

Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini

İlker Bekir TOPÇU*
Ali UĞURLU**

ÖZ

Bu makalede betonda elastisite kuramı ve baraj betonları için statik E-modülü tahminine yönelik kompozit modellemeler yardımı ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Betonun değişik fazlardan meydana gelmiş bir kompozit olduğu kabulünden hareketle betonda elastisite kuramı teorik olarak irdelenmiş ve bu teorik çıkarımlar statik E-modülü hesaplamasında kullanılan ampirik formüller ve kompozit modellemeler ile desteklenmeye çalışılmıştır. Yük altında belli bir gerilme düzeyine kadar elastik davranabilen betonun bu davranışının kompozit modellemeler ile açıklanabileceği ortaya çıkmışsa da bu denklemlerin yeterli olmadığı görülmüştür. Özellikle baraj betonlarında, elastisite deneyi yapmanın zorluğu ile ilişkilendirilerek yürütülen çalışma; kompozit modellemelerin beton E-modülü hesaplaması ve tahmininde kullanılabileceğini ya da daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek amacıyla kullanılması gerektiğini; ama daha önce geliştirilip ve yıllardır kullanılan “ıslak eleme” gibi yöntemlerin de kesinlik taşımama durumu dikkate alınarak sonuçların betonda E-modülü değerini etkileyen diğer faktörlerle yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

ABSTRACT

Theory of Elasticity on Concrete and Estimation of the Static Modulus of Elasticity for Dam Concrete with Composite Models

In this article elastic theory of concrete and estimation of static E-modulus with composite models for dam concrete were examined. As it is known concrete is a composite material, which has different phases so elastic theory was examined theoretical and these theoretical results were supported with empirical formulas, used for calculating static E-modulus, and composite models. Concrete behave elastically under load, up to a specific tensile strength, so it was seen that this behavior of concrete can be explained with composite models, but it was not enough. Especially for dam concrete elasticity tests were hard to conduct owing to inconvenient conditions in dam construction and for this reason calculation and estimation of E-modulus of concrete with composite models became important, but first it has to be

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 10.06.2005 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2007 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir –

** DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara – aliugurlu@mynet.com

improved considering uncertain results of wet sifting methods and also results must be evaluated again due to other factors that affect E-modulus of concrete.

1. GİRİŞ

Elastik hesaplamaların dikkate alındığı yapısal tasarımlarda şekil ya da yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için betonun E-modülünün bilinmesi gerekir. Değişik yükler altında şekil değiştirebilen bir yapıya sahip bütün malzemeler gibi beton da üzerine gelen yükün tipinden, büyüklüğünden ve süresinden etkilenecek belirli ölçüde şekil değiştirme ya da başka bir deyişle deformasyon gösterir. Betonda E-modülü tayini betonun elastik davranabildiği sınırlar içerisindeki yüklemeye düzeylerinde standartlarda tanımlandığı üzere genellikle $\phi 150 \times 300$ mm boyutlarındaki silindirik şekilli numuneler üzerinde yapılır. Kütle betonu olarak isimlendirilen baraj betonlarında ise betonda kullanılan agrega en büyük tane çapının büyümesi sonucu gerek basınç dayanımı ve gerekse E-modülü tayini gibi deneyler yukarıda bahsedilen numuneler üzerinde gerçekleştirilemez. Deneyler için daha büyük numunelerin kullanıldığı bu çalışmalarda numune boyutlarının büyümesi ile çok yüksek kapasiteli deney preslerine ve büyük deney aparatlarına gerek duyulur. Çok az araştırma laboratuvarının dışında bunları bulmak olanaksızdır. Bu nedenle adı geçen deneylerin yapılabilmesi için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en çok uygulananı *ıslak eleme* olarak adlandırılan; taze beton içerisinde 38 (ya da 32) mm'den büyük agregaların beton henüz taze iken eleme suretiyle alınıp geriye kalan kısmı ile numune hazırlanıp deneylerin bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmesi yöntemidir. Pratikte bu yöntemin kullanılması; numune homojenitesinin bozulması, faz dengelerinin değişmesi, çimento hamuru-agrega ara yüzeyi toplam alanının küçülmesi gibi önemli sayılan nedenlerle hala tartışılmakta ve elde edilen değerlere de şüphe ile bakılmaktadır.

Bu çalışmanın bütününde daha geniş olarak tartışılacak bu faktörlerin etkisini en aza indirebilmek amacıyla elde edilen deneysel sonuçların betonun agrega, matris ve agrega-çimento hamuru temas bölgesinden oluşan üç fazlı bir kompozit olduğu tezinden hareketle beton için geliştirilmiş kompozit malzeme kuramlarıyla yeniden değerlendirilmiştir.

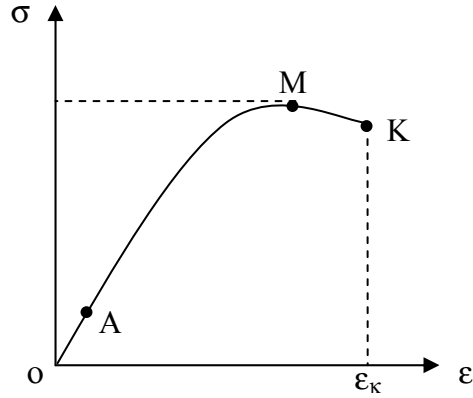
2. BETONDA ELASTİSİTE KURAMI

Üç fazlı anizotropik gevrek bir malzeme olarak tanımlanan beton üzerine gelen değişik yükler nedeniyle farklı davranışlar gösterir. Elastik özellikteki malzemedan elde edilmiş olan bir elemanın P yükü altında göstereceği toplam deformasyon miktarı o elemana uygulanan yükün büyüklüğü ve elemanın boyu ile doğru orantılı, elemanın kesit alanı ile ters orantılıdır [1]. Bu durum $\Delta L \propto PL / A$ ya da $\Delta L / L \propto P / A$ olarak ifade edilebilir.

