

LASTİK AGREGALI BETONLARDA ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN DENEYSSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet EMİROĞLU, Servet YILDIZ* ve Ercan ÖZGAN

Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Düzce Üniversitesi Konuralp/Düzce

*Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi Merkez/Elazığ

mehmetemiroglu@duzce.edu.tr, syildiz@firat.edu.tr, ercanozgan@gmail.com

(Geliş/Received: 11.09.2008 ; Kabul/Accepted: 08.07.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, atık lastiklerden beton içinde kullanmak amacıyla ince ve iri lastik agregalar üretilmiştir. Bu lastik agregalar normal agrega ile sırasıyla % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında hacimsel olarak yer değiştirilmek suretiyle lastik agregalı betonlar elde edilmiştir. Üretilen lastik agregalı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Eğilmede çekme deneylerinin yapılabilmesi için 100x100x500 mm ebatlarında kırış numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler eğilmede çekme deneylerine tabi tutularak deney esnasında kırışların orta noktalarından elde edilen sehim miktarları ölçülmüştür. Bu sehim miktarlarından faydalanarak üretilen lastik agregalı betonların elastisite modülleri belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen lastik agregalı betonların elastisite modülleri çeşitli ülkelerin standartlarında önerilen ampirik formüllerle de hesaplanmıştır. Deneysel olarak belirlenen elastisite modülleri ile ampirik formüllerle hesaplanan elastisite modülleri arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, betondaki lastik miktarı arttıkça deneysel verilerle hesaplanan elastisite modülleri ile ampirik formüllerle hesaplanan elastisite modülleri arasındaki ilişkinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak, Amerika Beton Enstitüsü (ACI) tarafından önerilen formül ile deneysel olarak hesaplanan elastisite modülü arasında oldukça yüksek bir ilişki olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lastik agregalı beton, atık taşıt lastikleri, elastisite modülü.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF MODULUS OF ELASTICITY ON RUBBERIZED CONCRETE

ABSTRACT

In this study, fine and coarse rubber aggregates were produced for using in concrete. Rubber filled concretes have been produced by replacing the normal aggregates with rubber aggregates (5%, 10%, 15% and 20%) by volume respectively. Physical and mechanical properties of the produced rubber filled concretes have been determined. Beam specimens with 100 x 100 x 500 mm were prepared for the three point bending tests. The three point bending tests have conducted on these beam specimens and deflection amount of the beams during the test have been measured. By using the deflection values elasticity modulus of the produced specimens have been determined. Also, the elasticity modulus of the specimens has been calculated by using empirical equations which were proposed from some countries' standards. It was tried to determine that the relationship between the experimental results and empirical equation results for elasticity modulus. As a result, it is determined that while increasing rubber content in the concrete the relationship between experimental results and empirical equation results for elasticity modulus were decreased. However, it is observed that there was a high correlation between experimental results and empirical equation proposed by American Concrete Institute (ACI) for elasticity modulus.

Keywords: Rubber filled concrete, waste vehicle tires, modulus of elasticity.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam şişeler, plastik içecek ve yemek kutuları, çelik kavanozlar, döşeme ve mobilya kaplama malzemeleri, kırılmış seramikler, geri kazanılmış beton atıkları ve atık taşıt lastikleri çevre için problem olan katı atıklar arasında yer almaktadırlar. Atık taşıt lastikleri taşıt sayısının artışına bağlı olarak her yıl artmaktadır. Amerika'da yılda yaklaşık 242 milyon adet parçalanmış lastik meydana geldiği, Portekiz'de yaklaşık olarak yılda 50 bin ton kullanılmış lastik açığa çıktığı, Tayland'da 2001 yılında yaklaşık olarak 94 bin ton atık lastiğin ortaya çıktığı, Fransa'da her yıl 10 milyonun üzerinde atık lastiğin meydana geldiği, Brezilya'da her yıl yaklaşık 10-15 milyon atık lastiğin biriktiği ve Türkiye'de ise 2000 yılında yılda yaklaşık 180 bin ton atık lastik biriktiği kaydedilmiştir [1-6].

Bu lastik yığınlarının yangın potansiyeli bulunması dışında kemirgenler için beslenme alanları oluşturma ve estetik gibi problemlere neden oldukları bilinmektedir [7]. Günümüze kadar biriken atık lastiklerin yeniden ekonomiye kazandırılması amacıyla, kesilmiş lastiklerin kauçuk ve plastik üretiminde kullanılması, elektrik santrallerinde yakıt olarak kullanılması ve asfalt-beton gibi yapı malzemelerinde agrega olarak kullanılabilirliğiyle ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır [8, 9]. Atık lastiklerin asfalt üretiminde kullanımı, kauçuklu asfaltın daha iyi kayma direnci göstermesi, yorulma çatlaklarını azaltması ve geleneksel asfalta oranla daha fazla servis ömrü sağladığı için başlangıçta ilgi çekmiştir. Ancak kauçuklu asfaltın ilk maliyetinin geleneksel asfalta oranla %40 ile %100 daha fazla değişen oranlarda olması ve uzun vadede getireceği faydaların tam olarak bilinmemesi nedeniyle bu konudaki çalışmalar giderek azalmıştır [10-14].

