

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PERFORMANSLI TAŞIYICI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE POMZA
AGREGALARIN KULLANILABİLİRLİĞİ, MEKANİK BÜYÜKLÜKLERİ VE
UYGULAMA KRİTERLERİ

CİHAN YOLCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. ZEHRA CANAN GİRGİN

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI TAŞIYICI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE POMZA
AGREGALARIN KULLANILABİLİRLİĞİ, MEKANİK BÜYÜKLÜKLERİ VE
UYGULAMA KRİTERLERİ**

Cihan YOLCU tarafından hazırlanan tez çalışması tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ercan YÜKSEL
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı Mimarlık Anabilim Dalında hazırlanan bu Yüksek Lisans Tezi kapsamında, doğal hafif agrega kullanılarak yüksek dayanımlı yüksek performanslı betonun üretilebilirliği konusu kuramsal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda farklı karışım tasarımları denenmiş, arzu edilen mekanik büyüklüklere bağlı olarak en uygun karışım tasarımları ortaya konmuştur.

Tez çalışmam süresince güler yüzlülüğü ile bana destek olan, sabrı ile çalışma disiplinine girmemi sağlayan, düzenlemeleri ile çalışmamın gerçekleşmesini sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Zehra Canan Girgin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma-geliştirme çalışmalarımın gerçekleştirilmesi konusunda sağladıkları deneysel destekten dolayı Nuh Beton AR-GE Müdürü Emre Fenerci ve Deniz Sayım'a teşekkür ederim.

Numunelerin üretim ve testlerindeki çabalarından dolayı Mustafa Yapıncak ve Berati Karaduman'a teşekkür ederim.

Deneyler için malzeme temini konusunda Soylu Grup'dan Levent Soylu ve Osman Topçu'ya, ayrıca KAOLIN Endüstriyel Mineraller San.Tic.A.Ş. ve Elkem firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşantım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hem yüksek lisans yapmam konusunda, hem de üniversite eğitimim boyunca bana destek olan sevgili kız arkadaşım Ece Naz Muti'ye sevgilerimi sunarım.

Mayıs, 2018

Cihan YOLCU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
HAFİF AGREGA KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ	5
2.1 Geçmişten Günümüze Hafif Agregalı Beton ve Uygulamaları.....	6
BÖLÜM 3	
HAFİF AGREGA TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIMI	15
3.1 Hafif Agregası ve Teknik Özellikleri	16
3.2 Yapay Hafif Agregası Teknolojileri ve Kullanımı	18
3.3 Pomza (Bims) Tanımı ve Karakteristik Özellikleri.....	22
3.3.1 Pomzanın Oluşumu.....	25
3.3.2 Dünyada Pomza Rezervleri ve Pomza Kullanımı.....	26
3.4 Doğal Hafif Agregalı Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi	28

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA	31
4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	31
4.2 Karışım Tasarımı ve Numune Üretimi.....	36
4.3 Yapılan Deneyler ve Değerlendirmeleri.....	38
4.3.1 Mekanik Karakteristikler.....	38
4.3.2 Klorid Geçirimsizliği.....	42

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGE LİSTESİ

D_{maks}	Agrega boyutu
E	Elastisite modülü
f_b	Basınç dayanımı
R	Korelasyon katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
AR-GE	Araştırma Geliştirme
ASTM	American Society for Testing and Materials
ESCSI	Expanded Shale, Clay and Slate Institute
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
NLC	Normal ve Hafif Agregalı Beton
NC	Normal Agregalı Beton
LC	Hafif Agregalı Beton
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Pantheon ve Pompeii'deki amfityatro	6
Şekil 2. 2a J.L.Lambot'un Beton Kanosu.....	6
Şekil 2. 2b Beton Kano Yarışması	6
Şekil 2. 3 SS Selma	8
Şekil 2. 4 Çökme Konisi.....	8
Şekil 2. 5 Beton gemi ve donatı yerleşimi	8
Şekil 2. 6 Southwestern Bell Telephone Company Building ve Chase Park Plaza	9
Şekil 2. 7 Oak Tower	9
Şekil 2. 8 Oakland Bay Bridge	10
Şekil 2. 9 Marina City Towers	10
Şekil 2. 10 Coronado Bridge	11
Şekil 2. 11 One Shell Plaza	11
Şekil 2. 12 Dulles Airport	12
Şekil 2. 13 Bank of America Corporate Center	12
Şekil 2. 14 Heidrun Offshore Oil Platform	13
Şekil 2. 15 Wellington Stadium	13
Şekil 2. 16 New Benicia Martinez Bridge.....	14
Şekil 3. 1 Çelik kirişte ve kolonda püskürtme beton uygulaması.....	16
Şekil 3.2 Kompozit döşemede normal agregalı-hafif agregalı betonda, püskürtme beton kaplaması olmadan yangın dayanımı süre karşılaştırması	16
Şekil 3. 3 Hafif agregaların yoğunluk ve dayanıma göre sınıflandırılması.....	17
Şekil 3. 4 Performans ilişkili basınç dayanımı-elastisite modülü değişimleri.....	18
Şekil 3. 5 a) Doğal arduvaz kayaç formu b) Genleştirilmiş arduvaz agregası.....	18
Şekil 3. 6 Boyutlarına göre tasnif edilmiş genleştirilmiş kil agregalar	19
Şekil 3. 7 Genleştirilmiş a) Şist b) Arduvaz c) Kil hafif agrega tipleri	19
Şekil 3. 8 Döner fırın ile genleştirilmiş şist, arduvaz ve kil hafif agrega üretimi.....	20
Şekil 3. 9 Pantheon ve Pompeii'deki amfityatro	22
Şekil 3. 10 Asidik pomza ve bazik pomza	23
Şekil 3. 11 Volkanik aktivite ve pomza oluşumu	25
Şekil 3. 12 National Park volkanik krater gölü ve Santorini'deki pomza oluşumları.....	26
Şekil 3. 13 Türkiye'deki pomza kaynakları.....	26
Şekil 3. 14 Türkiye'deki pomza kaynaklarının yerleri ve miktarları.....	26
Şekil 3. 15 Ülkelere göre pomza üretimi	27

Şekil 3. 16	Hafif agregalı ve normal agregalı betonlarda basınç dayanımı-elastisite modülü-su/bağlayıcı madde oranı değişimleri	29
Şekil 3. 17	Doğal bims ve yapay geliştirilmiş agregalar için çimento, bağlayıcı miktarı, su/çimento oranı ve silindir basınç dayanımı arasındaki ilişkiler.....	30
Şekil 4. 1	Kullanılan bağlayıcı malzemeler a) Çimento b) Silis dumanı c) Yüksek fırın cürufu d) Metakaolin	33
Şekil 4. 2	Agregalar a) No1 pomza b) No 1 mıcır c) Taş tozu d) Dağ kumu.....	34
Şekil 4. 3	Toz hiperakışkanlaştırıcı	34
Şekil 4. 4	Fırın kuru No I pomzanın süre-su emme ilişkisi	35
Şekil 4. 5	Hafif agreganın yakından toplu, tekli ve SEM görünümleri	36
Şekil 4. 6	Hafif agregalı normal ve kendiliğinden yerleşen beton numuneler.....	37
Şekil 4. 7	Basınç dayanımı-çimento miktarı değişimleri	38
Şekil 4. 8	Basınç dayanımı-toplam bağlayıcı miktarı değişimleri	39
Şekil 4. 9	Hava kuru yoğunluk-toplam bağlayıcı miktarı değişimleri.....	39
Şekil 4. 10	LC test sonuçlarının elastisite modülü-basınç dayanımı grafiğindeki konumu	40
Şekil 4.11	LC test sonuçlarının normal ve pomzalı betonların basınç dayanımı-elastisite modülü değişimindeki konumu.....	40
Şekil 4.12	Pomza ve yapay hafif agregalar için çimento miktarı, su/bağlayıcı oranı, silindir basınç dayanımı ve hava kurusu yoğunluk arasındaki ilişkiler. (% s.d: silis dumanı/çimento oranı, dairesel semboller pomza agregalı, köşeli olanlar yapay agregalı olan verileri tanımla-maktadır).....	41
Şekil 4.13	ASTM C1202-12 Standardına göre deney düzeneği.....	43
Şekil 4.14	Deney sonrası tipik görünüm (Ortadaki numune normal agregalıdır).....	43

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	Yapay hafif agregaların dünyadaki tipik bazı uygulamaları..... 21
Çizelge 3. 2	Asidik ve bazik pomzalara ait tipik kimyasal bileşimler 23
Çizelge 3. 3	Pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri 24
Çizelge 4. 1	Çimento, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun analiz sonuçları 32
Çizelge 4. 2	Silis dumanı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları 33
Çizelge 4. 3	Deneylerde kullanılan normal ve hafif agregalar 35
Çizelge 4. 4	Deneylerde kullanılan hafif agreganın karakteristik büyüklükleri 36
Çizelge 4. 5	Klorid iyon geçirgenlik sınıflandırması 42

**YÜKSEK PERFORMANSLI TAŞIYICI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE POMZA
AGREGALARIN KULLANILABİLİRLİĞİ, MEKANİK BÜYÜKLÜKLERİ VE
UYGULAMA KRİTERLERİ**

Cihan YOLCU

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN

Bu çalışmada, yurt dışında inşaat sektöründe yıllardır başarıyla kullanılan yapay hafif agregalardan ilham alınarak; Türkiye’de zengin rezervi bulunan doğal hafif agrega çeşidi olan pomza (bims) için, yapay hafif agregalara benzer dayanım ve performans düzeylerinin sağlanabilirliğini ortaya koyabilmek amacıyla kapsamlı bir deneysel araştırma çalışması yürütülmüştür. Bu deneylerde; pomza kullanılarak özellikle yüksek dayanımlı yüksek performanslı beton üretilebilirliği araştırılmıştır. Atıl durumda kalan ve inşaat sektöründe çoğunlukla yalıtım amaçlı (hafif blok, sıva vb) kullanılan pomzaya hak ettiği değerin verilmesi, böylece hem inşaat sektörüne yenilikçi bir ürün katılması hem de ülke ekonomisine pozitif yönde katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Pomza kullanımı ile, taşıyıcı sistem öz ağırlığı hafiflerken deprem yükleri de azalacaktır böylelikle, yapı sisteminin daha ekonomik boyutlandırılması mümkün olacaktır. Aynı zamanda, prefabrikasyon sektöründe öngermeli/ardgermeli elemanların üretiminde de kullanılabilirler. Ayrıca betona sağladığı içsel kür özelliği nedeniyle, taşıyıcı elemanın iç yapısı dış etkilere karşı çok daha dayanıklı hale gelecek, özellikle klorid geçirimsizliğinin önemli olduğu sanat yapıları daha ekonomik olarak inşa edilebilecektir. Hafif beton ile üretilen ön üretimli elemanlarda taşıma maliyetleri de olumlu yönde etkilenecektir.

Pomza agregaların yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılabilirliğinin belirlenmesi için bir Hazır Beton firmasının AR-GE Laboratuvarında farklı

karışımlar ile, Nisan 2017-Nisan 2018 döneminde bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Normal agregalı beton ile karşılaştırmalı olarak; çökme, yayılma, birim ağırlık, su emme, klorid geçirimsizliği gibi fiziksel testlerin yanısıra küp ve silindir numuneler üzerinde basınç ve elastisite modülü mekanik büyüklük testleri de yapılmıştır. Tez kapsamında deneylerden elde edilen sonuçlar, literatürdeki yapay hafif agregalı olanlar ile birlikte değerlendirilmiş, uygun koşullar sağlandığında yapay hafif agregalarınkine denk bir dayanım ve performans ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Pomza kullanılarak, 40-60 MPa silindir dayanımı, 20 GPa'ın üzerinde elastisite modülü ve düşük düzey klorid geçirgenliği olarak tanımlanan 1000 Coulombs'un çok altında değerlere ulaşılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ulusal literatürde bir ilk niteliği taşıırken, uluslararası literatürde de kendine yer bulacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın İlk Bölümünde, literatür özeti, amaç ve izlenen yöntem aktarılmıştır.

İkinci Bölümde; hafif agrega ve hafif agregalı betonun tarihçesi hakkında bilgi verilmiş, ayrıca hafif agregalı beton teknolojileri ve mimari uygulamalar incelenmiştir.

Üçüncü Bölümde; hafif agrega tipleri ve teknik özellikleri, yapay hafif agrega teknolojileri ve kullanımının yanısıra; pomzanın oluşumu, Türkiye'de ve dünyada üretim-tüketim ve rezerv durumu, karakteristik özellikler, tüketim biçimleri ve literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

Dördüncü Bölümde; deneylerde kullanılan malzemeler ve karakteristik özellikleri, karışımlar, uygulanan testler ve sonuçları tablolar halinde ve ayrıca grafiksel karşılaştırmalar ile sunulmuştur.

Beşinci Bölümde; genel bir değerlendirme yapılarak araştırmadan elde edilen sonuçlar ve bunların ışığında öneriler aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: taşıyıcı hafif beton, doğal hafif agrega, pomza, yüksek dayanım, yüksek performans

**USABILITY, MECHANICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION CRITERIA
OF PUMICE AGGREGATES IN THE PRODUCTION OF HIGH PERFORMANCE
LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE**

Cihan YOLCU

Department of Architecture

Master Thesis

Advisor: Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

This research study is inspired by artificial lightweight aggregates that have been used successfully in the construction industry abroad for many years. A comprehensive experimental research on lightweight concrete with pumice aggregate, which has wide range reserves in Turkey, was conducted in order to reveal the real performance of pumice aggregate and the availability of similar performance level comparing with using lightweight artificial aggregate. In these experiments; pumice has been investigated especially for the production of high strength high performance concrete. It is aimed to give value to pumice aggregate, which is in the unproductive situation and mostly used for insulation purposes (light block, plaster, etc.) in the construction sector, so as to contribute both to the construction sector with an innovative product and to contribute to the country's economy positively.

With the use of the pumice aggregate, the earthquake loads will be reduced with decreasing dead weight of the structural system, which will enable more economical dimensioning of the structural system. It can also be used in the production of the members in the precast sector. In addition, due to the internal curing in concrete, the structural system members will be more durable to environmental conditions, especially

civil structures where chloride impermeability is important. In precast elements produced with light-weight concrete, the transportation costs will be affected positively as well.

A series of tests were carried out in April 2017-April 2018 with different mixes in R&D Laboratory of a Ready-Mixed Concrete Firm to determine the usability of pumice aggregates for high performance and high strength concrete production. Compared with normal aggregate concrete; physical tests such as slump, flow, unit weight, water absorption, chloride impermeability; and mechanical characteristic tests such as compressive tests on cubes as well as elastic modulus test on cylinders. The results obtained from the experiments have been evaluated together with those ones of artificial lightweight aggregates in the literature. It is realized that when the proper conditions are satisfied, the strength and performance equivalent to those ones of artificial lightweight aggregates can be achieved. Using pumice aggregate, 40-60 MPa cylinder strengths, elastic modulus above 20 GPa and chloride permeability less than 1000 Coulombs have been reached. While the results obtained in this study are the first one for the national literature, it is thought that it will find its place in the international literature.

In the First Chapter of this Thesis, the literature survey, the purpose and method of this study used are given.

In the Second Chapter; historical development of lightweight aggregate types and technologies as well as architectural applications are handled.

In the Third Chapter; lightweight aggregate types and technical properties, artificial lightweight aggregate technologies and their use; pumice production- consumption and reserves in the world and Turkey, and the literature are examined.

In the Fourth Chapter; the materials used in the experiments and their characteristics, mixtures, tests and results are presented in tabular form and also in graphical comparisons.

Keywords: structural lightweight concrete, natural lightweight aggregate, pumice, high strength, high performance.

1.1 Literatür Özeti

20.yüzyılın başlarından itibaren yapay hafif agreganın üretilmesi ve gitgide yaygınlaşması; antik zamanlardan beri kullanılan doğal hafif agregaların uygulama alanlarının daralmasına neden olmuştur. Yapay hafif agregaların betonda kullanımı ile, betonarme veya ön üretilmiş beton elemanlardan oluşturulan yapı sistemlerinde ağırlıktan tasarruf sağlanırken, istenen performans kriterleri de daha kolaylıkla yerine getirilebilmektedir. Doğal hafif agrega kullanımına ilginin azalması, araştırma ve üretimin düşük dayanımlı taşıyıcı olmayan yapı elemanlarına (blok vb) doğru değişimine neden olmuştur.

Türkiye'nin önemli bir doğal kaynağı olan pomza, iri agrega olarak ancak bloklarda değerlendirilmektedir. Bu çalışmada pomza (bims) ile, dünyadaki örnekler ışığında, yüksek performanslı/yüksek dayanımlı beton elemanların üretilebilirliği ve taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılabilirliği yorumlanmaktadır. Yararlanılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

- Fiorato, A.E., (1981). "Inspection Guide For Reinforced Concrete Vessels" Final Report, Portland Cement Association, Commentary, U.S. Department of Transport. Vol.2, No. CG-M-11-81.
- Elmastaş, N., (2012). "Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı)". Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi 5(23):197-206.

