

Hafif Beton

Nihat KABAY¹, Fevziye AKÖZ²

Özet

Yapıların zati ağırlığını, taşıyıcı elemanların kesit alanını dolayısı ile yapı maliyetini azaltmak amacı ile üretilen hafif betonlar, agregaların boşluklu yapısı nedeni ile ısı iletimini azaltır, yalıtım sağlar ve yapının kullanım maliyetini düşürür. Etüv kuru durumdaki yoğunluğu 2000 kg/m³'ün altında olan betonlar "hafif beton" olarak adlandırılır. Hafif betonlar; üretim tekniğine ve malzemesine göre; hafif agregalı betonlar, ince tanesiz betonlar ve gaz betonları olarak; işlevine göre de taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olarak gruplandırılır.

Hafif agregalı beton üretiminde, birim ağırlığı düşük doğal ve/veya yapay hafif agregalar kullanılır. Doğal hafif agregalar; tuf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu vb gözenekli volkanik doğal taşlardan, yapay hafif agregalar ise yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi endüstri atıklarından ve perlit, vermikülit, kil ve şist vb. doğal taşların ısı işlem ile geliştirilmesinden elde edilir.

1. GİRİŞ

Bu bildiri, Yıldız Teknik Üniversitesi SİGMA dergisi özel sayısında yayımlanmış olan derleme makalesinden [1] yararlanılarak hazırlanmıştır.

Beton; agregaya, çimento, su ve gerektiğinde bazı mineral ve/

Lightweight Concrete

Lightweight concrete is usually defined as a concrete with an oven dry density of no greater than 2000 kg/m³. The use of lightweight concrete reduces self-weight of structures, cross-sectional areas of structural elements, construction costs, and also provide thermal insulation. Lightweight concretes are classified into three groups based upon the materials and production technique as lightweight aggregate concrete, no-fines concrete and gas concrete. Based upon their use and physical properties lightweight concretes are divided into three groups as structural, structural/insulating and insulating.

Natural and/or artificial aggregates with low density are used in manufacturing lightweight aggregate concrete. Natural lightweight aggregates are mined from volcanic deposits such as pumice and scoria. Artificial lightweight aggregates are utilized from industrial byproducts such as blast furnace slag and fly ash and by thermal treatment of raw materials such as perlite, vermiculite, clay, and shale.

gözenekli volkanik doğal taşlardan veya diatomit gibi tortul taşlardan temin edilebilmektedir. Yapay hafif agregalar ise; yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerden ve perlit, kuvarsit, vermikülit, obsidyen, arduvaz, kil ve şist gibi doğal taşların ısı işlem ile geliştirilmesinden elde edilebilmektedir. Bunlardan başka elyaf, talaş ve testere tozu hâlindeki ahşap atıkları, EPS köpükler, plastik atıkları, hafif tuğla kırıkları ve diğer tarım atığı malzemeler de hafif beton agregası olarak kullanılabilir [3, 6, 8, 9, 10, 11, 12].

veya kimyasal katkı maddelerinin birlikte karıştırılması ile elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Etüv kuru durumdaki yoğunluğu 800 kg/m³ ile 2000 kg/m³ arasında olan betonlar "hafif beton" olarak adlandırılır [2]. Hafif agregalı betonlar, ince tanesiz betonlar ve boşluklu betonlar olmak üzere üç ana grupta toplanan hafif betonlar; çimento, birim ağırlığı düşük hafif agregaya ve/veya normal agregalar ile üretilmektedir. Agregaya karışımında hafif agregaya miktarının artırılması ile daha hafif ve birim ağırlığı daha düşük olan betonlar elde edilebilmektedir [3]. Hafif beton kullanımı ile yapıların zati ağırlıklarını, taşıyıcı elemanların kesit alanını ve donatı oranını dolayısıyla inşaat maliyetini azaltmak, bununla birlikte ısı iletimini düşürerek de kullanım maliyetini azaltmak mümkün olabilmektedir [4-7].

Hafif beton üretiminde kullanılan doğal hafif agregalar; tuf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, bentonit, vb.

1) nkabay@yildiz.edu.tr, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

2) fevziyeakoz2@gmail.com

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Hafif beton, hafif agregaya, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, dayanabilir.

2. HAFİF BETON

2.1. Hafif Betonun Tarihçesi

Hafif agregalı beton, eski çağlardan beri bilinmekte ve yapı üretiminde kullanılmaktadır. Örneğin, ponza gibi volkanik esaslı doğal agregalar kullanılarak yapılmış günümüze kadar ulaşan çok sayıda yapı bulunmaktadır [13]. Romalı mühendisler, MÖ 273 yılında İtalya'nın batı kıyısında bu tür bir malzeme kullanarak 5 adet beton iskele inşa etmişlerdir. Yaklaşık 7m genişliğinde, 10m uzunluğunda ve 5m yüksekliğindeki bu iskeleler, balıkçılığı geliştirmek için bir nevi dalgakıran görevi görmüştür. Hafif beton olarak dikkate alınabilecek bu yapılarla, doğal bir hafif agrega olan volkanik tüf kullanılmıştır [14]. Uzun yıllar deniz suyu etkisine maruz kalmasına rağmen bu yapılarda sadece az miktarda aşınma oluşmuştur [14, 15]. Yunanlılar ve Romalılar ponza agregasını yaygın olarak kullanmış ve bugün birçoğu hâlâ ayakta olan yapılar üretmişlerdir. M.S. 14 yılında inşa edilen su kemeri, Pont du Gard ve MS 70-82 yılları arasında inşa edilen Roma amfiteyatrosu, Kolezyum, MS 118-128 yılları arasında inşa edilen Roma tapınağı, Pantheon bu tür yapılara örnek olarak verilebilir. Pantheon, 43,3m çapındaki hafif beton kubbesi ile fonksiyonelliğini hala koruyan Roma döneminin belki de en önemli eseridir [14].