Diğer taraftan, atık lastiklerin beton içerisinde agrega olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Lastik agregalı beton üretimi, normal agreganın karışım içerisinde hacimsel olarak lastik agregalar ile yer değiştirilerek daha masrafsız bir yöntemle yapılmaktadır. Beton karışımındaki normal agreganın hacimsel olarak atık lastiklerle yer değiştirilerek yapılmaktadır. Lastik agregalı beton geleneksel betona göre daha düşük birim ağırlık ve yüksek tokluğa sahiptir. Ancak, lastik miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Topçu ve Avcular yaptıkları çalışmada, iki farklı boyutta lastik agrega içeren betonların çarpma dayanımlarının normal betona oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [15]. Khatib ve Bayomy beton içerisinde ince ve iri agrega yerine iki farklı boyutta lastik agrega kullanılmasının lastik agregalı betonun dayanımını azalttığını, buna karşın tokluğunu arttırdığını belirlemişlerdir [16]. Oliveras ve arkadaşları ortalama uzunlukları 12,5 mm olan atık lastik ve polipropilen lif kullanımının lastik agregalı betonların basınç dayanımlarını azalttığını belirlemişlerdir [17]. Li ve arkadaşları, atık lastik

agrega içeren beton karışımları hazırlamışlar ve ürettikleri lastik agregalı betonların, düktil bir kırılma sergilediğini, basınç ve eğilme yükleri altında daha fazla enerji soğurdıklarını ve iyi bir titreşim yalıtımı sağladıklarını ifade etmişlerdir [18]. Emiroğlu, Yıldız ve Keleştemur lastik agregalı betonlarda atık lastikler ile çimento pastası arasındaki aderansın normal agrega ile çimento pastası arasındaki mevcut aderansın daha az olduğunu ve bu nedenle lastik agregalı betonlarda basınç dayanımının azaldığını bildirmişlerdir [19]. Segre ve Joekes atık lastik tozlarını sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde yüzey işlemine tabi tutarak beton içerisinde kullanmışlar ve ürettikleri lastik agregalı betonların basınç dayanımları ile tokluklarının arttığını kaydetmişlerdir [20]. Güneysi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, silika katkılı ve silika katkısız lastik agregalı betonun mekanik özelliklerini belirlemişler ve silika füme katkısının lastik agregalı betonun basınç dayanımındaki düşüş oranını azalttığını kaydetmişlerdir [21].

Bu çalışmada eğilmede çekme deneyi esnasında kırışların orta noktalarından elde edilen sehim miktarları ölçülerek lastik agregalı betonların elastisite modülleri belirlenmiştir. Lastik agregalı betonların elastisite modüllerini belirlemek amacıyla çeşitli ülkelerin standartlarında önerilen ampirik formüllerden faydalanılmıştır. Ayrıca, deneysel olarak belirlenen elastisite modülleri ile ampirik formüllerle hesaplanan elastisite modülleri birbiriyle karşılaştırılarak aralarındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, lastik agregalı beton üretimi için su, çimento, kum (0-4 mm), çakıl (4-8 mm), ince lastik agrega (0-4 mm) ve iri lastik agrega (4-8 mm) kullanılmıştır. Lastik içermeyen (Kontrol) beton karışım oranları TS 802'ye göre hazırlanmıştır. Kontrol numunelerin tasarımında kum (0-4 mm) ve çakıl (4-8 mm) agrega grupları 1 m³ beton içerisinde hacimsel olarak toplam karışımın sırasıyla %39 ve %21'ini oluşturmaktadır. Lastik agregaların maksimum tane çaplarının 8 mm olması nedeniyle beton karışım hesabı maksimum tane çapı 8 mm'ye göre yapılmıştır. TS 802'ye göre maksimum agrega çapı 31,5 mm olan agrega kullanılarak beton üretildiğinde hedef dayanımın 40 Mpa olabilmesi için su/çimento oranının 0,43 olması gerektiği belirtilmiştir. Agregatane çapı küçüldükçe suyla agrega temas yüzeyinin artması nedeniyle hidrasyonun yeterli düzeyde sağlanabilmesi ve işlenebilirliğin azalmaması için su/çimento oranının artırılması gerekmektedir. Agregatane çapının 8 mm olması nedeniyle hem hidrasyon ve işlenebilirliğin sağlanabilmesi hem de hedef dayanıma ulaşılabilmesi için su/çimento oranı 0,55 olarak seçilmiştir.

