

**DÜNYADA YAPAY HAFİF AGREGALI YAPISAL BETON UYGULAMALARI VE DOĞAL
POMZA AGREGANIN KULLANILABİLİRLİĞİ**Cihan YOLCU¹, Z.Canan GİRGIN²¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, Yapı Programı, İstanbul, Türkiye² Yıldız Teknik Üniversitesi, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye,

yolcu.cihan@gmail.com , zcgirgin@yildiz.edu.tr

Özet

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 yapılarda 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. Bu çalışmada, hafif agregalı betonun tarihçesi ve betondan beklenen mekanik özelliklere ilave olarak; iri agreganın tamamının hafif agrega olarak seçilmesi durumunda, yüksek dayanım ve yüksek performans kriterlerinin karşılanabilirliği literatürdeki güncel deneysel veriler ile incelenmiştir. Ayrıca, Türkiye'nin önemli bir doğal kaynağı olan, iri agrega olarak ancak bloklarda değerlendirilen bims (pomza) agreganın, dünyadaki örnekler ışığında, taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılabilirliği yorumlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hafif agrega, bims (pomza), yüksek performans, mekanik büyüklükler

**EXPANDED LIGHTWEIGHT AGGREGATES IN THE WORLDWIDE STRUCTURAL CONCRETE
APPLICATIONS AND THE USABILITY OF NATURAL PUMICE AGGREGATES****Abstract**

Artificial lightweight production since the early 20th century and its commonly utilization caused to consumption reduction of natural lightweight aggregates used since ancient times. The usage of lightweight aggregates in concrete lead the saving in dead weight and to provide the performance criteria more easily. The demand decrease in natural lightweight aggregate tended their consumptions to the nonstructural lightweight masonry blocks. The history of lightweight-aggregate concrete and mechanical properties to be anticipated are presented in this study. From the current literature, the requirements of high strength and high performance criteria were investigated for the case of supplying the coarse aggregates fully from lightweight aggregates. In addition, pumice, which is an important natural source of Turkey, is examined in view of usability in structural concrete.

Keywords: Lightweight aggregate, pumice, high performance, mechanical characteristics

1. GİRİŞ

Dünyada hafif agreganın kullanımı Babil'in inşasına kadar uzanmaktadır. Antik Yunan ve Roma'da Bims (Pomza)¹, hem hafif agreganın olarak hem de öğütülerek hidrolik bağlayıcıya katılmış; amfiteyatros, 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'lerin başlarında başlamış, ilk ticari kullanımları ise I.Dünya Savaşı sırasında, çelik kıtlığı nedeniyle, "ferrocement" ticari gemilerin üretimi ile olmuştur (Fiorato, 1981). 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 girmiştir. Özellikle geliştirilmiş şist ve arduvaz tipi yapay hafif agregaların geliştirilerek taşıyıcı sistemde kullanımı, 1952'de A.B.D'de yapay agrama üretim ve araştırmaları üzerine enstitü kurulması; Avustralya, Japonya ve Kanada'nın da katılımı sektöre hız katmıştır.

Türkiye'de zengin doğal hafif agreganın kaynakları mevcuttur, rezerv itibarı ile tarihte pomzanın ilk kullanıldığı bölgelerden biri Van Gölü Havzası'dır; Urartular Döneminde (M.Ö.900-M.Ö.600) konutlarda ve gıda depolarında izolasyon malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (Elmastaş,2012). Günümüzde pomzanın % 90'ı inşaat sektöründe değerlendirilmektedir. İnce olanlar kısmen sıva 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 (Gündüz,2008). Türkiye'de, zengin pomza rezervine (2.6 milyar m³) (Özkan, Tuncer,2001) rağmen, nitelikli ve boşluk yüzdesi daha az olan pomzalar bile betonarme taşıyıcı sistem tasarımında yer almamaktadır. Oysa ki, içsel küre ile zaman içinde devam eden hidratasyonun sonucu olarak dış etkilere karşı daha dayanıklı iç yapı oluşumunun yanısıra, betonarme yapılarda deprem yüklerinin azaltılması ve temel sisteminin daha ekonomik seçimi sözkonusudur. Bu çalışmada doğal pomza (bims) agregası, yapay hafif agregalar ile birlikte dikkate alınarak mekanik büyüklükleri irdele-necektir (Yolcu, 2017).

2. HAFİF AGREGALARIN BETONDA KULLANIMI

2.1 Tarihsel Gelişim

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; amfiteyatros, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler ve konut inşaatlarında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Gündüz ve Şapçı, 2005). Roma'da Pantheon ve Pompeii'deki amfiteyatros bunlara örnek olarak verilebilir (Şekil 1).

