

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Turhan BİLİR*

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

Geliş / Received: 04.05.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 20.06.2016

Kabul / Accepted: 25.06.2016

ÖZ

Son zamanlarda, farklı betonların elastisite modüllerinin tahmin edildiği çalışmaların sayısı sürekli artmıştır. Bu çalışmada, pomza agregası içeren betonlarla ilgili bir referans makale literatürden seçilmiştir. Bu referans çalışmada yer alan beton serilerinin karışım oranları, basınç dayanımları ve birim hacim ağırlığı özellikleri yardımıyla mevcut 10 adet ampirik ve 10 adet kompozit model ile elastisite modülleri tahmini yapılmıştır. Tahmin edilen değerler referans çalışmadan elde edilen serilerin deneysel elastisite modülleri ile karşılaştırılarak söz konusu ampirik ve kompozit modellerin pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahminindeki performansları değerlendirilmiştir. Pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahminine en uygun model belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel elastisite modülleri ile tahmin edilen elastisite modülleri arasındaki hata oranları tartışılmış ve pomza agregalı betonların elastisite modülleri ile ilgili genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ampirik modeller, elastisite modülü, kompozit modeller, pomza agregalı beton

INVESTIGATION OF SOME EMPIRICAL AND COMPOSITE MODELS FOR THE PREDICTION OF ELASTIC MODULI OF PUMICE AGGREGATE CONCRETES

ABSTRACT

Recently, the number of studies in which the elastic modulus of different concrete is estimated has continuously increased. In this study, a reference article dealing with concrete containing pumice aggregate was chosen from the literature. The elastic moduli of the pumice concretes given in the reference article were predicted by using 10 empirical and 10 composite models with the aid of mixture proportions, compressive strengths and unit weights of those pumice concrete series. The performances of mentioned empirical and composite models for predicting the elastic moduli of pumice aggregate concretes were evaluated by comparing the predicted elastic moduli with the experimental elastic moduli reported in the reference paper. It was tried to determine the most appropriate model for the prediction of elastic moduli of pumice aggregate concretes. The error percentages between predicted elastic moduli and the experimental elastic moduli were discussed, and a general evaluation about the moduli of elasticity of pumice aggregate concrete was reported.

Keywords: Composite models, empirical models, modulus of elasticity, pumice aggregate concretes

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 372 291 15 41; e-mail/e-posta: tbilir@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Betonun şekil değiştirme davranışının belirlenmesinde elastisite modülü önemli parametrelerden biridir [1]. Toumi ve ark. [2], eski beton onarımında, düşük elastik modülüne sahip ince bağlanmış bindirme malzemesi olarak lif içeren çimento esaslı harçların etkilerini incelemişlerdir. Zhou ve ark. [3], farklı iri agrega türlerinin yüksek performanslı betonun elastisite modülüne etkisini araştırmışlardır. Ramesh ve ark. [4], harcın veya betonun elastisite modüllerine çimento hamuru-agrega arayüz bölgesinin, faz elastik modüllerinin ve hacim oranlarının etkilerini çalışlardır. Boulay ve ark. [5], erken yaşlardan itibaren betonun elastisite modülünü, basınç ve çekme dayanımlarını otomatik olarak gözlemlemek için bir yöntem ve cihaz geliştirmişlerdir. Simeonov ve Ahmad [6], betonun elastik davranışına arayüz bölgesinin etkisini rapor etmişlerdir. Aynı zamanda, düşük elastisite modülü değerlerinin çatlak hassasiyetini azaltabildiği de literatürde bildirilmiştir [7-10]. Yukarıdaki kaynaklar ışığında, beton bilimi açısından çimento hamuru, harç ve betonun, elastik davranışları ile elastisite modüllerinin araştırılmasının gerekli olduğu söylenebilir.

Ek olarak, harç veya betonun elastisite modüllerinin çeşitli modellerle tahmin edilmesi araştırmacıların dikkatini yoğun olarak çekmektedir. Bu açıdan, baraj betonu, lastikli beton, farklı agrega ve çimento tipleri içeren geleneksel beton, cürufu beton, taşıyıcı hafif beton vb. birçok beton türü için literatürde bazı numerik ve kompozit malzeme modellerinin geliştirildiği görülmektedir [1, 11-18]. Farklı çimento, harç ve beton kompozitlerinin elastisite modüllerinin tahmini için çok sayıda çalışma da rapor edilmiştir. Örneğin Lee ve ark. [19], betonun elastisite modülünün sıcaklık bağımlılığını ve ısı değişimini, beton seviyesi, harç seviyesi ve çimento hamuru seviyesi olmak üzere üç farklı ölçekte incelenebilmesi için bir multi ölçekli kemo-mekanik model geliştirmişlerdir. Model sonuçları literatürdeki veriler ve bu çalışmada yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yüksek sıcaklıklarda betonun elastisite modülünün bu modelle tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bununla beraber, Demir [20], normal ve yüksek dayanımlı betonların elastisite modüllerinin tahmini için bulanık mantığa dayalı bir model önermiştir. Önerilen modelde basınç dayanımları kullanılmış ve araştırmacı tarafından bu bulanık modelin normal ve yüksek dayanımlı betonların elastisite modülünün tahmininde performansının iyi olduğu söylenmiştir. Zhao ve ark. [21], silis dumanı içeren ve içermeyen 600°C sıcaklığa kadar ısıtılmış çimento hamurlarının elastisite modüllerinin tahminleri ve değerlendirilmeleri için iki kompozit küre modeli ve iki aşamalı yaklaşım (ısı bozulma ve mikro çatlak etkileri) önermişlerdir. Lee ve Park [22], üç boyutlu karmaşık arayüz geçiş bölgesine sahip betonun elastisite modülünü incelemek için süreksizliği dikkate alan sonlu eleman ile üç fazlı kompozit model içeren bir nümerik model geliştirmişlerdir.

Bu çalışmalara ek olarak, Guan ve ark. [23], çekme yüklemesine maruz kalan lif takviyeli betonun mekanik özelliklerinin tahmini için bir stokastik multi ölçekli hesaplama modeli geliştirmişlerdir. Bu model mikro ölçek, mezo ölçek ve makro ölçek aşamalarını içermektedir. Önceki çalışmalara benzer şekilde, bu modelin nümerik sonuçları çalışmada yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, önerilen stokastik multi ölçekli hesaplama yönteminin, lif takviyeli betonların mekanik özelliklerinin tahmininde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Li ve ark. [24], tarafından da betonun etkili Young Modülüne maksimum agrega tane büyüklüğünün ve agrega gradasyonunun nicel etkisini araştırmak için başka bir iki adımlı analitik yöntem önerilmektedir. Benzer şekilde, tahmin sonuçları yine literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve her bir basit eleman için ikinci adımda eş şekil değiştirme kabul edildiğinde, sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada ise, palmiye kabuğunun ince agregada yer değiştirilmesi ile üretilen betonların elastisite modüllerinin tahmini incelenmiştir. CEB/FIP (Avrupa Beton Komitesi/İtalyan Beton Komitesi) koduna dayalı önerilen modelin bu betonların elastisite modülünü tahmin etmede uygun olduğu rapor edilmiştir [25]. Bir başka çalışmada, arayüz, agrega tipi ve çimento hamurunun özelliklerine bağlı olarak elastisite modülünün tahmini için bir diferansiyel efektif medyum teorisi uygulanmıştır. Benzer şekilde, bu modelin de çok farklı beton türleri için uygun sonuçlar verdiği görülmüştür [26]. Bir başka makalede, hidrasyon sırasında betonun elastik özelliklerinin değişimi gözlenmiştir [27]. Bu makalede, homojenleştirme teorisi kullanılmıştır. Tahmin sonuçlarının, literatürden ulaşılabilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, ilerleyen yaşlardaki etkili elastisite modüllerinin tahmininde, hidrasyon sırasında ve hidrasyon sonunda mükemmel olduğu rapor edilmiştir [27].