Üretilen lastik agregalı beton karışımlarında, ince lastik agregalar kum ile iri lastik agregalar da çakıl ile hacimsel olarak %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bu çalışmada üretilen beton karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir.

2.1. Çimento (Cement)

Bu çalışmada üretilen lastik agregalı betonlarda Elazığ Altınova Çimento Fabrikasından temin edilen PÇ 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır, kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

2.2. Normal Agregası (Normal Aggregate)

Bu çalışmada normal agregası olarak maksimum tane çapı 8 mm ve birim hacim ağırlığı 2,56 gr/cm³ olan

Palu kumu kullanılmıştır. Agregalar, 0-4 mm (kum) ve 4-8 mm (çakıl) olmak üzere iki sınıfa ayrılmış ancak granülometri ergisinde her iki aralık için elde edilen değerler (% geçen) sürekli granülometri sağlayacak şekilde tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Karışımda kullanılan agregalara ait granülometri eğrisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Üretilen lastik agregalı betonda kullanılan agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3’de özetlenmiştir.

2.3. Lastik Agregası (Rubber Aggregate)

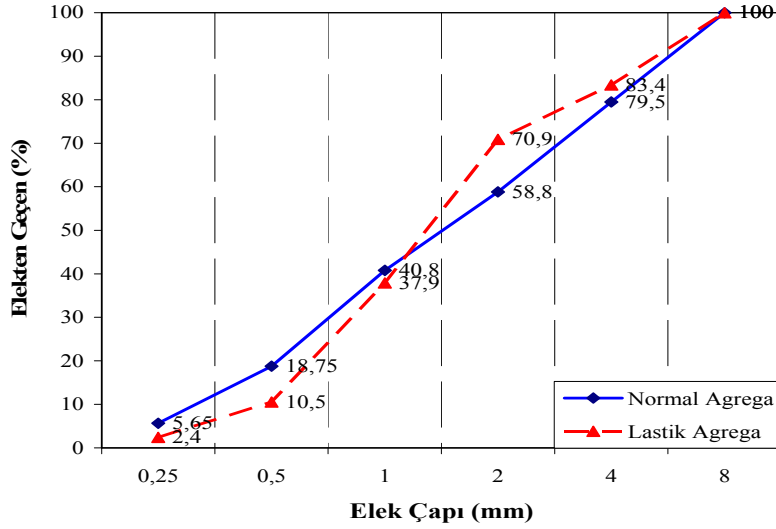
Deneylerde kullanılan lastik agregalar, lastik kaplama imalatı sırasında lastiklerin sırt kısımlarının mekanik kesme aleti ile kesilmesiyle elde edilmiştir. Kesilen lastik parçacıkları eleklerden elenerek 0-4 mm (ince lastik agregası) ve 4-8 mm (iri lastik agregası) olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. İnce lastik agregalarının

Tablo 1. Beton karışımına giren malzeme oranları (1 m³) (Mix proportion of concrete)

Karışıma Giren Malzemeler		Lastik Agregası İçeriği (%)									
		0 (Kontrol)		5		10		15		20	
		Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)	Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)
İnce Lastik Agregası	Su	0.230	230	0.230	230	0.230	230	0.230	230	0.230	230
	Çimento	0.138	418	0.138	418	0.138	418	0.138	418	0.138	418
	Lastik Agregası	0.0	0.0	0.0298	28.35	0.0597	56.71	0.0895	85.06	0.119	113.41
	Doğal Kum	0.388	993.0	0.358	916.62	0.328	840.22	0.298	763.81	0.269	687.41
	Çakıl	0.209	535.0	0.209	535.04	0.209	535.04	0.209	535.04	0.209	535.04
İri Lastik Agregası	Su	0.230	230	0.230	230	0.230	230	0.230	230	0.230	230
	Çimento	0.138	418	0.138	418	0.138	418	0.138	418	0.138	418
	Lastik Agregası	0.0	0.0	0.0298	27.2	0.0597	54.3	0.0895	81.5	0.119	108.6
	Doğal Kum	0.388	993.0	0.388	993.0	0.388	993.0	0.388	993.0	0.388	993.0
	Çakıl	0.209	535.0	0.179	458.6	0.149	382.2	0.119	305.8	0.089.6	229.4

Tablo 2. Deneylerde kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler (Physical, chemical and mechanical properties of the cement used for the tests)