Betonarmenin 19. yüzyıl sonlarında hızla gelişmesi ve gelişmiş ülkelerin çoğunda doğal hafif agrega yataklarının nadir bulunması veya bulunmaması nedeni ile yapay hafif agrega üretimi için araştırmalar başlamıştır. 20. yüzyılın başlarında çelik üretimi endüstriyel altyapının temelini oluşturduğu için hafif agrega ile ilgili araştırmalar yüksek fırın cürufu üzerinde yoğunlaşmış ve 1970'li yılların başında, geliştirilen yüksek fırın cürufalarında kayda değer gelişmeler sağlanmıştır. Amerika'da 1913 yılında yapılan araştırmalar kil ve şistlerin yakıldıklarında genleştiklerini göstermiş [16], 1918 yılında, Hayde tarafından hafif beton üretiminde kullanılabilir genleştirilmiş kil ve şist agregalarını üretecek döner fırın sistemi tasarlanmıştır [16]. Bu tip hafif agregalı beton ilk olarak 1919'da U.S.S. Selma isimli okyanus tipi geminin inşasında kullanılmış, bu gemide 1953 ve 1988 yıllarında yapılan incelemelerde betonun hâlâ iyi konumunu koruduğu [14], 7.500 ton ağırlığındaki geminin 12-30mm kalınlığındaki örtü betonunun donatı korozyonunu önlemede oldukça etkili olduğu görülmüştür [18]. Amerika Birleşik Devletleri'nde, 1922 yılında Kansas City'de inşa edilen Westport Lisesi yapay hafif agrega ile inşa edilen ilk hafif beton yapısı olma özelliğindedir. Bunu, 1928 yılında St. Louis'teki "Park Plaza Oteli" ve Kansas City'deki "South Western Bell Telephone Company" inşaatları takip etmiştir [16].

Britanya'da yüksek fırın cürufu gibi yan sanayi ürünlerinden elde edilen yapay hafif agregalar ile üretilen hafif betonun kullanımı 20. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. Britanya'da hafif beton ilk olarak 1958 yılında Brentford'da 3 katlı bir ofis binası inşaatında kullanılmış, 1960 ve sonrasındaki yıllarda ise hafif beton ile az sayıda yapı inşa edilmiştir. Hafif betonun Japonya'da kullanımı 1960'lara, Avustralya'da 1970'li yıllara dayanmaktadır [16]. Sovyetler Birliği döneminde taşıyıcılık, ısı yalıtım özelliği ve yangın dayanımı gibi özelliklerin hepsini bünyesinde barındırması nedeniyle çok katlı konutların dış duvarlarında geliştirilmiş kilden elde edilen keramzite agregası ile üretilen hafif beton kullanılmıştır [14].

2.2. Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif betonlar, Tablo 2.1'de verildiği gibi yoğunluğuna, ısı iletim katsayısına ve basınç dayanımına bağlı olarak taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere üç gruba ayrılır [19].

2.2.1. Taşıyıcı hafif betonlar

ACI 213R'de; ASTM C 567'ye göre belirlenen yoğunluğu, 1.120-1.920 kg/m³ arasında, 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'nın üzerinde olan hafif betonlar taşıyıcı olarak tanımlanmıştır [20]. Taşıyıcı hafif betonlarda genellikle volkanik kaynaklardan elde edilen agregalar, ısı işlem görmüş şist, kil, arduvaz, genleştirilmiş cüruf ve uçucu külün peletlenmesi ile elde edilen agregalar kullanılmaktadır [19].

2.2.2. Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları

Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları, genelde dolgu betonu kullanılmasını gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Bu tür betonun basınç dayanımının ve yoğunluğunun taşıyıcı beton ile yalıtım betonunun arasında olması yeterlidir. Bunlar, yüksek oranda hava boşluğu içeren hafif agrega ile üretilir, basınç dayanımları 3,4-17,0 MPa arasında değişen bu betonların ısı özellikleri yalıtım betonu ile taşıyıcı hafif beton arasında değerler alır [19].

2.2.3. Yalıtım hafif betonu

Yalıtım hafif betonu, taşıyıcı olmayan, yüksek ısı direnç sağlamak amacıyla kullanılan, düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı betonlardır. Bu betonların üretiminde vermikülit ve perlit gibi düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı agregalar kullanılır. Yalıtım hafif betonlarının yoğunluğu 800 kg/m³'ün altındadır ve basınç dayanımı ise 0,7 ile 3,4 MPa arasında değişir.

Tablo 2.1: Hafif betonun kullanımına göre sınıflandırılması [19]

Hafif beton sınıfı	Basınç dayanımı (MPa)		Beton yoğunluğu (kg/m ³)		Isı iletim katsayısı (W/m °K)	
	A	B	A	B	A	B
Taşıyıcı (ACI 213R)	> 17,0	> 15,0	1120-1920	1600-2000	-	-
Taşıyıcı/yalıtım	3,4-17	> 3,5	800-1440	< 1600	0,22-0,43	< 0,75
Yalıtım	0,7-3,4	> 0,5	240-800	<<14500	0,065-0,22	< 0,30

A: Holm ve Ries'e göre, B: RILEM/CEB'e göre

* ACI 213R'de belirtilen dengeli yoğunluk (kg/m³)

Hafif betonlar TS EN 206-1'de (2002) yoğunluğuna ve basınç dayanımına göre sınıflandırılmaktadır. Yoğunluğu 800 kg/m³ ile 1000 kg/m³ arasında hafif betonlar D 1.0, yoğunluğu 1.000 kg/m³ ile 1.200 kg/m³ arasında olanlar D 1.2, yoğunluğu 1.200 kg/m³ ile 1.400 kg/m³ arasında olanlar D 1.4, yoğunluğu 1.400 kg/m³ ile 1.600 kg/m³ arasında olanlar D 1.6, yoğunluğu 1.600 kg/m³ ile 1.800 kg/m³ arasında olanlar D 1.8, yoğunluğu 1.800 kg/m³ ile 2.000 kg/m³ arasında olanlar D 2.0 olarak sınıflandırılmaktadır [2]. Basınç dayanım sınıfı ise LC8/9 ile LC80/88 arasında değişmekte; en düşük karakteristik silindirik basınç dayanımı (f_{ck}, MPa), 8 ile 80 MPa arasında değerler almaktadır.