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



Şekil 1. Pantheon [1] ve Pompeii'deki amfityatro [2]

20.yüzyıla geldiğimizde; hafif agreganın betonda kullanımının, yük gemileri ile başladığı görülmektedir. N.K.Fougner'in tasarladığı 25 m boyunda ilk beton mavna, Norveç'de 1917'de denize indirilmiştir. Savaş koşullarında çelik yokluğu nedeni ile, A.B.D'de de ticari gemileri donatılı betondan üretme fikri benimsenmiş, Fougner ile 24 gemilik anlaşma yapılmıştır. I.Dünya savaşı devam ederken; J. Hayde, yaptığı araştırmalar sonucunda, 1918'de geliştirilmiş şist tipi hafif agreganın patentini almıştır. 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. 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 et.al., 2010) ve 23 GPa elastisite modülü elde edilmiştir², 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). Ayrıca savaş döneminde, bir geminin kış tarafına isabet eden bombanın betonun kompakt iç yapısı nedeniyle kalıcı hasara neden olmadığı görülmüştür. Bazı gemilerden daha sonra dalgakıran olarak da yararlanılmıştır.

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 küre nedeniyle artan aşınma, donma ve klorid dayanımı ile üstün performans özellikleri göstermiştir (Castrodale, 2006). Beton birim hacim ağırlığı sıklıkla $1800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ 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 agreganın üretiminin % 95'inin geliştirilmiş şist, arduvaz ve kil olduğu tahmin edilmektedir.

2.2 Teknik Özellikler

Hafif agregaların ön ıslatma sırasında boşluklarına emdiği suyun, sonraki evrelerde yavaş yavaş salınması ile (diğer bir deyişle içsel küre durumu söz konusudur) beton, dış ortamdaki su alması da hidrasyonu ve

2 Okyanusta geçen 34 yıldan sonra, 1953'de U.S.S Selma'nın gövdesinden alınan karotlar üzerinde, laboratuvarında yapılan tuz çevrimleri sonucunda, pas payı sadece 1.6 cm olmasına rağmen, tuzun ancak 6 mm derinliğe geçebildiği görülmüştür.

dayanım artışı devam eder. Devam eden hidrasyon; agrega-matris ara yüzey aderansının çok güçlenmesini, ayrıca çatlak oluşumunda azalmayı beraberinde getirir. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük su/gaz/klor geçirgenliği sonucu azalan bakım onarım maliyetleri ile servis ömrü uzar. Hafiflik nedeniyle artan yangın dayanımı, çelik yapıların kompozit döşemelerinde de önemli avantaj sağlar.

ACI 213-03'e göre yapay hafif agrega olarak genleştirilmiş kil, cüruf, uçucu kül, şist, arduvaz ve doğal hafif agrega olarak bims (Şekil 2), taşıyıcı hafif beton uygulamalarında kullanılabilir. ASTM C 330'a göre taşıyıcı sistem hafif betonlarında kuru gevşek birim ağırlık, iri hafif agregalar için maks. 880 kg/m³, ince hafif agregalar için ise maks. 1120 kg/m³ olmalıdır. İri agrega bazında gevşek birim ağırlıklar; genleştirilmiş kil için 700-1050 kg/m³; genleştirilmiş cüruf, şist ve arduvaz için 800-950 kg/m³, doğal agrega olan bims için ise 400-800 kg/m³ aralığı verilebilir. Maks. dane boyutu 10-12 mm, çökme değeri 15 cm olarak önerilmektedir (ACI 301-05), ancak çökmenin daha yüksek olduğu uygulamalar da mevcuttur. Kaliteli hafif agregalarda su emme genellikle %15'in altındadır (Neville & Brooks, 2010), genleştirilmiş şist ve arduvaz tipi yapay hafif agregalarda bu oran %10'un altındadır. Türkiye'deki doğal bims iri agregalarında ise, genellikle -24 saat bazında- su emme % 15'in üzerindedir, bu da yüksek basınç dayanımı elde etmeyi zorlaştıran bir unsurdur.



a) Genleştirilmiş şist [3]

b) Genleştirilmiş arduvaz [4]

c) Doğal bims (pomza) [5]

Şekil 2. Beton içinde en çok kullanılan yapay agregalar ve doğal pomza agregası

28 gün bazında birim hacim ağırlık 1120-1920 kg/m³ aralığında yer almalı, sağlanması gerekli performans koşulları yoksa basınç dayanımı min. 17.2 MPa olmalıdır. ACI-201'e göre yüksek dayanım sınırı, normal agregalı betona benzer olarak, 40 MPa'dır. Köprü tabliyeleri ve yol betonlarında donma-çözülme ve don çözücü tuzlara karşı min.27 MPa basınç dayanımı sağlanmalıdır. 2000'li yıllardan itibaren yüksek performanslı hafif agregalı beton kavramının ortaya çıkışıyla elastisite modülünün en az 20 GPa olması gerekliliği benimsenmiştir (Girgin,2017).

