

LASTİK AGREGALI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA KIRILMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet EMİROĞLU¹, Servet YILDIZ², M. Halidun KELEŞTEMUR³

¹ Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

² Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

³ Melikşah Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,
Kayseri, Türkiye

Özet

Bu çalışmada lif şeklinde kesilmiş atık otomobil lastikleri ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların kırılma parametreleri araştırılmıştır. Çalışmada kendiliğinden yerleşen beton içerisinde %15, %30, %45 ve %60 oranlarında atık otomobil lastiği agrega olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda atık lastik kullanımıyla kendiliğinden yerleşen betonların elde edilebildiği ancak yüksek lastik ikamelerinde (%30'un üzerinde) karışımın akışkanlık parametrelerinin azaldığı gözlenmiştir. Elde edilen lastik agregalı kendiliğinden yerleşen betonun gevrekliği ise lastik ikamesinin artmasıyla azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Lastik Agrega, Kendiliğinden Yerleşen Beton, İki Parametrelili Metot, Pık Yük Metodu

DETERMINATION OF FRACTURE MECHANICS PARAMETERS OF SELF- CONSOLIDATING RUBBERIZED CONCRETE

Abstract

Fracture parameters of self-consolidating rubberized concrete have been investigated. The concrete is produced by using rubber pieces which are chopped from wasted automobile tires. Particles of wasted automobile tire in the concrete have been mixed in the rates of 15, 30, 45 and 60% instead of using aggregate. Consequently, self-consolidated concrete with rubber particles has been successfully produced; however, it is observed that the fluidity parameters of the concrete mixture at higher rates of rubber contents, higher than 30%, go down. The brittleness of the self-consolidated rubberized concrete decreases with the increasing rate of rubber content.

Keywords: Rubber Aggregate, Self-Consolidating Concrete, Two Parameter Method, Peak Load Method

1. GİRİŞ

Yüksek akışkan özelliğe sahip, sık donatılı alanlara kolaylıkla yerleşebilen ve aynı zamanda dayanım ve dayanıklılık açısından yüksek performans sergileyen bir beton üretiminin gerçekleştirilmesi hususu bu malzemenin tarihsel gelişimi sırasında en önemli sorunlardan biri olmuştur. İlk olarak 80'li yılların sonuna doğru Japonya'da geliştirilen ve bahsedilen özelliklere sahip yüksek performanslı betona zaman içerisinde çeşitli isimler verilmiş olmasına rağmen literatüre Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) olarak geçmiştir [1]. Atık lastiklerin beton içerisinde agrega olarak değerlendirilmesi yaklaşık otuz yıldır çeşitli araştırmacılar tarafından irdelenmektedir. Burada amaç, doğal agregaya göre çok daha hafif ve esnek olan lastik atıklarını beton içerisinde değerlendirilmesi ile hem çevreye zarar veren katı atıkların bertarafına katkı sağlamak hem de betonun yük altında aniden hasar görmesine sebep olan gevrek davranışını sınırlandırmaktır. Bu amaçla, geleneksel beton içerisinde agrega yerine lastik agregaların kullanılması ile başlayan ve öncülüğünü Eldin ve Senouci (1993); Topçu (1995); Li vd., (1998); Katip ve Bayomy (1999) gibi araştırmacıların yaptığı çalışmalar yürütülmüştür [2-5]. Lastik agregaların temel karakteristiklerinin belirlendiği ilk çalışmaları, bu betonların, statik ve tekrarlı dinamik yükler altındaki davranışları, farklı yüzey işlemleri uygulayarak lastik agregalara yüzey pürüzlülüğü kazandırıp aderansın artırılması, kırılma performanslarının değerlendirilmesi, donma çözülme, korozyona ve sülfat iyonlarına karşı göstermiş olduğu direnç, ses ve ısı yalıtım kapasiteleri, kaldırım parkesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ve daha bir çok yeni çalışma izlemiştir [6-15]. Günümüze kadar yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde lastik agregalar ya ince öğütülmüş toz halinde ya da yonga halinde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda lif şekilli lastiklerin performanslarının yonga şekilli olanlara nazaran daha iyi olduğu bildirilmiştir. Ancak boy/çap oranlarının çok yüksek olmaması gerektiği aksi takdirde karıştırma işlemi esnasında lif şekilli lastiklerin birbirine dolanma riski taşıdıkları bilinmektedir [8, 16].

Bu çalışmada, lastik kaplama işlemi sırasında atık olarak ortaya çıkan ve lif şeklinde elde edilebilen lastik agregalar kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton üretimi olanakları ile bu betonların kırılma parametreleri araştırılmıştır.

2. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ

Metaller için kırılma mekanik test yöntemlerinin temelleri oldukça iyi kurulmuştur. Ancak, plastik, seramik ve kompozitlerin kırılma mekanik temelleri nispeten yenidir ve çözüme kavuşmamış birçok husus vardır [17]. Literatürde malzemelerin gerilme-deformasyon eğrileri göz önünde bulundurularak birçok mühendislik materyali gevrek ve sünek dışında bir üçüncü kategori olan yarı gevrek (quasi-brittle) malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genellikle gevrek (brittle) olarak tanımlanmasına rağmen gerçekte ileri seramiklerin çoğundan daha dayanıklı olan yarı-gevrek bir malzemedir [18, 19]. Yarı-gevrek malzemelere en iyi örnekler, beton, buz, kaya ve bazı seramikler olarak sıralanabilir.

Kırılma mekaniklerinin incelenmesinde kullanılan ve malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içerisinde kalması prensibinden hareketle geliştirilen analitik ifadelerin tümüne Lineer Elastik Kırılma Mekanik (LEKM) denmektedir. Bu metodun temel prensibi, çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlak ucuna ve yönüne bağlı olarak ifade edilmesidir [20].

Eğer kırılma işlemi çatlak ucundaki tek bir noktada meydana geliyorsa tüm gövde elastiktir ve lineer elastisite kullanılabilir. Ancak, kırılma işlemi sonsuz bir çizgi üzerinde ya da sonsuz bir bölgede meydana geliyorsa gövde lineer olmayan (nonlinear) anlamda davranır. Kırılma işlem bölgesi çok geniş olan ve tek bir nokta olarak düşünülmecek birçok gevrek malzeme bulunmaktadır [21]. Betonun içyapısının farklı düzeylerde heterojen olduğu ve herhangi bir yük uygulamasından önce bile bünyesinde bazı mikro çatlaklar ve gözenekler bulunduğu bilinmektedir. Dolayısıyla betonda belirli bir gerilme durumu altında kırılma, bu mikro çatlaklardan en kritik olanlarının, en kritik gerilme yığılma noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu olacaktır. Bu sırada diğer çatlaklar oluşmaya ve yayılmaya devam edecektir. Beton, ilerleyen çatlak önünde oluşan kırılma-gelişme bölgesinin varlığı nedeniyle çekme gerilmeleri altında yumuşama davranışı gösterir ve bu nedenle yarı-gevrek bir malzeme kabul edilir. Çatlak ucunda gerilmenin teorik olarak sonsuza gittiğini varsayan LEKM beton gibi yarı gevrek malzemelere doğrudan uygulanamaz. Bundan dolayı, lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir [22]. Yarı gevrek malzemelerin kırılma mekaniği modelleri Fiktif Çatlak Modeli ve Eşdeğer-Elastik Çatlak Yaklaşımı (Etkif-Elastik Çatlak Modeli) olarak sınıflandırılabilir [18].

Jenq ve Shah tarafından geliştirilen betonun iki parametrelili kırılma modeli Etkif-Elastik Çatlak Modelini esas almaktadır. Burada, çentik uzunluğu a_0 olan gerçek bir yapının pik yük öncesi lineer olmayan davranışı çatlakın etki uzunluğu a_c ($a_c > a_0$) olan eşdeğer elastik bir yapı vasıtası ile kurulur [23]. İki bağımsız malzeme parametresi olan kritik gerilme yoğunluk faktörü K_{Ic}^s ve kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi $CTOD_c$ etkili çatlakın kritik durumu için tanımlanır. Bu kritik durum genellikle maksimum yükte ve aynı zamanda etkili çatlak uzunluğuna (a_c) erişildiğinde söz konusu olmaktadır. Bu kritik durumda;

$$K_I = K_{Ic}^s \text{ ve } CTOD = CTOD_c \quad (1)$$

olmaktadır.

İki parametrelili modelde çözüme iki yoldan ulaşılmaktadır. Bunlar komplians metodu ve pik yük metodudur (Alyamaç, 2008). İki parametrelili modelde, komplians metoduna nazaran daha az kapasiteli deney ekipmanına ihtiyaç duyulmasına rağmen, "ya aynı boyutta farklı çentik boyuna ya da farklı boyutta aynı relatif çentik boyuna sahip" en az iki numunenin pik yük değerinin belirlenmesi esastır. Bu metod, hem üç noktalı eğilmeye maruz kirişlere, hem silindirik numunelere hem de eksantrik basınç numunelerine uygulanabilmektedir [18, 23]. Ayrıca bu model çentikli ya da çentiksiz numune ve yapılara uygulanabilmektedir [24].