Yoğunluğu, 300-2.000 kg/m³, küp dayanımı 1-60 MPa ve ısı iletim katsayısı 0,2-1,0 W/m °K olan hafif betonları taşıyıcılık, ısı iletim katsayısı ve yoğunluğuna bağlı olarak da sınıflandırmak mümkündür [16, 21].

3. HAFİF BETON ÖZELLİKLERİ

3.1 Taze Beton Özellikleri

Hafif betonun kütlesi homojen, en düşük kıvamı da istenen işlenebilirliği sağlayacak düzeyde olmalı, üretimde hafif agregalı betonun aynı işlenebilirlikteki normal betona göre daha düşük çökme değeri vereceği göz önünde bulundurulmalıdır [22]. Hafif betonlarda karışım hesabı yapılırken agreganın su emme oranı ve birim ağırlığı gibi fiziksel özellikleri dikkate alınmalıdır. Bunlardan en önemlisi agregaların su emme oranıdır. Doğal ya da yapay olsun bütün agregalar zamana bağlı olarak belirli oranda su emerler, bu olay kuru ya da kısmen doymuş agregalarda oldukça önemlidir çünkü taze betonun işlenebilirliğini, pompalanabilirliğini, yoğunluğunu, ısı özelliklerini, yanığına ve donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığını doğrudan veya dolaylı olarak etkiler. Bir agreganın su emme oranı ve hızı, boşluk hacmine, boşluk dağılımına ve yapısına bir başka deyişle boşlukların sürekli ya da süreksiz oluşuna bağlıdır. Hafif agregalarda boşluk hacmi normal agregalara oranla daha fazla olduğundan su emme oranı ve hızı da genelde daha fazladır. Agregaların su emme oranları genellikle etüv kuru su ağırlığına bağlı olarak 30 dakikada ve 24 saatteki su emmesine göre belirlenir. Hafif agregaların 30 dakikalık su emme oranı %3-12 arasında iken 24 saatlik su emme oranı genelde %5-

15 arasında değerler almakta, agreganın gözenek yapısına bağlı olarak daha yüksek su emme oranları da gözlemlenmektedir.

Beton üretiminde hafif agregalar tarafından emilecek su miktarının yaklaşık hesabında 30 dakikalık su emme oranı dikkate alınabilir. Hafif betonda, belirli bir beton sınıfı için hazırlanacak karışımların çimento içeriği, normal betona oranla genelde daha fazladır ve ulaşılabilecek en büyük dayanım, kullanılacak agreganın cinsine bağlıdır. Hafif betonun kalıba yerleştirme ve kür işlemleri normal betondan farklı değildir ve hafif betonlar, agreganın tanelerinde tutulan rezerv sudan dolayı olumsuz kür şartlarından normal betona oranla daha az etkilenir [16, 21].

3.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Hafif betonların basınç dayanımı, etüv kuru su birim ağırlığı, rötresi ve ısı iletim katsayısı gibi temel özellikleri, beton üretiminde kullanılan agregaların cinsine, agreganın tane boyutuna ve birim ağırlığına göre geniş bir alanda değişim göstermektedir. Sertleşmiş hafif betona ait fiziksel ve mekanik özellikler ve bunlara etki eden faktörler aşağıda verilmiştir.

3.2.1 Yoğunluk

Sertleşmiş beton yoğunluğu, taze beton yoğunluğundan düşüktür; düşüşün nedeni nem kaybıdır ve kayıp oranı, ortam şartlarının ve beton elemanın yüzey alanı/hacim oranının bir fonksiyonudur. Hafif betonda ince agregalar normal kum kullanılması, yoğunluğu artırır. Basınç dayanımı 35 MPa'ın üzerinde hafif beton elde etmek için çimento miktarının artırılması gerekir, bu durumda da yoğunluk artar. Yoğunluğu etkileyen faktörler aşağıdaki gibi özetlenebilir [19].

- Karışımdaki hafif agregaların normal agregalar ile değiştirilmesi, beton yoğunluğunu yaklaşık 150-200 kg/m³ artırır.
- Suya doymuş ya da kısmen doymuş hafif agregalar ile üretilen betonların yoğunluğu, tam kuru agregalar ile üretilenlerden daha fazladır; agreganın nem içeriği arttıkça betonun yoğunluğu artar.
- Çimento dozajındaki 100 kg/m³'lük bir artış, yoğunlukta yaklaşık 50 kg/m³'lük artışa neden olur.
- Katkı maddesi ile karışıma giren sürüklenmiş hava, yoğunluğu yaklaşık 90 kg/m³ azaltır.

3.2.2 Basınç dayanımı

Birçok hafif agregalı, basınç dayanımı 35 MPa ve üzerinde hafif beton üretimi için yeterlidir, ancak sınırlı sayıda hafif agregalar ile dayanımı 50-70 MPa olan betonlar üretilebilmektedir. Basınç dayanımı 20-35 MPa olan hafif betonların yerinde dökümü yaygındır; daha yüksek dayanımdaki hafif betonlar ise prekast köprü elemanlarında ve offshore uygulamalarında kullanılmaktadır. Hafif agregalı betonlarda ulaşılabilecek en yüksek dayanım sınırlıdır. Örneğin bağlayıcı malzeme ilavesi dayanımda önemli ölçüde artış sağlamazken hafif agreganın cinsi, alındığı kaynak vb. özellikler dayanımda önemli rol oynar. Hafif agregalı betonun basınç dayanımı da normal betonlarda olduğu gibi agreganın dayanımı, boşluk oranı, boşluk çapı ve dağılımı gibi parametreler ve boşlukları çevreleyen camsı fazın özellikleri ile yakından ilişkilidir [19]. Hafif betonda basınç dayanımını etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir;

- Agregalı tanelerinin dayanımı ve rijitliği: Betonun maksimum dayanımı kullanılan agreganın cinsine bağlıdır. Zayıf agregalı taneleri, daha kuvvetli bir hamur fazı, dolayısıyla daha fazla çimento miktarı gerektirir [19].
- Çimento miktarı: Beton basınç dayanımı, agregalı cinsine bağlı olarak belirli bir işlenebilirlik için çimento miktarı ile artar, dozajdaki %10'luk bir artış, dayanımı yaklaşık %5 arttırır [18]. Şahin, vd. tarafından yapılan çalışmada dozajın 200 kg/m³'ten 500 kg/m³'e çıkarılması ile basınç dayanımının %265 arttığı ifade edilmektedir [23, 24].
- Betonun yaşı: Zamanın hafif betona etkisi normal betondakine benzerdir; ancak hafif agregalı betonlar, zayıf kür şartlarından normal betona oranla daha az etkilenir [16]. Bununla birlikte Haque, vd. yaptıkları çalışmada hafif beton numunelerde en iyi dayanım gelişiminin suda kür edilen numunelerde gözlemlendiğini ifade etmişlerdir [25].