Bu çalışmaların yanında, Craeye ve ark. [28] tarafından kendiliğinden yerleşen betonun elastisite modülleri ile çekme dayanımları incelenmiştir. Literatürdeki 250 adetten fazla makaleden sonuçlar toplanmıştır. Bu literatür sonuçları, Eurocode 2 ile Model Kodu (MC 90 ve/veya MC 2010) olarak belirtilen şartnamelerden elde edilen mevcut modellerin sonuçları ve yazarların makalede geliştirdikleri kendi modellerinin tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bir başka çalışmada, normal ve yüksek dayanımlı betonların tanjant elastik modülleri için yeni tahmin denklemlerinin geliştirilmesini içeren bir inovatif multi anlatım programlaması geliştirilmiştir. Bu yöntem daha önceki birçok çalışma ve şartname gibi beton basınç dayanımını kullanmıştır ve önerilen model önceki modellere göre daha verimli ve hassas çıkmıştır [29]. Bunlarla beraber, geleneksel beton için nümerik istatistiksel bir yöntem kullanan üç fazlı homojen kompozit malzeme incelemeleri ve analizlerine de literatürde rastlanmaktadır [30]. Behnood ve ark. [31] geri dönüştürülmüş agregalı betonların elastisite modülü tahmini için

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

M5 model ağacı algoritmalarını kullanan bir model önermiştir. Bir başka yazıda, suya doygun olmayan betonların elastisite modülü ve poisson oranı gibi bazı elastik özelliklerinin tahmini için bir başka model önerilmektedir [32].

Yukarıdaki çalışmalara ek olarak, literatürde, normal ve yüksek dayanımlı betonlar, düşük dayanımlı harçlar, geri dönüştürülmüş agregalı betonlar, kalsiyum hidroksit (kireç) vb. birçok beton türlerinin elastisite modüllerinin tahmininde; yapay sinir ağları, destek vektör makinesi, adaptif nöro-bulanık sistemler, optimal non-lineer regresyon modelleri, mikromekanik modelleme teorileri, bulanık mantık gibi birçok yöntemin kullanıldığı çok sayıda çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir [33-39]. Bu modellerin performansları genellikle oldukça iyidir ve bu türde betonların elastisite modüllerinin tahmininde kullanılabilirlerdir. Ayrıca, bu durum deney yapmadan bu türdeki betonların elastisite modüllerinin belirlenmesinde katkı sağlamaktadırlar. Bunun yanında, bu modeller farklı türdeki betonların elastik davranışının incelenmesini, araştırılmasını ve değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadırlar. Bu yolla, farklı yaklaşımlara sahip yeni elastik modülü tahmin modellerinin geliştirilmeye devam edileceği değerlendirilmektedir. Bununla beraber, gelecek yıllarda bu tür modellerin geliştirilmesinin yaygınlaşacağı da düşünülmektedir.

Öte yandan, pomza veya işlenmiş pomza agregası içeren çok farklı türdeki betonların fiziksel, mekanik, elastik, şekil değiştirme, kıvam, kendiliğinden yerleşme, vb. taze ve sertleşmiş beton özellikleriyle ilgili literatürde, yeterli sayıda çalışmanın olduğu da görülmüştür [40-53]. Bu nedenle, pomza agregalı betonların özelliklerini genel olarak araştırmacılar tarafından iyi bilindiği de söylenebilir. Pomza agregalı betonlarda elastisite modülünün deneysel olarak bulunduğu çalışmaya literatürde kısıtlı sayıda ulaşılabilmektedir. Benzer şekilde bu tür betonların elastisite modülünün tahmininde kullanılan mevcut ampirik, kompozit veya modern bilimsel modellerin performanslarının değerlendirildiği çalışmaya da rastlanılamamaktadır. Bununla beraber, pomza agregalı betonların elastisite modülünün tahmini için model geliştirme çalışmalarının da yeterli sayı da olmadığı söylenebilir. Bu açıdan, pomza agregaların elastisite modüllerinin tahmininde mevcut ampirik ve kompozit modellerin tahmin yetenek ve güçlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bu modelleme çalışmasında, literatürden alınan pomza agregalı bir grup betonun özellikleri pomza agregalı beton elastisite modülünün tahmininde kullanılmıştır. Bu beton serilerinin basınç dayanımları ve yoğunlukları, literatürdeki bazı çalışma ve şartnamelerden alınan ampirik elastisite modülü tahmin modellerinde girdi ve parametre olarak değerlendirilmiştir. Bununla beraber, karışım oranları ve fazların tahmini elastisite modülleri kompozit modellerde parametre olarak ele alınarak yine bu betonların elastisite modüllerinin tahmini yapılmıştır. Bu şekilde, 10 farklı ampirik model ve 10 farklı kompozit modelden elde edilen tahmin sonuçları, aynı çalışmada yer alan pomza agregalı betonların [54] deneysel elastisite modülleri ile karşılaştırılmıştır. Bu açıdan, çalışmanın amacı farklı ampirik ve kompozit modellerin pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahminindeki performanslarının incelenmesidir. Son olarak, 20 farklı modelin deneysel elastisite modülüne göre hata oranları hesaplanarak performansları tartışılmış ve uygun tahmin verebilen modeller sunulmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Literatürdeki çalışmadan alınan pomza agregalı betonların karışım oranları Tablo 1’de, bu betonların elastisite modülleri ve poisson oranları ise Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 1’de NC normal betonu, IKP Isparta Karakaya pomza agregalı betonu, IGP Isparta Gelincik pomza agregalı betonu, KP Kayseri pomza agregalı beton ve NP ise Nevşehir pomza agregalı betonu ifade etmektedir. Buradan, söz konusu referans literatür çalışmasında [54] farklı yörelere ait ve farklı özelliklerdeki pomza agregaları kullanılarak beton serilerinin üretildiği anlaşılmaktadır. Böylece, üretilen beton serilerinin deneysel özellikleri de farklı olarak elde edilmiştir. Bununla beraber, çalışmada farklı granülometrilere sahip iki ayrı grup beton üretimi yapıldığı görülmüştür. Bu granülometri grupları I ve II simgeleri kullanılarak gösterilmiştir. I simgesi ile belirtilen grup % 40 oranında 0-4 mm ince agrega içerirken % 60 oranında 4-8 mm iri agrega içermektedir. II simgesi ile üretilen pomza agregalı beton serileri ise % 60 oranında 0-4 mm ince agrega ve % 40 oranında 4-8 mm iri agrega içermektedir. Bu şekilde çok sayıda pomza agregalı beton serisi üretilmiştir. Ayrıca, bu çalışmadan bazı seriler model performanslarının değerlendirilmesinde dikkate alınmamıştır. Çünkü 8 adet beton serisinin ampirik ve kompozit modellerin performanslarının incelenmesinde yeterli olacağı düşünülmüştür. Böylece NC I, IGP I, KP I, NP I, NC II, IGP II, KP II ve NP II olarak adlandırılan serilerin özellikleri kullanılarak elastisite modülü tahminleri ampirik ve kompozit modellerle yapılmıştır. Aynı serilerin Tablo 2’de gösterilen deneysel elastisite modülleri ile modellerden tahmin edilen elastisite modüllerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Granülometrik eğriler, agregaların fiziksel özellikleri vb. gerekli özellikler Davraz ve ark. [54] tarafından yapılan makale çalışmasında yer almaktadır.

Tablo 1. Pomza agregalı beton serilerinin karışım oranları (kg/m³) [54]

Beton Kodu	Çimento	Su	Süper Akışkanlaştırıcı	İri Agregata	İnce Agregata	Betonun Yoğunluğu (kg/m ³)
NC I	400	160	8	1058	746	2,372
IGP I	400	160	8	273	352	1,194
KP I	400	160	8	291	234	1,093
NP I	400	160	8	352	343	1,263
NC II	400	160	8	705	1118	2,392
IGP II	400	160	8	182	529	1,279
KP II	400	160	8	194	351	1,113
NP II	400	160	8	234	514	1,317

Tablo 2. Elastisite modülleri ve poisson oranları [54]

Beton Kodu	NC I	IGP I	KP I	NP I	NC II	IGP II	KP II	NP II
E _c (GPa)	23,25	4,45	4,14	2,29	25,64	7,87	5,01	7,03
ν _c	0,20	0,23	0,24	0,21	0,18	0,22	0,23	0,20

Eşitlikler (1-11), pomza agregalı beton serilerinin elastisite modüllerinin tahmini için literatürden ve bazı şartnamelerden elde edilen ampirik modellerin denklemleridir [14, 17, 55]. Modellerin yer aldığı çalışmalar (modelleri geliştirenler) ve şartnameler (şartnameyi sunan kuruluşlar) denklemlerin yanında parantez içinde belirtilmektedir. Burada, f₂₈ 28 günlük basınç dayanımını, E_{c28} veya E_c betonun 28 günlük veya ilgili beton yaşındaki beton elastisite modülünü ve f_c' standart silindirik numune beton basınç dayanımını ifade etmektedir. w_c ise betonun birim hacim ağırlığıdır. Ancak Davraz ve ark. [54] tarafından yapılan çalışmada betonun yoğunluğu verilmiştir ve beton birim hacim ağırlıkları belirli olmadığı için bir yaklaşım olarak bu yoğunluk değerleri, Denklem 1, 4 ve 8 modellerinde elastisite modülünün tahmini için birim hacim ağırlık değeri yerine kullanılmıştır. Ayrıca, normal betonun yoğunluğu olarak belirtilen değerlerin normal betonun yaklaşık birim hacim ağırlığı olan 2400 kg/m³ değerine yakın olduğu da söylenebilir. Bir yaklaşım olarak, yoğunluk değerleri birim hacim değerleri olarak ele alınıp ampirik modellerde tahmin yapılmaya çalışılmıştır. Söz konusu çalışmadan çıkarılan beton basınç dayanımları ve beton yoğunlukları Tablo 3'de sunulmuştur.

