



**GENLEŞTİRİLMİŞ CAMIN HAFİF BETON
AGREGASI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sema GÜLENGÜL

**Yüksek Lisans Tezi
Kimya Mühendisliğı Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Filiz KAR**

Aralık-2019

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENLEŞTİRİLMİŞ CAMIN HAFİF BETON AGREGASI OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ

Sema GÜLENGÜL

İlk Teslim Tarihi: 27.11.2019

Savunma Tarihi: 24.12.2019

TEZ ONAYI

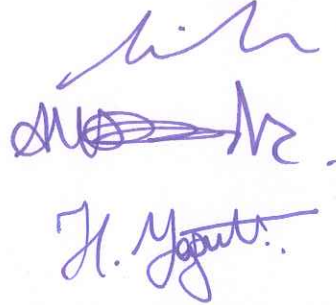
Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Filiz KAR
Fırat Üniversitesi, Müh. Fakültesi

Başkan: Prof. Dr. Nurhan ARSLAN
Fırat Üniversitesi, Müh. Fakültesi

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hakan YOĞURTÇU
Munzur Üniversitesi, Müh. Fakültesi

İmza



Onaylarım

Onaylarım

Onaylarım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında daima güler yüzlülüğüyle ilgisini ve desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren saygıdeğer danışmanım Sayın Prof. Dr. Filiz KAR' a,

Çalışmalarım esnasında laboratuvar olanaklarından faydalandığım Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümüne, engin bilgileriyle yolumu aydınlatan değerli hocam Prof. Dr. Nurhan ARSLAN'a,

Deneyisel çalışmalarımın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü tüm araştırma görevlilerine, ısıl iletkenlik testleri için yardımcı olan Sn. Arş. Gör. Ercan AYDOĞMUŞ' a,

Deneyisel çalışmalarım sırasında elastisite modülü testinde yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sn. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ' a,

Deneyisel çalışmalarım sırasında basınç ve çekme dayanım testlerinde yardımcı olan Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Görevlisi Sn. Abdullah Tevfik BİLDİK' e,

Çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen bana her zaman güvenen sevgili aileme ve hep destekleyici olan sevgili arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. HAFİF BETON	3
2.1. Hafif Betonun Önemi ve Geleceği	5
2.2. Hafif Betonların Üretimi ve Kullanım Alanları	6
2.3. Hafif Beton Türleri	12
2.3.1. Kumsuz Beton.....	12
2.3.2. Gaz Beton	12
2.3.3. Hafif Agrega Betonu.....	13
2.4. Beton Yapımında Kullanılan Agregalar	16
2.5. Beton Katkı Maddeleri	19
3. GENLEŞTİRİLMİŞ CAM	22
4. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	29
5. MATERYAL VE METOT	38
5.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri	38
5.1.1. Çimento.....	38
5.1.2. Kum (ince agregası)	39
5.1.3. Genleştirilmiş Cam	40
5.1.4. Karışım Suyu	40
5.1.5 Kimyasal Katkı	40
5.2. Beton Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması	40
5.3. Beton Numunelerine Uygulanan Deneyler	44
5.3.1. Birim Ağırlık Deneyi	44
5.3.2. Basınç ve Çekme Dayanımı Deneyi	44

5.3.3. Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi	45
5.3.4. Su Emme ve Kuruma Hızları Deneyi	46
5.3.5. Ultrasonik Yöntemle Elastisite Modülünün Tayini	48
5.3.6. Isı İletim Katsayısı Deneyi	51
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	53
6.1. Kuru Birim Ağırlık	53
6.2. Basınç Dayanımı	54
6.3. Yarmada Çekme Dayanımı	56
6.4. Su Emme Oranı	57
6.5. Kuruma Oranı	59
6.6. Isı İletim Katsayısı	61
6.7. Elastisite modülü	63
7. SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ÖZET

Günümüzde, gözenekli ve hafif malzemelerin kullanımı, farklı endüstriyel alanlarda giderek artan bir eğilim göstermektedir. Bu malzemeler genellikle inşaat sektöründe hafif yapı elemanları üretmek için kullanılırlar. Hafif beton, normal betondan çok daha düşük yoğunluğa sahiptir. Oldukça gözenekli veya hücreli özelliklerinden dolayı gelişmiş yalıtım performansı gibi pek çok avantaja sahip bir malzemedir. Hafif beton üretmek için çeşitli hafif agrega türleri kullanılır ve bu hafif agregaların özellikleri malzeme özelliklerini önemli şekilde etkiler. Hafifliği, yanmazlık özelliği ve su geçirgenliğinin düşük olması gibi özelliklerinden faydalanmak amacı ile bu çalışmada, hafif beton agregası olarak geri dönüştürülmüş camdan elde edilen geliştirilmiş cam kullanılmıştır.

Bu çalışmada; hacimce farklı oranlarda geliştirilmiş cam ve doğal kum kullanılarak, hafif betonlar üretilmiştir (Genleştirilmiş cam oranı: %0, %5, %10, %15, %20). Aynı harç karışımlarına, işlenebilirliği sağlamak ve su oranını azaltmak amacıyla akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilerek hazırlanmıştır. Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların, basınç dayanımları, elastisite modülleri, ısı iletkenliği ve su emme oranları ile birim ağırlıkları araştırılmıştır.

Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin yoğunluğu $1.5-2.2 \text{ g/cm}^3$, su emme oranları %4-16.69, ısı iletim katsayıları $1-0.063 \text{ W/mK}$, 28 günlük basınç dayanımları $18.3-68.8 \text{ MPa}$ aralığında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla geliştirilmiş cam oranı arttıkça beton numunelerin yoğunluğu, su emme oranı, ısı iletim katsayısı ve basınç dayanımı azalmıştır. Bu azalma geliştirilmiş camın düşük yoğunluk ($0.17-0.23 \text{ g/cm}^3$), düşük su emme oranı (%23), düşük ısı iletim katsayısına (0.0639 W/mK) sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada betonun elastisite modülü, UPV metodu kullanılarak araştırılmıştır. Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü $18.6-40.23 \text{ GPa}$ arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla geliştirilmiş cam oranı arttıkça dinamik elastisite modülü azalmıştır. Kum içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü daha yüksektir.

Genleştirilmiş camın hafif beton üretiminde kullanılması; yapının deprem yükünün azaltılması, yenilenmeyen doğal kaynakların korunması, atık kaynakların yeniden kazanımı, çevre kirliliğinin önlenmesi, enerjinin korunması ve enerjinin üretimde yeniden kullanılması gibi açılardan oldukça avantajlı olacağı düşünülmektedir. Elde edilen deneysel sonuçların literatürle uyumlu olması, geliştirilmiş camın hafif beton üretiminde kullanılabilirliğini desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif beton, geliştirilmiş cam, mekanik özellikler, elastisite modülü

SUMMARY

Evaluation of the Expanded Glass as a Light Concrete Aggregate

At present, the use of porous and lightweight materials has shown an increasing trend in different industrial areas. These materials are generally used to produce lightweight structural elements in the construction industry. Lightweight concrete has a much lower density than normal concrete. It is a material with many advantages, such as improved insulation performance due to its highly porous or cellular properties. Various types of lightweight aggregates are used to produce lightweight concrete and the properties of these lightweight aggregates significantly affect the material properties. In this study, expanded glass granules made from recycled glass were used in order to benefit from its light weight, non-flammability and low water permeability.

In this study, the lightweight concretes were produced by changing the ratio of expanded glass and natural sand (Ratio of expanded glass: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%). The same mortar mixtures were also prepared using a plasticizer additive to ensure workability and reduce water content. The compressive strength, modulus of elasticity, thermal conductivity, water absorption rates and unit weights of lightweight aggregate concretes produced in various unit weights were investigated.

Density of concrete samples containing expanded glass is 1.5-2.2 g/cm³, water absorption rates are 4-16.69%, heat transmission coefficient is 1-0.0639 W/m.K, 28 day, compressive strengths vary between 18.3-68.8 MPa. Density, water absorption rate, heat conduction coefficient and compressive strength of concrete samples decreased as the ratio of expanded glass increased compared to control concrete samples. This reduction is due to the fact that the expanded glass has a low density (0.17-0.23 g/cm³), a low water absorption rate (23%), and a low heat conduction coefficient (0.0639 W/m.K). The 28-day compressive strength of expanded glass-containing concrete samples ranged from 18.3 to 68.8 MPa. As the proportion of expanded glass increased compared to the control concrete samples, the compressive strength of the concrete samples decreased. In this study, elasticity modulus of concrete was investigated by UPV testing method. Dynamic elasticity modulus decreased as the ratio of expanded glass increased compared to control concrete samples. The dynamic modulus of elasticity of concrete samples containing expanded glass in changes rouge of 18.6-40.23 GPa. The dynamic modulus of elasticity of concrete samples containing sand is higher.

The use of expanded glass granules in light concrete production is thought to be very advantageous in terms of reducing the earthquake load of the structure, preserving the non-renewable natural resources, recovering the waste resources, preventing environmental pollution, protecting the energy and reusing the energy in production. The fact that the experimental results were compatible with the literature supported the usability of expanded glass granules in light concrete production.

Key Words: Lightweight concrete, expanded glass, mechanical properties, elasticity modulus

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Hafif betonun kullanıldığı ve günümüze kadar gelen antik eserler	4
Şekil 2.2.	Hafif agregalı beton	14
Şekil 3.1.	Genleştirilmiş cam agregaların üretim aşamaları	24
Şekil 3.2.	Cam tozu genleşme işleminin (a) sıcaklık-zaman grafiği, (b) basınç-hacim .. grafiği	25
Şekil 3.3.	Genleştirilmiş cam agregalarının mevcut şekilleri	27
Şekil 5.1.	Kum (ince agreganın) elek analizi sonuçlarının grafiksel gösterimi	39
Şekil 5.2.	Çimento, genleştirilmiş cam ve kum	41
Şekil 5.3.	Beton harç karışımı	41
Şekil 5.4.	Kalıplara dökülen harç numuneleri	42
Şekil 5.5.	Kalıplardan çıkartılan beton numuneler	42
Şekil 5.6.	Basınç ve çekme dayanımı deney düzeneği	44
Şekil 5.7.	Basınç ve çekme dayanımı deney numunesinin görüntüsü	45
Şekil 5.8.	Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği	46
Şekil 5.9.	Su dolu kap içerisinde bulunan numuneler	47
Şekil 5.10.	Tartımı yapılan beton numune	47
Şekil 5.11.	Kurumaya bırakılan beton numuneler	48
Şekil 5.12.	Dalgaların partikül hareketleri ve dalga yayınımları	49
Şekil 5.13.	Ultrasonik test cihazının görünümü ve şematik diyagramı	49
Şekil 5.14.	Beton numunesinde yapılan ultrasonik dalga hızı ölçüm yöntemleri	50
Şekil 5.15.	Isı iletim katsayısı ölçümü alınan beton numune	52
Şekil 6.1.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agreganın yoğunluk üzerindeki etkisi	53
Şekil 6.2.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregasının basınç	55
Şekil 6.3.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregasının yarmada çeme dayanımı üzerindeki etkisi	56
Şekil 6.4.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregasının su emme ... oranı üzerindeki etkisi	58

Şekil 6.5.	Beton numunelerin su içerisinde kalma süresine bağlı olarak ağırlık değişimi.....	59
Şekil 6.6.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının 48 saat süren kuruma oranı üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 6.7.	Kurumaya bağlı olarak genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin zamanla ağırlık değişimi.....	61
Şekil 6.8.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisi.....	62
Şekil 6.9.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının P dalga hızı üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 6.10.	Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının dinamik elastisite modülü üzerindeki etkisi.....	65
Şekil 6.11.	Basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki.....	66
Şekil 6.12.	Teorik modeller kullanılarak ve deneysel olarak bulunan elastisite modülünün genleştirilmiş cam oranı ile değişimi.....	67

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 2.1. Doğal ve atık malzemelerden elde edilen hafif agregaların özellikleri.....	19
Tablo 5.1. Çimentonun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri	38
Tablo 5.2. Kum (ince agreganın) elek analiz değerleri	39
Tablo 5.3. Kullanılan genleştirilmiş camın teknik özellikleri	40
Tablo 5.4. Deneylerde kullanılan beton numunelerin içeriği	43
Tablo 5.5. Beton kalitesinin/niteliğinin P dalga hızına bağlı sınıflandırılması	51



1. GİRİŞ

Beton teknolojisi alanındaki hızlı gelişme, yalnızca geleneksel olarak kullanılan normal ağırlıktaki betonun malzeme ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesine ve özel bazı özelliklere sahip alternatif beton türlerinin geliştirilmesine de yol açmıştır.

Hafif beton yapının kütlesini ve dolayısıyla orantılı sismik yükleri azaltma çabası olarak geliştirilmiştir, bu nedenle inşaatta önemli tasarruflar sağlar, aynı zamanda betonarme yapıların yapısal bütünlüğünü ve deprem direncini korur (Badogiannis ve Kotsovos, 2014).

Hafif agrega betonu son zamanlarda inşaat projelerinde ve endüstriyel alanda büyük ilgi görmektedir. Hafif agrega betonu, geleneksel betona göre daha düşük yoğunluğa ve ısı iletkenliğe sahip olması ve birçok teknik, ekonomik ve çevresel avantajlar sunmaktadır (Joseph ve Ramamurthy, 2009).

Doğal kaynakların tükenmesi nedeniyle, sinterleme veya soğuk bağlama yöntemiyle üretilen yapay hafif agregaların kullanımına önem verilmiştir. Yaklaşık 1200 °C sıcaklıkta üretilen geliştirilmiş kil ve geliştirilmiş cam gibi sinterlenmiş hafif agregalar, çok düşük yoğunlukları ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Korat ve ark., 2013). Yapısal hafif betona ulaşmanın en popüler yolu, doğal veya yapay olabilen hafif agregalar kullanmaktır (Polat ve ark., 2010). Diatomit, pomza, volkanik küller, cüruf, tuf gibi doğal hafif agregalar geliştirilmiş kil, şeyl, kayrak, perlit ve vermikülit gibi yapay hafif agregalar yapı malzemeleri olarak kullanılmıştır (Aslam ve ark., 2016).

Katı atık malzemelerin farklı sosyo-ekonomik faaliyetlerden geri dönüşümü, atıkların toplanmasını, geri dönüştürülebilir malzemelerin “ikincil hammaddelere” dönüştürülmesi ve daha sonra yeni ürünlere dönüştürülmesini içerir. Bu işlemler, atılacak malzeme miktarında ciddi bir azalma ve aynı zamanda enerji ve malzeme kaynaklarının geri kazanılmasında eş zamanlı bir artış sağlar.

Son yıllarda yüksek yalıtım gerektiren durumlarda hafif betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Fabrika inşaatlarında, duvar panellerinde, tuğla yapımında, çatı ve taban betonlarında özellikle kullanılmaktadır. Geliştirilmiş cam granüllerinden yapılan hafif beton, en yeni beton türlerinden biridir. Geliştirilmiş camın çimento matrisine dahil

edilmesi ile yapılır. Genleştirilmiş camın yoğunluğu, 480-1600 kg/m³ arasında değişebilir (US Patent 7695560, 2011).

Geri dönüşümle kazanılan hurda camın, özel patentli teknoloji ile küçük hücresel bir yapıya dönüştürülmesi sonucu elde edilen genleştirilmiş cam kürecikler, özel bir termal izolasyon malzemesidir. Genleştirilmiş cam küre teknolojisi ile hedeflenen çevre hassasiyeti ile cam atıklarının tekrar kazanımını sağlamak, enerji tasarrufu sağlayarak doğal kaynakları korumak, inşaat sanayiini, insan sağlığına zararsız dayanıklı ve hafif termal izolasyon malzemelerinin kullanımına teşvik etmektir. Hücresel yapısı ile sahip olduğu 0.059-0.08 W/mK ısı iletim katsayısı sayesinde yapı malzemesine termal izolasyon özelliği katmaktadır. Basınç dayanımı değerleri 1.5-2.5 MPa aralığında olup son malzeme içerisinde de değişmemektedir. Alev direncine sahiptir ve A1 sınıfı yanmazlık özelliğindedir. Tamamen su içerisine batırılsa bile kapalı gözenek yapısı sayesinde %10'dan fazla emilimi engellemektedir. Her türlü organik ve inorganik kimyasala (cam eritmede kullanılan hidrojen florür asidi hariç) karşı tamamen dirençlidir. Ekolojik, çevre dostu bir üründür. Hafif agrega olması nedeniyle, betona termal izolasyon özelliği ve hafiflik kazandırır.

Genleştirilmiş camın düşük yoğunluğu nedeniyle bu malzemenin basınç dayanımı nispeten düşüktür. 1000 kg/m³'ten az yoğunluğa sahip agregalar için, elastik modül ve agrega betonunun basınç dayanımı, agreganın hacim fraksiyonundan büyük ölçüde etkilenir (Ke ve ark., 2009). Yapılan binalarda ısı yalıtımı ile ilgili gerekli önlemlerin alınması için, sığınakların sıcaklık etkilerinden olumsuz etkilenmemesi için gerekli ısıl konforun sağlanması gerekmektedir (Postacıoğlu, 1986; Yağanoğlu ve ark., 1999). Düşük birim ağırlığı ve yüksek gözenekliliği nedeniyle, günümüzde izolasyon malzemeleri olarak hafif beton elemanlar tercih edilir. Yapı elemanlarında hafif beton kullanılarak, düşük enerji tüketimi ile istenilen sıcaklık değerleri sağlanabilir (Rossignolo ve Agnesini, 2001). İnşaat sektörü, Avrupa enerji talebinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Alan ısıtma ve soğutma, binalarda tüketilen toplam enerjinin kabaca %60'ına tekabül etmektedir (Özel, 2011; Zheng ve ark., 2010).

Malzeme yoğunluğunu azaltmak, daha düşük termal iletkenliğe ulaşılmasını sağlar, ancak aynı zamanda mekanik performansta düşüşe yol açar (Neville, 2011).

Bu çalışmada, genleştirilmiş camın, hafif beton agregası olarak değerlendirilmesi araştırılacaktır.

2. HAFİF BETON

Antik çağdan bu yana volkanik patlamalar sonucu oluşan tuf, pomza (sünger taşı), cüruf gibi tabii agregalar hafif beton ve harç üretiminde kullanılmıştır. M.Ö 3000’li yıllarda Sümerler ve Babil yapıtlarında hafif beton kullanılmıştır. Romalılar ve Yunanlılar da bina yapımında pomza kullanmışlardır. İstanbul’da Aya Sofya, Roma İmparatorluğu eserlerinden Pantheon ve Colosseum, Meksika’da Maya Piramitleri hafif betonun kullanıldığı ve günümüze kadar gelen göz alıcı antik eserlerden bazılarıdır (Chandra ve Berntsson, 2002). Şekil 2.1’de bu eserler görülmektedir.

Günümüzde en çok kullanılan doğal malzemeler fırınlarda yüksek sıcaklıkta geliştirilmesi ile üretilen yapay hafif agregalar olup; 1900’lerin başlarında ilk üretim çalışmaları başlamıştır. İlk ticari olarak kullanımı I. ve II. Dünya Savaşı sırasında yeterli miktarda çelik bulunamaması nedeniyle, “ferrocement” ticari beton gemilerin üretimi ile başlamıştır (Fiorato, 1981). Betonun dayanım gücü ve ağırlığının geliştirilmesi amacıyla kullanılan yapay hafif agregalar (genleştirilmiş şist tipi) beton gemilerinin üretiminde hız kazandırmıştır. Genleştirilmiş şist ve arduvaz tipi yapay hafif agregaların teknik özellikleri geliştirilerek taşıyıcı sistemde kullanımı 1952’de A.B.D’de yapay agrega üretim ve araştırmaları üzerine enstitü kurulması; Avustralya, Japonya ve Kanada’nın da katılımı sektöre hız kazandırmıştır (Fiorato, 1981).

Hafif agreganın betonda kullanımı 20. yüzyılda yük gemileri ile ortaya çıkmaktadır. N.K. Fougner’in dizayn ettiği 25 m uzunluğundaki ilk beton mavna, Norveç’de 1917’de denize indirilmiştir. Çelik yoksunluğu nedeniyle A.B.D’de de ticari gemileri donatılı betondan üretme fikrini ortaya çıkarmıştır. Hayde, yaptığı araştırmalar sonucunda, 1918’de genleştirilmiş şist tipi hafif agreganın patentini almıştır (Hayde,1918). Bu gelişme, istenen performans düzeyine daha kolay erişilebilen; üretimi, dane biçimi ve boyutu kontrol altında olan, daha yüksek dayanım elde edilebilen doğal agregalara kıyasla yapay agregayı uygulama alanına sokmak açısından önemli bir basamak oluşturmuştur. 1917-1920 döneminde normal agregalı yapılarda beton dayanımı yalnız 17 MPa iken, üretilen donatılı beton gemilerde 1760 kg/m^3 yoğunluk ile 38 MPa basınç dayanımı (Ries ve ark., 2010) ve 23 GPa elastisite modülü elde edilmiştir, 90 yıl sonra betondan alınan karotlarda dayanımın 60 MPa’a ulaştığı görülmüştür. Bu gemiler ile

sadece kuru yük değil aynı zamanda petrol taşımacılığı da yapılmış, betona herhangi bir zararı izlenmemiştir (Fiorato, 1981).



Şekil 2.2. Hafif betonun kullanıldığı ve günümüze kadar gelen antik eserler

Geçmişten günümüze, A.B.D (1920’lerden itibaren), S.S.C.B ve Polonya (1960’lardan itibaren)’da çok sayıda köprü tabliyesinde yapay hafif agregalı beton uygulanmış; içsel kür nedeniyle artan aşınma, donma ve klorid dayanımı ile üstün performans özellikleri göstermiştir (Castrodale, 2006). Beton birim hacim ağırlığı sıklıkla $1800-2000 \text{ kg/m}^3$ olup, 1990’lardan itibaren basınç dayanımları 55-70 MPa aralığında yer almıştır.

Savaş sonrası hafif agreganın kullanıldığı bazı ticari yüksek yapılar ise Chase-Park Plaza Hotel (1928), One Shell Plaza (1971) ve Marina City Towers (1968)’dir. A.B.D’de günümüzde hafif agrega üretiminin %95’inin genişletilmiş şist, arduvaz ve kil olduğu tahmin edilmektedir.

Hafif beton, normal betona kıyasla farklı özelliklere sahip, boşluklu, birim ağırlığı düşük ve düşük dayanımlı betondur. Hafif betonlar; boşluklu (havalı) betonlar, hafif agregalı betonlar ve ince agregasız betonlar olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Bomhard, 1980).

Birim ağırlıkları, hafif betonların genel olarak 560-1850 kg/m³ arasında değerler alabilen yapısal hafif beton için genellikle 1360-1840 kg/m³ arasında ve yalıtım betonlar için ise 320-1120 kg/m³ arasında değişebilmektedir (Spratt, 1975).

Hafif betonların birim hacim ağırlıkları düşük olduğundan ısı yalıtımları yüksektir. Birim ağırlıkları 960-1648 kg/m³ arasında değişen hafif betonların ısı iletkenlikleri 0.19-0.40 kcal/mh°C arasında değerler alabilir (Ashworth ve Ashworth, 1991).

Hafif betonlarda genel olarak, birim ağırlık değerleri arttıkça, basınç dayanımı ve ısı iletimi artar. Gözeneklilik arttıkça basınç dayanımı ve ısı iletkenlik azalır (Tekinsoy, 1984).

Binalara tesir eden deprem kuvvetleri, yapıların kütlesi ile orantılıdır. Yapının kütlesinin azaltılması sismik riskin azaltılmasında büyük önem taşımaktadır. Bu da hafif beton inşaatının kullanımı ile elde edilebilir. Yük taşıyan bileşenlerin hacmini azaltmak, ham maddeleri korumak ve ayrıca geleneksel beton ile karşılaştırıldığında daha iyi termal özellikler elde etmek için hafif betonlar geliştirilmiştir.

Hafif beton, betonun ağırlığını azaltan, ek ağırlıkları azaltan ve karışımın hacmini arttıran genleşmiş hafif agregalar içerir. Sentetik hafif agregalar genellikle 1000 °C civarında ısı iletimle üretilen kil, şeyl, arduvaz, perlit ve vermikulit gibi malzeme formlarıdır. Malzemeler, kalsinasyondan önce istenen boyuta indirilir veya kalsinasyon işleminden sonra ezilir. Genleşme, ısı işlem sırasında üretilen işlenmiş malzemenin içinde bulunan gazların sıkışmasından kaynaklanır. İlk olarak pelet haline getirilmiş malzemelerin ısı işlem prosesinde kullanımı, pelet haline getirilmemiş malzemeden üretilen parçacıklara göre %12-30 daha düşük su emme kapasitesi ve yarı geçirgen bir kaplamaya sahip küresel agrega parçacıkları üretir. Bu nedenle kaplanmış partiküller işlenebilirlik açısından tercih edilir, ancak kaplanmamış olanlardan daha pahalıdır (Neville ve Brooks, 2010).

2.1. Hafif Betonun Önemi ve Geleceği

Son otuz yıl içinde, hafif beton kullanımı birçok sanayi ülkesinde özellikle; Belçika, Hollanda, Almanya, İngiltere, A.B.D ve Japonya'da hız kazanmıştır. Söz konusu ve diğer sanayi ülkelerinde hafif betonla inşa edilmiş birçok yapı mevcuttur. Türkiye topraklarının yaklaşık 1/5'i volkanik kayalardan oluşmaktadır. Bu kayalar dünyanın en zengin ve kaliteli doğal hafif agrega kaynaklarını teşkil etmektedir. Buna karşılık, bugün

Türkiye’de hafif beton üretimi arzulanan düzeyde değildir. Bunun başlıca nedeni, bu betonların özelliklerinin geleneksel betonunkiler kadar bilinmemesidir.