Kimyasal özellikler	Fiziksel özellikler	Mekanik özellikler
Silisyum dioksit (SiO ₂) (%)	20.4	Özgül ağırlık, (gr/cm ³)
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃) (%)	5.61	Özgül yüzey, (cm ² /gr.Blaine)
Demir oksit (Fe ₂ O ₃) (%)	3.27	Hacim genişmesi, (mm)
Kalsiyum oksit (CaO) (%)	63.01	Priz başlama süresi, (h/dk.)
Mağnezyum oksit (MgO) (%)	2.49	Priz sonu, (h/dk.)
Kükürt trioksit (SO ₃) (%)	2.26	
Klorür (Cl) (%)	0.006	
Kızdırma kaybı (%)	1.64	
Tayin edilemeyen (%)	1.68	



Şekil 1. Normal ve lastik agregaya ait granülometri eğrisi (Granulometric curve of the normal and the rubber aggregate)

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri (Physical properties of the aggregate)

Agrega Tane Sınıfı (mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)	Kil Miktarı (%)	Donma Çözülme Kaybı (%)	Aşınma Kaybı 500 Devir (%)
0-4	2,56	3.5	2	9	16,8
4-8	2,65				

ölgül ağırlıkları 0,95 gr/cm³ ve iri lastik agregaların ölgül ağırlıkları da 0,91 gr/cm³ olarak belirlenmiştir [22]. Deneylerde kullanılan lastik agregalara ait elek analizi grafiği Şekil 1’de verilmiştir.

2.4. Beton Karakteristikleri (Concrete Characteristics)

Karışım oranlarına göre hazırlanan betonlar; birim ağırlık, yarmada çekme ve basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla 6 adet 15x15x15 cm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı için ise 3 adet 10x10x50 cm boyutlarındaki standart prizmalar kullanılmıştır. Kalıplara dökülen beton numuneleri 28 gün kür şartlarında bekletildikten sonra birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımları belirlenmiştir. Kontrol ve lastik agregalı betonlara ait fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve eğilmede çekme dayanımı sonucunda her bir kiriş numunesinin orta noktasına yerleştirilen komparatörle kirişlerin kırılma anındaki sehim değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Üretilen lastik agregalı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri ile sehim ölçüm sonuçları Tablo 4’de özetlenmiştir.

Beton içerisinde lastik agregası kullanımı ile betonun basınç ve yarmada çekme dayanımlarında lastik içeriği arttıkça bir azalma meydana gelmektedir. Beton içerisinde ince lastik agregası kullanımı ile lastik agregalı beton numunelerinin eğilme dayanımları basınç ve yarmada çekme dayanımlarında olduğu gibi lastik içeriği arttıkça azalmıştır. Ancak iri lastik agregası kullanımı ile betonun eğilme dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca eğilme deneyi esnasında

lastik agregalı beton numunelerinin orta noktalarından alınan sehim değerlerinin kontrol numunelerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

2.5. Elastisite Modülünün Belirlenmesi (Determine of the modulus of elasticity)

Elastisite modülü, betonarme elemanın uzama ve deformasyonunun belirlenmesi amacıyla kullanılabilir ve daha çok teorik metotlarla hesaplanmaktadır. Beton dayanımına bağlı olarak geliştirilmiş olan bazı ampirik formüllerle hesaplanan elastisite modülü için Türk Standartları Enstitüsü (TSE) [23], Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) [24], İngiliz Standart Enstitüsü (BSI) [25] ve Avrupa Beton Komitesi (CEB) [26] tarafından önerilmiş ve geleneksel beton için birbirine yakın sonuçlar veren formüller kullanılmaktadır (Tablo 5).

Deneysel olarak elastisite modülünün belirlenmesinde genel olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulan numunenin yük-deformasyon eğrisinden faydalanılır. Diğer taraftan, deneysel olarak betonun elastisite modülü, üç nokta eğilme deneyinde basit kiriş numunelerinin orta noktalarından ölçülen sehim miktarlarından faydalanılarak da belirlenebilmektedir. Üç nokta eğilme deneyi esnasında kiriş numunelerinin orta noktalarından ölçülen sehim miktarlarının şematik gösterimi aşağıdaki gibidir (Şekil 2).