$$E_c = 0,043w_c^{1,5} \sqrt{f_c'} \quad \text{için } 2,5 \leq f_c' \leq 40 \text{ (MPa)} \quad \text{(ACI 318)} \quad (1)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad \text{(ACI 318M-95)} \quad (2)$$

$$E_c = 4500 \sqrt{f_c'} \quad \text{(CSA A23.3)} \quad (3)$$

$$E_c = 9500 f_c'^{0,3} (w/2400)^{1,5} \quad \text{(Norwegian Code)} \quad (4)$$

$$E_c = (3320 \sqrt{f_c'} + 6900) (w/2346)^{1,5} \quad \text{için } 21 \leq f_c' \leq 83 \text{ (MPa)} \quad \text{(ACI 363 ve Martinez)} \quad (5)$$

$$E_c = 1000 (f_c' + 8)^{0,33} \quad \text{(CEB)} \quad (6)$$

$$E_c = 3000 f_c'^{0,67} \quad \text{için } f_c' \leq 27 \text{ (MPa)} \quad \text{(Gardner ve Zhao I)} \quad (7)$$

$$E_c = 9000 f_c'^{0,33} \quad \text{için } f_c' \geq 27 \text{ (MPa)} \quad \text{(Gardner ve Zhao II)} \quad (8)$$

$$E_c = (3300 \sqrt{f_c'} + 6900) (w/2300)^{1,5} \quad \text{(CSA)} \quad (9)$$

$$E_{c28} = (3250 \sqrt{f_{c28}} + 14000) \text{ (MPa)} \quad \text{(TS500)} \quad (10)$$

$$E_c = 22000 (f_c' / 10)^{0,33} \text{ (MPa)} \quad \text{(CEB-FIP)} \quad (11)$$

$$E_c = 3191 (f_c' / 1,45)^{0,33} \text{ (MPa)} \quad \text{(Eurocode2)} \quad (12)$$

ACI kısaltması American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü), CSA kısaltması Canadian Concrete Code (Kanada Beton Kodu), CEB kısaltması Comité Euro-International du Béton (Euro Uluslararası Beton Komitesi), FIP ise Fédération Internationale de la Précontrainte anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle, bu kısaltmalar modellerin yer aldığı şartnamelerin geliştirildiği kuruluşları ifade etmektedir. Son olarak, TS Türk Standardının kısaltmasıdır. Ayrıca, Denklem 1-3'de belirtilen modellerinin yüksek dayanımlı beton için kullanılamayacağı sadece normal dayanımlı betonlar için kullanılacağı da belirtilmelidir [14]. Denklem 4-8'de belirtilen modeller ise sadece yüksek dayanımlı betonlar için kullanılırken [14], Denklem 9-11'de belirtilen modeller hem yüksek dayanımlı ve hem de normal dayanımlı betonlar için kullanılabilir [17, 55]. Bunun yanında, Denklem 5 ve 8'de belirtilen modellerin birbirine benzer olduğu ve tahmin sonuçlarının da birbirine

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

çok yakın çıkabileceği anlaşılmaktadır. Ek olarak, Denklem 5 modeli, 21 ile 83 MPa arasındaki basınç dayanımı değerleri için geçerlidir. Bunun dışındaki basınç dayanımına sahip betonlar için geçerli değildir. Tablo 3’deki basınç dayanımı sonuçları göz önüne alındığında bu modelin pomza agregalı betonların elastisite modülünün ampirik olarak tahmininde kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Denklem 8 modeli için ise hiçbir basınç dayanımı sınır değeri kullanılmamaktadır. Denklem 7 modeli için de benzer bir yargı yapılabilir. 27 MPa altındaki ve üstündeki değerler için farklı formülasyonlar kullanılmıştır. Sonuç olarak, Denklem 7 iki adet model içermektedir. Bu iki model Gardner ve Zhao I ve Gardner ve Zhao II modelleri olarak anılmaktadır. Dolayısıyla basınç dayanımı değerleri 27 MPa’ın altında olduğu için Denklem 7 olarak iki modelden Gardner ve Zhao I olarak adlandırılan model Denklem 7 modelini temsilen seçilmiştir. Son olarak, pomza agregalı beton için Tablo 3’deki değerlere göre kullanılan ampirik modeller seçilmiştir. Bu şekilde 10 adet ampirik model, pomza agregalı betonun elastisite modülü tahminleri için kullanılmıştır.

Tablo 3. Referans olarak alınan pomza agregalı betonların basınç dayanımları ve yoğunlukları [54]

Beton Kodu	f _{c28} küp (MPa)	f _{c28} silindir (MPa)	Beton Yoğunluğu (kg/m ³)
NC I	20,50	16,40	2371,45
IGP I	11,00	8,80	1193,49
KP I	8,00	6,40	1093,35
NP I	6,00	4,80	1263,29
NC II	27,00	21,60	2391,45
IGP II	15,50	12,40	1278,65
KP II	13,00	10,40	1113,33
NP II	15,00	12,00	1317,55

Denklem 12-21 modelleri beton için genel olarak kullanılan tane donatılı ve iki fazlı kompozit malzeme modelleridir [14, 56]. Bu modeller çimento hamuru-agrega arayüz/geçiş bölgesini bir faz olarak değerlendirmez. Sadece matris fazı olarak çimento hamurunu ve tane donatısı olarak da agregaları alır. Böylece, matris ve agregada fazından oluşan iki fazlı kompozit modeller ile beton elastisite modülleri tahmin edilebilir. Bu şekilde, 10 adet ampirik modele ek olarak 10 adet de iki fazlı kompozit model, pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahmininde kullanılmıştır.

$$E_{cVoigt} = E_m V_m + E_a V_a \quad (\text{Voigt Modeli}) \quad (12)$$

$$\frac{1}{E_{cReuss}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_a}{E_a} \quad (\text{Reuss Modeli}) \quad (13)$$

$$\frac{1}{E_{cHirsch}} = 0,5 \left(\frac{1}{E_{cVoigt}} + \frac{1}{E_{cReuss}} \right) \quad (\text{Hirsch-Dougill Modeli}) \quad (14)$$

$$E_{cPopovics} = 0,5(E_{cVoigt} + E_{cReuss}) \quad (\text{Popovics Modeli}) \quad (15)$$

$$\frac{1}{E_{cCounto}} = \frac{1 - \sqrt{V_a}}{E_m} + \left(\frac{1 - \sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}} E_m + E_a \right)^{-1} \quad (\text{Counto Modeli}) \quad (16)$$

$$E_{cHashin} = \left[\frac{(E_m + E_a) + (E_a - E_m)V_a}{(E_m + E_a) - (E_a - E_m)V_a} \right] E_m \quad (\text{Hashin Modeli}) \quad (17)$$

$$E_{cBache} = E_m^{V_m} E_a^{V_a} \quad (\text{Bache ve Nepper-Christensen Modeli}) \quad (18)$$

T. BİLİR

$$E_{cMehmel - Kern} = \frac{\sqrt[3]{V_a^2}}{\frac{\sqrt[3]{V_a}}{E_a} + \frac{1 - \sqrt[3]{V_a}}{E_m}} + E_m (1 - \sqrt[3]{V_a^2}) \quad (\text{Mehmel-Kern Modeli}) \quad (19)$$

$$E_{cIllston} = \left[\frac{1 - \sqrt[3]{V_a}}{E_m} + \frac{\sqrt[3]{V_a}}{E_a \sqrt[3]{V_a^2} + E_m (1 - \sqrt[3]{V_a^2})} \right]^{-1} \quad (\text{Illston Modeli}) \quad (20)$$

$$E_{cMaxwell} = \frac{2 E_m + E_a - 2 V_a (E_m - E_a)}{2 E_m + E_a + V_a (E_m - E_a)} E_m \quad (\text{Maxwell Modeli}) \quad (21)$$