Beton, gevrek ve farklı fazlardan oluşan bir kompozit olduğundan elastik bir malzeme değildir. Ancak küçük gerilmeler altında elastik özellik gösterebilir. Teorik olarak bu basınç dayanımının % 30 ile 40'ı arasındaki bir değere karşılık gelir [1]. Buna karşılık beton, mühendislik hesaplamalarında elastik bir malzeme olarak kabul edilir [2,3]. Betonun elastik davranışını açıklamakta kullanılan σ - ϵ ilişkisi deneysel yöntemlerle belirlenebilir.

Şekil 1'de betona ait tipik bir σ - ϵ davranışı görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere betonda gerilme arttıkça numunede doğru orantılı olarak deformasyon da artmaktadır. A noktasına kadar bu durum doğrusal olup beton üzerindeki bu kısa süreli elastik yükün kaldırılmasıyla birlikte herhangi kalıcı bir deformasyon görülmez. A noktasında numuneye daha büyük gerilmelerin uygulanmasıyla eğri doğrusallıktan sapar ve bu durum M

noktasına kadar eğimin artmasıyla devam eder. A noktasından sonra gerilmenin artması ile betondaki mikro çatlaklar hızla çoğalır ve M noktasında beton paralanmaya başlar. K noktasında ise göçme yada kırılma meydana gelir. K noktasındaki gerilme değeri σ_k betonun kırıldığı andaki gerilme değerini ϵ_k ise birim deformasyon değerini gösterir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla çizilen σ - ϵ eğrisi üzerinden betonun statik E-modülü hesaplanır. Bunun için değişik yöntemler kullanılabilir.



Şekil 1. Betonun tipik σ - ϵ eğrisi

2.1 E-modülü Değerinin Elde Edilmesinde Kullanılan Değişik Yöntemler

Betonda statik E-modülü elde edilirken genellikle yukarıda anlatılan deneysel yöntem kullanılır. Bu yöntemde TS 3502 ve ASTM C 469'da tanımlanan deney numuneye uygulanarak σ - ϵ eğrisi elde edilir ve bu eğri üzerinde değişik yöntemler ile statik E-modülü değeri hesaplanır [4,5]. Türk Standartları, Avrupa Beton Komitesi (CEB) ve Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) betonun birim ağırlığı ve basınç dayanımından hareketle beton E-modülünün hesaplanmasına yönelik ampirik bağıntılar da geliştirmiştir. *TS 500 Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları* olarak bilinen standardında [6],

$$E=14000+3250 \sigma^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

statik E-modülü hesaplaması için (1) bağıntısı verilmiştir. Avrupa Beton Komitesi (CEB) ise basınç dayanımından E-modülünü hesaplayabilmek için [7],

$$E=9500(\sigma+8)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

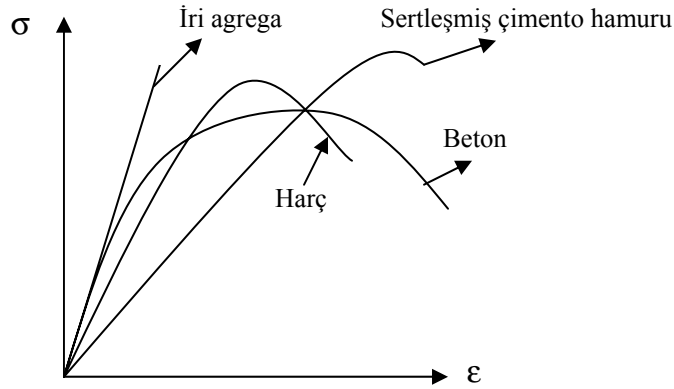
(2) bağıntısını tanımlamıştır. ACI ise beton statik E-modülü hesaplamasında basınç dayanımı ile birlikte birim ağırlığı da dikkate alan ampirik bir bağıntı geliştirmiştir, [8].

$$E= 0.043 W^{3/2} \sigma^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

Burada E: Beton basınç dayanımının % 40'ına denk gelen gerilme düzeyinin temel alınarak sekant yöntemi ile belirlenen E-modülü değeri, W: Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığı (yoğunluk), σ : standart silindir numunelerle elde edilen basınç dayanımıdır. Görüleceği üzere yukarıdaki ampirik bağıntılar yardımı ile de beton E-modülü hesaplanabilir. Bu bağıntılar sonuç olarak birbirine yakın değerler vermektedir [1]. Anılan bu kuruluşların geliştirmiş olduğu ampirik bağıntılar dışında sonik ya da ultrasonik yöntemler kullanılarak da beton E-modülü hesaplanabilir. Adına *dinamik E-modülü* denilen bir başka yöntem ise ultrasonik ses dalgalarının beton içerisinden geçişi esasına dayanır. Bu yöntemde ultrasonik dalgaların beton içerisinden geçiş hızı hesaplanır ve daha sonra kullanılan ampirik bağıntılar yardımıyla betonun dinamik E-modülü bulunur. Dinamik yöntemler ile hesaplanan E-modülü değeri statik yöntemlerle elde edilen E-modülü değerinden biraz daha yüksektir. Bu durum deney sırasında numune üzerine yük uygulanmaması gerçeği ile ilgilidir. Dinamik yöntemlerle bulunan E-modülü değerine en yakın olan statik E-modülü değeri başlangıç teğet yöntemi ile bulunan değerdir. Yalnız bu yaklaşımların hepsinde E-modülü için oldukça önemli olan beton yaşı, agreganın E-modülü ve boyutu gibi faktörler ihmal edilmektedir. Bu nedenle adı geçen bağıntılar yardımı ile hesaplanan E-modülü değerleri gerçek E-modülü değerini hiçbir zaman temsil etmez.