Metot iki farklı numune üzerinden alınan K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ gibi kırılma parametrelerini aşağıdaki eşitliklerle çözümlemeye çalışır.

$$K_I^1(\sigma_{Nc}^1, a_c^1) = K_{Ic}^s \quad (2)$$

$$CTOD^1(\sigma_{Nc}^1, a_c^1) = CTOD_c \quad (3)$$

$$K_I^2(\sigma_{Nc}^2, a_c^2) = K_{Ic}^s \quad (4)$$

$$CTOD^2(\sigma_{Nc}^2, a_c^2) = CTOD_c \quad (5)$$

Burada 1 ve 2 olarak kullanılan üst simgeler iki farklı numuneyi temsil etmektedir. K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ birer malzeme özelliğidir ve verilen malzeme için aynı olmalırlar, bu katsayılar

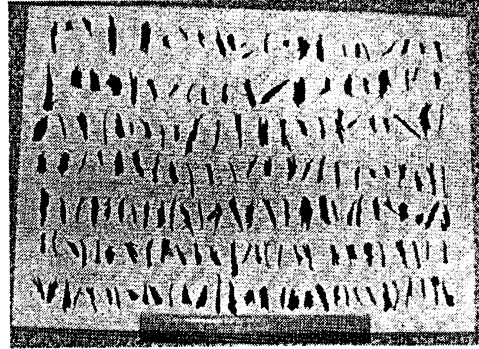
geometriden ve numune boyutlarından bağımsızdır. σ_N gerilmeleri alınan yük değerine göre hesaplanabildiğinden, eşitlikteki ifadelerden bilinmeyen olarak yalnızca a_c^1, a_c^2, K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ kalmaktadır. Bu da önerilen bu modelin teorik temelini oluşturur ve bu dört nonlineer denklem takımının çözümü ile K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ elde edilmiş olur [25].

3. MATERYAL VE METOT

Lastik agregalı KYB üretimi için hammadde olarak, su, CEM I 42,5 R ve CEM IV/B (P) 32,5 R olmak üzere iki farklı çimento, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu, ince agreg (0-4,75 mm), iri agreg (4,75-12,5 mm), lastik agreg, süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici kullanılmıştır. Lastik agregaların düşük birim ağırlıklarından dolayı segregasyon probleminin önlenmesi amacıyla lastik ilaveli KYB karışımlarında hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır. Çalışmada iki farklı çimento kullanılmasının sebebi, KYB üretiminin dezavantajlarından olan yüksek dozaj nedeniyle yüksek hidrasyon ve kuruma rötresi gibi sorunlardan kaçınmak ve karışımın viskozitesini ayarlamaktır.

Çalışmada ince (0 - 4,75 mm) ve iri agreg (4,75 -12,5 mm) olarak, Düzce yöresinden temin edilen Kapıcıoğlu A.Ş. firmasının ürettiği kireçtaşı kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan lastik agregalar, lastik kaplama işlemi sırasında ortaya çıkan atık lastiklerden seçilmiştir. Kaplama işlemi için hazırlanan kullanılmış lastiklerin temas yüzeyleri kesici aletler yardımıyla traşlanarak elde edilmiştir. Elde edilen lastikler beton içerisinde kullanmak üzere 4,75 mm elekten elenmek suretiyle ince malzemelerden arındırılmıştır. Eleme işlemi sonrası elde edilen lastik agregaların görünüşleri Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. Lif şeklindeki lastik agregalar.

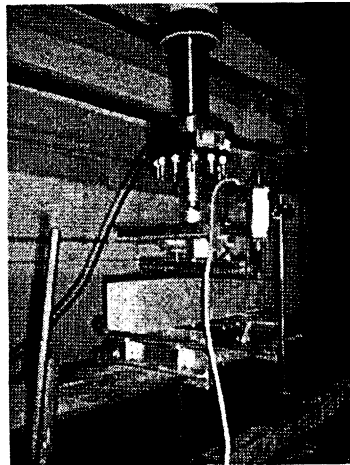
Lastik agregalı KYB üretiminde önce lastik içermeyen (referans) KYB tasarımı gerçekleştirilmiş ve KYB içerisinde lastik kullanımının beton özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla, literatürde sık karşılaşılan bir yöntem kullanılarak, lastik agregalar iri agreg ile hacimsel olarak yer değiştirilmiştir [3, 5, 9, 26]. Lastik agreg içeren KYB karışımlarında olası segregasyon problemini önlemek amacıyla, toplam bağlayıcı oranının % 0,5'i oranında hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

Bu çalışmada, referans KYB karışım oranları belirlendikten sonra karışıma ait doğal iri agregalar hacimce %0, %15, %30, %45 ve %60 oranlarında atık lastik agregalarla yer değiştirilerek lastik agregalı KYB karışımları hazırlanmıştır. Tüm serilere ait karışım oranları Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. KYB karışım oranları (1 m³).