Yüksek performans kriterleri, özellikle öngermeli dış etkilere açık köprü segmentlerinde veya açık deniz platformlarında ön plana çıkmaktadır. Heidron yüzen açık deniz platformu (1996) (Şekil 3a) inşasında, su tarafından uygulanan kaldırma kuvvetini arttırmak için, iri agreganın tamamı genleştirilmiş kil agregası olarak konulmuş, 0.37 su/bağlayıcı madde oranı ile 1940 kg/m³ birim hacim ağırlık ve 79 MPa (küp) basınç dayanımı elde edilmiştir [6]. Yüksek performans kriterlerini sağlayan ilk köprü ise, genleştirilmiş arduvaz

agregası kullanılan, The Route 106 Bridge (Virginia,2001)'dir; öngermeli kiriş segment üretiminde 0.34 su/bağlayıcı madde oranı benimsenmiş; C_l geçirgenliği için 1500 Coulombs; kuru yoğunluk, elastisite modülü ve 28 günlük basınç dayanımı için sırasıyla 1920 kg/m^3 , 20 GPa ve 55 MPa hedef alınmıştır. 2007'de yüksek sismik aktivitenin sözkonusu olduğu New Benica-Martinez Bridge (California)'de (Şekil 3b) öngermeli kutu kesitli kiriş segmentleri yapay hafif agregalı beton ile üretilmiştir, dengeli konsol yöntemi ile geçilen en büyük açıklık 200 m'dir. Projede en ekonomik çözümü veren hafif agregalı öngermeli beton segment seçimi ile, zayıf zemin koşulları ve deprem etkisi nedeniyle köprüyü hafifletmek ve ayak adedi/kazık boyunu azaltmak mümkün olmuştur. 1965 kg/m^3 birim hacim ağırlık, 26.2 GPa elastisite modülü ve 75 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir (Zuritz et.al.2006). Sismik açıdan yine çok aktif bir bölge olan Yeni Zelanda'da inşa edilen Wellington Stadyumu (2000)'nda (Şekil 3c), A.B.D'dan ithal edilen geliştirilmiş şist agregası (su emme oranı %7-8) kullanılmış, 35 MPa beton dayanımı ve 19.1 GPa elastisite modülü hedef alınmıştır (McSaveney, 2000). Yüksek dayanımlı hafif agregalı yüksek yapı uygulamasına tipik bir örnek olarak Bank of America Corporate Center (1992) verilebilir, LEED sertifikası almış bir yapıdır (Şekil 3d). Yapıda döşemeler için 1890 kg/m^3 birim hacim ağırlık ile 3 saat yangın dayanımı esas alınmış, ortalama 47 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.



a) Heidrun Offshore Oil Platform (1996) [7]



b) New Benicia Martinez Bridge [8]



c) Wellington (Westpac Trust) Stadium [9]



d) Bank of America Corporate Center [10]

Şekil 3. Dünyadan bazı yüksek performanslı beton uygulamaları

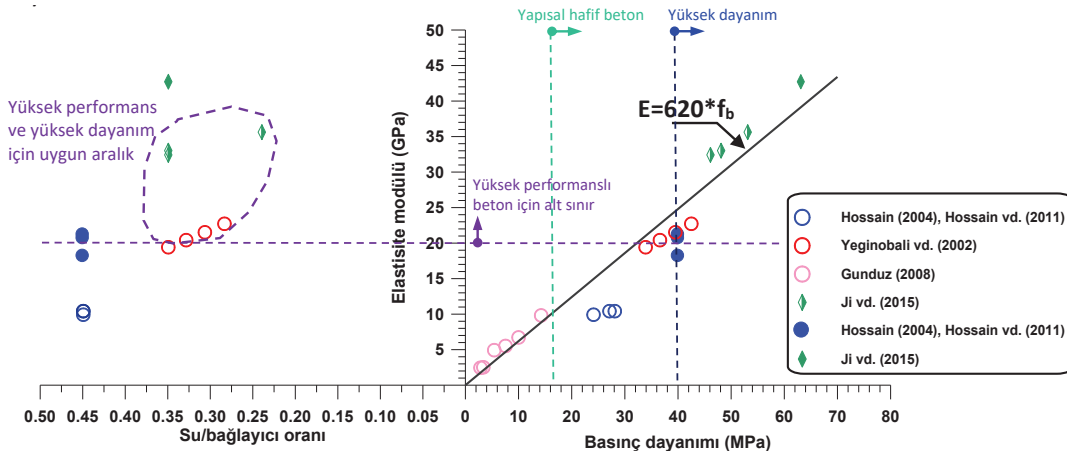
2.3 Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi

Bu bölümde hafif agregalı yüksek performanslı betonlara ait deneysel verilerini de içerecek şekilde literatürdeki doğal hafif agregalı beton sonuçları (20 veri, 10 cm küp numune) topluca Şekil 4'de verilmiştir. Taşıyıcı sistemde kullanılacak olanlar (Hossain, 2004; Hossain et.al. 2011; Yeginobali et.al., 2002) ve yalıtım amaçlı olanlar (Gunduz, 2008), yapay hafif agregalı beton verileri (Ji et.al., 2015) ile karşılaştırılabilir. İçi boşluklu olan semboller, iri agregası tümüyle hafif agregalı olanları; içi dolu olanlar, normal agregalı kontrol verilerini temsil etmektedir.

Bu çalışmada, deneysel verilerden hareketle, 0-65 MPa aralığı için korelasyon katsayısı (r) yüksek, pratik bir doğrusal bağıntı üretilmiştir,

$$E = 620 f_b, r = 0.948, n = 20 \quad (1)$$

bağıntısında E elastisite modülü (MPa), f_b basınç dayanımıdır (MPa). Böylece yüksek performans alt sınırı olan $E = 20$ GPa değerini sağlayacak basınç dayanımını tahmin etmek kolay olacaktır.



Şekil 4. Hafif agregalı ve normal agregalı betonlarda basınç dayanımı-elastisite modülü-su/bağlayıcı madde oranı değişimleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan bims agregasının kuru gevşek birim ağırlığı; Hossain (2004) çalışmasında (Yeni Gine) 870 kg/m^3 ($D_{\text{maks}} = 20 \text{ mm}$), Hossain et.al. (2011) 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 altındadır. Yeginobali et.al. (2002) verilerinin üçü yüksek performanslı beton kriterlerini, ikisi yüksek dayanımlı beton kriterlerini sağlamaktadır, kullanılan hafif agregaların su emme yüzdeleri -24 saat- % 22-30, gevşek birim ağırlığı $640-870 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişmektedir. Diğer taraftan, Ji et.al. (2015) 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. Buradan

su emmenin, diğer bir deyişle agrega boşluk yüzdesinin, mekanik karakteristikleri etkileyen en önemli faktör olduğu bir kez daha görülmektedir. 0.25-0.35 su/bağlayıcı oranının sağlanması ve su emme yüzdesi % 15'i geçmeyen doğal hafif agrega kullanılması, yüksek performanlı yüksek dayanımlı beton şartlarını sağlayacaktır. Burada, düşük su/bağlayıcı oranlarında önemli sorun oluşturan otojen rötre olayının içsel küre nedeni ile sorun oluşturmayacağı da ayrıca belirtilmelidir.

Elastisite modülü verilmediği için Şekil 2'de değerlendirilmemiş olmakla birlikte, Green et.al. (2001) çalışmasında, ithal yapay hafif agrega yerine Yeni Zelanda'nın mevcut doğal bims kaynaklarının değerlendirilme imkanı araştırılmış, su emme yüzdesi çok yüksek (% 54) olan iri hafif bims agregalar ile 40 MPa dayanım elde edilebilmiştir.

Türkiye'de mevcut bims agregası açık işletmelerinden elde edilecek görel olarak su emmesi az olan 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.