2.2 Betonun E-modülü Değerini Etkileyen Faktörler

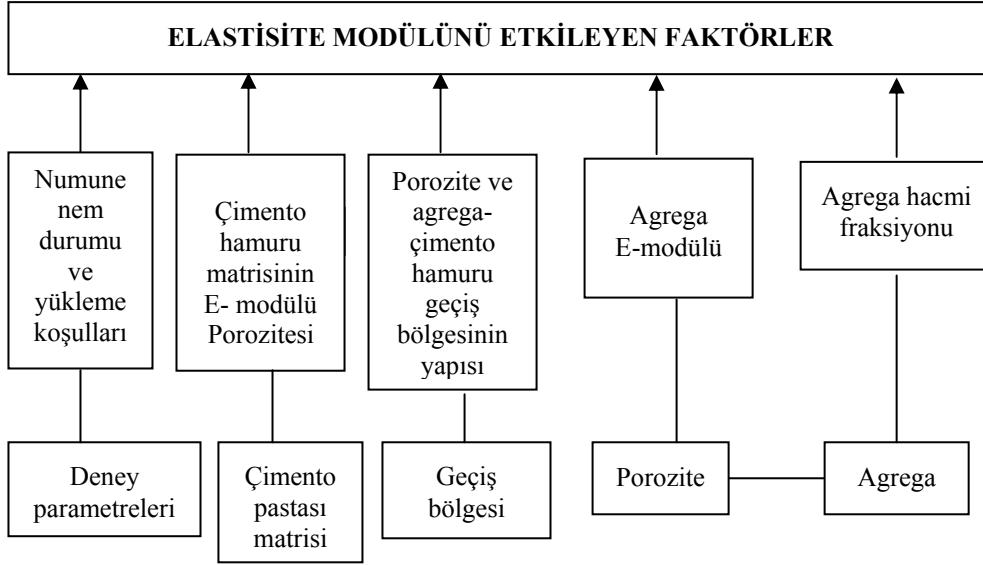
Heterojen bir yapıya sahip olan beton içyapısı, yükleme sırasında agrega, çimento hamuru matrisi, değişik boşluk sistemleri, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi gibi sahip olduğu değişik fazlar nedeniyle farklı davranış gösterir [9]. Bu nedenle bunların birisinin nicelik veya niteliğindeki değişiklik beklenen sonuçların çok farklı çıkmasına neden olabilir. Örneğin aynı basınç dayanımına sahip fakat bileşim özellikleri ve bileşenleri farklı olan betonların elastisite değerleri de farklı olabilir.



Şekil 2. Betonun ve betonu oluşturan malzemelerin σ - ϵ eğrileri

Şekil 2'den de görüleceği üzere betonun ve betonu oluşturan bileşenlerin gerilme-deformasyon davranışları birbirinden oldukça farklıdır [2]. Şekilden anlaşılacağı üzere beton içerisindeki fazlardan agreganın ve sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımı beton ve harcın dayanımına göre daha yüksektir. Buna karşılık beton kendi bileşenlerine

göre daha sünek bir davranış göstermektedir. Yani betonun diğer fazlar ve bileşenlere göre inelastik davranışı daha yüksektir. Şekilden görüleceği üzere betonun gösterdiği deformasyon söz konusu faz ve bileşenlere göre eşdeğer bir basınç dayanımı için daha yüksektir. Bu olguların hepsi sonuçta malzemenin kırılma anındaki davranışını, rijitliğini, E-modülünü ve deformasyon kapasitesini belirler. E-modülünü etkileyen faktörleri Şekil 3'teki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3. Betonun E-modülünü etkileyen faktörlerin sınıflandırılması

Şekil 3'te verilen bu temel öğelerin hepsi önemli olmakla birlikte agreganın porozitesi ve agreganın E-modülü, çimento hamuru matrisinin özellikleri, çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi ve deney parametreleri en önemli faktörlerdir. Agreganın porozitesi ve E-modülü onun rijitliğini belirleyen önemli bir öğedir. Bu nedenle yüksek yoğunluklu boşluksuz agregaların ve bunların kullanıldığı betonların da E-modülü yüksek olur. Çimento hamurunun E-modülü ve çimento hamurunun özellikleri ise deyim yerindeyse tamamıyla su/ çimento oranı tarafından belirlenir. Su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının E-modülü artar. Bu durum harç fazı/iri agreganın E-modülü oranının artmasına neden olur. Bu değişim ise iri agreganın çimento hamuru temas bölgesindeki gerilmelerin azalması yönünde etki yapar. Değişik nedenlerle ortaya çıkan çimento hamuru porozitesi de betonun E-modülü üzerinde önemli bir rol oynar. Çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi de beton E-modülü için önemli bir parametredir. Genelde hava boşlukları, mikro çatlaklar ve dağılmış kalsiyum hidroksit kristallerinin yoğun olduğu bu bölgenin betonun kırılma ve elastik özellikleri üzerinde ne kadar önemli bir işlevinin olduğu son yıllarda elektron mikroskoplarıyla yapılan içyapı incelemeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Agreganın ve çimento hamurunun özellikleri bu bölgenin davranışı üzerinde önemli bir rol oynar. Bu iki farklı fazın E-modüllerinin farklı olması nedeniyle betona yük uygulanması sırasında agreganın taneleri ile çimento hamuru temas bölgesinde ortaya çıkan çekme, kayma gibi kuvvetler de artar. Bu durum sonuçta büyük çatlaklara ve kırılmalara da yol açabilir.

3. BARAJ BETONU E-MODÜLÜNÜN TAHMİNİ

Baraj gibi büyük beton kütle yapılarında E-modülü; elastik hesabı dikkate alan yapısal tasarımlar ile şekil ve yer değiştirmelerin kestirimi için bilinmesi gerekli bir parametredir. Barajlar gibi çok büyük yapılar için beton tasarımı yapılırken teknik ve ekonomik nedenler dikkate alınarak adına kütle betonu denilen ve günlük hayatımızdaki yapı tiplerinde rastlamadığımız bir beton tasarımı yapılır.

Genelde en büyük tane çapı 80–200 mm arasındaki agregalar ile üretilen bu betonlardan gerek numune hazırlanması ve gerekse de hazırlanan numunelerin deneylere tabi tutulması; kullanılan kalıp boyutları, numunelerin taşınması, deney düzeneği ve deney için yüksek kapasiteli aletlerin temin edilmesi konusunda ciddi sıkıntıları da beraberinde getirir [10].