Burada; E_m çimento matris fazının elastisite modülü, E_a ise agrega fazının elastisite modülü, V_m çimento matrisinin ve V_a ise agrega fazının hacim fraksiyonlarıdır. Örnek olarak, E_{cReuss} Reuss kompozit modelinin kullanılmasıyla tahmin edilen beton elastisite modülünü ifade etmektedir. Referans alınan literatür çalışmasında iri agrega olarak kireçtaşı kökenli kırma taş kullanıldığı belirtilmiştir. Bu agrega türünün deneysel elastisite modülü söz konusu yazıda [54] belirtilmediği için literatürdeki diğer çalışmalar incelenerek kireçtaşının elastisite modülü hakkında fikir edinilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle, kireçtaşı agrega fazının elastisite modülü Mostofinejad ve Nozhati [14] tarafından yapılan çalışmada belirtildiği gibi 42,7 GPa olarak seçilmiştir. Davraz ve ark. [54] çalışmalarındaki kireçtaşının türü veya elastisite modülü farklı olabilir ancak bir yaklaşım geliştirmek için literatürden 42,7 GPa seçilerek kompozit modellerde kullanılmıştır. Tablo 4’te çalışmadaki karışım oranlarından hesaplanan çimento matrisi ve agrega fazı hacim fraksiyonları verilmiştir. Tüm karışımlarda farklı malzemeler kullanılmasına rağmen Matris ve Agrega Fazı toplam hacimleri sabit tutulduğu için hacim fraksiyonları da tüm karışımlarda aynıdır.

Tablo 4. Normal ve pomza agregalı betonların hacim fraksiyonları

Beton Kodu	Matris Hacim Fraksiyonları (V_m)	Agrega Fazı Hacim Fraksiyonları (V_a)	Toplam
NC I	0,32	0,68	1
IGP I	0,32	0,68	1
KP I	0,32	0,68	1
NP I	0,32	0,68	1
NC II	0,32	0,68	1
IGP II	0,32	0,68	1
KP II	0,32	0,68	1
NP II	0,32	0,68	1

Öte yandan, deneysel olarak elde edilmediği için agrega ve matrisi fazı için seçilen ve kabul edilen elastisite modülü değerlerinin kompozit modellerin performansını etkileyeceği görünen bir durumdur. Tüm serilerin hacim fraksiyonları ve kullanılan çimento tipi aynıdır. Dolayısıyla, deneysel ve kompozit modellerle tahmin edilen elastisite modüllerinin de yöreye göre farklılaşan pomza türlerine göre değişeceği buradan anlaşılmaktadır. Ampirik modeller, elastisite modülü tahmininde çoğunlukla basınç dayanımı olmak üzere dayanım ve birim hacim ağırlık değerlerini kullanmaktadır. Bu yüzden, hem ampirik hem de kompozit modellerin tahmin sonuçları kullanılan farklı pomza türlerinden (özelliklerinden) ve miktarlarından etkilenecektir. Her ne kadar hacimler aynı olsa da, I ve II gruplarının granülometrinin de farklı olması deneysel elastisite modüllerini etkilediği gibi tahmin sonuçlarını da etkilemektedir. Sonuç olarak, referans makalede [54], hem agrega türleri hem de agrega miktarları her beton serisinde birbirinden farklıdır ve bunun tahmin sonuçlarına etkisi olacaktır. Bununla beraber çimento matrisinin de deneysel elastisite modülü belli değildir. Ancak kullanılan çimento tipinin elastisite modülünün, literatürdeki çalışmaların rapor ettiği değerler de dikkate alınarak, 20 ve 25 GPa arasında değiştiği söylenebilir [1, 12, 13]. Referans çalışmadaki [54], pomza agregalı betonların deneysel elastisite modülleri düşünüldüğünde çimento matris fazının elastisite modülü 20 GPa seçilerek kompozit modellerde kullanılmıştır. Böylece çimento matrisinin elastisite modülünün tahmin yapılabilmesi için kullanılması sağlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmadaki ampirik ve kompozit modellerin

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

performansları sadece bu yapılan kabuller için geçerli olmaktadır. Ancak kompozit modeller için pomza agregalı veya normal beton serilerinin herhangi bir fazının deneysel elastisite modülleri bilinmediği için böyle kabul ve yaklaşımlar ile pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahmininin yapılabilmesi için kaçınılmaz olmaktadır. Buna benzer yaklaşımlar literatürde de yer almaktadır [16]. Öte yandan, literatürde pomza agregasının deneysel elastisite modülü ile ilgili bir çalışmaya rastlanamamıştır. Pomzaların deneysel olarak elastisite modülünün bulunmasının zor olduğu ve elastisite modülünün çok düşük bir değer olabileceği de görülmektedir. Bu nedenle, 2 GPa civarında alınırsa model performansları açısından bir fikir verebileceği düşünülmüştür. Ancak farklı pomzalar için aynı değerde agrega fazı elastisite modülü kabulü yapılmasına ve hacim fraksiyonları aynı olmasına rağmen, tahmin sonuçlarının pomza türünden etkileneceği ve farklı tahmin sonuçları elde edilebileceği öngörülmüştür. Pomza agregalarının elastisite modülünün aynı olamayabileceği durumunun, kompozit model sonuçları değerlendirilirken dikkate alınması gerektiği kanısına varılmıştır.

Sonuçta bu şekilde kabul ve yaklaşımlarla pomza agregalı hafif betonların, sadece deneysel basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıklarının belirlenmiş olduğu durumlardaki elastisite modüllerinin tahmininde, toplam 20 adet ampirik ve kompozit model kullanılarak bu modellerin performansları değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bunun için elastisite modülü tahminleri bu 20 adet modelle yapılmış ve Davraz ve ark. [54] referans çalışmasında yer alan ve Tablo 2’de de verilen deneysel elastisite modülleri ile karşılaştırılarak hata oranları yüzdesel olarak bulunmuştur. Deneysel elastisite modüllerine en yakın tahmin sonuçlarını veren (yaklaşık % 10 hata oranının altında hata veren modellerin seçilmesi gerektiği düşünülmüştür) ampirik ve kompozit modellerin belirlenmesine çalışılmıştır. Deneysel elastisite modülleriyle modeller arasındaki hata oranları, tahmin sonuçlarını etkileyen nedenler ve mekanizmalar tartışılarak pomza agregalı hafif betonların tahmininde kullanılabilen en uygun ampirik ve kompozit modellerin her bir beton türü için sunulması amaçlanmıştır. Bir başka deyişle, model performansları irdelenerek her bir pomza betonunun elastisite modülü tahmini için en uygun performansa sahip her bir model ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