3. SONUÇLAR

20.yüzyılın başlarından itibaren geliştirilmiş hafif agregaların üretimi; doğal hafif agrega türü olan pomzanın kullanımının gittikçe azalması ve üretimin farklı alanlara (blok gibi tali yapı elemanları) yönelmesi sonucunu doğurmuştur. Bu çalışmada; kaliteli, boşluk yüzdesi görel olarak düşük doğal hafif agregalar ile, yüksek performanslı ve hatta yüksek dayanımlı beton üretilebileceğini göstermek amaçlanmıştır, bu konuda detaylı deneysel incelemeler yapılacaktır. Yüksek performanslı betonda elastisite modülü alt sınır değeri (20 GPa) ve yüksek dayanımlı betonda basınç dayanımı alt sınır değerinin (40 MPa), dünyada daha yüksek boşluk oranına sahip agregalar ile yapılan tasarımlar da gözönüne alındığında, karışım tasarımında optimizasyon ile elde edilebileceği düşünülmektedir. Böylece 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 hafif beton agregası olarak değerlendirilebilecektir. Bu kullanım şeklinin, artan dayanıklılık ve ağırlıkta hafifleme ile, yapıların deprem dayanımı ve inşaat sektöründe katma değer üretimine şüphesiz önemli katkıları olacaktır.

4. KAYNAKLAR

ACI 201.2 R-01. 2001. Guide to durable concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

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.

Field reference manual 2005. Specification for Structural Concrete ACI 301-05 with selected ACI references, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ASTM C330/C330M-17a. Specification for lightweight aggregates for structural concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.

Castrodale, R.W. 2006. Lightweight high performance concrete for bridge decks. Presentation in Virginia Concrete Conference.

Elmastaş, N. 2012. Türkiye ekonomisi için önemi giderek artan bir maden: pomza (sünger taşı). *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi* 5(23), 197-206.

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.

Girgin, Z.C. 2017. Hafif agregalı yüksek performanslı beton ve prefabrikasyon uygulamaları. *Beton Prefabrikasyon*, (121-122), 5-12.

Gündüz, L. 2008. The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties. *Construction and Building Materials* (22), 721–728.

Gündüz, L. ve N. Şapçı 2005. Türkiye pomza madenciliği, endüstrisi ve Türkiye açısından önemi (gelişen yeni bir sektör), *19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, İzmir, Türkiye.

Hossain, K.M.A. 2004. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research* (34), 283-291.

Hossain, K.M.A, S. Ahmed and M.Lachemi. 2011. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials* (25), 1186–1195.

Ji, T., Zhang,B., Y.Z.Zhuang, and H.C Wu 2015. Effect of Lightweight Aggregate on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete. *ACI Materials Journal* 112(3), 355-364.

McSaveney, L.G. 2000. The Wellington stadium: New Zealand's first use of high strength lightweight precast concrete. *Proceedings 2nd Int. Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Oslo, Norvege.

Neville, A. M., and J.J. Brooks. 2010. *Concrete Technology* (2nd ed.) Prentice Hall Harlow, England.

Ries, J.P., J.Speck and K.S.Harmon. 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.

Özkan, Ş.G., ve G.Tuncer. 2001. Pomza madenciliğine genel bir bakış. *4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye.

Zuritz C., Y.H.Chai and et.al. 2006. Health monitoring of the New Benicia-Martinez Bridge instrumentation plan and preliminary results. Caltrans Bridge Research Conference.

Yeginobali, A., K.G.Sobolev, S.V. Soboleva and M.Tokyay. High strength natural lightweight aggregate concrete with silica fume. ACI SP-178-38, 739-758.

Green, S.M.F., N.J.Brooke, L.G. McSaveney and J.M. Ingham. 2011 Mixture Design Development and Performance Verification of Structural Lightweight Pumice Aggregate Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering 23 (8), 1211-1219.

Yolcu, C. 2017. Sürdürülebilir taşıyıcı sistem tasarımında pomza agregaların kullanılabilirliği, mekanik yükler ve uygulama kriterleri. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İNTERNET KAYNAĞI

[1] <https://traveldigg.com/pantheon/>

[2] <http://www.romeinspompeii.net/amphitheater1.html>

[3] <http://living-rocks.blogspot.com.tr/>

[4] <https://www.americanbonsai.com/American-Bonsai-Grey-Slate-p/ab-soil-s-expsla-5gal.htm>

[5] <http://www.agrosan.com.tr/pumice-stone/index.html>

[6] Expanded Shale, Clay & Slate Institute (ESCSI), 2007. Chapter 9 High-Performance Lightweight Concrete. (<http://www.escsi.org>)

[7] www.offshoreenergytoday.com/psa-norway-inspects-statoils-heidrun-platform

[8] www.tylin.com/en/projects/new_beniciamartinez_bridge

[9] www.fletcherconstruction.co.nz/projects/community/westpac-trust-stadium

[10] www.skyscrapercenter.com/building/bank-of-america-corporate-center/711