Bileşen	Numune Kodu-Lastik Agregası Oranı (%)				
	R0	R15	R30	R45	R60
	0	15	30	45	60
Çimento (CEM I) (kg/m ³)	300	300	300	300	300
Çimento (CEM IV) (kg/m ³)	165	165	165	165	165
Yüksek Fırın Cürufu (kg/m ³)	135	135	135	135	135
Toplam Filler (kg/m ³)	600	600	600	600	600
Su (kg/m ³)	170	170	170	170	170
Su/Filler (kg/m ³)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Su/Çimento	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
Akışkanlaştırıcı (% 1,5) (kg/m ³)	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Hava Sürükleyici (% 0,5) (kg/m ³)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
İnce Agregası (0-5 mm) (kg/m ³)	1192	1192	1192	1192	1192
İri Agregası (5-12 mm) (kg/m ³)	521	443	364	286	208
Lastik Agregası (5-12 mm) (kg/m ³)	-	26,6	53,2	79,9	106,5

Tablo 1’deki karışım oranlarına uygun olarak karıştırılan seriler kırılma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çentiksiz (0 mm) ile 30 mm ve 50 mm çentiğe sahip olmak üzere üç farklı çentik boyu ile hazırlanmış olan 10x10x50 cm³ boyutlarındaki prizma numuneler Şekil 2’de görüldüğü üzere üç nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Pik yük metodunda önemli olan numunelerin kırıldığı maksimum yük (pik yük) olduğundan pik yük değerleri kaydedilmiştir [27]. Hidrolik olarak yüklenen numunelerin pik yük değerleri kaydedilerek iki parametrelili modele uygun olarak K_{IC}^S ve $CMOD_C$ değerleri tüm seriler için 28. günde ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 2. Çentikli numunelerde üç nokta eğilme deneyi.

K_{IC}^S ve $CTOD_c$ parametrelerine ek olarak, bir malzeme parametresi olan elastisite modülü (E) ile birlikte kullanıldığı ve gevreklik indeksi olarak adlandırılan (Q) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır [28].

$$Q = \left[\frac{E \cdot CTOD_c}{K_{IC}^S} \right]^2 \quad (6)$$

Ayrıca, taze beton numuneleri üzerinde birim ağırlık, slump yayılma testleri ile 28 günlük standart kür işlemi ardından tüm serilerin basınç ve yarmada çekme dayanımları da belirlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar ait bazı taze ve sertleşmiş beton özellikleri Tablo 2'deki gibidir.

Tablo 2. KYB karışım oranları (1 m³)

Deney/Lastik Oranı	Numune Kodları				
	R0	R15	R30	R45	R60
	0	15	30	45	60
Slump Yayılma Çapı (mm)	720	775	725	642	615
Birim Ağırlık (kg/m ³)	2442	2319	2213	2066	1952
28 Basınç Dayanımı (MPa)	71.6	63.7	47.2	32.9	25.2

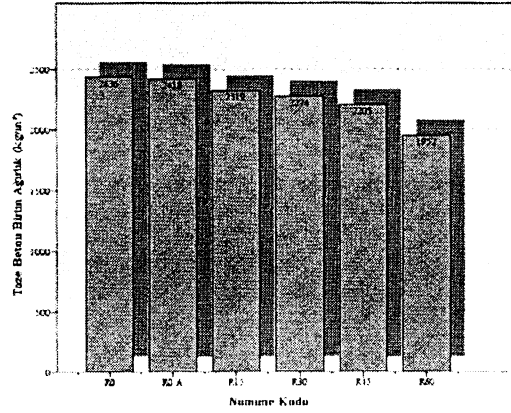
4. BULGULAR

Lastik agregaya ikameli kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin taze haldeki slump yayılma çapı ve birim ağırlık deney sonuçları Tablo 3 ve Şekil 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Slump yayılma deney sonuçları.

Numune Adı	Lastik Oranı	Slump Yayılma			
	(%)	d1 (mm)	d2 (mm)	D (mm)	T50 (sn)
R0	0	740	700	720	5,54
R15	15	765	785	775	2,55
R30	30	710	740	725	5,66
R45	45	640	644	642	8,01
R60	60	610	620	615	5,69

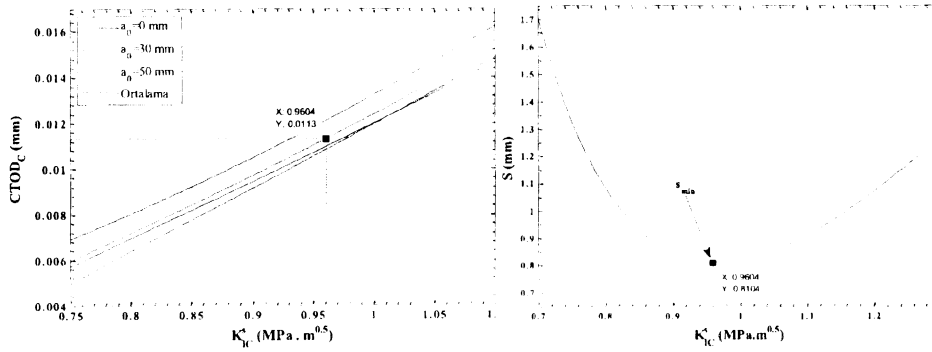
Lastik ikamesi ile birlikte hem slump yayılma çapı hem de T₅₀₀ akma sürelerinde bir azalma gözlenmiştir. Lif şekilli atık lastiklerin kesim işleminden kaynaklanan pürüzlü yapısı ve yüzey alanlarının doğal agregaya göre fazla olması nedeniyle oluşacak sürtünme sayesinde akmayı bir miktar engellemiştir. Ayrıca lastik agregaların düşük birim ağırlıklarının da yayılma çapındaki azalmanın bir nedeni olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. Taze beton birim ağırlık deney sonuçları.