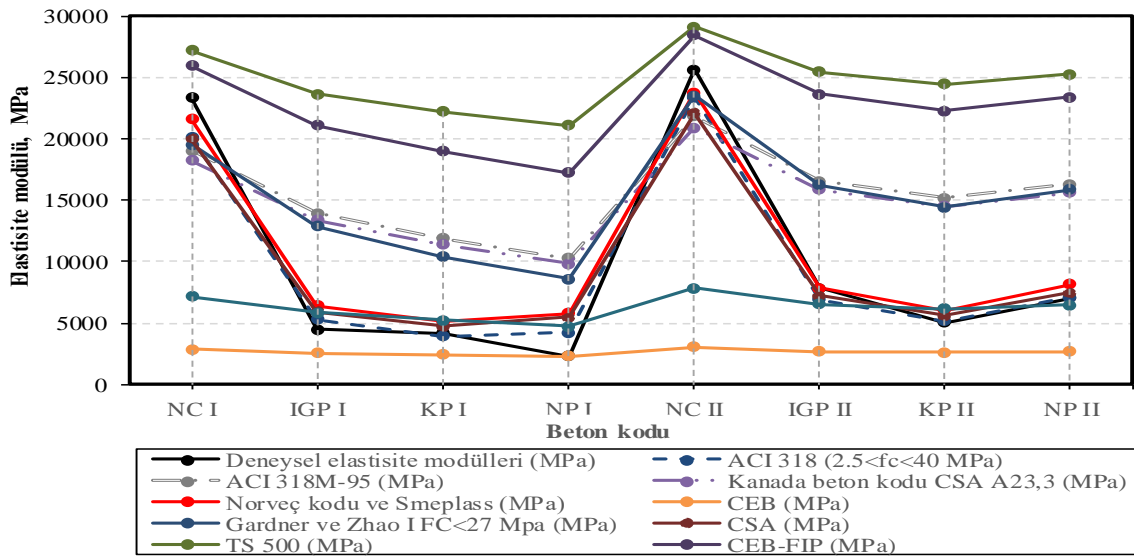
Şekil 1’de ampirik modellerin elastisite modülü tahmin sonuçları ile deneysel elastisite modülleri sunulmaktadır. Tablo 5’de ampirik modellerin hata oranları verilmiş ve % 10 hata oranı siyah, % 10-20 arasında değişen hata oranları kırmızı ve % 20-25 arasında değişen hata oranları ise mavi ile boyanarak sunulmuştur. Böylece model performansları daha açık olarak ortaya konulmuştur. Şekiller aracılığıyla görsel karşılaştırma yapılabilmektedir. Ampirik modellerin tahminlerine bakıldığında CEB ve Eurocode modelleri hariç normal beton NC I ve NC II serilerinde deneysel elastisite modülüne yakın değer tahmin edildiği görülmüştür. Buna karşın, deneysel elastisite modülü ile tahmin edilen değerlerin arasında % 8-25 hata oranları elde edilmektedir. CEB ve Eurocode modelleri için ise hata oranları % 70-80 olarak gerçekleşmiştir. Ampirik modellerde ACI 318, Norwegian Code ve CSA modellerinde birim ağırlık yerine yoğunluklar da kullanılmasına rağmen diğer modellere göre daha hassas sonuçlar verdiği söylenemez. Tüm ampirik modeller yine deneysel elastisite modüllerine bir miktar yakın değerler elde edilmesine rağmen % 5-800 arasında değişen hatalar vermektedir. Bir başka deyişle, bazı modeller bazı seriler için yaklaşık değerler verirken bazı seriler için çok yüksek hata oranlarına neden olmaktadır. Bu yüzden model tahminlerinde değerlendirilebilecek sistematik bir değişim elde edilemediği görülmüştür. Bununla beraber, normal dayanımlı betonlar için geçerli olan TS 500 modeli, NC I ve NC II normal beton serilerinde bile ortalama % 15 civarında hata oranlarıyla tahmin yapabilmektedir. Ayrıca, Şekil 2’de hata oranı % 10 olan tahminlerin kabul edilebilir olduğu düşünülürse hangi modellerin bu hata oranında sonuçlar verdiği görmek için Şekil 1’de deneysel elastisite modülü grafiğine hata çubukları eklenmiştir. TS 500 modelinin bazı sonuçlarının % 10 hata oranına yakın olmalarına rağmen bu değer altında da değildir. Bununla beraber, TS 500 modelinin pomza agregalı hafif betonlar için uygulanamayacağı çok açıktır. ACI 318 M95, Canadian Concrete Code CSA A23.3, CEB, Gardner ve Zhao I ve CEB-FIP modellerinde de benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Normal beton için % 10’un üstünde olmasına rağmen daha yakın sonuçlar verirken pomza agregalı betonlar için % 100 değerinin üzerinde hata oranları elde edilmektedir. Bu modellerin de TS 500 gibi ancak normal veya yüksek dayanımlı betonlar için kullanılabildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ampirik formüller verilirken yöntem kısmında belirtilmiştir. Ampirik formüller belirli dayanımlara sahip betonlar için geçerlidir ancak dayanım değerleri uygun görünse de pomza agregalı beton bir çeşit hafif beton olduğu için bu tür betonlara özel ampirik formüllerin geliştirilmesi kaçınılmazdır. Ancak birim hacim ağırlığının kullanıldığı beton serilerinde bile düzenli ve yakın tahmin sonuçları elde edilememektedir. Bununla beraber ilginç bir şekilde CEB modeli sadece NP I betonu için % 1,28 oranında hata ile çok yakın bir tahmin yapmaktadır. Buna karşın NP I serisi için diğer model tahminlerinin de kendi içinde diğer seri sonuçlarıyla karşılaştırıldığında yüksek hata oranları ve uyumsuz tahmin sonuçları verebildiği görülmektedir. Örneğin, NP II serisi benzer bir seri olup sadece garnülometrileri farklı olduğu halde CEB modeli bu seri için uygun tahmin yapmamaktadır. Benzer şekilde,

T. BİLİR

CSA, Eurocode ve Norwegian modelleri ise II numaralı granülometriye sahip pomza agregalı serilerde daha iyi sonuçlar vermektedir. Bütün modellerin içinde ACI 318 modeli NP I serisi hariç daha yakın tahminler yapabilmektedir. Ancak bu yorumlar sadece, hata oranlarının % 25 in altında olduğu durumlar için geçerlidir. Buradan, bu deneysel çalışmada I numaralı granülometriye Nevşehir pomzası agregasının tüm ampirik modelleri tahmininde daha yüksek hata oranları vermesi nedeniyle özel bir seri olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Betonun içerdiği pomza agregası ve normal agrega türünün, granülometrisinin ve dolayısıyla beton basınç dayanımı ile yoğunluğunun etkisi ortaya çıkmıştır. Ancak bu ampirik modeller normal ve yüksek dayanımlı betonlar için geçerlidir buna karşın normal beton serileri NC I ve NC II için bile nispeten daha iyi performans gösterebilirler de % 10'un altında hata oranları elde edilememektedir. Ayrıca hata oranlarına bakıldığında, modellerin beton seri tipine göre % 25, % 20 veya % 10'un altında hata oranı göstermesi, yani modellerin performanslarının beton serilerinin özelliklerine göre değişimi tam olarak açıklanamamaktadır. Bir başka deyişle, ampirik modellerin beton serilerinin hangi özelliklerinden etkilendiği ve tahmin performansı ile ilgili mekanizma bu sonuçlarla tam olarak ortaya konulamamaktadır. Bununla beraber, ACI 318 modeli KP I, NC II, KP II ve NP II serileri için, Norwegian Code modeli NC I, NC II ve IGP II serileri için, CEB modeli NP I için, Gardner ve Zhao I sadece NC II serisi için, CSA modeli IGP II ve NP II serileri için ve Eurocode modeli sadece NP II serisi için % 10 hata oranının altında hata oranlarıyla, deneysel elastisite modüllerine en yakın tahmin sonuçları vermişlerdir. Çalışma sonucunda, ampirik modellerin pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahminindeki performanslarının ortaya konulduğu düşünülmektedir. Çoğunlukla çok yüksek performanslar elde edilmemesine rağmen, yukarıda verildiği gibi bazı modeller bazı beton serileri için de çok iyi performanslar da gösterebilmişlerdir. Bununla beraber, pomza agregasının türünün ve agrega granülometrisinin tahmin sonuçlarında etkili olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, pomza agregasının granülometrisinin elastisite modüllerine etkisini gösterebilmek için agrega incelik modülünü; agreganın basınç dayanımına ve tahmin sonuçlarına etkisini göstermek için de agreganın birim hacim ağırlığını da içeren yeni ampirik modellerin daha uygun tahminler yapılabileceği de değerlendirilmektedir. Bu tür yeni modellerin geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5. Ampirik modellerin hata oranları (%)

Beton Kodu	ACI 318	ACI 318M-95	Kanada Beton Kodu CSA A23.3	Norveç Kodu ve Smeplass	CEB	Gardner ve Zhao I	CSA	TS 500	CEB-FIP	Eurocode
NC I	-13,88	-18,49	-21,95	-7,51	-87,71	-16,29	-14,59	16,32	11,11	-69,32
IGP I	18,19	213,31	199,98	43,75	-42,98	189,44	32,72	431,26	373,76	30,80
KP I	-5,01	187,20	174,98	23,14	-41,75	151,34	14,71	436,76	357,95	26,43
NP I	84,72	349,66	330,52	153,63	1,28	274,73	139,49	822,29	652,20	107,67
NC II	-8,85	-14,81	-18,43	-7,36	-88,07	-8,32	-13,81	13,51	10,91	-69,38
IGP II	-12,03	110,30	101,35	-0,10	-65,63	105,94	-8,02	223,31	200,32	-17,08
KP II	2,82	202,54	189,66	20,95	-47,81	187,54	11,42	388,64	344,90	22,83
NP II	1,33	131,60	121,74	15,84	-61,77	125,54	6,65	259,29	232,55	-8,19



Şekil 1. Deneysel elastisite modülleri ve ampirik modellerle tahmin edilen elastisite modülleri

