

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAFİF AGREGALI BETONLARDA MEZO-MEKANİK
MODELLEME**

MELTEM YALMAN

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAFİF AGREGALI BETONLARDA MEZO-MEKANİK
MODELLEME

MELTEM YALMAN

Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Nihat KABAY

Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖNER

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada hafif agregalı betonlarda elastisite modülünün mezo-mekanik modellenmesi yapılarak, elde edilen modelleme sonuçları ile deneysel sonuçlar kıyaslanmaktadır.

Öncelikle tez çalışmam süresince bana olan inancı ile her daim destek olan, araştırma ve çalışmalarında bilgi birikimi ve tecrübesiyle yol gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bunun yanında hayatımın her aşamasında beni hep destekleyen, maddi ve manevi olarak yanımda olan başta anne ve babama sonrasında çok değerli kardeşlerime, son olarak sevgili eşim Selim Can YALMAN'a gösterdiği büyük sabır, ilgi, hoşgörü ve manevi desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Mayıs - 2021

Meltem YALMAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
1.1. Hafif Beton	4
1.1.1. Hafif betonların sınıflandırılması	5
1.1.1.1. Taşıyıcı hafif betonlar.....	5
1.1.1.2. Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları	6
1.1.1.3. Yalıtım hafif betonu.....	6
1.1.2. Hafif beton üretiminde kullanılan agregalar	8
1.1.2.1. Ponza.....	10
1.1.2.2. Uçucu kül	11
1.1.2.3. Genleştirilmiş kil.....	12
1.1.2.4. Yüksek fırın cürufu.....	12
1.1.2.5. Genleştirilmiş perlit	13
1.1.3. Hafif agregaların özellikleri	13
1.1.3.1. İç yapı özellikleri	13
1.1.3.2. Tane şekli ve yüzey dokusu	13
1.1.3.3. Birim ağırlık.....	14
1.1.3.4. Özgül ağırlık	14
1.1.3.5. Su emme	14
1.1.4. Hafif betonların taze ve sertleşmiş hal özellikleri	15
1.1.4.1. Yoğunluk	16
1.1.4.2. Basınç dayanımı.....	17
1.1.4.3. Çekme dayanımı	18
1.1.4.4. Şekil değiştirme	19
1.1.4.5. Elastisite modülü.....	19
1.1.4.6. Sünme	20
1.1.4.7. Rötne.....	21
1.1.4.8. Yorulma	23
1.1.4.9. Su emme	23
2. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN MEZO-MEKANİK MODELLEMESİ	25
2.1. Elastisite Modülünün Tahmini	25
2.2. Elastisite Modülünün Mezo-Mekanik Modellenme Aşamaları	27
2.2.1. Çimento hamurunun elastisite modülü.....	28
2.2.2. Çimento harcının elastisite modülü.....	29
2.2.3. Betonun elastisite modülü	30

3. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN MEZO-MEKANİK MODELLEME İLE ANALİZİ.....	31
3.1. Mezo-Mekanik Modellemesinde Kullanılan Deneysel Elastisite Modülü Verileri.....	31
3.2. Elastisite Modülünün Tahmininde Kullanılan Modeller.....	32
3.3. Mezo-Mekanik Modelleme Analizleri	35
3.4. Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	36
4. SONUÇLAR	42
KAYNAKLAR	43
EKLER.....	48
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	51
ÖZGEÇMİŞ	52



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Hafif agregalı betonların birim ağırlığına göre sınıflandırılması.....	10
Şekil 2.1. Performans ile ilişkili basınç dayanımı-elastisite modülü değişimleri	26
Şekil 3.1. PN 2-4 serisinin değişken α değerlerine karşılık elastisite modülü (GPa)-beta eğrisi.....	37
Şekil 3.2. PN 4-8 serisinin değişken α değerlerine karşılık elastisite modülü (GPa)-beta eğrisi.....	37
Şekil 3.3. PL 2-4 serisinin elastisite modüllerinin deneysel sonuçlarının ve mezo-mekanik modelleme ile elde edilen değerlerinin karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.4. PL 4-8 serisinin elastisite modüllerinin deneysel sonuçlarının ve mezo-mekanik modelleme ile elde edilen değerlerinin karşılaştırılması.....	39

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Hafif betonun sınıflandırılması.....	6
Tablo 1.2.	Hafif beton için dayanım sınıfları.....	7
Tablo 1.3.	Hafif betonun yoğunluğuna göre sınıflandırılması	7
Tablo 1.4.	Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif beton kriterleri	8
Tablo 1.5.	Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri.....	9
Tablo 2.1.	Betonların elastik modülleri için tahmin modelleri	25
Tablo 3.1.	Karışımda kullanılan malzemeler	32
Tablo 3.2.	Elastisite modülü tahmininde kullanılan modeller	33
Tablo 3.3.	Elastisite modülü tahmininde kullanılan modellerden elde edilen sonuçlar.....	34
Tablo 3.4.	Farklı hidrasyon dereceleri için PREF örneğinin elastisite modülü mezo-mekanik modelleme sonuçları	35
Tablo 3.5.	PREF, FMREF, MREF ve CREF karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa.....	35
Tablo 3.6.	PN 0-2, PN 2-4 ve PN 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik sonuçları, GPa.....	35
Tablo 3.7.	PN 0-2, PN 2-4 ve PN 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa.....	36
Tablo 3.8.	PL 2-4 ve PL 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa.....	38
Tablo 3.9.	MREF karışımındaki 2-4 mm boyutundaki normal agregaların 2-4 mm hafif agrega ile yer değiştirildiği harç karışımlarının deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları.....	40
Tablo 3.10.	Genleştirilmiş kil hafif agregası içeren kompozitlerin elastisite modüllerinin mezo-mekanik bağıntılar ile hesaplama sonuçları, GPa.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

β	: Bağları giderilmiş malzemenin yüzey alanı oranı
D	: Yoğunluk sınıfı
f _{ck,sil}	: Karakteristik silindir dayanımı (MPa)
f _{ck,küp}	: Karakteristik küp dayanımı (MPa)

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Deney ve Materyaller Birliği)
CEB-FIB	: Comité européen du béton (Avrupa Beton Komitesi) - Fédération Internationale de la Précontrainte (Uluslararası Öngerilme Federasyonu)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EN	: European Norm (Avrupa standartları)
EK	: Etüv Kurusu
MS	: Milattan Sonra
LC	: Hafif Beton
PREF	: Çimento hamuru
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (Uluslararası Laboratuvarlar ve Yapı Malzemeleri, Sistem ve Yapı Uzmanları Birliği)
TS	: Türk Standartları

HAFİF AGREGALI BETONLARDA MEZO-MEKANİK MODELLEME

ÖZET

Çimento hamuru ve agreganın betonun elastisite modülüne etkisini belirleyebilmek için çimento hamuru ve farklı tane büyüklüklerinde olan normal ve hafif ağırlıklı agregalar kullanılarak üretilmiş kompozitlerde mezo-mekanik bağıntılar kullanılmıştır. Bağları giderilmiş kaba malzemenin yüzey alanı oranı (β) faktörüne bağlı olarak değişkenlik gösteren mezo-mekanik modelleme ile hesaplanan elastisite modülleri araştırılmaktadır. Farklı agrega çeşitleri (normal agrega ve hafif agrega) içeren kompozitler oluşturulmuştur. Hesaplanan kompozitlere ait elastisite modüllerinin yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen elastisite modülleri ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Düşük su/çimento oranlı karışımlarda mezo-mekanik modellemelerde yaygın kullanılan 0,75 olan hidrasyon derecesinin daha düşük alınması gerektiği belirlenmiştir. Hafif agregaya içeren kompozitlerde içsel kütleme nedeniyle düşük su/çimento oranlı kompozitlerde hidrasyon derecesinin bir miktar daha yüksek alınabileceği belirtilmiştir. Bu durum hafif agregaya çimento ara yüzeyinde mekanik kenetlenmenin daha güçlü olması ile açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Agregaya Boyutu, Elastisite Modülü, Hafif Agregaya, Mezo-Mekanik Modelleme.

MESO-MECHANICAL MODELING IN CONCRETE WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE

ABSTRACT

In order to determine the effect of cement paste and aggregate on the modulus of elasticity of concrete, meso-mechanical relations were used in composites produced using cement paste and normal and lightweight aggregates with different particle sizes. The modulus of elasticity calculated by meso-mechanical modeling, which varies depending on the surface area ratio (β) factor of the bonded coarse material, is investigated. Composites containing different types of aggregates (normal aggregate and lightweight aggregate) are formed. The comparison of the moduli of elasticity of the calculated composites with the moduli of elasticity obtained from the experimental study is presented. In low water/cement ratio mixtures, it was determined that the degree of hydration, which is 0,75, commonly used in meso-mechanical modeling, should be taken lower. It has been noted that in composites with a low water/cement ratio, the degree of hydration may be slightly higher owing to internal curing in composites containing lightweight aggregates. This is explained by the stronger mechanical interlocking on the lightweight aggregate cement interface.

Keywords: Aggregate Size, Modulus of Elasticity, Lightweight Aggregate, Meso-Mechanical Modeling.

GİRİŞ

Beton, agregâ (çakıl, kum vb.) genel adıyla bilinen taneli malzemelerin bir bağlayıcı malzeme ve su ile birleştirilmesinden meydana gelen zamanla priz alıp mukavemet kazanan inşaat yapı taşıdır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olarak bilinmektedir. 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde yaşayan ve duvar ustalığı yapan Joseph Aspdin tarafından doğal kil ve kalker karışımının pişirilip öğütülmesiyle yapılan çalışmalar neticesinde dayanımı yüksek ilk çimento elde edilmiştir. Portland çimentosunun bulunmasıyla birlikte başlayan, 1800'lü yılların sonlarına doğru betonarme ve 1930'lu yıllarda da ön gerilmeli beton yapı sistemlerinin geliştirilmesiyle ivme kazanan bu süreçte beton vazgeçilmez bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Beton özellikleri günden güne gelişmekte, kullanım alanları gittikçe artmakta ve yeni uygulama alanları oluşmaktadır.

20. yüzyılın ilk yarısından beri yapı üretiminde yaygın olarak kullanılan beton, yapı teknolojisine katkıda bulunduğu ekonomik faydalar nedeniyle üretimi ayrı bir sektör haline gelen, hemen her ülkenin üzerine birçok standart geliştirdiği en önemli yapı malzemesidir. Ortaya çıkan yeni ürünlerin yapı sektörüne etkisi, sahip olduğumuz üretim kaynaklarının nitelik ve nicelik açısından gereksinimlere yanıt verip vermemesi ile şekillenmektedir.

Beton, agregâ, çimento, su ve gerekli görüldüğünde bazı kimyasal katkı ve/veya mineral maddelerinin birleştirilmesiyle elde edilen kompozit bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Normal betonun yoğunluğu, 2400 kg/m^3 civarında olup; yoğunluğu, 2600 kg/m^3 'ten fazla olanlar "ağır beton", etüv kurusu durumundaki yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ün altında olanlar ise "hafif beton" olarak adlandırılmaktadır [1].

Hafif beton inşaat sektöründe kullanımını neticesinde, yapıların ölü yüklerinde önemli bir azalma görülmekte, taşıyıcı elemanların kesit boyutlarının küçülmesi ve betonarme

elemanlarda donatı miktarını azalması sağlanmaktadır. Normal betona kıyasla ısı iletim katsayısı daha düşük olan hafif betonların yangına karşı dayanıklılığının yüksek olduğu bilinmektedir [2, 3]. Bu gibi avantajları yanı sıra hafif betonların dezavantajı olarak sıkıştırma, karıştırma ve yerleştirme süreçleri için daha fazla özen gerekmesi sayılabilir. Kullanılan agregaya cinsine bağlı olmakla beraber hafif betonlarda, normal betonun dayanım değerine benzer değerler elde etmek için daha fazla çimento kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Hafif agregaya kullanarak elde edilen hafif betonun, beton teknolojisinde yeni keşfedilmediği, eski zamanlardan bu yana doğal agregalar (volkanik esaslı) kullanılarak yapılmış olan çok sayıda yapı örneklerinin bulunduğu bilinmektedir. Bu agregalar hem iri hem de ince agregaya olarak kullanılmaktaydı. Agregalar, ince agregaya olarak kullanıldıklarında aktif puzolanik madde olarak işlev görmektedirler. Yapısal hafif betonların üretiminde kullanılan agregalar çoğunlukla genleştirilmiş kil, cüruf, ponza, şeyl gibi dayanımları nispeten daha fazla olan agregalardır. Taşıyıcı hafif betonların üretiminde özellikle hafif agregaya kullanımı tercih edildiği de bir gerçektir. Taşıyıcı hafif betonlar çoğunlukla duvar panellerde, köprü açıklıklarında, blokların inşasında, çatı katı döşemelerinde ve ön yapımlı beton ünitelerinde kullanılmaktadır.

Yapı sistemlerinde hafif betonun, inşaat mühendisliğinde yaygın uygulama alanı bulunan geleneksel betona kıyasla birim ağırlığının önemli ölçüde düşük olması önemli avantajlar sağlamaktadır. Beton üretiminde kullanılan hafif agregaya oranının artması, binaların zati yükünün azalması, bununla birlikte binaya etkiyen deprem kuvvetlerinin azalması ile yapı elemanlarının kesitlerinin küçülmesi ve yapı maliyetinin azalması gibi önemli üstünlükleri barındıran ayrıca üretiminde kullanılan hafif agregaya yoğunluğunun artış ve azalışına göre dayanımının değiştiği bilinen hafif betonlar; ponza agregası, genleştirilmiş kil agregası gibi farklı türlerde düşük yoğunluğa sahip agregalardan üretilebilmektedir. Bu hafif betonların özellikleri, beton üretiminde kullanılan hafif agreganın tipine göre değişkenlik gösterebilmektedir [4].

Beton malzemesinin giderek artan çeşitlilikte kullanılmasıyla çatlak oluşumu ile yayılmasına sebep olan ve etkileyen faktörlerin bilinmesi önem kazanmaktadır. Betonda göçmenin nereden, hangi koşullarda ve nasıl olacağı kırılma mekaniği kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu bağlamda kullanılacak betonun elastisite

modülünün tanımlanması önem kazanmakta ve mezo-mekanik modelleme bağıntıları gerçekçi yaklaşımlar vermektedir.