Basit eğilme etkisindeki bir kirişte Şekil 3’deki kesit dikkate alındığında tarafsız düzlemin eğriliği ile eğilme momenti arasındaki bağıntı kirişin herhangi

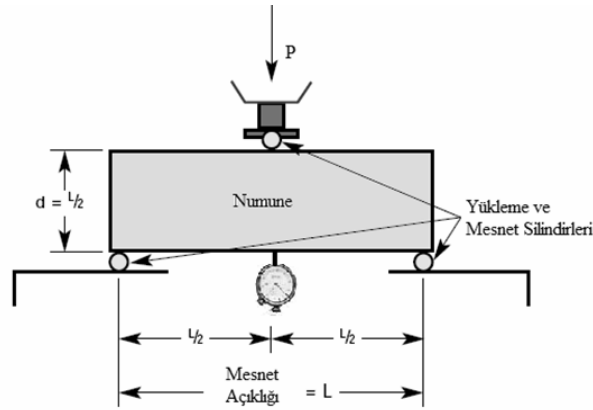
Tablo 4. Lastik agregalı betonlara ait fiziksel ve mekanik özellikler (Physical and mechanical properties of the rubber filled concrete)

Deneyler	Numuneler								
	Kontrol	%5		%10		%15		%20	
		İnce	İri	İnce	İri	İnce	İri	İnce	İri
Birim Ağırlık, (kg/m ³)	2260	2190		2120		2050		1980	
Basınç Dayanımı, (N/mm ²)	45,69	41,71	42,49	33,69	37,30	24,75	26,96	22,14	23,91
Eğilmede Çekme Dayanımı, (N/mm ²)	4,75	4,67	5,34	4,16	4,74	4,10	4,89	3,66	4,29
Yarmada Çekme Dayanımı, (N/mm ²)	4,191	3,087	3,741	2,928	3,141	2,622	2,676	2,346	2,238
Kırılma Anındaki Şehim, (mm)	0,043	0,045	0,061	0,065	0,063	0,074	0,087	0,068	0,077

Tablo 5. Elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan formüller (Equations used for determining the modulus of elasticity)

TSE	ACI	BSI	CEB
$E = 14000 + 3250\sigma^{1/2}$	$E = 0.043\omega^{3/2}\sigma^{1/2}$	$E = 9100(\sigma)^{1/3}$	$E = 9500(\sigma + 8)^{1/3}$

E=Elastisite Modülü (MPa), ω = Birim Ağırlık (kg/m³), σ = Basınç Dayanımı (Mpa)

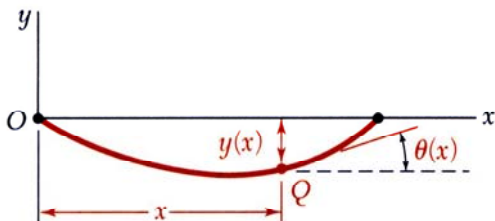
**Şekil 2.** Kiriş numuneleri üzerinden şehim ölçülmesi (Deflection measurement on the beam specimens)

bir kesitinin uç kısmına olan uzaklığı "x" ile ifade edilirse;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

denklemi yazılabilir (Denklem 1). Burada, "ρ", eğrilik yarıçapını, "M", eğilme momentini, "x", ele alınan kirişin sol ucundan olan uzaklığını, E, elastisite modülünü ve "I" da, kesitin tarafsız eksenine göre atalet momentini göstermektedir.

Düzlem içerisinde kalan bir eğrinin herhangi bir Q(x,y) noktasındaki eğriliği ise;

**Şekil 3.** Basit bir kirişte elastik eğri elemanları (Elastic curve members for the simple beams)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (2)$$

denklemi ile ifade edilmektedir (Denklem 2). Burada; "dy/dx" ve "d²y" ve "dx²" ifadeleri kirişin elastik eğrisini tanımlayan y(x) fonksiyonunun birinci ve ikinci türevleridir.

Bir kirişe ait elastik eğri denklemi dikkate alındığında dy/dx'in değeri çok küçük bir değere sahiptir ve 1 ile kıyaslandığında (dy/dx)² terimi ihmal edilebilir. Böylece;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3)$$

ifadesi yazılabilir (Denklem 3). "1/ρ" değeri 1. denklemde yerine yazılırsa;

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (4)$$

ifadesi elde edilir.

İkinci mertebeden diferansiyel bir denklem olan bu ifade elastik eğriye ait bir diferansiyel denklemdir. Elastisite modülü (E) ve atalet momenti (I)'nın çarpımı (EI), eğilme rijitliği olarak tanımlanmaktadır ve prizmatik kirişlerde (EI) eğilme rijitliği değeri sabittir. Bu nedenle Denklem 4'teki eşitliğin her iki tarafı EI sabiti ile çarpılıp x'e göre integrali alınır;

$$EI \frac{dy}{dx} = \int_0^x M(x) dx + C_1 \quad (5)$$

elde edilir (Denklem 5). Şekil 2'de görüldüğü gibi, $\theta(x)$, elastik eğri üzerinde bulunan Q noktasından çizilen teğet ile yatay doğru arasındaki açısının radyan cinsinden ifadesidir ($\frac{dy}{dx} = \tan \theta \cong \theta(x)$). $\theta(x)$ değeri Denklem 5'de yerine yazılırsa;

