde edilmiştir.

- % 100 Genleştirilmiş kil agregasının kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 21,42 - 28,60 aralığında gerçekleşirken eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 11,42-14,74 aralığında gerçekleşmiştir.

- İnce agrega olarak kireçtaşı kumunun kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 1840 kg/m³ birim hacim ağırlıkta uçucu küllü tasarımda en yüksek 25,9 MPa 28 günlük dayanım elde edilmiş, eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlar içerisinde ÖYFC'li tasarımda 1813 kg/m³ birim hacim ağırlıkla 28.gün 36,5 MPa dayanım elde edilmiştir.

- İnce agrega olarak kireçtaşı kumunun kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 7,88 - 10,76 aralığında gerçekleşirken eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 6,56-7,61 aralığında gerçekleşmiştir.

- İnce agrega olarak doğal kumunun kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 1709 kg/m³ birim hacim ağırlıkta ÖYFC'li tasarımda en yüksek 20,7 MPa 28 günlük dayanım elde edilmiş, eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlar içerisinde saf çimentolu tasarımda 1760 kg/m³ birim hacim ağırlıkla 28.gün 35,1 MPa dayanım elde edilmiştir.

- İnce agrega olarak doğal kumunun kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 10,75 - 13,93 aralığında

gerçekleşirken eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 5,97-8,66 aralığında gerçekleşmiştir.

- % 100 kireçtaşı agregasının kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 2378 kg/m³ birim hacim ağırlıkta saf çimentolu tasarımda en yüksek 49,8 MPa 28 günlük dayanım elde edilmiş, eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlar içerisinde ÖYFC'li tasarımda 2401 kg/m³ birim hacim ağırlıkla 28.gün 72,8 MPa dayanım elde edilmiştir.

- % 100 kireçtaşı agregasının kullanıldığı ve eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 3,73 - 4,79 aralığında gerçekleşirken eşdeğer bağlayıcısı 500 kg/m³ olan tasarımlarda 24 saatlik su emme değerleri % 2,95-3,74 aralığında gerçekleşmiştir.

- En düşük birim hacim ağırlık eşdeğer bağlayıcısı 300 kg/m³ olan saf çimentolu tasarımla 1195 kg/m³ olarak ölçülmüş ve 28 günlük dayanım 15,2 MPa elde edilmiştir.

- Genleştirilmiş kil agrega kullanılan tasarımlarda en yüksek yarmada çekme dayanımı 500 kg/m³ eşdeğer bağlayıcılı doğal kum ve kireç taşı kumu takviyeli karışımlarda 3,5 MPa olarak elde edilmiştir.

- % 100 Genleştirilmiş kil agregasının kullanıldığı tasarımlarda yeterli incelik sağlanamadığından hedef kıvam sağlanamamıştır.

KAYNAKLAR

- ACI 213R-03. (2003). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. *American Concrete Institute*, 1–38.
- Alessandro, P. F., Bernardino, C., & Andrea, G. (2016). Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates. *Construction and Building. Materials*, 127, 692–701.
- Alexander, M. G., & Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete*. Taylor and Francis, 270 Madison Ave, New York, p.1, 448.
- Alexandra, B., Geoffrey, P., Le, A. D., Douzane, O., Amar, B., Frédéric, R., & Thierry, L. (2016). Hygrothermal properties of blocks based on eco-aggregates: Experimental and numerical study. *Construction and Building. Materials*. 125, 279–89.
- Arizon, O., Arslan, G., Tuncan, A., Tuncan, M., Kaya, G., Karasu, B., Kilinc, K., & Kivrak, S. (2007). Light weight expanded production from bottom Ash. *Proceedings of 10th ECerS Conference*, 2051–3.
- Arizon, O., Kilinc, K., Karasu, B., Kaya, G., Arslan, G., Tuncan, A., Tuncan, M., Kivrak S, & Korkut, M. (2008). A Preliminary research on the properties of Light weight expanded clay aggregate. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 44(1), 23–30.
- Aslama, M., Shafigh, P., Alizadeh, N. M., & Jumaata, M. Z. (2017). Manufacturing of high-strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregates. *Journal of building engineering*, 13, 53–62.
- ASTM C330/330M. (2014) *Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, US.
- ASTM C330-05. (2005). *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. US.
- Bentz, D. P., Lura, P., & Roberts, J. W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. *Concrete International*, 27(2), 35–40.
- Bogas J. A, Gomes A. A. (2013). Simple mix design method for structural lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*, 46, 1919–32.
- Bogas, J. A., Augusto, G., & Pereira, M. F. C. (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building. Materials*, 35, 1013–22.