Bu çalışmada ilk olarak çimento hamuru ve agreganın betonun elastisite modülüne etkisini belirleyebilmek için çimento hamuru ve farklı tane büyüklüklerinde olan normal ve hafif ağırlıklı agregalar kullanılarak üretilmiş kompozitlerde mezo-mekanik bağıntılar kullanılmaktadır. Bağları giderilmiş kaba malzemenin yüzey alanı oranı faktörüne (β) bağlı olarak değişkenlik gösteren mezo-mekanik modelleme ile hesaplanan elastisite modülleri araştırılmaktadır. Farklı agrega çeşitleri (normal agrega ve hafif agrega) içeren kompozitlerin hesaplanan elastisite modüllerinin yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen elastisite modülleri ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Beton fazından kademeli olarak agrega çıkartılarak üretilmiş harç ve çimento hamuru fazlarının mezo-mekanik modelleme ile hesaplanan elastisite modülü ile deneysel sonuçları karşılaştırılmaktadır.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Hafif Beton

Hafif betonlarla ilgili olarak standartlarda çeşitli tanımlamalar yapılmaktadır. Bu tanımlamalardan birkaçı aşağıda yer almaktadır;

- TS EN 206-1 standardına göre [1] hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim ağırlığı 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3 'ü geçmeyen kısmen veya tamamen hafif agregalarla üretilmiş betondur.
- ACI 213R-87 standardına göre [5] taşıyıcı hafif beton, hafif agregalarla üretilmiş, 28 günlük hava kurusu birim ağırlığı $1440\text{--}1850 \text{ kg/m}^3$ arası ve basınç dayanımı en az $17,2 \text{ MPa}$ olan yapısal betondur.
- ASTM C330 standardı [6] tamamen hafif agregalarla üretilmiş hafif betonların birim ağırlığının 1760 kg/m^3 , kısmen hafif kısmen normal agrega karışımıyla üretilen hafif betonların birim ağırlığının 1840 kg/m^3 'ü geçmemesini önermektedir. Standardın tanımladığı hafif betonlarda minimum basınç dayanımı 17 MPa 'dır.
- CEB-FIB standardı [7] ise taşıyıcı hafif betonun kuru birim hacim ağırlığının 1900 kg/m^3 'ü geçmemesini önermektedir.

Hafif beton tanımı, Türk Standartlarında TS 2511 (yürürlükten kaldırılmış standart) [8] ve TS EN 206-1 [1]'de yer almaktadır. TS 2511 [8] yapısal hafif betonu tanımlarken, TS EN 206-1 [1] ise genel olarak hafif betonu tanımlamaktadır. TS 2511 [8] 'Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esaslarına' göre taşıyıcı hafif beton, birim ağırlığı 1900 kg/m^3 'ün altında ve 28 günlük basınç dayanımı ise 16 MPa 'ın üzerinde olan beton şeklinde tanımlanmaktadır.

Yapı üretiminde yeni bir keşif olmadığı bilinen hafif agregalı beton, eski zamanlardan bu yana kullanılmakta ve ponza gibi volkanik esaslı doğal agregalar kullanılarak yapılmış çok sayıda yapı örneklerine rastlanmaktadır. Örneğin, Sümerler, Babil'in

inşasında, Yunanlılar ve Romalıların da pek çok inşaatta ponza agregasının yaygın olarak kullandığı bilinmektedir [9]. Eski Roma imparatorluğu döneminde inşa edilen ve birçoğu hala ayakta olan yapılara en önemli üç örnek; Cosa Limanı, Pantheon Kubbesi ve Kolezyum'dur [10]. Isidore ve Anthemius adlı iki mühendis tarafından inşa edilen Aya Sofya, M.S.14 yılında inşa edilen su kemeri, Pont du Gard ve M.S. 70–82 yılları arasında inşa edilen Roma amfi tiyatrosu, Kolezyum, M.S.118–128 yılları arasında inşa edilen Roma tapınağı, Pantheon hafif agrega kullanılarak yapılan yapılara örnek olarak verilebilmektedir [9].

Geleneksel agregalarla üretilen normal betonların taşıyıcı özellikleri iyi olmasına rağmen birim ağırlıklarının fazla olması nedeniyle; bu yapılar deprem kuvvetlerinden daha fazla etkilenmektedir. Ayrıca yüksek yapıların inşasında çeşitli problemler yaratmakta, taşıyıcı elemanların boyutlarını büyültmekte ve bazı mimari tasarım sorunları meydana getirmektedir. Yapı zati ağırlığının yüksek olması özellikle temel boyutlarını büyütüp, yapı maliyetini arttırır. Bununla beraber pratik hayatta geçilmesi gereken büyük açıklıklardaki eğilme etkisindeki elemanlar zati ağırlıklarını bile taşıyamaz hale gelebilmektedir.

Hem yüksek dayanımlı hem de hafif olarak tasarlanan betonlar ise, sunduğu ekonomik, çevresel ve teknik avantajlardan ötürü çok yönlü bir malzeme olarak görülmektedir.

1.1.1. Hafif betonların sınıflandırılması

Hafif agregalı betonlar; taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere kullanım amacına göre aşağıda açıklandığı gibi üç gruba ayrılmaktadır [11, 12].

1.1.1.1. Taşıyıcı hafif betonlar

Taşıyıcı hafif beton, yoğunluk ve basınç dayanımına bağlı olarak; ASTM C 567'ye göre belirlenen yoğunluğu 1120–1920 kg/m³ arasında, 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'nın üzerinde olan hafif betonlar olarak tanımlanmaktadır [10]. RILEM'e göre ise taşıyıcı hafif betonlar, yoğunluğu 1600-2000 kg/m³, basınç dayanımı 15 MPa'nın üzerinde olan betonlardır [7]. Taşıyıcı hafif beton üretiminde genellikle ısıtma işlemi

görmüş şist, kil, arduvaz, genleştirilmiş cüruf ve volkanik kaynaklardan elde edilen agregalar tercih edilmektedir.

1.1.1.2. Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları

Yoğunluk ve yalıtım olarak bakıldığında taşıyıcı/yalıtım hafif betonların, taşıyıcı beton ile yalıtım betonunun arasında değer alması yeterli bulunmaktadır. Basınç dayanımları 3,4–17,0 MPa değerleri arasında değişkenlik gösteren bu betonların ısı özellikleri yalıtım betonu ile taşıyıcı hafif beton arasında değer aldığı görülmektedir. Bu betonlar, yüksek oranda hava boşluğu barındıracak şekilde hafif agregalar ile üretilmektedir. Genelde dolgu betonu kullanılmasını gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanımına öncelik verilmektedir.

1.1.1.3. Yalıtım hafif betonu

Düşük yoğunluk ve düşük dayanıma sahip olan yalıtım hafif betonları, taşıyıcı olmayan elemanlarda yüksek izolasyon ve ısı direnç sağlamak amacı ile kullanılmaktadır. Bu betonun üretiminde genleştirilmiş perlit ve vermikulit gibi düşük yoğunluğa ve düşük dayanıma sahip agregaların kullanımı tercih edilmektedir. Yalıtım hafif betonlarının yoğunluğu 800 kg/m^3 'ün altında olup basınç dayanımı 0,69-3,4 MPa değerleri arasında değişkenlik göstermektedir.

Hafif betonların kullanım alanlarına göre sınıflandırılması Tablo 1.1'de görülmektedir.

Tablo 1.1. Hafif betonun sınıflandırılması [9]

Hafif Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)		Beton yoğunluğu (kg/m^3)		Isı iletim katsayısı ($\text{W/m}^0\text{K}$)	
	A	B	A	B	A	B
Taşıyıcı	>17,0	>15,0	1120-1920	1600-2000	-	-
Taşıyıcı/Yalıtım	3,4-17,0	> 3,5	800-1440	<1600	0,22-0,43	<0,75
Yalıtım	0,7-3,4	> 0,5	240-800	<<1450	0,065-0,22	<0,30

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

TS EN 206-1'e [1] göre hafif betonların basınç dayanım sınıfları ve hafif betonların yoğunluğa göre sınıflandırılması Tablo 1.2 ve Tablo 1.3'te belirtilmektedir.

Tablo 1.2. Hafif beton için dayanım sınıfları [1]

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck,sil}$ (N/mm ²)	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{ck,küp}$ (N/mm ²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Tablo 1.3. Hafif betonun yoğunluğuna göre sınıflandırılması [1]

Yoğunluk sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk aralığı (kg/m ³)	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000

Hafif betonlarda da normal betonda olduğu gibi basınç dayanımını etkileyen en önemli etken su/çimento oranı ve çimento dozajı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla taşıyıcı hafif betonun karışım hesabını basınç dayanımı, birim ağırlık ve işlenebilirlik faktörleri olmak üzere başlıca üç değişken etkilemektedir [8]. Bunlardan basınç dayanımı, su/çimento oranına bağlı olmakla beraber işlenebilirlik, agrega türüne bağlı olarak su içeriğine göre değişmekte ve birim ağırlık ise agrega cinsi ile çimento içeriğine bağlı olmaktadır.

Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif betonların özgül kütleleri ve basınç dayanımları Tablo 1.4'te özetlenmiştir.

Tablo 1.4. Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif beton kriterleri [13]

Standartlar	Özgül kütle (kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)
DIN 1045	≤ 2000	≥ 16
ASTM C 330	≤ 1840	≥ 17
TS 2511	< 1900	≥ 16
ACI 213R-03	< 1840	≥ 17

1.1.2. Hafif beton üretiminde kullanılan agregalar

Hafif beton üretimi için bilinen en yaygın yöntem hafif agregalar kullanılarak beton üretimi yapmaktır. Hafif agregalar, yapay yöntemlerle üretilebildiği gibi doğal kaynaklardan da elde edilebilmektedir. Doğal kaynaklardan elde edilen hafif agregaların çoğu volkanik kökenli olup yapay agregalar ise bazı işlemlerden geçirilerek üretilmektedir.

TS 1114 [14]'te hafif agregalar, tane yoğunluğu 2000 kg/m³ veya gevşek yığın yoğunluğu 1200 kg/m³'ü aşmayan mineral kökenli agregalar olarak tanımlanmaktadır. Agregalar betonun hacimsel olarak %60~75'ni, ağırlık olarak %70~85'ni kapsamaları sebebiyle agregaların beton içerisinde rolünün çok fazla olduğu bilinmektedir. Beton karışımlarında kullanılacak olan agregaların yapısı, granülometrisi ve sertliği betonun özelliklerini direkt olarak etkileyebilmektedir. Bu etkiden dolayı agregalar betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli farklılıklara sebep olabilmektedir.

Doğal elde edilen ve yapay olarak üretilen hafif agregalar yüzey dokusu ve tane şekli bakımından değişiklikler gösterebilmektedir. Hafif agregalar tane şekli olarak kübik, küresel, sivri veya düzensiz olarak görülebilmektedir. Agregaların bu tane şekilleri, beton karışımlarında işlenebilirliği doğrudan olumlu veya olumsuz etkilemektedir.

Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri Tablo 1.5'te verilmektedir.

Tablo 1.5. Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri [15]

Agrega Türü	Agreganın kuru birim ağırlığı (kg/m ³)	Betonun kuru birim ağırlığı (kg/m ³)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	Isı iletkenliği (W/mK)	Su emme (%)
Genleştirilmiş kil	550-1050	110-1850	14-42	0,26-0,43	5-15
Köpük cürufu	500-1000	110-1850	14-42	0,17-0,34	5-25
Sinterlenmiş uçucu kül	600-1000	1350-1900	14-42	0,17-0,51	14-24
Mikalı vermikülit	65-250	400-950	0,67-3	0,07-0,10	20-35
Genleştirilmiş perlit	65-250	550-800	0,6-3,5	0,07-0,10	10-50
Ponza	-	800-1300	4-5	0,15-0,30	-
Genleştirilmiş cam	250-500	1200	9	0,28	5-10
Genleştirilmiş polyester boncuk	30-150	300-900	0,7-12,5	0,07	-
Briket molozu	750	1750-1900	7,7-21	0,40-0,51	19-36
Kırmataş	1450-1750	2250-2400	21-50	1,0-3,0	0,5-2,0

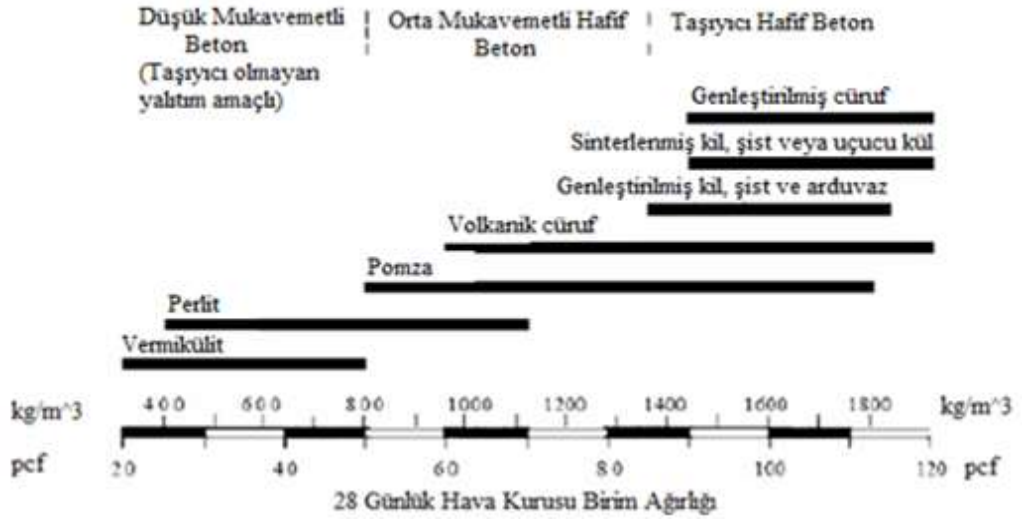
Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar, fonksiyonlarına göre sınıflandırılır ise; genel olarak yalıtım hafif betonunda perlit ve vermikülit, hem taşıyıcı hem yalıtım hafif betonlarında ponza taşı ve volkanik cürufur, taşıyıcı hafif betonda genleştirilmiş kil, şist ve cüruf kullanılmaktadır.

TS 1114 EN 13055-1 [14], doğal hafif agregayı; meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış tüf, bims (ponza), lav cürufu, sünger taşı, diatomit vb. gibi kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlamaktadır. Aynı standartta yapay hafif agregalar ise; kil, yüksek fırın cürufu, kuvars, uçucu kül, perlit, arduvaz, obsidiyen, şist, vermikülit, vb. inorganik elemanlardan genellikle ısıtma, bazı hallerde sinterleştirme, gaz veya köpük oluşturma yolu ile gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlanmaktadır [9].