Baraj ya da kütle betonu olarak tanımlanan bu betonlardan yapılacak basınç, elastisite gibi deneyler için 450x900 mm'lik kalıplar ile numune alınır. Bu büyüklükteki numuneler üzerinde deneyler yapabilmek için çok yüksek kapasiteli basınç preslerine ve deformasyon ölçecek aparatlara gereksinim duyulur. Gerek şantiyelerde ve gerekse laboratuvarların birçoğunda anılan teknik koşulların sağlanması neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle baraj betonları için E-modülü tayini ve tahminine yönelik bazı farklı yaklaşımlar geliştirilmiş ve denenmiştir. Bu yöntemlerin en çok bilineni ve kullanılanı; kütle betonunun henüz beton taze iken 38 mm'lik elekten elenerek elekten geçen kısmı ile hazırlanan numunelerin test edilmesine dayanan ve adına *ıslak eleme* denen yöntemdir.

Bu yöntemde taze beton elenerek elekten geçen malzemenin agregası en büyük tane boyutu küçültülür, agregası en büyük tane boyutu küçülen beton için uygun olan $\phi 150 \times 300$ mm'lik silindirik kalıplar kullanılarak numune hazırlanır ve deneyler bu numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Ancak, yapılan bu işlemde eleme sonrası kalan betonun; iri agregası alındığı için çimento (harç)/ iri agregası oranı yükselir, toplam hacimdeki iri agregası konsantrasyonu azalır, su/ çimento oranı küçülür, iri agregası-çimento hamuru temas yüzeyi toplam alanı ve uzunluğu azalır. Bu gelişmeler orijinal (elenmemiş) betona göre ıslak elenmiş bu yeni betonun kırılma ve kırılma anındaki şekil değiştirme parametrelerini önemli ölçüde etkiler.

Belli hacimdeki iri agregası-çimento hamuru temas yüzeyi (aderans) hattı uzunluğunun toplam olarak azalması durumu beton içyapısındaki zayıflıkların azalması ya da içyapının gerilmeler karşısında güçlenmesi olarak değerlendirilir. Bunun yanı sıra yüklemenin belli bir aşamasında iri agregası yüzeylerinde artan kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan aderans kopmaları ve bunun sonucunda çatlama da azalır. Su/çimento oranının küçülmesi sonucunda ise porozite azalır. Kısaca özetlersek bu gelişmelerin hepsi betonun gerilmeye-şekil değiştirme davranışını etkileyerek daha sünek bir beton davranışı ve daha düşük bir E-modülü ortaya çıkmasını sağlar. Bu durumda ıslak elenmiş betonla yapılan basınç dayanımı değeri daha yüksek elde edilir. Buna karşılık E-modülü değerinin ise daha düşük çıkmasına neden olur. Araştırmalar ıslak elenmiş betonla elde edilen basınç dayanımı değerinin % 85'inin alınmasının uygun olacağını göstermiştir [11,12]. Bu durum E-modülü değeri tahminini daha da zorlaştırır.

Bu düşünce; baraj betonunun ıslak eleme yapılması neticesinde içerisindeki 38 mm'den büyük iri agregaların alınması sonucu beton bileşim oranlarının değişeceği ve sonuçta harç/agregası oranının büyümesi sonucu sertleşmiş beton özelliklerinin değişmesi tezine dayanır. Teorik olarak böyle düşünmekle birlikte kaba olarak iki fazlı bir kompozit olarak kabul edilen anizotrop yapıdaki betonun yük altında nasıl davranacağını kestirmek oldukça karmaşıktır. Bu durum, beton özelliklerini belirleyen parametrelerin çokluğundan ve bu

parametrelerin birbirinin özelliklerini etkilemesi ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, basınç dayanımları aynı olan fakat bileşim özellikleri farklı olan iki betonun E-modülü değerleri eşit olmayabilir. Kırılma yada şekil değiştirmelerde harç ve agregaya kadar agregaya-harç ara yüzeyinin de önemli olduğu son yıllarda anlaşılmıştır. Yani harç dayanımı agregaya dayanımından yüksek olan bir betonun şekil değiştirme indeksi agregaya dayanımı harç dayanımından yüksek olan (tersi durum) bir betonla aynı olmaz. Bu her iki farklı durumda, yük altında betondaki temas yüzeyinin kırılma anındaki fonksiyonu farklıdır. Birinci durumda aderans kuvvetlerinin işlevi ikinci duruma göre daha önemsizdir [13].

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere ıslak eleme yapılarak elde edilen E-modülü değeri ile gerçek orijinal numuneler üzerinden belirlenen E-modülü değeri arasında fark vardır. Bu nedenle sonuçların daha farklı yaklaşımlarla doğrulanması ya da sınanması gereklidir. Basınç dayanımından hareketle E-modülünün tahmin edilmesini sağlayan klasik ampirik formüllerden madde 2’de söz edilmişti. Yalnız bu bağıntıların kullanılması durumunda E-modülü için önemli olan baraj betonunun yaşı, iri agregaya ve numune boyutunun ihmal edildiği gözden kaçırılmamalıdır [14]. Deneylerden ya da ıslak eleme yönteminden elde edilen sonuçlar betonun agregaya ve çimento hamuru matrisinden meydana gelmiş iki fazlı bir kompozit olduğu kabulüne dayanan paralel, seri ve her iki fazın birlikte kullanıldığı model ve kuramlar ile yeniden değerlendirilerek baraj betonu için E-modülü tahminine yönelik yaklaşımlar denenebilir [13]. Ama unutulmaması gereken çok önemli bir nokta daha vardır ki o da bütün bu modellemelerin hepsinin betonun agregaya ve harçtan meydana gelmiş iki fazlı bir kompozit olduğu kabulüne dayanması gerçeğidir. Ne yazık ki bu kabul, son yıllarda elektron mikroskopları ile varlığı daha iyi anlaşılan ve betonun yük altındaki davranışında çok önemli bir işlevi olan agregaya-harç temas yüzeyi bölgesini dikkate almadığından günümüz koşullarında yeniden değerlendirilmesi gerekir.