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Şekil 2’de ise kompozit modellerin elastisite modülü tahmin sonuçları ile deneysel elastisite modülleri gösterilmiştir. Tüm kompozit modellerde, $E_m = 20$ GPa NC I ve NC II için $E_a = 42,7$ GPa ve pomza agregalı diğer tüm beton serileri için ise $E_a = 2,00$ GPa olarak alınmıştır. Tablo 6’da kompozit modellerin hata oranları verilmiş ve % 10 hata oranı siyah, % 10-20 arasında değişen hata oranları kırmızı ve % 20-25 arasında değişen hata oranları ise mavi ile boyanarak sunulmuştur. Ampirik modellerle karşılaştırıldığında, daha yakın tahmin sonucu yapan yani % 10’un altında hata oranı veren model sayısı daha az olmasına rağmen NP I serisi hariç hata oranları genellikle % 50’nin altında kalmaktadır. Ayrıca % 10-20 arasındaki hata oranları ve % 20-25 arasında hata oranları veren model sayısı da daha azdır. Bu açıdan, ampirik modellere göre yakın tahmin yapan ya da performansı kabul edilebilir model sayısı daha az olmasına rağmen, kompozit modellerin hata oranları ampirik modellerinde oluşanlardan çoğunlukla daha azdır. Voigt modeli IGP II ve NP II serileri için, Hirsch-Dougill modeli IGP I ve KP I serileri için, Popovics modeli KP II serisi için, Bache ve Nepper-Christensen modeli IGP I ve KP I serileri için, Illston modeli NP II serisi için ve Maxwell modeli ise yine NP II serisi için % 10 altında hata oranı vermiştir. Bunun yanında, Hirsch-Dougill modeli KP II, Popovics modeli IGP I, Counto ve Hashin modelleri KP II ve NP II serileri için, Bache and Nepper-Christensen modeli KP II serisi için, Mehmel Kern modeli NP II için Illston ve Maxwell modellerinin ikisi de IGP II serisi için % 10-20 arasında değişen hata oranlarında tahminlerde bulunmuştur. Kompozit modellerin hepsinde hacim fraksiyonları tüm agrega türleri yani serilerin hepsinde aynıdır. Bu durumda, matris fazının elastisite modülü 20 GPa olmak üzere aynı değer alındığı için agreganın elastisite modülü deney tahminlerinde etkili olan parametredir. Bu yüzden her model NC I ve NC II serilerinde diğer pomza serilerden farklı tahminler yapmışlardır. Bunun nedeni normal agreganın elastisite modülünün 42,7 GPa ve farklı olmalarına rağmen pomza agregalarının hepsinin elastisite modüllerinin 2 GPa olarak seçilmesidir. Böylece diğer pomza serilerinin hepsinde elastisite modülü tahmini aynı model için hep aynı değerdir. Bu Şekil 1’den de görülmektedir. Ancak, iki granülometri ve farklı pomza agrega elastisite modülleri nedeniyle deneysel elastisite modülleri değerleri arasında birbirinden farklıdır dolayısıyla pomza serilerinde her bir model aynı değeri tahmin ettiği için deneysel elastisite modülü değerleriyle hata oranları farklılık göstermektedir. Kompozit modellerde de ampirik modellere benzer olarak NP I serisinin tahmin değerleri oldukça farklıdır. Bunun dışında, her bir pomza agregasının elastisite modüllerinin birbirinden farklı olduğu da anlaşılmaktadır. Ayrıca granülometrinin farklı olması da agrega fazının elastisite modülünü değiştirmekte ve betonun elastisite modülünü etkilemektedir. Çimento matris fazının elastisite modülünün 20 GPa ve kireçtaşının elastisite modülü 42,7 GPa olarak kabul edilmesi NC I ve NC II normal betonlarında elde edilen fazla elastisite modüllerini nedenidir. Buradan referans deneysel çalışmada kullanılan kireçtaşının, yine literatürden bulunan ve elastisite modülü 42,7 GPa olan agregadan farklı bir türde kireçtaşı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca agrega fazının yani deneysel çalışmada kullanılan kireçtaşının elastisite modülünün 42,7 GPa değerinden daha düşük değerde olduğu anlaşılmaktadır. II numaralı granülometriye sahip NC II serisinde kompozit modeller NC I’e göre daha yakın tahmin sonuçları vermiştir. Ancak, pomza agregalı serilerdeki farklı tahmin sonuçlarının ve farklı hata oranlarının olması, hem pomza agregalarının elastisite modüllerinin birbirinden farklı olması hem de ortaya çıkan farklı granülometriyle açıklanabilmektedir.

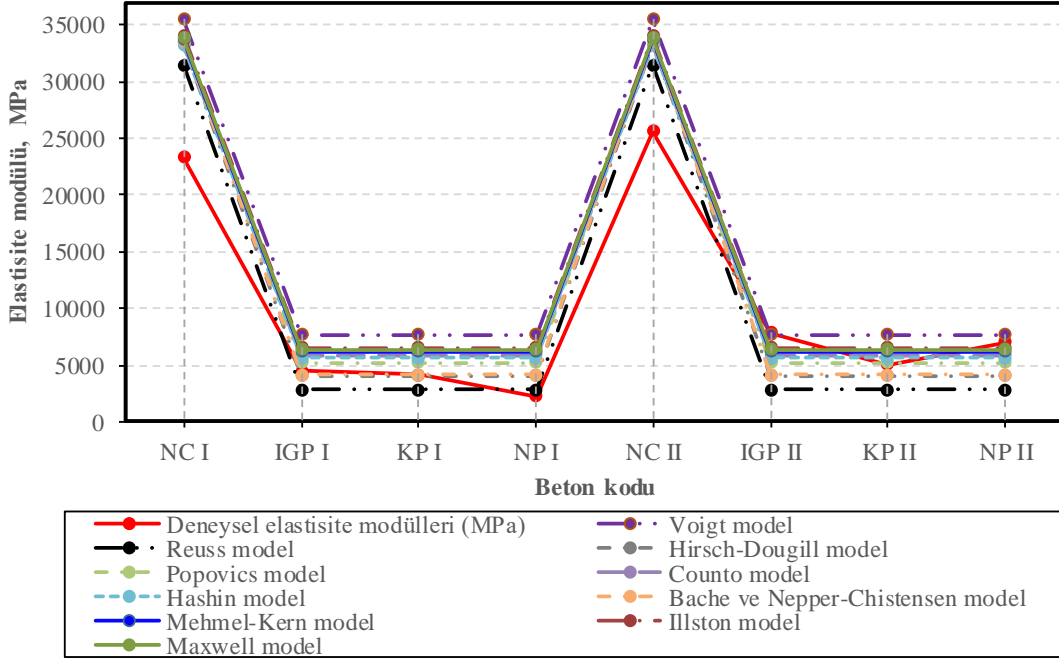
Tablo 6. Kompozit modellerin hata oranları (%).

Beton Kodu	Voigt Model	Reuss Model	Hirsch-Dougill Model	Popovics Model	Counto Model	Hashin Model	Bache ve Nepper-Christensen Model	Mehmel-Kern Model	Illston Model	Maxwell Model
NC I	52,20	34,65	42,89	43,43	42,92	42,09	43,95	44,30	45,90	45,10
IGP I	72,64	-37,22	-7,92	17,71	31,78	26,80	-7,03	39,51	47,58	43,68
KP I	85,55	-32,52	-1,03	26,52	41,63	36,29	-0,07	49,94	58,62	54,43
NP I	235,43	21,99	78,91	128,71	156,04	146,37	80,64	171,05	186,74	179,16
NC II	38,59	22,61	30,12	30,60	30,14	29,39	31,08	31,40	32,85	32,13
IGP II	-2,43	-64,51	-47,95	-33,47	-25,53	-28,34	-47,46	-21,16	-16,60	-18,80
KP II	53,33	-44,24	-18,22	4,54	17,04	12,62	-17,43	23,90	31,07	27,61
NP II	9,34	-60,25	-41,69	-25,45	-16,53	-19,69	-41,12	-11,64	-6,53	-9,00

Buradan, pomza agregasının türünün, dolayısıyla elastisite modülünün, birim hacim ağırlığının, boşluk oranı ve yapısının, basınç dayanımının deneysel elastisite modüllerine etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, hem ampirik hem de kompozit model tahminlerinden de anlaşılmaktadır. Son olarak, bu çalışmadaki ampirik ve kompozit modeller yapılan kabuller için geçerlidir. Ortaya çıkan yeni sonuçlara göre modeller geliştirilmemiştir.

T. BİLİR

Bunun nedeni, çalışmanın amacının mevcut yaklaşımlarla kullanılan ampirik ve kompozit modellerin performanslarının değerlendirilmesidir. Bu bağlamda, çalışmanın amacına ulaştığı söylenebilir.