Hafif betonlar sahip oldukları özelliklerden dolayı sanayi ülkelerinde hemen her çeşit inşaatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif beton yapıların en önemli özelliklerinden biri, ısıtılmalarında kullanılan yakıt masrafının, geleneksel betonlarınkinden çok daha az oluşudur. Türkiye gibi aktif deprem kuşağında bulunan ülkelerde, betonarme inşaatlarda hafif beton kullanımı deprem zararlarını azaltması mümkün gözükmemektedir. Türkiye hafif beton yapımında kullanılan doğal hafif agrega kaynakları bakımından son derece zengin bir ülkedir. Bu nedenle Türkiye’de ekonomik açıdan ilk uygulamalarda doğal hafif agregaların kullanılmasının daha gerçekçi olacağı anlaşılmaktadır. Oysa Türkiye’de hafif betonla inşa edilmiş yapılar çok değildir. Bunun temel nedeni, bir taraftan alışkanlıklarımız, diğer taraftan ülkemizde bu betonlar konusunda gerekli bilgi ve deneyim birikiminin yeterli düzeyde olmamasıdır. Burada, yurtdışı ve Türkiye’de hafif betonlar konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçların da her zaman birbirini desteklemediği ve bunun araştırmalarda kullanılan yöntemlerin farklı oluşuyla açıklanabileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

Hafif beton farklı yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntemler genel olarak şu şekilde gruplandırılabilir (Baradan 2004):

- 1-Hafif agrega kullanarak,
- 2-Kum kullanmadan boşluklu beton üreterek,
- 3-Köpüklü beton üreterek,
- 4-Gaz beton üretimi ile.

2.2. Hafif Betonların Üretimi ve Kullanım Alanları

Daha önce de belirtildiği gibi hafif betonlar, bileşiminde hafif agrega kullanmak, ince agrega kullanmadan sadece iri agrega kullanmak ya da kimyasal katkıları yardımıyla çimento hamurunda gözenekler oluşturmak suretiyle üretilmektedir. Bu çalışmada, hafif agrega ile üretilen betonlar kullanıldığından diğer hafif betonlar konusunda ayrıntıya girilmemektedir. Hafif agregalarla üretilen hafif betonlarda segregasyon ihtimali geleneksel betonlarınkinden yüksektir. Bu nedenle üretimlerinde gereken tedbirlerin alınması kaçınılmaz olmaktadır. Burada ayrıca hafif agregaların boşluklu ve pürüzlü

yapısı nedeniyle çimento hamuruyla olan aderanslarının geleneksel agregalarınkinden daha büyük olduğu, dolayısıyla da bunlarla sertleşmiş çimento hamuru arasındaki aderans sökülmesine pek rastlanmadığı belirtilmelidir.

Hafif betonları kullanım amaç ve yerlerine göre; taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı olmayan duvarlar ve yalıtım blokları olarak sınıflandırabiliriz. Taşıyıcı hafif betonlarda havada kurumuş haldeki ağırlığının 2000 kg/m^3 'den ve silindir basınç dayanımının 17 N/mm^2 'den, yalıtım bloklarının ise $800\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ ve dayanımının $0.7\text{-}7 \text{ N/mm}^2$ 'den az olmaması istenir (Neville, 1975). Hafif betonlar ise kuru birim hacim ağırlıkları 800 kg/m^3 'den büyük ve basınç dayanımları 20 kg/cm^2 'den küçüktür (Gündüz ve ark., 1998).

İzolasyon amaçlı olarak 1 N/mm^2 altında basınç dayanımı olan hafif betonlar kullanılır. Buna rağmen, basınç dayanımı 1 N/mm^2 'nin üzerindeyse, hafif betonlar yük taşıyan yapı elemanlarında kullanılabilir (Ujhely, 1983).

Hafif beton son yıllarda çok çeşitli inşaat projelerinde büyük bir ilgi ve büyük endüstriyel talep yaratan kaynak niteliğindeki bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Hafif betonun günümüzde düşük özgül ağırlığa, yüksek dayanıklılığa ve ısı yalıtım özeliğine sahip olduğundan dolayı yaygınlaştığı görülmektedir (Chandra ve Berntsson, 2003).

Hafif betonlar çoğunlukla birim ağırlık ve dayanım şartlarına göre sınıflandırılır. Taşıyıcı olan hafif betonların birim ağırlığı $1450\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ aralığında bulunmaktadır. Mukavemetleri $7\text{-}17 \text{ N/mm}^2$ arasında bulunan betonlar yalıtım betonu ve orta dayanımlı beton sınıfına girer (Neville, 1975).

Hafif beton çok yönlü bir malzemedir, çünkü bazı teknik, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamaktadır (Kok ve Min-Hong 2002).

Günümüzde hafif betonun birincil kullanımı, bir yapıdaki ölü yükü azaltmaktır. Bu, tasarımın kolanların, temellerin ve yük taşıma elemanlarının boyutunun azalmasına izin verir. Yapısal hafif beton, yapısal elemanlarda daha verimli bir ağırlık oranı sağlar. Hafif betonun marjinal olarak daha yüksek maliyeti, yapısal boyutların küçültülmesiyle dengelenir, böylece benzer hacimsel kapasite için beton hacmini ve donatı çeliği miktarını azaltır. Duvarlardaki daha yüksek R (ısı direnç) değerleri daha iyi yalıtım sağlar ve enerji tasarrufu sağlar. Hafif agrega gözenekliliği, betonun sağlamlığını ve dayanıklılığını sürekli olarak iyileştirmeyi sağlayan betonun iç kürü için bir su kaynağı sağlar. Bu, harici sertleştirme ihtiyacını ortadan kaldırmaz.

Yapılarda hafif inşaat malzemelerinin kullanımı; deprem etkisi, ekonomiklik, ısı ve ses izolasyonu, ateşe karşı dayanıklılık, donma-çözülme gibi birçok problemin çözümünde önemli rol oynamıştır (Bingöl ve Gül, 2004).

Farklı oran ve granülometride hafif agregalar kullanarak birim hacim ağırlığı 1.0-2.0 kg/dm³ ve basınç dayanımı 15-100 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton elde etmek mümkündür (Faust ve Gert König, 1997).

Yüksek dayanımlı hafif betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen faktörlerden en önemlisi, hafif agregaların su emme kapasiteleridir (Zhang ve Gjorj, 1991). Hafif betonun basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör su/çimento oranıdır (Bilgiç, 2009).

Doğal yoldan elde edilen perlit, kil, vermikülit, arduvaz gibi agregaların ısı işleme tabi tutulması ile elde edilen yapay agregaların ve uçucu kül gibi atık malzemelerden elde edilen, kille benzer şekilde sinterleştirilen yapay agregaların betonda hafif agregalar olarak kullanımları mevcuttur (Gökçe, 2010).

Yüksek katlı yapıların inşasının yaygınlaşması, küçük kesit, hafif, yüksek enerji yutma kapasitesi ve durabiliteye sahip betonlara ihtiyacı zorunlu hale getirmiştir. Aynı zamanda hafif betonlar yapıların ölü yüklerinde önemli oranda düşme sağladığı için deprem etkilerinde önemli derecede azalma ve elastik modüllerindeki düşüklükten dolayı iyi bir deprem davranışı göstermelerine neden olmaktadır (Kayali ve Zhu, 2004; Chandra ve Berntsson, 2003).

Hafif beton farklı alanlarda da kullanılabilir. Örnek olarak;

- Çatı ve ara kat ısı yalıtımı malzemesi,
- İç ve dış mekanlarda taşıyıcı olmayan duvar malzemesi,
- Ara katların şaplarında veya yüzey yükseltme işlemleri,
- Tutuşmayı ve yangını önleyici engeller ve boşlukların oluşturulması,
- Tesisat kanallarının yanı sıra geleneksel binaların tavan sıva malzemesi,
- Çelik inşaat aksamının etrafına kalıp yardımı ile dökülerek yangın koruyucu bir tabaka oluşturulması,
- Zemin stabilizasyonu ve dolgu malzemesi,
- Kanalizasyon,
- Yer altı boruları, kanal ve tünellerin doldurulması; yüzme havuzu, su depoları, sarnıçlar, maden ocakları gibi tekrar kazanılması gereken yüzeylerin doldurulmasında dolgu malzemesi,

- Arazi işlemleri,

- Dekoratif panellerin üretimi ile çok amaçlı yapı dolgu maddesi olarak kullanılabilirliği gösterilebilir (Ekinci, 2008).

Doğal kaynaklardan hafif agregası üretimi Romalılar dönemine kadar uzanmakta olup günümüze kadar devam etmektedir. 19. yy. sonlarında betonarmenin gelişmesi ile gelişmiş ülkelerin çoğunda doğal gözenekli agregası yataklarının nadir bulunması veya hiç bulunmaması nedeni ile yapay agregası üretimi için araştırmalar başlamış ve 20. yy. başlarında demir üretimi endüstriyel alt yapının temelini oluşturduğu için, gelişmeler yüksek fırın cürufu üzerinde yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte 1970'li yılların başında geliştirilen yüksek fırın cüruflarında kayda değer gelişmeler meydana gelmiştir. Böylece günümüzde taşıyıcı betonlar için uygun olan daha pürüzsüz yüzeyli cüruf içelikli agregalar üretilmiştir. Cürufu karşılaştırıldığında, 1913'lü yılların öncesinde Amerika'da yapılan araştırmalar kil ve şistlerin yakıldıklarında genleştiklerini ispatlamıştır. 1917 yılında, hafif beton üretiminde kullanılabilecek geliştirilmiş kil ve şist agregalarını üretecek döner fırın sistemi, Hayde tarafından dizayn edilmiştir (Hayde, 1918). Bu sistem ilk olarak 1919'da USS Selma isimli okyanus tipi geminin inşasında kullanılmıştır. Taşıyıcı hafif beton ilk olarak 1921'li yıllarda St. Louise'de Park Plaza Otel inşaatında uygulanmıştır. 1950'lerden sonra ise, hafif betonun birçok büyük yapıda kullanıldığını görmek mümkündür (Clarke, 1993; Mindess ve Young, 1981).

Normal beton iyi bir taşıyıcı olmasına karşılık, birim ağırlığı büyük, bu nedenle de ısı iletkenlik değeri yüksektir. Normal betonun bu sakıncalı yönlerini ortadan kaldırmak ve bazı olumlu özellikleri kazandırmak amacıyla bugün sanayi ülkelerinin birçoğunda hafif betonlar kullanılmaktadır. Normal betonun bu sakıncaları belirli bir dayanımı sağlamak kaydıyla birim ağırlığının düşürülmesini sorunlu hale getirmektedir. Betonun birim ağırlığının düşürülmesi ile betonarme elemanların kendi ağırlıkları azalır, yapı hafifletilebilir. Böylece elemanların kesitleri küçültülebilir. Bu hem estetik hem de ekonomik açıdan yararlıdır. Ayrıca betonda birim ağırlığın azaltılmasıyla ısı iletim katsayısı küçülür, ses yalıtımı artar. Isı yalıtımı bakımından normal betondan üstün olan hafif betonların günümüzdeki enerji sorunu nedeniyle yapılarda kullanılması önem kazanmıştır (Toydemir, 2000).

Birim ağırlığı normal betonlardan yaklaşık %25 daha düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Uluslararası standart beton üretim merkezi ise hafif betonu, kuru

birim ağırlığı 1200 ile 2000 kg/m³ arasında değişen beton olarak tarif etmektedir. Bu betonların birim ağırlıkları kullanım amacına göre değişmektedir.

Isı yalıtım amacıyla kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 300 ile 800 kg/m³ arasında değişirken, taşıyıcı olarak kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 2000 kg/m³'e kadar yükselebilmektedir (Mindess ve Young, 1981).

Birim ağırlığı normal betonlardan belirli bir şekilde küçük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Hafif betonlar, kuru birim ağırlığı 300-2000 kg/m³ arasında olan, kübik basınç dayanımları ise 10 kgf/cm²'den 612 kgf/cm²'ye kadar çıkabilecek şekilde üretilen betonlardır (Barry, 1989). ASTM C-330-69'a göre, birim ağırlıkları 1840 kg/m³'ü geçmeyen ve silindir basınç dayanımı 173 kgf/cm²'yi aşan betonlar hafif beton sınıfına girer kabul edilmektedir (Yıldırım ve ark., 1993). DIN 1045'e göre ise, birim ağırlığı 2000 kg/m³'ün altında olan betonlar hafif betondur (Postacıoğlu, 1987).

Hafif beton üretmek için en yaygın yöntem hafif agrega kullanmaktır, çünkü agregalar betonun yaklaşık %70-80'nini oluşturur. Agreganın beton karışımındaki yüksek oranlı kullanımı nedeniyle betonun mekanik ve diğer bazı özellikleri üzerinde önemli etkisi vardır (Mindess ve Young, 1981).

Hafif beton tipik olarak normal ve hafif agrega kombinasyonları ile üretilir. Tüm kaba ve ince hafif agregaların bir beton karışımında kullanılması, beton yoğunluğunu 90 lb/ft³ (1440 kg/m³)'ün altına düşürebilir.

Genelde, birim ağırlığı 1800 kg/m³'ten az olan betonlar hafif beton olarak sınıflandırılır (Ulus, 2007). Hafif beton ve normal beton arasındaki temel fark, ayırt edilebilir termal ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra düşük yoğunluklu bir kütleye sahiptir. Düşük yoğunluğa sahip hafif beton elde etmek için içerisinde yeterli havanın sürüklenmiş olması gerekir. Bu da hava oluşturan ajanlar veya hafif agregalar kullanılarak elde edilebilir.

Hafif betonun avantajları

- Yapı ağırlığının azalmasına bağlı olarak düşey yüklerde azalmalar olmaktadır ve bununla beraber yapıyı etkileyen atalet kuvvetleri de azalmaktadır. Böylece deprem yapıya daha az zarar vermektedir.
- Hafif betonla üretilen yapı elemanlarının birim ağırlıklarının düşük seyretmesi sebebiyle yapıdaki ölü yükler azalmaktadır. Böylece temelleri ve diğer yapı elemanlarını daha küçük boyutlarda tasarlamak ve inşa etmek mümkün olmaktadır.

- Eğilme etkisindeki elemanlarda ekonomik uygunluğu sağlamaktadır.
- Geçici taşıyıcılar ile mesnet ve temeller gibi daimi taşıyıcı elemanlarda ekonomiyi sağlamaktadır.
- Isı iletkenlik katsayılarının diğer betonlara nazaran daha düşük olması sebebiyle ısı ve ses izolasyonu daha iyi olmaktadır.
- Hafifliği nedeniyle taşınması ve yerleştirilmesi kolay olmaktadır.
- Homojen bir özellik göstermektedirler.
- Yangına karşı oldukça dayanıklıdır (Dikici, 2010).

Hafif betonun dezavantajları

- İçinde poroziteleri olması nedeniyle basınç dayanımları düşük ve aşınmaya karşı dayanıksız olmaktadır.
- Sünme ve rötre değerleri normal betona nazaran daha yüksektir.
- Normal betona kıyasla daha çok çimento dozajı gerektirmektedir. Bu sebeple maliyet artışı olmaktadır.
- Normal betona göre daha düşük bir kesme-kayma dayanımına sahip olmaktadır.
- Hafif agrega bulmak güç olduğu için ek masraf gerekmektedir.
- İmalat ve yerine konması daha kaliteli ve usta işçilik gerektirmektedir. Daha çok emek ve maliyet istemektedir.
- Elastisite modülünün düşük olmasından dolayı taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, dönmeler daha yüksektir (Dikici, 2010).

Tüm bu nedenlerden dolayı, yapısal hafif betonun tasarımı, özellikle deprem riski altındaki bölgelerde tercih edilir (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2005).

Taşdemir (1982), hafif betonun normal betona göre üstünlüklerini yaptığı bir çalışmada şu şekilde açıklamıştır:

- 1- Deprem etkilerine karşı güvenliği daha yüksektir,
- 2- Bina ağırlığı azalacağı için kiriş, kolan gibi taşıyıcı elemanların kesit boyutları daha küçük yapılabilir,
- 3- Betonarme elemanlardaki donatı azalır,
- 4- Kalıp ve iskele yapımı ile takviyesi kolaylaşır, maliyeti azalır,

- 5- Betonun kalıba taşınması ve yerleştirilmesi kolaylaşır,
- 6- Temel maliyeti azalır,
- 7- Isı yalıtım değeri daha yüksektir, enerji tasarrufu sağlar,
- 8- Sese karşı daha yalıtıcıdır,
- 9- Yangına dayanımı normal betonla kıyaslandığında daha iyidir,
- 10- Soğuk iklimli, özellikle donma-çözülme olayının sık olduğu bölgelerde don etkisine karşı daha dayanıklıdır.

2.3. Hafif Beton Türleri

Hafif betonlar; kumsuz beton, gaz beton, hafif agrega betonu olarak sınıflandırılabilir.

2.3.1. Kumsuz Beton

Kumsuz beton, çimento ve kaba agregadan oluşan hafif bir beton türüdür. Düzgün bir şekilde dağılmış boşluklardan oluşmaktadır. Bu hafif beton tipinin temel özelliği, boşluklarını muhafaza etmesi ve duvara yerleştirildiğinde boşluk tabakası veya çimento filmi oluşturmamasıdır.

İç ve dış duvarlar, yük taşıma duvarları ve zemin katlarda genellikle kullanılır. Çimento içeriği arttıkça bu hafif betonun dayanımı artar. Bununla birlikte, su bileşimine duyarlıdır. Yetersiz su, parçacıklar arasında yapışma eksikliğine ve dolayısıyla betonun dayanım kaybına neden olabilir. Aynı şekilde çok fazla su, çimento filminin akmasına neden olabilir (Mohd, 1997).

2.3.2. Gaz Beton

Gaz beton, silis kumunun çimento esaslı bağlayıcı veya kireçle sulu ortamda karıştırılması ve karışıma gözenek oluşturuçu alüminyum tozu ilavesi ile oluşturulan ve hafif beton sınıfında yer alan bir yapı malzemesidir (Güçlüer, 2011). Alüminyum tozu ilavesiyle gerçekleşen kimyasal tepkime sonucu karışım hacmi iki kat kadar genişler ve oldukça gözenekli bir yapı oluşur (Karakurt ve ark., 2010). Gaz beton kaba agrega içermez.

2.3.3. Hafif Agregalı Beton

Günümüzde en yaygın kullanılan hafif agregalar, doğal malzemelerin fırınlarda yüksek sıcaklıkta genleştirilmesi ile üretilen yapay hafif agregalar olup; ilk üretim çalışmaları 1900'lerin başlarında başlamış, ilk ticari kullanımları ise I. Dünya Savaşı sırasında, çeliğin kısıtlı olması nedeniyle, "ferrocement" ticari gemilerin üretimi ile olmuştur (Fiorato, 1981).

Bu tip hafif betonda normal agrega yerine düşük özgül ağırlığa sahip gözenekli hafif agrega kullanılır. Şekil 2.2'de hafif agregalı beton görülmektedir. Hafif agregalar, son yıllarda özellikle inşaat sektöründe hafif yapı elemanı olarak değerlendirilmektedir.

Hafif agregalar genellikle normal agregalara kıyasla çok yüksek bir su emme özelliğine sahiptir. Gözenekli yapısıyla, hafif agregalar, hafif betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde bozan serbest suyu kolayca emebilmektedir (Zhu ve ark., 2017).

Daha az gözenekli hafif agregalar, yapısal gerilimlere dayanacak kadar güçlü, ancak yüksek gözenekli agregalarla yapılanlara göre daha yoğun ve daha az verimli ısı yalıtımına sahip olan betonlar üretebilir (Shirley, 1975).

Hafif agregalarla imal edilen betonların özellikleri agreganın minerolojik yapısı ile birlikte granülometri bileşimine, çimento miktarına, su çimento oranına bağlıdır. Sertleşmiş betonların birim ağırlığı, su emmesi, dayanımı ve ısı yalıtımı birbiriyle ilişkili olan özelliklerdir. Genel olarak betonun birim ağırlığı arttıkça ısı yalıtımı azalmakta ve buna karşılık dayanım artmaktadır (Gündüz, 2007). Hafif agrega, pomza, cüruf ve volkanik kökenli olanların tamamı gibi doğal agrega ve genleştirilmiş yüksek fırın cürufu, vermikülit ve klinker gibi yapay agrega olabilir. Hafif agregaların temel özelliği, düşük bir özgül ağırlıkla sonuçlanan yüksek porozitesidir.

Hafif agregaların en önemli özelliği olan yüksek poroziteleri, düşük görünür özgül ağırlıklara sahip olmalarına neden olur (Baradan, 1994).



Şekil 2.2. Hafif agregalı beton

Agreganın birim ağırlığı; granülometrisi, boşluk oranı, yüzey yapısı ve nem oranına bağlı olarak değişiklik gösterir. Hafif agregalar üzerinde yapılan birim ağırlık deneyi, şişleme esnasında tanelerin ufalanma ihtimaline karşı, uygulamada yalnızca gevşek birim ağırlığın tayininden ibarettir (Gül ve Geçten, 1993).

Hafif agregalı hafif betonların sınıflandırılması

Hafif betonları, kullanım amaçlarına ve elde ediliş şekillerine göre sınıflandırmak mümkündür.

Birim ağırlık-mukavemet temelinde, hafif betonları kullanım amaçlarına göre;

- Düşük mukavemet-düşük birim ağırlıklı, yalıtım hafif betonları,
- Orta mukavemetli, hem taşıyıcı hemde yalıtım hafif betonları,
- Yüksek mukavemetli, taşıyıcı hafif betonlar,

şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Taşıyıcı hafif betonlar

Taşıyıcı hafif betonlar, birim ağırlıkları 1400 ile 1900 kg/m³ arasında olan betonlardır. Birim ağırlıkları 1600 ile 2000 kg/m³ arasında değişen betonlar olarak da tanımlanmaktadırlar. TS 2511'e göre ise taşıyıcı hafif beton, kurumuş halde havadaki birim ağırlığı 1900 kg/m³'den az olan ve en az 160 kgf/cm² basınç dayanımına sahip olan betonlardır (Hüsem ve Durmuş, 1993).

Bu tür betonların yapıda kullanılmasıyla daimi yükün %25 gibi belirgin bir ölçüde azalması sağlanmaktadır. Bundan dolayı betonarme yapı tekniğinde taşıyıcı hafif beton kullanılması eğilimi gittikçe artmaktadır. Bu tür yapı malzemesinin kullanılmasının başlıca nedeni, yapının tüm ağırlığının azaltılmasını sağlayarak taşıyıcı elemanların kesitlerini küçültmek ve böylece maliyet bedelini düşürmektir (Neville, 1996).

Taşıyıcı hafif betonlar için basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör normal betonda olduğu gibi su/çimento oranıdır. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesabını üç faktör etkiler:

- Basınç dayanımı; su/çimento oranına bağlıdır,
- İşlenebilirlik; agrega türüne bağlı olarak su içeriğine göre değişir,
- Birim ağırlık; agrega ve çimento içeriğine bağlıdır (TS 2511, 1997).

Taşıyıcı olmayan hafif betonlar

Genelde izolasyon amacı ile kullanılırlar. Birim ağırlıkları 300 ile 1200 kg/m³ arasında değişirken, basınç mukavemetleri de 50 ile 170 kgf/cm² arasında değişmektedir (TS 2511, 1997).

Birim ağırlık, üretilen betonun hafif beton sınıfına girip girmeyeceğinin bir göstergesi olduğundan genelde birim ağırlığı 1.6 kg/dm³'ün altında olan betonlar hafif beton olarak adlandırılır (Baradan, 1994).

Betonların kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişiklikler diğer bütün özelliklerini, özellikle mekanik ve termik özelliklerini etkiler. Kuru birim hacim ağırlığının yükselmesi halinde betonun mekanik dayanımları artarken ısı yalıtkanlık gücü zayıflar. Bu iki özellik arasında en iyi uzlaşmayı sağlayan kuru birim hacim ağırlığın en ideal olanıdır (Urhan, 1993).

Yapı malzemelerinin ısı iletkenliği; malzemenin gözeneklilik derecesine, gözeneklerin büyüklük ve dağılım durumuna, malzemenin türüne yapısına, malzeme içindeki nem miktarına ve birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişir. Katı cisimler içerisinde ısı iletimi moleküllerin ısı aktarımı ile olur. Camsı molekül yapısında ısıyın katedeceği yol, kristalin molekül yapısına göre daha uzundur ve sonuç olarak da ısı iletkenlik katsayısı da aynı kimyasal bileşimde kristal yapıdaki cisimlerininkine göre daha küçüktür. Genleşmiş yüksek fırın cürufu, perlit, cam, kalsine uçucu kül ve sünger taşı agregalarının kimyasal yapıları diğer agregalara göre daha camsıdır ve dolayısıyla bu agregalar ile yapılan betonlar kuru birim hacim ağırlıklarına göre diğer betonlardan daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olabilmektedir (Yağanoğlu, 1994; Eriç, 2002).

2.4. Beton Yapımında Kullanılan Agregalar

Agrega, betonun iskeletini oluşturan kum, çakıl, kırma taş veya cüruf gibi granül malzemedir. Aşamalı olarak daha küçük elek boylarına sahip bir elek takımı içinden geçirilerek derecelendirilir. Agreganın maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan betonda bir dolgu malzemesi olarak kabul edilebilir, ancak agreganın kullanmanın tek sebebi beton üretiminde ekonomi sağlamak değildir. Agreganın aynı zamanda betona önemli teknik avantajlar sağlar; beton, çimento hamuruna göre hacim sabitliğini daha iyi korur ve çevre etkilerine karşı daha dayanıklı olur. Ayrıca taze betonun işlenebilmesi, pompalanabilmesi, beton içerisindeki hava miktarı da agreganın tarafından belirlenir (Neville, 1975).

Agrega beton hacminin %75'ini veya daha fazlasını oluşturur ve bu nedenle özellikleri büyük ölçüde betonun özelliklerini belirler. Betonun iyi kalitede olması için, agreganın güçlü ve dayanıklı olması ve silt, organik madde, yağ ve şeker içermemelidir. Aksi takdirde, kullanımdan önce yıkanmalıdır, çünkü bu yabancı maddelerden herhangi biri çimentonun nemlenmesini yavaşlatabilir veya önleyebilir veya çimento hamuru ile agreganın parçacıkları arasındaki bağı azaltabilir.

Standartta göre beton agregaları; sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları, zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür vb.), basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları, toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri, yassı ve uzun taneler içermemeleri, çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleri ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidirler (TS 706 EN 12620, 2009).

Beton yapımında agreganın kullanılması tek nedeni daha ekonomik beton üretmek değildir. Agreganın betonun teknik özelliklerine de önemli katkılarda bulunmaktadır (Erdoğan, 2003). Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, gözenekliliği, su geçirgenliği, mineral yapısı, tane şekli, gradasyonu, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, en büyük tane boyutu, elastiklik modülü, betonun özelliklerini etkilemektedir (Mehta ve Monteiro, 2006).