3.1 Kompozit Modellemeler Yardımı İle E-modülünün Belirlenmesi

Kaba olarak çimento hamuru ve agregadan meydana gelen bir kompozit malzeme olarak kabul edilen betonun E-modülünün tayini için basit kompozit sistemlere uygulanan modellerden yararlanılabilir. İki fazlı malzemelerin elastik davranışını açıklamada pek çok kompozit modelde paralel ve seri fazlı düzenlemelerle Şekil 4’de olduğu gibi temel kompozit modellemeler kullanılır [15,16]. Bu modellerin kullanılmasında;

- beton, matris ve iri agregaya olarak tanımlanan iki homojen ve izotropik fazın üç boyutlu olarak bileşimidir,
- söz konusu bu iki faz betonun lineer elastik bölgesinde doğrusal davranır,

gibi kabulleri esas alır [17]. Bunlarla birlikte yine betonun karışım oranları, agregaya birim ağırlıkları veya hacim oranları ve her bir fazın E-modülü de bilinmelidir.

Şekil 4’te bazı iki fazlı beton kompozit modelleri görülmektedir. Bunlar içerisinde en fazla kullanılanları Voight’in paralel ve Reuss’un seri modellemeleridir. Voight’in paralel modellemesinde, kompozit malzeme üzerinde sabit birim deformasyon olduğu kabul edilerek E-modülü hesaplaması için aşağıdaki bağıntı yazılır;

$$E_b = E_{ch} V_{ch} + E_a V_a \dots \dots \dots (4)$$

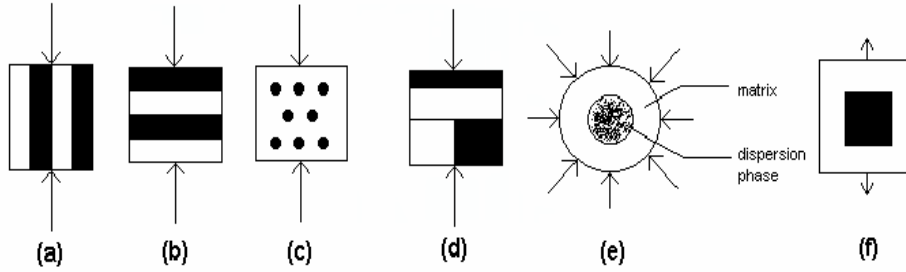
Reuss’un seri modellemesinde ise kompozit malzeme üzerinde sabit gerilme olduğu kabul edilir ve E-modülü tayini için aşağıdaki denklem yazılır;

$$1/E_b = V_{ch}/E_{ch} + V_a/E_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

Yukarıda verilen her iki bağıntıdan da görüleceği üzere betonun ya da kompozitin E-modülü hem çimento hamurunun, hem agreganın, hem de bunların beton içerisindeki hacimsel miktarlarının bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Seri ve paralel fazların eşit oranlandığı Hirsch modellemesinde de beton kabaca iki fazlı bir malzeme olduğu kabulü ile

$$1/E_b = (1-x) [C/E_a + 1-C/E_{ch}] + x [1/C E_a + (1-C) E_{ch}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

denklemini yazılır. (6) denklemini ile verilen Hirsch modelinde E-modülü; betonun iki fazlı bir malzeme olduğu, agrega ve matris fazının hacim fonksiyonu ve ampirik sabitin E-modülü üzerinde etkisi olduğu temeline dayanır, [2, 5].



a) Paralel faz b) Seri faz c) Dağınık faz d) Hirsch-Dougill e) Hashin f) Counto

Şekil 4 . Kompozit modeller

4. KOMPOZİT MODELLERLE E-MODÜLÜ HESAPLAMALARINA ÖRNEKLER

Madde 3.1’de verilen kompozit modeller yardımı ile şimdiye kadar bazı çalışmalar yapılmışsa da bu çalışmalarda E-modülünü tahmin etmenin dışında konu tartışılmamıştır [12,14,18]. Daha önceki bölümlerde de açıklandığı üzere beton iç yapısı ve davranışının açıklanamadığı dönemlerde yazılmış olan birim hücre modellemesine dayanan kompozit denklemlerin günümüzde yapılacak pratik çalışmalar ile yeniden yazılması gereklidir. Bu doğrultuda son yıllarda J. Villardell vd. yapmış oldukları çalışmada bazı hususlara açıklamalar getirecek şekilde sonuçlara ulaşılmış ve sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir [17].

Tablo 1. Farklı şekilde düzenlenmiş aynı betona ait değişik yaşlardaki E-modülü değerleri

Deney yaşı, gün	E-Modülü, GPa		
	Harç	Islak elenmiş beton	Baraj betonu, (elenmemiş)
7	19.6	24.8	30.3
28	23.8	34.5	37.3
90	28.2	35.1	43.0
180	30.7	37.2	42.2

Bu çalışmada baraj betonu 120 mm'lik agrega en büyük tane çapı ile hazırlanmıştır. Daha sonra bu beton taze halde iken 38 mm'lik elek ile elenerek ıslak elenmiş beton elde edilmiştir. Bu beton da 4 no'lu elekten elenerek harç numuneleri meydana getirilmiştir. Tablo 1'de verilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde deney süresi ya da numune yaşının artması ile E-modülü değerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca baraj betonu olarak bilinen elenmemiş betonunun E-modülü değerinin ıslak elenmiş beton ve harç numunelere göre daha yüksek olduğu görülecektir.

E-modülü değeri sıralaması büyükten küçüğe doğru sıralanacak olursa; baraj betonu (elenmemiş), ıslak elenmiş beton ve harç şeklindedir. Bilindiği üzere bu sonuçlar agrega E-modülü değeri ile yakından ilgilidir. Agrega E-modülü değerinin artması ile betonun E-modülü değeri de artmaktadır. Bu durum agrega E-modülü değerinin çimento hamuru E-modülü değerinden daha yüksekse olduğu durumlar için geçerlidir. Tersisi durumda ise sonuç daha farklı olacaktır. E-modülü yüksek olan fazın hacim oranı da önemli bir parametredir.