- Gündüz, L. ve Şapıcı N., (2005). "Türkiye Pomza Madenciliği, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (gelişen yeni bir sektör)", 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
- Ries, J.P., Speck, J. and 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, 13-15 Nisan, Arizona.
- Fernandez, J. F., Bettencourt, T.N. ve Helene P., (2008) "A Review of the Application of Concrete to Offshore Structures", ACI Special Publication, 253: 393-408.
- McSavaney, L.G., (2002) "The Wellington Stadium, New Zealand's First Use of High Strength Lightweight Precast Concrete", Expanded Shale, Clay and Slate Institute, Utah, publication no 4800.
- Girgin, Z.C., (2017). "Hafif Agregalı Yüksek Performanslı Beton ve Prefabrikasyon Uygulamaları". Beton Prefabrikasyon, 121-122: 5-12.
- Khaloo, A. ve Kim, N., (1999) "Effect of Curing Condition on Strength and Elastic Modulus of Lightweight" ACI Materials Journal, 96: 485-490.
- ACI 213R-03, (2003). Guide For Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Byard, B.E., Schindler, A.K. ve Barnes R.W., (2010) "Cracking Tendency of Lightweight Concrete in Bridge Deck Applications" Proceedings of the Concrete bridge conference, Phoenix, AZ.
- Efe, T., (2011). Edremit Travertenleri ve Van Gölü Kuzeyinde Yüzeyleyen Pomzaların Çimento Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Gündüz, L., (2008). "The Effects of Pumice Aggregate/Cement Ratios on The Low-Strength Concrete Properties", Construction and Building Materials 22: 721-728.

- Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N., Seçer, T., (1997) "Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları", 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim 1997, İzmir, Türkiye.
- Gündüz, L., Davraz, M., Ortaçşme, H., (2005), Bimsblok ve Isı Yalıtım Özellikleri, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi Bildirimler Kitabı, Cilt 1, Nevşehir.
- Hossain, K.M.A., (2004), "Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete". Cement and Concrete Research, 34: 283-291.
- Ji, T., Zhang, B., Zhuang Y.Z. ve Wu H.C., (2015) "Effect of Lightweight Aggregate on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete". ACI Materials Journal 112(3): 355-364.
- Green, S.M.F., Brooke N.J., McSaveney L.G. ve Ingham, J.M., (2001) "Mixture Design Development and Performance Verification of Structural Lightweight Pumice Aggregate Concrete". ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 23 (8): 1211-1219.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, günümüzde, yalnız normal dayanımlı betonlarda değil, yüksek dayanımlı yüksek performanslı betonlarda da uygulama alanı bulan yapay hafif agrega yerine; yıllardır yapısal kullanım açısından gözardı edilmiş doğal zenginliğimiz olan pomza (bims) tipi hafif agreganın kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu çalışmada, normal dayanımın yeterli olduğu yapılara ilave olarak, 20 GPa'nın üzerinde elastisite modülü gerektiren öngerme/ ard-germe uygulamalarında da pomza agregalı betonun uygulanabilirliği incelenmiştir. ASTM ve ACI Yönetmelikleri ile literatürdeki deneyler gözönüne alınmak suretiyle, pomza ile muhtelif karışımlar üretilmiştir. Bu karışımlar ile yoğunluk, mekanik karakteristikler, klorid geçirimsizliği, kapilerite gibi hususlar irdelenmiştir.

1.3 Hipotez

Uygun özelliklerde doğal pomza (bims) hafif agregası kullanılarak, hafifleme sağlanmasının yanında, yapay hafif agrega kullanılan betonlara eşdeğer dayanım ve

performans sağlanabileceği 6ng6r6lmektedir. Bu hipotezin gerçekliği muhtelif karışımlar ile yapılacak deneylere araştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel ve grafiksel y6ntemler ile sunulmuş ve değerlendirmeler yapılmıştır.



HAFİF AGREGA KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ

Dünyada hafif agrega kullanımı Babil'in inşasına kadar uzanmaktadır. Antik Yunan ve Roma'da doğal hafif agrega olan Pomza (Bims)¹, hem hafif agrega olarak hem de öğütülerek hidrolik bağlayıcıya katılmış; amfiteyatro, tapınak, su kemeri gibi muhtelif yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmıştır.

Günümüzde en yaygın kullanılan hafif agregalar, doğal malzemelerin fırınlarda yüksek sıcaklıkta geliştirilmesi ile üretilen yapay hafif agregalar olup; ilk üretim çalışmaları 1900'larda başlamış, ilk ticari kullanımları ise I.Dünya Savaşı sırasında, çelik kıtlığı nedeniyle, "ferrocement" ticari gemilerin üretimi ile olmuştur [1]. Savaş sırasında, betonda ağırlık ve dayanım ile ilgili koşulları sağlayan ilk yapay hafif agreganın (genleştirilmiş şist tipi) geliştirilmesi beton gemilerin üretimine ivme kazandırmıştır. Savaş sonrası beton gemi imalatı durmuş; II. Dünya savaşı sırasında ise, ticari gemi üretimi için yeterli miktarda çelik bulunamaması sonucunda yeniden beton gemiler gündeme gelmiştir. Özellikle geliştirilmiş şist ve arduvaz tipi yapay hafif agregaların 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 katmıştır.

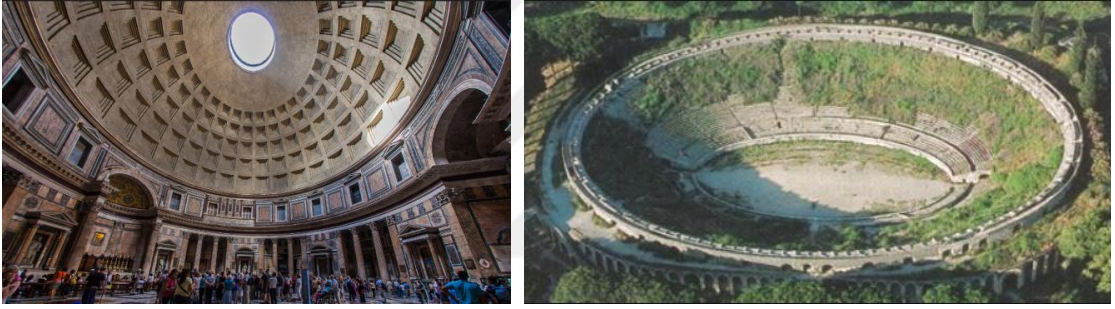
Tarihsel süreçte önemli işlevi olan pomza, günümüzde inşaat sektörü açısından yapıların taşıyıcı sistem elemanlarında yeterince değerlendirilememektedir. Türkiye'de,

¹ İri hafif agrega Almanca'da *Bims*, İtalyanca'da *Ponza*, İngilizce'de ise *Pumice* olarak isimlendirilmektedir. Türkçe'de bims ve pomza (ponza) terimleri kullanılmaktadır.

zengin pomza rezervine (2.6 milyar m³) [2] rağmen, nitelikli ve boşluk yüzdesi daha az olan pomzalar bile betonarme taşıyıcı sistem tasarımında yer almamakta, bu kaynaklar büyük ölçüde bölme duvar bloklarının imalatında kullanılmaktadır.

2.1 Geçmişten Günümüze Hafif Agregalı Beton ve Uygulamaları

Gözenekli yapısı nedeniyle hafifliği ve dış etkenlere karşı yüksek dayanıklılığı nedeni ile volkanik kökenli pomza en eski yapı malzemelerinden biridir. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde pomzanın; liman yapısı, amfi tiyatro, tapınak, su kemeri, hamam, mahzen ve konut inşaatlarında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir [3]. Port of Cosa (M.Ö.273), Roma'da Pantheon (M.S.126) ve Pompeii'deki amfitiyatro bunlara örnek olarak verilebilir (Şekil 2.1). Yığma yapı kategorisindeki Pantheon kubbesinin 43 m açıklığı, karışımda pomza kullanılarak kubbenin hafifletilmesi ile mümkün olmuştur.



Şekil 2.1 Pantheon [4] ve Pompeii'deki amfitiyatro [5]

Donatılı-beton gemilerin başlangıcı, 1848'de Fransız J.L.Lambot'un çalışmalarına dayanmaktadır. Demir çubuklar üzerine kümes teli ile hasır oluşturduktan sonra, üzerini çimento harcı ile sıvayarak ilk beton kanoyu inşa etmiştir (Şekil 2.2a), günümüzde beton kano yarışmaları her sene düzenlenmektedir (Şekil 2.2b).



Şekil 2.2 a) J.L.Lambot'un beton kanosu [6] b) Beton kano yarışması [7]

20.yüzyıla geldiğimizde; hafif agreganın betonda kullanımının, yük gemileri ile başladığı görülmektedir. Genleştirilmiş hafif agrega üretimi üzerine ilk çalışmalar 1908 yılında başlamıştır, ancak daha yaygın kullanımı I.Dünya Savaşı sırasında ticari gemi üretimi ile olmuştur. I.Dünya Savaşı devam ederken çeliğin askeri amaçlar ile kullanılması, ticari gemiler için çeliğin dışında malzeme arayışını beraberinde getirmiştir. N.K. Fougner'in tasarladığı 25 m boyundaki ilk beton mavnası Norveç'te 1917'de denize indirilmiştir. Bu sırada, A.B.D'de de beton gemi üretimi fikri benimsenmiş, Fougner'in firması ile 24 beton gemi için anlaşma yapılmıştır. Ancak ağırlık önemli bir sorun oluşturmuştur, diğer taraftan bazı doğal hafif agregalar kullanılması durumunda da düşük dayanım ve yüksek geçirgenlik nedeniyle istenen şartlar sağlanamıyordu. J.Hayde,yaptığı çalışmalar sonucunda genleştirilmiş şist tipi hafif agreganın patentini almıştır (1918). Bu gelişme, doğal hafif agregalara kıyasla istenen performans düzeyine daha kolay erişilebilen; üretimi, dane biçimi ve boyutu kontrol altında olan, daha yüksek dayanım elde edilebilen yapay agregayı uygulama alanına sokmak açısından önemli bir basamak olmuştur. Proje kapsamında donatılı-hafif agregalı betondan 22 gemi üretilmiştir. En büyüğü 1919'da denize indirilen 130 m ve 6340 tonluk SS Selma idi (Şekil 2.3). 1917-1920 döneminde normal agregalı yapılarda beton dayanımı yalnız 17 MPa iken, hafif agregalı-donatılı beton gemilerde 1760 kg/m³ yoğunluk ile 38 MPa basınç dayanımı ve 23 GPa elastisite modülü elde edilmiştir [8]²; geminin inşası aynı zamanda çökme konisi testinin (slump testi) geliştirilmesinde de önemli bir adım olmuştur (Şekil 2.4).

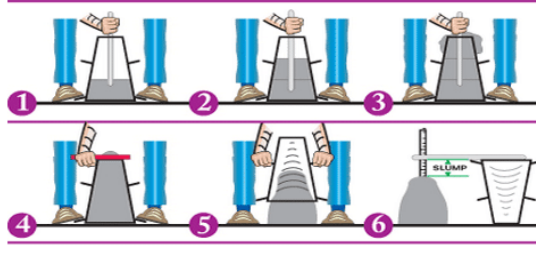
Bu gemiler ile sadece kuru yük değil aynı zamanda petrol taşımacılığı da yapılmış, betona herhangi bir zararı izlenmemiştir. Kaliteli inşa edilmiş beton gemi performansının, çelikten gemiler ile eşdeğer düzeyde olabileceği ifade edilmiştir³ (Şekil 2.5).

² SS Selma'nın gövde kalınlığı alt kısımda 10 cm, yanlarda 12 cm idi. Okyanusta geçen 34 yıldan sonra, 1953'de, gövdesinden alınan karotlar üzerinde laboratuvarında yapılan tuz çevrimleri sonucunda, pas payı sadece 1.6 cm olmasına rağmen, tuzun ancak 6 mm derinliğe geçebildiği görülmüştür. Ayrıca donatılarda korozyon oluşmadığı da gözlenmiştir.

³ Gemi gövdesinde çelik yerine hafif beton kullanımının; gemi gövdesi ve güvertesindeki titreşimlerin çeliğe kıyasla daha az olması, yapım süresinde kısımla, işletme ömrü giderlerinde azalma, dayanım ve dış etkilere karşı dayanıklılığının çok iyi olması gibi avantajları sözkonusuydu. Bu avantajlarına karşılık, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren özellikle büyük yük kapasitesine sahip, uzun mesafede seyir eden gemilerin inşasında; gemi toplam ağırlığının çelik olana kıyasla daha fazla olması, daha büyük motor seçimi ve özellikle daha az yük taşıma kapasitesi nedenleri ile çelik malzeme daha ön plana çıkmıştır.

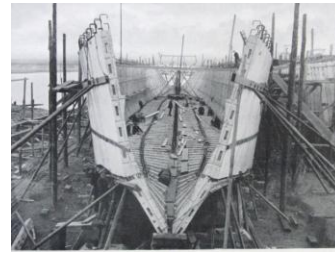
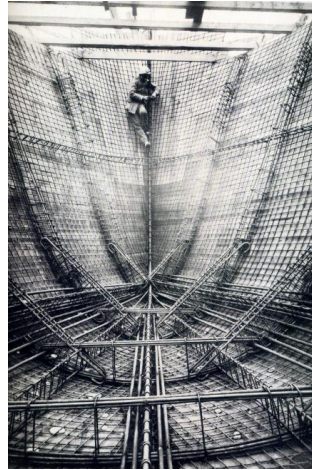


Şekil 2.3 SS Selma [9]



Şekil 2.4 Çökme konisi [10]

Savaşın⁴ sona ermesi ile ticaret filoları yaygınlık kazanmış, beton gemi yapımı 1922 itibarı ile durmuş ve genişletilmiş şist agreganın ticari kullanımı başlamıştır. 1919'da, yüksek yapılarda ağırlık ve donatı miktarının azaltılması amacı ile hafif agreganın kullanılması teklif edilmiştir⁵.



Şekil 2.5 Beton gemi ve donatı yerleşimi [11-13]

⁴ Gemiler, kıç taraf ve civarına düşen bombalardan kalıcı hasar almamıştır. Bazı gemilerden daha sonra dalgakıran olarak da yararlanılmıştır. 90 yıl sonra betondan alınan karotlarda dayanımın 60 MPa'a ulaştığı görülmüştür.

⁵ O dönemde kum ve çakılın satış fiyatı 3.3 \$/m³ iken, hafif agreganınki 7.9 \$/m³ düzeyindeydi.

1923' de yapay hafif agregalı (genleştirilmiş şist) beton blok üretilmiştir.

1929'da Southwestern Bell Telephone Company Building (Kansas, A.B.D)'in tasarım aşamasında hafif agrega kullanılarak sağlanan hafifleme ile yapının 14 kat yerine 28 katlı yapılabileceği görülmüştür. Genleştirilmiş arduvaz agregası kullanılmış, 28 günlük 24 MPa basınç dayanımı, o döneme göre çok dikkate değer bir basınç dayanımıydı. Bu yapı, sonraki 80 yıl boyunca hafif agreganın kullanım avantajları açısından örnek olarak gösterilmiştir [14]. Yine aynı yıl tamamlanan 28 katlı Chase-Park Plaza (St. Louis, A.B.D), hafif agreganın taşıyıcı sistemde kullanıldığı ilk yüksek yapı olarak kabul edilmektedir. Hem çerçeve sistemde, hem de döşeme sisteminde kullanılmış, aynı zamanda yangın geciktirici olarak da işlev görmüştür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Southwestern Bell Telephone Company Building [15] ve Chase Park Plaza [16]

14 katlı Oak Tower (Kansas, A.B.D) (Şekil 2.7) 1920'de tamamlanmıştır. Daha sonra yeni katların inşasına ihtiyaç duyulmuş, yapılan analizlerde normal agregalı beton ile ancak 6 kat ilave edilebileceği görülmüş, onu yerine hafif agregalı beton kullanılarak yapıya 14 kat daha ilave edilebilmiştir (1929).



Şekil 2.7 Oak Tower [17]

1936'de San Francisco'da inşa edilen Oakland Bay Bridge'in (Şekil 2.8) tabliyesinde⁶ geliştirilmiş şist agregalı beton kullanılarak 3 milyon \$ tasarruf sağlanmıştır.



Şekil 2.8 Oakland Bay Bridge [18]

1952'de kar amacı gütmeyen uluslararası bir kuruluş olan Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI) kurulmuştur. Geçmişten günümüze ESCSI, hafif agrega kullanımını teşvik ederek eğitimler verir ve AR-GE çalışmalarını destekler.

1955'e gelindiğinde A.B.D ve Kanada'da 33 hafif agrega üretim tesisi mevcuttu.

1961'de Nevada Çölü'ndeki atom bombası testinde (Yucca Flats) 1400 m mesafedeki tek katlı hafif agregalı beton bloklardan donatılı yığma yapı ile hafif agregalı betondan ön üretilmiş yapı, diğer yapıların aksine, şok tesirini çok hafif şekilde atlatmıştır.

1962'de inşa edilen 65 katlı Marina City Towers'da (Chicago, A.B.D) öz ağırlığı azaltmak için döşeme ve kirişlerde 21-23 MPa dayanımlı hafif agregalı beton kullanılmış⁷ (Şekil 2.9), böylece kazık, kiriş ve kolon boyutları azaltılabildiği.



Şekil 2.9 Marina City Towers [20], [21]

⁶ 1979'da yapılan incelemede, yüzey tuzla kirlenmiş olmakla birlikte hafif agregalı tabliye betonu içine nüfuziyetin yalnız 0.6 kg/m^3 düzeyinde kaldığı, normal agregalı beton uygulanan yaklaşım tabliyesinde ise 6 kg/m^3 olduğu ve hafif agregalı tabliyenin aksine bazı yerlerde dağılıma olduğu gözlenmiştir [19].