$$EI \theta(x) = \int_0^x M(x) dx + C_1 \quad (6)$$

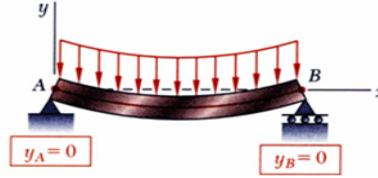
elde edilir (Denklem 6) ve Denklem 6'nın x'e göre integrali alınır;

$$EI y = \int_0^x \left[\int_0^x M(x) dx + C_1 \right] dx + C_2 \quad (7)$$

elde edilir (Denklem 7). C_1 ve C_2 integral sabitlerini belirlemek için sınır şartları kullanılabilir. Basit kiriş için sınır şartları Şekil 4'de gösterilmiştir.

Bu sınır şartlarına göre çözüm yapılırsa basit bir kiriş için elastisite modülü (E) hesaplanmış olur (Denklem 8) [26].

$$E = \frac{PL^3}{48Iy} \quad (8)$$



Şekil 4. Eğilme etkisindeki basit bir kirişte sınır şartlarının belirlenmesi (Determining the end conditions of the beams under the flexure)

Burada;

E = Elastisite modülü (MPa),

P = Yük (N),

y = Kirişin orta noktasından ölçülen sehim miktarı (mm),

L = Mesnet açıklığı (mm),

I = Atalet momentini (mm⁴) ifade etmektedir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

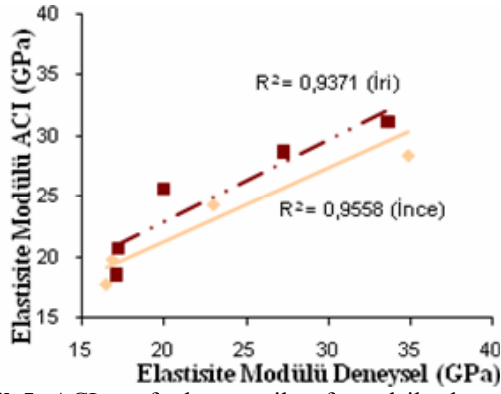
Beton içerisine lastik agrega ilave edilerek üretilen lastik agregalı betonların elastisite modülleri farklı metotlara göre hesaplanmış ve hesaplanan elastisite modülü değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Beton içerisinde lastik agrega kullanımı ile betonun elastisite modülünde bir azalma gözlenmiştir. Teorik formüllerle elde edilen elastisite modülü değerleri ile deneysel olarak elde edilen elastisite değerleri incelendiğinde, yalnızca dayanıma göre elastisite modülü tahmini yapan formüllerle elde edilen değerlerin, deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değerleri ile arasındaki farkın lastik agrega miktarı arttıkça arttığı görülmüştür. Deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değeri ile teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 5, 6, 7 ve 8).

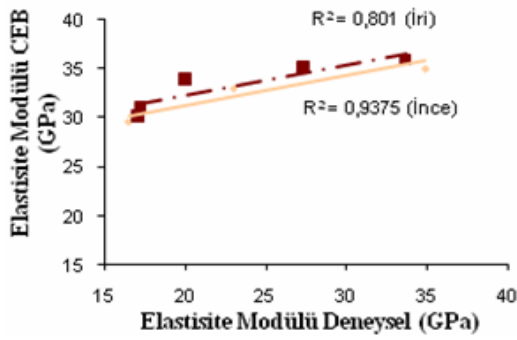
ACI tarafından önerilen denklemde elastisite modülünün hesabı basınç dayanımı ve birim ağırlığa göre hesaplanmaktadır. Teorik hesap sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında lastik ilavesi arttıkça ACI tarafından önerilen denklem kullanılarak elde edilen elastisite modülü değerleri ile deneysel

Tablo 6. Üretilen lastik agregalı betonların farklı metotlarla hesaplanan elastisite modülü değerleri (Modulus of elasticity values calculated with different method of rubber filled concrete)

Yöntem	Numune Adı	Elastisite Modülü (MPa)				
		Kontrol	%5	%10	%15	%20
TSE	İnce	35968	34990	32864	30169	29292
	İri		35185	33849	30875	29892
ACI	İnce	31186	28461	24363	19856	17826
	İri		28726	25635	20723	18525
BSI	İnce	32532	31559	29391	26520	25553
	İri		31754	30405	27287	26216
CEB	İnce	35839	34931	32941	30394	29565
	İri		35112	33865	31063	30132
Deneysel	İnce	33630	34837	23002	16866	16494
	İri		27274	19972	17213	17079



Şekil 5. ACI tarafından önerilen formül ile deneysel veriler arasındaki ilişki (Relationship between ACI equation and experimental results)