Hafif agregalar üretildikleri malzemenin kaynağına göre şu şekilde sınıflandırmaktadır [16];

- Doğal Hafif Agregalar: Ponza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf,
- Doğal Malzemedен Üretilen Yapay Hafif Agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikülit gibi polimer esaslı malzemeler,
- Endüstriyel Atıklardan Üretilen Hafif Agregalar: Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül,
- Endüstriyel Atıkların İşlenmesiyle Üretilen Hafif Agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

Hafif agregalı betonların birim ağırlığına göre sınıflandırılması Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Hafif agregalı betonların birim ağırlığına göre sınıflandırılması [5]

Hafif beton üretiminde çeşitli hafif agregalar tercih edilebilmektedir. Hafif beton üretiminde amaç birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır ve bunun için en uygun yöntem hafif agrega kullanımınıdır. Yaygın olarak kullanılan agrega çeşitlerinden bazılarının temel özellikleri, kullanım alanları ve üretim aşamaları aşağıda açıklanmaktadır;

1.1.2.1. Ponza

Ponza gibi volkanik kökenli doğal hafif agregalar; gözenekli yapıya sahip olmaları sebebiyle birim hacim ağırlığının düşük olması, yüksek ses ve ısı izolasyonu

sağlamaları ve dış etkenlere karşı dayanıklılıklarının fazla olmasından dolayı tarihsel süreçte kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olarak bilinmektedirler [17].

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler sonucu iki tür ponza (asidik ve bazik) oluşumu görülmektedir. Asidik karakterli ponzaların içeriğindeki silis oranının daha yüksek olmasından kaynaklı inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Asidik ponzanın özgül ağırlığı, bazik ponzaya göre daha az olup 0,5-1 civarında olduğu bilinmektedir [18].

1.1.2.2. Uçucu kül

Termik santrallerde enerji üretimi amacıyla, pulverize kömürün yakılmasıyla oluşan baca gazından elektrostatik çökticiler sayesinde biriktirilen, yakılan kömürün tipine göre değişen farklı türlerde kül atıkları meydana gelmektedir.

Endüstrinin önemli yan ürünlerinden birinin uçucu kül olduğu bilinmektedir. Sağladığı avantajların yanı sıra biriktirilmesi ve elden çıkarılması sırasında bazı güçlüklerle sebep açtığı görülmektedir. Dünya üzerinde üretimi yapılan uçucu külün sadece %9'u değerlendirilerek kullanıma sunulmaktadır. Bu durum eskiye nazaran önemli gelişmeler göstermiş olsa da hali hazırda istenilen seviyeye ulaşamamıştır [19].

Uçucu külün agrega olarak beton ve harç içinde kullanıldığı uzun zamandan beri bilinmektedir. Uçucu kül; Türk, Amerikan ve İngiliz standartlarında beton ve duvar elemanları için yapay hafif agrega olarak kabul edilmektedir. Betonda uçucu kül kullanımını ince agrega, sinterleme sonrası yapay hafif agrega ve uçucu kül ile bir miktar Portland çimentosu karıştırılarak elde edilen iri hafif agrega olmak üzere üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde yapılan bir çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası üretimi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve bu malzemenin inşaat sektöründe başta agrega olmak üzere birçok alanda kullanılabileceği önerilmiştir [20].

Sinterlenmiş uçucu kül hafif agregasının geleneksel agrega yerine betonda içi dolu veya boş blok üretimi için kullanılabileceği ve çok katlı binalarda ölü yükü azaltacağı belirtilmektedir [21].

Peletleme işlemi yapay agrega üretiminde dünyada yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Fakat inşaat sektöründe kullanımı yaygın değildir. İnşaat sektöründe uçucu

külden yapılan hafif agrega kullanımının düşük olmasının sebebi aglomerasyon prosesinin maliyetinin yüksek olması, bunu yerine doğal kaynakların kullanılması ve malzemelerin dayanımlı olması için aglomerasyon prosesinde enerji gereksiniminin (sinterleme vb.) olmasıdır [22]. Uçucu kül peleti üreten ülkelerin başında Bulgaristan, Hollanda, Çin, Kolombiya, Almanya, İtalya, Japonya, İngiltere, Amerika ve Rusya gibi ülkeler sıralanmaktadır.

1.1.2.3. Genleştirilmiş kil

Sinterleşme süreci çabuk olan ve 1100°C-1300°C dereceler arasında belirli bir hacim artışına uğrayan hafif agregalara genleştirilmiş kil adı verilmektedir. Genleştirilmiş kil için kullanılan yaygın hammaddeler; erken sinterleşen kil, kumlu kil, killi şist ve şifertondur. Isıtma işlemi boyunca bünyedeki gazlar küçük kabarcıklar oluşturarak kili genleştirmektedir ve bal peteği yapısı oluşturmaktadır. Genleşmiş killer döner fırınların dairesel hareketi neticesi ile genellikle yuvarlak veya patates şeklinde olmakla beraber farklı boyutlarda ve farklı birim ağırlıklarda elde edilebilmektedir. Uygun hammadde ve teknoloji seçimiyle dış yüzeyde sert sinterlenmiş bir kabuk oluşturulurken, iç yüzeyde oldukça hafif, son derece dayanıklı ve gözenekli klinker benzeri bir yapı oluşturulmaktadır. Genleştirilmiş killerin en önemli üstünlükleri istenilen miktarda, istenilen tane büyüklüğünde ve özelliğinde malzeme üretimine imkân vererek, farklı tüketim alanlarının değişik taleplerini karşılayabilmesidir. Aynı zamanda yüksek basınç direncine sahip olan bu malzemeler beton yapılarda çok rağbet gören hafif bir katkı maddesi haline gelmiştir. Daha çok köprü ve gökdelen inşaatlarında bu hafif malzemeler büyük gelişmeleri mümkün hale getirmişlerdir. [18]. Genleşmiş killer ısı ile işlem gördükleri zaman gaz çıkışının bir sonucu olarak kendi hacimlerinin 5-6 katı kadar genişleyebilmektedir.

1.1.2.4. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırınlarda demir üretilirken elde edilen silis, kalsiyum alümin silis ve bazik kökenli bileşikler içeren ve ergimiş halde elde edilen atık bir malzemedir. Kaba bir yüzey dokusuna sahip olan yüksek fırın cürufu, gözenekli olup bal peteği şeklindedir. Az veya çok koyu gri bir renge sahip bu agrega malzemesinin kuru yoğunluğu 600-900 kg/m³ arasında değişkenlik göstermektedir. Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık

olarak 1400°C–1600°C sıcaklığa sahip olduğundan, kullanım öncesi soğutulması ihtiyacı doğmaktadır.

1.1.2.5. Genleştirilmiş perlit

Volkanik patlamaların sonrasında asidik özelliğe sahip magmanın soğuması ile oluşan, kılcal çatlak ve yarıklara atmosferdeki su, deniz, göl ve akarsuların nüfuz etmesiyle meydana gelmektedir. Doğal perlit, bünyesinde %2–%6 arası su tutan, camsı yapıya sahip, gri, kirli beyaz, siyah renklerinde bulunabilen bir kayaç olarak bilinmektedir. Sıcaklık 1800°C'ye ulaştığında genişerek 4–30 kata kadar bir hacim büyümesi meydana gelmektedir. Perlitin patlaması olarak bilinen bu olay neticesinde içinde hava kabarcıkları oluşmaktadır. Isı yalıtım özelliği kazanan perlit; yangına, asite, alkalilere dayanıklı ve düşük yoğunluklu yapay bir agrega haline gelmektedir. Genleştirme işleminden önceki birim hacim ağırlığı 1200 kg/m³ olan perlitin genleştirme işleminden sonra bu değer 32–240 kg/m³ arasına kadar düştüğü görülebilmektedir. Genleştirilmiş perlit özellikle hafif beton yapımında, yalıtım özelliğinden dolayı izolasyon gerektiren işlerde, ses yutma özelliğinden dolayı sıva yapımında, gevşek hafif dolgu malzemesi olarak duvarlarda, döşemelerde ve değişik sanayi tesislerinde kullanılmaktadır.

1.1.3. Hafif agregaların özellikleri

1.1.3.1. İç yapı özellikleri

Hafif agregaların tane yoğunluğu, gözenekli yapıya sahip olmalarından dolayı düşüktür. Belli başlı ham maddelerin erime sıcaklığına kadar erişmesi ile tanelerdeki gözenekli yapı oluşmaktadır. Bu sıcaklıkta gazlar kütle içinde hacim artışına neden olmakta, genişleyerek yaklaşık 5–300 µm boyutlu üniform dağılmış boşluk oluşturmakta ve soğuma esnasında da bu durumunu korumaktadır [12].

1.1.3.2. Tane şekli ve yüzey dokusu

Doğal hafif agregalar kaynağına, yapay hafif agregalar üretim yöntemine bağlı olarak yüzey dokusu ve tane şekli bakımından önemli değişkenlikler göstermektedir. Tane şekli düzensiz, kübik, küresel ya da sivri olabilen hafif agregaların yüzey dokusu küçük boşluklu olabilmekte, kısmen düzgün bir yapı gösterebilmekte veya oldukça

düzensiz ve büyük boşluklu bir yapıda olabilmektedir. Yüzey dokusu ve tane şekli, ince/iri agrega oranını, beton karışımının işlenebilirliğini, su ve çimento ihtiyacını etkilemekle beraber bunlara bağlı olarak mekanik ve fiziksel özellikleri de doğrudan değiştirmektedir [12].

1.1.3.3. Birim ağırlık

Agrega birim ağırlığı, agrega yığını kütesinin, agreganın kapladığı hacme oranı şeklinde ifade edilmektedir. Bu agregaların hacmi taneler arasındaki ve tanelerin içindeki boşlukların tamamını kapsamaktadır. Birim ağırlık, nem içeriğinin, tane şeklinin, boyutunun ve inceliğinin bir fonksiyonu olarak da tanımlanmaktadır. Aynı zamanda birim ağırlık agregaların sıkı ya da gevşek yerleştirilmiş olmasına bağlıdır. Her malzemenin birim ağırlığı farklıdır, bu farklılık aynı tür malzemenin farklı incelik ve boyutta olması durumunda da geçerli olmaktadır [12].

1.1.3.4. Özgül ağırlık

Agregaların özgül ağırlığı, agrega kütesinin, agreganın dolu kısmındaki partiküllerin toplam hacmine oranlanması ile bulunmaktadır. Bu agreganın dolu kısmındaki hacim, partiküllerdeki mikro boşlukları kapsamakta ancak partiküller arasındaki makro ve mezo boşlukları kapsamamaktadır. Bu partiküllerin özgül ağırlığı, boşluksuz camsı malzemenin özgül ağırlığına ve partiküllerdeki mikro boşlukların hacmine bağlı olmaktadır. Genellikle tane boyutu azaldıkça partiküllerin özgül ağırlığı artmaktadır [12].

1.1.3.5. Su emme

Hafif agregaların su emme oranı; gözenek dağılımı, yapısı, boyutu ve sürekliliği faktörlerine bağlıdır. Agregada tarafından emilen su, çimento ile hemen kimyasal tepkimeye girmese de uzun süreli kütleme, çimentonun hidratasyonu ve agrega/matris ara yüzeyinin gelişmesi için yarar sağlamaktadır. Bundan dolayı karışım öncesindeki su emme oranı yüksek olan hafif agregaların en az 24 saat ve tercihen 72 saat suda bekletilerek doyurulması önerilmektedir [23].

Yüzeye yakın, dışa açık ve birbiri ile ilişkili boşluklar, nemli ortamda ilk birkaç saat içinde dolarken, daha iç kısımda yer alan süreksiz boşluklar yıllarca su içerisinde bekletilse bile boş kalmaktadırlar [9].

Taşıyıcı hafif agregaların doygunluk derecesi, bütün boşlukların teorik toplam doygunluğunun yaklaşık %25~35'i arasında değerler almaktadır. Ancak su emme oranı zamana bağlı olarak belirli bölgelere ayrılabilir. Bunun için Holm ve Ries'e göre ASTM'de hafif agregalar için tanımlanan doygun yüzey kuru ifadesi teorik olarak hatalı, analitik olarak yanıltıcı ve uygun olmadığı Lamond ve Pielert [12] tarafından belirtilmiştir.

1.1.4. Hafif betonların taze ve sertleşmiş hal özellikleri

Hafif beton özellikleri de normal betonlarda olduğu gibi taze ve sertleşmiş beton özellikleri olarak incelenebilir.

Taze beton özellikleri; normal betonda olduğu gibi hafif beton da taze halde iken homojen kütlede olmalı, kalıba kolay yerleştirilmeli, taşıma ve yerleştirme sırasında ayrılmaması gerekmektedir. Kütleli homojen olan hafif betonun kıvamı, işlenebilirliği sağlayacak en alt değerde olması gerekmektedir. Hafif agregalı beton aynı işlenebilirlikteki normal betona göre daha düşük çökme değeri vereceği için çökme değerinin 10 cm'yi geçmemesi önerilmektedir [8]. Hafif betonda, hafif agrega/çimento oranı arttıkça taze betonda çökme değeri azalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı hafif betonlarda karışım hesabı yapılırken agreganın su emme oranı, agrega/çimento oranı, birim ağırlığı ve elde edilebilme koşullarının dikkate alınması gerekmektedir.