Lo, vd. tarafından yapılan deneysel çalışmalarda [26, 27], en yüksek basınç dayanımına 30 dakika ön emdirme işlemi uygulanan hafif agregalar ile üretilen beton numunelerde ulaşıldığı, agregalara ön su emdirme süresi uzadıkça hafif betonun basınç dayanımının arttığı ifade edilmektedir. Chen ve Liu, yaptıkları çalışmada, lif ilavesi ile hafif betonun basınç dayanımının lif katılmayan hafif betona oranla %20'den fazla arttığını belirlemişlerdir [28]. Hossain tarafından yapılan çalışmada volkanik ponza agregası ile üretilen hafif beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımının 22-27 MPa arasında olduğu, karışımda ponza agregasının artması ile basınç dayanımının azaldığı belirtilmektedir [29]. Gündüz ve Uğur, yaptıkları çalışmada ponza betonunun 28 günlük basınç dayanımının 14,6-26,1 MPa arasında olduğunu, kür süresinin

ve çimento miktarının artışı ile dayanımın da arttığını ifade etmişlerdir [30]. Bazaltik ponza agregası ve silis dumanı kullanımı ile basınç dayanımı 40 MPa olan taşıyıcı hafif beton üretmek ve taşıyıcı hafif beton kullanımı ile yapılarda zati yükü azaltmak mümkündür [31].

3.2.3 Çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı iri agregalı taneleri ile harç fazın çekme dayanımına ve iki faz arasındaki aderansa bağlıdır. Çekme dayanımı, genellikle basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak tanımlanır, ancak bu yaklaşımda agregalı tanelerinin dayanımı, yüzey karakteristikleri ve betonun nem içeriği dikkate alınmamaktadır. Çekme ile ilişkili özelliklerin belirlenmesinde uygulanan yarma deneyi, basit ve pratik bir yöntemdir. Taşıyıcı hafif betonun yarma dayanımı, aynı basınç dayanımına sahip normal betonun yarma dayanımının %75'i ile %100'ü arasında değişir. Hafif ince agregalı yerine normal ince agregalı kullanılması, betonun çekme dayanımını arttırır [19].

3.2.4 Şekil değiştirme

Hafif agregaların rijitliğinin az oluşu ve karışımda daha fazla çimento kullanılması, betonda daha yüksek deformasyonlar oluşmasına neden olur. Hafif agregalardaki gerilme şekil değiştirme ilişkisi normal betonlara göre daha lineerdir. Böyle bir davranış agregalı taneleri ile çimento matrisi arasındaki aderansın daha iyi oluşuna bağlıdır [16]. Düzgün vd. tarafından yapılan çalışmada çelik lif ilavesi ile hafif betonun şekil değiştirme kapasitesinin arttığı, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin artan ve azalan kısımlarındaki eğimin değiştiği, çelik lifin esas önemli etkisinin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında olduğu, lif oranı arttıkça bu bölgedeki eğimin azaldığı ifade edilmiştir [32].

3.2.5 Elastisite modülü

Betonun elastisite modülü, betonu oluşturan harç, hafif agregalı, normal agregalı gibi her bir fazın elastisite modülünün ve karışımdaki oranlarının bir fonksiyonudur. Normal betonun elastisite modülünün hafif betonun elastisite modülünden yüksek olmasının nedeni normal agreganın elastisite modülünün hafif agreganınkinden yüksek olmasıdır. Pratikte yoğunluğu 1.400 ile 2.500 kg/m³ arasında değişen betonların elastisite modülü ACI 318'de verilen (1) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$E = 0,04W_c^{1,5} \sqrt{f_c} \quad (1)$$

Bu bağıntıda; E (MPa) sekant modülünü, W_c (kg/m³) yoğunluğu, f_c (MPa) silindir basınç dayanımını ifade etmektedir. Bu tip denklemler yalnızca ilk yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

Elastisite modülü, $\pm\%25$ gibi yüksek oranda bağlayıcının ve agreganın cinsine, nem içeriğine, vb. faktörlere bağlıdır. Yukarıda verilen bağıntı genellikle yüksek dayanımlı hafif betonun elastisite modülü için yüksek değerler verir [19].

Hafif betonda çimento dozajının betonun elastisite modülüne etkisinin araştırıldığı bir çalışmada; dozajın 200 kg/m^3 'ten 500 kg/m^3 'e çıkarılması ile betonun elastisite modülünde $\%112$ 'lik bir artış olduğu, basınç dayanımı $28,14 \text{ MPa}$ olan betonun elastisite modülü 14657 MPa olarak belirlenmiştir [23]. Gündüz ve Uğur'un çalışmasında da basınç dayanımı, $15-26 \text{ MPa}$ olan hafif betonun elastisite modülünün $8700-11000 \text{ MPa}$ arasında değerler aldığı belirtilmiştir [30].