4.1 Deneysel Çalışmalar

Yukarıdaki bölümlerde açıklanan kuramsal sentezlerin pratikte değerlendirilmesi ve doğrulanması amacıyla Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Beton ve Yapı Malzemeleri Laboratuvarında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, pratikte ölçülen elastisite modülü gerçek değerleri ile kompozit malzemelere ait model denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması temeline dayanmaktadır.

Bu amaçla J. Villardell ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadan yararlanılmıştır [17]. J. Villardell ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışma sonuçları ve karışım parametreleri kullanılarak model denklemler için veriler üretilmiş ve buradan kompozit model denklemleri yardımıyla statik E-modülü hesaplamaları yapılmıştır. J. Villardell ve arkadaşları yaptıkları çalışmada agrega olarak kullanılacak kayalardan boy/çap oranı 2 olan karot numuneler alıp bunların ayrı ayrı elastisite modülü değerlerini ölçmüşlerdir. Elde edilen kayaların elastisite modülü değerleri sırasıyla 35, 50 ve 60 GPa bulunmuştur.

Adı geçen kayalar kırma eleme tesisinde kırılıp, öğütülerek karışımlarda kullanılmak üzere (0-1.25), (1.25-5), (5-19), (19-60) ve (60-120) mm boyutlarındaki beş farklı tane grubuna ayrılmıştır. Karışımlarda Tip I 45A (CEN Class I 42.5R) çimentosu, 130 kg; uçucu kül, 89 kg; ince kum (0-1.25 mm), 398 kg; iri kum (1.25-5 mm), 234 kg; ince çakıl (5-19 mm), 392 kg; orta boy çakıl, (19-60 mm), 646 kg; kaba çakıl (60-120 mm), 558 kg; akışkanlaştırıcı 0.55 litre ve su 45 kg ölçülerinde kullanılmıştır. Kullanılan agregalar baraj yakınlarındaki Segre nehrinden alınmış olup esas olarak kireçtaşından oluştuğu belirlenmiştir. Baraj betonuna ilaveten bu beton için tane boyutu 5 mm'ye kadar olan çakılsız harçlar da üretilmiştir.

Çalışma kapsamında önce, en büyük tane çapı 120 mm olan agrega kullanılarak beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımdan 450x450x450 mm boyutlarında prizmatik numuneler alınmış ve *Baraj Betonu* olarak etiketlenmiştir. Aynı beton tazeliğini kaybetmeden 38 mm'lik elekten ıslak eleme yöntemi ile elenerek elekten geçen, yani agrega en büyük tane çapı 38 mm'ye düşürülen betondan deney yapmak üzere $\phi 150 \times 300$ mm boyutlarında silindirik şekilli numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler de *Islak Eleme Betonu* olarak isimlendirilmiştir. En büyük agrega tane çapı 38 mm'ye düşürülen bu beton yine tazeliğini kaybetmeden 4 nolu (5 mm) elek ile elenerek $\phi 150 \times 300$ mm boyutlarında silindirik şekilli *Harç Numuneleri* hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri bir gün sonra

Betonda Elastisite Kuram ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit...

kalıplardan sökülerek deney anına kadar 23 ± 2 °C'deki kür havuzlarında tutulmuştur. Kür havuzunda 90 gün boyunca bekletilen numuneler bu sürenin sonunda havuzlardan çıkartılarak doymun kuru yüzey durumuna getirilmiş ve deneye tabii tutulmuştur. Her silindir numunesindeki şekil değiştirme, numunenin düşey ekseninin ortasına yerleştirilmiş üç strain-gage yardımıyla ölçülmüştür. Strain-gage'lerin uzunlukları harç için 30, ıslak elenmiş betonlar için ise 120 mm'dir. Prizma şekilli numunelerde ise referans noktalarını gösteren strain-gageler iki karşılıklı düşey yüze yapıştırılmışlar ve DEMEC tipi 15 cm gage uzunluğundaki mekanik ekstensometre ile bitişik diskler arasındaki şekil değiştirmeler elle ölçülerek kaydedilmiştir. Strain-gage'lerin şekil değiştirmeleri bilgisayar kontrollü veri toplayıcı sistem ile bulunmuştur.

Numuneler MTS 458 kapalı devre kontrollü servo hidrolik basınç presinde 4.5 MN'lik tek eksenli basınç altında yüklenmişlerdir. Aynı eksenel şekil değiştirmenin sağlanması için piston yükleme hızı silindir numunelerde 0.004 mm/sn, prizmalarda 0.012 mm/sn olarak sabitlenmiştir. Bu yükleme hızı ile silindir numunelerde yaklaşık 4 dakika sonra kırılma gerçekleşmiştir. Deney numuneleri preste kırılana kadar yüklenmiştir. E-modülü değerleri, kırılma gerilmesinin % 30'luk kısmına karşılık gelen eğri üzerinde (doğrusal kısım) iki nokta işaretlenerek ve bu iki noktadan geçirilen bir doğrunun eğiminden hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen bu sonuçların gerilme-şekil değiştirme eğrileri grafiksel olarak bilgisayar ortamında matematiksel denklemler yardımıyla çözümlenmiş ve nümerik hale getirilmiştir. Tablo 2'deki hacim oranları kullanılarak farklı kompozit modelleri için yazılmış denklemler yardımıyla on dört farklı kompozit model için elastisite modeli hesaplanmış ve Tablo 3'te deneysel sonuçlarla birlikte verilmiştir.