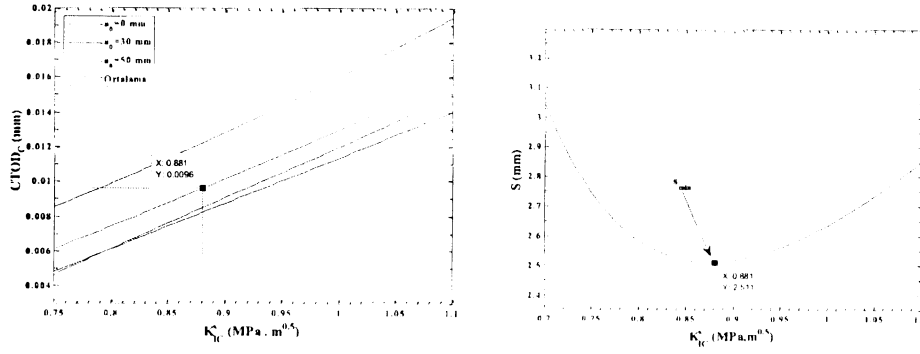
Şekil 3 incelendiğinde, düşük özgül ağırlığı nedeniyle lastik ikamesi ile birlikte numunelerin taze beton birim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmiştir. Şekil 3'e göre maksimum taze beton birim ağırlık değeri R0 referans serisinden elde edilirken minimum taze beton birim ağırlık değeri ise %60 lastik ikamesi içeren R60 serisinden elde edilmiştir.

Eğilme deneyi sonucunda elde edilen pik yük değerleri kullanılarak üç farklı çentik boyuna sahip numunelerin K_{Ic}^S - $CTOD_c$ grafikleri ile s - K_{Ic}^S değişimleri hesaplanarak Şekil 4'deki grafiklerde verilmiştir.



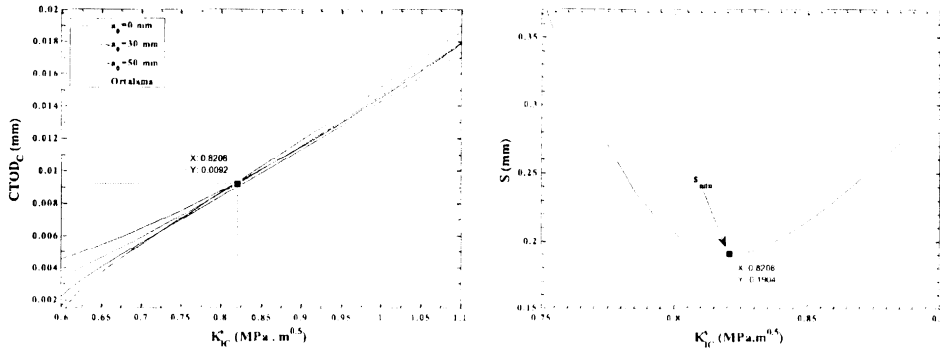
Şekil 4. R0 serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

Farklı çentik oranları için K_{Ic}^S ile $CTOD_c$ arasındaki değişim Şekil 4'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R0 referans serisi için K_{Ic}^S ve $CTOD_c$ değerleri sırasıyla 0,9604 ve 0,0113 olarak tayin edilmiştir. K_{Ic}^S değerini elde etmek amacıyla hesaplanan standart sapma (s) değerinin K_{Ic}^S ile arasındaki değişim incelendiğinde, minimum standart sapma (s_{min}) değeri olan 0,8104 değerine karşılık gelen 0,9604 değeri K_{Ic}^S olarak tayin edilmiştir.