3.2.6 Sünme

Sabit gerilme etkisinde kalan malzemelerde zaman içinde meydana gelen yavaş, fakat ilerleyen şekil değiştirmeye (deformasyona) sünme denir. Betonda sünmenin etkisi, kuruma rötresi ile birlikte değerlendirilmeli, gerek görüldüğü takdirde yapısal tasarımlarda dikkate alınmalıdır. Hafif agregalı betonlardaki sünme şekil değiştirmesi, elastisite modülünün daha düşük olması nedeniyle normal betona göre $1,0-1,15$ katı kadar daha yüksektir. Sünme ve kuruma rötresi, çimentonun cinsine ve miktarına, agregaların cinsine, granülometrisine, karışım sırasındaki nem içeriğine, beton karışımının su içeriğine, sürüklenmiş hava miktarına, kür yöntemine, betonun yaşına, yüklemeye uygulanan gerilme değerine ve süresine, numune veya yapı elemanının boyutlarına ve ortamın bağıl nemine bağlıdır [16, 20, 33]. Sünme ve rötresiz şekil değiştirmeleri, uzun sürede sehimi artıracak, öngerme kuvvetinde kayba yol açacağı ve gerilme yığılmasını arttıracak için bu tip zamanla ilişkili parametrelerin doğru hesaplanması ve tasarımı dikkate alınması gerekir [19].

3.2.7 Rötresiz

Betonun içindeki suyun fiziksel ve/veya kimyasal nedenlerle azalması sonucunda betonun boyunda ve hacminde meydana gelen küçülme/büzülme rötresiz olarak adlandırılır. Rötresiz, hem beton taze iken, hem de sertleşmiş durumda iken meydana gelen bir olaydır. Taze betondaki su kaybı tamamen fiziksel nedenlere dayanmaktadır. Taze betondaki suyun bir kısmı, betonun yerleştirildiği kalıplar veya zemin tarafından emilerek kaybolmakta, asıl su kaybı ise betondaki suyun buharlaşması ile gerçekleşmektedir. Sertleşmiş betondaki su kaybı, hem fiziksel hem de kimyasal nedenlerle gerçekleşmektedir. Betonun kuruması, karbonatlaşması ve betonun içindeki çimentonun hidrasyonu, sertleşmiş betondaki suyun azalmasına yol açan başlıca etkenlerdir. Bu nedenle sertleşmiş betondaki rötresiz, su kaybına yol açan bu etkenlere bağlı olarak hidrasyon rötresi, karbonatlaşma rötresi ve kuruma rötresi olarak adlandırılmaktadır. Betonun büzülmesi

zamana bağlı bir olay olduğundan üzerine yük uygulanmış olsa da, olmasa da, zaman ilerledikçe hacminde küçülme meydana gelmektedir. Bu olayda, agregaların taneleri, çimento hamurunun serbestçe büzülebilmesini kısıtlamaktadır [33].

Hafif agregalı betonların rötresiz normal betonların $1,0-1,5$ katı kadardır ancak karışıma hafif ince agregaya yerine normal ince agregaya katılması durumunda normal betonla benzer sonuçlar elde edilebilir. Sünme ve rötresiz aynı anda oluşur ve belki bundan dolayı hafif agregalı betonlarda rötresiz çatlağı oluşumu nadiren gözlenir [16, 20]. Chen ve Liu, yaptıkları çalışmada lif ilavesinin hafif betonun erken yaşlardaki rötresiz üzerinde etkili olmadığını, 60. günden sonra ise rötresiz neredeyse tamamen engellendiğini belirlemişler, lif kullanımı ile rötresiz $\%24-30$ arasında azaldığını ifade etmişlerdir [4].

Düşük dayanımlı ponza betonunda yapılan çalışmalarda kuruma rötresizinin ponza agregası/çimento oranı arttıkça azaldığı, beton numunelerinde rötresizinin $\%0,08$ 'in altında olduğu [24], diğer bir çalışmada ise ponza betonunda rötresizinin $\%0,027-0,037$ arasında değiştiği ifade edilmiştir [30]. Kayalı, vd., yaptıkları çalışmada normal beton ile hafif betonun uzun dönemdeki kuruma rötresizini incelemişler, yaklaşık 400 günlük süreçte yüksek dayanımlı normal betonun kuruma rötresizinin, hafif betonun yarısı kadar olduğunu ve 500×10^{-6} 'da sabitlendiğini, sinterlenmiş uçucu kül agregalı hafif betonun ise ilk 100 günde artan hızda rötresiz yaptığini, bu artış oranının zamanla azalmadığını ifade etmişlerdir [34]. Büyük hacimli beton elemanların ya da bağıl nemin yüksek olduğu ortam şartlarına maruz kalan betonların rötresizden daha az etkileneceği dikkate alınmalıdır.

3.2.8 Yorulma

Maksimum statik gerilme değerinin altındaki tekrarlı gerilme neticesinde malzemede meydana gelen göçme olayına yorulma denir [33]. Clark, yoğunluğu 1.500 kg/m^3 'ün üzerinde olan hafif betonun tekrarlı basınç yükleri altında normal betonla aynı davranışı gösterdiğini belirtmiştir [16]. Ramakrishnan vd., yaptıkları deneysel çalışmada $30-50 \text{ MPa}$ basınç dayanımına sahip hafif betonların yorulma mukavemetinin $2,2-3,0 \text{ MPa}$ arasında değiştiğini ifade etmişlerdir [35].

3.2.9 Su geçirimsizliği

Betonun su geçirimsizliği, porozitenin, boşluk çapı, dağılımı ve sürekliliğinin bir fonksiyonudur. Çoğu hafif agreganın su emme oranı normal agregalara oranla daha yüksek olduğundan hafif agregalı betonların permeabilite katsayısının ve ağırlıkça su emmelerinin normal betonlara oranla daha yüksek olduğu düşünülür, ancak, hafif betonda agregaların taneleri yüksek kalitede bir matris ile çevrili olduğundan, fark düşüldüğü kadar yüksek değildir [16].