Şekil 6. CEB tarafından önerilen formül ile deneysel veriler arasındaki ilişki (Relationship between CEB equation and experimental results)

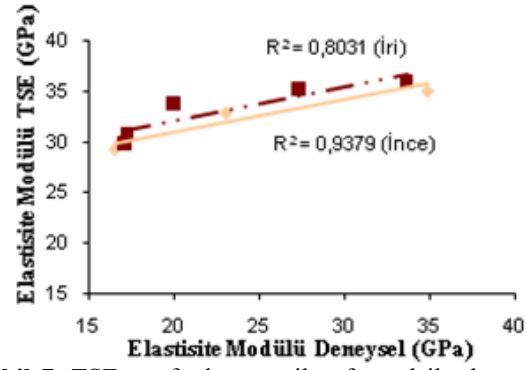
olarak elde edilen değerlerin birbiri ile uyum sağladığı görülmüştür.

Beton içerisine lastik agrega ilavesi ile birim ağırlık ve basınç dayanımında meydana gelen değişiklikler dikkate alındığında, lastik agregalı betonların elastisite modüllerinin tayininde ACI tarafından verilen formülün daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

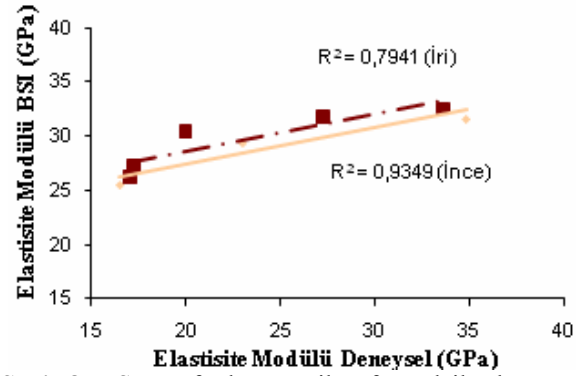
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and CONCLUSION)

Bu çalışmada, beton içerisinde ince ve iri lastik agrega kullanımı ile elde edilen beton numunelerin deneysel ve teorik olarak belirlenen elastisite modülleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar yazılabilir;

- Beton içerisinde lastik agrega içeriği arttıkça basınç, yarmada çekme ve elastisite modülü değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Lastik agrega ile üretilmiş numunelerin sertleşmiş beton özellikleri incelendiğinde, numunelerin basınç, çekme ve elastisite modülü değerlerinin birbiri ile paralel sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- TSE, ACI, BSI ve CEB gibi standartlarda mevcut olan ve betonun elastisite modülünün belirlenmesi için önerilen ampirik formüller, normal beton için oldukça yakın sonuçlar vermektedir.



Şekil 7. TSE tarafından önerilen formül ile deneysel veriler arasındaki ilişki (Relationship between TSE equation and experimental results)



Şekil 8. BSI tarafından önerilen formül ile deneysel veriler arasındaki ilişki (Relationship between BSI equation and experimental results)

- Beton içerisinde lastik agrega kullanımı ile lastik içeriğine bağlı olarak elastisite modülünün önceden tahmininde kullanılan ve sadece beton dayanımına bağlı olan formüllerle deneysel sonuçlar arasındaki fark artmıştır.
- Beton içerisine %5 ince ve iri lastik kullanımında deneysel olarak belirlenen elastisite modülü ile TSE tarafından önerilen formülle belirlenen elastisite modülü arasındaki fark sırasıyla -%0,44 ve -%29 iken %20 ince ve iri lastik kullanımında ise bu fark sırasıyla -%77 ve -%75 olarak belirlenmiştir.
- Beton içerisine %5 ince ve iri lastik kullanımında deneysel olarak belirlenen elastisite modülü değeri ile ACI tarafından önerilen formülle belirlenen elastisite modülü arasındaki fark sırasıyla +%18 ve -%5 iken %20 ince ve iri lastik kullanımında ise bu fark sırasıyla -%8 ve -%8,5 olarak belirlenmiştir.
- Beton içerisine %5 ince ve iri lastik kullanımında deneysel olarak belirlenen elastisite modülü değeri ile CEB tarafından önerilen formülle belirlenen elastisite modülü arasındaki fark sırasıyla -%0,27 ve -%28 iken %20 ince ve iri lastik kullanımında ise bu fark sırasıyla -%79 ve -%77 olarak belirlenmiştir.
- Beton içerisine %5 ince ve iri lastik kullanımında deneysel olarak belirlenen elastisite modülü değeri ile BSI tarafından önerilen formülle

belirlenen elastisite modülü arasındaki fark sırasıyla +%9,4 ve -%16 iken %20 ince ve iri lastik kullanımında ise bu fark sırasıyla -%54 ve -%53 olarak belirlenmiştir.