Tablo 2. Hesaplamalarındaki harç ve agregaların hacim fraksiyonları

Kodu	V_{harç}	V_{agrega}
H	0.555	0.445
IE	0.405	0.595
B1	0.725	0.275

H: Harç, IE: Islak elenmiş beton, B1: Baraj

Doksan günlük olarak gerçekleştirilen pratik deneylerde her üç farklı E-modülündeki agrega için; harç numunelerden elde edilen E-modülü değerinin en düşük sonuçları verdiği görülmüştür. Islak eleme uygulanmış betonların E-modülü değerinin harç E-modülü değerinden daha yüksek olduğu buna karşılık baraj betonu E-modülü değerinden ise daha düşük olduğu belirlenmiştir, (Tablo 3). Yani sıralama $E_{Baraj} > E_{Islk. Elm.} > E_{Harç}$ şeklindedir. Bu, beton içerisindeki agrega hacmi, agrega ve çimento hamurunun E-modülü değeri ile ilgili bir durumdur. Agreganın E-modülünün 35 GPa'dan 65 GPa'a artması ile harç, ıslak eleme ve baraj betonu E-modülü değerleri de artmaktadır. Bu durum agreganın hacminin artması ve E-modülü değerinin değişmesi ile ilgilidir. Bu sonuç aynı zamanda E-modülü 35 GPa alan agrega ile üretilen betonlar hariç diğer iki farklı agrega E-modülüne sahip (50 ve 65 GPa) agrega ile üretilen betonların; agrega fazı E-modülü değerinin harç fazı E-modülü değerinden daha yüksek olduğunu da gösterir. E-modülü 35 GPa olan agrega ile üretilen betonlarda ise bu durum sonuçlardan görüleceği üzere tersinedir.

Tablo 3. Agrega E-modülleri farklı; ıslak-elenmiş, baraj betonları ve harç numunelerin kompozit modellerine göre E-modülü değerleri, (90 günlük)

Gün	E_a GPa	Kodu	DeneySEL sonuç	Paralel Model	Seri Model	Hirsch-Dougill, (x=0.3)	Hirsch-Dougill, (x=0.5)	Hirsch-Dougill, (x=0.8)	Popovics	Illston	Mehmel-Kern	Counto	Hashin-Hansen	Hobbs	Maxwell	Bache-Nepper-Christensen
90	35	H	28	31	30	30	31	31	15	31	31	31	31	31	31	31
		B	33	32	31	31	32	32	16	32	32	32	32	32	32	32
		IE	35	35	35	35	35	35	17	35	35	35	35	35	35	35
	50	H	32	37	34	35	36	37	18	37	36	36	36	36	36	36
		B	43	41	38	38	39	40	20	40	39	39	39	39	39	39
		IE	39	39	38	38	38	39	19	39	38	38	38	38	38	38
	65	H	37	44	37	39	40	43	22	42	40	40	40	40	41	40
		B	48	50	42	44	46	48	25	47	46	46	45	45	46	46
		IE	43	43	40	41	41	42	21	42	41	41	41	41	41	41

H: Harç, IE: Islak elenmiş beton, BI: Baraj betonu

Üç farklı agrega E-modülüne sahip agrega ile üretilmiş betonların deneysel E-modülü sonuçları ile kompozit denklemlerden elde edilen E-modülü değerleri karşılaştırıldığında; baraj ve ıslak eleme betonu olarak tanımlanan betonların deneysel sonuçları ile kompozit modellerden matematiksel olarak elde edilen sonuçlar, harç numune sonuçları hariç birbirine yakındır. Harç numunelerinde ise kompozit denklemlerinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir, (Tablo 3).

Deneysel sonuçların kompozit modellemeler ile yapılan doğrulama hesaplamalarında Voight'in paralel modeli ile paralel ve seri fazların eşit oranlandığı Hirsch-Dougill (x:0.8) modellemesi kullanılarak elde edilen değerlerin deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiği görülmüştür. Toplam 11 farklı kompozit model esas alınarak yapılan hesaplamalar içerisinde Popovics kompozit denklemi kullanılarak hesaplanan E-modülü değerlerinin deneysel sonuçlardan en fazla sapmayı gösteren bir model olarak karşımıza çıkması da çalışmanın bir başka ilginç sonucudur, (Tablo 3).

5. SONUÇ

Beton ya da betonarme yapılarda değişik yükler altında betondaki şekil değiştirmelerin sayısal ifadesi olarak kabul edilen betonun E-modülü elastik hesaplamaların dikkate alındığı baraj gibi yapı tiplerinde oldukça önemli bir parametredir. Bilindiği üzere, özel bir beton olarak tanımlanan baraj betonlarında E-modülü değerini belirlemek oldukça zordur. Şimdiye kadar kullanılan bazı kestirimler ve adına ıslak eleme denilen yöntemle tayin edilen E-modülü değeri de hep kuşku ile karşılanmıştır.

Yukarıda irdelenen konunun teorik temellerinden anlaşılacağı üzere de E-modülü tahmini yada kompozit denklemlerinden E-modülü hesaplanmasında dikkate alınması gereken parametre sayısının çokluğu nedeniyle ancak deneysel çalışma sonuçları güvenilir olarak kabul edilebilir. Çok fazlı anizotropik bir malzeme olması dolayısıyla betonun kırılma yada şekil değiştirme mekaniğini tam olarak açıklamak oldukça zordur. Bu konudaki yaklaşımlar belirli kabuller üzerine inşa edilmiştir. Bu nedenle kompozit birim hücre modellemeleri esas alınarak yazılmış olan E-modülü denklemleri betonun gerçek anlamda elastik davranışını sayısal olarak tam ifade etmekten uzaktır. Ancak bir fikir edinilmesi açısından belirli bir yere kadar güvenilir olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra adı geçen denklemlerin yazılımında; betonun şekil değiştirme ve kırılma anında çok önemli bir rolü olan agrega-çimento hamuru bölgesi ihmal edilmiştir. Elektron mikroskopları ile beton iç yapısı incelenmeye başlandıktan sonra betonunun morfolojisi adeta yeniden tanımlanarak bu bölgenin beton davranışında ne kadar önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu bölge yapısı itibari ile süreksizlik sınırı öncesinde beton davranışını etkilemekte ve plastik deformasyon oluşma sürecinin ötelenmesine yol açabilmektedir. Yine bunların yanı sıra kullanılan kompozit model denklemlerinde beton içerisindeki boşluk yapısı ve dağılımı ile agreganın E-modülü dışındaki fiziksel özellikleri de ihmal edilmiştir. Bu nedenle anılan denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ancak "E-modülü tahmini" için dikkate alınmalı kesin sonuçlar olarak kabul edilmemelidir.