- Bogas, J. A., Brito, J. D., & Cabaço, J. (2014). Long-term behaviour of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 470–9.
- Bonabi, S. B., Jalal Kahani Khabushan, J. K., Kahani, R., & Abbas, H. R. (2014). Fabrication of metallic composite foam using ceramic porous spheres. *Light Expanded Clay Aggregate via casting process. Materials and design*, 64, 310–15.
- Bond of reinforcement in concrete. Bulletin 10, state-of-art-report, Lausanne. Federation internationale du beton (2000). 1–434.
- Chandra, S. & Berntsson, L. (2003). *Lightweight Aggregate Concrete*. Noyes Publications, New York, 79.
- Chang, G., Liang, H., Libo Yan, L., Bohumil Kasal, B., & Li, W. (2016). Behaviour of glass and carbon FRP tube encased recycled aggregate concrete with recycled clay brick aggregate. *Composite structures*, 155, 245–54.
- Chia, K. S., & Zhang, M. H. (2002). Water Permeability and Chloride Penetrability of High-strength Lightweight Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 639-645.
- Clarke, J. L. (2005). *Structural Lightweight Aggregate Concrete*.
- Clarke, J. L. (2005). *Structural Lightweight Aggregate Concrete*.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2015). *Use of synthetic fibres in self compacting light weight aggregate Concretes. Journal of building engineering*. 4, 247–54.
- Cui, H. Z., Lo, T. Y., Memon, S. A., & Xu, W. (2012). Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater*, 35, 149–58.
- Erdoğan, T. Y. (1997). *Admixture for Concrete*, Middle East Technical University, Ankara.
- Erdoğan, T. Y. (2002). *Materials of Construction*, Middle East Technical University, Ankara.
- Expanded clay aggregate. (2018). https://en.wikipedia.org/wiki/Expanded_clay_aggregate.
- FIP Manual of Lightweight aggregate concrete. ,(1983). Federation International de la Precontrainte (FIP). Second edition, Survey University Press.
- Gjorv, O. E., Monteiro, P. J. M., & Mehta, P. K. (1990). Effect of condensed silica fume on the steel–concrete bond. *ACI Material Journal*, 87(6), 573–80.

- Hubertova, B., & Hela, R. (2013). Durability of light weight expanded clay aggregate concrete. *Procedia Engineering*, 65, 2–6.
- Hwang, C. L., & Hung, M. F. (2005). Durability Design and Performance of Self Consolidating Lightweight Concrete. *Construction and Building Materials*, 19, 619-626.
- Khandaker, M., & Hossain, A. (2004). Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 283-291.
- Kılıç, A., Atış, C. D., Yaşar, E., & Özcan, F. (2003). High-strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures. *Cement and Concrete Research*, 33, 1595-1599.
- Kvande, T. (2001). Investigations of some material properties for structural analysis of LECA masonry. *Norwegian University of Science and Technology*, PMID:11475194.
- Lightweight aggregate for concrete, mortar and grout - Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar. (2002). <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=0000000000301187942002>.
- Lightweight Concrete and Reinforced Lightweight Concrete of Dense Structure Properties. (1979). <https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-4219-1-1979-12--639904/>
- Liu, P., Farzana, R., Ravindra, R., & Veena, S. (2017). Lightweight expanded aggregates from the mixture of waste automotive plastics and clay. *Construction and Building Materials*, 145, 283–91.
- Markus, B., Harald, J., & Hilde, T. K. (2014). The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay. *Cement and concrete composites*, 53, 233–238.
- Miguel, C. S., & Pedro, D. S. (2014). Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 63, 89–96.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- Murat, D., Atahan, H. N., & Engul, C. S. (2015). A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*, 101, 260–7.