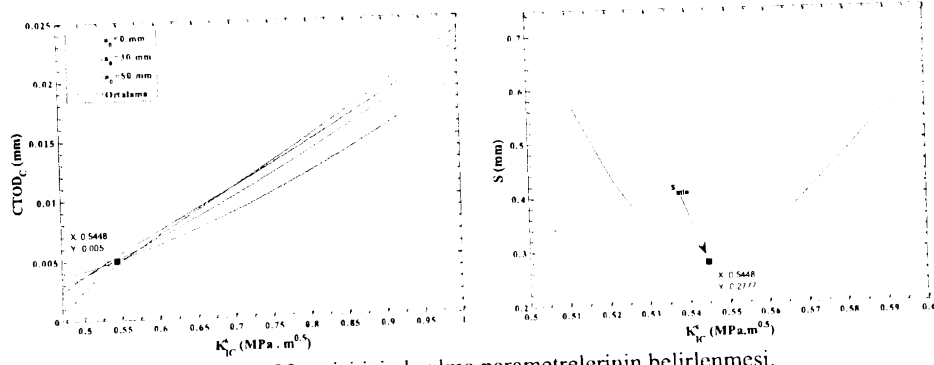
Şekil 5. R0-A serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

R0-A serisi için farklı çentik oranlarında K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil5’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R0-A referans serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 0,881 ve 0,0096 olarak elde edilmiştir. K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim incelendiğinde, (s_{min}) değeri olan 2,511’e karşılık gelen 0,881 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



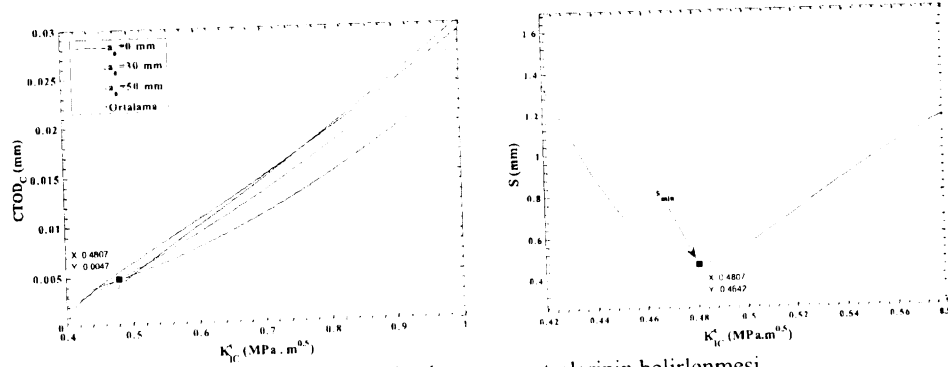
Şekil 6. R15 serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

R15 serisi için farklı çentik oranlarında K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil6’da görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R15 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 0,8208 ve 0,0092 olarak elde edilmiştir. K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim incelendiğinde, (s_{min}) değeri olan 0,1904’e karşılık gelen 0,8208 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



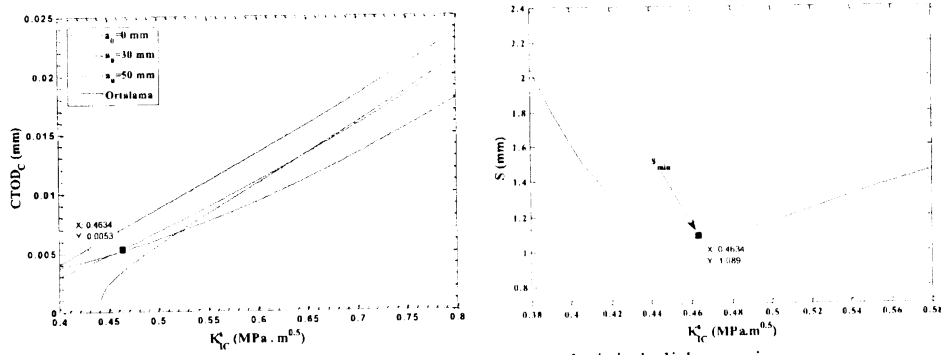
Şekil 7. R30 serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

R30 serisi için farklı çentik oranlarında K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 7Şekil 'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R30 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 0,5448 ve 0,005 olarak elde edilmiştir. K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim incelendiğinde, (s_{min}) değeri olan 0,2777'ye karşılık gelen 0,5448 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



Şekil 8. R45 serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

R45 serisi için farklı çentik oranlarında K_{Ic}^s ile CTOD_c arasındaki değişim Şekil 8Şekil 'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R45 serisi için K_{Ic}^s ve CTOD_c değerleri sırasıyla 0,4807 ve 0,0047 olarak elde edilmiştir. K_{Ic}^s değerini elde etmek amacıyla hesaplanan (s) değerinin K_{Ic}^s ile arasındaki değişim incelendiğinde, (s_{min}) değeri olan 0,4642'ye karşılık gelen 0,4807 değeri K_{Ic}^s olarak tayin edilmiştir.



Şekil 9. R60 serisi için kırılma parametrelerinin belirlenmesi.

R60 serisi için farklı çentik oranlarında K_{IC}^S ile $CTOD_c$ arasındaki değişim Şekil 9'da görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R45 serisi için K_{IC}^S ve $CTOD_c$ değerleri sırasıyla 0,4634 ve 0,0053 olarak elde edilmiştir. K_{IC}^S değerini elde etmek amacıyla hesaplanan (s) değerinin K_{IC}^S ile arasındaki değişim incelendiğinde, (s_{min}) değeri olan 1,089'a karşılık gelen 0,4634 değeri K_{IC}^S olarak tayin edilmiştir.