⁷ Kışın çok soğuk günlerde hafif agregalı beton yerine normal agregalı beton uygulanmıştır. Kalıp alma sırasında kiriş köşelerinde betonda kopma gözlenmiş, temiz bitiş açısından altta 6-7 cm'lik kısım normal beton ile dökülmüş, üstüne hafif agregalı beton uygulanmıştır [24]. Bu tarz durumlar 0.6 mm 'in altında agrega olmaması durumunda ortaya çıkabilir, bunun için ACI 213 ince kum içeren karışım kullanılmasını önerir.

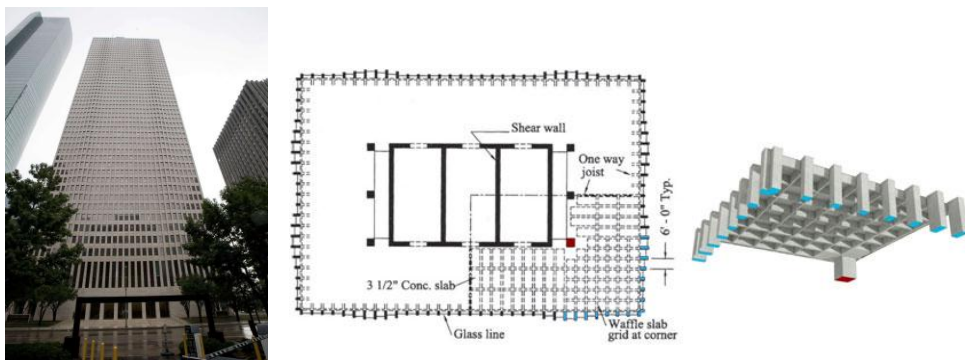
1969'da Coronado Bridge (San Diego, A.B.D)'in (Şekil 2.10) öngermeli kirişlerinde kullanılmıştır. 1840 kg/m^3 hava kuru yoğunluk ve 40 MPa 'a kadar basınç dayanımı elde edilmiştir. Kirişlerde sağlanan hafifleme ile nakliye 160 km uzaklığa yapılmıştır, 35 m . açıklığa kadar kirişler tırlar ile, daha uzun olanlar tren ile taşınmıştır.



Şekil 2.10 Coronado Bridge [22], [23]

A.B.D, S.S.C.B ve Polonya'da çok sayıda köprü tabliyesinde yapay hafif agregalı beton uygulanmış; içsel kür nedeniyle aşınma ve donma dayanımı ile klorid geçirimsizliği konusunda üstün performans gözlenmiştir.

1971'de tamamlanan 50 katlı One Shell Plaza (Houston, A.B.D) (Şekil 2.11), o dönem dünyanın en yüksek betonarme yapısı olarak kayıtlara girmiştir. Tüm taşıyıcı elemanları hafif agregalı beton ile yapılmış ilk yapıdır ve tüp-içinde-tüp sistemin ilk örneklerinden biridir ve tüp sistemleri ortaya koyan F.Khan'ın tasarımıdır. Houston'ın zayıf zemin koşulları, normal agregalı beton ile ancak 35 katlı bir yapıya uygundu; 2.5 m kalınlıklı radye temel üzerine, hafif agregalı beton kullanılarak 35 yerine 50 kat çıkılabildi. Hafif agregalı betondan dolayı çekirdek ve çevre kolonlar arasındaki farklı rötre, sünme düzeylerini kontrol etmek için, tüm düşey taşıyıcı sistem elemanlarında aynı gerilmelerin oluşması esas alınmıştır.



Şekil 2.11 One Shell Plaza [25], [26]

1962 yılında tamamlanan Dulles Airport (Virginia, A.B.D)'un çatı kabloları arasında ön üretimli yapay hafif agregalı 2.5 cm*3 m*1.5 m boyutlarında 1800 adet beton döşeme plağı yerleştirilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Dulles Airport [27], [28]

Hafif agregalı beton birim hacim ağırlığı genellikle 1800-2000 kg/m³ olup, 1990'lardan itibaren 55-70 MPa basınç dayanımı düzeyi de elde edilebilmiştir.

1992'de inşa edilen Bank of America Corporate Center'in kiriş ve döşemelerinde, hem gerekli hafiflemeyi sağlamak hem de gerekli yangın dayanımını sağlamak amacıyla yüksek dayanımlı⁸ hafif agregalı beton kullanılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Bank of America Corporate Center [29]

Açık deniz yapılarında da son zamanlarda hafif agrega kullanılmıştır. 1995'de tamamlanan Heidrun **Offshore** Oil Platform⁹ dünyada yüzen ilk açık deniz petrol platformudur,

⁸ 28 günlük basınç dayanımı 48 MPa, birim hacim ağırlığı 1890 kg/m³ [30]

⁹ Açık deniz yapılarında hafif agrega kullanımı üzerine, geliştirilmiş arduvaz ve sıklıkla da geliştirilmiş kil agregalar üzerinde, çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yüksek dayanımlı, 1900-2000 kg/m³ birim hacim

kablolar ile 345 m derinlikteki zemine ankre edilmiş, (Şekil 2.14), 60 MPa dayanımlı 58000 m³ hafif agregalı beton¹⁰ kullanılmıştır.



Şekil 2.14 Heidrun Offshore Oil Platform [32]

2000 yılında tamamlanan Wellington Stadium, Yeni Zelanda'da hafif agrega¹¹ kullanılmış ilk büyük ölçekli projedir. Öngermeli T kirişler, kolonlar ve merdivenlerde yüksek performanslı hafif beton kullanılmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Wellington Stadium [33]

ağırlık düzeyinde (Normal agregalı betonlar için C75-C85 sınıfı beton; bazalt, granit ve gneiss agrega bu dayanım sınıfını sağlar, kireçtaşı ve kumtaşı agregası kullanılması önerilmemektedir) [31].

¹⁰Temel bileşenler; HS 65 sınıfı 420 kg/m³ çimento, 20 kg/m³ silis dumani, 307 kg/m³ ve 254 kg/m³ (4-8 mm ve 8-16 mm) genişletilmiş kil agregası, 720 kg/m³ kum (0-3 mm)'dur, su/bağlayıcı madde oranı 0.37 dir. Çökme 25 cm, taze birim hacim ağırlık 1885 kg/m³, 28 günlük dayanım 70 MPa, birim hacim ağırlık 1943 kg/m³ olarak ölçülmüştür.

¹¹Ülkede hafif agrega kaynağı olarak sadece pomza olduğu ve bu dönemde pomzanın betonda uygulanabilirliği üzerine yapılmış araştırmalar henüz mevcut olmadığı için projede, iri agrega olarak ithal yapay hafif agrega (genleştirilmiş şist, $\gamma_{\text{gevşek}} = 800 \text{ kg/m}^3$, su emme oranı %7-8, nem yüzdesi %16-26, California) kullanılmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 35 MPa, transfer dayanımı 25 MPa (18 saat ısı kürü sonrası), elastisite modülü 20 GPa, fırın kuru yoğunluk 1845 kg/m³, klor difüzyonu 4796 Coulombs (normal kür), 4562 Coulombs (ısı kürü sonrası) olarak ölçülmüştür [34,35].

2007’de yüksek sismik aktivite ve zayıf zemin koşullarında inşa edilecek mühendislik yapısı New Benicia Martinez Bridge’in tasarımında; diğer tüm alternatifler içinde, hafif agregalı yüksek performanslı beton¹²,dan öngermeli beton segment üretimi seçeneği kabul görmüştür (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 New Benicia Martinez Bridge [36], [37]

¹² Zayıf zemin koşullarında % 20 hafifleme sağlamak; böylece segment uzunluklarını arttırarak, ayak adedi ve kazık adedini / boyunu azaltmak ve dış etkilere dayanıklılık (Cl⁻ iyonları, epoksi kaplı donatılar da kullanılmıştır) açısından tercih edilmiştir. Yapımda dengeli konsol köprü yöntemi esas alınmıştır. Performans hedefleri olarak 28 gün bazında; 45 MPa basınç dayanımı, min. 23 GPa elastisite modülü, 2000 kg/m³ birim hacim ağırlık, maks. % 0.05 rötre (180 gün), maks. 70 millionths/MPa sünme (365 gün) esas alınmıştır. Gerçekleşenler ise 69 MPa, E=26.2 GPa, 2003 kg/m³, %0.042 rötre (180 gün), 32 millionths / MPa sünme (365 gün) ‘dir [35,38,39].

HAFİF AGREGA TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIMI

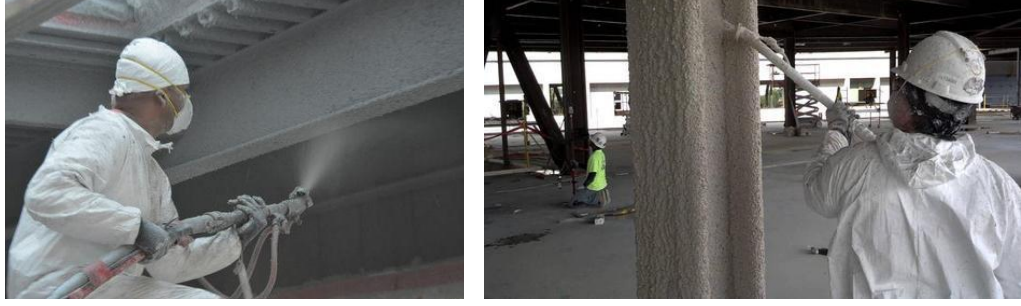
Hafif agregası; antik Roma ve Yunan medeniyetlerinden bu yana, doğadaki biçimiyle kırılarak ve/veya toz hale getirilerek hidrolik bağlayıcılar ile birlikte kullanılmış bir malzemedir. 20.yy'a gelindiğinde, doğal hafif agregaların, betonda artan dayanım ve performans ihtiyacını karşılayamadığı gerekçesiyle, yüzyılın başlarından itibaren şist, arduvaz, uçucu kül, kil, yüksek fırın cürufu gibi doğal/atık malzemelerin yüksek sıcaklıktaki fırınlarda geliştirilmesiyle yapay hafif agregalar üretilmeye başlamıştır. Literatürde, geliştirilmiş arduvaz agregası kullanılarak, maks.86 MPa basınç dayanımına ulaşıldığı belirtilmektedir [40].

Beton üretimi aşamasında; karışım suyunu bünyesine almaması ve içsel kür için yeterli su içeriği açısından, ilk 10 dk.'da hafif agregaya, boşluklarına emeceği oranda ön doyurma suyu verilir. Bu suyun sonraki evrelerde yavaş yavaş salınması ile, dış ortamdan su alması da, betonda hidrasyon ve dayanım artışı içsel kür ile devam eder. Devam eden içsel hidrasyonun sonucu olarak,

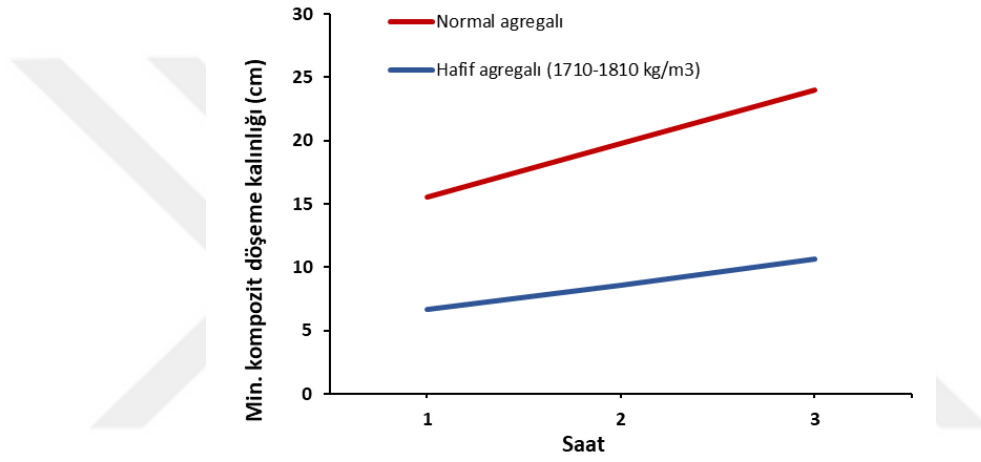
- agrega-matris ara yüzey aderansında güçlenme,
- çatlak oluşumunda azalma,
- düşük su/gaz/klor geçirgenliği,
- yüksek donma-çözülme ve aşınma dayanımı,
- servis ömrü boyunca bakım-onarım maliyetlerinde ekonomi.

sağlanır. Ayrıca çelik profillerin çevresine püskürtülerek (Şekil 3.1) ve betonarme/çelik yapı döşemelerinde kullanılarak yapıların yangın dayanım süresi arttırılır (Şekil 3.2). Betonun hafif agregalı taşıyıcı beton ile tasarımı, taşıyıcı elemanlar ve temel sisteminin

boyutlandırılmasında ekonomi getirir. Ayrıca ağırlıktaki azalma, deprem yüklerinin azaltılması açısından son derece önemlidir.



Şekil 3.1 Çelik kirişte ve kolonda püskürtme beton uygulaması [41]



Şekil 3.2 Kompozit döşemede normal agregalı-hafif agregalı betonda, püskürtme beton kaplaması olmadan yangın dayanımı süre karşılaştırması [42]

Hafif agreganın doğal veya yapay olmasının beton dayanımına etkisi, bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Bu bölümde öncelikle yapay hafif agregalı betonun teknik özellikleri ve üretim teknolojileri aktarılacaktır. Dünyada inşaat sektöründe kullanım alanları sayısal verilerle; takiben doğal hafif agrega kullanımının Türkiye ve dünya ölçeğinde mevcut ve olası genişleme alanları incelenecektir.

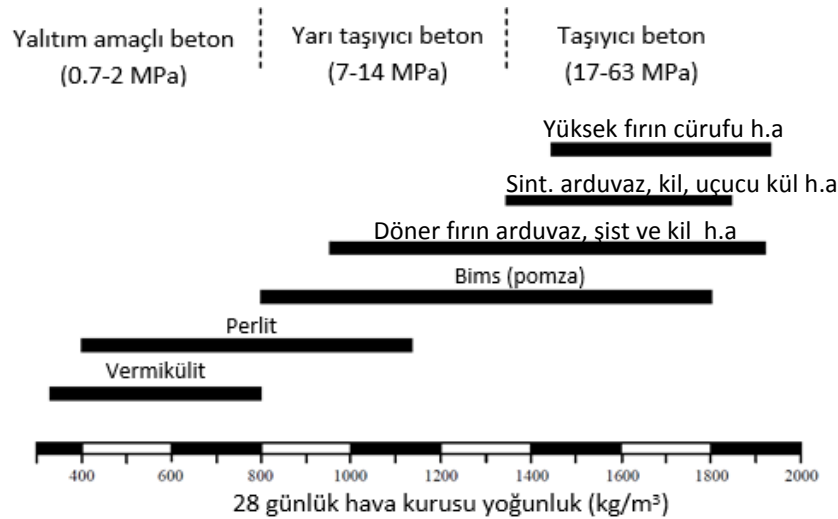
3.1 Hafif Agregaların Teknik Özellikleri

ACI 213R-03' e [43] göre yapay hafif agrega olarak geliştirilmiş kil, cüruf, uçucu kül, şist, arduvaz ve doğal hafif agrega olarak pomza taşıyıcı hafif beton uygulamalarında kullanılabilir. ASTM C330'a [44] göre taşıyıcı sistem hafif betonlarında kuru gevşek birim ağırlık, iri hafif agregalar için maks. 880 kg/m^3 , ince hafif agregalar için ise maks. 1120 kg/m^3 olmalıdır. İri agrega bazında gevşek birim ağırlıklar; geliştirilmiş kil için

700-1050 kg/m³; genişletilmiş cüruf, şist ve arduvaz için 800-950 kg/m³, doğal agrega olan pomza için ise 400-800 kg/m³ aralığı verilebilir (Şekil 3.3).

Maks. dane boyutu 10-12 mm, çökme değeri ise 7.5-10 cm. aralığında önerilmekte, maks. 15 cm. ile sınırlandırılmaktadır (ACI 213R-03) [43], ancak uygulamada çökmenin 15 cm'in üzerinde olduğu uygulamalar da mevcuttur. Genleştirilmiş hafif agregalarda su emme % 5-20 aralığında olup, kaliteli hafif agregalarda genellikle %15'in altında [45], genişletilmiş şist ve arduvaz tipi olanlarda ise %10'un altındadır. Türkiye'deki doğal pomza iri agregalarında ise, 24 saat bazında su emme genellikle % 15'in üzerindedir, bu da yüksek basınç dayanımı elde etmeyi zorlaştıran bir unsurdur. Uygulama öncesi; su emmesi az olan hafif agregalar (genleştirilmiş arduvaz, şist) hariç en az 24 saat, tercihen 72 saat suda bekletilerek suya doyurulmalıdır.