Agregaların su emme oranı taze beton özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Doğal ya da yapay olsun bütün agregaların zamana bağlı olarak belirli miktarda su emdiği görülmektedir. Bu olay kuru ya da kısmen doygun agregalarda taze betonun yoğunluğunu, işlenebilirliğini, yangına karşı dayanıklılığını, pompalanabilirliğini, donma-çözülme etkisini ve ısı özelliklerini doğrudan veya dolaylı olarak etki etmesi nedeniyle oldukça önemlidir. Bir agrega tanesinin su emme hızı ve su emme oranı, boşluk hacmine, boşluk dağılımına ve boşlukların yapısına bir başka deyişle boşlukların sürekli ya da süreksiz oluşuna bağlı olmaktadır. Hafif agregalarda boşluk hacmi normal agregalara oranla daha fazla olduğundan su emme oranı ve hızının da

daha fazla olduğu görülmektedir. Agregaların su emme oranları genel olarak etüv kurusu ağırlığına göre 30. dakikada ve 24. saatteki su emme miktarına göre hesaplanmaktadır. Hafif agregaların su emme oranı 30. dakikada %3-%12 arasında iken 24. saatte %5-%15 arasında oldukça benzer değerler vermektedir. Bu sebeple beton üretilirken hafif agregalar tarafından emilecek su miktarının yaklaşık değerinin tayininde 30 dakikalık su emme oranı baz alınmaktadır [11]. Boşluklu yapısı sebebiyle kolayca su emebilen ve birim ağırlığı düşük olan hafif agregalar, karışım ve yerleştirme işlemleri sırasında kolayca beton karışımının yüzeyine çıkarak işlenebilirliği olumsuz anlamda etkileyebilmektedirler. Bu gibi betonda segregasyon meydana gelen durumlarda, hafif betona ilave edilebilecek lifler, beton içeriğinde bir ağ yapısı oluşturarak oluşan segregasyonu engelleyebilmektedir [24].

Hafif betonda, herhangi bir beton sınıfı için hazırlanacak karışımların çimento miktarı, normal betona oranla genelde daha fazla olmaktadır. Ulaşılabilecek en yüksek dayanım kullanılacak agreganın cinsine bağlı değişmektedir. Hafif betonun kalıba yerleştirme ve kürleme işlemleri normal beton ile aynı olmaktadır. Hafif agregaların tanelerinde tutulan rezerv sudan dolayı hafif betonlar normal betona oranla kötü kür şartlarına karşı daha dirençlidir [11, 25].

Sertleşmiş beton özellikleri; Hafif betonların etüv kurusu birim ağırlığı, ısı iletim katsayısı, rötresi ve basınç dayanımı gibi belirli özellikleri, beton üretiminde kullanılan agregaların cinsine, birim ağırlığına ve agregaların boyutuna göre büyük bir alanda farklılık göstermektedir. Sertleşmiş hafif betonların mekanik ve fiziksel özellikleri ile bunlara etki eden faktörler aşağıda özetlenmektedir [9].

1.1.4.1. Yoğunluk

Hafif agregalı betonlarda, sertleşmiş betonun yoğunluğu, karışımdaki hava miktarının, su ihtiyacının, malzeme oranının ve hafif agregaların özgül ağırlığı ile nem içeriğinin fonksiyonu olan taze beton yoğunluğundan daha düşüktür. Bunun nedeni nem kaybı yaşanmasıdır. Nem kaybı, beton elemanın yüzey alanı/hacim oranının ve ortam şartlarının bir sonucu olarak oluşmaktadır. Hafif beton karışımlarında ince hafif agregaların yerine normal kum kullanılması sertleşmiş beton yoğunluğunu arttırmaktadır. Basınç dayanımı 35 MPa'ın üzerinde hafif beton elde etmek için genelde çimento miktarının artırılması gerekmektedir, bu durumda da yoğunluk artmaktadır [12]. Clarke'a [11] göre;

- Çimento dozajında yapılan 100 kg/m³'lük bir artış, yoğunluğu yaklaşık olarak 50 kg/m³ arttırmaktadır.
- Karışımdaki hafif agregaların yerine normal agregalar kullanılması, yoğunluğun yaklaşık 150-200 kg/m³ artmasına sebep olmaktadır.
- Suya doymun ya da kısmen doymun hafif agregalar kullanılarak üretilen betonların yoğunluğu daha fazla olmakta ve agreganın nem içeriğinin artması da yoğunluğun artmasını sağlamaktadır.
- Sürüklenmiş hava sonucu karışım oranlarında meydana gelen değişim, yoğunluğu yaklaşık 90 kg/m³ azaltmaktadır.

1.1.4.2. Basınç dayanımı

Hafif agrega çeşitlerinden birçoğu ile basınç dayanımı 35 MPa ve üzerinde hafif beton üretilmekte ve sınırlı sayıdaki hafif agrega ile de silindir dayanımı 48-69 MPa olan hafif beton üretimi yapılabilmektedir. Basınç dayanımı 21-35 MPa olan hafif betonların dökümü yaygın iken, daha yüksek dayanıma sahip hafif betonlar prekast köprü elemanlarının uygulamalarında tercih edilmektedir. Hafif agregalı betonda basınç dayanımı, kullanılan agreganın cinsine ve yapısına bağlı olmakla beraber bağlayıcı malzeme eklenmesi dayanımda önemli ölçüde artış sağlamamaktadır [12]. Çimento hamuru rijitliği ve hafif agrega rijitliğinin birbirine yakın olması gerilme dağılımının üniform olmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum da hafif betonun basınç dayanımının beklenen değerden daha yüksek olmasına yol açmaktadır [26]. Hafif betonda basınç dayanımını, normal betonda olduğu gibi kür koşulları, agrega tanelerinin dayanımı rijitliği, betonun yaşı, mineral katkıları, nem içeriği, lifler ve çimento miktarı gibi faktörler etkilemektedir. Bu faktörlerden bazıları aşağıda açıklanmaktadır;

- Agregata tanelerinin dayanımı: Beton dayanımını etkileyen en önemli faktörler kullanılan agreganın cinsi ve dayanımıdır. Zayıf agregata tanelerinden oluşacak kuvvetli bir hamur fazı için daha fazla çimento kullanılması gerekmektedir [12]. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agrega miktarı arttıkça beton basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmektedir [26].
- Agregata tanelerinin nem içeriği: Hafif agregaların içerdiği nem, hafif betonun basınç dayanımına etki eden en önemli faktörlerin başında yer almaktadır. Genel olarak

hafif agregaların suya doygun hale getirilmesi betondaki basınç dayanımında artış sağlamaktadır. Lo vd., [27] yaptıkları deneysel çalışmada en yüksek basınç dayanımı değerini otuz dakika ön suya maruz bırakma işlemi uygulanan hafif agregalarla bulmuşlardır. Lo vd.,'de [28], hafif agregalı betonlarda, agregalara uygulanan ön suya maruz bırakma süresi uzadıkça hafif betonun basınç dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.

- Çimento miktarı, mineral katkıları ve lifler: Beton basınç dayanımı, agrega cinsine bağlı olarak belirli bir işlenebilirliği yakalamak şartıyla çimento miktarı ile artmaktadır. Çimento dozajındaki %10'luk artış, basınç dayanımını yaklaşık olarak %5 arttırmaktadır [12]. Şahin vd., [29] tarafından yapılan çalışmada çimento dozajının 200 kg/m³'ten 500 kg/m³'e çıkarılması ile basınç dayanımının %265 arttığını bildirmektedirler. Kılıç vd., [30] yaptıkları çalışmada basınç dayanımı 40 MPa olan taşıyıcı hafif beton üretmenin, silis dumanı ve bazaltik ponza agregası kullanımı ile mümkün olduğunu göstermektedirler. Taşıyıcı hafif betonda mineral katkı kullanımı sayesinde yapılarda zati yükün daha da azaltılacağını ve bununla beraber dayanımı arttıracığını ifade etmektedirler.
- Betonun yaşı ve kür koşulları: Zamanın hafif betona etkisi normal betondakine benzemektedir. Ancak normal beton kurduğunda hidrasyon sona ererken hafif betonlarda agregalarca emilen su sebebiyle durum biraz daha farklı hal almaktadır. Hafif agregalı betonlar zayıf kür şartlarına normal betona oranla daha dayanıklı olmaktadır [11]. Benzer şekilde Haque vd., [31] yaptıkları çalışmada en iyi dayanım gelişiminin suda kürlenmiş hafif beton numunelerinde gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

1.1.4.3. Çekme dayanımı

Çekme dayanımının; aderans dayanımı, kayma, çatlama karşı direnç ve burulma gibi parametreler ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Betonun çekme dayanımı, iki faz arasındaki aderansa ve iri agrega tanesi ile harç fazının çekme dayanımına bağlı olmakta ve genel olarak basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu yaklaşımda agreganın yüzey karakteristikleri, tane dayanımı ve betonun nem içeriği hesaba katılmamaktadır. Çekme ile ilgili özelliklerin belirlenmesinde kullanılan yarılmada çekme deneyi, basit ve oldukça pratik bir yöntem olarak görülmektedir. Taşıyıcı hafif betonun yarılmada çekme dayanımı, aynı basınç dayanım değerine sahip normal betonun yarılmada çekme dayanımının %75'i ile %100'ü arasında değişkenlik

göstermektedir. Hafif ince agrega yerine normal ince agrega kullanılması hafif betonun çekme dayanımını arttırdığı bilinmektedir [12].

Ponza agregası oranı %0'dan %100'e kadar arttıkça yarmada çekme dayanımı ve 28 günlük elastisite modülü değerlerinde düşüşler görülmekte, su geçirimsizliğinde ise artışlar gözlemlenmektedir. Kuruma rötresi verilerini elde eden yazarlar, hafif agreganın fazla büzülme göstermesinin ve düşük çekme dayanımına sahip olmasının çatlaklara yol açabileceğini, fakat düşük elastisite modülünün bu bağlamda avantaj sağlayabileceğini ifade etmişlerdir [32].

1.1.4.4. Şekil değiştirme

Hafif agregaların rijitliğinin az olması ve karışımlarda daha fazla çimento ihtiyacının olması, betonda daha farklı deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Hafif agregalı betonların gerilme şekil değiştirme arasındaki ilişkisinin normal betonlara göre daha gevrek ve lineer olduğu görülmektedir. Böyle bir davranış, çimento matrisi ile agrega taneleri arasındaki aderansın daha iyi oluşuna bağlıdır [11].

1.1.4.5. Elastisite modülü

Betonun elastisite modülü, kompozit malzemeyi oluşturan harç ve agrega fazlarının elastisite modülünün ve karışımda kullanılan miktarlarının bir fonksiyonudur. Hafif agrega tanelerinin elastisite modülünün normal agrega tanelerinden daha düşük olması sebebiyle hafif agregalı betonların elastisite modülü normal betonların elastisite modülünün 1/2~3/4'ü kadardır. Beton iri agrega ve harç olmak üzere iki fazlı bir kompozit olarak görülür ise, kompozitin elastisite modülünün, iri agrega ve harcın rijitliğinin azalması ile düşmesi gerekmektedir. Bu sebepten ötürü hafif beton ile üretilen yapılar belirli bir yük altında daha fazla deformasyona uğramaktadır [10, 11].

Yoğunluğu 1400 ile 2500 kg/m³ arasında değişen betonların elastisite modülü pratik olarak ACI 318'de [33] verilen Denklem (1.1) ile hesaplanabilmektedir.

$$E=0,04\sqrt{D^3f_c} \quad (1.1)$$

Bu denklemde;

E (MPa); betonun sekant modülünü,

D (kg/m³); betonun yoğunluğunu,

f_c (MPa); betonun silindir basınç dayanımını ifade etmektedir.

Denklem (1.1) genellikle yüksek dayanımlı hafif betonun elastisite modülü için iyi değerler vermektedir. Bu nedenle bu tip denklemlerin yalnızca ilk yaklaşım olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Elastisite modülü, ± %25 gibi yüksek oranda nem içeriğine, bağlayıcının ve agreganın tipi gibi faktörlere bağlı kalmaktadır [12].

Normal betonda elastisite modülü hafif betona kıyasla daha yüksek olarak çıkmaktadır. Bu durum, agregaların elastisite modülünün beton elastisite modülü üzerinde büyük rol oynamasına bağlanmaktadır. Hafif betonların yüksek büzülme değerlerine ulaşmasının düşük elastisite modülünden kaynaklandığı ifade edilmektedir [34].

1.1.4.6. Sünme

Sabit gerilmeye maruz kalan bir malzemede zaman içinde meydana gelen yavaş ancak zamanla artan deformasyona sünme denilmektedir. Sünme etkisinin kuruma rötresi ile birlikte ele alınması gerekmektedir. Sünme ve rötre şekil değiştirmeleri, uzun süreli sehimi arttırmakta, gerilme yığılmasında artışa sebep olmakta ve öngerme kuvvetinde kayba sebep olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu tip zamanla ilişkili parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanması ve tasarım yapılırken dikkate alınması önemli hale gelmektedir [12, 35]. Sünme ve kuruma rötresi birbiri ile yakından ilişkili kavramlar olup; agreganın cinsi, nem içeriği ve granülometrisi, yüklenme yaşı, çimento tipi, karışımın su içeriği, sürüklenmiş hava miktarı, numune veya yapı elemanının boyutları, uygulanan gerilme değeri, kür yöntemi ve ortamın bağıl nemi gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Hafif agregalı betonlarda, elastisite modülünün daha düşük olması sebebiyle sünme şekil değiştirmesi normal betona göre daha yüksek değer vermektedir. Hafif agregalı betonun sünmesi, normal betonun sünmesinin yaklaşık olarak 1,0–1,15 katıdır. Kuruma rötresi de aynı şekilde normal betonunkinden daha yüksektir [10, 11].

1.1.4.7. Rötire

Betonun içindeki suyun kimyasal ve/veya fiziksel sebeplerle azalması sonucunda betonun hacminde ve boyunda meydana gelen azalma rötire olarak tanımlanmaktadır. Rötire hem taze beton hem de sertleşmiş betonda meydana gelmektedir. Betonun kuruması, karbonatlaşması ve çimentonun hidrasyonu sertleşmiş betonda bulunan mevcut suyun azalmasına yol açan başlıca faktörlerdir. Bu faktörler sebebiyle sertleşmiş beton rötiresi, hidrasyon rötiresi, karbonatlaşma rötiresi ve kuruma rötiresi olarak adlandırılmaktadır [35]. Harç ve özellikle betonlarda agreganın bulunması rötreyi engellemekte yardımcı olmaktadır. Betonun rötiresini, çimentonun rötiresine bağlayan Pickett formülünde (1.2) agrega miktarının önemi vurgulanmaktadır.

$$\varepsilon_{rb} = \varepsilon_{rc} \times (1-a)^n \quad (1.2)$$

Bu denklemde;

ε_{rb} ; betonun rötiresini,

ε_{rc} ; çimento hamurunun rötiresini,

a; 1m³ betondaki toplam agrega mutlak hacmini,

n; 1,2~1,7 arasında değer alan bir katsayıyı ifade etmektedir [36].