Buna karşılık deneysel sonuçlar içerisinde ıslak eleme yapılarak elde edilen betondan ölçülen E-modülü de tartışmalıdır. Çünkü bu yöntemle elde edilen sonuçlar elenmemiş (baraj betonu) betona göre, agrega E-modülü değerinin 50 ve 65 GPa olduğu betonlarda yaklaşık % 10-15 daha düşüktür. Agrega E-modülü değerinin 35 GPa olduğu çalışmada ise ıslak eleme ile elde edilen deneysel E-modülü değeri baraj betonlarından elde edilen deneysel E-modülü değerine göre ise daha yüksektir. Bu durum kompozit denklemlerinden elde edilen sonuçlar için de böyledir. Bu; ıslak eleme sonrası faz hacimlerinin değişmesi ve ara yüzey etkisi ile ilgilidir.

Çalışma, sonuçları açısından kısaca özetlenirse;

- Betonun E-modülü; beton bileşenleri ve özelliklerinden bağımsız değildir. Özellikle agreganın E-modülü, şekli gibi fiziksel özellikler ile çimento hamurunun yapısı sonuçlar üzerinde önemli derecede etkilidir.
- Betonun anizotropik yapısı nedeniyle, içerisindeki fazlar ve bu fazların hacimsel oranı betonun şekil değiştirmesi üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır. Bu fazların yanı sıra agrega-çimento hamuru ara yüzeyi de betonun elastik yada inelastik davranışı üzerinde önemli bir rol oynar.
- Kompozit modelleme esaslarına göre yazılmış olan E- modülü denklemleri baraj betonu E-modülü hesaplamasında kullanılabilir. Fakat elde edilen sonuçlar kesin sonuç olarak kabul edilmemelidir. Bu kabulde beton yaşı özellikle dikkate alınmalıdır. Voight'in paralel ve Hirsch-Doughill'in karma modelleri sonuçları açısından en güvenilir olarak kabul edilebilir.
- Kompozit model denklemleri betonu iki fazlı homojen ve izotropik fazın üç boyutlu bileşimi olarak tanımlanmış ve denklemler ona göre yazılmıştır. Bu tanımda betonun şekil değiştirme ve kırılma davranışında çok önemli bir rolü olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle kompozit denklemlerinden elde edilen sonuçlar hiçbir zaman tam olarak deneysel sonuçlara eşit değildir.
- E-modülünü tahmin etmek üzere yazılmış olan kompozit model denklemleri ile betonun E-modülünü tam olarak belirlemek zordur. Bu nedenle adı geçen

denklemlerden elde edilen sonuçlar elastik hesaplamalarda bir yaklaşım yada tahminin dışında veri olarak kullanılmamalıdır.

- Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde E-modülü açısından $E_{\text{Baraj } 1-2} > E_{\text{Islk. Elm.}} > E_{\text{Harç}}$ şeklinde bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu durumda pratikte kullanılan ıslak eleme numunelerinin gerçek (elenmemiş) numuneleri temsil etmediği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ıslak eleme yöntemi kullanılarak elde edilen beton E- modülü değeri ancak basit elastik hesaplamalarda kullanılmalıdır. Baraj gibi kritik yapılar söz konusu ise değişen iri agregâ/ harç fazı oranı ve ara yüzey etkisi de dikkate alınarak deneyler en az 90 yada 180 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirmelidir.

Kaynaklar

- [1] Mehta, P.K, Concrete, Prentice-Hall Inc., USA.
- [2] Erdoğan, T.Y., Beton, Middle East Technical University Press, Ankara, 2003.
- [3] Mindess, S., Young, J.F., Concrete, Prentice- Hall Inc., New Jersey, USA, 1981.
- [4] TS 3502, Betonda E-modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1981.
- [5] ASTM C 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standarts, 1994.
- [6] TS 500, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [7] Committee Euro-International du Beton, CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, Bull. 124/ 125, April 1978.
- [8] ACI 312-92, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Manuel of Concrete Practice, Part 3, 1994.
- [9] Shah, S. P., Lange A.D., Li, Z., Mitsui, K., Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Aggregate interface, ACI journal, Vol. 91, No 1, pp. 30-39, January-February 1994.
- [10] R. Sanchez Trejo, Quality Control of Concrete, Report for the Committee on Materials for Dams, Bulletin 47, ICOLD, Paris, 1983
- [11] Tuthill, L.H., Sarkaria, G.S. and Cortright, C.D., Transactions of the 10. Int. Congress on Large Dams, (Montreal, 1970) IV. 181-197, ICOLD, Paris, 1970.
- [12] Topçu, İ.B., Alternative Estimation of the Modulus of Elasticity for Dam Concrete, Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 11, pp. 2199-2202, 2005.
- [13] Uğurlu, A., Betonda Agregâ-Çimento Hamuru Aderansı, THBB, Hazır Beton Dergisi, Yıl 9, Sayı 49, ss. 66-74.
- [14] Soares, J.P., Mora, J. and Florentine, C.A., Transactions of the 16. International Congress on Large Dams (San Francisco, 1988), III, 483-491, ICOLD, Paris, 1988.
- [15] Topçu, İ.B., Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul, 126s.
- [16] Topçu, İ.B., Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 8, pp. 1135-1139, 1997.
- [17] Villardell, J. Aguado, A., Agullo, L. and Gettu, R., Estimation of the Modulus of elasticity for dam concrete, Cement and Concrete Research, No. 1, pp. 93-101, 1998.
- [18] Neville, A.M., Properties of Concrete, Longman Scientific and Technical, England, 1981