Yapısal hafif beton için, özel performans koşulları yoksa, 28 günlük hava kurusu birim hacim ağırlık $\gamma_{hk}=1440-1850$ kg/m³ aralığında, basınç dayanımı ise min. 17.2 MPa olmalıdır. Min. çimento içeriği 330 kg/m³ olmalıdır. Birçok yapay hafif agrega üreticisi $\gamma_{hk}=1600-1760$ kg/m³ ve 20-28 MPa basınç dayanımını esas almaktadır. ACI-201'e [46] göre yüksek dayanım sınırı, normal agregalı betona benzer, 40 MPa'dır ancak hafif agregalı betonda 40 MPa üzeri dayanım çok seyrek. Köprü tabliyesi ve yol betonunda donma-çözülme ve don çözücü tuzlara karşı min.27 MPa sağlanmalıdır (Şekil 3.4).



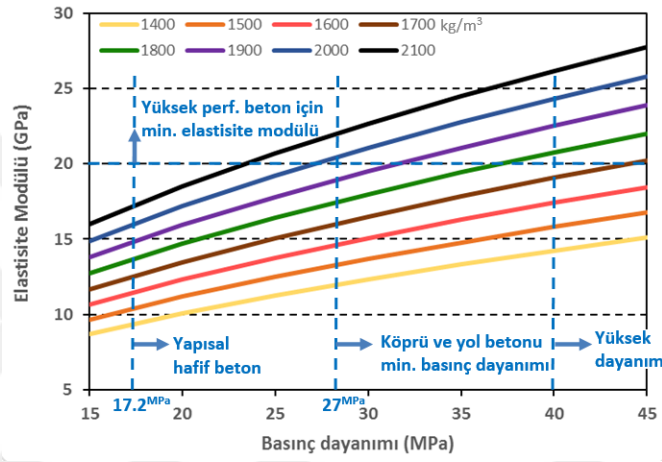
Şekil 3.3. Hafif agreganın¹³ yoğunluk ve dayanıma göre sınıflandırılması [43], [47]

¹³ h.a: hafif agrega, sint:sinterlenmiş

ACI 318 [48], elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında, $\gamma_{hk}=1440-2480 \text{ kg/m}^3$ aralığındaki hafif agregalı betonları da kapsayacak şekilde

$$E = 0.043 \gamma_{hk}^{1.5} \sqrt{f_b}, \text{ MPa} \quad (f_b \leq 42 \text{ MPa}) \quad (3.1)$$

bağıntısını önermiştir. Bu bağıntı kullanılarak basınç dayanımı-elastisite modülü değişimi için aşağıdaki grafik (Şekil 3.4) üretilmiştir. 2000'lerden itibaren yüksek performanslı hafif agregalı beton kavramının ortaya çıkışıyla, elastisite modülünün min.20 GPa olması gerekliliği benimsenmiştir [49]. Hafif agregalı betonda E değeri, genellikle normal agregalar ve aynı matris ile yapılmış betonun 1/2-3/4'ü düzeyindedir.



Şekil 3.4 Performans ilişkili basınç dayanımı-elastisite modülü değişimleri [35]

3.2 Yapay Hafif Agregate Teknolojileri ve Kullanımı

Döner fırın prosesi ile üretilen ilk yapay hafif agregate 1908'de geliştirildi ve 1918'de Stephen J. Hayde tarafından patentlendi. O dönemde, geliştirilmiş arduvaz agregası (Şekil 3.5), hafif beton tuğla imalatı ve betonarme döşemelerde kullanılmıştır.

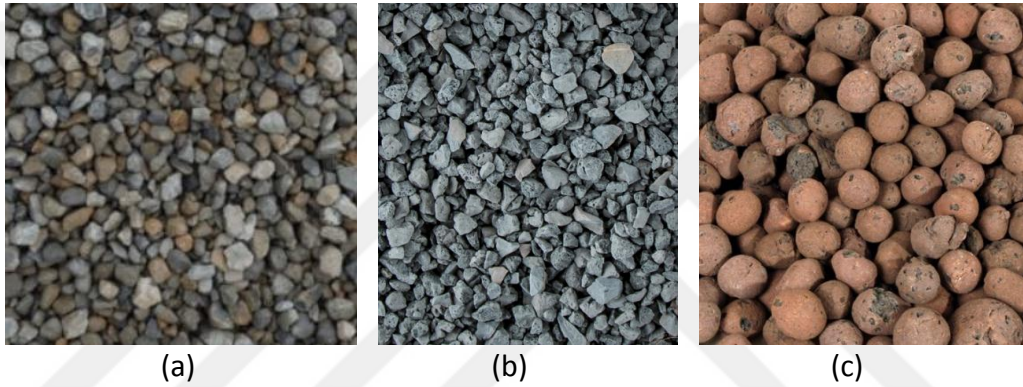


Şekil 3.5 a) Doğal arduvaz kayaç formu [50] b) Genleştirilmiş arduvaz agregası [50]

Yüksek fırın cüruf agregası, çok eski zamanlardan beri bilinmekle birlikte, ticari olarak 1928'den beri kullanılmaktadır¹⁴. 1930'lu yıllarda Danimarka'da geliştirilmiş kil agregası (Şekil 3.6), 1958'de ise İngiltere'de geliştirilmiş uçucu kül agregası üretilmiştir¹⁵.



Şekil 3.6 Boyutlarına göre tasnif edilmiş geliştirilmiş kil agregalar [51]

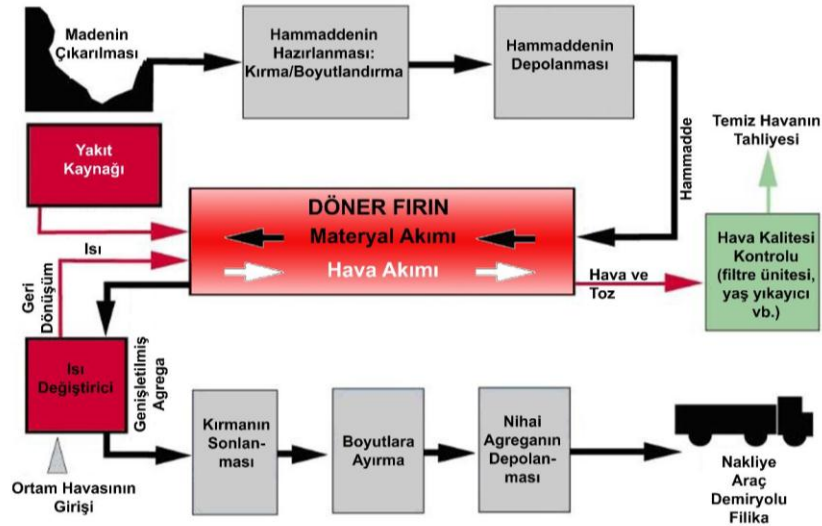


Şekil 3.7 Genleştirilmiş a) Şist b) Arduvaz c) Kil hafif agrega tipleri [52], [53], [54]

Genleştirilmiş arduvaz ve şist hafif agrega üretimi için öncelikle kaya parçaları agrega boyutuna kadar kırılır, ardından ön ısıtma ünitesine verilir, daha sonra döner fırına beslenir. Fırında 1200°C'ye kadar ısıtılırken (Şekil 3.8), kayaç agregaları ergime noktasına çok yaklaşır, plastikleşen agregadan gaz çıkışı agreganın genişmesini ve içinde düzgün dağılmış bağlantısız boşluklar (5-300 µm aralığında) oluşmasını sağlar. Genleşmiş agregalar daha sonra soğutma birimine alınır, boyutlarına göre sınıflara ayrılır (Şekil 3.6).

¹⁴ Yüksek fırına, çeliği saflaştırma amaçlı konulan kireçtaşı veya dolomit agregasından ortaya çıkan ergimiş ürün (1200°C), soğuk su ile soğutulurken çıkan gazlara bağlı olarak genişler.

¹⁵ 1950'lerde İngiltere'de geliştirilmiş şist ve arduvaz agregası da üretilmiş ancak üretim maliyetindeki artış nedeniyle vazgeçilmiştir.



Şekil 3.8 Döner fırın ile geliştirilmiş şist, arduvaz ve kil hafif agrega üretimi [55]

Yapay hafif agregaların dünyadaki tipik bazı uygulamaları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgeden de izlendiği üzere iri normal agreganın çoğunlukla tamamı yapay hafif agrega ile değiştirilmektedir. Elastisite modülü değerleri 16-25 GPa aralığında yer almaktadır. 70 MPa’dan daha yüksek basınç dayanımı gerekli olduğunda önemli miktarda normal agrega da kullanılarak elastisite modülü 32 GPa düzeyine çekilebilmektedir.

Çizelge 3.1 Yapay hafif agregaların dünyadaki tipik bazı uygulamaları [[56] kaynağından üretilmiştir).

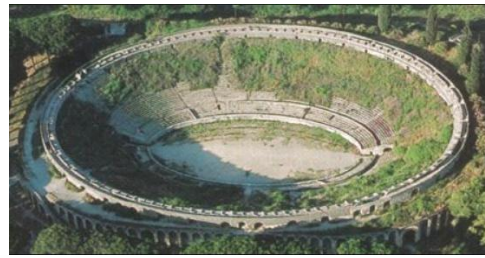
Dünyadaki Uygulamalar	Hafif agregası	Normal agregası	Su	Çimento	Silis Dumanı	Toplam bağlayıcı		M_{su}/M_b	Çökme	7 Gün Basınç Dayanımı, MPa	28 Gün Basınç Dayanımı, MPa	Elastisite Modülü, GPa
	$M_{hf, hafif}$ (kg/m ³)	$M_{nr, normal}$ (kg/m ³)	M_{su} (kg/m ³)	M_c (kg/m ³)	M_{sf} (kg/m ³)	M_b (kg/m ³)	100 mm Küp					
Picasso tower	345		190	320	120	440	440	0.43	23	22.5	30.1	
TWA Terminal, 1962	600			365		365	365		13		35	
Marina City Towers, 1962	830			310		310	310		10		25	16
Nations Bank, 1992	534		175	385	83	468	468	0.37	20		47	25
The Stolma Bridge, 1998	600	12	208	420	35	455	455	0.46		64.1	70.4	
Støvset Bridge, Norway 1994	520		194	425	30	455	455	0.43	20	58.2	64.5	22
The Troll West Floating Platform, 1992	237	1347		436	30	466	466		23		≥75	32
The Nordhordland Float Bridge, 1994	595		200	410	33	443	443	0.45	20		70.4	21
Bergsoysundet Bridge	590		193	430	22.5	452.5	452.5	0.43			62.7	

3.3 Pomza (Bims) Tanımı ve Karakteristik Özellikleri

“Ponza (Pomza)” İtalyanca bir terimdir, Bims Almanca bir terimdir; Fransızca'da “Ponce”, İngilizce'de “Pumice” (iri agrega) ve “Pumicite” (ince agrega), Almanca'da (iri agrega) “Bims”, (ince agrega) ve “Bimstein” olarak isimlendirilmektedir. Türkçe'de ponza (pomza) ve bims'e ilave olarak, kullanım alanına göre süngertaşı, köpüktaşı, nasırtaşı, hışırtaşı gibi farklı terimler de kullanılmaktadır.

Gözenekli yapısı nedeniyle hafifliği ve dış etkenlere karşı yüksek dayanıklılığı nedeni ile volkanik kökenli pomza, en eski yapı malzemelerinden biridir. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde pomzanın; amfityatrolar, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler ve konutlarda yaygın olarak uygulandığı bilinmektedir [57]. Roma'da Pantheon ve Pompeii'deki amfityatro bunlara örnek olarak verilebilir (Şekil 3.9), bu malzeme doğrudan hafif agrega olarak kullanıldığı gibi, öğütülerek puzolan olarak bağlayıcı ile birlikte de kullanmıştır.

Yapay hafif agrega, yüz yılı aşkın bir süredir yüksek katlı yapılardan, köprü tabliyelerine ve açık deniz petrol platformlarına kadar geniş bir alandaki mühendislik uygulamalarında yer almıştır. Türkiye'de ise zengin doğal hafif agrega kaynakları mevcuttur, rezerv itibarı ile tarihte pomzadan yararlanan ilk bölgelerden biri Van Gölü Havzası'dır; Urartular Döneminde (M.Ö.900-600) pomzadan, konutlarda ve gıda depolarında izolasyon malzemesi olarak yararlanılmıştır [2].



Şekil 3.9 Pantheon [58] ve Pompeii'deki amfityatro [59]

Pomza, camsı yapıda volkanik kayadır, ancak perlit veya obsidyen'den farklı olarak kristal suyu yoktur. İki tür pomza oluşumu mevcuttur (Şekil 3.10), açık renkli (kirli beyaz ve grimsi) asidik pomza ve koyu renkli (kahverengimsi siyahımsı) bazik pomza (scoria). Asidik pomza inşaat sektöründe değerlendirilirken, bazik olanlar diğer endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Asidik ve bazik pomzalara ait tipik kimyasal özellikler Çizelge

3.2’de verilmiştir. Asidik pomzalarda gözenekler arası genelde bağlantısız boşlukludur ve bazik pomzalara kıyasla daha hafiftir (Şekil 3.10), asidik pomzaların bu iki özelliği inşaat sektöründe kullanılabilirlik açısından olumlu özelliklerdir.

Çizelge 3.2 Asidik ve bazik pomzalara ait tipik kimyasal bileşimler [60]

Kimyasal Bileşenler	Asidik Pomza, %	Bazik Pomza, %
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2.5	7
CaO	0.9	11
Na ₂ O+K ₂ O	9	8
MgO	0.6	7
Kızdırma Kaybı	3	1

Günümüzde pomzanın %90’ı inşaat sektöründe değerlendirilmektedir. İnce olanlar kısmen siva ve şapta, iri olanlar ise daha ziyade ısı yalıtım amaçlı hafif blok üretiminde değerlendirilmekte, yoğunluğu 400-1300 kg/m³ aralığında hafif yalıtım elemanı (boşluklu bloklar) üretilmektedir [61]. Oysa ki, içsel kür ile zaman içinde devam eden hidrasyonun sonucu olarak dış etkilere karşı daha dayanıklı iç yapı oluşumunun yanısıra, betonarme yapılarda (ve ayrıca çelik yapıların kompozit döşemelerinde) deprem yüklerinin azaltılması ve temel sisteminin daha ekonomik seçimi de söz konusu olabilecektir.

Pomza, oluşumu sırasında içerisindeki gazların ani olarak çıkması ve soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Özgül ağırlığı 1-2 gr/cm³ civarındadır. İçerdiği SiO₂, kayaca, çeliği rahatlıkla aşındırabilecek abraziflik özelliği; Al₂O₃ ise, ateşe ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırmaktadır (Çizelge 3.3). Na₂O ve K₂O, tekstil sanayinde reaksiyon özellikleri veren mineraller olarak bilinmektedir [62].



Şekil 3.10 Asidik pomza ve bazik pomza [63], [64]

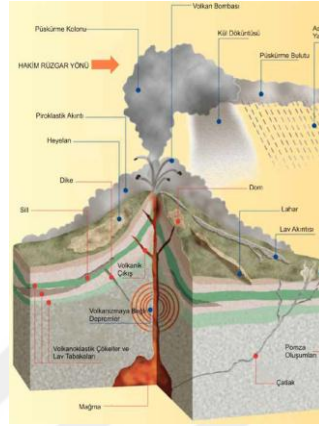
Çizelge 3.3 Pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri [60]

Fiziksel Özellikler	
Renk	Açık griden, kirli beyaza
Kristal Şekli	Amorf (Kristal şekli yok)
Kristal Suyu	Yok
Sertlik (MOHS)	5.5-6.0
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	0.32-0.97
Gerçek Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	1.9-2.65
Porozite (%)	45-70
Rötre (mm/m)	2
Isı İletkenlik Katsayısı (kcal/mh°C)	0.12-0.20
Isınma Isısı (cal/gr.°C)	0.24-0.28
Ses Yalıtımı (dB)	40-55
Su Emme (Ağırlıkça %)	30-70
Buhar Diffüzyon Katsayısı	5-10
Kimyasal Özellikler	
PH	7-7.3
Radyoaktivite	Yok
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça%)	< 0.15
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça%)	< 2.9
Uçucu Madde (Ağırlıkça %)	Yok
Asitlerle Etkileşimi*	Inert
Alevlenme Derecesi (°C)	Yok
Ergime Derecesi (°C)	900
Kimyasal Bileşenler	
Silisyum dioksit (SiO ₂)	52-75
Aluminyum oksit (Al ₂ O ₃)	11.0-17.0
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	0.5-5.0
Kalsiyum oksit (CaO)	1.0-8
Magnezyum oksit (MgO)	0.5-3
Na ₂ O+K ₂ O	3-9
Titanyum dioksit (TiO ₂)	<1
Kükürt trioksit (SO ₃)	<1
Ateş Zaiyatı (A.Z.)	1-3

* Pomza sadece hidroflorik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gazı çıkarır.

3.3.1 Pomzanın Oluşumu

Volkanik oluşumlarda bazik magmaya nazaran daha viskoz olan asidik magma, bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda katı halde bulunur. Basıncın artmasıyla asidik malzeme ile birlikte magmadaki erimiş gazlar, patlamalar şeklinde bacadan püskürmeye başlar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Volkanik aktivite ve pomzanın oluşumu [65]

Ani basınç serbestleşmesi ve ani genişlemeler, bünyede uçucu bileşenlerin ani olarak kaçmasına neden olur. Uçucuları takiben, arkada kalan erimiş küresel parçalar, atmosferle temas eder etmez hızla soğur, böylelikle pomza oluşur; volkan aktivite sonrasında volkan krateri zamanla bir krater gölüne dönüşebilmektedir (Şekil 3.12). Burada pomza oluşumunu kontrol eden faktörler; püskürme süresi, ara süreler, magma ısı, magmadaki erimiş gaz miktarı, püsküren malzemenin soğuma zamanıdır [66].