Kuruma rötiresi, hidrolik rötire veya sertleşmiş beton rötiresi olarak da adlandırılmaktadır. Beton üretiminin ilk gününden başlayarak 5–6 aya kadar devam etmektedir. Sertleşmiş çimento hamurundaki katı taneciklerin absorbe ettiği su molekülleri, bu tanecikleri bir arada tutan elektrostatik kuvvetleri oluşturmaktadırlar. Absorbe olan su tabakası inceldikçe taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler artmakta, su tabakası kalınlaştıkça taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler azalmaktadır. Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmaktadır. Daha sonra bu boşluklara jel suyu akmaya başlamakta ve bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta absorbe olan su tabakası incelmekte, taneler birbirine yaklaşmakta; hacim büzülmesi meydana gelmektedir [36].

Taşıyıcı hafif betonun rötiresi de normal betonda olduğu gibi, agregaların rijitliğine, çimento hamurunun rötiresine, agreganın ve çimento hamurunun mutlak hacim oranlarına ve ortam şartlarına bağlıdır. Hafif betonun rötiresi, normal agreganın rijitliği hafif agreganın rijitliğinden yüksek olmasından dolayı normal betonun rötiresinden

yüksektir [12]. Hafif agregalı betonların rötresi, normal agregalı betonun rötresinin 1,0~1,5 katı kadar olduğu bilinmektedir. Ancak karışıma hafif ince agrega yerine normal ince agrega katılması durumunda normal betonlarınkine benzer sonuçlar elde edilmektedir [10, 11]. Alduaij vd., [37] genel olarak aynı tip agrega kullanılan betonlarda, çimento miktarının artması ile kuruma rötresinin arttığını belirtmektedirler. Yaptıkları bir çalışmada da farklı tip hafif agrega kullanılarak üretilen betonların 28. gündeki kuruma rötresinin $71-212 \times 10^{-6}$ değerleri arasında değiştiği açıklanmaktadır.

Kayalı vd., [38] hafif beton ile normal betonun uzun süredeki kuruma rötresini incelemektedirler. Yüksek dayanımlı normal betonun kuruma rötresinin 400 günlük süreçte hafif betonun kuruma rötresinin yarısı kadar olduğunu ve 500×10^{-6} değerinde sabit kaldığını belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül agregalı hafif betonun ise ilk 100 gün rötresinin artarak devam ettiğini ve bu artış oranının zamanla azalmadığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca geliştirilmiş şist agregalı hafif betonların normal betonlara oranla %30-%50 daha az kuruma rötresi yaptığı da belirtilmiştir. Ayrıca 28 gün kürlenme işlemi sonrasında 56 gün kuruyan hafif betonun rötresinin $34-230 \times 10^{-6}$ değerleri arasında olduğunu ifade etmektedirler.

Konvansiyonel kür teknikleri çatlakları önlemede her zaman etkili olmamaktadır. Çünkü suyun beton içerisine nüfuz etmesi, çimento hamurunun sızdırmazlığından kaynaklı sınırlı olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için kullanılacak yöntemlerden biri suya doyurulmuş hafif agregaların su rezervuarı olarak kullanılmasıdır [39, 40]. Karışımdaki su rezervuarlarının dağılımı içsel kür mekanizmasında öne çıkan en önemli parametre olarak bilinmektedir. Düşük su/çimento oranına sahip hamurda suyun maksimum taşınım uzaklığı birkaç yüz mikrometre olarak tahmin edilmektedir. Su rezervuarlarının matris içerisinde iyi dağılımı ve içsel kür işleminin verimliliği de artmış olacaktır. İçsel kürlenmede yeni görüşlerden birisi doymuş çok küçük hafif agregaların beton içerisinde dağıtılarak küçük su rezervuarları oluşturulması işlemidir. Agregtaaneleri arasındaki mesafenin azalmasından dolayı bu tanelerdeki suyun sızması/difüzyonu için uzun mesafe kat etmesine ihtiyaç olmayacaktır [40]. Yapılan deneysel çalışmalarda beton içerisindeki doymuş hafif agregaların otojen rötreyi azaltmakta, hatta engellemekte oldukça etkin olduğu görülmektedir [39, 41].

1.1.4.8. Yorulma

En yüksek statik gerilme değerinin altında kalan gerilme değerlerinin tekrarlı uygulanmaları sonucunda malzemede oluşan kırılma olayına yorulma denilmektedir [35]. Clarke tarafından yapılan çalışmada yoğunluğu 1500 kg/m^3 'ün üzerinde olan hafif betonun tekrarlı basınç yüklemeleri altında normal beton ile aynı davranışı gösterdiği gözlenmektedir [11]. Ramakrishnan vd., [42] yaptıkları deneysel çalışmada 30-50 MPa basınç dayanımına sahip hafif betonların yorulma mukavemetlerinin 2,2-3,0 MPa arasında değişkenlik gösterdiğini ifade etmektedirler.

1.1.4.9. Su emme

Birçok hafif agreganın su emme oranının normal agregaların su emme oranlarından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu sebeple hafif agregalı betonların su emme oranının normal betonlara oranla daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Ancak, hafif betonda agrega taneleri yüksek kalitede bir matris ile çevrili olduğundan, aradaki farkın düşünüldüğü kadar da yüksek olmadığı aşıkardır [11].

Normal betonlarda su emme beton yaşı ile birlikte azalmaktadır, ancak Lo vd., [43] tarafından yapılan deneysel çalışmada hava sürükleyici ilave edilen düşük dayanımlı hafif beton numunelerinde su emmenin beton yaşının artışı ile arttığı görülmektedir. Elsharief vd., [44] kuru halde olan ve 24 saat suya doygun hale getirilen hafif agregalar ile üretilen harç numuneleri üzerinde yaptıkları kılcal su emme deneyinde, suya doygun agrega kullanılan harçların su emme oranlarının diğerlerinden yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Bu olayın suya doygun agregalı harçtaki ara yüzey mikro yapısının daha boşluklu olmasından kaynaklandığını ifade etmektedirler.

Chia ve Zhang, [45] 0,55 su/çimento oranına ve 400 kg/m^3 dozaja sahip hafif betonun su geçirimliliğinin normal betonunkinden daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Normal betonda su/çimento oranının 0,35 olması durumunda ise su geçirimliliğinin hafif betona oranla çok daha düşük değerler aldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca hafif ve normal betona silis dumanı ilave edilmesinin su geçirimliliğini azalttığını ifade etmişlerdir.

Betonun su geirirnililiği, porozitenin, boşluk çapının, dağılımlının ve sürekliliğinin bir fonksiyonun sonucudur. Bagel ve Zivica, [46] cıva porozimetresi deneyi ile belirlenen boşluk çapının, boşluk ile permeabilite arasındaki ilişkiyi belirlemek için en uygun boşluk parametresi olduğunu ifade etmişlerdir.



2. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN MEZO-MEKANİK MODELLEMESİ

2.1. Elastisite Modülünün Tahmini

Betonların elastik modüllerinin tahmin veya tespit edilmesi, yapısal analiz ve tasarım anlamında büyük önem taşımaktadır. Betonların elastik davranışlarının, içerdikleri agregalarının yapısıyla ilişkili olduğu bilinmektedir [4].

Tablo 2.1’de betonların elastik modülleri için bazı tahmin modelleri verilmektedir [7, 33, 47, 48]. Burada w_c , betonun kg/m^3 cinsinden birim ağırlığını ifade etmektedir.

Tablo 2.1. Betonların elastik modülleri için tahmin modelleri [7, 33, 47, 48]

Model Standardı	Tahmin Modelleri (MPa)
ACI 318 (2008)	$E_c=0,043w_c^{1,5}\sqrt{f'_c}$
ACI 363 (1992)	$E_c=\left(3320\sqrt{f'_c}+6900\right)\left(\frac{w_c}{2320}\right)^{1,5}$
TS 500 (2000)	$E_c=3250\sqrt{f'_c}+14000$
CEB-FIB (1990)	$E_c=21500\alpha\left[\frac{f'_c}{10}\right]^{1/3}$ ■

(■ α = bazalt ve yüksek yoğunluklu kireçtaşı agregaları için 1,2, normal kireçtaşı agregası için 0,9 ve kumtaşı agregası için 0,7 alınması önerilmektedir.)

Elastisite modülü tahmin modellerinde sadece basınç dayanımına bağlı formüller geliştirmek doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Daha gerçekçi bir model tahmini için sertleşmiş betonun birim ağırlığının da tahmin modeline ilave edilmesi ve agrega tipine göre bazı faktörlerin kullanılması gerekmektedir [4].

Bu tahmin modellerinden sadece CEB-FIB modeli, betonun birim ağırlığını ve kullanılan agrega tipine bağlı bir faktörü modelin formülüne eklemektedir.

Yalnızca basınç dayanımı değerlerini baz alarak tahmin yapan TS 500 modeli [48], normal betonun elastisite modül değerlerini yüksek tahmin etmektedir. TS 500 tahmin modeli, geleneksel betonlara göre oluşturulmuştur ve betonun birim ağırlığını formülde kullanmamaktadır. Bu nedenle hafif agregalı betonların elastisite modülünün tahmininde kullanılmasının doğru bir yaklaşım olmadığı görülmektedir [4].

Yoğunluğu 1440-2480 kg/m³ olan hafif betonun basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki ACI 318'in [49] Denklem (2.1) ile hesaplanabilmektedir.

$$E=0,043\gamma_{hk}^{1,5}\sqrt{f_b}, \text{ MPa} \quad (f_b \leq 42 \text{ MPa}) \quad (2.1)$$

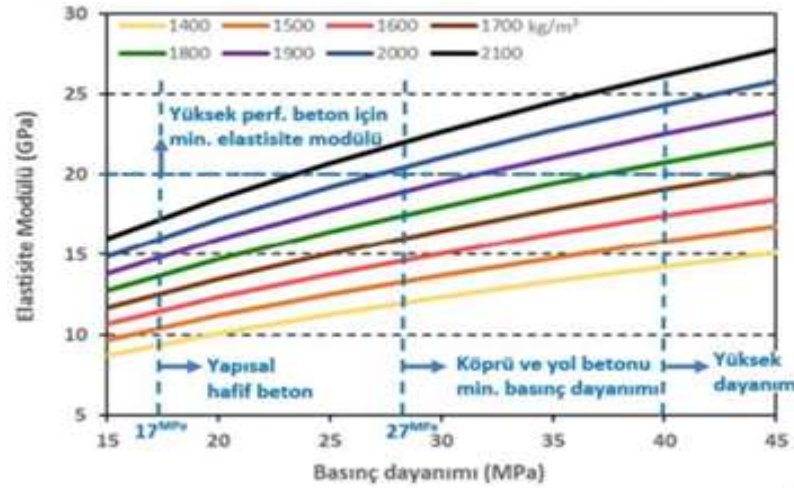
Bu denklemde;

E; elastisite modülünü,

γ_{hk} ; normal ağırlıklı betonun yoğunluğu veya hafif betonun yoğunluğunu,

f_b ; basınç dayanımını ifade etmektedir.

Bu bağıntıdan hareketle Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi basınç dayanımı-elastisite modülü değişimi grafiği elde edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Performans ile ilişkili basınç dayanımı-elastisite modülü değişimleri [50]

ACI 213R-03'e [10] göre yüksek dayanım için sınır en az 40 MPa'dır. Karışım içerisindeki çimento muhtevasının en az 330 kg/m³ olması gerekmektedir. Donma-çözülmeden etkilenmemesi için yol ve köprü tabliye betonunda ise basınç dayanımının en az 27 MPa'a ulaşılması gerekmektedir (Şekil 2.1).

Beton malzemesinin giderek artan çeşitlilikte kullanılmasıyla çatlak oluşumu ile yayılmasına sebep olan ve etkileyen faktörlerin bilinmesi önem kazanmaktadır. Betonda göçmenin nereden, hangi koşullarda ve nasıl olacağını belirlemek kırılma mekaniği kullanılarak çözümlenebilir. Bu bağlamda kullanılacak betonun elastisite modülünün tanımlanması önem kazanmakta ve mezo-mekanik modelleme bağıntıları gerçekçi yaklaşımlar vermektedir. Çimento esaslı malzemelerin elastisite modülünü tahmin etmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunların arasında en bilinenleri paralel ve seri model [51], Maxwell modeli [52], Hirsch-Dougill modeli [53], Popovics modeli [54], Counto modeli [55], Hashin-Hansen modeli [56], Bache and Nepper-Christansen modelidir [57]. Bahsedilen tüm modellerde sadece agrega ve çimento hamurunun elastisite modülleri ve hacim oranları parametre olarak alınırken agreganın tane boyutu ve diğer yüzey özellikleri göz önünde bulundurulmamaktadır. Genellikle normal dayanımlı betonlarda kullanılan bu yöntemleri Akçay ve Taşdemir [39] yüksek dayanımlı betonlar için de kullanılabileceğini ve elastisite modülünü tahmin etmede en yakın değerleri Hirsch-Dougill ve Popovics modellerinin verdiğini göstermiştir. Bunun yanında bu çalışmada da kullanılan mezo-mekanik modellemenin Nielsen [34] ise deneysel sonuçlara daha yakın tahminler elde ettiğini göstermiştir.

Bu çalışmada Nielsen [34] tarafından önerilen mezo-mekanik bağıntılar, su/çimento oranı düşük olan çimento hamuru ile çeşitli agrega içeren kompozitlerin elastisite modülünü tahmininde kullanılmıştır.

2.2. Elastisite Modülünün Mezo-Mekanik Modellenme Aşamaları

Nielsen [34] tarafından geliştirilen model (Denklem (2.2)), iki fazlı sistem olarak kabul edilen çimento hamuru, harç ve beton gibi çimento esaslı kompozit malzemelerin elastisite modülünü hesaplamak için kullanılabilir. Bu modelde elastisite modülü Denklem (2.2) kullanılarak bulunmuştur [51].

$$E = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n-1)}{n + \Theta - V(n-1)} \quad (2.2)$$

Bu denklemde;

E_m : sürekli fazın elastisite modülü,

V : dağılı fazın hacim oranı,

Θ : dağılı fazın tanımlanması için kullanılan geometrik fonksiyon,

n: dağılılı fazın elastisite modülünün sürekli fazın elastisite modülüne oranıdır.