Agrega, düşük birim hacim ağırlığı ve istenilen mukavemeti sağlayacak özelliklerde olsa da su emme özellikleri direkt betonun çökme ve işlenebilirliğini etkilediği belirtilmektedir (Gökçe ve Can, 2009).

Agreganın su emme oranı, agreganın fiziksel ve mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etki eder. Su emme değeri yüksek agregalar beton karışım suyu miktarını

arttıracağından mukavemet düşüklüğüne sebep olur. Su emme kapasitesi yüksek olan agregalar betonun işlenebilirliğini yüksek oranda etkiler; yüksek su emmeye sahip agregalar betonun işlenebilirliğini azalttığı gibi düşük su emmeye sahip agregalar işlenebilirliği artırır.

Agrega toplam beton hacminin yaklaşık %65-75'ini kaplamaktadır (Terzic ve ark., 2015). Agreganın kimyasal ve minerolojik bileşimi, petrografik yapısı, özgül ağırlığı, sertliği, dayanımı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı ve rengi gibi özellikleri, elde edildiği kayacın özelliklerine bağlıdır. Tüm bu özelliklerin beton kalitesi üzerindeki etkisi büyüktür (Alexsander ve Milne, 1995).

Kum ve çakıl agregaları ile yapılmış normal betonların birim hacim ağırlıkları 2000-2600 kg/m³ civarındadır. Beton yapımında kullanılan kum, çakıl veya çimentonun bir kısmı beton yapısında hava boşlukları meydana getirdiği için geleneksel agregalar yerine hafif ve çok hafif agregalar kullanıldığında betonun hacim ağırlığı azaltılabilmektedir. Bu yolla üretilen kuru birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³'den düşük olan betonlar, hafif beton olarak adlandırılmaktadır (Gündüz ve ark., 1998).

Harçlarda hafif agregaların kullanımı gündeme geldiğinde mekanik özelliklerden çok yalıtımsal değer ve hafiflik dikkate alınmaktadır. Genleştirilmiş perlit, taban külü ve bims gibi agregaların kullanımı ile hafif ürünler elde etmek ve bu ürünlerden ısı izolasyonu elde etmek mümkündür (Yıldırım ve Kiraz, 2013; Keskin ve Yıldırım, 2016).

Hafif agregalar hafif taşıyıcı betonların üretilmesinde veya yalıtım özelliği yüksek panellerin yapımında kullanılabilirler. Betonarme yapılarda betonun birim ağırlığının yüksek olması, yapıların ağırlığını artırmakta bu da kesitlerin büyümesine yol açmaktadır. Dolayısıyla, yapının ağırlığı bir miktar daha artmakta ve zeminde önemli kuvvetler oluşmaktadır (Sönmez ve ark., 2004).

Agregaların çeşitli özellikleri arasında, hafif agregaların derecelendirilmesi (veya partikül büyüklüğü dağılımı) betonun işlenebilirliğini ve maliyetini etkileyebileceği için çok önemli bir faktördür (Mehta ve Monteiro, 2005).

En uygun şekilli agregalar küre ve küp şekline mümkün olduğu kadar yaklaşanlardır. Bu şekillerden çok ayrılan elemanlara kusurlu taneler denir. Betonda yer alabilecek yassı tanelerse açık boşluklar oluşturarak, zayıf kesimler oluşturur ve yine çimento ihtiyacını artırır. Çok ince malzemenin fazla olması durumunda betonda olumsuz etkileri olabilmektedir. Bu malzemeler agregalar tanelerinin etrafını sararak çimento hamuru ile arasındaki bağı zayıflamasına ve aderansın azalmasına neden

olmaktadır. Ayrıca, beton karma suyu miktarını arttırarak betonun dayanım ve durabilitesine olumsuz etki eder (Neville, 1996).

Günümüzde, hafif beton ve blok üretimi için doğal ve yapay agregaların kullanıldığı farklı yöntemler bulunmaktadır. Genel olarak;

1- Normal ağırlıklı agregaya yerine, boşluklu doğal ve yapay agregaya kullanmak (Geniştirilmiş kil ve şist perlit, pomza gibi).

2- Fiziksel veya kimyasal yolla beton ve bloklar içerisinde boşluklar oluşturmak (Gaz beton, köpük beton gibi).

3- İnce agregasını çıkartarak büyük boşluklar oluşturarak kumsuz beton blokları üretmek, şeklinde sınıflandırılır.

Üç metotta da betonun birim hacim ağırlığının düşme nedeni, oluşturulan hava boşluklarıdır. Bu boşluklar agreganın, harç veya iri agregaların arasında olabilir. Bu boşlukların beton mukavemetini düşüreceği bir gerçektir. Yapı elemanlarının hafif olması, özellikle yapıda temel ve alt katlara az yükün gelmesi yapının dayanıklılığı bakımından çok önemlidir.

Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agreganın amacı, hafif agregaya kullanımı ile birim hacim ağırlığı istenen aralıklarda tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar üretildikleri malzemenin hammaddesine ve kendi birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Üretildikleri malzemenin kaynağına göre hafif agregalar dört sınıfta toplanabilir (Ateş, 2000).

- Doğal Hafif Agregalar: Pomza taşı, volkanik tuf, volkanik cüruf.

- Doğal Malzemedan Üretilen Yapay Hafif Agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikülit gibi polimer esaslı malzemeler.

- Endüstriyel Atıklardan Üretilen Hafif Agregalar: Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül.

- Endüstriyel Atıkların İşlenmesiyle Üretilen Hafif Agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül (Dikici, 2010).

Hafif agregaya olarak kullanılan agregaların teknik özellikleri, kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir. Fiziksel ve mekanik özellikleri agregaların hafif beton, hafif duvar-döşeme yapı elemanları, prefabrik elemanlar, kompozit yapıda yalıtım amaçlı sıva ve harç malzemesi vb. amaçlarda kullanımına olanak sağlamaktadır. Doğal ve atık

malzemelerden elde edilen hafif agregaların özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir (Mueller ve ark., 2007).

Tablo 2.1. Doğal ve atık malzemelerden elde edilen hafif agregaların özellikleri

Hafif agregaların özellikleri	Doğal hammaddelerden elde edilen hafif agregalar		Atık maddelerden elde edilen hafif agregalar			
	Perlit ve vermikülit	Genleştirilmiş kil	Geri dönüştürülmüş cam granülleri	Kırma kum granülleri	Mineral köpük granülleri	Uçucu kül ve diğer bileşen.
Fırınlanma sıcaklığı (°C)	Yaklaşık 900	1100-1200	750-900	1000-1080	<1000	1000-1300
Yığın yoğunluğu (kg/m³)	32-400	160-850	190-300	250-600	150-400	710-1400
Isı iletkenliği (W/mK)	0.04-0.06	0.08-0.12	0.07	0.06-0.09	0.09	0.07

2.5. Beton Katkı Maddeleri

Beton katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansını artırabilmek ve/veya betonun daha ekonomik olmasını sağlayabilmek için kullanılmaktadır. Taze betonun işlenebilirliğini artırmak, priz sürelerini değiştirmek, sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmak gibi amaçlarla beton üretiminde kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Beton teknolojisinde kimyasal katkı maddeleri, su içerisinde erime özelliği bulunan katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır (Topçu ve ark., 2006).

Katkılar oluşturdukları etkiler ve fonksiyonları açısından sınıflandırılabilir.

RILEM Uluslararası Malzeme ve Yapı Laboratuvarları Birliği şu sınıflandırmayı yapmıştır:

1. Taze betonun reolojik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri
2. Priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri
3. Beton hava içeriğini değiştiren katkı maddeleri
4. Betonların fiziksel ve mekanik niteliklerini arttıran katkı maddeleri

5. Betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri
6. Betona ek nitelikler kazandıran katkı maddeleri (Akman, 1990).

ACI Committee 212 tarafından beton katkı maddeleri 5 gruba ayrılmıştır:

1. Hava sürükleyen katkılar
2. Hızlandırıcı katkılar
3. Su azaltıcı ve priz süresini ayarlayan katkılar
4. Akıcı beton için katkılar
5. Diğer çeşitli katkılar (ACI Committee 212, 1986).

TS 3452 ve ASTM ise kimyasal katkıları şu şekilde sınıflandırmıştır:

1. Tip A: Su indirgeyiciler
2. Tip B: Priz geciktiriciler
3. Tip C: Priz hızlandırıcılar
4. Tip D: Su indirgeyici ve priz geciktiriciler
5. Tip E: Su indirgeyici ve priz hızlandırıcılar
6. Tip F: Yüksek oranda su indirgeyiciler
7. Tip G: Yüksek oranda su indirgeyiciler ve priz geciktiriciler (Neville, 1996; TS 3452, 1988).

Betonun karışım suyunu azaltan katkılar, taze betonun priz almasını geciktiren veya hızlandıran katkılar, kimyasal katkı maddeleri olarak anılan katkı grubu içerisinde yer alan maddelerdir (Erdoğan, 2003).

Akışkanlaştırıcılar, uygulamada su/çimento oranının azaltılması ile aynı işlenebilmeyi elde etmek, daha yüksek dayanım kazanabilmek, çimentonun azalmasını sağlayarak hidrasyon ısını düşürmek amaçlarıyla kullanılmaktadırlar (Uyan ve Özkul, 1985).

İlk olarak 1930’larda ortaya çıkan akışkanlaştırıcı katkıların temelini lignosülfonatlar oluşturmaktaydı. 1960’lara gelindiğinde sülfonatlı naftalin polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkılar ortaya çıkmıştır. 1990’lardan sonra ise önce vinil kopolimerler ve en son olarak da modifiye polikarboksilatların ortaya çıkmasıyla beton teknolojisinde oldukça yeni bir kapı aralanmıştır (Sağlık, 2005). Taze betonun döküleceği yere ulaşması sırasında geçen zamandan dolayı oluşan kıvam kaybının su kullanılarak iyileştirilmesinin betonun özelliklerine olumsuz etkileri vardır (Yıldırım ve ark., 1996).

Bu nedenle çimento miktarı azaltılmaksızın veya basınç dayanımı düşmeksizin üretilen betonun, akıcı ve kolay yerleşebilir olmasının sağlanması gerekmektedir. Taze betonda bu akıcılığın sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır (Aydın ve ark., 1996).

Kimyasal katkıları, daha çok işlenebilirliği artırmak, su/çimento oranını azaltmak, pompalanabilirliği kolaylaştırmak, yüksek dayanımlı beton üretmek, soğuk ve sıcak hava koşullarında betonun korunması ve iyi bir performans göstermesi amaçlarıyla kullanılmaktadır. Beton üretiminde çimento tipi değiştirildiğinde kullanılan kimyasal katkı oranının ve etkilerinin belirlenmesi için yeniden laboratuvar çalışması yapılmasının gerektiği düşünülmektedir (Topçu ve ark., 2006).

Beton üretiminde kullandıkları katkı miktarı ise çimento miktarının %0.8 ile %1'i arasındadır. Katkı kullanımının beton üretimine ek maliyeti %1-3 arasında değişmektedir (Topçu ve ark., 2006).

3. GENLEŞTİRİLMİŞ CAM

Bilindiği gibi, son yıllarda cam ürünlerinin kullanımı büyük ölçüde artmıştır ve bu da büyük miktarda atık camla sonuçlanmıştır (Rashad, 2014). İngiltere Çevre Ajansı raporuna göre, İngiltere’de her yıl yaklaşık 670.000-770.000 ton atık düz cam üretiliyor; geri kalanının yalnızca 210.000 tonu geri dönüştürülürken, geri kalan kısmı atık depolama alanına gitmiştir. Bir başka çalışma A.B.D’de her yıl yaklaşık 900.000 ton atık camın üretildiğini bildirmektedir 2010 yılında Portekiz’de yaklaşık 425.000 ton atık cam üretildi ve bunlardan sadece 192.000 tonu geri dönüştürüldü (Fernandes ve ark., 2009).

Atık camın yaklaşık %80’i cam işleme fabrikalarında tekrar eritmeye uygun değildir. Günümüzde, geri dönüştürülemeyen bu atık camın imha edilmesi tüm dünyada acil bir çevre konusudur, çünkü camın biyolojik olarak parçalanamayan doğası, büyük miktarda atık depolama alanına ihtiyaç duymaktadır ve buna ek olarak hava, toprak ve su kirliliğine neden olacaktır (Castro ve Brito, 2013).

Geri dönüştürülemeyen atık camlarla yukarıda belirtilen sorunları en aza indirmenin en iyi çözümü, inşaat ve endüstriyel alanda kullanılabilecek hafif, ekonomik, kullanımı kolay çevre dostu olan yeni alternatif yapı malzemesine geri dönüştürülmesi gerekir. Endüstriyel atık geri dönüşümü, endüstriyel atıkları elden çıkarmanın bir yoludur. Gelişmekte olan ülkelerde endişe kaynağı olan geri dönüşüm atıklarını faydalı ürünlere etkin bir şekilde dönüştürmek için değil, aynı zamanda gelecek nesillere doğal kaynakları bırakmak için de önemlidir. Katı atık malzemelerin farklı sosyo-ekonomik faaliyetlerden geri dönüşümü, atıkların toplanmasını, geri dönüştürülebilir malzemelerin “ikincil hammaddelere” dönüştürülmesi ve daha sonra yeni ürünlere dönüştürülmesini içerir. Bu işlemler, atılacak malzeme miktarında ciddi bir düşüşe ve aynı zamanda enerji ve malzeme kaynaklarının geri kazanımında bir artışa izin verir.

İnce veya iri geri dönüştürülmüş agregaların kullanımı, atık depolama alanlarına gönderilen atık madde miktarında bir azalmaya ve ayrıca yaygın olarak betonda kullanılan doğal malzeme miktarını azaltabilir (Maier ve Durham, 2012; Menadi ve ark., 2013). Atık cam kullanarak köpüklü cam üretimi, atık camın geri dönüşümünün bir yöntemi olabilir. Örneğin, Rusya’da atık cam parçaları kullanılarak köpük cam üretiminin yakın gelecekte devam edeceği bildirilmektedir (Lotov ve Krivenkova, 2002). Köpük cam imalat ilkesi camın karıştırılması, yıkanması ve ezilmesi ve daha sonra hazırlanan

ezilmiş cam karışımına bir köpük aktivatörü (kalker karbonat) eklenmesi üzerine kuruludur. Karışım bir fırına yerleştirilir ve camın viskoelastik halini ve aktivatörün gaz halinde ayrışmasını sağlayan sıcaklığı elde etmek için 800-900 °C'ye ısıtılır. Bu işlem karışımın köpürmesine neden olur. Akışkan yataklı fırının çıkışında, ortam sıcaklığında üretilen söndürme, agrega halinde parçalanmaya yol açar (Shutov ve ark., 2007; Ritola ve Vares, 2008).

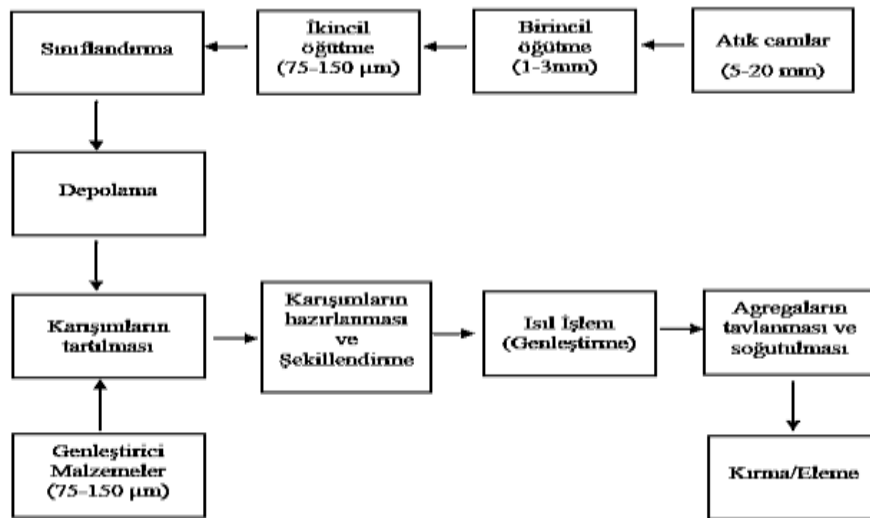
Genleştirilmiş cam, geri dönüştürülmüş camdan yapılmış taneli bir malzemedir. Genleştirilmiş cam aynı zamanda hücresel cam veya köpük cam olarak da adlandırılmaktadır. Genleştirilmiş cam agrega üretimi, genel olarak hammaddelerin hazırlanması, karıştırılması, şekillendirme, ısıtma işlem teknolojisi ve çıkan ürüne yapılan işlem basamaklarından oluşmaktadır. Yaklaşık 5 mm ile 20 mm arasında boyutlandırılmış atık camlar öncelikle çekiçli değirmenlere beslenir ve 1 mm ile 2 mm arasındaki boyutlara kadar öğütülür. Bu malzeme bilyalı değirmenlerde 100 mikrona kadar öğütülerek toz haline getirilir. Cam tozu, bağlayıcı ve köpürme ajanı ile karıştırılır ve granüller halinde şekillendirilerek 700-900 °C arasındaki sıcaklıkta olan döner fırına gönderilir. Burada sinterlenir ve köpürtülür (genleştirilir). Isıtma sürecinden geçen agregalar fırından geçerken tavanı soğutulur. Sertleşme sürecini tamamlayan cam agregalar, endüstriyel kullanım amacına uygun olacak şekilde kırma ve eleme işlemlerinden geçirilir (Hurley, 2003). Genleştirilmiş cam agregalar nispeten pürüzsüz bir yüzeye sahiptir ve kabuk içinde kapsüllenmiş çok sayıda kapalı gözeneklerden oluşmaktadır (Abd Elrahman ve ark., 2018).

Genleştirilmiş cam agrega üretiminin prensibi, 700-900 °C arasında cam tozunun viskoz bir sıvı haline dönüşmesi ve daha sonra köpürme (genleştirici) ajanının çözünerek bir gaz açığa çıkarması ve bu gazın da kabarcıklar oluşturarak ayrışmasına dayanır. Oluşan gaz kabarcığının tüm gövde boyunca yükselmemesi için camın yeterli viskoziteye sahip olması gerekir. Sıcaklığın çok yüksek olmasıyla beraber kabarcıklar yükselerek matriks yapının çökmesine ve genişlemenin oluşmamasına neden olur (Kreidl, 1942). Isıtma hızının kontrolü, köpük cam ürününün optimize edilmesinde en önemli faktörlerden biridir. Hızlı ısıtma, genişleyen cam agreganın çatlamasına neden olurken, yavaş ısıtma camın viskozitesi, camın genişlemesine izin verecek kadar düşük olmadığından köpürme ajanı gazın erken salınmasına neden olacaktır (Hurley, 2003). Genleştirilmiş agregaların düşük sıcaklıkta elde edilmesi ince gözenekli bir yapı oluştururken 900 °C üzerinde kaba gözenekli bir yapı oluşturur.

Genleştirmede, erime sıcaklığına kadar ısıtılan malzemede, gaz çıkışı ile birlikte piroplastik yapı oluşmaktadır. Genleştirmeyi sağlamak için, döner fırınlar, dikey fırınlar ve köpürtme yatakları yaygın olarak kullanılmaktadır (Şapcı, 2013).

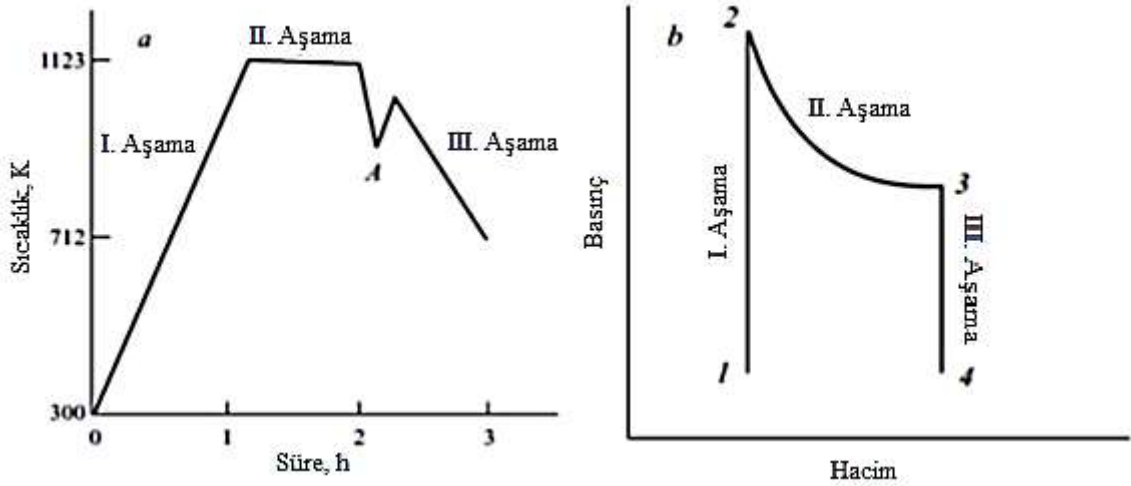
İnce öğütülmüş cam tozunun genleştirilmesinde etkin olan genleştirici ajan malzemeler kullanılmaktadır. Genleştirme için kalsiyum sülfat (CaSO_4) veya kalsiyum karbonat (CaCO_3) gibi doğal kayaç bileşenler kullanılır. CaSO_4 kullanımında, termal iletkenliğin daha düşük olacağı bildirilmektedir, ancak CaCO_3 ile çalışmak daha kolaydır. Bunun nedeni genleşme işlemi sırasında CaSO_4 'tan gelen kükürt gazların açığa çıkmasıdır. SO_2 gazı CO_2 gazından daha düşük bir termal iletkenliğe sahiptir. Bununla birlikte, SO_2 oluşumu zararlı bir gaz olduğundan daha fazla kontrol gerektirir (Lynsavage, 1951). Daha ucuz bir genleştirme ajanı olan CaCO_3 kullanımı, 1944 yılında geliştirilmiş ve patentlenmiştir (Jones ve ark., 1979). Suyun atık camda genleştirici madde olarak kullanılması da geliştirilmiştir (Goyal ve Cutler, 1975).

Genleştirici ajanlar, nötrleştiriciler (örneğin CaCO_3 ve $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ve redoks ajanları (örneğin C, SiC ve Si_3N_4) olarak sınıflandırılır (Spiridonov ve Orlova, 2003). Genleştirme ajanının türü (nötrleştiriciler veya redoks), genleştirilmiş camın yapısını ve su emilimini belirler. Nötrleştirici genleştirme maddesi kullanılarak işlenen camlarda gözeneklerin açık olduğu su emme %50-70 kadardır, redoks gazı oluşturan genleştirme maddesi kullanılarak işlenen camlarda ise su emme %10-15 arasında değişmektedir (Spiridonov ve Orlova, 2003). Genleştirilmiş cam agregalarının üretim aşamaları Şekil 3.1.'de verilmiştir (Solomon ve Ros, 1996).



Şekil 3.1. Genleştirilmiş cam agregaların üretim aşamaları

Genleştirilmiş cam prosesi genel olarak Şekil 3.2’de gösterildiği gibi üç aşama ile tanımlanmaktadır. I. Aşamada, genişletme ajanı ile cam tozu, belli bir süre zarfında genişleme sıcaklığına kadar ısıtılır. II. Aşamada, genişleme meydana gelir ve son aşamada, genleştirilmiş cam soğutulur (A noktası) ve tavlanır (Manevich ve Subbotin, 2008).



Şekil 3.2. Cam tozu genişleme işleminin (a) sıcaklık-zaman grafiği, (b) basınç-hacim grafiği

Erimiş cam veya silis topaklarına köpürtücü ajanlar ilave ederek 1970’lerde genleştirilmiş cam geliştirilmiştir. Bu yöntemle %0.1 öğütülmüş silis köpürme ajanı ile fırında basınç altında köpürtülmüştür. Bu metodu kullanarak ateşe dayanıklı cam dahil olmak üzere çeşitli cam türleri başarıyla köpürtülmüştür (Jones ve ark., 1979).

Doğal kumun azaltılması ve hafif bir malzeme kullanılması yapının kendi ağırlığını azaltır, böylece yapısal elemanların boyutunu azaltır veya daha yüksek binaların inşa edilmesine izin verir (Kralj, 2009; Khatib ve ark., 2012). Bu da ticari bir fayda sağlayacaktır, çünkü daha az malzeme miktarı binanın maliyetini düşürür.

Son zamanlarda alternatif olarak, beton üretimi için geri dönüştürülmüş cam atıklarından elde edilen genleştirilmiş cam kullanılmıştır (Yu ve ark., 2013). Bu tür agregaların betonda ana inşaat malzemesi olarak kullanılması inşaat endüstrisinin sürdürülebilir gelişimi için büyük önem taşımaktadır (Fennis ve Walraven, 2012). Bu agregalardan üretilen bloklar hafif, uygun yük taşıma kapasitesine sahip, dona dayanıklı, ısı ve ses izolasyonu sağlayan, yanmaz malzemelerdir (Kvande, 2001). Bununla birlikte, genleştirilmiş cam agreganın betona uygulanmasının sadece başlangıç aşamasında olduğu vurgulanmalıdır. Bu alandaki ilk çalışmalar, betonun 28 günlük sertleşme sonrası

yoğunluğunun ve basınç dayanımının, sırasıyla 1280-1490 kg/m³ ve 23.3-30.2 MPa olarak bulunmuştur (Yu ve ark., 2013).

Genleştirilmiş cam granüller %100 mineraldir ve düşük yoğunluklu hafif bir malzemedir. Yoğunluğu 0.38-0.42 kg/dm³ aralığındadır. Hafif genleştirilmiş cam granülleri 0.45-0.55 MPa aralığında basınç dayanımını gösterir. Bu tür malzemenin çimento matrisine dahil edilmesiyle, genleştirilmiş cam granüllerinin basınç dayanımı nedeniyle betonun sıkıştırma dayanımını sınırlandırabilir.

Genleştirilmiş cam granüllerinden yapılan hafif beton, en yeni beton türlerinden biridir. Bu uygulama sürdürülebilir kalkınmya, atık camın verimli şekilde yeniden kullanılması için yeni bir yöntem sunar. Genleştirilmiş cam granüllerinin çimento matrisine dahil edilmesi ile yapılır. Karışım oranına bağlı olarak DIN 1045 uyarınca normal beton sağlamlığına ulaşılabilir. Genleştirilmiş camın yoğunluğu, 480-1600 kg/m³ arasında değişebilir (US Patent 7695560, 2011).