Pomza taşınma mekaniği 3 ana grupta ele alınabilmektedir:

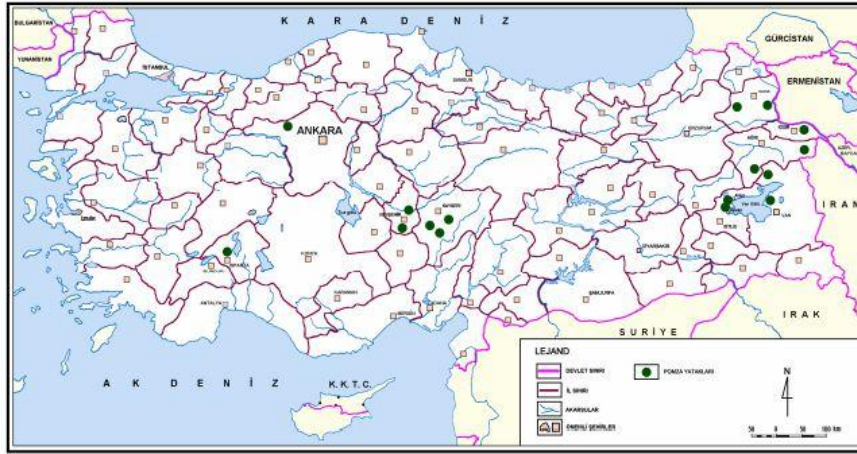
- Düşme (buluttan çökme) ile yığılma: Pomza tane büyüklükleri dar bir aralıktadır, cm mertebeleri ile simgelenebilir, tabaka kalınlıkları tepelerde ve düzlüklerde değişmez.
- Fırlatma ile yığılma: Bazen düzgün ve yer yer birbiri içine itilmiş tabakalar, arada bazaltik kayaç sokulumları ve patlama-çarpma etkisi ile parçalanma ve sıkışma görülür.
- Akma ile yığılma: Kötü ayrışma, yok denecek kadar az boyut sınıflandırması söz konusudur. Gang mineralleri alt katmanda, pomza ise serbest halde üst katmanda yer alır. Dane çapı çoğunlukla < 5 cm olup, bazen >10 cm de olabilir [2].



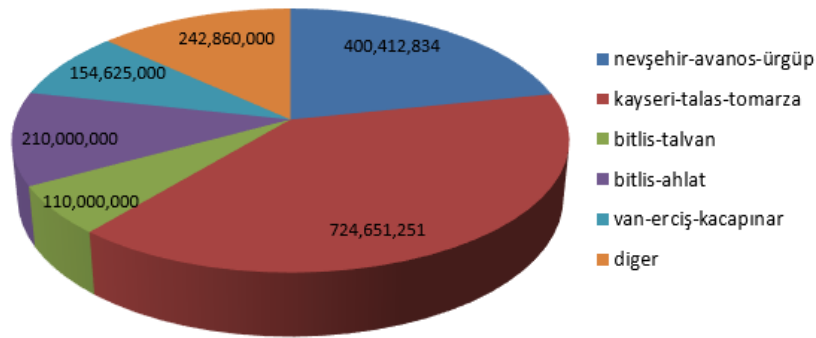
Şekil 3.12 National Park krater gölü ve Santorini'deki pomza oluşumları [67], [68]

3.3.2 Dünyada Pomza Rezervleri ve Pomza Kullanımı

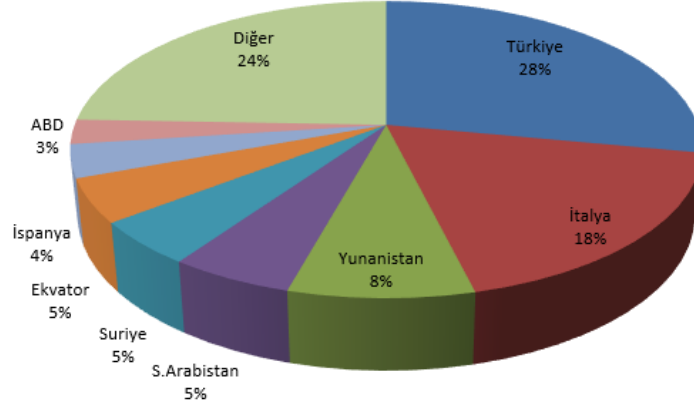
Dünya genelinde tespit edilen pomza kaynakları ~18 milyar m³ olup bunun %40'ı (7.2 milyar m³) Türkiye'de bulunmaktadır, pomza kaynakları ve rezerv durumları Şekil 3.13 ve 3.14'de verilmiştir. 2010 verilerine göre Türkiye (%23) ve İtalya (%17) pomza üretiminde ilk sıraları paylaşmaktadır, bu ülkeleri Yunanistan, İran, Suriye, Şili ve Suudi Arabistan takip etmektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.13 Türkiye'deki pomza kaynakları [69]



Şekil 3.14 Türkiye'deki pomza kaynakları ve miktarları, ([70] 'den üretilmiştir)



Şekil 3.15 Ülkelere göre pomza üretimi ([71]'den üretilmiştir)

Pomza, ülkemizde ve dünyada geniş anlamda inşaat sanayiinde kullanılmaktadır. Bunun en büyük sebebi düşük birim hacim ağırlığı, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özelliği, kolay sıva tutması, mükemmel akustik özelliği, deprem yük ve davranışları karşısındaki elastikiyeti ve alternatiflerine göre daha ekonomik oluşu gibi özellikleridir [72].

Pomzadan imal edilen yapı malzemelerinin en önemlisi ve en yaygın olanı bimsbloklardır. Bimsbloklar yüksek ısı ve ses yalıtımı, yüksek mukavemet göstermeleri ve depreme dayanıklı mekânları en ucuza mal etme gibi özelliklerinden dolayı vazgeçilmez duruma gelmiştir. Günümüzde dünyanın pek çok ülkesinde bu hammad- denin yıllık tüketimi 20 milyon metreküpü geçmektedir [73].

Hafif yapı elemanlarında olduğu gibi, özellikle ısı ve ses yalıtımı amaçlı duvar kesitlerinin elde edilmesinde hafif sıva ve örgü harçları, inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak yer almaktadır. Değişik suni veya doğal boşluklu agrega türleri, bu tip sıva harcı karışımlarında kullanılmakta olup, bunlar arasında en popüler olanlardan bir tanesi pomzadır. Pomzadan mamul hafif akustik sıva, hafif izolatif sıva ve pomza harcı yüksek ısı ve ses yalıtım sağlaması ve mükemmel akustik özellik göstermesi nedeni ile dünya inşaat piyasasında kendine önemli bir pay elde etmiştir [74]. Bunların dışında kompozit cephe elemanlarında, zemin şap uygulamalarında ve enerji etkin tasarımlarda kullanılabilir.

Ülkemizde halen yaygın uygulama olmamasına karşılık, dünyada pomzanın hazır beton endüstrisinde kullanımı oldukça yaygındır. Özellikle tek katlı veya dubleks konutlarda,

gürültü kirliliğinin yoğun olduğu havaalanları ve otoyollarının çevreden izole edilmesi amacıyla çevre duvarlarında; ayrıca konser, tiyatro, disko, sinema gibi akustiğin ve ses yalıtımının ön plana çıktığı sosyal ve kültürel mekanların inşasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Normal betona kıyasla 1/2 - 2/3 oranında daha hafif olan pomza betonunda, inşaat demirinden %13-%17, işçilikten ise %30 oranında tasarruf edildiği bilinmektedir [75].

3.4 Doğal Hafif Agregalı Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi

Doğal hafif agregalı yüksek performanslı betonlara ait deneysel verileri de içerecek şekilde literatürdeki veriler (20 adet 10 cm. küp numune) topluca Şekil 3.16'de verilmiştir. Taşıyıcı sistemde kullanılacak olanlar [76-78] ve yalıtım amaçlı olanlar [79], yapay hafif agregalı beton verileri [80] ile karşılaştırılabilir. İçi boşluklu olan semboller, iri agregası tümüyle hafif agregalı olanları; içi dolu olanlar, normal agregalı kontrol verilerini temsil etmektedir. Şekil 3.16'dan aşağıdaki yorumlar yapılabilir :

o Pomza agregasının kuru gevşek birim ağırlığı; Hossain [76] çalışmasında (Yeni Gine) 870 kg/m^3 ($D_{\text{maks}}=20 \text{ mm}$), Hossain vd. [77] çalışmasında ise daha boşluklu olup 680 kg/m^3 ($D_{\text{maks}}=12.5 \text{ mm}$, su emme -24 saat- %26.7) 'dir. Sonuçlar, yüksek performanslı beton kriterlerinin oldukça altında kalmıştır.

o Yeginobalı vd. [78] Türkiye'den dört farklı bimsi incelemiştir, verilerinin üçü yüksek performanslı beton kriterlerini, ikisi yüksek dayanımlı beton kriterlerini sağlamaktadır.

o Ji vd. [82] çalışmasında kullanılan yapay hafif agreganın 24 saatlik su emme yüzdesi % 7.5, gevşek birim ağırlığı 852 kg/m^3 'dir. Elde edilen dayanımlar yüksek performanslı yüksek dayanımlı beton kriterlerini rahatlıkla sağlamıştır.

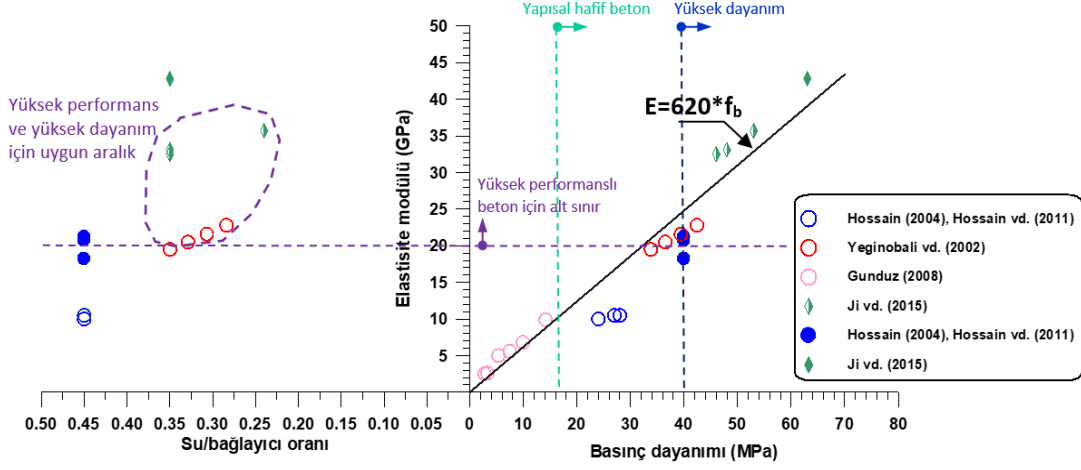
o Su emme yüzdesinin, diğer bir deyişle agreganın boşluk yüzdesinin, mekanik karakteristikleri etkileyen en önemli faktör olduğu görülmektedir. 0.25-0.35 su/bağlayıcı oranının sağlanması ve 24 saatlik su emme yüzdesi % 20'yi geçmeyen doğal hafif agreganın kullanılması durumunda, yüksek performanslı-yüksek dayanımlı beton üretilebileceği düşünülmektedir.

o Deneysel verilerden hareketle, 0-65 MPa aralığı için korelasyon katsayısı (R) yüksek, pratik bir doğrusal bağıntı (3.2) üretilmiştir:

$$E = 620 f_b, R = 0.948, n = 20$$

(3.2)

Böylece yüksek performans alt sınırı olan $E=20$ GPa değerini sağlayacak basınç dayanımını tahmin etmek kolay olacaktır.

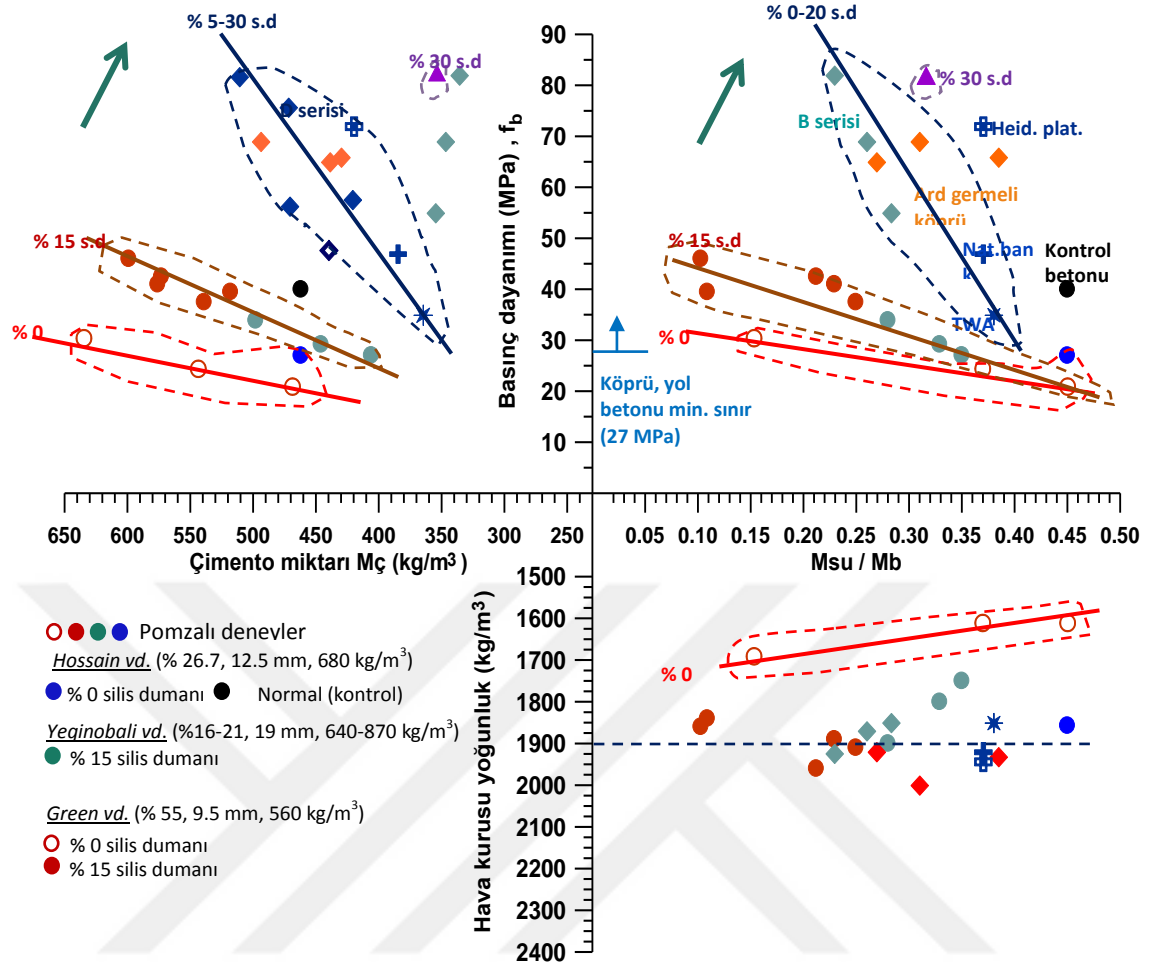


Şekil 3.16 Hafif agregalı ve normal agregalı betonlarda basınç dayanımı-elasticite modülü-su/bağlayıcı madde oranı değişimleri

Literatürde, hafif ve yapay agregalı beton verilerinin karşılaştırıldığı bir grafik Şekil 3.17'de verilmiştir. Burada, Şekil 3.16'daki pomza verilerine ilave olarak, Green vd. [83] çalışması da incelenmiş, ayrıca yapay hafif agregaya ile uygulanmış bazı projelere (Çizelge 3.1) yer verilmiştir. Yuvarlak semboller pomza agregayı, diğer veriler ise yapay hafif agregalı verileri temsil etmektedir. Şekil 3.17'den şu yorumlar yapılabilir :

o İthal yapay hafif agregaya yerine, Yeni Zelanda'nın su emme yüzdesi çok yüksek (% 54) doğal pomza kaynaklarının değerlendirilme imkanı araştırıldığında, silis dumanı olmadan (% 0 s.d) en düşük basınç dayanımlarının elde edildiği, % 15 s.d ilavesi durumunda ise $\sim 0.25 M_{su}/M_b$ oranı için 40 MPa dayanım sağlanabileceği görülmüştür.

o Su emme düzeyi düşük yapay hafif agregalar, pomza agregalı olanlara kıyasla, farklı bir eğilim göstermekte, aynı su/bağlayıcı madde oranı için çok daha yüksek dayanımlar mümkün olmaktadır. Yapay olanların boşluk yüzdesinin doğal olanlara göre oldukça düşük olması bu imkanı sağlamaktadır.