2.2.1. Çimento hamurunun elastisite modülü

Mezo-mekanik bağlantılara göre Nielsen'in [34] elastisite modülü modelinde, çimento esaslı bir malzeme iki fazlı bir sistem olarak kabul edilmiştir. Çimento hamurunun elastisite modülü (E_p) Denklem (2.3) kullanılarak bulunmuştur.

$$E_p = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n-1)}{n + \Theta - V(n-1)} \quad (2.3)$$

Su/çimento oranı (w/c), $1.2\rho_w/\rho_c$ değerinden büyükse (ρ_w ve ρ_c sırasıyla su ve çimentonun yoğunluklarıdır), çimento hamurunun çimento jeli içine dağılmış kapiler boşluklardan oluştuğu ve n'nin sifira eşit olduğu kabul edilir.

Bu durumda V ve Θ aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır;

$$V = \frac{\frac{w}{c} - 1.2\rho_w/\rho_c}{\frac{w}{c} + \rho_w/\rho_c} \quad (2.4)$$

$$\Theta = \eta_k(1-V) \quad (2.5)$$

Bu denklemde η_k : kapiler boşlukların şekil faktörüdür.

Eğer $w/c < 1.2\rho_w/\rho_c$ ise, çimento hamurunun, çimento jeli içine dağılılı olan anhidr çimento tanelerinden oluştuğu kabul edilir. Bu durumda V, Θ ve n şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$V = \frac{1 - 0.83\left(\frac{w}{c}\right)\left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)}{1 + \left(\frac{w}{c}\right)\left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)} \quad (2.6)$$

$$\Theta = 0,5 \left[\eta_u \sqrt{1-V} (1-n) + \sqrt{\eta_u^2(1-V)(1-n)^2 + 4n} \right] \quad (2.7)$$

$$n = \frac{E_u}{E_m} \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde;

E_u : anhidr çimento taneciğinin elastisite modülü,

E_m : hidrate olmuş çimento jelinin elastisite modülü,

η_u : anhidr çimento taneciğinin biçim faktörüdür [58].

E_m , çimento hamurunun hidrasyon derecesi (α) kullanılarak Denklem (2.9) ile belirlenebilir. Çimento hamurunun elastisite modülü Denklem (2.3)'da $E=E_p$ alınarak bulunur.

$$E_m=27200\alpha \quad (2.9)$$

2.2.2. Çimento harcının elastisite modülü

Harcın elastisite modülünü (E_r) hesaplamak için, çimento hamurunun hesaplanan elastisite modülü, sürekli fazın elastisite modülü ($E_m=E_p$) olarak alınır. Hesaplamalarda V yerine V_f yani ince agreganın hacim oranı kullanılarak ve n değeri ince agreganın elastisite modülünün (E_f) çimento hamurunun elastisite modülüne (E_p) oranı olarak alınarak Denklem (2.3)'ün düzenlemesiyle aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$E_r=E_p \frac{n+\Theta+V_f\Theta(n-1)}{n+\Theta-V_f\Theta(n-1)} \quad (2.10)$$

$$n=\frac{E_f}{E_p} \quad (2.11)$$

Harçtaki dağılımı fazın geometri fonksiyonu şu şekilde hesaplanabilmektedir;

$$\Theta=0,5[q+\sqrt{q^2+4n}] \quad (2.12)$$

$$q=\eta_f(1-V_f)+n\eta_f(V_f-1) \quad (2.13)$$

$$\eta_f=\frac{3A_f(1+A_f)}{1+A_f+4A_f^2} \quad (2.14)$$

Bu denklemlerde;

A_f : ince agreganın narinliği,

η_f : ince agreganın şekil faktörüdür.

Agreganın elastisite modülü (GPa), Müller-Rochholz formülü [59] ile agreganın partikül yoğunluğu (ρ_{ag}) kullanılarak Denklem (2.15)'e göre de belirlenebilmektedir.

$$E_{ag}=8,1\rho_{ag}^2 \quad (2.15)$$

2.2.3. Betonun elastisite modülü

Beton için, sürekli faz olarak hesaplanan harç elastisite modülü ($E_m=E_p$) ve dağılı faz olarak da iri agreganın kullanılarak Denklem (2.16) ile elde edilmektedir.

$$E=E_r \frac{n+\Theta+V_c \Theta(n-1)}{n+\Theta-V_c(n-1)} \quad (2.16)$$

Beton için n değeri şu şekilde hesaplanabilmektedir;

$$n=\frac{E_c}{E_r} \left(1-\beta^{5+\frac{E_c}{E_r}} \right) \quad (2.17)$$

Bu denklemde;

E_c : iri agreganın elastisite modülü,

E_r : harcın elastisite modülü,

V_c : iri agreganın hacim oranı,

β : kopan agreganın yüzey alanının tüm yüzey alanına oranıdır.

Betonun elastisite modülünü hesaplamak için kullanılan diğer parametreler aşağıdaki denklemlerde ifade edilmiştir;

$$\Theta =0,5[q+\sqrt{q^2+4n}] \quad (2.18)$$

$$q=\eta_c(1-V_c)+\eta_c(V_c-1) \quad (2.19)$$

$$\eta_c=\frac{3A_c(1+A_c)}{1+A_c+4A_c^2} \quad (2.20)$$

Bu denklemde;

A_c : iri agreganın en boy oranı

η_c : iri agreganın şekil faktörü şeklindedir.

3. ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN MEZO-MEKANİK MODELLEME İLE ANALİZİ

3.1. Mezo-Mekanik Modellemesinde Kullanılan Deneysel Elastisite Modülü Verileri

Deneysel olarak belirlenmiş elastisite modülü değerleri için Akçay [60] tarafından verilen düşük s/ç oranlı çimento hamuru, ince harç, kaba harç ve beton örnekleri kullanılmıştır. Bunun yanında hacimsel olarak %70 çimento hamuru fazı %30 agrega fazı içeren çimentolu kompozitlerin deneysel sonuçları da kullanılmıştır.

Deneysel araştırmalar için karışımlarda kullanılan özgül ağırlığı $3,11 \text{ g/cm}^3$ olan CEM I 42,5 çimentosunun 7 ve 28 günlük standart RILEM-Cembureau harç basınç dayanımları sırasıyla 40,0 ve 50,6 MPa olarak bulunmuştur. Tüm beton karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0,28 ve silis dumanı (özgül ağırlığı $2,24 \text{ g/cm}^3$ ve SiO_2 içeriği %93,7 olan) ilavesi oranı çimento ağırlığının %10'u kadardır. Tüm agregalar, karışımlara eklenmeden önce belirli elek boyutları kullanılarak elenmiştir. Kırma kireçtaşı (4-8 mm), kırma kum (2-4 mm), kuvars kumu (0-2 mm) ve silis unu (0-0,25 mm) tane yoğunlukları sırasıyla 2720, 2710, 2650 ve 2620 kg/m^3 'tür. Hafif agrega olarak Kapadokya bölgesinde ponza taşları kullanılmıştır. 2-4 ve 4-8 mm tane büyüklüğünde elenerek 24 saat suya doygun halde kullanılan hafif agregaların tane yoğunlukları sırasıyla 1070 ve 1020 kg/m^3 'tür [60].

Çimento hamuruna (PREF) daha sonra farklı tane boyutuna (0-2 mm, 2-4 mm ve 4-8 mm) sahip normal ağırlıklı agregaların ilavesiyle kompozitler hazırlanmıştır (PN 0-2, PN 2-4 ve PN 4-8 olarak) [60]. Hafif agreganın etkisini araştırmak amacıyla da aynı hamur fazına 2-4 mm ve 4-8 mm boyutlarında hafif ağırlıklı agregalar ilave edilerek yeni kompozitler hazırlanmıştır (PL 2-4 ve PL 4-8 olarak). Karışımların detayları Tablo 3.1'de sunulmuştur. Hazırlanan karışımlardan 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde her bir seriye ait 5 adet silindirik örnekler hazırlanmış ve 28. günde basınç altında statik elastisite modülleri EN 12390'e göre belirlenmiştir [61].


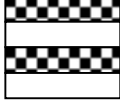
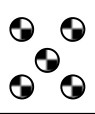


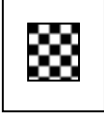
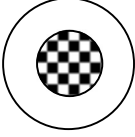
Tablo 3.1. Karışımda kullanılan malzemeler [60]

Malzemeler	PREF	FMREF	MREF	CREF	PN 0-2	PN 2-4	PN 4-8	PL 2-4	PL 4-8
Çimento, kg	1464	800	610	497	1005	1005	1018	1010	1007
Silis dumanı, kg	146	80	61	50	101	101	102	101	101
Su, kg	451	247	188	153	309	309	314	311	310
Akışkanlaştırıcı, kg	9	12	12	10	6,3	5	3,7	5	3,7
Silis unu, kg	0	272	207	169	0	0	0	0	0
Doğal kum (0-2 mm), kg	0	828	630	514	765	0	0	0	0
Kırma kum (2-4 mm), kg	0	0	638	520	0	765	0	0	0
Kırma taş (4-8 mm), kg	0	0	0	529	0	0	805	0	0
Hafif agregası (2-4 mm), kg	0	0	0	0	0	0	0	222	0
Hafif agregası (4-8 mm), kg	0	0	0	0	0	0	0	0	215
Hava, %	0,5	3,3	2,5	1,4	2,3	2,4	1,7	2	2
Yoğunluk, kg/m ³	2070	2239	2345	2441	2186	2185	2239	1717	1704
Elastisite Modülü, MPa	17,9	31,03	39,4	45,7	27,43	28,01	29,3	16,49	19,78
Basınç Dayanımı, MPa	68,5	74,93	87,98	93,06	68,42	72,21	74	29,23	30,69

3.2. Elastisite Modülünün Tahmininde Kullanılan Modeller

Çimento esaslı malzemelerin elastisite modülünü tahmin etmek için çeşitli yöntemlerin kullanıldığı daha önce belirtilmiştir. Kullanılan modellerin hesaplama detayları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Elastisite modülü tahmininde kullanılan modeller [60]

<p>Paralel faz modeli [51]</p>  $E_c = E_m V_m + E_p V_p$ $E_p < E_m$	<p>Seri faz modeli [51]</p>  $\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_p}{E_p}$ $E_p > E_m$
<p>Dispersed Phase (Maxwell) modeli [52]</p>  $E_c = E_m \left[\frac{1 + 2V_p (\alpha - 1) / (\alpha + 2)}{1 - V_p (\alpha - 1) / (\alpha + 2)} \right]$ $\alpha = E_p / E_m$	<p>Hirsch-Dougill modeli [53]</p>  $\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_{c,Parallel}} + \frac{1}{E_{c,Seies}} \right]$
<p>Popovics modeli [54]</p>  $\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} [E_{c,Parallel} + E_{c,Seies}]$	<p>Counto modeli [55]</p>  $\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{V_p}}{E_m} + \left[\frac{1 - \sqrt{V_p}}{\sqrt{V_p}} E_m + E_p \right]^{-1}$
<p>Hashin-Hansen modeli [56]</p>  $\frac{1}{E_c} = E_m \left[\frac{(E_m + E_p) + (E_p - E_m)V_p}{(E_m + E_p) - (E_p - E_m)V_p} \right]$	<p>Bache and Nepper-Christansen modeli [57]</p> $E_c = E_m^{V_m} E_p^{V_p}$

Bu tabloda E_m ve E_p sırasıyla matris ve agrega fazlarının elastisite modülünü ifade etmektedir. Çalışmada amaçlanan ana yaklaşım olan mezo-mekanik modelleme ile

karşılaştırma yapabilmek için çimento hamuru ve agregaların elastisite modülü değerleri Akçay'da [60] verilen değerler ile aynı alınmıştır.

Hem normal agregası için hem de hafif agregası için hesaplanan elastisite modülü tahmin model sonuçları Tablo 3.3'te verilmektedir. Normal agregalı kompozitlerin elastisite modüllerinin, Paralel ve Seri modeller hariç tüm modellerde hafif agregalı kompozitlere göre daha iyi tahmin edildiği görülmektedir. En yaklaşık değerler veren sonuçlar Hirsch-Dougill ve Popovics modeli ile yapılan hesaplamadan elde edilmiştir. Öte yandan, Lydon ve Balendran [62], Bache ve Nepper-Christansen [57] modelinin normal agregalı kompozitlerin ve hafif agregalı kompozitlerin elastisite modülünü tahmin etmek için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Tahmin edilen değerlerin deneysel değerlerden daha küçük bulunmasının nedeni, hafif agregalı kompozitler ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin etkisinin hesaplamalarda dikkate alınmamış olmasıdır. Bu nedenle, kompozitlerin elastisite modülünü tanımlamak için mezo-mekanik modelleme uygulanmıştır. Çimento esaslı malzemeler için elastisite modülü değerlerinin mezo-mekanik modelleme ile başarılı bir şekilde tahminin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır.

Tablo 3.3. Elastisite modülü tahmininde kullanılan modellerden elde edilen sonuçlar

	Normal agregalar ile çimento hamuru (GPa)	Hafif agregalar ile çimento hamuru (GPa)
Parelel faz modeli	32,4	18,0
Seri faz modeli	26,8	15,3
Maxwell modeli	29,5	17,4
Hirsch-Dougill modeli	29,4	16,6
Popovics modeli	29,6	16,7
Counto modeli	29,4	17,4
Hashin-Hansen modeli	28,6	17,0
Bache ve Nepper- Christansen modeli	29,2	16,8

3.3. Mezo-Mekanik Modelleme Analizleri

Düşük su/çimento oranlı bu karışımlarda önerilen hidrasyon derecesi olan 0,75 yerine su miktarının az çimento miktarının yüksek olması nedeni ile 0,60 olarak alınabileceği düşünülmüştür. Hamur fazının elastisite modülünün farklı hidrasyon dereceleri alınarak hesaplanmış mezo-mekanik modelleme sonuçlarının verildiği Tablo 3.4'ten de görüleceği üzere hidrasyon derecesinin $\alpha=0,60$ alınması deneysel sonuçlara en yakın değeri vermektedir.