Genleştirilmiş cam inşaat uygulamalarında hafif ve yarı yapısal olmayan malzeme olarak kullanılmaktadır (Limbachiya ve ark., 2012). Genleştirilmiş cam agregalarının düşük yoğunluğu nedeniyle, bu malzemenin basınç dayanımı nispeten düşüktür (Macedo, 2011; Bumanis ve ark., 2013). 1000 kg/m³'ten az yoğunluğa sahip agregalar için, elastik modül ve agrega betonun basınç dayanımı, agreganın hacim fraksiyonundan kuvvetli bir şekilde etkilenir (Ke ve ark., 2009).

Genleştirilmiş cam ülkemizde üretimi olmayan sadece dünyada ticari olarak üretilen ve endüstride kullanılan bir agregadır. Genleştirilmiş cam agrega içeren hafif beton, inşaatte tek başına kullanılabilir, ancak taşıyıcı bir yapı olarak kullanılamaz. Genleştirilmiş camdan yapılmış betonun çok iyi ısı iletkenliğine sahip olduğu; bu nedenle, inşaat sırasında kaplama malzemesi olarak önerilebilir.

Hafif agrega dış kabuk kalınlığı, makro gözeneklilik ve kırık tanelerin yüzdesi, toplam dayanımı etkiler (Ke ve ark. 2009). Hafif agrega betonunun en zayıf bileşeni çimento matrisi veya ara yüzey geçiş bölgesi değil, agregadır. Bu nedenle hafif betonun mekanik performansları sadece çimento matris kalitesi ile değil, beton ve agrega özelliklerindeki toplam hacim ile de kontrol edilir (Chi ve ark., 2003). Hafif beton kompozitinin basınç dayanımını arttırmanın iki temel yolu vardır. Bunlardan biri, hafif beton karışımındaki genişletilmiş cam granül hacmini değiştirmektir. Bu nedenle beton karışım tasarımında çimento macunu hacmindeki değişiklik ile istenilen dayanım elde edilir. Diğer bir seçenek de beton karışım tasarımına kum gibi ince agregalar katılarak

hafif betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Her iki çözüm de hafif betonun ısı özelliklerini etkiler. Mekanik mukavemeti arttırmak için, numunenin ısı yalıtım kapasitesi hafifçe azaltılmalıdır, çünkü yoğunluğun artmasıyla, basınç dayanımı, ısı iletkenlik katsayısından daha hızlı artar (Jasaitiené ve ark., 2010). Optimal genişleştirilmiş cam agregası miktarı ve bunlara karşılık gelen çimento harç matrisinin mukavemeti belirlenebilir ve seçilmiş bir beton yoğunluğu ve basınç dayanımı için uygun genişleştirilmiş cam miktarı seçilebilir (Nemes, 2006).

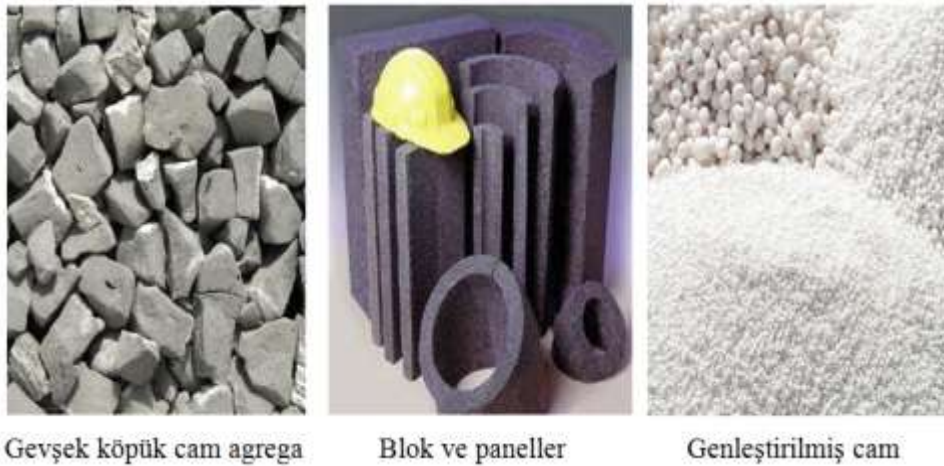
Piyasada mevcut olan genişleştirilmiş cam ürünleri üç tiptir:

- Gevşek köpük cam agregası; açık gözeneklere sahip taş şeklinde bir konveyör fırınında sürekli olarak üretilir ve soğutulduktan sonra dökme parçalara ayrılır ve boyutlandırılır.

- Blok ve paneller; hafif, sağlam bir yalıtım malzemesi olarak blok ve panel şeklinde üretilmektedir.

- Genleştirilmiş cam; peletlenerek üretilen küresel boncuk şeklinde üretimi mevcuttur (Hurley, 2003).

Genleştirilmiş cam agregalarının mevcut şekilleri Şekil 3.3'de verilmiştir. Genleştirilmiş cam, kuru harçta, panellerde ve hafif betonda, yapı kimyasal ürünlerinde ve mineral dökümde fonksiyonel hafif agregası olarak kullanılır. Yüksek kaliteli inşaat malzemeleri ve endüstriyel ürünler için hammadde olarak kullanılan yeni bir üründür.



Gevşek köpük cam agregası

Blok ve paneller

Genleştirilmiş cam

Şekil 3.3. Genleştirilmiş cam agregalarının mevcut şekilleri

Avantajlarına genel bir bakış;

- ✓ Çok hafif olmasına rağmen yüksek basınç dayanımı,
- ✓ İyi ısı yalıtım özellikleri, mükemmel ses emilimi,

- ✓ Geri kazanılmış cam kullanıldığından çevre dostu,
- ✓ Saf mineraller,
- ✓ Tutuşmaz,
- ✓ Çok yüksek akışkanlık özelliği,
- ✓ Kireç, çimento ve diğer bağlayıcılar ile birleştirmek için ideal,
- ✓ Haşere ve kemirgenler için bir üreme ortamı sağlamaz,
- ✓ Sağlık için tehlike arz etmeyen anti-alerjik malzeme,
- ✓ Solvent içermez ve kokusuz,
- ✓ Endüstriyel ortamlarda üretilen krem-beyaz renkli genişletilmiş cam birçok uygulama alanı için güvenilir olduğu kadar yüksek kaliteli bir hammadde çözümü sunar.

Genleştirilmiş camın düşük ısı iletim katsayına sahip olması, hafif betonda mümkün olan en iyi ısı yalıtım değerlerine ulaşmasını sağlar. Böylece genişletilmiş camın hem yeni yapılarda hem de yenilenen eski yapılarda bir yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlar. Düşük yoğunluğa sahip olan genişletilmiş cam, bina üzerine etki eden yüklerin azalmasına ve hafif ağırlık sayesinde uygulama alanında kullanım kolaylığı sağlar.

Genleştirilmiş cam ile birleştirilen hafif beton, gerektiğinde kolayca geri dönüştürülebilir çevre dostu bir yapı malzemesine dönüşür. Genleştirilmiş cam; dış cephe izolasyon panellerinde ciddi oranda hafiflik, %40 termal izolasyon değer artışı sağlayarak yapıya ses izolasyonu, akustik değerler, nem dayanımı, bakteri ve küf gibi oluşumlara karşı direnç ve nefes alabilen yapı özelliği kazandırır. Hafif beton üretim prosesinde genişletilmiş cam granüller sıcak veya soğuk hava koşullarında genişlemeye uğramaz (İnt. Kyn. 2).

4. KONUS İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kralj, bu çalışmada hafif beton atıkları ve genişleştirilmiş cam agregalarını kullanarak hafif beton üretimini amaçlamıştır. Yoğunluk, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik gibi özellikleri araştırmış ve aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

- ✓ Elde edilen hafif beton numunelerin birim kütlesi 0.05 ile 0.25 kg/dm^3 arasında değiştiği için, bu birim kütle değerlerine göre ısı yalıtımlı hafif beton sınıfında olduğu,
- ✓ Hafif beton numunelerin basınç dayanımı değerleri 4.36 N/mm^2 altında olduğu,
- ✓ Üretilen hafif beton numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin tuğla ($0.45\text{-}0.60 \text{ W/mK}$), briket ($0.70\text{-}1.0 \text{ W/mK}$), pomza (0.29 W/mK) gibi diğer duvar malzemelerine göre daha düşük değerlere ($0.194\text{-}0.220 \text{ W/mK}$) sahip olduğu görülmüştür.

Hafif beton yapı atıklarının geri dönüşümünün mümkün olduğu ve genişletilmiş cam içeren agregalar ile inşaat sırasında kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte daha ucuz ve çevre dostu hafif beton üretimi için gerekli olduğu görülmüştür. Ayrıca geliştirilen bu model, P-200600191 numaralı patent bildirimi ile onaylanmıştır. 15 Kasım 2006 tarihli patent yayını sonucu, inşaat uygulaması sırasında test edilmiştir (Kralj, 2009).

Beton önemli bir çevresel etkiye sahip olmasına rağmen, sürdürülebilirliğini artıracak atık malzemelerin geri dönüşümü için ilginç fırsatlar sunmaktadır. Normalde betona geri dönüştürülen farklı endüstriyel atıklarla birlikte genişleştirilmiş cam hafif bir agrega olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, camın betonda kullanılması, alkali ortamlardaki zayıf stabilitesinden dolayı dayanıklılık ile ilgili endişelere neden olmaktadır. Bu yazıda, hafif betonun, sırasıyla genişleştirilmiş cam ve silis dumanı ile yapılmış olup, agreganın ince fraksiyonunun değiştirilmesi ve mineral ilavesi için dayanıklılığının araştırılması amaçlanmıştır. Genleştirilmiş cam partikülleri, alkali agrega reaksiyonu, yoğunluk, emilim ve mikro yapı açısından karakterize edilmiştir (Carsana ve Bertolini, 2017).

Nemes, bu çalışmada genişleştirilmiş cam peletlerini, genişleştirilmiş kil yıkım atıkları ve ezilmiş tuğla gibi hafif agregalarla kıyaslama yapmak amacıyla malzeme özelliklerini

deneysel olarak belirlemiştir. Genleştirilmiş cam agregalardan yapılan hafif betonun mekanik özelliklerini (çekme-basma ve basınç dayanımı) ve deformasyon özelliklerini (elastisite modülü, büzülme ve ısı genleşme) deneysel olarak belirlemiştir.

Farklı miktarlarda (hacimce %38 ile %56 arasında) genleştirilmiş cam agregası (partikül yoğunluğu: 1.000 kg/m^3) ve sabit bir çimento harç matrisi kullanarak hafif agregası betonunun dayanımını test etmiştir. Genleştirilmiş cam miktarının azaltılması, hafif betonda yoğunluk artışına ve basınç dayanımının artmasına neden olmuştur. Daha yüksek miktarda genleştirilmiş cam, hafif betonun yoğunluğunu düşürmüş, ancak basınç dayanımı sabit kalmıştır. Genleştirilmiş cam agregası betonunun basma-çekme dayanımı, kuvars kumu içeren agregası betonunun basma-çekme dayanımından daha düşük olmadığını gözlemlemiştir (Nemes, 2006).

Bu araştırmada genleştirilmiş kil agregalarının, hafif agregası olarak inşaat endüstrisinde değerlendirilebilmesi amacıyla bir dizi teknik analiz yapılmıştır. Bu inceleme bulgularına göre, genleşmiş kil agregalarının yalnızca, inşaat-yapı endüstrisinde hafif beton, hafif yapı elemanı üretiminde birer hammadde ve ısı-ses yalıtım malzemesi olarak kullanımı değil, diğer birçok endüstri dalında da farklı amaçlarla uygulama alanı bulabileceği belirlenmiştir (Gündüz ve ark., 2006).

Šeputytė-Jucikė ve Sinica, bu çalışmada genleştirilmiş cam ve polistiren atıklarını agregası olarak kullanmış ve düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip ($0.070-0.098 \text{ W/mK}$) hafif agregası betonu oluşturmuştur. Isı iletkenlik katsayısı ve numunelerin yoğunluğuna bağlı olarak bir bağıntı elde etmiştir. Hafif agregası beton numunelerinin 28 günlük sertleşmesinden sonra basınç dayanımı değerleri, genleştirilmiş cam içeren numunelere genleştirilmiş atık polistiren ilavesi ile basınç dayanımı artmıştır. Basınç dayanım değerleri sadece genleştirilmiş cam içeren numune değerlerine kıyasla %8-14 oranında daha düşüktür. Sadece genleştirilmiş cam içeren numunelerin yoğunluğu $247-335 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Genleştirilmiş polistiren atığı ilavesi ile bu yoğunluk değeri %9-15 oranında azalır. Yalnızca genleştirilmiş cam içeren numunelere kıyasla artan genleştirilmiş polistiren atığı ilavesi ile su emilimi azalmıştır. Düşük basınç dayanımı, yoğunlukları ve ısı iletkenlik katsayıları nedeniyle, bu çalışmada elde edilen betonlar ısı yalıtımlı hafif agregası betonu olarak sınıflandırılmıştır (Šeputytė-Jucikė ve Sinica, 2016).

Rumsys ve ark., bu çalışmada hafif beton karışımlarında, genleştirilmiş cam ve genleştirilmiş kil agregaları ile farklı mikro doldurucular (kuartz kumu ve silis dumanı) kullanarak basınç dayanımı ve dayanıklılık özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir.

Ayrıca çevresel etkiye maruz kalan yapısal betonlara istinaden genleştirilmiş cam içeren beton karışımlarının dayanıklılık özelliklerini (alkali korozyon ve donma-çözülme direnci) incelemişlerdir. Genleştirilmiş cam bulunan karışımlarda kullanılan kuartz kumu basınç dayanımı üzerindeki yoğunluğun etkisi ile artmıştır. Bu durumun silis dumanının partikül boyutundan kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Genleştirilmiş kil hacminin %5'ini genleştirilmiş cam ile yer değiştirdikten sonra, hafif betonun yoğunluğunda (1700-1796 kg/m³) ve basınç dayanımında (42.7-53.6 MPa) %25.5 artış görülmüştür. Genleştirilmiş cam miktarındaki %25'lik bir artış, referans karışımla karşılaştırıldığında yoğunluk ve basınç dayanımı üzerinde gözle görülür bir etkiye sahip değildir. Genleştirilmiş cam miktarında bir başka artış betonun dayanım ve yoğunluğunun azalmasına yol açmıştır. Genleştirilmiş cam içeriğinin %50'ye kadar artırılmasıyla, basınç dayanımı ve yoğunluğu sırasıyla %4.7 ve %1.2 oranında azalmıştır. Genleştirilmiş camın %100'lük bir karışımında, basınç dayanımı %17.8 ve yoğunluk %6.5 oranında düşmüştür. Yoğunluktaki bu düşüş, hafif agreganın ağırlığındaki azalma ve bileşimdeki düşük yoğunluklu genleştirilmiş cam miktarındaki artıştan kaynaklanmıştır (Rumsys ve ark., 2018).

Chung ve ark., hafif beton üretiminde üç farklı agreganın kullanılması (ezilmiş atık cam, genleştirilmiş atık cam ve doğal kum) ve bunların beton üzerindeki etkisi çeşitli yaklaşımlar kullanarak incelemiştir. Bir kontrol numunesi olarak, doğal ince kumlu bir beton numunesi hazırlanmış ve özellikleri, ezilmiş ve genleştirilmiş atık cam agregaları içeren numunelerin mekanik ve ısı özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ezilmiş ve genleştirilmiş atık cam agregalarının alternatif hafif agregalar olarak kullanılabilirliğini desteklemiştir (Chung ve ark., 2017).

Jasaitienė ve ark., genleşmiş cam ve kil granüllerinin hafif beton örneklerinin temel fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek ve karşılaştırmak için deneysel araştırma yapmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre:

- ✓ Genleşmiş kil içeren betonun yoğunluğu, genleşmiş cam içeren beton yoğunluğundan 1.6 kat daha yüksek olduğunu,
- ✓ Genleşmiş cam içeren betondan yapılmış numunelerin basınç dayanımı, genleşmiş kil içeren betonun mukavemetine kıyasla 4 kat daha düşük olduğunu,
- ✓ Maksimum sıkıştırma mukavemetinin %27.4 ince agreganın ve %72.6 oranında kaba agreganın içeren beton numunelerinde elde edildiğini ve ince agreganın oranının artması ile mukavemetin azaldığını,

- ✓ Genleşmiş cam içeren beton numenlerinde ortalama termal iletkenlik katsayısı, genleşmiş kil içeren beton numunelerine kıyasla yaklaşık 1.2 kat daha düşük olduğunu,
- ✓ Genleşmiş cam içeren betonda su emilimi, genleşmiş kil içeren beton ile karşılaştırıldığında yaklaşık iki kat daha yüksek olduğunu deneysel olarak belirlemişlerdir (Jasaitienė ve ark., 2010).

Abd Elrahman ve ark., bu çalışmada, hafif agrega olarak genleşmiş cam (Liaver), genleşmiş kil (Liapor) ve köpük cam (Ecoglas) üç farklı tipte genleşmiş malzeme kullanılmış ve hafif betonun özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. X-ışını mikro-bilgisayarlı tomografi kullanılarak farklı agrega türlerine sahip örneklerin mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Hafif beton numunelerin termal ve mekanik özellikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- ✓ Çok düşük yoğunluklu (1200 kg/m^3 'ten az) hafif beton örnekleri, genleşmiş agregalar kullanılarak etkili bir şekilde üretilebilmiştir.
- ✓ Üretilen tüm hafif beton numuneleri 6 MPa'dan daha büyük bir basınç dayanımı ve 0.3 W/mK 'den daha düşük ısı iletkenliği gösterir ve bu nedenle çok yüksek performanslı hafif beton örnekleri olarak düşünülebilir.
- ✓ X-ışını mikro-bilgisayarlı tomografi partikül şekli ve gözeneklilik gibi her bir bileşenin malzeme özelliklerini, numuneye zarar vermeden araştırmak için etkili bir yaklaşımdır.
- ✓ Kullanılan agregalar arasında genleşmiş cam, düşük yoğunluklu ve daha yüksek mekanik performansa sahip hafif beton üretimi için en etkili malzeme olarak kabul edilebilir.
- ✓ Genleşmiş cam içeren numuneler ayrıca en düşük termal iletkenliği göstermektedir ve bu nedenle en etkili yalıtımı sağladığı düşünülebilir (Abd Elrahman ve ark., 2018).

Kurpińska ve Ferenc bu çalışmada granül kül ve granül genleştirilmiş cam agregalarının hafif çimento kompozitinde fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çimento kompozitinde su/çimento oranı 0.5 sabit olup hacimce agrega oranları %0, %25, %50, %75 ve %100 olarak değişmiştir. Gözenekliliğin incelenmesi açısından üç farklı tane büyüklüğüne sahip 2 mm, 4 mm granül genleşmiş cam ve 8 mm granül kül agregalar kullanılmıştır. Portland çimentosu CEM 42.5R kullanılmıştır. Hiçbir katkı maddesi kullanılmamıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- ✓ Genleştirilmiş camdan yapılan hafif beton numuneleri, yüksek gözeneklilik ve nispeten düşük yoğunluk ile karakterize edilmiştir.
- ✓ Gözenekliliği %15 ile %20 aralığında olan numuneler 13-21 MPa'ı gösterirken %45 ve %65 aralığında olan beton numuneler, yaklaşık 4 MPa'lık bir basınç dayanımı göstermiştir.
- ✓ En yüksek basınç dayanımı, çeşitli oranlarda genleştirilmiş cam (2 mm) ve kül agregadan (8 mm) oluşan örnekler için elde edilmiştir.
- ✓ 4 mm tane büyüklüğünde hacimce %100 oranında genleştirilmiş cam içeren numuneler en yüksek gözeneklilik oranı %67 ile karakterize edilmiş, yaklaşık 13 MPa'lık bir basınç dayanımı ve görünür yoğunluk olarak 1078 kg/m³ göstermiştir.

Bu çalışma, tane tipi ve büyüklüğünün hafif betonun fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Mekanik özellikler göz önüne alındığında, hafif agrega betondaki en zayıf bileşendir. Bununla birlikte, yoğunluk veya gözeneklilik gibi diğer fiziksel özellikleri incelemek, malzemenin çok sayıda avantaj sunduğu örneğin; yüksek ısı veya ses yalıtımı söylenebilir (Kurpińska ve Ferenc, 2017).

Khatib ve ark., bu çalışmada betonarme kirişlerde genleştirilmiş camın eğilme davranışını incelemişlerdir. Beton karışımlarında su/çimento oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Hacimce İnce agrega (kum) %0, %25, %50 ve %100 oranlarında kullanarak genleştirilmiş cam ile yer değiştirilmiştir. Sonuç olarak, hacimce %50 oranında genleştirilmiş camın (1-2 mm ile 0.5-0.25 mm boyutlarda) ilave edilmesi betonun işlenebilirliğini artırmıştır. Genleştirilmiş cam miktarı arttıkça, basınç dayanımı doğrusal olarak azalmıştır. Beton kirişin sünekliliği, genleştirilmiş camın eklenmesiyle önemli ölçüde iyileşmiştir. Bununla birlikte, kiriş ve ilk çatlağın gerçekleştiği yükün taşıma kapasitesi azaltılmıştır. Genleştirilmiş camın yapısal beton uygulamalarına dahil edilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Khatib ve ark., 2015).

Bumanis ve ark., bu çalışmada farklı miktarlarda genleşmiş cam granüller ve kuvars kumundan yapılan hafif betonun mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisi test edilmiştir. Genleşmiş cam granüller için yığın yoğunluğu, su emme ve malzeme gözenekliliği belirlenmiştir. Granüllerin mikroporozitesi gözlemlenmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak mikro yapılarının görsel muayenesi yapılmıştır. 28 günlük hafif beton numuneler için eğilme ve basınç dayanımı, yoğunluk, su emme ve gözenekliliği belirlenmiştir. Hafif beton özellikleri, karışım tasarımıadaki

genleşmiş cam granül ve kum içeriğinin miktarından etkilenmiştir. Buna göre sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- ✓ Hafif betondaki genleşmiş cam miktarının artırılmasıyla, yoğunluğu 685 kg/m³'ten 561 kg/m³'e ve ısı iletkenliği 0.163'ten 0.140 W/mK'e düşürülebilmektedir.
- ✓ Hafif betonun karışımına kum katılımı ile yoğunluğu 523'ten 651 kg/m³'e ve ısı iletkenliğinin 0.138'den 0.177 W/mK'e yükselmiştir.
- ✓ Genleşmiş cam granüllere sahip hafif betonun basınç dayanımı, farklı miktarlarda genleşmiş cam granüllere sahip örnekler için 4.0 ile 5.8 MPa arasında ve dahil edilmiş kum içindeki hafif beton için 3.2 ile 4.5 MPa arasında değişmiştir. Isı iletkenliği, artan miktarda genleşmiş cam granülle birlikte azalmış ve hafif beton karışımına kum katılımı ile artmıştır.
- ✓ Genleşmiş cam granüllerinin sabit miktarı ve karışım tasarımına göre farklı kum miktarları, beton yoğunluğunun artmasının yanı sıra, mukavemet ve termal iletkenlik özellikler sağlamıştır.

Bu araştırma, karışım tasarımında genleşmiş cam granül miktarının daha da artırılmasının, üreticiler ve tüketiciler için önemli olan önemli ölçüde daha iyi beton ısı iletkenliği sağlamadığı sonucuna varmıştır (Bumanis ve ark., 2013).

Yu ve ark., bu çalışmada hafif agrega olarak geliştirilmiş cam ve polipropilen lifler kullanarak Ultra Hafif Fiber Donatılı Betonarme (ULFRC) geliştirmişlerdir. Geliştirilen ULFRC'nin yoğunluğu, mekanik özellikleri ve ısı iletkenliğini belirlemişlerdir. Buna göre:

- ✓ Geliştirilen ULFRC'nin kuru yoğunluğu ve ısı iletkenliği sırasıyla yaklaşık 750 kg/m³ ve 0.165 W/mK'dir.
- ✓ Aynı yoğunluklu veya termal iletkenliğe sahip diğer hafif betonlarla karşılaştırıldığında, geliştirilen ULFRC, belirgin şekilde daha yüksek bir basınç dayanımına (yaklaşık 16 MPa) sahiptir.
- ✓ ULFRC'nin mekanik özelliklerini geliştirmek için optimize edilmiş miktarda polipropilen lifin yararlı olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen ULFRC gelişmiş mekanik özelliklere ve daha düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle yüzer yapılarda uygulanabileceği ve monolitik yapılar tasarlamak için bir ısı yalıtıcı yapı malzemesi olarak kullanımının mümkün olabileceği öngörüsünde bulunmuşlardır (Yu ve ark., 2016).

Petrella ve ark., bu çalışmada genleştirilmiş gözenekli geri dönüşümlü atık camın hafif beton uygulamasında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu tip camın kullanımı, gelişmiş mekanik özellikler göstermenin yanı sıra ısı yalıtımını iyileştirebilecek hafif beton üretimine imkan sağlayacağı düşünülmüştür. Genleştirilmiş cam içeren beton örneklerinin ısı yalıtım özellikleri analiz edilmiş ve genleştirilmiş kil içeren beton örnekleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre:

- ✓ Sadece agregası olarak iri kum içeren örnekler için en yüksek ısı iletkenlik ve yayılma değerleri elde edilirken, genleştirilmiş cam ve genleştirilmiş kiler gibi daha hafif gözenekli agregalar içeren örneklerin daha yalıtıcı olduğu bulunmuştur. Spesifik olarak genleştirilmiş cam içeren beton, kil karışımlarına kıyasla %45'ten daha düşük ısı iletkenlik değerleri göstermiştir. İletkenlikteki bu azalma, betona olağanüstü ısı yalıtım özellikleri sağlayan bu inert malzemelerin kapalı gözenekli olmasına bağlanmıştır.
- ✓ Sadece agregası olarak iri kum içeren örnekler en yüksek basınç dayanımına sahipken genleştirilmiş kil örnekleri, genleştirilmiş cam içeren beton örneklerinden dört kat daha yüksek basınç dayanım değerleri göstermiştir. Bu sonucun, diğer örneklerle göre %35 daha düşük bir özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür (Petrella ve ark., 2007).