Şekil 3.17 Doğal bims ve yapay genişletilmiş agregalar için çimento, bağlayıcı miktarı, su/çimento oranı ve silindir basınç dayanımı arasındaki ilişkiler (s.d: silis dumani, % s.d: silis dumani/çimento oranı, dairesel semboller pomza agregalı, köşeli olanlar genişletilmiş agregalı olan verileri tanımlamaktadır) [35]

Türkiye’de mevcut pomza agregası açık işletmelerinden elde edilecek görel olarak su emmesi az olan hafif agregalardan kullanmak suretiyle, yapay hafif agregalar ile elde edilenlere yakın bir verimlilik elde edileceği düşünülmektedir. Bu da yerli hafif agrega kaynakları ile, deprem açısından yapı ölü yükünün azaltılması, temel optimizasyonu, öngermeli/ardgermeli önüretimli eleman üretimi anlamına gelecektir, sürdürülebilir ekonomiye de pozitif katkısının olacağı kaçınılmaz bir gerçektir.

Burada, düşük su/bağlayıcı oranlarında önemli sorun oluşturan otojen rötre olayının içsel kür nedeni ile sorun oluşturmayacağı da ayrıca belirtilmelidir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA

Doğal agrega olan pomza agregası (bims,scoria), yüksek oranda (genellikle ≥ 20) su emme özelliği olan bir malzemedir. Deneylerde kullanılan pomzanın agrega boyutunun, ACI Standartlarında önerilen maks. çap aralığı içinde, ayrıca boşluk oranının da diğer pomza türlerine göre görece olarak az olması, dolayısıyla su emmesinin de düşük olması istenmiştir. Böylelikle yüksek performanslı doğal hafif agregalı yüksek dayanımlı beton üretmek ve ulaşılabilecek değerleri yapay hafif agregalarınkiler ile karşılaştırmak mümkün olabilecektir. Dolayısıyla temin edilen pomza agregası kendi grubu içinde nitelikli bir hafif agregadır.

Yüksek performanslı doğal hafif agregalı beton üretilebilirliğine yönelik planlanan deneysel çalışmalar 15.04.2017 tarihinde Nuh Beton A.Ş. AR-GE Laboratuvarında başlamıştır. Deneysel çalışma, normal agregalı beton numuneler ile karşılaştırmalı olarak yürütülmüştür. Farklı bağlayıcı malzemelerin değişik oranları ile karışımlar denenmiş, en iyi performansın elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, sadece vibrasyon ile yerleşen değil, kendiliğinden yerleşen beton denemeleri de yapılmıştır.

Pomza agregası, Soylu Madencilik tarafından kendi ocaklarından temin edilmiştir.

4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde, bağlayıcı malzeme olarak çimentoya ilave olarak yüksek fırın cürufu ve puzolanik açıdan çok güçlü bileşenler olan metakaolin ile silis dumanı kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

Bağlayıcı bileşenler :

- CEM I 42.5R Portland Çimentosu ,TS EN 197-1 [82]
- Metakaolin (Kaolin A.Ş,Bulgaristan tesisleri)
- Yüksek Fırın Cürufu (Bolu Çimento), TS EN 15167-1 [83]
- Silis dumanı (Mikrosilika Grade 920E,Elkem), EN 13263-1:2005+A1:2009 [84]

Agregalar :

- Nevşehir bölgesi hafif agrega No I (Soylu Madencilik)
- Mıdır No I ve Taş Tozu (Özkanca firması)
- Dağ Kumu (Daştan firması)
- Polycarboxyl bazlı hiperakışkanlaştırıcı (Melflux, Basf)
- Şehir şebeke suyu

Bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.2’de, kullanılan iri ve ince agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

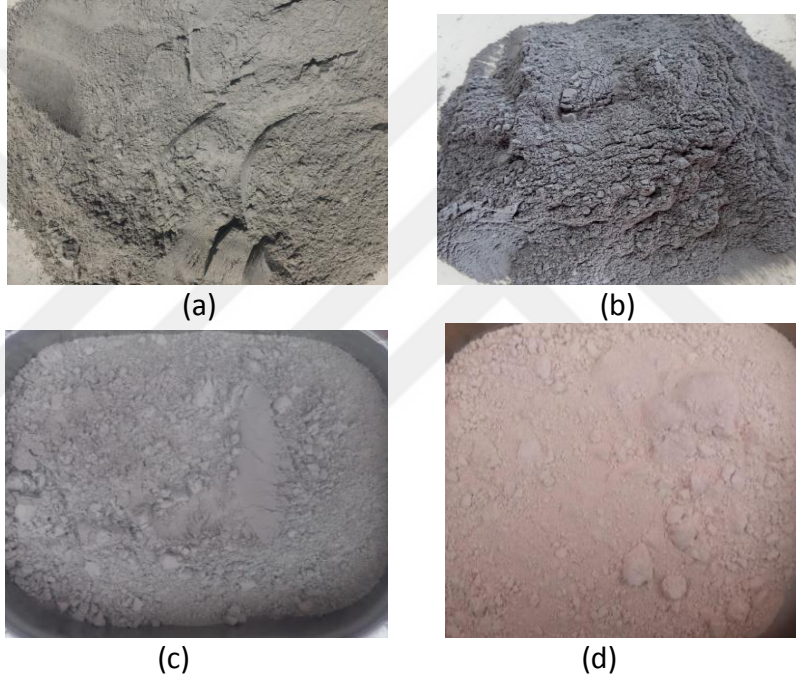
Çizelge 4.1 Çimento, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun analiz sonuçları

Analiz sonuçları	Çimento	Metakaolin	Yüksek Fırın Cürufu
	Portland CEM I 42.5R	KAOLIN Endüst. Mineraller A.Ş	Bolu Çimento
	%		
SiO ₂	18.82	56.10	39.42
CaO	63.86	0.19	38.36
Al ₂ O ₃	4.77	40.23	12.97
Fe ₂ O ₃	3.21	0.85	1.51
TiO ₂		0.55	0.79
MgO	1.53	0.16	6.21
K ₂ O	0.55	0.51	0.63
Na ₂ O		0.24	0.82
CaO+SiO ₂ +MgO			81.3 (> 66.7)
(CaO+MgO)/ SiO ₂			1.06 (> 1)
Kızdırma kaybı		1.1	0.01
Mineralojik Bileşim, XRD		quartz % 8, mika % 4 amorf faz % 87	
Puzolanik aktivite indeksi, 28 gün	% 100		% 70 (7 gün % 51 >% 45)
Özgül yüzey alanı, cm ² /g	3868	14600	5163 (> 2750)
Özgül ağırlık	3.16	2.52	2.95

Çizelge 4.2 Silis dumanı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Analiz sonuçları	Elkem Mikrosilica® Grade 920 E
SiO ₂	≥ % 85
SO ₃	≤ % 2
Cl	≤ % 0.3
Serbest CaO	≤ % 1
Serbest Si	≤ % 0.4
Kızdırma kaybı	≤ % 4
Özgül yüzey alanı, cm ² /g	15000-35000
Puzolanik aktivite indeksi, 28 gün	min.%100

Kullanılan bağlayıcı malzemelerin topluca görünümü Şekil 4.1’de verilmiştir.



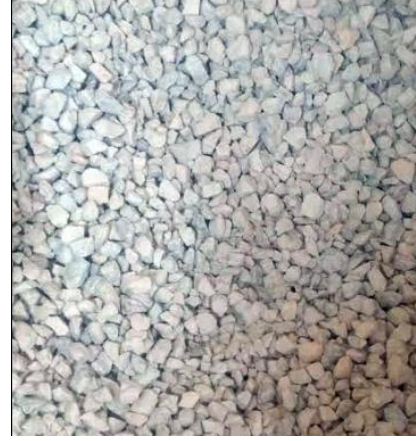
Şekil 4.1 Kullanılan bağlayıcı malzemeler a) Çimento b) Silis dumanı c) Yüksek fırın cürufu d) Metakaolin

Deneylerde kullanılan agregalar toplu halde Şekil 4.2’de, teknik özellikleri ise Çizelge 4.3’de verilmiştir. Temin edilen No 1 pomza hafif agregası 4-12 mm aralığındadır. Hafif agregası, %10 mertebesinde yabancı normal agregası ile karışık durumdadır¹⁶.

¹⁶ Bu durum, doğal hafif agregalarda sıkça karşılaşılan bir durum olup, suda çöktürme yöntemi ile yabancı agregalar elenebilir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2 Agregalar a) No1 pomza agrega b) No 1 micir c) Taş tozu d) Dağ kumu
Akışkanlaştırıcı olarak özel, yüksek akışkanlık verme özelliğine sahip polycarboxyl katkı
temin edilmiştir (Şekil 4.3).



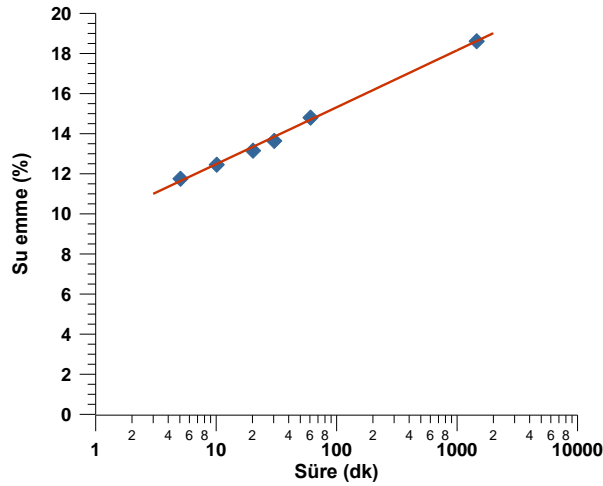
Şekil 4.3 Toz hiperakışkanlaştırıcı

Hafif agrega, Nisan 2017'de laboratuvara getirildiğinde suya oldukça doygun olduğu gözlenmiştir, su emme yüzdesi % 2 olarak ölçülmüştür. Fırın kuru duruma getirilerek su emmenin zaman içindeki değişimi incelenmiş, Şekil 4.4'de grafiksel hale getirilmiştir. Buna göre, hafif agreganın 24 saatteki su emmesi %18.6'dur, %12 ilk 10 dk'da gerçekleşmektedir.

Çizelge 4.3 Deneylerde kullanılan normal ve hafif agregalar

Elek göz açıklığı (mm)	ASTM Elek no	Hafif agregası	Kırmataş	Taş tozu	Dağ
		No I	No I		Kumu
		Soylu	Özkanca	Özkanca	Daştan
Elekten Geçen (%)					
31.5	1 3/4"	100	100	100	100
22.4	7/8"	100	100	100	100
16	5/8"	100	100	100	100
12.5	1/2"	100		100	100
9.5	3/8"	92.7		100	100
8	5/16"	79.4	76	100	100
4.75	No:4	32.1		100	100
4	No:5	15.0	13	96	100
2	No:10	2.9	3	57	98
1	No:18	2.7	2	32	93
0.5	No:35	2.6	0	23	78
0.25	No:60	2.4	0	17	38
0.125	No:120	2.1	0	14	18
0.063	Tepsi	1.6	0	11	2
İncelik				3.60	1.75
Özgül Ağırlık			2.72	2.66	2.59
Su Emme, %		*	0.80	2.18	1.00

* Şekil 4.1'de incelenmektedir.

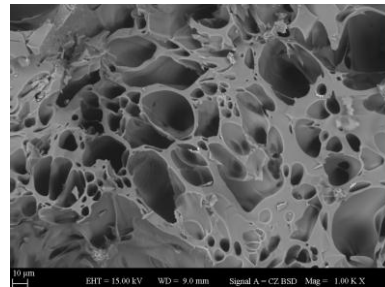
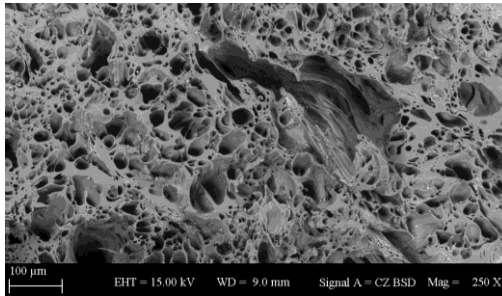


Şekil 4.4 Fırın kuru No I pomzanın süre-su emme ilişkisi

Hafif agreganın deneyler ile belirlenen teknik karakteristikleri Çizelge 4.4'de toplu olarak verilmiştir. Hafif agreganın yakın ve elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Deneylerde kullanılan hafif agreganın karakteristik büyüklükleri
(deneyleyler iki grup numune üzerinde yapılmıştır)

Büyüklük	Mevcut Durum		Etüv Kuru (24 saat)		Etüv Kuru (72 saat)	
	1	2	1	2	1	2
Gevşek Birim Ağırlık (kg/dm ³)	0.82	0.79	0.62	0.65	0.62	0.62
	0.81		0.64		0.62	
Özgül Ağırlık (kg/dm ³) (Tane Yoğunluğu)	1.42	1.56	1.31	1.30		
	1.49		1.31			
Görünür Tane Yoğunluğu ρ_{La} (kg/dm ³)	1.41	1.41	1.26	1.27		
	1.41		1.27			
Etüv Kuru Tane Yoğunluğu ρ_{Lrd} (kg/dm ³)			1.02	0.99		
			1.01			
Su Emme (%)	2.17	1.83	18.85	18.44		
	2.00		18.64			
Nem Yüzdesi (%)	25.4	25.2				
	25.3					



Şekil 4.5 Hafif agreganın yakından toplu, tekli ve SEM görünümüleri

4.2 Karışım Tasarımı ve Numune Üretimi

Deneyleri yapılacak karışım tasarımlarının yapılması farklı aşamalardan oluşmaktadır. Birinci aşamada betondan istenilen özellikler belirlenmekte, ikinci aşamada ise bu özelliklere göre teorik beton bileşim hesabı yapılmaktadır. Normal ve hafif beton

karşılaştırmalı incelenecek şekilde; öncelikle hafif agrega, taş tozu ve doğal kum hacimce karışım oranları belirlenmiştir. İstenen işlenebilirlik, dayanım ve performans düzeyinin sağlanabilmesi için; mineral katkı miktarları (metakaolin, silis dumanı, yüksek fırın cürufu) muhtelif deneylerle araştırılmış, karışım tasarımı optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır.

Deneylerde su/bağlayıcı madde oranı genellikle 0.25-0.35 aralığında tutulmuştur. İri hafif agregalı ve normal agregalı tüm numunelerde % 50 Mıcır No 1, % 20 Taş tozu, % 30 Doğal kum kullanılmıştır. Ayrıca daha yüksek dayanım ve performans istenen betonlar için; iri agrega (No 1), % 50 pomza + % 50 normal agrega olarak uygulanmıştır.

Karışım hazırlama işlemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır;

- Hafif agrega mikserle konulduktan sonra, ön doyum işlemi için belirlenen miktarda su eklenip karıştırılarak agreganın suyu emmesi beklenir.
- Doğal kum ve taş tozu eklenip, karışım homojen bir hal alana kadar karıştırılır.
- Çimento, varsa mineral katkı/katkılar ve hiperakışkanlaştırıcı eklenerek karıştırma işlemine devam edilir.
- Ardından su miktarı 3 eşit parçaya bölünerek, kontrollü bir şekilde betona verilir. İstenilen taze beton çökme/yayıma düzeyine ulaşıldığında suyun fazlası arttırılır, gerçek su/bağlayıcı madde (su/b.m) oranı belirlenir.
- İstenilen kıvama ulaşan taze beton karışımı (Şekil 4.6), vibrasyon sehpasında yeterli miktarda vibrasyon (kendiliğinden yerleşen beton numuneler için gerekli değildir) ile kalıplara yerleştirilir.



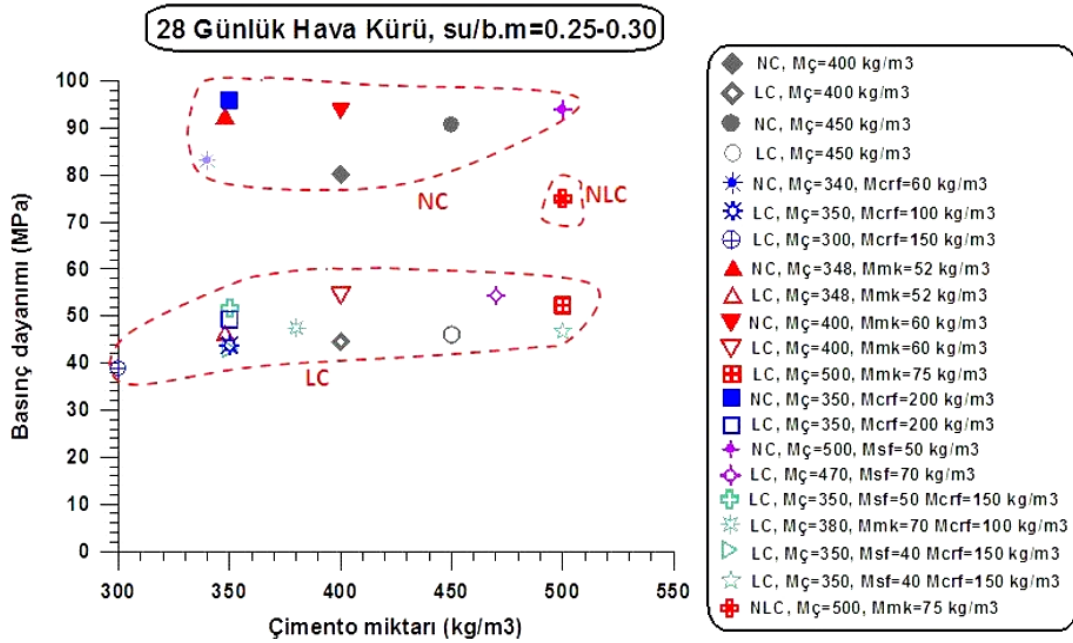
Şekil 4.6 Hafif agregalı normal ve kendiliğinden yerleşen beton numuneler

4.3 Yapılan Deneyler ve Değerlendirmeleri

4.3.1 Mekanik Karakteristikler

Bu bölümde muhtelif mineral katkıları kullanılarak yapılan deneyler grafiksel olarak verilecek, sonuçları değerlendirilecektir.