Şekil 2. Deneysel elastisite modülleri ve kompozit modellerle tahmin edilen elastisite modülleri

Çalışmanın amacı ampirik ve kompozit modellerin pomza agregalı betonların elastisite modülü tahminindeki performanslarını değerlendirmek olmasına rağmen deneysel elastisite modül sonuçlarına etkileyen pomza agregasının özellikleri ve deneysel sonuçların değişimleri ile ilgili de analiz yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında, çalışmanın sonuçlarının ve bu modellerin performanslarının değerlendirilmesinin; pomzalı betonun elastisite modülü ile ilgili, dolayısıyla bu tür betonların şekil değiştirme davranışları ile ilgili fikir verebildiği de ve bilime katkı sağladığı da düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Ampirik ve kompozit modeller farklı pomza agregalı beton serileri için iyi veya kötü performans sergileyebilmektedir. Tartışmada en uygun modeller sunulmuştur.

- Her bir ampirik veya kompozit model yapılan kabuller ve elde edildiği betonun özelliklerine bağlı olarak belirli türde betonlar için çalışabilmektedir. Bu nedenle, pomza agregalı betonlar için basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, karışım oranları gibi özellikler yeterli olmamaktadır. Dolayısıyla, pomza agregalı betonlar için çalışan yeni ampirik veya kompozit modellerin geliştirilmesi gereklidir.

- Pomza agregalı betonların deneysel elastisite modülleri, pomza agregasının elastisite modülünden, granülometrisinden, basınç dayanımından ve birim hacim ağırlığından etkilenmektedir. Bu durum, ampirik ve kompozit modellerin tahminlerinden ve oluşan hata oranlarından da anlaşılmaktadır. Ayrıca granülometrinin değişmesi ile deneysel elastisite modülünün değişmesi; beklendiği üzere betonun elastisite modülünün ve basınç dayanımının betonun boşluk yapısından etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı biçimde agrega yığının granülometrisi de betonun birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı ve elastisite modülünü etkilemektedir.

- Ampirik modeller için betonun birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı yanında, bu parametrelere etkileyen pomza agregasının birim hacim ağırlığı, granülometrisini temsilen incelik modülü, pomza agregasının basınç dayanımı veya elastisite modülü gibi değerlerin de etkisinden göz önüne alındığı yeni modellerin geliştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Bir başka deyişle, pomza agregasının boşluk yapısı ampirik model tahmin sonuçlarına etkisi irdelenebilir. Pomza agregasının deneysel olarak tespit edilemeyen özellikleri, o özellikleri temsil eden ve deneysel olarak tespit edilen başka özellikler aracılığıyla dikkate alınabilir.

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

- Kompozit modeller için agrega ve matris fazlarının elastisite modülün deneysel olarak belirlenmesinin önemli bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Ancak elastisite modülü deneysel olarak belirlenemeyen agrega ya da matris türleri için bu malzemelerin elastisite modüllerinin dolaylı olarak bulunmasını sağlayacak matematiksel modellerin geliştirilmesi de gereklidir.

- Bunlara ek olarak kullanılan deneysel elastisite modülü değerlerinin sayısı modellerin performanslarının değerlendirilmesi yeterli olmayabilir. Ancak, pomza agregalı betonların deneysel sonuçlarının yer aldığı çalışmalara literatürde rastlanmadığı da eklenmelidir.

- Model performanslarının değerlendirilmesi, sadece her bir pomza agregalı beton türü için en uygun tahmin modelinin belirlenmesinde değil, aynı zamanda bu tür betonların elastisite modüllerinin değişiminin dolayısıyla elastik özelliklerinin irdelenmesine de olanak ve katkı sağlamaktadır. Ayrıca hem deneysel sonuçlar hem de tahmin sonuçlarının, betonun birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, karışım oranları ve faz elastisite modülleri yanında pomza özelliklerinin değişiminden önemli derecede etkilendiği görülmüştür. Betonun deneysel elastisite modülü değerlerini ve tahmin sonuçlarını etkileyen ana etmenler aynı zamanda pomza özelliklerinden etkilenen parametrelerdir. Bu nedenle, ampirik modellerin kompozit modellere göre pomza agregasının özelliklerinin elastisite modülü tahminine etkisini, dolaylı veya doğrudan dikkate alınmasını kolaylaştıracağı düşünülmektedir. Böylece kompozit modellerden çok pomza agregalı betonların elastisite modüllerinin tahmininde yeni ampirik modellerin geliştirilmesi ve kullanılması önerilmektedir.

- Çalışma sonunda, bu şekilde model performanslarının değerlendirilerek veya yeni modeller geliştirilerek beton özelliklerinin değerlendirildiği yeni çalışmaların bilime katkı sağlayacağı öngörülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] TOPÇU, İ.B., “Alternative Estimation of the Modulus of Elasticity for Dam Concrete”, Cement and Concrete Research, 35, 2199-2202, 2005.
- [2] TOUMI, A., NGUYEN. T.H., TURATSİNZE, A., “Benefits of Low Modulus of Elasticity of Fibre Reinforcement of Cement Based Mortars as Thin Bonded Overlay Materials”, Experimental Mechanics, 53, 1791–1797, 2013.
- [3] ZHOU, F.P., LYDON, F.D., BARR, B.I.G., “Effect of Coarse Aggregate on Elastic Modulus and Compressive Strength of High Performance Concrete”, Cement and Concrete Research, 25, 177-186, 1996.
- [4] RAMESH, G., SOTELINO, E.D., CHEN, W.F., “Effect of Transition Zone on Elastic Moduli of Concrete Materials”, Cement and Concrete Research, 26, 611-622, 1995.
- [5] BOULAY, C., STAQUET, S., DELSAUTE, B., CARETTE, J., CRESPI, M., YAZOGHLI-MARZOUK, O., MERLIOT, E., RAMANICH, S., “How to Monitor the Modulus of Elasticity of Concrete, Automatically Since the Earliest Age?”, Materials and Structures, 47, 141–155, 2014.
- [6] SIMEONOV, P., AHMAD, S., “Effect of Transition Zone on the Elastic Behaviour of Concrete”, Cement and Concrete Research, 25, 304-310, 1995.
- [7] TOPÇU, İ.B., BİLİR, T., “Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars”, ACI-Materials Journal, 107, 48-56, 2010.
- [8] TOPÇU, İ.B., BİLİR, T., “Effect of n-GGBS as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars”, ACI-Materials Journal, 107, 545-553, 2010.
- [9] TOPÇU, İ.B., BİLİR, T., “Experimental Investigation of Drying Shrinkage Cracking of Composite Mortars Incorporating Crushed Tile Fine Aggregate”, Materials & Design, 31, 4088-4097, 2010.
- [10] BİLİR, T., GENÇEL, O., TOPÇU, İ.B., “Properties of Mortars with Fly Ash as Fine Aggregate”, Construction and Building Materials, 25, 782-789, 2015.
- [11] TOPÇU, İ.B., AVCULAR, N., “Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material”, Cement and Concrete Research, 27, 1135-1139, 1997.
- [12] NILSEN, A.U., MONTERIO, P.J.M., “Concrete: A Three Phase Material”, Cement and Concrete Research, 23, 147-151, 1993.
- [13] VILARDELL, J., AGUADO, A., AGULLO, L., GETTU, R., “Estimation of the Modulus of Elasticity for Dam Concrete”, Cement and Concrete Research, 28, 93-101, 1998.
- [14] MOSTOFINEJAD, D., NOZHATI, M., “Prediction of the Modulus of Elasticity of High Strength Concrete”, Iranian Journal of Science and Technology, 29, 311-321, 2005.
- [15] TOPÇU, İ.B., BİLİR, T., “Analysis of Rubberized Concrete as a Three Phase Composite Material”, Journal of Composite Materials, 43, 1251-1263, 2009.
- [16] TOPÇU, İ.B., BİLİR, T., BOĞA, A.R., “Estimation of the Modulus of Elasticity of Slag Concrete by Using Composite Material Models”, Construction and Building Materials, 24, 741-748, 2010.