Normal betonlarda su emme beton yaşı ile azalırken; Lo, vd. yaptıkları deneysel çalışmada hava sürükleyici katılan düşük dayanımlı hafif beton numunelerde su emmenin beton yaşı ile arttığını tespit etmişlerdir [36]. Kuru hâlde ve 24 saat suya doyurulan hafif agregalar ile üretilen harç numunelerde yapılan kılcal su emme deneyinde, suya doymuş agrega kullanılan harçların su emme oranlarının diğerlerinden yüksek olduğu belirlenmiş, bunun nedeninin suya doymuş agregalı harçta ara yüzey mikro yapısının daha boşluklu olması olarak açıklanmıştır [37]. Şahin, vd. yaptıkları deneysel çalışmada betonda ponza agregası oranının %100 olması durumunda betonun su emme oranının %16,7 olduğunu belirlemişlerdir [23]. Gündüz, yaptığı çalışmada ponza betonunun ağırlıkça su emme oranının %12,41 ile %26,37 arasında değiştiğini, ponza agregası/çimento oranı arttıkça su emmenin de arttığını, beton dayanımı azaldıkça su emmenin arttığını belirlemiştir [24]. Chia ve Zhang, aynı su/çimento oranına ve dozaja sahip hafif betonun su geçirimsizliğinin normal betondan daha az olduğunu, normal betonda su/çimento oranının azalması durumunda su geçirimsizliğinin hafif betona oranla çok daha düşük değerler aldığını, hafif ve normal betona silis dumanı ilavesinin su geçirimsizliğini azalttığını ifade etmişlerdir [5].

3.2.10 Isıl özellikler

Hafif agregalı betonların ısı genleşme katsayıları normal betondan daha düşüktür. Düşük ısı genleşme ve çekme etkisinde yüksek şekil değiştirme özellikleri nedeniyle hafif betonların ısı gerilmelerden dolayı hasar görme riski normal betona göre daha düşüktür [16]. Gözenekli yapılarından dolayı hafif agregaların boşluklarındaki hava, ısı transfer hızını azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak hafif agregalı betonlar birçok yapıda ısı yalıtımı sağlamak amacıyla kullanım alanı bulmuştur. Çeşitli kaynaklarda hafif betonun ısı direncinin normal betonunkinin yaklaşık 6 katı olduğu ifade edilmektedir [24, 29, 38]. Hafif agregalı betonların ısı iletim katsayısı betonun yoğunluğuna, agregası cinsine ve nem içeriğine bağlıdır [16].

Yapılan deneysel çalışmalarda ponza betonunun ısı iletim katsayısı, betonun yoğunluğuna ve ponza agregası/çimento oranına bağlı olarak 0,200-0,455 W/mK arasında değiştiği ifade edilmiştir [30, 24]. Hossain, yaptığı çalışmada volkanik ponza agregası kullanılarak üretilen hafif betonların ısı iletim katsayısının 0,163-0,231 W/mK arasında olduğunu belirlemiş, beton karışımındaki ponza agregası miktarı arttıkça betonun ısı iletim katsayısının azaldığını belirtmiştir [29]. Demirboğa ve Gül, yaptıkları çalışmada %100 ponza agregalı betonun ısı iletim katsayısının 0,3 W/mK civarında olduğunu, betona ponza agregası yerine geliştirilmiş perlit ilavesinin ısı iletim katsayısını azalttığını, silis dumanı ve uçucu kül gibi mineral katkıların da betonun ısı iletim katsayısını azalttığını belirlemişlerdir [39].

3.3 Dayanıklılık

Dayanıklılık, malzemenin çevresel etkilere karşı koyma özelliği olarak tanımlanabilir. Yapı malzemelerinde bu etkiler, kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak gruplandırılabilir. Kimyasal etkiler genellikle zararlı yer altı suyu, kirli hava ve reaktif sıvıların etkisidir. Fiziksel etkiler esas olarak donma-çözülme, rötre ve ısı gerilmelerdir. Mekanik etkiler ise aşınmadan ve darbeden kaynaklanabilir [40]. Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve dayanıklılığı beton matrisin boşluk yapısı ile doğrudan ilişkilidir [41].

Hafif agregası rijitliği ile çimento hamurunun rijitliğinin birbirine yakın oluşu, gerilmelerin üniform dağılımını ve beton dayanımının beklenenden daha yüksek çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca çimento hamuru ile genişlemiş agregası arasındaki aderansın oldukça iyi olması nedeniyle arayüzdeki dayanım oldukça yüksektir. Bu iki faktör hafif agregalı betonun dayanıklılığını arttırmaktadır [38].

Hafif beton ile üretilen birçok köprü yapısının gösterdiği performans hafif agregalı betonun daha geniş çapta kullanımını teşvik etmiştir. Yıllarca şiddetli agresif ortam koşullarına maruz kalan hafif beton ile inşa edilen yapılardan alınan karot numunelerde yapılan incelemelerde agregası-çimento hamuru arasında herhangi bir aderans kaybının olmadığı tespit edilmiştir. Hafif betonun bu kadar iyi performans göstermesindeki en önemli etken agregası-çimento hamuru arasındaki aderansın fiziksel ve kimyasal olmasından ve birçok normal betona oranla daha iyi bir arayüz oluşmasından kaynaklanmaktadır. Agregası tanelerinin hidrasyon sırasında terleyen suyu emmesi ve ileriki safhalarda içsel kürlenme ile katkıda bulunması bu bölgenin gelişimine katkı sağlamaktadır [42].

3.3.1 Donma çözülme

Hafif agregalı betonların donma-çözülme etkisi altındaki performansı esas olarak karışım oranlarına, agregasının cinsine, nem içeriğine ve sürüklenmiş hava miktarına bağlıdır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hava sürüklenmemiş hafif agregalı betonların aynı dayanıma sahip hava sürüklenmemiş normal betonlara oranla donma-çözülme etkisine daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ön su emdirme işlemi uygulanan hafif agregalarla üretilen hava sürüklenmiş hafif betonun performansının aynı özellikteki normal betonla hemen hemen aynı olduğu, ancak hava kurusu durumdaki hafif agregalar ile üretilen hava sürüklenmiş hafif betonun donma-çözülme etkisine karşı performansının normal betona göre çok daha iyi olduğu görülmüştür [16]. Gao vd. tarafından yapılan bir çalışmada; yüksek performanslı hafif betonlarda mikro çatlakların donma dayanıklılıktaki en önemli faktör olduğu, donma-çözülme etkisine maruz kalan betonda çatlak oluşumunun temel nedenlerinden birinin su-

yun donması, genişmesi ve gerilme oluşturmaları; diğerinin ise tekrarlı donma-çözülme sırasında oluşan ısıl gerilmeler olduğu belirtilmiştir. Bu sakıncaların giderilmesi için betona uçucu kül ilavesi ile daha yoğun bir içyapı elde edilebileceği, bu şekilde mikro çatlak oluşumunun ve çatlak ilerleyişinin engellenebileceği ifade edilmiştir [43].