Tablo 3.4. Farklı hidrasyon dereceleri için PREF örneğinin elastisite modülü mezo-mekanik modelleme sonuçları

	$\alpha=0,50$	$\alpha=0,55$	$\alpha=0,60$	$\alpha=0,62$	$\alpha=0,65$	Deneysel
E, GPa	15,57	17,16	18,63	19,21	20,77	17,94

Diğer parametreler ise $\eta_f=0,7$; $\eta_c=1,0$; $E_u=75000$ MPa; $A_f=A_c=1,0$ ve normal agrega için $\beta=0,2$ alınmıştır [63]. Bu durumda deneysel olarak bulunan ve mezo-mekanik modelleme bağıntıları ile hesaplanan elastisite modülü değerleri Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.5. PREF, FMREF, MREF ve CREF karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa

	PREF	FMREF	MREF	CREF
Deneysel	17,94	31,03	39,44	45,67
Mezo-mekanik modelleme	18,63	31,11	39,27	41,24

Tablo 3.6. PN 0-2, PN 2-4 ve PN 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik sonuçları, GPa

	PN 0-2	PN 2-4	PN 4-8
Deneysel	27,42	28,01	29,28
Mezo-mekanik modelleme	27,85	26,50	26,47

Tablo 3.5'te verilen PREF numunesi için hidrasyon derecesini $\alpha=0,60$ olarak belirleyerek mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülünün deneysel sonuçla oldukça yakın olması yanlış bir yaklaşım benimsenmediğini göstermektedir.

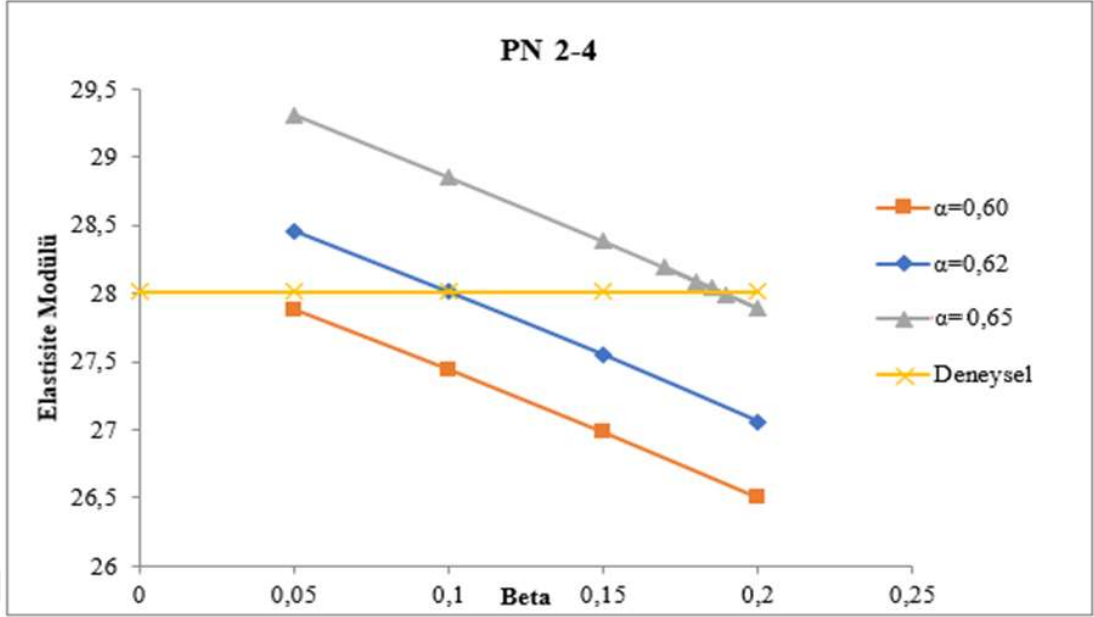
3.4. Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Elastisite modülünün mezo-mekanik bağıntılar ile tahmin edilebilirliği normal agrega içeren karışımlar için daha önce bazı yazarlar tarafından araştırılmış ve parametreler belirlenmişti [60]. Daha önceden bahsedildiği gibi benzer çalışma hafif agrega içeren karışımlar için henüz yapılmamıştı. Bu amaçla farklı hidrasyon dereceleri ($\alpha=0,60$; 0,62 ve 0,65) ve farklı β değerleri ($\beta=0,05$; 0,1; 0,15 ve 0,2) için aynı hesaplar yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de verilmiştir.

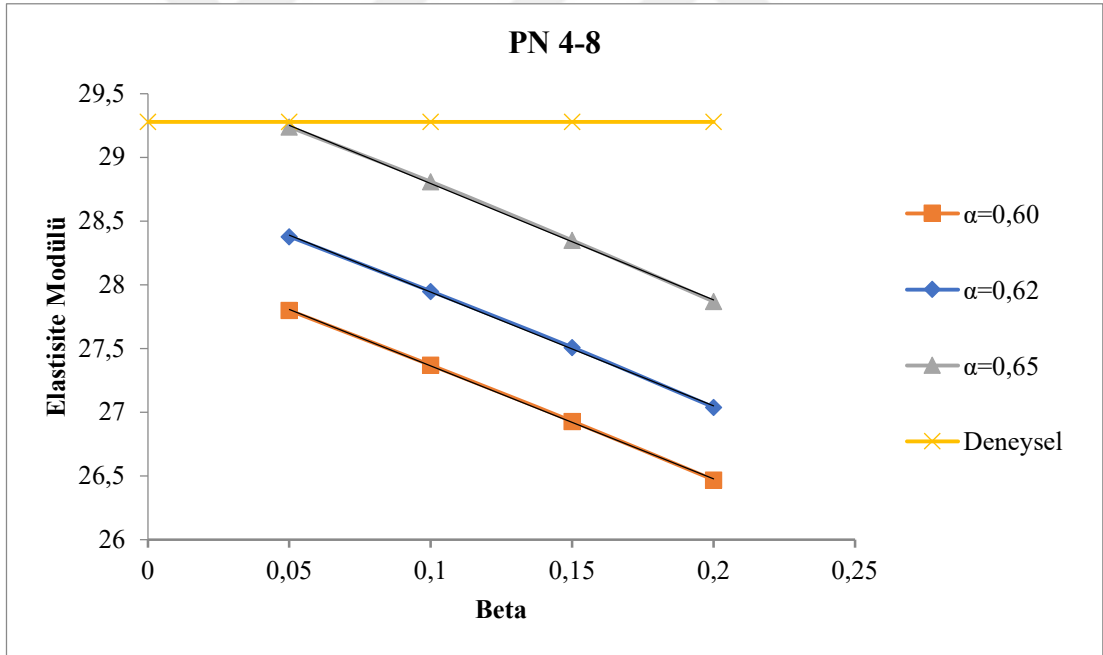
Tablo 3.7. PN 0-2, PN 2-4 ve PN 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa

		PN 2-4	PN 4-8	PN 0-2	
Mezo-mekanik modelleme	$\alpha=0,60 \beta=0,05$	27,88	27,80	27,85	
	$\alpha=0,60 \beta=0,1$	27,44	27,37		
	$\alpha=0,60 \beta=0,15$	26,98	26,93		
	$\alpha=0,60 \beta=0,2$	26,50	26,47		
	$\alpha=0,62 \beta=0,05$	28,46	28,38	28,42	
	$\alpha=0,62 \beta=0,1$	28,01	27,95		
	$\alpha=0,62 \beta=0,15$	27,55	27,51		
	$\alpha=0,62 \beta=0,2$	27,06	27,04		
	$\alpha=0,65 \beta=0,05$	29,31	29,24	29,27	
	$\alpha=0,65 \beta=0,1$	28,85	28,81		
	$\alpha=0,65 \beta=0,15$	28,38	28,35		
	$\alpha=0,65 \beta=0,2$	27,89	27,87		
	Deneysel		28,01	29,28	27,42

Deneysel sonuçlar ve mezo-mekanik modelleme sonuçları baz alınarak değişken α değerlerine karşılık gelen elastisite modülü–beta grafikleri Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. PN 2-4 serisinin değişken α değerlerine karşılık elastisite modülü (GPa)-beta eğrisi

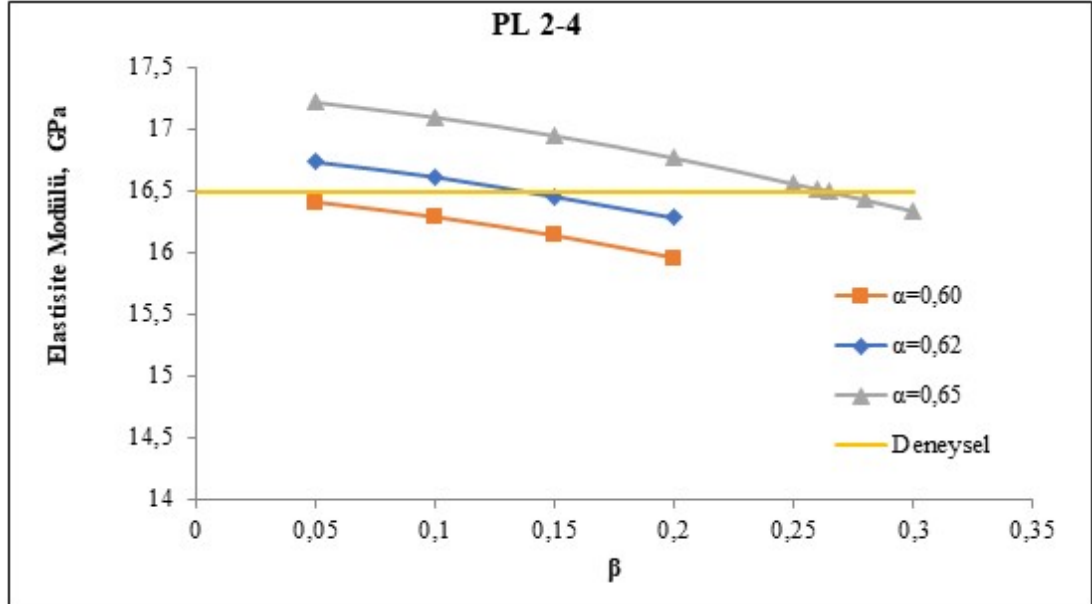


Şekil 3.2. PN 4-8 serisinin değişken α değerlerine karşılık elastisite modülü (GPa)-beta eğrisi

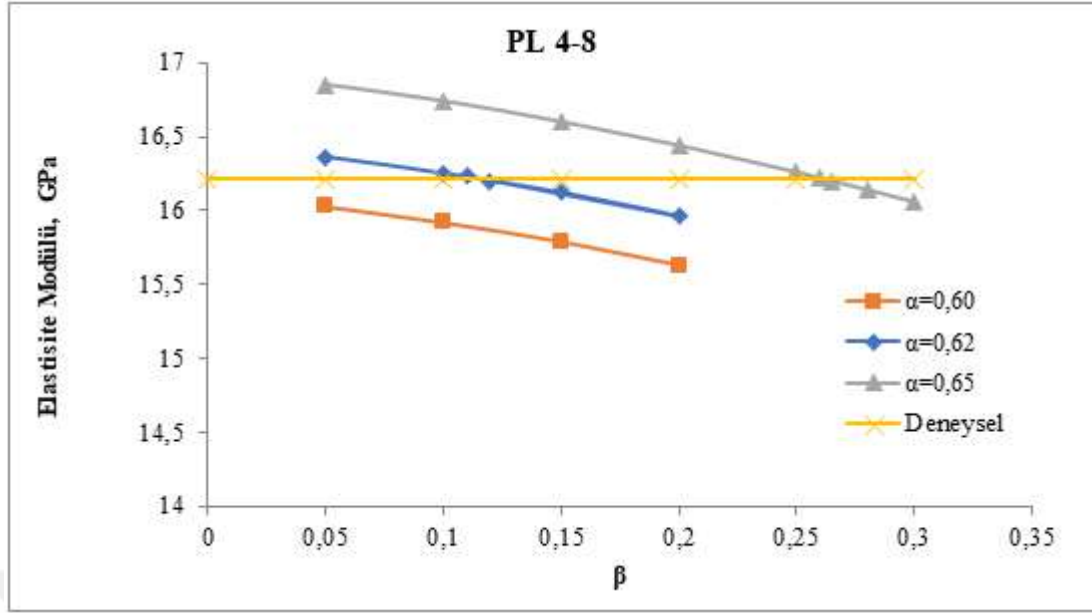
Tablo 3.8’de en yakın tahmini veren değerlerin $\alpha=0,62$ ’de olduğu görülmekte ise de sonuçlar grafik halinde incelendiğinde (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) $\alpha=0,65$ için daha büyük β ve $\alpha=0,60$ için daha küçük β değerlerinde daha iyi yaklaşık sonuçların olabileceği görülmüştür. Analizler bu değerlerde tekrar yapıldığında elde edilen sonuçlar da Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.8. PL 2-4 ve PL 4-8 karışımlarının elastisite modüllerinin deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları, GPa

		PL 2-4	PL 4-8	
Mezo-mekanik modelleme	$\alpha=0,60 \beta=0,05$	16,40	16,03	
	$\alpha=0,60 \beta=0,1$	16,28	15,92	
	$\alpha=0,60 \beta=0,15$	16,13	15,79	
	$\alpha=0,60 \beta=0,2$	15,95	15,63	
	$\alpha=0,62 \beta=0,05$	16,73	16,36	
	$\alpha=0,62 \beta=0,1$	16,61	16,25	
	$\alpha=0,62 \beta=0,15$	16,45	16,12	
	$\alpha=0,62 \beta=0,2$	16,28	15,96	
	$\alpha=0,65 \beta=0,05$	17,21	16,85	
	$\alpha=0,65 \beta=0,1$	17,09	16,74	
	$\alpha=0,65 \beta=0,15$	16,94	16,60	
	$\alpha=0,65 \beta=0,2$	16,76	16,44	
	Deneysel		16,49	16,21



Şekil 3.3. PL 2-4 serisinin elastisite modüllerinin deneysel sonuçlarının ve mezo-mekanik modelleme ile elde edilen değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.4. PL 4-8 serisinin elastisite modüllerinin deneysel sonuçlarının ve mezo-mekanik modelleme ile elde edilen değerlerinin karşılaştırılması

Böylece hem PL 2-4 hem de PL 4-8 serileri için $\alpha=0,65$ için $\beta=0,265$ değerinin de elastisite modülüne yaklaştığı belirlenmiştir.

Daha yüksek hidrasyon derecesinde de elastisite modülünün iyi tahmin edilmesi suya doyurulmuş hafif agrega ilavesiyle içsel kürlenmenin sayesinde daha çok çimento tanesinin suyla reaksiyona girebilmesi nedeniyle hidrasyon derecesinin artması ile ilişkilendirilebilir.