Düşük yoğunluklu, düşük su emme ve büzülme için en etkili çözüm, hafif agregalı köpüklü cam tanelerinin uygulanmasıdır. Bununla birlikte, köpük cam agregası içindeki yüksek silika içeriği nedeniyle, bunların bir çimento bazlı kompozitlerde kullanılması, alkali-silika reaksiyonları riski oluşturur. Bu nedenlerden yola çıkarak Vaganov ve ark., bu çalışmada granül köpüklü cam ile yüksek performanslı hafif beton elde etme ve karbon nano tüp kullanarak alkali silika reaksiyonlarını yok etme olanaklarını araştırmışlardır. Köpüklü hafif betonun dayanımını değerlendirmek için hafif agregası kullanmadan ve köpüklü cam taneleri kullanarak düşük ve yüksek yoğunluklu numuneler hazırlanmıştır. Sonuç olarak;

- ✓ Köpüklü cam taneciklerin eklenmesi, yüksek dayanımlı köpük betonu durumunda dayanımı azaltmış ve düşük mukavemetli köpüklü beton durumunda etkili olmamıştır.
- ✓ Köpüklü cam ilavesi, yoğunluğun azalmasına (özellikle yüksek yoğunluklu köpük betonunda) ve yüzey suyu emiliminin önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur.

- ✓ Karbon nano tüpün, betonun hidratasyon kinetiği, yapısı ve faz bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (Vaganov ve ark., 2016).

Pich r ve ark., bu çalışmada granül köpük camın hafif  imento harçlarında ısı yalıtımı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca  imento matrisine öğütülmüş genleştirilmiş atık perlit (hacimce %10, %20 ve %30) ilave edilmiştir. Sonuç olarak bu atığın uygulanması, harçların mukavemetini artırırken termal iletkenlik katsayılarını azaltmıştır. Granül köpük cam, çok iyi yalıtım özellikleri, taneciklerin küresel şekli ve nispeten düşük su emiliminden dolayı hafif bir dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Granül köpük cam/ imento oranı 0.6, 0.9 ve 1.2'ye sahip harçlar hazırlanmıştır. Ek olarak, granül köpük hacminin %20'si aynı granülasyon ile kuvars kumu ile yer değiştirilerek harçlar hazırlanmıştır. Her harç serisi,  imento kütlesinin %20'sine öğütülmüş perlit atığı eklenmesiyle yer değiştirilmiştir. Sonuç olarak;

- ✓ Genleştirilmiş atık perlit katılımı ile birlikte ısı yalıtım özelliklerinde bir iyileşme olduğu görülmüştür.
- ✓ Isı iletkenlik katsayısının artışı, granül köpük camın, kuvars kumu ile değiştirildiği harçlarda gözlenmiştir.
- ✓ Granül köpük cam miktarının artmasıyla birlikte basınç dayanımı azalmış olup, ancak hafif dolgu maddesinin bir kısmını kumla değiştirerek veya matrise genleşmiş perlit ilavesiyle iyileştirilebilmiştir.
- ✓ Granül köpük cam miktarının artmasıyla birlikte harçların kılcal su emilimini azaltmıştır (Pich r ve ark., 2019).

Zakrevskaya ve ark., granül köpük cam agrega kullanarak elde ettikleri hafif betonun özelliklerini incelemişlerdir. Beton bileşimine bağlı olarak, basınç dayanımı referans örneklerle kıyasla %20 ile %30 oranında azalma ve yoğunluk %2 ile %8 oranında artma görülmüştür. Elde edilen granül köpük camlı hafif betonun yoğunluğu 400-800 kg/m³, basınç dayanımı 2.2-6.5 MPa, ısı iletkenliği 0.09-0.15 W/mK aralığında değerler almıştır (Zakrevskaya ve ark., 2015).

Kan ve Demirboğa bu çalışmasında, atık Genleştirilmiş Polistiren K p Ğ n  (EPS) ısıl işlemlere tabi tutarak Hafif Genleştirilmiş Polistiren K p Ğ n  (MEPS) elde etmiştir. Agregada olarak MEPS köpüğünü kullanmış ve beton üzerindeki etkilerini incelemiştir. MEPS agregası, hacimce %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında beton numunelerde doğal agregada yerine kullanılmıştır. 900-1700 kg/m³ yoğunluğa sahip hafif bir betonlar

elde edilmiştir. MEPS betonunun 28 günlük basınç dayanımını 12.58 MPa ile 23.34 MPa arasında değişmekte olduğunu ve yarı-yapısal hafif betonun dayanım gereksinimini karşılayabileceğini öngörmüşlerdir (Kan ve Demirboğa, 2009).

Khonsari ve ark., hafif betonda agregası olarak geliştirilmiş perlit kullanımının etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Beton karışımlarında kum ve geliştirilmiş perlit (%5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında) agregalarını kullanmışlardır. Çimento esaslı malzeme içeriği 390 kg/m^3 'te sabit tutulmuştur. Çimento ağırlığının %2.5'i olacak şekilde süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Beton numunelerin basınç dayanımı 46.7 MPa ile 8.5 MPa, çekme dayanımı 2.19 MPa ile 0.71 MPa aralığında değerlere sahiptir. Sonuç olarak geliştirilmiş perlit içeriğinin artması ile basınç ve çekme dayanımında azalma ve su emme oranında artma meydana geldiğini görmüşlerdir (Khonsari ve ark., 2010).

Hedjazi bu çalışmasında, hafif agregası olarak geliştirilmiş camın beton yoğunluğu ve dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Geleneksel sıkıştırma testine ek olarak Ultrasonik Titreşim Hızı (UPV) testini kullanarak, hafif beton karışımlarının basınç dayanımını değerlendirmiştir. Deneysel çalışmada, beton karışımları normal agreganın hafif agregası ile kısmen veya tamamen yer değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Beton numunelerde geliştirilmiş cam oranı arttıkça yoğunluğun, basınç dayanımının ve ultrasonik dalga hızının azaldığı görülmüştür. Sonuçlar, basınç dayanımının ultrasonik dalga hızı ile ilişkili olabileceğini kanıtlar niteliktedir (Hedjazi, 2019).

5. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, deneysel çalışmaların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimleri, harç karışımlarında kullanılan malzeme oranlarına ve gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

5.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri

5.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Elazığ ilindeki ÇİMENTAŞ Elazığ Çimento Fabrikası tarafından üretilen ve Öz Torgutlar Ticaret Şirketinden temin edilen TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu Puzolanik çimento kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına dikkat edilmiş ve nem almaması için koruyucu kaplarda korunması sağlanmıştır. Çimentoş Elazığ Fabrikasından alınan CEM IV/B (P) 32,5 R Puzolanik çimentosuna ait temel kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi Tablo 5.1’de verilmiştir. Çimentonun priz başlangıç ve bitiş süreleri TS EN 196-3 (2002)’de belirtilen yöntemle göre tespiti yapılmıştır.

Tablo 5.1. Çimentonun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri

Görünüm	Gri veya beyaz granül toz	Bağıl Yoğunluk (g/cm³)	2.75-3.20
Koku	Yok	Görünür Yoğunluk (g/cm³)	0.9-1.5
pH (suda) 20 °C	9-14	Buhar Basıncı (hPa) 20°C	Uygulaması yok
Kaynama Noktası (°C) 760 mmHg	Uygulaması yok	Vizkozite (cPs) 25 °C	Uygulaması yok
Erime Noktası (°C)	>1200 °C	Patlama Tehlikesi	Ürünün patlama tehlikesi yoktur.
Parlama Noktası 760 mmHg	Uygulaması yok	Oksidasyon Özellikleri	Uygulaması yok
Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı (°C)	Uygulaması yok	Ortalama Tane İriliği (Mikron)	1-30
Ayrışma Sıcaklığı (°C)	Uygulaması yok	Suda Çözünürlük (%)	0.1-1.5
Ayrılma Katsayısı	Uygulaması yok	Buhar Yoğunluğu	Uygulaması yok

NOT: Yukarıdaki özellikler, Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmeliğinde öngörülen yöntemlere veya karşılaştırılabilir diğer bir yöntemle göre belirlenmiştir.

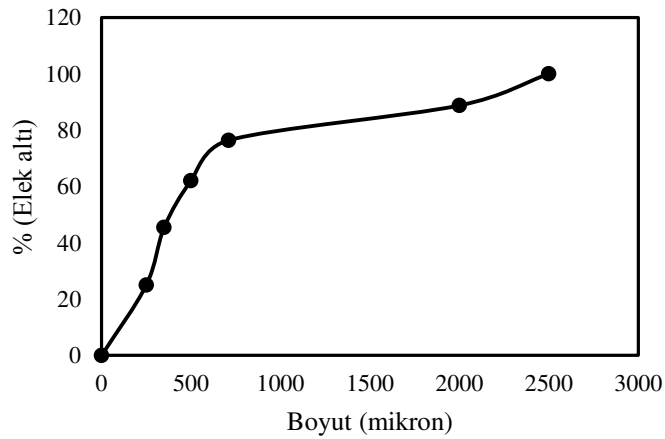
5.1.2. Kum (ince agreg)

Mukavemeti ve kalitesi yüksek bir beton üretmek için agreganın fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada su ihtiyacını azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak amacıyla ince agreg olarak 0-4 mm dane büyüklüğünde kum kullanılmıştır. Kum yıkanarak temizlenmiş ve etüvde kurutularak deneylerde kullanılmıştır.

Harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan kumun TS EN 933-1:2012'ye göre elek analizi yapılarak sonuçları Tablo 5.2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre çizilen grafik ise Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kum (ince agreganın) elek analiz değerleri

Elek Açıklığı (mikron)	Elek Üzerinde Kalan (g)	Elek Üzerinde Kalan (%)	Kümülatif Kalan (%)	Kümülatif Geçen (%)
2500	0	0	0	100
2000	45	11.25	11.25	88.75
710	49.44	12.36	23.61	76.39
500	57.41	14.35	37.96	62.04
350	66.15	16.53	54.5	45.5
250	82	20.5	74.99	25.01
Tava	100	25	100	0
Toplam	400			



Şekil 5.1. Kum (ince agreganın) elek analizi sonuçlarının grafiksel gösterimi

5.1.3. Genleştirilmiş Cam

Deneylerde kullanılan genleştirilmiş cam Omnis kompozit firmasından temin edilmiştir. Kullanılan genleştirilmiş camın teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.3. Kullanılan genleştirilmiş camın teknik özellikleri

Özellik	Standart	Değer
Granül boyutu (mm)	LST EN 933-1	2-4
Yığın yoğunluğu (kg/m ³)	LST EN 1097-1	200(±15%)
Basınç dayanımı (MPa)	LST EN 13055-1, Aannex	1.4
Termal iletkenlik (W/mK)	LST EN 12939-2002	0.0639
Su absorpsiyonu (Kütlece %)	LST EN 1097-6:2002	23

5.1.4. Karışım Suyu

Yapılan deneysel çalışmalarda ve beton harçlarını oluşturmak için içilebilir nitelikte olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Beton yapımında kullanılacak su temiz ve betona olumsuz etki yapmayacak nitelikte olmalıdır. İçme suları beton yapımında kullanılabilir (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

5.1.5 Kimyasal Katkı

Hazırlanan beton harç karışımlarında, su çimento oranını azaltmak amacıyla polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı, Elazığ Organize Sanayi bölgesinde yer alan üretici firma FRC Kimya Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Üretici firma talimatlarına göre çimento ağırlığının %0.7'si oranında karışım suyuna ilave edilerek kullanılmıştır.

5.2. Beton Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında beton harç karışımlarının hazırlanmasında bağlayıcı olarak çimento, agrega olarak kum, hafif agrega olarak genleştirilmiş cam ve hidrasyonun başlamasını sağlamak amacıyla su kullanılmıştır. Karışım suyu miktarını azaltmak amacıyla bazı harç karışımlarında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Hacimsel oranda tartımı yapılan kuru malzemeler (çimento, agrega, kum) karıştırma kabına alınarak harç kıvamına gelinceye kadar su ilave edilmiştir. Kullanılan çimento, genleştirilmiş cam ve kum Şekil 5.2’de ve su yardımıyla oluşturulan harç karışımı Şekil 5.3 ’de görülmektedir.



Şekil 5.2. Çimento, genleştirilmiş cam ve kum



Şekil 5.3. Beton harç karışımı

Harçlar yeteri kadar karıştırıldıktan sonra iç yüzeyleri yağlanmış küp formunda 100×100×100 mm boyutlarına sahip kalıplara dökülmüştür. Şekil 5.4’te kalıplara dökülen harçlar görülmektedir. Kalıplar titreşime tabi tutularak sıkıştırılmış ve üst yüzeyleri mala yardımıyla düzeltilmiştir. Beton karışım oranlarının yazılı olduğu etiketler üst yüzeyine

yerleştirip numuneler kalıp içerisinde oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. 48 saat sonra kalıp içerisinde numuneler çıkartılarak oda sıcaklığında (20 °C) 28 günlük standart kuruma süresine bırakılmıştır. Kalıp içerisinde çıkarılan beton numuneler Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kalıplara dökülen harç numuneleri



Şekil 5.5. Kalıplardan çıkartılan beton numuneler

Beton numuneler 28 günlük kuruma süresini doldurduktan sonra su emme ve kuruma oranı, mekanik dayanım ve ısı iletkenlik gibi özellikleri belirlemek amacıyla bir dizi deneylere tabi tutulmuştur.

Hafif agregata olarak geliştirilmiş camın beton içerisinde kullanımını incelemek amacıyla sadece geliştirilmiş camın kullanıldığı, kum agreganın ve geliştirilmiş camın birlikte kullanıldığı iki farklı karışım grubu hazırlanmıştır. Ayrıca karışımlar akışkanlaştırıcı kullanılarak aynı paralellikte tekrarlanmıştır. Karışım grupları içerisinde geliştirilmiş cam içermeyen kontrol harç karışımları da hazırlanmıştır. Bu karışım grupları aşağıda verilmiştir.

- 1.Grup: Kumsuz karışımlar olup çimento ve genleştirilmiş camdan oluşmaktadır. Aynı harç karışımına akışkanlaştırıcı ilave edilerek tekrarlanmıştır.
- 2.Grup: Kumlu karışımlar olup çimento, genleştirilmiş cam ve kumdan oluşmaktadır. Aynı harç karışımına akışkanlaştırıcı ilave edilerek tekrarlanmıştır.

Harç karışımlarında çimento/su oranı 0.50 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çimento ve kum miktarı eşit oranda kullanılmıştır. Her grup karışımının genleştirilmiş cam oranları %0 (kontrol betonu), %5, %10, %15, %20 olacak şekilde toplamda 40 adet beton numunesi hazırlanmıştır. Bazı harç karışımlarında çimento ağırlığının %0.7'si oranında akışkanlaştırıcı karışım suyuna ilave edilmiştir. Tablo 5.4'te deneylerde kullanılan beton numunelerin içeriği verilmiştir.

Tablo 5.4. Deneylerde kullanılan beton numunelerin içeriği

Grup no	Karışım kodu	Çimento/su	Genleştirilmiş cam (%)	Kum	Akışkanlaştırıcı
1	Ç1*	0.50	-	-	-
	ÇG 2		5	-	-
	ÇG 3		10	-	-
	ÇG 4		15	-	-
	ÇG 5		20	-	-
	ÇA 1*	0.70	-	-	+
	ÇGA 2		5	-	+
	ÇGA 3		10	-	+
	ÇGA 4		15	-	+
	ÇGA 5		20	-	+
2	ÇK 1*	0.50	-	+	-
	ÇGK 2		5	+	-
	ÇGK 3		10	+	-
	ÇGK 4		15	+	-
	ÇGK 5		20	+	-
	ÇKA 1*	0.70	-	+	+
	ÇGKA 2		5	+	+
	ÇGKA 3		10	+	+
	ÇGKA 4		15	+	+
	ÇGKA 5		20	+	+

"*" işareti kendi karışım grubu içerisinde kontrol betonu olduğunu, "-" işareti karışım içerisinde o malzemenin kullanılmadığını, "+" işareti karışım içerisinde o malzemenin kullanıldığını göstermektedir.

Ç=Çimento,

ÇG=Çimento+genleştirilmiş cam,

ÇK=Çimento+kum,

ÇGK=Çimento+genleştirilmiş cam+kum,

ÇA=Çimento+akışkanlaştırıcı,

ÇGA=Çimento+genleştirilmiş cam+akışkanlaştırıcı,

ÇKA=Çimento+kum+akışkanlaştırıcı,

ÇGKA=Çimento+ genleştirilmiş cam+kum+akışkanlaştırıcı

5.3. Beton Numunelerine Uygulanan Deneyler

5.3.1. Birim Ağırlık Deneyi

Beton numuneleri oda koşullarında 28 gün beklettikten sonra ağırlıkları hassas terazide tartılarak bulunmuştur. Sertleşen beton numunelerin ağırlıkları dış hacmine bölünerek birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

5.3.2. Basınç ve Çekme Dayanımı Deneyi

100x100x100 mm boyutta ve farklı özellikteki numunelere ait basınç dayanım deneyleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan, Ele International marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. 3000 kN yükleme kapasiteli tek eksenli kuvvet uygulayabilen yükleme hızı gibi deney parametrelerinin ayarlanabilmesini sağlayan otomatik dijital kumandalı olarak kullanılabilen özelliklere sahiptir. Şekil 5.6’da basınç ve çekme dayanımı deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 5.6. Basınç ve çekme dayanımı deney düzeneği

Basınç dayanım testine tabi tutulacak numunelere eşit oranda yük uygulanabilmesi için alt ve üst yüzeylerinin pürüzsüz olmaları gerekmektedir. Cihazın alt plakası sabit, üst plakası hareketli yapıdadır. Numune alt yükleme plakası üzerine dışarı taşmayacak şekilde, merkezlenerek yerleştirilir. Kontrol ünitesindeki “Start/Başlat” butonuna basılması ile üst plaka yavaşça numuneye doğru hareket eder ve artan miktarda numuneye kuvvet uygulanır. Numune kırıldığında cihaz otomatik olarak durur ve ekrandan kırılma anındaki maksimum kuvvet kN ve basma gerilmesi MPa cinsinden

okunur. Kırılan numune dışarı çıkartılır diğer numuneler için aynı işlemler tekrar edilir. Şekil 5.7’de basınç ve çekme dayanım deneyi uygulanan numunenin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.7. Basınç ve çekme dayanımı deney numunesinin görüntüsü

Basınç dayanımı sonuçları, TS500 standardına göre Eşitlik 5.1 kullanılarak çekme dayanımına dönüştürülebilir.

$$f_{ctk} = 0.35\sqrt{f_{ck}} \quad (5.1)$$

f_{ck} : basınç dayanımı (MPa) ve f_{ctk} : çekme dayanımı (MPa)’dır.

5.3.3. Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi

Beton numunelerin alt ve üst yüzeyinin orta noktasına, 1 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında duralit çubuklar karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Numunelerin üzerine sabitlenen duralitler numunenin bir düzlem boyunca ikiye bölünmesini sağlamıştır.

Numuneler 2000 kN kapasiteli press makinası içerisine yerleştirilerek çizgisel yük uygulanır. Uygulanan yük numune kırılincaya kadar devam eder ve kırılma anında maksimum yük kN cinsinden ölçülür. Çizgisel yükleme altında, numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Numunelerin maksimum yüke ulaşması 2 dk. ± 30 sn olacak şekilde yüklenmiştir. Her numune deney cihazına yerleştirilmeden önce yeni bir duralit çubuk kullanılmıştır. Basınç dayanım testinde duralit çubuklar kullanılmamıştır. Şekil 5.8’de yarmada-çekme dayanım deney düzeneği görülmektedir.

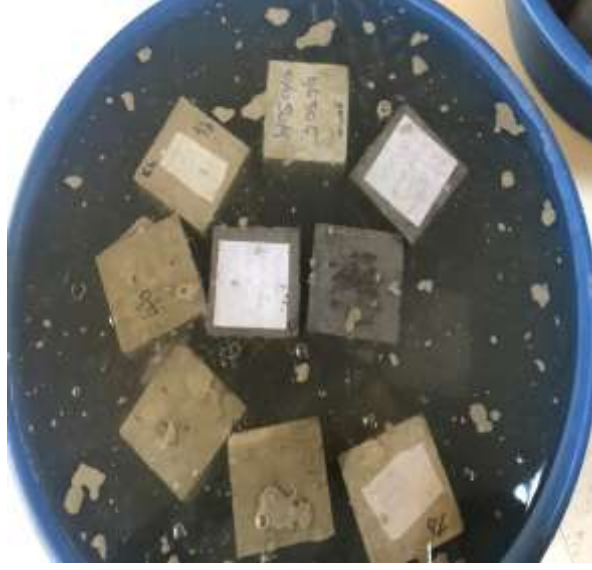


Şekil 5.8. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

5.3.4. Su Emme ve Kuruma Hızları Deneyi

Betonun su emmesi, hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların su emme kapasitesine ve agrega/çimento oranına bağlı olarak değişmektedir. Hafif agregalı betonların üretimlerinde kullanılan agregaların gözenekli yapılarından dolayı hafif betonların da su emmeleri oldukça yüksektir. Agregaların gözenek yapısı da hafif betonun su emme oranı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Aynı agrega oranında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme oranları da agregaların gözenek yapılarından dolayı farklı olmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2007).

Oda sıcaklığında 28 günlük kuruma süresini dolduran beton numunelerin kuru ağırlığı hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir. Numuneler su dolu kap içerisine konularak 20 dakika, 40 dakika, 1 saat, 2 saat ve 24 saat sürelerde bekletilmiştir. Şekil 5.9’da su dolu kap içerisinde bulunan numuneler görülmektedir. Her süre sonunda su içerisinden çıkarılan beton numunelerin yüzeyleri kurulanmış ve tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Su emme oranı Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 5.10’da tartımı yapılan beton numune görülmektedir.



Şekil 5.9. Su dolu kap içerisinde bulunan numuneler



Şekil 5.10. Tartımı yapılan beton numune

Su dolu kap içerisinde 24 saat bekleyen numuneler, kap içerinden çıkartılarak kuruması için 30 dakika, 1 saat, 2 saat, 3 saat, 4 saat, 24 saat ve 48 saat sürelerle bekletilmiştir. Şekil 5.11’de kurumaya bırakılan beton numuneler görülmektedir. Her süre sonunda tartılarak ağılıkları kaydedilmiştir. Kuruma hızı oranı Eşitlik 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (5.2)$$

$$m_2 = \frac{B-C}{C} \times 100 \quad (5.3)$$

m_1 :Ağırlıkça su emme oranı (%)

m_2 :Ağırlıkça kuruma hızı oranı (%)

A: Kuru numune ağırlığı (kg)

B: 24 saat sonrasındaki doymun yaş ağırlığı (kg)

C: 48 saat sonrasındaki kuru ağırlığı (kg)

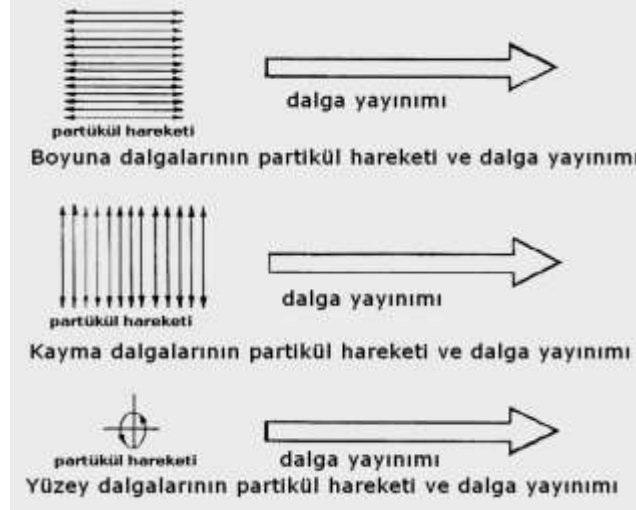


Şekil 5.11. Kurumaya bırakılan beton numuneler

5.3.5. Ultrasonik Yöntemle Elastisite Modülünün Tayini

Bu yöntem ile beton içerisinde ultrasonik dalgaları geçirerek yapıya herhangi bir zarar vermeden betona ait elastik parametreler, betonun basınç dayanımı ve beton içerisindeki boşluk, çatlak vb. kusurları kolay ve ucuz bir şekilde belirlenebilir. Kulakla duyulamayan frekansı 16000 hertz üzerinde olan dalgalar, boşlukta yayılmazken gaz, sıvı veya katı halde olan cisimler içinde belirli bir hızla yayılırlar.

Ultrasonik dalga yayılımı P dalgası (boyuna), S dalgası (enine) ve R dalgası (Rayleigh) olmak üzere üç tür formda ayrılırlar. R dalgası numunenin sadece yüzeyi boyunca hareket ederken P ve S dalgaları yayılımı numunenin küresel dalga cephesinde hareket eder. Dalgaların partikül hareketleri ve dalga yayınımları Şekil 5.12’de verilmiştir (Mix, 2005).



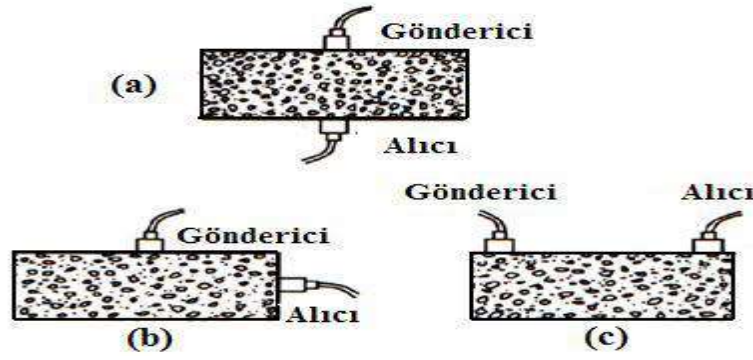
Şekil 5.12. Dalgaların partikül hareketleri ve dalga yayınımları

Ultrasonik dalga hızı ölçümleri için Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında mevcut olan V-METER MK IV ultrasonik test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz beton içerisine gönderilen dalgaları (P veya S) betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresini ölçüp, dalga hızlarını hesaplayarak dijital ekranına yansıtmaktadır. Beton üzerine dalgalar alıcı-verici başlıklar ile gönderilmektedir. Şekil 5.13’de deney cihazı ve şematik diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.13. Ultrasonik test cihazının görünümü ve şematik diyagramı

Ultrasonik test cihazıyla yapılan ölçümler doğrudan iletim, yarı doğrudan iletim ve yüzeyden iletim olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır. Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.14. Beton numunesinde yapılan ultrasonik dalga hızı ölçüm yöntemleri; doğrudan iletim

(a), yarı doğrudan iletim (b) ve yüzeyden iletim (c)

100×100×100 mm boyutlarındaki beton numuneler doğal kurulukta olup ölçüm alınacak yüzeyleri pürüzsüz ve herhangi bir çatlak kırık vb. kusur içermemektedir. İlk olarak cihaza deneyde kullanılacak beton numunelerin ortalama yoğunluğu (1750 kg/m³), dalga hızının geçeceği mesafe (0.1 m) girilerek, P dalga türü seçilmiştir. P dalgasına ait alıcı-verici başlıklar cihaza takılmıştır. Beton numuneleri alt ve üst yüzeyleri paralel olacak şekilde düz bir zemine yerleştirilmiştir. Ölçümü alınacak beton numunelerin alıcı-verici başlıklar arasında tam teması sağlamak amacıyla karşılıklı iki yüzeyine jel sürülmüştür. Alıcı-verici başlıklar arasına sıkıştırılan betona P dalgası gönderilerek betonun, dalga hızı cihaz yardımıyla direkt olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Cihaza S dalgasına ait alıcı-verici başlıklar takılarak aynı işlemlerle aynı beton numunelerinin dalga hızları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu çalışmada doğrudan iletim (Şekil 5.14) yöntemi kullanarak P ve S dalga hızları elde edilmiştir.