- Nadesan, M. S., & Dinakar, P. (2017) Structural concrete using sintered fly ash aggregate-A review. *Construction and building materials*, 158, 928–44.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). Advanced Concrete Technology, *Constituent Materials*, Elsevier, Oxford.
- Newman, J. B. (1993). Properties of structural lightweight concrete in structural lightweight concrete. *Chapman and Hall*, 19–44.
- Payam, S., Hafez, G., Hilmi, B. M., & Jumaat, M. Z. (2014). A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes. *Materials and design*, 60, 320–7.
- Payam, S., Lee, J. C., Mahmud, H. M., & Mohammad, A. N. (2018). *A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes. Journal of building Engineering*. 15, 252–60.
- Ramachandran, V. S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook*, 2nd ed., Noyes Publications, New Jersey.
- Real, S., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Bogas, J. A. (2016). Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. *Construction and Building Materials*, 121, 460–70.
- Rossignola, J. A., Agnessi, M. V. C., & Morais, J. A. (2003). Properties of High Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 23, 77-82.
- Sergey, A. M., Aleksandr, G. C., Galina, S. S., & Roman, V. D. (2016). Some aspects of the development and application of silicate expanded aggregates in lightweight concrete structures. *Procedia Engineering*, 153, 599–603.
- Swamy, R. N., & Lambert, G. H. (1981). The microstructure of Lytag TM aggregates. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(4), 273–85.
- William, D. A., Gregor, J. G., & Klaus, P. (2016). In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates. *Cement and concrete research*, 80, 33–43.
- Yang, K. H., Kim, G. H., & Choi, Y. H. (2014). An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 431–9.

- Yasar, E., Atiş, C D., Kılıç, A., & Gülşen, H. (2003). *Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Pumice and Fly Ash. Materials Letters, 57, 2267-2270.*
- Yliniemi, P., Ferreira, & Tiainen, I. (2017). Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete. *Construction and Building. Materials, 131, 784–92.*
- Zhutovsky, S., Kovler, K., & Bentur, A. (2004). Assessment of water migration distance in internal curing of high-strength concrete. *ACI Special Publication, 220, 181–200.*



EKLER

Ek 1: Deneysel Esnasında Çekilmiş Olan Fotoğraflar

Malzeme ve Deney Görüntüleri



Resim 1. Farklı boyutlarda genişletilmiş kil agregaları



Resim 2. Beton karışımı



Resim 3. Küp numunelerin alımı



Resim 4. Numunelerin yerleştirilmesi



Resim 5. Küp numunelerin yerleştirme sonrası görünümü



Resim 6. Kalıptan çıkan numunenin görünümü



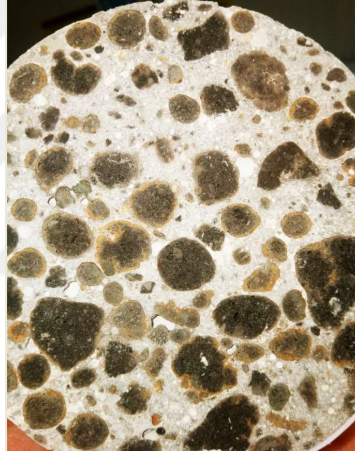
Resim 7. Numunelerin basınç dayanım testi



Resim 8. Ayrışan numunelerin kesit görünümü



Resim 9. Genleştirilmiş kil agregalı numune kesiti



Resim 10. Genleştirilmiş kil agreganın silindir numune kesiti

ÖZGEÇMİŞ

MUSTAFA USLU

1977 yılında Bünyan / KAYSERİ de doğdu. İlk ve Ortaöğrenimini 1994 yılında Kayseri de tamamladı. 1998 yılında KTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1999-2000 yılları arasında tamamladığı Askerlik görevinin ardından 2001-2005 yılları arasında Kayseri Melikgazi belediyesi fen işleri müdürlüğünde kontrol mühendisi ve asfalt şefi olarak çalıştı. 2005-2007 yılları arasında Yibitaş-Lafarge Çim. A.Ş.'de Ürün kalite kontrol sorumlusu 2007-2013 yılları arasında Cimpor Yibitaş Çim. A.Ş. ve 2013-2017 yılları arasında Votorantim Çim. A.Ş. de de Ürün Kalite Kontrol Müdürü olarak hazır beton sektöründe görev aldı. 2017 yılından itibaren Oyak Beton A.Ş. de Ar-Ge ve Ürün Kalite Müdürü olarak görevini sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.