Tüm serilere ait kırılma parametreleri (K_{IC}^S ve $CTOD_c$) ile gevreklik indeksi Q değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Lastik agregalı KYB'lere ait kırılma parametreleri ve gevreklik indeksi değerleri.

R	K_{IC}^S	$CTOD_c$	Q
0	0,9604	0,0113	228,97
0-A	0,881	0,0096	182,00
15	0,8208	0,0092	157,63
30	0,5448	0,0050	68,02
45	0,4807	0,0047	55,89
60	0,4634	0,0053	64,36

İki parametrelili kırılma modelinde malzemenin düktilitesi üç farklı şekilde değerlendirilir. Yarı gevrek malzemelerde daha yüksek ön çatlak açılması daha düşük düktiliteye işaret etmektedir. Bu nedenle kritik çatlak uzunluğu (a_c) malzeme düktilitesinin bir göstergesidir. John ve Shah (1989) yüksek mukavemetli harçlar ile normal betonun gevrekliklerini karşılaştırmış ve dayanımın artması ile birlikte a_c değerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir [28]. Bu nedenle a_c test edilen numunenin boyutu ve şekline bağlıdır. Bunun yanında Jeng ve Shah (1985) a_c 'ye ek olarak boyuttan bağımsız olan ve düktiliteyi temsil eden $CTOD_c$ ve Q gibi iki farklı parametre daha belirlemişlerdir. Daha gevrek malzemelerde $CTOD_c$ ve Q daha düşük değerler almaktadır [29, 30].

Bu çalışmada lastik ikamesine bağlı olarak Q gevreklik indeksinin azaldığını yani malzemenin gevrekliğinde azalma gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda Q değerinin harç numuneleri için 50-150 mm arasında ve normal betonlar için ise 150-350 mm arasında değiştiği bilinmektedir [28]. Alyamaç (2008) farklı mermer tozlu KYB karışımları için Q

gevreklik indeksini 268 ile 370 mm arasında tayin etmiştir [23]. Bu çalışmada elde edilen Q değerleri ise 64 ile 229 mm arasında değişiklik göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, lastik kaplama işlemi sırasında atık olarak ortaya çıkan ve lif şeklinde elde edilebilen lastik agregaları kullanarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde taze beton özellikleri ile kırılma parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen tüm veriler ışığında aşağıda değerlendirilmiştir.

Lif şeklinde elde edilen atık lastikler KYB karışımları içerisinde hacimce %30 oranlarına kadar kullanmaya uygundur.

KYB karışımları içerisinde lastik agregası ikamesi ile birlikte slump yayılma çapı değerlerinde azalma gözlenmiş, ancak lastik agregalı karışımların segregasyon göstermediği ve yayılmanın homojenliğinde değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, lif şeklindeki lastik agregaların kullanımı ile T_{500} yayılma hızı değerlerinde referans karışımlara oranla bir artış gözlenmiştir. Lastik agregalar karışımın akışını engellemiş ve yayılmanın daha geç gerçekleşmesine neden olmuştur.

Taze beton birim ağırlık değerleri incelendiğinde KYB karışımlarında lastik ikamesi ile birlikte birim ağırlıkta düşüş sağlanmıştır. Bu durum lastik agregaların ikame edildikleri doğal agregadan daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır ve beklenen bir durumdur. R0-A serisi ile karşılaştırıldığında lastik ikameli karışımların taze beton birim ağırlık değerlerinde lastik ikamesi arttıkça sırasıyla, %4,09, %5,96, %8,81 ve %19,27 oranlarında azalma gözlenmiştir.

Kırılma parametreleri incelendiğinde, lif ikameli kendiliğinden yerleşen betonlarda pik yük metodu ile iki parametrelili kırılma modellerinin uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Deney sonuçlarına göre, lastik ikamesine bağlı olarak karışımların gevreklikleri artmıştır. Bu çalışmada elde edilen Q (gevreklik indeksi) değerleri 64 ile 229 mm arasında değişiklik göstermiştir. Ayrıca, kırılma parametreleri ile basınç dayanımları arasında bir uyum söz konusudur.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda kendiliğinden yerleşen lastik agregalı betonların ileri yaş dayanımları ve farklı lif boyutları denenerek optimum lastik içeriği ve lastik boyutları tayin edilebilir. Ayrıca deneysel çalışmalar göstermiştir ki lastik agregalar ile çimento pastası arasındaki aderans yüksek harç içeriği ile gelişmekte ancak yeterli seviyede olamamaktadır. Bu nedenle bundan sonra lastik agregalarla çimento pastası arasındaki aderansı geliştirecek yeni çalışmaların yapılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- 1) Okamura, H., Ouchi, M., 2003. Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Technology, Vol. 1 (1), pp. 5-15.
- 2) Eldin, N.N. and Senouci, A.B., Rubber-tire particles as concrete aggregates, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 5, No. 4, 1993, pp. 478-496.
- 3) Topçu, İ.B., 1995. The Properties of Rubberized Concretes, Cement and Concrete Research, 34, pp. 304-310.
- 4) Li, Z.; Li, F. and Li, J. S. L., 1998. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles, Magazine of Concrete Research, 50, pp. 297-304.