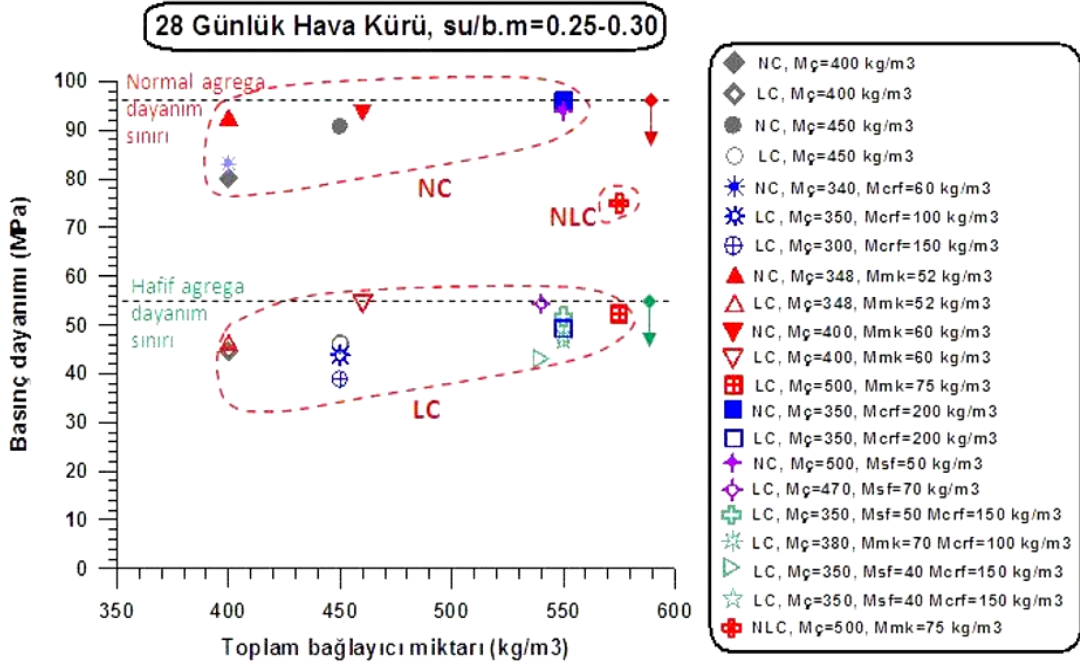
- $Su/b.m=0.25-0.35$ aralığında, hafif agregalı betonda 40 MPa düzeyinden 54 MPa düzeyine kadar değişen basınç dayanımları elde edilmiştir (Şekil 4.7). En optimum çözüm 54 MPa, 400 kg/m^3 çimento + 60 kg/m^3 metakaolin ile elde edilmiştir. Yarı hafif agregalı beton (NLC), hafif agregalı beton (LC) ile normal agregalı beton (NC) arasında dayanım vermiştir.



Şekil 4.7 Basınç dayanımı-çimento miktarı değişimleri¹⁷

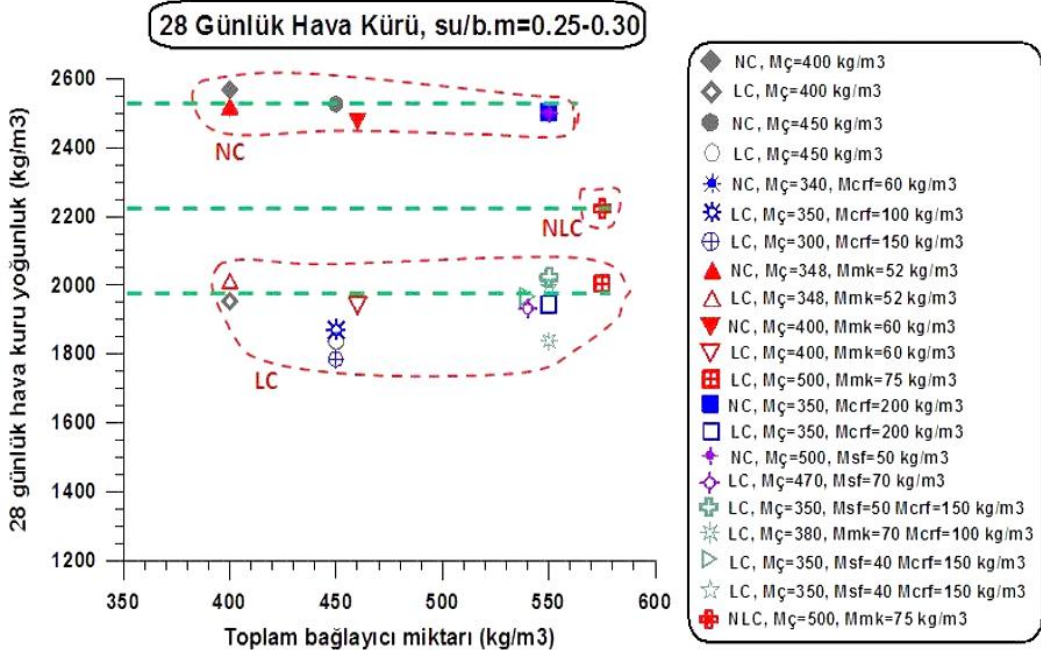
- Toplam bağlayıcı miktarı açısından (Şekil 4.8), bağlayıcı miktarı $400-575 \text{ kg/m}^3$ aralığında değiştirildiği zaman, bağlayıcı miktarı artırılarak harç fazı güçlendirilse de kırılmayı agrega dayanımının yönettiği görülmektedir. Grafikten, kireçtaşı normal agreganın basınç dayanım sınırının $\sim 95 \text{ MPa}$ olduğu, hafif agreganınkinin ise $\sim 55 \text{ MPa}$ olduğu görülmektedir.

¹⁷ Semboller kısmında crf: yüksek fırın cürufu, mk : metakaolin, sf : silis dumanı anlamına gelmektedir.



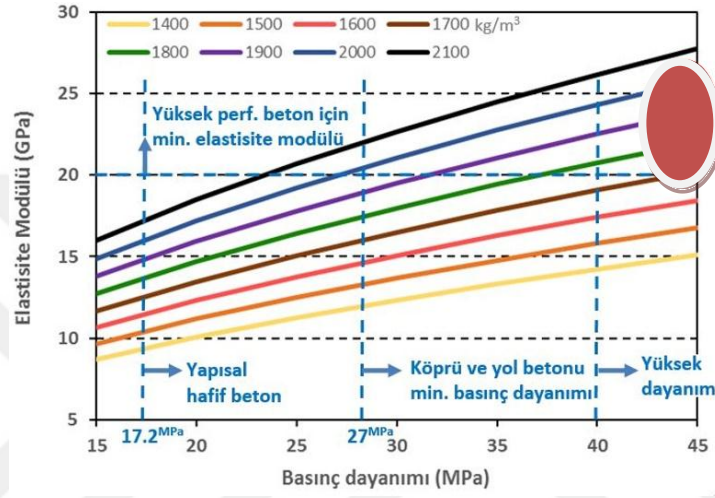
Şekil 4.8 Basınç dayanımı-toplam bağlayıcı miktarı değişimleri

- 28 günlük hava kürü birim ağırlık; normal agregalı betonlarda ise 2550 kg/m³, hafif agregalı betonlarda ise 1900-2000 kg/m³ düzeyinde gerçekleşmektedir (Şekil 4.9). Yüksek dayanım ve yüksek performans kriterleri sağlanırken, birim hacim ağırlık olarak 1/4 oranında azalma sökonusudur.

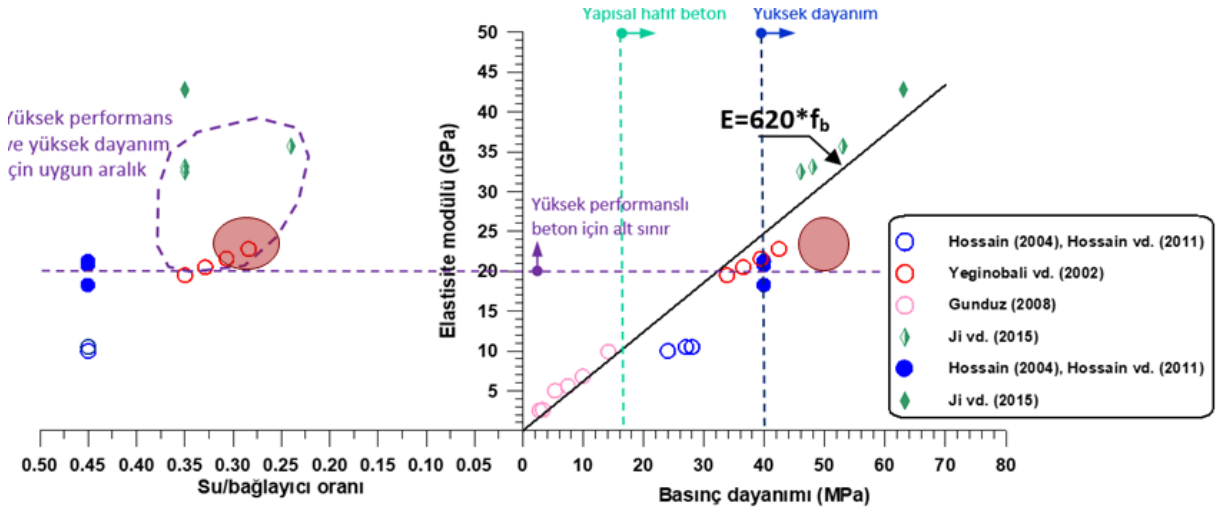


Şekil 4.9 Hava kuru yoğunluk-toplam bağlayıcı miktarı değişimleri

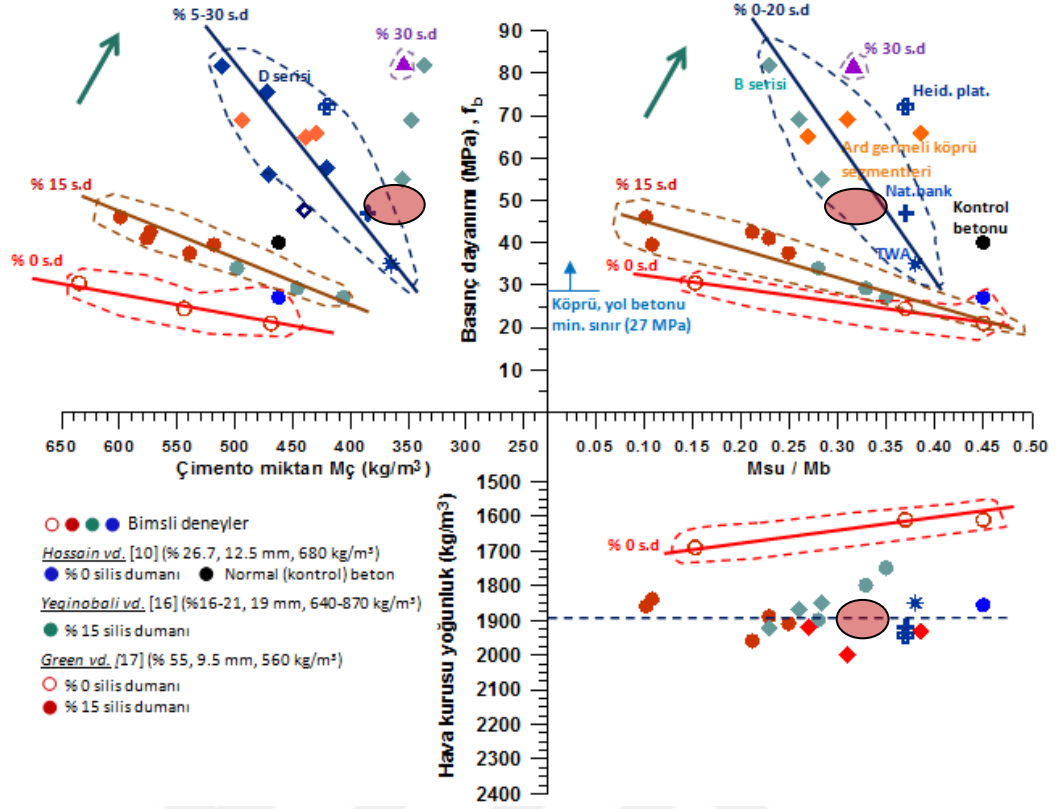
- Agreganın suya doymun olma durumunda 50-55 MPa aralığında basınç dayanımı yanında 27 MPa elastisite modülü elde edilebildiği gösterilmiştir. Tüm verilerin dağılım aralığı Şekil 4.10 [35], 4.11 ve 4.12 [35] üzerine işlenmiştir. İlgili grafiklerden de görüldüğü gibi, yarı hafif agregalı beton (NLC) grubuna girmeden de, yapay hafif agregalı olanlara benzer düzeyde ve ekonomik olarak, yüksek performans ve yüksek dayanım elde edilebilmektedir. NLC grubunda ise 70-80 MPa dayanım düzeyleri ve 30 GPa elastisite modülü mümkün olmaktadır.



Şekil 4.10 LC test sonuçlarının elastisite modülü-basınç dayanımı grafiğindeki konumu



Şekil 4.11 LC test sonuçlarının normal ve ponzalı betonların basınç dayanımı-elastisite modülü değişimindeki konumu



Şekil 4.12 Pomza ve yapay hafif agregalar için çimento miktarı, su/bağlayıcı oranı, silindir basınç dayanımı ve hava kuru yoğunluk arasındaki ilişkiler. (% s.d: silis dumanı/çimento oranı, dairesel semboller pomza agregalı, köşeli olanlar yapay agregalı olan verileri tanımlamaktadır)

Deneylerde, taşıyıcı hafif betonun su emme düzeyi genellikle %1.5-2 aralığında elde edilmiştir, dolayısıyla normal agregalı betonlara benzer niteliktedir.

4.3.2 Klorid Geçirimsizliği

Hafif ve normal agregalı numuneler üzerinde ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration Test'e [85] göre hızlandırılmış korozyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.13). Sözkonusu test şu aşamalardan oluşmaktadır :

- o En az 2 adet 100 mm çaplı silindirden 50 ± 3 mm kalınlığında disk kesilir.
- o Diskin dış çeperinde sızdırmazlık (epoksi vb) sağlanır, 12 saat kurumması beklenir.
- o Numuneler vakum tankına alınır; 3 saat kuru, 1 saat su ortamında vakumlama işlemi yapılır.
- o Numuneler, 18 ± 2 saat boyunca normal basınçta sulu ortamda bekletilir. Çıkartılan yaş numuneler, deney düzeneğine yerleştirilir ve deney başlar.

Toplam 6 saat süren deneyde, betonun klor iyonu geçişine karşı direnci, 30 dk. da bir yapılan ölçümlerle amper cinsinden (I_0, I_{30}, I_{60} vb) belirlenir ve toplamı (4.1) bağıntısı ile Coulomb'a çevrilir, kategori sınıflarına (Çizelge 4.5) göre değerlendirilir.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5 Klorid iyon geçirgenlik sınıflandırması

Geçen akım (Coulombs)	Klorid İyon Geçirgenliği
> 4000	Yüksek
2000-4000	Ortalama
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok düşük
< 100	İhmal edilir

Tüm numunelerde % 50 Mıdır No 1, % 20 Taş tozu, % 30 Doğal kum kullanılmıştır, su/bağlayıcı madde oranı 0.25-0.35 aralığındadır. Toplam bağlayıcı içeriği 460 kg/m^3 olan, 17-20 çökme düzeyine sahip, vibrasyon ile yerleştirilen pomza agregalı betonlar için klorid geçirgenliği 213-248 Coulombs aralığında elde edilmiştir, normal agregalı olan referans numunede ise 134-150 Coulombs değeri bulunmuştur (Şekil 4.14). Böylece, yüksek performans gerektiren özellikle deniz kıyısı projelerde, pomza agregası kullanılarak; klorid geçirgenliği için genellikle sağlanması istenen 1000 Coulombs değeri

ve “Düşük geçirgenlik” aralığının oldukça altında kaldığı görülmüştür. Kendiliğinden yerleşen beton numunede ise klorid geçirgenliği 400-600 Coulombs olarak belirlenmiş olmakla birlikte, bu düzey 1000 Coulombs’un $\frac{1}{2}$ si mertebesindedir.