3.3.2 Yüksek sıcaklığa dayanıklılık

Malzemeler, yanıcılık bakımından yanıcı-tutuşabilir olanlar ve yanıcı olmayanlar şeklinde sınıflandırılabilir. Taş, tuğla ve beton gibi inorganik malzemeler yanıcı değildir. Bir binanın yapı elemanlarına yangının etkisi, ulaşılan sıcaklığa, yangının süresine ve yapı elemanının ısıl özelliklerine bağlıdır [40]. Taşıyıcı hafif agregalı betonların yangına karşı dayanıklılığı normal betonlara göre daha yüksektir çünkü hafif agregalar;

- Yüksek sıcaklık etkisinde stabiliteyi korur, bu nedenle betonda dayanım kaybı daha az olur.
- Normal betona göre daha iyi ısıl performans göstermelerinden dolayı daha fazla ısı yalıtımı sağlar.
- Hafif agregalarda ısıl genişlemenin düşük olması betonun hasar görme riskini azaltır [16, 21].

3.3.3 Aşınma Direnci

Betonda aşınma direnci, betonun dayanımına, sertliğine, çimento matrisinin ve agregaların tokluğuna ve bu iki fazın aderansına bağlıdır. Taşıyıcı beton üretimine uygun olan çoğu hafif agrega camı seramik bir yapıdan oluşur ve Mohs sertlik skalasında kuvarza denktir; agregaların bu özelliği nedeniyle taşıyıcı hafif betondan mamul köprüler 100 milyondan fazla araç geçişine maruz kaldıklarında normal betona benzer aşınma performansı göstermiştir [19]. Hafif betonda aşınma dayanımını arttırmak için nispeten yumuşak olan iri agregayı sert ince agrega ile birleştirmek ve matrisin kalitesini arttırmak gerekir [16].

3.3.4 Karbonatlaşma

Hafif betonda agrega tanelerinin iyi kalitede bir matris içinde homojen dağılması durumunda karbonatlaşma oranı normal betondakinden çok farklı olmayacaktır ancak, korozyon dik-kate alındığında hafif beton ile yapılan yapılarda pas payının normal betonlara oranla daha fazla tutulması gerekmektedir ancak kaliteli hafif betonlarda karbonatlaşmadan dolayı, donatıda korozyon etkisi nadiren gözlenmiştir [16].

II. Dünya savaşı sırasında inşa edilen birçok betonarme gemiden karot numune alınarak karbonatlaşma ölçümleri yapılmış, 28 günlük basınç dayanımı 35 MPa'nın üzerinde, yoğunluğu 1730 kg/m³ olan betonların, 40 yıl boyunca deniz suyuna maruz kalmalarına rağmen hâlâ mükemmel durumda olduğu gözlenmiştir. Alınan karot numunelerdeki donatılarda korozyon oluşmadığı, donatı-beton arayüzünde karbonatlaşmaya rastlanmadığı, karbonatlaşma derinliğinin 1-2mm arasında ol-

duğu belirlenmiştir. 35 yıllık Chesapeake Bay Köprüsü'nden alınan beton karot numunelerde ise karbonatlaşma derinliğinin 2-13mm arasında olduğu belirlenmiş, New York'ta yer alan Coxsackie Köprüsü'nden alınan 15 yıllık beton karot numunelerde karbonatlaşma derinliğinin 5-10mm arasında olduğu gözlenmiş, donatıda korozyona rastlanmamıştır [13].

3.3.5 Donatı korozyonu

Hafif agregalı betonlarda çimento dozajının yüksek olduğundan dolayı betonun alkalitesi oldukça yüksektir ve donatı korozyonunu önleyici bir ortam oluşturur. Bu ortam, hafif betonun iyi yerleştirilmesi koşulu ile donatının korozyon riskini oldukça azaltır ancak, 300 kg/m³'ün altındaki düşük çimento dozajlarında erken korozyon meydana gelebilir. Her ne kadar bazı ulusal standartlarda hafif agregalı betonlarda örtü betonu kalınlığının daha fazla olması önerilse de pratikte birçok durumda böyle bir uygulamanın gerekmediği gözlenmiştir [16].

4. SONUÇLAR

Hafif beton, yapı üretiminde geçmişten günümüze yaygın olarak kullanılmıştır. Hafifliğinden ve ısıl özelliklerinden dolayı tercih edilen bu tür betonların, taşıyıcı olarak kullanımına yönelik birçok örnek mevcuttur. Dayanım ve dayanıklılık açısından normal betona oranla fazla eksiği olmayan, ancak hafifliği ve iyi ısı yalıtımı sağlaması gibi avantajlara sahip olan hafif betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi koşulu ile yapı sektöründe taşıyıcı malzeme olarak daha yaygın kullanılması yapım ve kullanım maliyetinde azalma sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya esas olan 26-05-01-03 numaralı "Yapı Malzemelerindeki Boşluk Yapısının Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi" konulu projeyi destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Araştırma Fonu Başkanlığına teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Kabay, N., Aköz F. "Hafif Beton" Derleme Makalesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezlerinden Üretilmiş Yayınlar Özel Sayısı, cilt 2, sayı 1, 2009.
- TS EN 206-1, "Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", 2002.
- Postacıoğlu, B., "Agregalar, Beton", Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1987, 397-400.
- Chen, B. and Liu, J., "Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-strength Lightweight Concrete Having Good Workability", Cement and Concrete Research, 35, 913-917, 2005.
- Chia, K., S. and Zhang, M., "Water Permeability and Chloride Penetrability of High-strength Lightweight Aggregate Concrete", Cement and Concrete Research, 32, 639-645, 2002.
- Alduaj, J., Alshaleh, K., Haque, N. and Ellaihy, K., "Lightweight Conc-

rete in Hot Coastal Areas", *Cement and Concrete Research*, 21, 453-458, 1999.