Ultrasonik yöntemle elde edilen S ve P dalga hızları kullanarak beton numunelerinin poisson oranı, μ 'nün elde edilmesi için,

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5.4)$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada V_p , P dalga hızı (m/s) V_s , S dalga hızını (m/s) göstermektedir.

E, elastisite modülü değerleri ise,

$$E = \frac{V_p^2 \rho}{144g} \left(\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \right) \quad (5.5)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

Betonun elastisite modülü agrega ve beton sınıfına bağlı olarak değişiklikler gösterebilir. Yüksek elastisite modülü olan agrega beton dayanımını artırır. Bazı ülke yönetmeliklerinde agrega sınıfına bağlı bağıntılar bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri ve Türkiye şartnamelerinde normal dayanımlarının elastisite modülü hesabı için beton dayanımı; f_{ck} (MPa), elastisite modülü; E (GPa) olmak üzere aşağıdaki bağıntılar verilmiştir.

$$\text{ACI 318-95} \quad E=4.73(f_{ck})^{1/2} \quad (5.6)$$

$$\text{TS 500} \quad E = 3250(f_{ck})^{1/2} + 14000 \quad (5.7)$$

Yüksek dayanımlı betonların elastisite modülü hesabı için Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Beton Komitesi tarafından önerilen formüller aşağıdaki gibidir.

$$\text{ACI 363} \quad E = 3.32(f_{ck})^{1/2} + 6.9 \quad (5.8)$$

$$\text{CEB 90} \quad E = 10(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (5.9)$$

Burada; E : Elastisite modülü, f_{ck} : Basınç dayanımını göstermektedir.

Beton niteliğinin doğrudan titreşim hızlarından belirlenmesine yönelik yaklaşım International Atomic Energy Agency (2002) el kitabında bulunan Tablo 5.5 aşağıda verilmiştir (Özçep, 2012).

Tablo 5.5. Beton kalitesinin/niteliğinin P dalga hızına bağlı sınıflandırılması

Beton kalitesi sınıflaması	P dalga hızı (m/sn)
Mükemmel	-4500
İyi-çok iyi	3650-4500
Orta	3050-3650
Zayıf	2000-3050
Çok Zayıf	0-2000

5.3.6. Isı İletim Katsayısı Deneyi

Beton numunelerinin ısı iletim katsayısını ölçmek için Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Müh. Bölüm Laboratuvarında bulunan Thermtest Portable cihazı kullanılmıştır. Cihaz geçici rejim ölçüm tekniklerinden, ısı kaynağı olarak sıcak tel metodunu kullanarak ölçüm yapmaktadır.

Cihaz yaklaşık 2 dk çalıştırılarak telin ısınması sağlanır. Ölçümü yapılacak beton numunelerin üst yüzeyine cihazın teli girecek kadar delikler matkap yardımıyla açılmıştır. Isı iletim katsayısı, 22-25 °C oda sıcaklığında ve her numuneye sıcak tel yerleştirilerek ölçümü yapılmıştır (Şekil 5.15). Cihaz ısı iletim katsayısını 0.02-6 W/mK aralığında %5 hassasiyetle vermektedir.



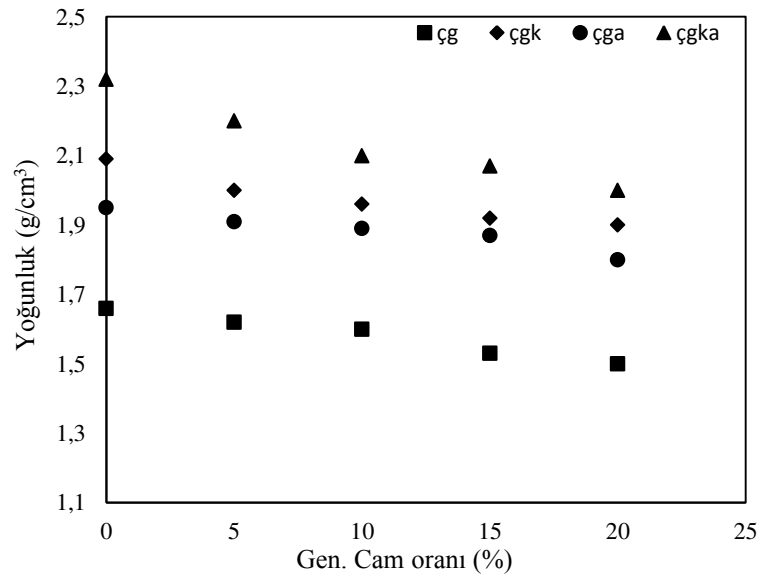
Şekil 5.15. Isı iletim katsayısı ölçümü alınan beton numune

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Kuru Birim Ağırlık

28 günlük kuruma süresinin ardından sertleşmiş beton numunelerin ağırlıkları dış hacmine bölünerek birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Hafif betonun kuru birim ağırlığı 800-2000 kg/m³ arasında olmalıdır (TS EN 206-1, 2002). Birim ağırlıkları 300-800 kg/m³ arasında olanlara düşük dayanımlı yalıtım betonları adı verilmektedir (Taşdemir, 2003).

Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agreganın yoğunluğa etkisi Şekil 6.1’de verilmiştir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça beton numunelerin yoğunluğu azalmıştır. Bu azalma genleştirilmiş camın düşük yoğunluğundan (0.17-0.23 g/cm³) kaynaklanmaktadır. Kumlu betonların kumsuz betonlara göre yoğunluğu daha yüksektir. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin yoğunluğu daha yüksektir. Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin yoğunluğu 1.5-2.2 g/cm³ aralığında değişmektedir. En yüksek birim ağırlığı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük birim ağırlığı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda olduğu görülmüştür. Elde edilen beton numuneler TS EN 206-1 standardına göre hafif beton sınıfındadır.



Şekil 6.1. Beton numunelerinde bulunan genleştirilmiş cam agreganın yoğunluk üzerindeki etkisi

Šeputytė-Jucikė ve Sinica, agrega olarak 0-2 mm, 4-8 mm, 8-16 mm boyutlarda yoğunlukları sırasıyla 290, 140, 120 kg/m³ olan genleştirilmiş cam kullanarak beton numunelerin yoğunluğunu 247-335 kg/m³ arasında değiştiğini, genleştirilmiş cam ve genleştirilmiş polistiren (0-2 mm) atığı kullanarak beton numunelerin yoğunluğunu 225-309 kg/m³ arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Genleştirilmiş polistiren atığının düşük yoğunluğa (15 kg/m³) sahip olması nedeniyle betonun yoğunluğunu düşürmüştür.

6.2. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı, bir beton numunenin eksenel yüklenmeye karşı ölçülen maksimum direnci olarak tanımlanmaktadır. Betonun basınç dayanımını etkileyen birçok faktör vardır. Çimento tipi, su/çimento oranı, agrega özellikleri, kimyasal veya mineral katkıları, betonun boşluk yapısı betonun dayanımını etkileyen iç faktörler olarak sınıflandırılabilir. Beton üretimi, dökümü, bakımı, sertleşme şartları, hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı etkiler dış faktörler olarak sınıflandırılabilir.

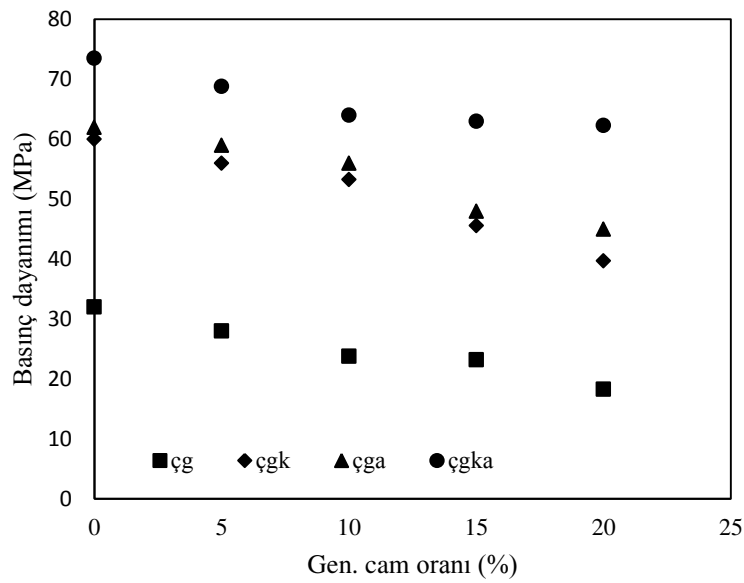
Betonun basınç dayanımını etkileyen, iki önemli faktör vardır. Bunlar su/çimento oranı ve betonun sıkışmasıdır (Ekinci ve Keleşoğlu, 2014). Tamamen sıkıştırılmış bir betonun basınç dayanımı, su/çimento oranı ile ters orantılıdır (Neville, 1981).

Beton karışımında kullanılan su, çimento ile birleşerek hidratasyon denilen kimyasal reaksiyonu başlatır. Agrega yüzeyini ıslatarak taze betonun işlenebilme özelliğine sahip olmasını sağlar. Su miktarının gereğinden az kullanılması işlenebilirliği azaltarak betonda boşlukların oluşmasına ve basınç dayanımının düşmesine neden olur. İşlenebilirliği sağlamak için gereğinden fazla kullanılan su, beton sertleştikten sonra buharlaşarak, beton içinde kılcal boşlukların oluşmasına ve basınç dayanımının düşmesine neden olur. İşlenebilirliği azaltmadan akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddelerini kullanarak su/çimento oranını %15-25 oranına düşürmek mümkündür.

Genleştirilmiş camın betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, beton numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçları Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrol numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça beton numunelerinin basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Hafif betonda, kompozitin en zayıf bileşeni hafif agregadır. Bu nedenle, teorik olarak betonda hafif agrega içeriğinin artırılması, mukavemette bir azalmaya yol açacaktır. Genleştirilmiş cam agregalarının

düşük yoğunluğu nedeniyle, betonun basınç dayanımı nispeten düşüktür (Macedo, 2011; Bumanis ve ark., 2013).

Kumlu betonların kumsuz betonlara göre basınç dayanımı, daha yüksektir. Genel olarak kullanılan agreganın birim hacim ağırlığı betonun dayanımı ile ilişkilidir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen betonların basınç dayanımları daha yüksektir ve işlenebilirlik üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. Akışkanlaştırıcı karışım suyunu azaltarak daha az boşluklu yapı oluşturur ve basınç dayanımı artar. Betonun dayanımı, agregaların özellikleri ve hacim oranı ile su/çimento oranının kontrolü ile değiştirilebilir.



Şekil 6.2. Beton numunelerde bulunan genişletilmiş cam agregası oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Genleştirilmiş cam ve kum agregalarını kullanarak elde edilen beton numunelerinin basınç dayanımları 18.3-68.8 MPa arasında değişmektedir. En yüksek basınç dayanımı %5 oranda genişletilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük basınç dayanımı %20 oranda genişletilmiş cam içeren ÇG betonunda olduğu görülmüştür. ACI 213R-03'e göre 28 günlük minimum basınç dayanımı 17 MPa, yoğunluğu 1120-1960 kg/m³ arasında olan sadece hafif agregası veya hafif agregası normal agregası kombinasyonu ile üretilen betonlar yapısal hafif betonlar olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma göre, elde edilen dayanım değerleri 17 MPa üzerindedir (ACI 213R-03, 2003).

Šeputytė-Jucikė ve Sinica, 28 günlük sertleşmesinden sonra genişletilmiş cam içeren beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri 0.38- 0.85 MPa arasında değiştiğini, genişletilmiş cam ve genişletilmiş polistiren atığı içeren beton

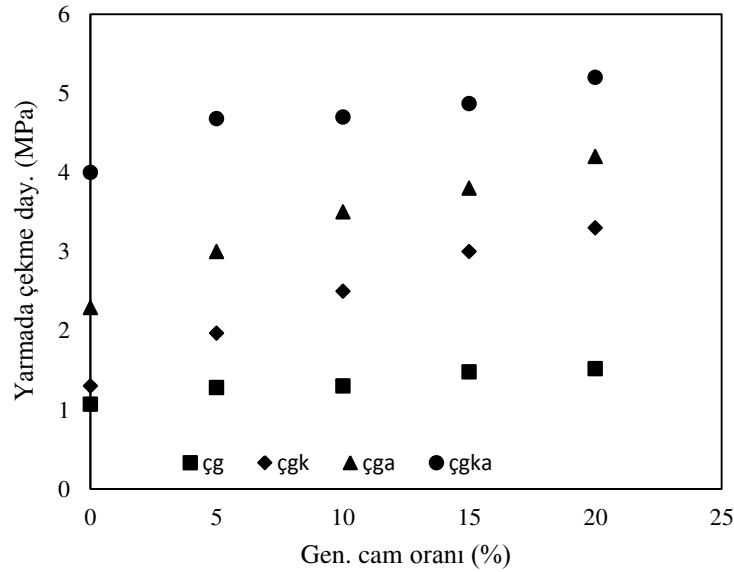
numunelerinin basınç dayanımı değerleri 0.35-0.73 MPa arasında değiştiğini bulmuşlardır.

6.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Beton elemanlarının çatlayabileceği yükü belirlemek için betonun çekme dayanımını belirlemek gerekir. Çekme dayanımı, betonun gerilim altında kırılmaya veya çatlamaya dayanma kabiliyetidir. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımından çok daha düşüktür. Bu nedenle beton yapılarının çelik gibi yüksek çekme dayanımına sahip malzemelerle güçlendirilmesi gerekmektedir. Beton kırılğan bir malzeme olması nedeniyle gerginlikte çok zayıftır. Bu nedenle çekme kuvvetleri betonun çekme dayanımını aştığında çatlaklar oluşur.

Beton numunelerinin çekme dayanımını dolaylı bir yöntem olan yarma deneyi ile belirlenmiştir. Yarma deneyinde küp numunelerine uygulanan yük sonucunda, betonun ortadan yarılarak iki parçaya ayrılmasından faydalanılarak çekme dayanımı belirlenmiştir.

Genleştirilmiş camın betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, beton numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 6.3'te verilmiştir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça yarmada çekme dayanımı artmıştır.



Şekil 6.3. Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi

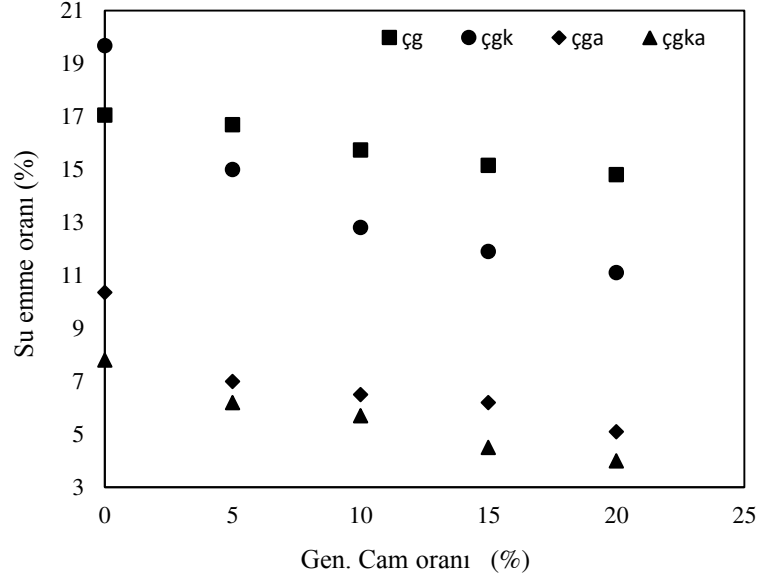
Kumlu betonların kumsuz betonlara göre yarmada çekme dayanımı, daha yüksek olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin yarmada çekme dayanımları daha yüksektir. Beton numuneleri arasında en yüksek yarmada çekme dayanımı 5.2 MPa olan %20 oranında genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük yarmada çekme dayanımı 1.28 MPa olan %5 oranda genleştirilmiş cam içeren ÇG betonu olduğu görülmüştür.

6.4. Su Emme Oranı

Hafif beton, hafif agregası içerisindeki boşluklar nedeniyle normal ve ağır betonlardan daha büyük bir gözenek hacmine sahiptir. Hafif betonun su emilimi, agregası partikülünün kapalı bir dış yüzeye sahip olup olmamasına veya hafif agregadaki gözeneklerin kendi içinde kapalı olup olmamasına bağlıdır. Hafif agregasının su emilimi, nem içeriği ve gözenekli agregasının betondaki hacim oranı betonun su emilimini etkileyen parametrelerdendir. Su emilimi, esas olarak beton kalitesini ve direncini değerlendirebilecek bir ölçüdür. Betonun birim ağırlığı, dayanımı, korozyona karşı dayanıklılığı, donma ve çözülme direnci su emme oranı ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Kaliteli bir betonun en önemli özelliklerinden biri düşük su emimidir (Herki, 2017).

Deneyde, tamamen kuru olan beton numuneleri su içerisine bırakılarak kılcal boşluklar vasıtasıyla su emmesi sağlanmıştır. TS 3624'e uygun olarak beton numunelerin kuru ağırlığı ve suya doygun ağırlıkları hassas terazi yardımıyla bulunmuştur. Beton numunelerin su emme oranı Eşitlik 5.2 yardımıyla hesaplanmıştır. Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının su emme oranı üzerindeki etkisi Şekil 6.4'te görülmektedir. Beton numunelerde genleştirilmiş cam oranı arttıkça su emme oranının azaldığı görülmüştür. Kontrol beton numunelerinin su emilim oranları genleştirilmiş cam içeren numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. En yüksek su emme oranı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda görülürken, en düşük su emme oranı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda olduğu görülmüştür. Genleştirilmiş cam kapalı gözenek yapısına sahip olması nedeniyle beton numunelerin su emme oranında azalma sağlamıştır. Kum içeren numunelerin su emme oranı daha düşüktür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin su emme oranının daha düşük olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı beton içerisindeki kapiler boşlukları azaltarak su emme

oranını düşürmüştür. Su emiliminin düşük olması betonun çatlama ve büzülme potansiyelini azaltır.

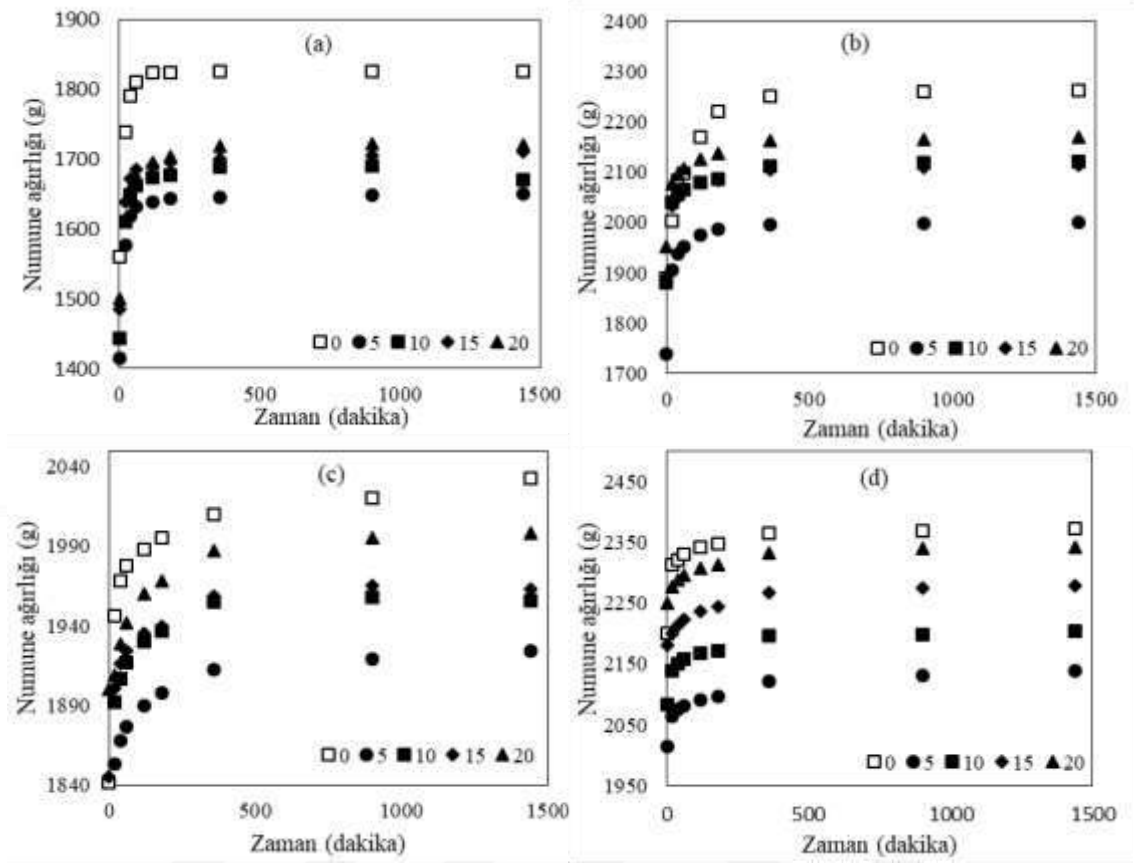


Şekil 6.4. Beton numunelerde bulunan genişletilmiş cam agregası oranının su emme oranı üzerindeki etkisi

Beton karışımında fazla kullanılan su miktarı, kılcal boşluk ağını oluşturur. Su, beton içerisindeki kılcal boşluklar yardımıyla absorbe edilir ve beton numunesinde ağırlık artışına neden olur. Betonda suyun emilim hızı, betonun içindeki gözeneklerin yapısı, boyutu ve dağılımına göre değişmektedir. Beton numunelerin su içerisinde kalma süresine bağlı olarak ağırlık değişimini gösteren sonuç Şekil 6.5'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre beton numunelerin su içerisinde kalma süresi arttıkça ağırlıklarında artış gözlenmiştir. Numunelerin ağırlığındaki bu artış doygunluğa ulaşınca kadar devam etmiştir. Suyu doymuş numunelerin ağırlığı su emilim hızının azalmasından dolayı zamanla azalmıştır.

Genleştirilmiş cam agregası ile elde edilmiş beton numunelerin su emme oranları %30'un altındadır. Dolayısıyla elde edilen betonun direkt suya maruz kalınan alanlarda kullanılabilmesi mümkündür.

Şeputytê-Jucikê ve Sinica, genişletilmiş camın betonda kullanılması sonucunda su emme oranının %9.9'dan %8.4'e düştüğünü, genişletilmiş cam ve genişletilmiş polistiren atığının beraber kullanılması durumunda %8.5'den %7.4'e düştüğünü bulmuşlardır.



Şekil 6.5. Beton numunelerin su içerisinde kalma süresine bağlı olarak ağırlık değişimi
(a)ÇG (b)ÇGK (c)ÇGA (d)ÇGKA

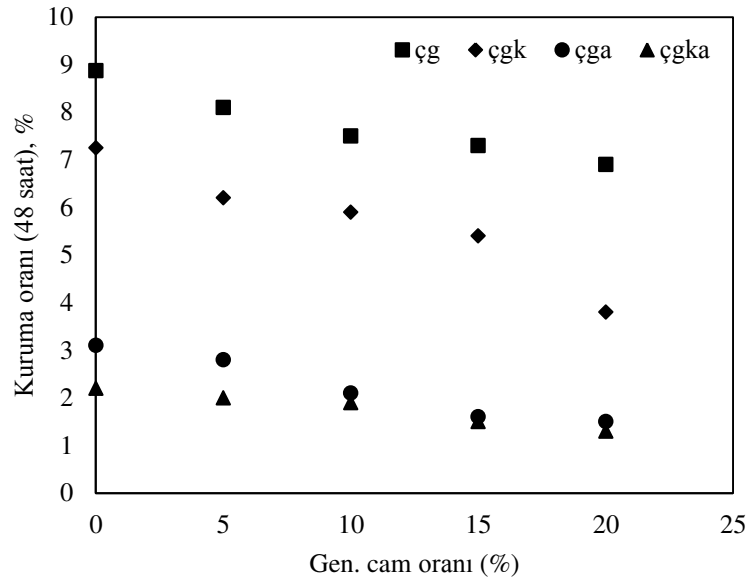
6.5. Kuruma Oranı

Kuruma işlemi, kılcal boşluklardan suyun buharlaşması sonucu olarak betonun maruz kaldığı hacim azalması olarak tanımlanabilir. Kuruma hızı betonun nem içeriğine, gözenekliliğine, su-çimento oranına, açıkta kalan yüzeyine ve ortam koşullarına bağlıdır.

Beton yapılarda kuruma, özellikle iklim koşulları altında sıcaklık ve nemdeki mevsimsel dalgalanmalarda kritik öneme sahiptir. Sıcaklık ve nemdeki ani ve sürekli değişiklikler betonda büzülme/genleşme döngüleri yaratır, bu da büzülmeye ve beton elemanlarında mikro çatlamaya yol açan ısıl gerilmelere neden olur (Asad, 1995). Deformasyona neden olan mikro çatlakların gelişimi, beton yapıların hizmet ömrünü ve dayanıklılığını önemli ölçüde azaltır (Bazant ve ark., 1991; Boucherit ve ark., 2014).