T. BİLİR

- [17] NOGUCHI, T., TOMOSAWA, F., NEMATİ, K.M., CHIAIA, B.M., FANTILLI, A.P., “A Practical Equation for Elastic Modulus of Concrete”, *ACI Structural Journal*, 106, 690-696, 2009.
- [18] CUI, H.Z., LO, T.Y., MEMON, S.A., XING, F., SHI, X., “Analytical Model for Compressive Strength, Elastic Modulus and Peak Strain of Structural Lightweight Aggregate Concrete”, *Construction Building Materials*, 36, 1036-1043, 2012.
- [19] LEE, J., XI, Y., WILLAM, K., JUNG, Y., “A Multiscale Model for Modulus of Elasticity of Concrete at High Temperatures”, *Cement and Concrete Research*, 39, 754-762, 2009.
- [20] DEMİR, F., “A New Way of Prediction Elastic Modulus of Normal and High Strength Concrete—Fuzzy Logic”, *Cement and Concrete Research*, 35, 1531-1538, 2005.
- [21] ZHAO, J., ZHENG, J.J., PENG, G.F., “A Numerical Method of Predicting Young’s Modulus of Heated Cement Paste”, *Construction and Building Materials*, 54, 197-201, 2014.
- [22] LEE, K.M., PARK, J.H., “A Numerical Model for Modulus of Elasticity of Concrete Considering Interfacial Transition Zone”, *Cement and Concrete Research*, 38, 396-402, 2008.
- [23] GUAN, X., LIU, X., JIA, X., YUAN, Y., CUI, J., MANG, H.A., “A Stochastic Multiscale Model for Predicting Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete”, *International Journal of Solids and Structures*, 56-57, 280-289, 2015.
- [24] LIA, G., ZHAOB, Y., PANGA, S-S., LI, Y., “Effective Young’s Modulus Estimation of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 29, 1455-146, 2015.
- [25] ALENGARAM, U.J., MAHMUD, H., JUMAAT, M.Z., “Enhancement and Prediction of Modulus of Elasticity of Palm Kernel Shell Concrete”, *Materials and Design*, 32, 2143-2148, 2011.
- [26] SUN, Z., GARBOCZI, E.J., SHAH, S.P., “Modelling the Elastic Properties of Concrete Composites: Experiment, Differential Effective Medium Theory, and Numerical Simulation”, *Cement and Concrete Composites*, 29, 22-38, 2007.
- [27] SANAHUJA, J., DORMIEUX, L., CHANVILLARD, G., “Modelling Elasticity of A Hydrating Cement Paste”, *Cement and Concrete Composites*, 37, 1427-1439, 2007.
- [28] CRAEYE, B., VAN ITTERBEECK, P., DESNERCK, P., BOEL, V., DE SCHUTTER, G., “Modulus of Elasticity and Tensile Strength of Self-Compacting Concrete: Survey of Experimental Data and Structural Design Codes”, *Cement and Concrete Composites*, 54, 53-61, 2014.
- [29] GANDOMI, A.H., FARAMARZIFAR, A., GHANAD REZAEI, P., ASGHARI, A., TALATAHARI, S., “New Design Equations for Elastic Modulus of Concrete Using Multi Expression Programming”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 21, 761-774, 2015.
- [30] CHUNSHENG, Z., KEFEI, L., FU, M., “Numerical and Statistical Analysis of Elastic Modulus of Concrete as a Three-Phase Heterogeneous Composite”, *Computers and Structures*, 139, 33-42, 2014.
- [31] BEHNOOD, A., OLEK, J., GLINICKI M.A., “Predicting Modulus Elasticity of Recycled Aggregate Concrete Using M5’ Model Tree Algorithm”, *Construction and Building Materials*, 94, 137-147, 2015.
- [32] WANG, H., LI, Q., “Prediction of Elastic Modulus and Poisson’s Ratio for Unsaturated Concrete”, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 1370-1379, 2007.
- [33] YAN, K., SHI, C., “Prediction of Elastic Modulus of Normal and High Strength Concrete by Support Vector Machine”, *Construction and Building Materials*, 24, 1479-1485, 2010.
- [34] AHMADI-NEDUSHAN, B., “Prediction of Elastic Modulus of Normal and High Strength Concrete Using ANFIS and Optimal Nonlinear Regression Models”, *Construction and Building Materials*, 36, 665-673, 2012.
- [35] DEMİR, F., “Prediction of Elastic Modulus of Normal and High Strength Concrete by Artificial Neural Networks”, *Construction and Building Materials*, 22, 1428-1435, 2008.
- [36] DUPLAN, F., ABOU-CHAKRA, A., TURATSINZE, A., ESCADEILLAS, G., BRULE, S., MASSE, F., “Prediction of Modulus of Elasticity Based on Micromechanics Theory and Application to Low-Strength Mortars”, *Construction and Building Materials*, 50, 437-447, 2014.
- [37] MONTEIRO, P.J.M., CHANG, C.T., “The Elastic Moduli of Calcium Hydroxide”, *Cement and Concrete Research*, 25, 1605-1609, 1995.
- [38] DUAN, Z.H., KOU, S.C., POON, C.S., “Using Artificial Neural Networks for Predicting the Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete”, *Construction and Building Materials*, 44, 524-532, 2013.
- [39] DEMİR, F., KORKMAZ, K.A., “Prediction of Lower and Upper Bounds of Elastic Modulus of High Strength Concrete”, *Construction and Building Materials*, 22, 1385-1393, 2008.
- [40] GÜNDÜZ, L., UĞUR, İ., “The Effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using Any Admixtures”, *Cement and Concrete Research*, 35, 1859-1864, 2005.

POMZA AGREGALI BETONLARIN ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN TAHMİNİNDE BAZI AMPİRİK VE KOMPOZİT MODELLERİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

- [41] ŞAHİN, R., DEMİRBOĞA, 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*, 33, 1245-1249, 2003.
- [42] SHKOLNIK, I.E., “Influence of High Strain Rates on Stress–Strain Relationship, Strength and Elastic Modulus of Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 30, 1000-1012, 2008.
- [43] YALTAY, N., EKİNCİ, C.E., ÇAKIR, T., OTO, B., “Photon Attenuation Properties of Concrete Produced with Pumice Aggregate and Colemanite Addition in Different Rates and the Effect of Curing Age to these Properties”, *Progress in Nuclear Energy*, 78, 25-35, 2015.
- [44] GÜNDÜZ, L., “The Effects of Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Low-Strength Concrete Properties”, *Construction and Building Materials*, 22, 721-728, 2008.
- [45] BIAN, L., WANG, Q., MENG, D., LI, H., “A Modified Micro-Mechanics Model for Estimating Effective Elastic Modulus of Concrete”, *Construction and Building Materials*, 36, 572-577, 2012.
- [46] ZAETANG, Y., WONGSA, A., SATA, V., CHINDAPRASIRT, P., “Use of Lightweight Aggregates in Pervious Concrete”, *Construction and Building Materials*, 48, 585-591, 2013.
- [47] ONOUE, K., TAMAI, H., SUSENO, H., “Shock-Absorbing Capability of Lightweight Concrete Utilizing Volcanic Pumice Aggregate”, *Construction and Building Materials*, 83, 261-274, 2015.
- [48] OKTAY, H., YUMRUTAŞ, R., AKPOLAT, A., “Mechanical and Thermophysical Properties of Lightweight Aggregate Concretes”, *Construction and Building Materials*, 96, 217-225, 2015.
- [49] KURT, M., GÜL, M.S., GÜL, R., AYDIN, A.C., KOTAN, T., “The Effect of Pumice Powder on the Self-Compactability of Pumice Aggregate Lightweight Concrete”, *Construction and Building Materials*, 103, 36-46, 2016.
- [50] KABAY, N., AKÖZ, F., “Effect of Prewetting Methods on Some Fresh and Hardened Properties of Concrete with Pumice Aggregate”, *Cement and Concrete Composites*, 34, 503-507, 2012.
- [51] SALLI BİDECI, Ö., BİDECI, A., GÜLTEKİN, A.H., OYMAEL, S., YILDIRIM, H., “Polymer Coated Pumice Aggregates and their Properties”, *Composites: Part B*, 67, 239-243, 2014.
- [52] HARIYADI, TAMAI, H., “Enhancing the Performance of Porous Concrete by Utilizing the Pumice Aggregate”, *Procedia Engineering*, 125, 732-738, 2015.
- [53] DAVRAZ, M., KORU, M., AKDAĞ, A.E., “The Effect of Physical Properties on Thermal Conductivity of Lightweight Aggregate”, *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 85-92, 2015.
- [54] DAVRAZ, M., CEYLAN, H., KILINÇARSLAN, Ş., “Mechanical Performances of Artificial Aggregated Lightweight Concrete”, *Acta Physica Polonica A*, 127, 1246-1250, 2014.
- [55] TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ., TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (birinci baskı), TSE, Ankara, Türkiye, 2000.
- [56] ERSOY, H.Y., *Kompozit Malzemeler (birinci baskı)*, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye, 2001.