Düzgün, O., A., Gül, R. and Aydın, A., C., "Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Natural Lightweight Aggregate Concrete", *Materials Letters*, 59, 3357-3363, 2005.

Bouguerra, A., Ledhem, A., Barquin, F., et al., "Effect of Microstructure on the Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Prepared from Clay, Cement, and Wood Aggregates", *Cement and Concrete Research*, 28, 8, 1179-1190, 1998.

Megri, A. C., Achard, G. and Haghghat, F., "Using Plastic Waste as Thermal Insulation for the Slab-on-grade Floor and Basement of a Building", *Building and Environment*, 33, 2-3, 97-104, 1998.

Babu, K., G. and Babu, D., S., "Behaviour of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume", *Cement and Concrete Research*, 33, 755-762, 2003.

Miled, K., Roy, R., L., Sab, et al., "Compressive Behavior of an Idealised EPS Lightweight Concrete: Size Effects and Failure Mode", *Mechanics of Materials*, 36, 1031-1046, 2004.

Haque, M., N., Al-Khaiat, H. and Kayali, O., "Strength and Durability of Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Composites*, 26, 307-314, 2004.

Chandra, S. and Berntsson, L., "Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology, and Applications", Noyes Publications, William Andrew Publishing, New York, 2003.

Bremner, T., W. and Holm, T., A., "High Performance Concrete - A Review", Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, 1995.

Bremner, T., W., Holm, T., A. and Stepanova, V., F., "Lightweight Concrete - A Proven Material For Two Millennia", *Proceedings of Advances in Cement and Concrete*, New Hampshire, 24-29 July 1994.

Clarke, J., L., "Structural Lightweight Aggregate Concrete", Chapman&Hall, Great Britain, 1993.

Bremner, T. and Holm, T., A., "Lightweight Aggregate Concrete for High Performance", International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty- First Century, Hyderabad (India), 9-11 February 1999.

Bremner, T., W., "Durability of Lightweight Concrete", Symposium on Lightweight Concrete Bridges, California, 10 September 1996.

Lamond, J., F. ve Pielert, J., "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete- making Materials", ASTM Publication, 2006. ACI 213R-03, "Guide For Structural Lightweight-Aggregate Concrete", 2003.

Neville, A.M., "Properties of Concrete", Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York, 2000.

TS 2511, "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları", 1977.

Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H., et al., "The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Compressive Strength and Densities of Concrete", *Cement and Concrete Research*, 33, 1245-1249, 2003.

Gündüz, L., "The Effects of Pumice Aggregate/cement Ratios on the Low/strength Concrete Properties", *Construction and Building Materials*, 2007.

Haque, M., N., Al-Khaiat, H. and Kayali, O., "Strength and Durability of Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Composites*, 26, 307-314, 2004.

Lo, T., Y., Cui, H., Z. ve Li, Z., G., "Influence of Aggregate Pre-wetting and Fly Ash on Mechanical Properties of Lightweight Concrete", *Waste Management*, 24, 333-338, 2004.

Lo, Y., Gao, X., F. and Jeary, A., P., "Microstructure of Pre-wetted Aggregate on Lightweight Concrete", *Building and Environment*, 34, 759-764, 1999.

Chen, B. and Liu, J., "Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-strength Lightweight Concrete Having Good Workability", *Cement and Concrete Research*, 35, 913-917, 2005.

Hossain, K., M., A., "Potential Use of Volcanic Pumice as a Construction Material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 6, 573-577, 2004.

Gündüz, L. ve Uğur, İ., "The Effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using any Admixtures", *Cement and Concrete Research*, 35, 1859-1864, 2005.

Kılıç, A., Atiş, C., D., Yaşar, E., vd., "High-strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures", *Cement and Concrete Research*, 33, 1595-1599, 2003.

Düzgün, O., A., Gül, R. ve Aydın, A., C., "Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Natural Lightweight Aggregate Concrete", *Materials Letters*, 59, 3357-3363, 2005.

Erdoğan, T., Y., "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 2003.

Kayali, O., Haque, M., N. ve Zhu, B., "Drying Shrinkage of Fibre-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Containing Fly Ash", *Cement and Concrete Research*, 29, 1835-1840, 1999.

Ramakrishnan, V., Bremner, T., W. and Malhotra, V., M., "Fatigue Strength and Endurance Limit of Lightweight Concrete", *Proceedings of the American Concrete Institute Symposium on Performance of Lightweight Concrete*, Dallas, 14 November 1992.

Lo, T., Y., Cui, H., Z., Nadeem, A., et al., "The Effects of Air Content on Permeability of Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Research*, 36, 1874-1878, 2006.

Elsharief, A., Cohen, M., D. and Olek, J., "Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar", *Cement and Concrete Research*, 35, 1368-1376, 2005

Bremner, T., W., "Lightweight Concrete an Environmentally-Friendly Material", International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, Ottawa, Canada, 21-23 October 1998.

Demirboğa, R. ve Gül, R., "The Effects of Expanded Perlite Aggregate, Silica Fume and Fly Ash on the Thermal Conductivity of Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Research*, 33, 723-727, 2003.

Short, A., Kinniburgh, W., "Lightweight Concrete", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1963.

Lo, T., Y., Cui, H., Z., Tang, et al., "The Effect of Aggregate Absorption on Pore Area at Interfacial Zone of Lightweight Concrete", 22, 623-628, 2008.

Holm, T.A., Bremner, T.W. and Newman, J.B., "Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering", *ACI - Concrete International*, 6,6:49-54, 1984.

Gao, X., F., Lo, Y.T. and Tam, C.M., "Investigation of Micro-cracks and Microstructure of High Performance Lightweight Aggregate Concrete", *Building and Environment*, 37, 485-489, 2002.