- Deneysel veriler değerlendirildiğinde, lastik agregalı betonların elastisite modüllerinin önceden tahmininde sadece basınç dayanımına bağlı olarak yapılan hesaplamaların gerçek elastisite modülü değerinden farklı sonuçlar verdiği fakat hem birim ağırlık hem de basınç dayanımına bağlı olarak elastisite modülü tahmini yapan ACI tarafından önerilen daha doğru sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Emiroğlu, M., **Atık Taşıt Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
2. Epps, J. A., "Uses of recycled rubber tires in highways", Synthesis of highway practice 198, **Transportation Research Board, National Research Council**, Washington, D.C., 1994.
3. Sobral, M., Samagaio, A.J.B., Ferreira, J.M.F., Labrincha, J.A. "Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate" **Journal of Materials Processing Technology**, 142, 427-433, 2003.
4. Sukontasukkul, P., Chaikaew, C., "Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber", **Construction and Building Materials**, 20, 7, 450-457, 2006.
5. Batır, B., **Türkiye İçin Kullanılmış Lastik Yönetimi Araştırması**, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
6. www.lasder.com
7. Tantala, M. W., Lepore, J. A., and Zandi, I., "Quasi-Elastic Behavior of Rubber Included Concrete", "12th International Conference on Solid Waste Technology and Management" 1996.
8. Nehdi, M. and Khan, A., "Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications", **Cement and Concrete Aggregates**, CCAGDP, 2001, Vol. 23, No. 1, June pp. 3-10.
9. Siddique, R. and Naik, T. R., 2004, "Properties of Concrete Containing Scrap-Tire Rubber- an Overview", **Waste Management**, 24, 563-569.
10. Celik, O. N., "The Fatigue Behaviour of Asphaltic Concrete Made With Waste Shredded Tire Rubber Modified Bitumen", **Turk. J. Engin. Environ. Sci.**, 2001, 25, 487-495 (in Turkish).
11. H.B. Takallou and R.G. Hicks, "Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified Asphalt Pavements", **Transportation Research Record**, 1171, 1988.
12. Jay L. McQuillen Jr., H.B. Takallou, R.G. Hicks, and Dave Esch, "Economic Analysis of Rubber-Modified Asphalt Mixes", **Journal of Transportation Engineering**, Vol. 114, 1988.
13. David C. Esch, "Construction and Benefits of Rubber-Modified Asphalt Pavements", **Transportation Research Record 860**, 1982.
14. Dore, G., Konrad, J.M., Roy, M. and Rioux, N., "The Use of Alternative Materials in Pavement Frost Protection: Material Characteristics and Performance Modeling," **Transportation Research Record No. 1481**, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 63-74, 1995.
15. Topcu I.B., "Assessment of brittleness index of rubberized concretes", **Cem. Concr. Res.**, 27 (2) 177-183, 1997.
16. Khatib Z.K., Bayomy F.M., "Rubberized Portland cement concrete", **J. Mater. Civ. Eng.**, 11 (3) 206-213 1999.
17. F. Hernáandez-Olivares, G. Barluenga, M. Bollati, B. Witoszek, "Static and dynamic behavior of recycled tyre rubber-filled concrete", **Cem. Concr. Res.**, 32 (10) 1587-1596, 2002.
18. Li, Z.; Li, F. and Li, J. S. L. "Properties of concrete incorporating rubber tyre particles", **Magazine of Concrete Research**, 50, 297-304, 1998.
19. Emiroğlu M., Yıldız, S., Keleştemur, M. H., "An Investigation on ITZ Microstructure of the Concrete Containing Waste Vehicle Tire", **Computers and Concrete**, Vol. 5, No. 5, 503-508, 2008.
20. Segre N., Joekes I., "Use of tire rubber particles as addition to cement paste", **Cem. Concr. Res.**, 30 (9) 1421-1425, 2000.
21. Güneyisi, E., Gesođlu, M. and Özturan, T., "Properties of Rubberized Concretes containing Silica Fume", **Cement and Concrete Research**, 34, 2309-2317, 2004.
22. TS EN 1097-6, **Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yođunluđu ve Su Emme Oranının Tayini**, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 2002.
23. TS 500, **Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları**, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 2000.
24. ACI 318-92, **Building code requirements for reinforced concrete**, ACI Manual of Concrete Practice Part 3: 1994.
25. British Standards Institute (BSI), **Code of Practice for the Structural use of concrete**, CP110, Part 1, London, 1972.
26. Comité Euro-International du Beton, **CEB-FIP Model Code for Concrete Structures**, Bull.124/125, April 1978.
27. Beer, F. P., Johnston, E. R., **Cisimlerin Mukavemeti**, Beta Basım Yayım Dağıtım A.ř., 1306, İstanbul, 2003.