Şekil 4.13 ASTM C1202-12 Standardına göre deney düzeneği



Şekil 4.14 Deney sonrası tipik görünüm (Ortadaki numune normal agregalıdır)

Taşıyıcı hafif betonun su emme düzeyi genellikle %1.5-2 aralığında elde edilmektedir, dolayısıyla normal agregalı betonlara benzer niteliktedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, doğal bir hafif agrega olan pomza (bims) ile taşıyıcı hafif betonda yüksek dayanım ve yüksek performans elde edilebileceği öngörüsü ile başlatılmış, sonuçları itibarı ile amaca ulaşılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve belli başlı öneriler şunlardır :

- Boşluk yüzdesi, yada su emme, hafif agregalı taşıyıcı beton üretimi konusunda betonun mekanik karakteristiklerini etkileyen en önemli faktördür. Bağlayıcı malzemelerin ekonomik kullanımı açısından, 24 saatlik su emmesi % 25'den büyük pomza agregaların kullanım alanının, 20-35 MPa küp basınç dayanımı için daha ziyade hazır beton sektörüne yönelik olacağı görülmektedir.
- Taşıyıcı hafif beton için, çökme düzeyi 10-15 cm seçilebileceği gibi, kendiliğinden yerleşen beton olarak da uygulanabilir, bu durumda 60-65 cm yayılma düzeyi uygun görünmektedir.
- 0.25-0.35 su/bağlayıcı oranının sağlanması ve nitelikli doğal hafif agrega kullanılması durumunda, yüksek performanslı yüksek dayanımlı beton üretilebildiği görülmüştür.
- İri hafif agreganın (toplam agrega hacminin % 50'si) tamamının hafif olması durumunda ~55 MPa basınç dayanımı, 27 GPa elastisite modülü düzeyine ulaşılmıştır. 20 GPa elastisite modülünün kolaylıkla sağlanabilmesi nedeniyle, öngerme/ardgerme ön üretimli eleman üretimi mümkün olabilecektir.
- Özel uygulamalarda kullanılmak üzere, iri agreganın yarısının hafif agrega seçilmesi durumunda, 75 MPa basınç dayanımı rahatlıkla sağlanmaktadır.

- Muhtelif karışimli hafif beton numunelerde ASTM C1202-12'ye göre klorid geçirgenliği, "düşük" geçirgenliğin alt sınırı olan 1000 Coulombs'un oldukça altında bulunmuştur, bu da klorid geçirgenliği çok düşük beton anlamına gelmektedir.
- Taşıyıcı hafif betonun su emme düzeyi genellikle %1.5-2 aralığında elde edilmektedir, dolayısıyla normal agregalı betonlara benzer niteliktedir.
- 20 GPa elastisite modülünün kolaylıkla sağlanabilmesi nedeniyle, öngerme/ardgerme ön üretimli eleman üretimi mümkün olabilecektir.
- Türkiye'de mevcut pomza agregası açık işletmelerinden elde edilecek görece olarak su emmesi az olan agregalar kullanılmak suretiyle, yapay hafif agregalar ile elde edilenlere yakın bir verimlilik elde edileceği düşünülmektedir.
- Pomzalı taşıyıcı hafif betonun; muhtelif beton dayanım sınıfları için tüm taşıyıcı sistem elemanlarında uygulanması mümkündür.
- Pomzalı betonda, pomzanın içsel kür özelliği nedeni ile, betonun zamanla hidrasyonu devam edecek ve iç yapısı daha geçirimsiz hale gelecektir.
- Yapının öz ağırlığının azaltılması ve daha düşük düzeyde deprem yüklerine maruz kalması sözkonusu olacaktır. Ayrıca taşıyıcı sistem elemanlarında kesit ekonomisi sağlanacaktır.
- Çelik yapılar hafif olsa da, kompozit döşemeleri nedeniyle ilave ağırlık sözkonusu olmaktadır. Pomzalı taşıyıcı hafif beton uygulaması ile bu sorun da aşılabilecektir.
- Gerek pomzanın hafifliği nedeniyle taşıma maliyetleri, gerekse prefabrikasyon alanında ön üretimli elemanların taşınması, daha düşük taşıma maliyetleri ile sağlanabilecek, prefabrikasyon firmasının hizmet alanı da genişleyebilecektir.
- Dünyanın önde gelen pomza rezervlerinden birine sahip Türkiye'de pomza; inşaat sektöründe blok, sıva veya dolgu malzemesi yerine, daha verimli şekilde, taşıyıcı hafif beton veya öngermeli/ardgermeli hafif beton agregası olarak da değerlendirilmelidir. Bu kullanım şeklinin; ağırlıkta getireceği azalma ile, yapıların deprem dayanımı ve inşaat sektöründe katma değer yaratma konusu üzerinde şüphesiz önemli katkıları olacaktır.
- Yüksek miktarda enerji tüketen yapay hafif agrega üretimi yerine, ulusal kaynakların verimli değerlendirilmesi mümkün olacak, sürdürülebilir ekonomiye de pozitif katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] Elmastaş, N., (2012). "Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı)". Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi 5(23), 197-206.
- [3] Gündüz, L. ve Şapcı N., (2005). "Türkiye Pomza Madenciligi, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör)", 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
- [4] Pantheon Yapısı, <https://traveldigg.com/pantheon/>, 30 Ekim 2017.
- [5] Amphitheater, <http://www.romeinspompeii.net/amphitheater1.html>, 30 Ekim 2017.
- [6] Concrete Ship, <http://www.concreteships.org/history/>, 20 Ekim 2017.
- [7] Beton Kanto, <http://www.itumhk.com/beton-kano-yarismasi-2/>, 19 Ekim 2017.
- [8] Ries, J. P., Speck, J. ve 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, 13-15 Nissan, Arizona.
- [9] Selma Gemisi, http://www.concreteships.org/ships/ww1/selma/selma_construction.jpg, 15 Ekim 2017.
- [10] Slump Testi, <https://theconstructor.org/wpcontent/uploads/2016/02/concrete-slump-test-procedure-1.png>, 15 Ekim 2017.
- [11] Gemi Donatıları, <http://www.pinterest.com>, 15 Ekim 2017.
- [12] Beton Gemi Donatıları, www.flickr.com, 15 Ekim 2017.
- [13] Beton Gemi Donatıları, www.en_cyclopediaofalabama.org/article/h-3597, 20 Ekim 2017.
- [14] Lightweight Concrete Expended Shale Clay and Slate Instute

- [15] Southwestern Bell Telephone Company Building, <https://tr.pinterest.com/pin/161355599126503279/>, 20 Ekim 2017.
- [16] Chase Park Plaza, <http://mapio.net/pic/p-16000479/>, 20 Ekim 2017.
- [17] Oak Tower, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commo/thumb/0/07/OakTower_Kansas_City_Missouri.jpg, 20 Ekim 2017.
- [18] Oakland Bay Bridge, https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/850b8e868ed406b79c9f2758404df56a_4B_Castrodale.pdf, 15 Mart 2018.
- [19] Castrodale, R., W., (2015), "Durability of Lightweight Concrete for Bridges", Western Bridge Engineer's Seminar, 9 Eylül 2015, USA.
- [20] Marina City Towers, https://www.valentinasumini.com/s/WCEE_Marina_4154.pdf, 15 Mart 2018.
- [21] Marina City Towers, <http://gatewaygrassroots.com/modern-architecture-city/nQ6h-1858/>, 15 Mart 2018.
- [22] Coronado Bridge, <http://fox5sandiego.com/tag/coronado-bridge/>, 15 Mart 2018.
- [23] Coronado Bridge, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coronado_Bridge_1.jpg, 15 Mart 2018.
- [24] Lightweight Aggregate Concrete- Recommended extensions to Model Code 90 Guide
- [25] One Shell Plaza, <http://www.houstonchronicle.com/business/real-estate/article/Namesake-tenant-departing-One-Shell-Plaza-9235491.php/>, 20 Şubat 2018.
- [26] One Shell Plaza, <http://khan.princeton.edu/khanOneShell.html>, 20 Şubat 2018.
- [27] Dulles Airport, <http://ietcharterwashingtondc.com/questions/>, 20 Şubat 2018.
- [28] Dulles Airport, <https://www.pinterest.com/rchiostri/washington-dulles-international-airport-iad/>, 20 Şubat 2018.
- [29] Bank of America Corporate Center, [http://www.escsi.org/uploadedFiles/mFeatured Projects/Structural Lightweight Concrete/Bank%20of%20America%202015-2003%20Solite.pdf](http://www.escsi.org/uploadedFiles/mFeatured%20Projects/Structural%20Lightweight%20Concrete/Bank%20of%20America%202015-2003%20Solite.pdf), 11 Nisan 2018.
- [30] Zhang, M. H., Liu, X., Chua, ve Chia, K. S. "High-Strength High-Performance Lightweight Concrete-A Review", Proc.of the 9th International on High Performance Concrete Symposium, August 2011, New Zealand.
- [31] Fernandez, J. F., Bettencourt, T. N. ve Helene P. (2008) "A Review of the Application of Concrete to Offshore Structures", ACI Special Publication, 253: 393-408
- [32] Heidrun Offshore Oil Platform, <http://www.offshoreenergytoday.com/wp-content/uploads/2014/05/Heidrun-Photo-%C3%98yvind-Hagen-Statoil.jpg>, 25 Kasım 2017.

- [33] Wellington Stadium, <http://www.austadiums.com/stadiums/photos/westpac-stadium.jpg>, 25 Nisan 2018.
- [34] McSavaney, L. G. "The Wellington Stadium, New Zealand's First Use of High Strength Lightweight Precast Concrete", Expanded Shale, Clay and Slate Institute, Utah, Baskı no 4800, 2002.
- [35] Girgin, Z. C., (2017). "Hafif Agregalı Yüksek Performanslı Beton ve Prefabrikasyon Uygulamaları". Beton Prefabrikasyon, 121-122: 5-12.
- [36] https://www.tylin.com/system/uploads/gallery_image/image/74/03.jpg, 12 Ocak 2018.
- [37] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New-Benicia-Martinez-bridge.jpg>, 12 Ocak 2018.
- [38] Land, R., Muruges, G. ve Raghavendrchar, M. Assessing Bridge Performance-When, What, How, www.pwri.go.jp, 19 Ocak 2018.
- [39] Benicia-Martinez Bridge, Concrete Reinforcing Steel Institute, www.crsi.org, 19 Ocak 2018.
- [40] Khaloo, A. ve Kim, N., (1999) "Effect of Curing Condition on Strength and Elastic Modulus of Lightweight", High-Strength Concrete, 96: 485-490.
- [41] Çelik kirişte ve kolonda püskürtme beton uygulaması, <http://www.sjhcontractors.com/fireproofing-services.html>, 18 Ocak 2018.
- [42] Kompozit döşemede normal agregalı-hafif agregalı betonun-püskürtme beton kaplamasız olarak- yangın dayanımı süresi karşılaştırması, <http://www.structuremag.org/?p=1163>, 19 Ocak 2018.
- [43] ACI 213R- 03, (2003). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [44] ASTM C330/C330M- 17a, (2003). Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- [45] Neville, A. M., and Brooks, J. J., (2010). Concrete Technology, 2nd Ed., Prentice Hall Harlow, England.
- [46] ACI 201.2 R-01, (2001). Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [47] Neville, A., (1995). Properties of Concrete, Final Ed., Longman Group Limited Longman House Burnt Mill, Harlow Essex CM20 2JE, England.
- [48] ACI 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete, https://archive.org/stream/gov.law.aci.318.1995/aci.318.1995_djvu.txt
- [49] Byard, B. E., Schindler, A. K. ve Barnes R. W. (2010) "Cracking Tendency of Lightweight Concrete in Bridge Deck Applications" Proceedings of the Concrete Bridge Conference, Aralık 2010, Phoenix, AZ.
- [50] Doğal arduvaz kayaç form, <https://www.amazon.com/Expanded-Shale-Haydite-quart-PM114/dp/B00IAWPWN0>, 12 Nisan 2018.

- [51] Kil agregalar, <http://www.leca.ae/Products-Gallery>, 23 Eylül 2017.
- [52] Genleştirilmiş şist, <http://www.natureswayresources.com/infosheets/expandedshale.html>, 25 Eylül 2017.
- [53] Genleştirilmiş arduvaz, <https://www.americanbonsai.com/American-Bonsai-Grey-Slate-p/ab-soil-expsla-bulk2.html>, 25 Eylül 2017.
- [54] Genleştirilmiş kil hafif agregası, <http://www.leca.co.uk/>, 25 Eylül 2017.
- [55] Döner fırın ile genleştirilmiş agrega üretimi, <http://www.escsi.org/ContentPage.aspx?id=53>, 25 Eylül 2017.
- [56] International Federation For Structural Concrete (2002). Lightweight Aggregate Concrete: Recommended Extensions To Model Code 90 – Guide; İdentification Of Research Needs – Technical Report; Case Studies-State-of-Art Report, Lausanne- İsviçre.
- [57] Gündüz, L. ve Şapcı N., “Türkiye. Pomza Madenciliği, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi”, 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, 09-12 Haziran 2005, İzmir, Türkiye.
- [58] Pantheon, <https://traveldigg.com/pantheon/>, 8 Ekim 2017.
- [59] Amfi Tiyatro, <http://www.romeinspompeii.net/amphitheater1.html>, 8 Ekim 2017.
- [60] Efe, T., (2011). Edremit Travertenleri ve Van Gölü Kuzeyinde Yüzeyleyen Pomzaların Çimento Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [61] Gündüz, L., (2008). “The Effects of Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Low-Strength Concrete Properties”, Construction and Building Materials 22: 721–728.
- [62] Pomza özgül ağırlığı, <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza>, 8 Ekim 2017.
- [63] Asidik pomza, <https://etarim.net/ekonomi/bundan-15-milyar-ton-var.html>, 10 Ekim 2017.
- [64] Bazik pomza, <http://www.agropomza.com.tr/kategori/>, 18 Ekim 2017.
- [65] Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, D. ve Çankıran, O., (1998). Pomza Teknolojisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Yayını, Cilt 1 (a), Isparta.
- [66] Gündüz, L., (2005) İnşaat Sektöründe Bimsblok. Süleyman Demirel Üniversitesi Yayınları, 928, Isparta.
- [67] Elmastaş, N., (2012) “Türkiye Ekonomisi İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı)”, Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, Cilt: 5 Sayı: 23, 196-206.
- [68] Santorini’deki pomza oluşumları, www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Santorini, 8 Ekim 2017.

- [69] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliđi Türkiye Toprak Sanayi Meclisi Bims (pomza) Alt Sektör Raporu, Bims Sanayicileri Derneđi, Eylül 2006, Ankara.
- [70] Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N. Ve Seçer, T. "Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları", 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim 1997, İzmir, Türkiye.
- [71] Crangle, R.D., (2013) Pumice and Pumicite, 2012 Minerals Yearbook, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- [72] Sezgin, M., Davraz, M. ve Gündüz, L., (2005), Pomza Endüstrisine Sektörel Bir Bakış, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi Bildirimler Kitabı,1, Nevşehir.
- [73] Gündüz, L., Davraz, M., Ortaçeşme, H., (2005), Bimsblok ve Isı Yalıtım Özellikleri, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi Bildirimler Kitabı, 1, Nevşehir.
- [74] Pomza Sektör Raporu Ahiler Kalkınma Ajansı Bekir Varol, <http://ahika.gov.tr/assets/ilgidosyalar/1Nevsehir-Pomza-Sektor-Raporu.pdf>, 13 Aralık 2017.
- [75] Sezgin, M., Davraz, M. ve Gündüz, L., (2005), Pomza Endüstrisine Sektörel Bir Bakış, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi Bildirimler Kitabı, 1, Nevşehir.
- [76] Hossain, K. M. A., (2004)."Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete". Cement and Concrete Research, 34: 283-291.
- [77] Hossain, K. M. A., Ahmed S. ve Lachemi M., (2011)."Lightweight Concrete Incorporating Pumice Based Blended Cement and Aggregate Mechanical and Durability Characteristics". Construction and Building Materials 25: 1186–1195.
- [78] Yeginobali, A., Sobolev, K. G., Soboleva, S. V. ve Tokyay, M., (2002). "High Strength Natural Lightweight Aggregate Concrete With Silica Fume". ACI SP-178-38: 739-758.
- [79] Gündüz, L., (2008). "The Effects of Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Low-Strength Concrete Properties". Construction and Building Materials 22: 721–728.
- [80] Ji, T., Zhang, B., Zhuang Y. Z. ve Wu H. C., (2015). "Effect of Lightweight Aggregate on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete". ACI Materials Journal 112(3): 355-364.
- [81] Green, S. M. F., Brooke N. J., McSaveney L. G. ve Ingham, J. M. (2001). "Mixture Design Development and Performance Verification of Structural Lightweight Pumice Aggregate Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering 23 (8): 1211-1219.
- [82] TS EN 197-1, (2012). Genel Çimentolar-Bileşim Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri, TSE, 1. Baskı, Ankara
- [83] TS EN 15167-1, (2006). Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufu-Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin- Bölüm 1: Tarifler, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri, TSE, 1. Baskı, Ankara

- [84] TS EN 13263-1+A1, (2010). Silis Dumanı-Betonda kullanılan-Bölüm 1: Tarifler, Gereker ve Uygunluk Kriterleri, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [85] ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.



KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Cihan YOLCU
Doğum Tarihi ve Yeri :19.12.1988/Kadıköy
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :yolcu.cihan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Mimarlık	Yıldız Teknik Üniversitesi	
Lisans	Mimarlık	Doğuş Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Üsküdar Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014-2017	Teksan	Mimar
2011-2014	Genç Mimarlık	Mimar

YAYINLARI

Makale

1.

- **Dergi:** Aurum Journal Of Engineering Systems And Architecture (2018)
- **Konu:**Dünyada Yapay Hafif Agregalı Beton Uygulamaları ve Doğal Pomza Agranın Kullanılabilirliği