Beton numuneler, doygun hale gelinceye kadar (24 saat) su içerisinde bekletilmiştir. Su içerisinden çıkarılan beton numuneler ortam koşulları altında kurumaya bırakılmıştır. Beton numunelerde bulunan genişleştirilmiş cam agrega oranının

48 saat süren kuruma oranı üzerindeki etkisini gösteren sonuç Şekil 6.6'da verilmiştir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genişleştirilmiş cam oranı arttıkça kuruma oranı azalmıştır. Genleştirilmiş camın pürüzsüz bir yüzeye ve kapalı gözeneklere sahip olması sebebiyle su emme oranı düşüktür. Bu nedenle betonda uzaklaşabilecek su oranı azaldığından kuruma oranı azalmıştır. Akışkanlaştırıcı ilave edilmiş beton numunelerin kuruma oranları diğer numunelere göre daha düşüktür. Akışkanlatırıcı boşluk oranını düşürerek su emilimini azaltır. Kum içeren beton numunelerin kuruma oranları daha düşüktür. En yüksek kuruma oranı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda görülürken, en düşük kuruma oranı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda olduğu görülmüştür.

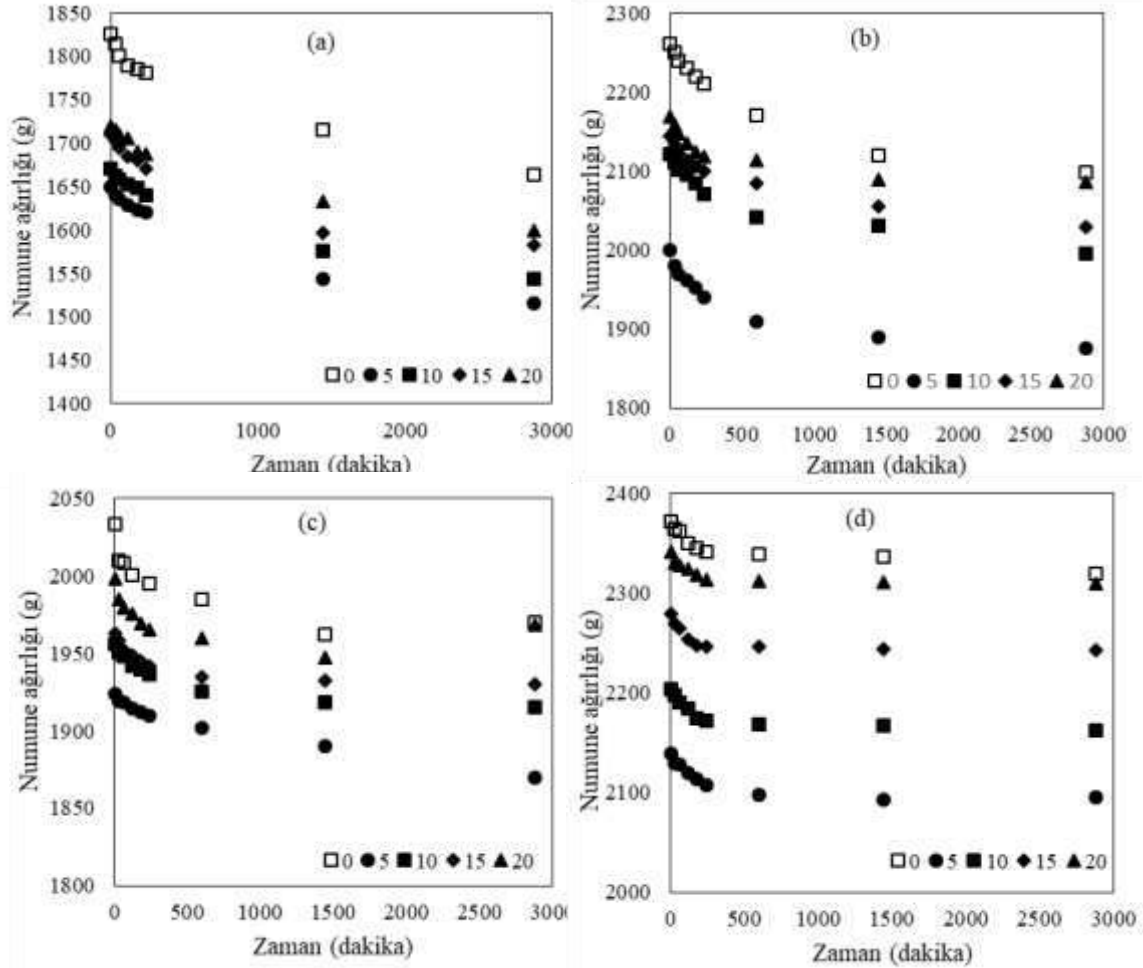


Şekil 6.6. Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının 48 saat süren kuruma oranı üzerindeki etkisi

Kuruma süresince (48 saat) su kaybına bağlı olarak beton numunelerin ağırlıklarında düşüş meydana gelmiştir. Şekil 6.7’de kurumaya bağlı olarak genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin zamanla ağırlık değişimi verilmiştir. Kuruma işlemi beton içeriğinden ve ortam koşullarından etkilenmektedir.

Betonun kuruması ile beton hacminde büzülme meydana gelmektedir. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin zamanla ağırlık kaybı diğer numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Agregası ortamın su ihtiyacını sağlaması nedeniyle, daha fazla su içeren beton daha fazla ağırlık kaybına neden olacaktır. Dolayısıyla artan

genleştirilmiş cam oranına bağlı olarak kuruma oranının düşük olması nedeniyle beton numuneler arasında ilk zamanlarda çok hızlı bir ağırlık kaybı görülmemiştir.



Şekil 6.7. Kurumaya bağlı olarak genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin zamanla ağırlık değişimi (a)ÇG (b)ÇGK (c)ÇGA (d)ÇGKA

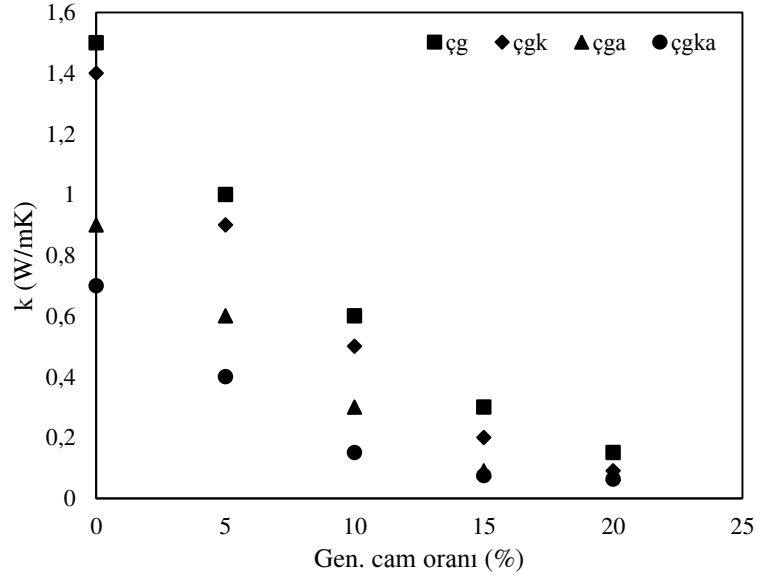
6.6. Isı İletim Katsayısı

Isı iletkenliği (k değeri), bir malzemenin ısı iletim kapasitesini gösteren bir özelliktir. Betonun ısı iletkenliği, öncelikle kullanılan hammaddelerin ısı iletkenliği ve karışım oranlarından etkilenir (Dilli ve ark., 2015).

Hafif agregalı betonların ısı iletkenliği genel olarak betonun nem içeriği, yoğunluğu ve agregalar türünden etkilemektedir (Clarke, 2010). Agregalar genellikle beton hacminin yaklaşık %70-80'ini oluşturduğundan, düşük ısı iletkenliği olan agregaların dahil

edilmesi betonun ısı yalıtım kapasitesinde önemli bir artışa katkıda bulunabilir. Düşük termal iletkenlik değerleri, artan yalıtım kapasitesiyle ilişkilidir.

Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agreganın ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisini gösteren sonuç Şekil 6.8’de verilmiştir. Beton numunelerde genleştirilmiş cam oranı arttıkça ısı iletim katsayısının azaldığı görülmüştür. Genleştirilmiş camın (2-4 mm) düşük ısı iletim katsayısı sayesinde (0.0639 W/mK) yapı malzemesine termal izolasyon özelliği katmaktadır. Kullanılan agreganın özellikleri, beton numunelerin ısı özelliklerini etkilediği görülmüştür. Kontrol beton numunelerinin ısı iletim katsayıları, genleştirilmiş cam içeren beton numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Isı iletim katsayısı en yüksek %5 oranında genleştirilmiş cam agregası içeren ÇG betonunda 1 W/mK, en düşük %20 oranında genleştirilmiş cam agregası içeren ÇGKA betonunda 0.063 W/mK elde edilmiştir. Kumun ilave edilmesiyle beton numunelerin ısı iletim katsayısını daha fazla düşürmüştür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin ısı iletim katsayıları diğer numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Su oranını düşürerek kapiler boşluk oranını azaltan akışkanlaştırıcı ısı iletimini kolaylaştırmıştır.



Şekil 6.8. Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agreganın ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisi

Šeputytė-Jucikė ve Sinica, sadece genleştirilmiş cam agregası kullanarak elde ettiği beton numunelerinin ısı iletim katsayılarının 0.073-0.097 W/mK aralığında genleştirilmiş polistiren atığı ilave edilen numunelerin 0.071-0.087 W/mK aralığında değiştiğini bulmuşlardır. Genleştirilmiş polistiren atık agreganın düşük yoğunluğu ve gözenekli

yapısı nedeniyle ısı iletkenlik katsayısını azalttığını öngörmüşlerdir. Gözeneklilik, hafif agregalı betonun ısı iletkenlik katsayısını etkileyen faktörlerden biridir. Kapalı gözeneklere giren havanın düşük ısı iletkenliği, hafif agregalı betonun ısı iletkenlik katsayısının azalmasına neden olur (Demirboğa ve Gül, 2003).

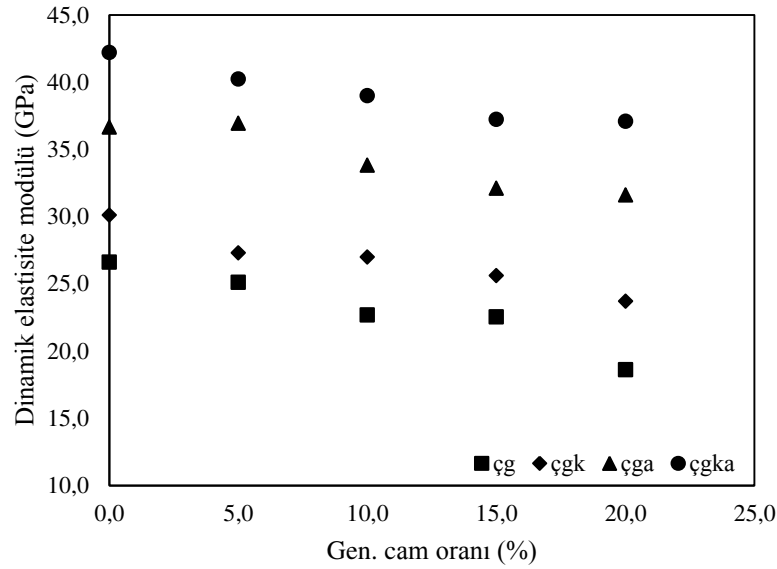
Jasaitiené ve ark., genişletilmiş cam içeren beton numunelerinde ortalama termal iletkenlik katsayısı, genişletilmiş kil içeren beton numunelerine kıyasla yaklaşık 1.2 kat daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

6.7. Elastisite modülü

Betonun elastisite modülü, binaların ve yapısal elemanların deformasyonunu tahmin etmek için kullanılan bir faktördür (Neville, 2011). Elastisite modülü esasen bir malzemenin sertliğinin bir ölçümüdür ve daha çok teorik metotlarla hesaplanmaktadır. Beton dayanımına bağlı olarak geliştirilmiş olan bazı ampirik formüllerle hesaplanan elastisite modülü için Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) ve Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından önerilmiş ve geleneksel beton için birbirine yakın sonuçlar veren formüller kullanılmaktadır.

Ultrasonik Titreşim Hızı (UPV) yöntemi, betona zarar vermeden beton içerisinden geçen dalga hızını ölçerek dayanım gibi betonun fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılan en uygun yöntemdir. Bu yöntem basit ve maliyet açısından ucuz olduğundan çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok ülkenin bu testin uygulanma biçimi için standartları vardır.

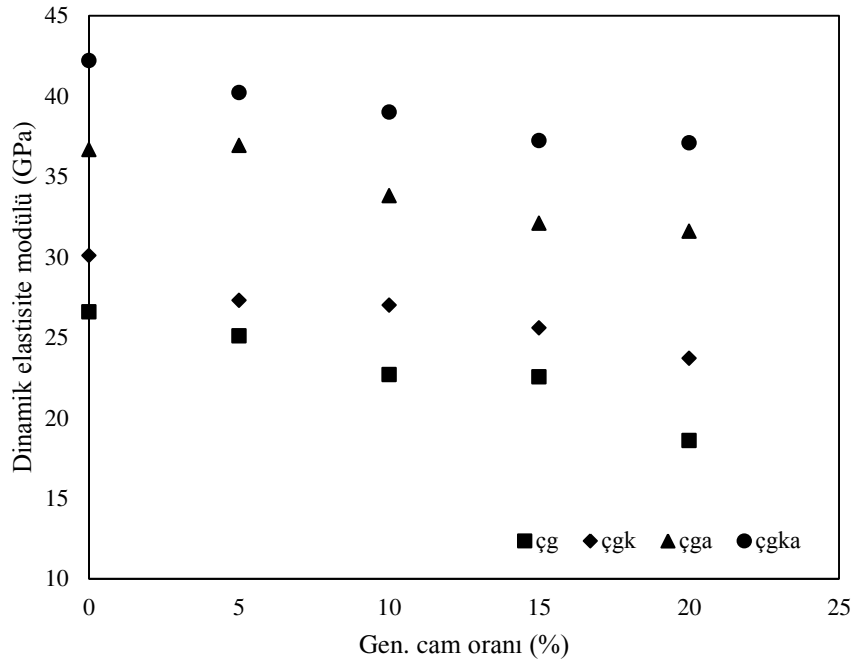
Bu deneyde ses dalgasının belirli bir boydaki beton içerisinden geçme süresine bağlı olarak dalga hızları ölçülmüştür. Ultrasonik dalga hızı önemli ölçüde agrega türü ve miktarından etkilenmektedir (Sturup ve ark., 1984). Beton numunelerde bulunan genişletilmiş cam agregası oranının P dalga hızı üzerindeki etkisini gösteren sonuç Şekil 6.9'da verilmiştir. Kontrol beton numunelere kıyasla genişletilmiş cam oranı arttıkça genel olarak P dalga hızı artmıştır. Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin ultrasonik P dalga hızları 2.09-4.08 km/s arasında değişmektedir. Beton içerisindeki boşluk miktarının dalga hızı ile yakından ilgili olması, elde edilen ultrasonik dalga hızı ile betonun kalitesine dair bir ilişki kurulabilir (Erdoğan, 2003). Ultrasonik ölçümlere göre beton numuneler Tablo 5.5 referans alındığında “iyi-çok iyi” sınıfına girmektedir.



Şekil 6.9. Beton numunelerde bulunan genişletilmiş cam agregası oranının P dalga hızı üzerindeki etkisi

Hafif agregası normal agregadan daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Betonun elastisite modülü, agreganın elastisite modülüne karşı hassastır, bu nedenle normal ağırlıktaki agreganın hafif agregası ile değiştirilmesi elastisite modülünün azalmasına neden olur. Hafif betonun elastisite modülü, yoğunluğun ve beton dayanımının artmasına bağlı olarak artar. (Wischers ve Manns, 1974).

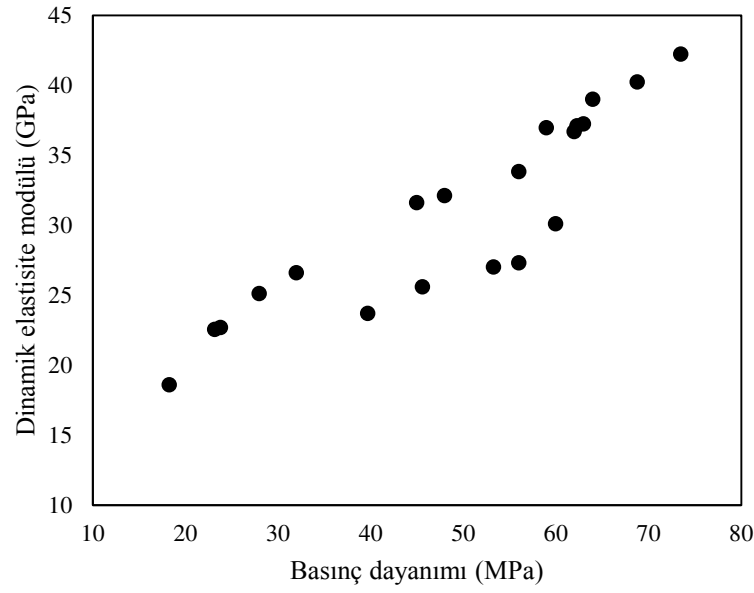
Beton numunelerin içerisinde ultrasonik yöntemle ses dalgaları geçirilerek, dalga hızları deneysel olarak ölçülmüştür. Eşitlik 5.5 kullanılarak elastisite modülü elde edilmiştir. Betonun dış yükler altındaki şekil değiştirme yeteneğinin bir göstergesi olan dinamik elastisite modülünü belirlemek için yapılan deney sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir. Genleştirilmiş cam ilaveli beton numunelerin elastisite modülü 18,6-40,23 GPa arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelere kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça dinamik elastisite modülü azalmıştır. Hafif agregası içeriğinin artması betonun elastisite değerinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum kullanılan genleştirilmiş cam agreganın düşük yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Elastisite modülü azaldıkça beton daha esnek davranır. Kum içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü daha yüksektir. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü akışkanlaştırıcı içermeyenlere oranla daha yüksektir. Bu durum betonun daha gözeneksiz bir yapıya sahip olmasından ve dolayısıyla dayanımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.10. Beton numunelerde bulunan genleştirilmiş cam agregası oranının dinamik elastisite modülü üzerindeki etkisi

Sinterlenmiş agregalara sahip bir hafif beton, yüksek yoğunluk ve daha düşük gözetekli bir yapı sergiler ve bunun sonucunda normal ağırlıktaki betona göre daha düşük elastisite modülü sergiler (Lo ve ark., 2004).

Betonun elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki yaklaşık olarak bilinmekle birlikte, bu ilişkinin kesinliği hakkında tam bir fikir birliği yoktur. Çünkü betonun elastisite modülü hem agregası ve çimento hamurunun elastisite modüllerinden, hem de bu malzemelerin hacim konsantrasyonlarından etkilenir (Hirsch, 1962). Beton numunelerin basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 6.11’de görülmektedir. Genel olarak basınç dayanımı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Betonun elastisite modülü, basınç dayanımına bağlı olduğundan agregası türü ve miktarından etkilenir. (Choubane ve ark, 1996).



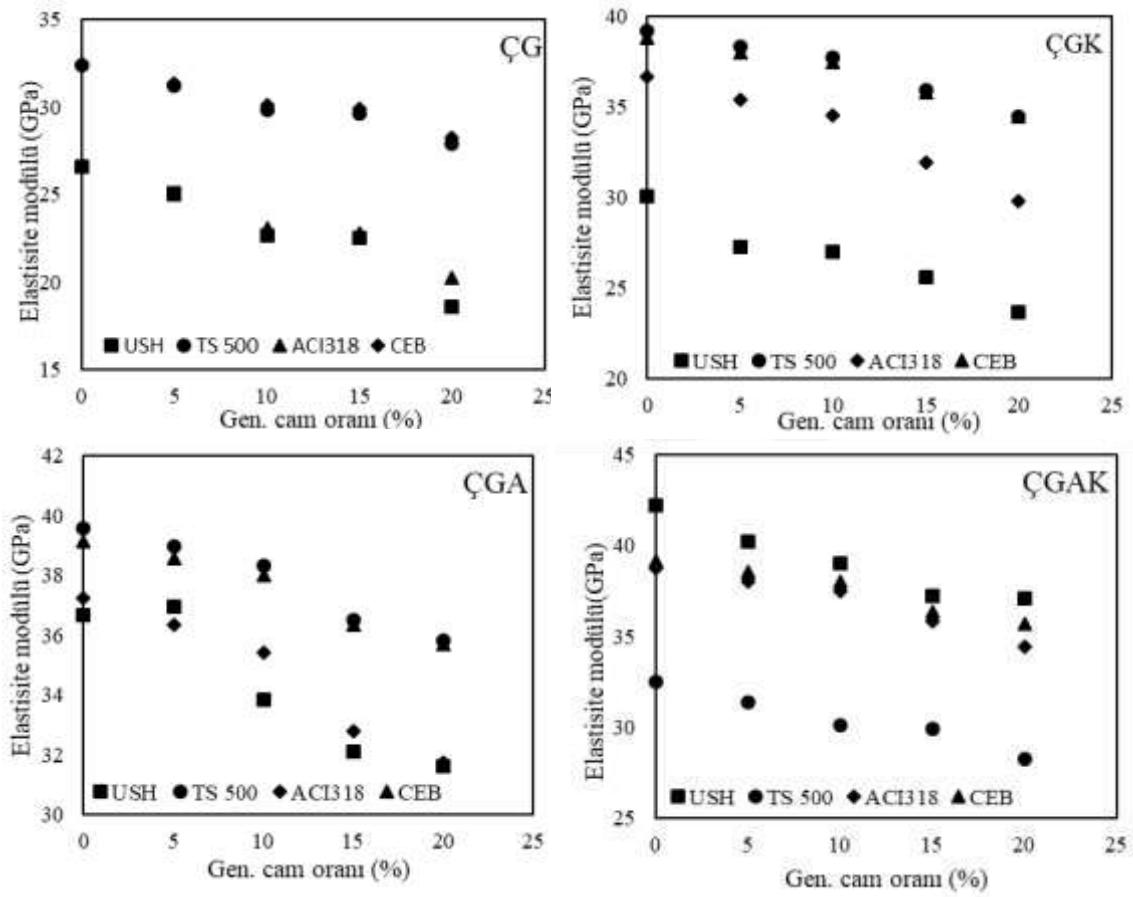
Şekil 6.11. Basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki

Betonun elastisite modülünü teorik olarak elde etmek için uluslararası standart formüller vardır. Bu formüller elastisite modülü ile beton dayanımı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. TS 500, ACI 318-95 ve CEB 90 standartlarına ait formüller kullanılarak beton numunelerin teorik elastisite değerleri hesaplanmıştır. Genleştirilmiş cam oranına bağlı olarak beton numunelerin deneysel ve teorik elastisite modülü değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Deneysel ve teorik elastisite modülü değerleri

	Gen. Cam oranı (%)	ÇG	ÇGK	ÇGA	ÇGKA
TS 500	0	32,384	39,174	39,590	41,862
	5	31,197	38,320	38,963	40,957
	10	29,855	37,727	38,320	40,012
	15	29,654	35,946	36,516	39,796
	20	27,903	34,477	35,801	39,652
ACI 318-95	0	26,757	36,638	37,244	40,551
	5	25,029	35,396	36,332	39,233
	10	23,075	34,532	35,396	37,840
	15	22,783	31,941	32,770	37,543
	20	20,234	29,803	31,730	37,334
CEB 90	0	32,490	38,776	39,152	41,189
	5	31,368	38,000	38,585	40,381
	10	30,098	37,458	38,000	39,522
	15	29,907	35,819	36,346	39,338
	20	28,252	34,453	35,685	39,208
Deneysel (Ultrasonik ses dalgası yöntemi)	0	26,600	30,100	36,671	42,216
	5	25,100	27,300	36,945	40,229
	10	22,683	27,000	33,819	39,000
	15	22,545	25,600	32,100	37,239
	20	18,600	23,700	31,600	37,100

Aynı gruptaki numunelere ait hesaplanan deneysel ve teorik sonuçlar Şekil 6.12’de görülmektedir. Deneysel ve teorik olarak elastisite modülleri karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Deneysel veriler, ACI 318-95 standardın teorik verilerine daha yakındır.



Şekil 6.12. Teorik modeller kullanılarak ve deneysel olarak bulunan elastisite modülünün genleştirilmiş cam oranı ile değişimi

7. SONUÇLAR

Genleştirilmiş camın hafif beton agregası olarak kullanımını ve sertleşmiş betonlar üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada agrega olarak sadece genleştirilmiş camın kullanıldığı kumsuz karışımlar ve ince agrega olarak kumun birlikte kullanıldığı kumlu karışımlar olmak üzere iki farklı ana karışım türü bulunmaktadır. Aynı Harç karışımlarına, işlenebilirliği sağlamak ve su oranını azaltmak amacıyla akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilerek beton numuneler hazırlanmıştır. Beton numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar genleştirilmiş camın kullanılmadığı kontrol beton numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmanın bulgularına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin yoğunluğu $1.5-2.2 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça beton numunelerin yoğunluğu azalmıştır. Bu azalma genleştirilmiş camın düşük yoğunluğundan ($0.17-0.23 \text{ g/cm}^3$) kaynaklanmaktadır. Kumlu betonların kumsuz betonlara göre yoğunluğu daha yüksektir. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin yoğunluğu daha yüksektir. En yüksek birim ağırlığı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük birim ağırlığı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda olduğu görülmüştür. TS EN 206-1 standardına göre elde edilen beton numuneler hafif beton sınıfındadır.
- Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları $18.3-68.8 \text{ MPa}$ arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça beton numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Bu azalma genleştirilmiş camın düşük yoğunluk ve düşük dayanımından (1.4 MPa) kaynaklanmıştır. Kumun ilave edilmesiyle beton numunelerde birim ağırlık artışıyla beraber basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Kumlu betonların kumsuz betonlara göre basınç dayanımı, daha yüksektir. Akışkanlaştırıcı ilave edilen betonların basınç dayanımları daha yüksektir ve işlenebilirlik üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. Akışkanlaştırıcı karışım suyunu azaltarak daha az boşluklu yapı oluşturduğundan basınç dayanımı sonuçlarında artış görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı %5 oranda genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük basınç

dayanımı %20 oranda genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda olduğu görülmüştür. Elde edilen basınç dayanım değeri 17 MPa üzerinde olması nedeniyle beton numuneler, ACI 213R-03'e göre yapısal hafif beton sınıfındadır.

- Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımları 1.28-5.2 MPa arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça yarmada çekme dayanım değeri arttığı görülmüştür. Kumlu betonların kumsuz betonlara göre yarmada çekme dayanımı, daha yüksektir. En yüksek yarmada çekme dayanımı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda görülürken, en düşük yarmada çekme dayanımı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin yarmada çekme dayanımları daha yüksektir. Beton numunelere uygulanan yük sonucunda oluşan dayanım değeri genleştirilmiş cam oranlarıyla doğru orantılı olduğu görülmüştür.
- Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin su emme oranları %4-16.69 arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça su emme oranı azalmıştır. Kapalı gözenek yapısı nedeniyle düşük su emme oranına sahip olan genleştirilmiş cam, beton numunelerinde su emme oranında azalma sağlamıştır. Kum içeren numunelerin su emme oranı daha düşüktür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin su emme oranının daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek su emme oranı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda görülürken, en düşük su emme oranı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda olduğu görülmüştür. Genleştirilmiş cam agregası ile elde edilmiş beton numunelerin su emme oranları %30'un altındadır. Dolayısıyla elde edilen betonun direkt suya maruz kalınan alanlarda kullanılabilmesi mümkündür. Beton numunelerin su içerisinde kalma süresi arttıkça ağırlıklarında artış gözlenmiştir. Ağırlıktaki bu artış doygunluğa ulaşmaya kadar devam etmiştir. Doygunluğa erişen beton numunelerin ağırlığı zamana bağlı olarak azalmıştır.
- Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin kuruma oranları %1.3-8.1 arasında değişmektedir. Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça kuruma oranı azalmıştır. Genleştirilmiş camın düşük su emme oranına sahip olması kuruma oranını etkilemiştir. En yüksek kuruma oranı %5 genleştirilmiş cam içeren ÇG betonunda görülürken, en düşük kuruma oranı %20 genleştirilmiş cam içeren ÇGKA betonunda olduğu görülmüştür. Kum içeren beton numunelerin kuruma

oranları daha düşüktür. Akışkanlaştırıcı ilave edilen betonların kuruma oranları daha düşüktür. Akışkanlaştırıcı boşluk oranını düşürerek su emilimini azaltır böylece kuruma oranını düşürmüştür. Kuruma süresince su kaybına bağlı olarak beton numunelerin ağırlıklarında azalma görülmüştür.

- Kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça ısı iletim katsayısı azalmıştır. Bu azalma genleştirilmiş camın (0.0639 W/mK) düşük ısı iletim katsayısından dolayı meydana gelmiştir. Isı iletim katsayısı en yüksek %5 oranında genleştirilmiş cam agregası içeren ÇG betonunda 1 W/mK bulunurken, en düşük %20 oranında genleştirilmiş cam agregası içeren ÇGKA betonunda 0.063 W/mK bulunmuştur. Kumlu betonların kumsuz betonlara göre ısı iletim katsayıları daha düşüktür. Akışkanlaştırıcı içeren beton numunelerin ısı iletim katsayıları daha düşüktür.
- Ultrasonik yöntemle elde edilen verilere göre, kontrol beton numunelerine kıyasla genleştirilmiş cam oranı arttıkça dinamik elastisite modülü azalmıştır. Genleştirilmiş cam içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü 18.6-40.23 GPa arasında değişmektedir. Kum içeren beton numunelerin dinamik elastisite modülü daha yüksektir.

Genleştirilmiş camın hafif beton üretiminde kullanılması; yapının deprem yükünün azaltılması, yenilenmeyen doğal kaynakların korunması, atık kaynakların yeniden kazanımı, çevre kirliliğinin önlenmesi, enerjinin korunması ve enerjinin üretimde yeniden kullanılması gibi açılardan oldukça avantajlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abd Elrahman, M., Stephan, D., Chung, S.Y., 2018.** Effect of different expanded aggregates on the properties of lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research*, 71(2), 95-107.
<https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00465>
- ACI Comittee 212, 1986.** Admixtures for Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.
- ACI Committee 213R-03, 2003.** Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- Akman M.S., 1990.** Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Alexander, M.G., Milne, T.I., 1995.** Influence of Cement Blend and Aggregate Type on Stress- Strain Behavior and Elastic Modulus of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 92, May-June. pp. 227–235.
- Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M.Z., 2016.** Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: a review, *J. Clean. Prod.*, 126, 56–73.
- Ateş, E., 2000.** Hafif betonun ve betonarme çatı plak elemanları üzerine araştırma, Bitirme Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
- Ashworth, T., Ashworth, E., 1991.** Insulation Materials: Testing and Applications, Vol. 2 ASTM STP 1116 R. S. Graves and D. C., Wysocki (eds.), pp. 415-429, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Aydın, K.K., Uyan, M., Baş, S., 1996.** Betonda Kıvam Kaybının Süper akışkanlaştırıcı Katkılarla İyileştirilmesi, İMO, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 73-80.
- Asad, M., 1995.** Computational modelling of shrinkage in repaired concrete, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabi.
- Badogiannis, E.G., Kotsovos, M.D., 2014.** Monotonic and cyclic flexural tests on lightweight aggregate concrete beams, *Earthq, Struct*, 6, 317–334.
- Baradan, B., 1994.** Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 3, 63-98, İzmir.
- Baradan, B., 2004.** Yapı Malzemesi II, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No: 207, s. 221, İzmir.
- Barry, R., 1989.** The Construction Of Buildings, BSP Professional Books, 1, 8-23, Oxford.
- Bazant, Z. P., Kim, J. K., Panula, L., 1991.** Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 1-Shrinkage, *Materials and Structures*, Vol. 24, No. 5, 327–345.
- Bilgiç, M., 2009.** Investion of Properties of Prefabricated High Performance Lightweight Concrete, MSc Thesis, Suleyman Demirel University, Isparta/Turkey.
- Bingöl, A. F., Gül, R., 2004.** Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures, *Indian J. of Eng. and Materials Sciences*, 1168-1172.
- Bomhard, H., 1980.** Lightweight Concrete Structures, Potentialities, *The International Journal of Lightweight Concrete*, Vol.2, No:4, 193-209.

- Boucherit, D., Kenai, S., Kadri, E., Khatib, J. M., 2014.** A simplified model for the prediction of long term concrete drying shrinkage. *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 18, No. 7, 2196–2208.
- Bumanis, G., Bajare, D., Korjakins, A., 2013.** Mechanical and thermal properties of lightweight concrete made from expanded glass, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2(3), 26-32. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.2.3.2790>
- Carsana, M., Bertolini, L., 2017.** Durability of Lightweight Concrete with Expanded Glass and Silica Fume, *Acı Materials Journal*, 114 (2). <https://doi.org/10.14359/51.689.472>
- Castrodale, R.W., 2006.** Lightweight high performance concrete for bridge decks, Presentation in Virginia Concrete Conference.
- Castro, S., Brito, J., 2013.** Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, *J. Clean. Prod.*, 41, 7-14.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2002.** Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology and Applications, 110p, Noye Publications, Goteborg.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2003.** Lightweight Aggregate Concrete, Noyes Publications, USA, 1-430.
- Chi, J.M., Huang, R., Yang, C.C., Chang, J.J., 2003.** Effects of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 25(2), 197-205. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00020-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00020-3)
- Chung, S.Y., Abd Elrahman, M., Sikora, P., Rucinska, T., Horszczaruk, E., Stephan, D., 2017.** Evaluation of the Effects of Crushed and Expanded Waste Glass Aggregates on the Material Properties of Lightweight Concrete Using Image-Based Approaches, *Journal Materials*, 10, 1354. <http://dx.doi.org/10.3390/ma10121354>
- Clarke, J.L., 2010.** Lightweight Structural Concrete, British Cement Association, Crowthorne, Berkshire, 282s.
- Clarke, J.L., 1993.** Structural Lightweight Aggregate Concrete, First Edition, Spon Pres, UK.
- Choubane, B., Wu, C., Tia, M., 1996.** Coarse Aggregate Effects on Elastic Moduli of Concrete. Transportation Research Record 1547, Transportation Research Board, Washington, D.C. 29-34.
- Dikici, T., 2010.** Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Dilli, M.E., Atahan H.N., Sengül, C., 2015.** A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates, *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 260-267.
- Demirboğa, R., Gul, R., 2003.** The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* 33(5): 723–727.
- Ekinci, C.E., 2008.** Bordo Kitap: Yapı ve Tasarımcının İnşaat El Kitabı, Data Yayınları, Ankara.
- Ekinci, C.E., Keleşoğlu, Ö., 2014.** A Study on Occupancy and Compressive Strength of Concrete with Produced Injection Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8.
- Ekmekyapar, T., Örüng, İ., 1993.** İnşaat Malzeme Bilgisi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Notları, No: 145, Erzurum.
- Erdoğan, T.Y., 2003.** Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.

- Eriç, M., 2002.** Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yayınevi, İstanbul, 98152.
- Faust, T., Gert König, E.H., 1997.** Stres-Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete, LACER, 2, 103-109.
- Fennis, S.A., Walraven, J.C., 2012.** Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, Heron, 57, 73-101.
- Fernandes, H.R., Tulyaganov, D.U., Ferreira, J.M.F., 2009.** Production and characterisation of glass ceramic foams from recycled raw materials, Advances in Applied Ceramics, vol. 108, pp. 9-13.
- Fiorato, A.E. 1981.** Inspection guide for reinforced concrete vessels, Final Report, Vol. 2, No. CG-M-11-81, Portland Cement Association, Commentary, U.S. Department of Transportation.
- Goyal, S.K., Cutler, I.B., 1975.** Absorption of water in waste glass as a precursor for foam formation, Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 19, pp. 311-320.
- Gökçe, H. S., Can, Ö., 2009.** Pomza Agregasının Farklı Zamanlardaki Su Emmelerinin Hafif Betonun Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi, 12(4), 293-298.
- Gökçe, H.S., 2010.** Hafif Beton Üretiminde Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Güçlüer, K., 2011.** Uçucu külden üretilen silis dumanı katkılı gaz beton örnekler üzerine kür etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 83.
- Gül, R., Geçten, O., 1993.** Elazığ Ferrookrom İşletmesi Granüle Cürufunun Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 97-103.
- Gündüz, L., Saruışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, D., Çankıran, O., 1998.** Pomza Teknolojisi, cilt II, s.111, Isparta.
- Gündüz, L., Bekar, M., Şapcı, N., 2006.** Genleşen Killerin Doğal Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta.
- Gündüz, Ş., 2007.** Polistren agregalı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Hayde, J.S., 1918.** U.S. Patent No. 1,255,878, Serial No: 178,396, Kansas City, Missouri, USA.
- Hedjazi, S., 2019.** Compressive Strength of Lightweight Concrete, Department of Civil Engineering and Construction, Georgia Southern University, Statesboro, GA, USA.
- Herki, B.M.A., 2017.** Absorption Characteristics of Lightweight Concrete Containing Densified Polystyrene. Civil Engineering Journal, 3.
- Hirsch, T.S., 1962.** Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix And Aggregate Journal of the American Concrete Institute, USA.
- Hurley, J., 2003.** A UK Market Survey For Foam Glass, Research and Development Final Report, 114s, The Waste and Resource Action Programme, The Old Academy, 21 Horsefair, Banbury.
- Hüsem, M., Durmuş, A., 1993.** Karadeniz hafif agregaları ile üretilen taşıyıcı betonlar, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 1. Teknik Kongre, Gazi Magosa-Kuzey Kıbrıs, 72-97.
- İnt.Kyn.1, <http://poraver.com>, 12.11.2018**

Int.Kyn.2, <https://www.helenyapi.com>, 20.11.2018

- Jasaitienė, J., Ivanauskas, E., Daukšys, M., 2010.** Investigation of Lightweight Concrete with Porous Aggregates, Preceeding of the 2nd International Conference Advanced Construction, Kaunas University of Technology, November 2010, Kaunas Lithuania, 122-128.
- Jones, G.D., McMillan, W.J., Williams, C.N., 1979.** Foamed Glass And Vitreous Silica Pellets, Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development, vol. 18, pp. 64-69.
- Joseph, G., Ramamurthy, K., 2009.** Influence of fly ash on strength and sorption characteristics of cold-bonded fly ash aggregate concrete, Constr. Build. Mater., 23, 1862-1870.
- Kan A., Demirboğa R., 2009.** A novel material for lightweight concrete production, Cement and Concrete Composites, 31(7):489-495.
- Karakurt, C., Kurama, H., Topçu, İ.B., 2010.** Utilization of Natural Zeolite in Aerated Concrete Production, Cement and Concrete Composites, 32, 1-8.
- Kayali, O., Zhu, B., 2004.** Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Lightweight Aggregate High Strength Fly Ash Concrete, Construction and Building Materials, 19, 327-336.
- Ke, Y., Beaucor, A. L., Ortolá, S., Dumontet, H., Cabrillac, R., 2009.** Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials, 23, 2821-2828.
- Keskin, F.Ş., Yıldırım S.T., 2016.** Investigation of Utilization of Perlite and Bottom Ash for the Insulation Mortar by Using Design of Experiment via Taguchi Method, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 3(1).
- Kok, S.C., Min-Hong, Z., 2002.** Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, Cement And Concrete Research, No:32, 639-645.
- Korat, L., Ducman, V., Legat, A., Mirtic, B., 2013.** Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP), Ceram. Int., 39, 6997-7005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038>
- Khatib, J.M., Shariff, S., Negim, E.M., 2012.** Effect of Incorporating Foamed Glass on the Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams, World Applied Sciences Journal, 19(1), pp. 47-51.
- Khatib, J., Jefimiuk, A., Khatib, S., 2015.** Flexural Behaviour Of Reinforced Concrete Beams Containing Expanded Glass As Lightweight Aggregates, Slovak Journal Of Civil Engineering, Vol. 23, No: 4, 1-7.
- Khonsari, V., Eslami, E., Anvari, A., 2010.** Effect of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures Conference, Korea Concrete Institute, South Korea, January 2010, 1354-1360.
- Kralj, D., 2009.** Experimental Study of Recycling Lightweight Concrete with Aggregates Containing Expanded Glass, Process Safety and Environmental Protection, 87, 267-273.
- Kreidl, E., 1942.** Foam Glass, The Glass Industry, pp. 304-318.
- Kvande T., 2001.** Investigations of Some Material Properties for Structural Analysis of LECA Masonry, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Civil Environmental Engineering, Department of Bulding and Construction Engineering, PhD Thesis Norway, 252.

- Kurpińska, M., Ferenc, T., 2017.** Effect of porosity on physical properties of lightweight cement composite with foamed glass aggregate, Gdansk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Narutowicza Gdańsk, Poland, 11/12, 80-233.
- Limbachiya, M., Meddah, M., Fotiadou, S., 2012.** Performance of granulated foam glass concrete, Construction and Building Materials, 28(1), 759–768.
- Lo, T., Cui, H., Li, Z., 2004.** Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. Waste Manage 24:333–8.
- Lotov, V.A., Krivenkova, E.V., 2002.** Kinetics of formation of the porous structure in foam glass, Glass and Ceramics, vol. 59, pp. 89-93.
- Lynsavage, W., 1951.** Foam Glass, Ceramic Bulletin, 30(7), 21-22.
- Macedo, P.M.B., 2011.** Strong lower density composite concrete building material with foam glass aggregate, Patent 7695560, US. Available from Internet: <http://www.google.com/patents/US7695560>.
- Maier, L.P., Durham, S.A., 2012.** Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures, Construction and Building Materials, 29(3), pp. 428-437.
- Manevich, V.E., Subbotin, K.Y., 2008.** Mechanism Of Foam-Glass Formation, Glass and Ceramics, vol. 65, pp. 154-156.
- Mehta, P.K., Monteiro, J.M.P., 2005.** Concrete: Microstructure, Properties and Materials, 3rd ed., McGraw-Hill: New York, NY, USA, pp. 13–37.
- Mehta, P.K., Monteiro, J.M.P., 2006.** Concrete, Microstructure-Properties and Materials, Mc Graw Hill, (3rd ed.).
- Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J.M., 2013.** Fracture behavior of concrete containing limestone fines, Proceedings of the ICE Construction Materials Journal, 167(3), pp. 162-170.
- Mindess, S., Young, J.F., 1981.** Concrete, Prentice- Hall, New Jersey, 26p.
- Mix, P.E., 2005.** Introduction to Nondestructive Testing, a Training Guide, Published by John Wiley, Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Mohd, R.S., 1997.** First report research project on lightweight concrete, University Technology Malaysia, Skudai, Johor Bahru.
- Mueller, A., Sokolova, S.N., Vereshagin, V.I., 2007.** Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials. Construction and Building Materials, 22, 703-712.
- Nemes, R., 2006.** Lightweight concrete made with expanded glass aggregate, Budapest University of Technology and Economics, Summary of PhD Thesis, Budapest.
- Neville, A.M., 1975.** Properties of Concrete, Pitman publishing, 606-607, London.
- Neville, A.M., 1981.** Properties Of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical.
- Neville, A.M., 1996.** Properties of Concerete, Fourth and Final Edition, John Willey, G. Sons., 56-80.
- Neville, A.M., Brooks, J.J., 2010.** Concrete Technology (2nd ed.), Harlow, England: Prentice Hall.
- Neville, A.M., 2011.** Properties of Concrete, 5th edn. Pearson Education, Harlow, UK.
- Özçep, F., 2012.** Karabulut, S., Özgüven, B., Sanlı, O., Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri, Jeofizik Bülteni (Kasım), 11-24.

- Özel, M., 2011.** Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials, *Applied Thermal Engineering*, 31(17), 3854-3863.
- Petrella, A., Petrella, M., Boghetich, G., Petruzzelli, D., Calabrese, D., Stefanizzi, P., De Napoli, D., Guastamacchia, M., 2007.** Recycled waste glass as aggregate for lightweight concrete, *Construction Materials*, 160(4), 165-170.
- Pichór, W., Kamiński, A., Szoldra, P., Frac, M., 2019.** Lightweight Cement Mortars with Granulated Foam Glass and Waste Perlite Addition, *Hindawi Advances in Civil Engineering*, Volume 2019, Article ID 1705490, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2019/1705490>
- Polat, R., Demirboğa, R., Karakoç, M.B., Türkmen, I., 2010.** The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze–thaw cycles, *Cold Reg. Sci. Technol*, 60 (1), 51–56.
- Postacıoğlu, B., 1986.** Concrete, Volume: 1. Printer House of Press Technicians, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., 1987.** Beton, (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar), TKY Teknik Kitaplar Yayınevi, 32-76, İstanbul.
- Rashad, A.M., 2014.** Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement, *Constr. Build., Mater* 72, 340-357.
- Ries, J.P., Speck, J., Harmon, K.S., 2010.** Lightweight aggregate optimizes the sustainability of concrete, through weight reduction, internal curing, extended service life, and lower carbon footprint, *Concrete Sustainability Conference*, National Ready Mixed Concrete Association, Tempe, AZ.
- Ritola, J., Vares, S., 2008.** Recycling of waste glass in foam glass production (in finnish). Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2458. pp. 51.
- Rossignolo, A.J., Agnesini, M.V.C., 2001.** Mechanical Properties of Polyme Modified Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Research* No:32, 329-334.
- Rumsys, D., Spudulis, E., Bacinskas, D., Kaklauskas, G., 2018.** Compressive strength and durability properties of structural lightweight concrete with fine expanded glass and/or clay aggregates, *Peer-reviewed version available at Materials*, 11, 2434. doi:10.20944/preprints201811.0261.v1
- Sağlık, A., 2005.** Beton ve Kimyasal Katkı Teknolojisinde Yeni Gelişmeler ve Standartlar, TMMOB, KMO ve İMO, Yapılarda Kimyasal Katkılar Semp, Ankara, 83-117.
- Sarı, D., Paşamehmetoğlu, A.G., 2005.** The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete, *Cement And Concrete Research*, 35(5), 936-942.
- Šeputytė-Jucikė, J., Sinica, M., 2016.** The Effect of Expanded Glass And Polystyrene Waste on The Properties of Lightweight, Aggregate Concrete, *Engineering Structures and Technologies*, 8(1), 31–40.
- Sönmez, R., Demir, M., Ekim, H., 2004.** Strafor Agregalı Hafif Beton.
- Solomon, D., Ros, M., 1996.** Foamed Glass Manufacture, US Patent: 5,516,351, Informative patent on the use of foaming agents and percentage to use for desired properties.
- Shirley, D.E., 1975.** Introduction to Concrete, Cement and Concrete Association, London.
- Shutov, A.I., Yashurkaeva, L.I., Alekseev, S.V., Yashurkaev, T.V., 2007.** Study of the structure of foam glass with different characteristics, *Glass and Ceramics*, 64 (9), 297-299.

- Spratt, B. H., 1975.** An Introduction to Lightweight Concrete, Cement and Concrete Association, Wexham Springs.
- Spiridonov, Y.A., Orlova, L.A., 2003.** Problems of foam glass production, Glass and Ceramics, vol. 60, pp. 313-314.
- Sturup, V.R., Vecchio, R.J., Caratin, H., 1984.** Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength, ACI SP 82-11, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 201.
- Şapcı, N., 2013.** Doğal Kayaç Bileşenli Genleşmiş Cam Agregası Üretimi ve Endüstriyel Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Taşdemir, M. A., 1982.** Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, İTÜ İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Taşdemir, C., 2003.** Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 427, s.57 – 61.
- Tekinsoy, M.A., 1984.** A Research On The Using Possibilities of Concrete Briquette Supplemented Rice Husk for Farm Buildings at Çukurova Region In Turkey, Unpublished Assoc.Prof.Thesis, Çukurova University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Engineering, Adana.
- Terzic, A., Pezo, L., Mitic, V., Radojevic, Z., 2015.** Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, Ceram. Int., 41, 2714–2726. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.086>
- Topçu, İ.B., Canbaz, M., Karabulut, C., 2006.** Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı, Polietnik Dergisi, 9, (1), 59-63.
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., 2007.** Properties Of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete, Building and Environment, 42, 4108-4116.
- Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L., 2000.** Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme, 94-103, Literatür Yayınevi, İstanbul.
- TS 3452, 1988.** Beton Kimyasal Katkı Maddeleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2511, 1997.** Taşıyıcı Betonların Karışım Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002.** Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- TS EN 206-1, 2002.** Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- TS 706 EN 12620, 2009.** Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012.** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Elleme metodu
- Ulus, İ., 2007.** Investigation to Production of High Strength Light Weight Concrete with Using Raw Perlite Aggregate, PhD Thesis, Ataturk University, Erzurum/Turkey.
- Urhan, S., 1993.** Hafif ve çok hafif betonların karakteristik özellikleri ve teknik kapasiteleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 369, 27s.
- Ujhely, J., 1983.** The Letter from Hungarian Institute for Building Science. Budapest. Uluata, A.R.1981.Concrete Materials and Concrete, (Lecture Notes) Atatürk University, Agricultural Faculty, Department of Agricultural Engineering, Erzurum, Turkey.

- US Patent 7695560, 2011.** Strong lower density composite concrete building material with foam glass aggregate.
- Uyan, M., Özkul, H., 1985.** Beton Katkı Maddeleri ve Türkiye’de Durumu, Akdeniz Üniversitesi, Isparta Müh. Fak., II. Mühendislik Haftası Bildirileri.
- Vaganov, V., Popov, M., Korjakins, A., Šahmenko, G., 2016.** Effect of CNT on Microstructure and Mineralogical Composition of Lightweight Concrete with Granulated Foam Glass, *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 172, 1204 – 1211.
- Wischers, G., Manns, W., 1974.** Technology of structural lightweightconcrete. *Lightweight Aggregate Concrete Technology and World Application*, Cembureau, Paris, 23-35.
- Yağanoğlu, V., 1994.** Tarımsal Yapılarda Kullanılan Bazı Isı Yalıtım Malzemelerinin Isı İletkenliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* , Erzurum, 25, 19s.
- Yağanoğlu, A.V., Okuroğlu, M., Örüng, İ., Şahin, S., 1999.** The Possibilities of Using Thermal Isolated Materials Supplemented Different Plant Wastes in Farm Buildings, *7th National Agricultural Engineering Congress*, Nevşehir, Turkey, pp.340-350.
- Yıldırım, M.Ş., Biçer, Y., Yıldız, C., 1993.** Yapı Malzemesi Olarak Styropor İçeren Betonların Fiziksel Özellikleri Üzerine Bir Çalışma, *Isı Bilimi ve Tekniği 9. Ulusal Kongresi*, Elazığ, 1, 34-37.
- Yıldırım, H., Yorulmazel, V., Ardaç, E., 1996.** Süper ve Normal Akışkanlaştırıcı Katkıların Çimento ile Uyuşumu, *İMO, 4. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 25-33.
- Yıldırım, S.T., Kiraz, E., 2013.** Investigation of binders composition and curing condition of masonry samples with fly ash and expanded perlite. *Cement Wapno Beton* 18.80, 3, 169-177.
- Yu, Q.L., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H., 2013.** Development of cement-based lightweight composites, Part 1: mix design methodology and hardened properties, *Cement Concrete Comp.*, 44, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.030>
- Yu, R., Van Onna, D.V., Spiesz, P., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H., 2016.** Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass, *Journal of Cleaner Production*, 112, 690-701.
- Zakrevskaya, L., Vaganov, V., Hempel S., Mechtcherine, V., Popov, M., 2015.** Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamlglass, *2nd International Conference on Innovative Materials Structures and Technologies*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 96.
- Zhang, M.H., Gjorj, O.E., 1991.** Mechanical Properties of High Strenth Lightweight Concrete, *ACI Materials Journal*, 88(3), 240-247.
- Zheng, G., Jing, Y., Huang, H., Gao, Y., 2010.** Application of improved grey relational projection method to evaluate sustainable building envelope performance, *Applied Energy*, 87(2), 710–720.
- Zhu, C., Niu, J., Li, J., Wan, C., Peng, J., 2017.** Effect of Aggregate Saturation Degree on the Freeze–Thaw Resistance of High Performance Polypropylene Fiber Lightweight Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 145, 367p.

ÖZGEÇMİŞ

Sema GÜLENGÜL 1993 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise tahsilini Elazığ'da tamamladıktan sonra, 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünde lisans eğitime başlamış ve 2015 yılında mezun olmuştur. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Eğitim Fakültesi tarafından verilen Pedagojik Formasyon Eğitimini tamamlamıştır. 2017 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitime başlamıştır. 2018-2019 yılları arasında Elazığ'da bulunan ASILGAZ LTD. ŞTİ.'nde Kimya Mühendisi olarak çalışmıştır.