Elastisite modülünü belirlemek için hidrasyon değerinin artırılması mı yoksa β değerinin düşürülmesi mi gerektiği sorusuna çözüm aramak gerekmektedir. Bu yüzden Akçay [60] tarafından deneysel sonuçları verilen MREF karışımındaki 2-4 mm normal agreganın yine 2-4 mm hafif agrega ile yer değiştirdiği harç numunelerinin elastisite modülü mezo-mekanik bağıntılar ile tekrar hesaplanarak yaklaşımın kalibrasyonu yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9'dan görüleceği gibi normal agregalar için alınan $\beta=0,2$ değerinin hafif agregalar için 0,05 olarak alınmasının gerektiği görülmüştür. Hafif agregalar için $\beta=0,05$ alındığında deneysel sonuçlara yaklaşıldığı görülmektedir.

Tablo 3.9. MREF karışımındaki 2-4 mm boyutundaki normal agregaların 2-4 mm hafif agregaya ile yer değiştirildiği harç karışımlarının deneysel ve mezo-mekanik modelleme sonuçları

		E, GPa
Mezo-mekanik modelleme	$\alpha=0,60 \beta=0,05$	21,16
	$\alpha=0,60 \beta=0,2$	20,74
	$\alpha=0,62 \beta=0,15$	20,78
	$\alpha=0,62 \beta=0,2$	20,62
	$\alpha=0,65 \beta=0,2$	21,03
	$\alpha=0,65 \beta=0,265$	20,89
Deneysel		23,32

Rijitliği normal agregaya göre daha düşük olan hafif agregaların kopan agreganın yüzey alanının tüm yüzey alanına oranının daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum hafif agregaya çimento ara yüzeyinin rijitliğinin normal agregaya göre daha yüksek olduğunu yani hafif agregaların çimento ile daha iyi mekanik kenetlenme sağladığını göstermektedir.

Bu yaklaşım literatürde verilmiş genişletilmiş kil hafif agregası ve çimento hamuru içeren karışımların Akçay vd., [64] elastisite modülünün modellenmesinde tekrar analiz yapılarak test edilmiştir. Düşük su/çimento oranlı bir çimento hamuruna hacimce %30 oranında iki farklı boyutta 4,00-6,73 mm (FLWAP) ve 6,73–8,00 mm (CLWAP) genişletilmiş kil hafif agregaları ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerin elastisite modülü farklı β değerleri ile modellenerek deneysel sonuçlar Tablo 3.10’da karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.10. Genleştirilmiş kil hafif agregası içeren kompozitlerin elastisite modüllerinin mezo-mekanik bağıntılar ile hesaplama sonuçları, GPa

		FLWAP	CLWAP
Mezo-mekanik modelleme	$\beta=0,05$	16,74	15,09
	$\beta=0,2$	16,29	14,75
Deneysel		17	16

Bu hesaplamalarda hamur fazının elastisite modülü deneysel sonuçları ile bulunan değer (21 GPa) alınmıştır. Tablo 3.10'dan da görüleceği gibi $\beta=0,05$ değeri deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermiştir.



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada agrega birim ağırlığı ve tane boyutunun çimento esaslı kompozitlerin elastisite modülüne etkisini belirleyebilmek için mezo-mekanik bağıntılar kullanılmış ve bu yaklaşım literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler ve parametrik çalışmalar ile elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Düşük su/çimento oranlı karışımlarda mezo-mekanik modellemelerde yaygın kullanılan 0,75 olan hidrasyon derecesinin daha düşük alınması gerektiği belirlenmiştir. Bu değer normal agrega içeren kompozitlerde 0,60 olarak alınabileceği analizler ile gösterilmiştir.
- Hafif agrega içeren kompozitlerde ise içsel kütleme nedeniyle düşük su/çimento oranlı kompozitlerde hidrasyon derecesinin bir miktar daha yüksek alınabileceği belirtilmiştir.
- Normal agrega içeren karışımlarda β kopan agreganın yüzey alanının tüm yüzey alanına oranı değeri 0,2 olarak kullanılabilirken, parametrik çalışmalarla bu değer hafif agrega içeren karışımlarda 0,05 olarak kullanılmasının elastisite modülünün deneysel değerlerine daha yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu durum hafif agrega çimento ara yüzeyinde mekanik kenetlenmenin daha güçlü olması ile açıklanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] TS EN 206-1, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.
- [2] Postacıoğlu B., *Beton*, 2. bs., Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1987.
- [3] Taşdemir M. A., Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1982.
- [4] Dilli M. E., Hafif Agregalı İçeren Yalın ve PVA Lif ile Güçlendirilmiş Yapısal Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 154848.
- [5] ACI 213R-87, Guide For Structural Lightweight Aggregate Concrete, *American Concrete Institute*, 1999.
- [6] ASTM C330/C330M-13, Standard Specification For Lightweight Aggregates For Structural Concrete, *ASTM International*, 2014.
- [7] CEB-FIP Model Code, Bulletin d'Information, Thomas Telford Services, *Comité Euro-International du Béton*, London, 1990.
- [8] TS 2511, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1977.
- [9] Kabay N., Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 243881.
- [10] ACI 213R-03, Guide For Structural Lightweight-Aggregate Concrete, *American Concrete Institute*, U.S.A., 2003.
- [11] Clarke J. L., *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Chapman&Hall, Great Britain, 1993.
- [12] Lamond J. F., Pielert J. H., *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, U.S.A., 2006.
- [13] Balun B., Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2013, 334591.

- [14] TS 1114 EN 13055–1, Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2004.
- [15] Mindess S., Young J. F., Darwin D., Concrete, 2nd ed., Prentice Hall, NJ:Englewood Cliffs, 1987.
- [16] Ateş E., Styropor Hafif Betonun ve Betonarme Çatı Plak Elamanları Üzerine Araştırma, Bitirme Ödevi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul, 2000.
- [17] Yenidoğan C., Hafif Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Üretimi ve Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019, 603501.
- [18] DPT, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu, *DPT*, ISBN 975 – 19 – 2852 – 4, 2, 2001.
- [19] Kayalı O., Fly Ash Lighthweigth Aggregates in High Performance Concrete, *Science Direct Construction and Building Materials*, 2008, **22**(12), 2393-2399.
- [20] Aruntaş H. Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2006, **21**(1), 193-203.
- [21] Verma C. L., Handa S. K., Jain S. K., Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India, *Construction and Building Materials*, 1998, **12**(6-7), 341-346.
- [22] Baykal G., ve Döven A. G., Utilization of Fly Ash by Pelletization Process; Theory, Application Areas and Research Results, *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, **30**(1), 59–77.
- [23] Yolcu C., Yüksek Performanslı Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Pomza Agregalarının Kullanılabilirliği, Mekanik Büyüklükleri ve Uygulama Kriterleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018, 504480.
- [24] Chen B., Liu J., Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the Highstrength Lightweight Concrete Having Good Workability, *Cement and Concrete Research*, 2005, **35**(5), 913-917.
- [25] Neville A. M., *Properties of Concrete*, 3rd ed., Longman Scientific and Technical, New York, 2000.
- [26] 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.
- [27] Lo T. Y., Cui H. Z., Effect of Porous Lightweight Aggregate on Strength of Concrete, *Materials Letters*, 2004, **58**(6), 916-919.

- [28] Lo Y., Gao X. F., Jeary A. P., Microstructure of Pre-wetted Aggregate on Lightweight Concrete, *Building and Environment*, 1999, **34**(6), 759-764.
- [29] Şahin R., Demirboğa R., Uysal H., Gül R., The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Compressive Strength and Densities of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**(8), 1245-1249.
- [30] Kılıç A., Atiş C. D., Yaşar E., Özcan F., High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**(10), 1595-1599.
- [31] Haque M. N., Al-Khaiat H., Kayali O., Strength and Durability of Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2004, **26**(4), 307-314.
- [32] Hossain K., Lachemi M., Mixture Design, Durability and Fire Resistance of Lightweight Pumice Concrete, *ACI Materials Journal*, 2007, **104**(5), 449-457.
- [33] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete And Commentary, *American Concrete Institute*, U.S.A., 2008.
- [34] Nielsen L. F., Tech. Rep. No.208 Build. Mat. Insst., Techn. Univ. Of Denmark. 1990.
- [35] Erdoğan T. Y., *Beton*, 4. bs., ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 2003.
- [36] Akman M. S., *Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri*, Livane Matbaacılık, İstanbul, 2000.
- [37] Alduaij J., Alshaleh K., Haque N., Ellaithy, K., Lightweight Concrete in Hot Coastal Areas, *Cement and Concrete Research*, 1999, **21**(5-6), 453-458.
- [38] Kayalı O., Haque M. N., Zhu B., Drying Shrinkage of Fibre-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Containing Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, 1999, **29**(11), 1835-1840.
- [39] Akçay B., Taşdemir M.A., Optimisation of Using Lightweight Aggregates in Mitigating Autogenous Deformation of Concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, **23**(1), 353-363.
- [40] Lura P., Bentz D. P., Lange D. A., Kovler K., Bentur A., Breugel K. V., Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste, *Engineering Conferences International*, Copper Mountain, 10-14 August 2003.
- [41] Kovler K., Souslikov A., Bentur A., Pre-Soaked Lightweight Aggregates as Additives for Internal Curing of High-Strength Concretes, *Cement, Concrete, and Aggregates*, 2004, **26**(2), 1-8.

- [42] Ramakrishnan V., Bremner T. W., 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.
- [43] Lo T. Y., Cui H. Z., Nadeem A., Li Z. G., The Effects of Air Content on Permeability of Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2006, **36**(10), 1874-1878.
- [44] Elsharief A., Cohen M. D., Olek J., (), Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar, *Cement and Concrete Research*, 2005, **35**(7), 1368-1376.
- [45] Chia K. S., Zhang M., Water Permeability and Chloride Penetrability of Highstrength Lightweight Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2002, **32**(4), 639-645.
- [46] Bagel L., Zivica V., Relationship Between Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Mortars: on the Choice of Effective Pore Structure Parameter, *Cement and Concrete Research*, 1997, **27**(8), 1225-1235.
- [47] ACI 363R-92, State-of-the-Art Report on Highstrength Concrete, *American Concrete Institute*, U.S.A., 1992.
- [48] TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 2000.
- [49] ACI 318-95, Building Code Requirements for Structural Concrete, *American Concrete Institute*, U.S.A., 1995.
- [50] Girgin Z. C., Hafif Agregalı Yüksek Performanslı Beton ve Prefabrikasyon Uygulamaları, *Beton Prefabrikasyon*, 2017, (121-122), 5-12.
- [51] Hansen T. C., Strength, elasticity and creep as related to the internal structure of concrete, *Chem. of Cement, Proc., 4th Int. Symp*, Washington D. C., 709-723, 1960.
- [52] Holiday L., Composite Materials, *Elsevier Science*, Amsterdam, 1966.
- [53] Hirsch T. J., Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate, *ACI J*, 1962, **59**(3), 427-451.
- [54] Popovics S., Erdey M., Estimation of the modulus of elasticity of concrete like composite materials, *Materials and Structure*, 1970, **3**, 253-260.
- [55] Counto U. J., The effect of elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep and creep recovery of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 1964, **16**(48), 129-138.
- [56] Hansen T. C., Influence of aggregate and voids on modulus of elasticity of concrete, cement mortar and cement paste, *ACI Journal*, 1965, **62**(2), 193-215.

- [57] Bache H., Nepper-Christansen P., Observations on strength and fracture in lightweight and ordinary concrete-the structure of concrete and it's behaviour under load, *Proc., Int. Conf. on the Struct. of Concrete, Cement and Concrete Assoc.*, 1965, 1-16.
- [58] Nielsen L. F., Poröse Materialers Stivhed, Technical Report No. 287, Institute of Building Materials, Technical University of Denmark, 1993.
- [59] Müller-Rochholz J., Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement, *The International Journal of Lightweight Concrete*, 1979, **1**(2), 87-90.
- [60] Akçay B., Effects Of Lightweight Aggregates on Autogenous Deformation And Fracture Of High Performance Concrete, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223721.
- [61] TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 2019.
- [62] Lydon F. D., Balendran R. V., Some observations on elastic properties of plain concrete, *Cement and Concrete Research*, 1986, **16**(3), 314-324.
- [63] Karihaloo B. L., Nallathambi P., An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete, *Cement and Concrete Research*, 1989, **19**(4), 603-610.
- [64] Akçay B., Pekmezci B. Y., Taşdemir M. A., Effects Of Lightweight Aggregates On Autogenous Deformation And Fracture Of High Performance Concrete, *Symposium 'Keep Concrete Attractive'*, Budapest, 2005.



EKLER

Ek-A Elastisite modülü değerleri ve basınç dayanımları

Tablo A.1. Üretilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı ve elastisite modülünün sonuçları [60]

	Basınç dayanımı, MPa		Elastisite modülü, MPa	
		Ortalama		Ortalama
PREF-1	77,67	68,50	19592	17,94
PREF-2	78,56		15471	
PREF-3	55,39		15423	
PREF-4	62,39		21443	
FMREF-1	78,33	74,93	30447	31,03
FMREF-2	72,87		30874	
FMREF-3	71,51		32526	
FMREF-4	77,01		30261	
MREF-1	93,17	87,98	39578	39,44
MREF-2	86,58		37385	
MREF-3	92,05		41132	
MREF-4	80,12		39658	
CREF-1	104,96	93,06	45466	45,67
CREF-2	95,24		46636	
CREF-3	78,98		44895	
PN 0-2-1	71,3	68,42	28420	27,42
PN 0-2-2	63,28		25421	
PN 0-2-3	67,98		26394	
PN 0-2-4	71,11		29466	
PN 2-4-1	72,42	72,21	27616	28,01
PN 2-4-2	70,81		28877	
PN 2-4-3			29518	
PN 2-4-4	73,41		26026	

Tablo A.1. (Devam) Üretilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı ve elastisite modülünün sonuçları [60]

	Basınç dayanımı, MPa		Elastisite modülü, MPa	
		Ortalama		Ortalama
PN 4-8-1	81,49	74,00	29002	29,28
PN 4-8-2	61,12		29281	
PN 4-8-3	79,40		29567	
PL 2-4-1	27,54	29,02	15301	16,49
PL 2-4-2	26,32		16204	
PL 2-4-3	33,21		17970	
PL 4-8-1	30,07	29,99	17275	16,21
PL 4-8-2	29,90		15150	

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yalman M.**, Hafif Agregalı İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Elastisite Modülünün Mezo-mekanik Modellenmesi, *6. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi-IMASCON 2021 Bahar*, Kocaeli, 21-22 Mayıs 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya’da tamamladı. 2012 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne başladı ve 2016 yılında mezun oldu. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.