- 5) Khatib Z.K., Bayomy F.M., 1999. Rubberized Portland cement concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 11 (3), pp. 206-213.
- 6) Savaş, B.Z., Ahmad, S., Fredroff, D., 1996. Freeze-thaw Durability of Concrete with Ground Waste Tire Rubber, *Transportation Research Record No. 1574*, Transportation Research Board, Washington DC (1996), pp. 80-88.
- 7) Oliveras, H. F., Barluenga, M. B. and Witoszek, B., 2002, Static and Dynamic Behaviour of Recycled Tyre Rubber-Filled concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 1587-1596.
- 8) Guoqiang, L., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. and Huang, B., 2004. Development of waste tire modified concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2283-2289.
- 9) Güneysi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T., 2004. Properties of Rubberized Concretes containing Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, 34, 2309-2317, (2004).
- 10) Turgut P, Yesilata B, 2008. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks, *Energy and Buildings*, 40 (5), pp. 679-688.
- 11) Turgut, P., Yeşilata, B. ve Işiker, Y., 2007. Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-2: Hurda Lastik Katkılı Betonlar İçin Ölçüm Sonuçları, *Mühendis ve Makina*, 48 (565), pp. 33-39.
- 12) Zheng, L., Huo, X.S., Yuan, Y., 2008. Experimental Investigation on Dynamic Properties of Rubberized Concrete, *Construction and Building Materials*, 22 (5), pp. 939-947.
- 13) Taha, R.M.M., El-Dieb, A.S., Abd El-Wahab, M.A., and Abdel-Hameed, M.E., 2008. Mechanical, Fracture and Microstructural Investigations of Rubber Concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 20 (10), pp. 640-649.
- 14) Richardson, A.E., Coventry, K.A., Ward, G., 2012. Freeze/Thaw Protection of Concrete with Optimum Rubber Crumb Content, *Journal of Cleaner Production*, 23, pp. 96-103.
- 15) Keleştemur, O., 2010. Utilization of Waste Vehicle Tires in Concrete and its Effect on the Corrosion Behavior of Reinforcing Steels, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 17 (3), 363-370.
- 16) Emiroğlu, M., 2006. Atık Taşıt Lastiğinin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- 17) Anderson, T.L., 1995. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Second Edition, CRC Press, p. 680, USA.
- 18) Shah, S.P., Swartz, S.E., Ouyang, C., 1995. *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and Other Quasi-Brittle Materials*, John Wiley & Sons, Inc., p.552, Canada.
- 19) Landis, E.N., Nagy, E.N., 2000. Three-Dimensional Work of Fracture for Mortar in Compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 65 (2-3), pp. 223-234.
- 20) Yayla, P., 2007. *Kırılma Mekanikliği*, Çağlayan Kitabevi, p. 229. İstanbul.
- 21) Bazant, Z.P., Cedolin, L., 2010. *Stability of Structures Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., p. 1011, Singapore.
- 22) Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik Lıflı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- 23) Alyamaç, K.E., 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lince Olmayan Kırılma Mekanikliği Prensipleriyle İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, p. 129, Elazığ, Türkiye.
- 24) Bazant, Z.P., 1992. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS1), held at Beaver Run Resort, Breckenridge, Colorado, USA.
- 25) Tang, T., Ouyang, C., Shah, S.P., 1996. A Simple Method for Determining Material Fracture Parameters from Peak Loads, *ACI Material Journal*, 93(2), pp.147-157.
- 26) Emiroğlu M., Yıldız, S., Keleştemur, M. H., 2008. An Investigation on ITZ Microstructure of the Concrete Containing Waste Vehicle Tire, *Computers and Concrete*, 5 (5), pp. 503-508.
- 27) Alyamaç, K.E., 2004. Betonun Kırılma Parametreleri Üzerine Malzeme Parametrelerinin Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, p. 72, Elazığ, Türkiye.
- 28) John, R., Shah, S.P., 1989. Fracture Mechanics Analysis of High-strength Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1 (4), pp. 185-198.
- 29) Shah, S.P., Ahmad, S.H., 1994. *High Performance Concretes and Applications*, Edward Arnold Publication, p. 403, Britain.
- 30) Ince, R., 2010. Determination of Concrete Fracture Parameters Based on Two-parameter and Size Effect Models Using Split-tension Cubes, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, pp. 2233-2250.