

Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması

Investigating the effect of the use of waste tires as aggregate in concrete production on the fresh and mechanical properties of concrete

Süleyman İPEK^{*1,a}, Kasım MERMERDAŞ^{2,b}, Alparslan ULUSOY^{2,c}, Yusuf İŞIKER^{3,d}

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bingöl, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

³Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 20.12.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 19.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 29.04.2022

Öz

Kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinin geri dönüştürülmesi çözüm bekleyen global ölçekte bir sorundur. Bu lastiklerin depolanarak muhafaza edilmesi sorunu çözmek yerine olası problemlerle yüzleşmeyi geciktiren bir durumdur. Bu bağlamda atık lastiklerin çevreye zarar vermeden ve düşük maliyetlerle geri dönüştürülmesi birçok araştırmacının ilgili odağı olmuştur. 21. yy.ın başından buyana, bu lastiklerin öğütülerek beton üretiminde kullanılan agrega boyutlarına getirilip sonrasında beton üretiminde doğal agrega yerine kullanılabilirliği bu alanda çalışan bilim insanlarının araştırma konusu olmuştur. Literatürde bu konu ile ilgili çalışmaların sayısı da her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma da temelinde bu alandaki son gelişmeleri derleyerek literatüre kazandırma amacına sahiptir. Bilindiği üzere betonun hem taze durumdaki hem de sertleşmiş durumdaki özellikleri çok geniş bir yelpazeye sahiptir. Buradaki çalışmanın amacına uygun bir şekilde sunulabilmesi için de atık lastiklerden elde edilmiş lastik agregalarının betonun taze özelliklerinden işlenebilirlik ve reolojik davranışı, sertleşmiş özelliklerinden ise basınç ve çekme dayanımı, elastik modül, kırılma parametreleri ve aşınma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Derlenen bilgilerden elde edilen bulgular neticesinde lastik agregasının beton üretiminde kullanılması genel olarak betonun bahsedilen özelliklerini kötüleştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu özelliklerin ne derece etkilendiği de lastik agreganın şekli, boyut, yüzey özellikleri ve ikame seviyesi ile ilişkilidir. Bundan dolayı bu tür betonların yapısal betonlarda kullanımı önerilmemekle beraber yapısal olmayan, kentsel peyzaj yapılarında, yol banket kenar bordürleri, kilit taşları, satıh kaplamaları vb. üretimlerde kullanılmasının iyi bir geri dönüşüm alternatifi olacağı vurgulanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık yönetimi, Beton, Geri dönüşüm, Lastik agregası

Abstract

Recycling of end-of-life tires is a global problem that needs a solution. Storing and preserving these tires is a situation that delays facing potential problems instead of solving the problem. In this context, recycling of waste tires without harming the environment and at low costs has been the focus of many researchers. Since the beginning of the 21st century, the possibility of these tires to be granulated to the size of aggregate employed in concrete production and then to be used instead of natural aggregate in the manufacturing of the concrete has been the subject of research by scientists studying in this field. In the literature, the number of studies conducted on this subject has been increasing day by day. This study basically aims to compile the latest developments in this field and bring them to the literature. As it is known, the properties of concrete both in the fresh state and hardened state have a wide range. In order to present the study in accordance with its scope, the influence of tire aggregates obtained from waste tires on the fresh properties of concrete like workability and rheological behavior and the hardened properties such as the compressive and tensile strengths, elastic modulus, fracture parameters, and wear resistance were investigated. As a consequence of the findings achieved from the compiled information, it can be concluded that the incorporation of rubber aggregate in concrete production has generally adverse influences on the mentioned properties of concrete. In addition, the degree of affection of these properties is related to the shape, size, surface properties, and level of substitution of the rubber aggregate. Therefore, although the use of such concretes for structural purposes is not recommended, it is emphasized that it will be a good recycling alternative to use in non-structural like urban landscape structures, road shoulder side borders, keystones, surface coatings, etc.

Keywords: Waste management, Concrete, Recycle, Rubber aggregate

*a Süleyman İPEK; sipek@bingol.edu.tr, Tel: (0426) 216 00 12/1970, orcid.org/0000-0001-8891-949X

^b orcid.org/0000-0002-1274-6016

^c orcid.org/0000-0002-1376-2448

^d orcid.org/0000-0002-6777-0080

1. Giriş

1. Introduction

Durağan veya seyir halindeki bir taşıtın güvenli bir şekilde yer ile temasını sağlayan en önemli parçalarından biri olan lastikler, 1846'da demiryolu mühendisi İskoç Robert William Thomson tarafından "pnömatik tekerlekler" için üretilip patenti alınmıştır. Öte yandan, sıvı lastik kullanımıyla kanvas ve/veya deri parçaları birbirine yapıştırılarak bisiklet için şişme lastikler 1880'li yılların sonunda veteriner hekim İskoç John Boyd Dunlop tarafından icat edilmiştir. Bugünün lastikleri ise, 1891'de iki erkek kardeş, Andre ve Edouard Michelin tarafından çıkarılabilir lastik olarak üretilmiştir (ETRMA, 2015). Araç lastikleri, kullanım ömürleri tamamlandığında yani değiştirilme amacıyla söküldüklerinde, bu minvalde tekrar kullanılmayacakları anlamına gelir. Dolayısıyla, bu işleme lastikler, hurda lastiği olarak bilinen atık madde duruma gelir ve ürün/malzeme geri dönüşümü, enerji geri kazanımı veya çöp depolama alanlarına dayalı atık yönetim sistemine girerler.

Kullanılmayan ve/veya istenmeyen malzemeler olan atık maddeler; zirai işlemler, ticari, endüstriyel veya madencilik işlemleri gibi bir dizi üretim aşamasından veya ev içi faaliyetlerden arındırılmış maddeler olarak ifade edilir. Birleşmiş Milletler Çevre Koruma Ajansı'na göre atık maddeler, tehlikeli ve tehlikesiz olmak üzere iki sınıfta ele alınır. Kimyevi maddeleri, ticari üretim işlemlerinden kalan yan ürünlerden elde edilen maddeleri veya ağır metalleri ve atıl durumda olup evden çıkarılan ev eşyalarını kapsayan tehlikeli atık maddeler, çevreye veya canlıların sağlığına zarar verebilme potansiyeline sahiptirler. Bununla beraber yeniden kullanım ve geri dönüştürülebilme imkanına sahip atıl durumdaki maddeler esasında tehlike arz etmeyen atık madde olarak değerlendirilebilir.

Lastik Üreticileri Birliği, atıl durumdaki lastiklerin, doğru kullanıldığında, çevresel sorunların yaşanmasına sebep olmadığını belirtmektedir. Ancak, yanlış kullanımı söz konusu olduğunda, atık lastiklerin çevre ve sağlık için tehlike oluşturabildiği de ifade edilmektedir. Bundan dolayı, atıl durumdaki lastikler, mevcut durumlarında tehlike arz etmiyor olsa da lastiklerin yakılması veya lastik yangınlarının meydana gelmesi ile yüksek miktarlarda toksik gazlar, ağır metaller ve madeni yağ açığa çıkacağı için tehlikeli atık madde kategorisinde değerlendirilebilir. Ayrıca bu lastikler sahip oldukları şekilden dolayı depolandıkları alanlarda içlerinde su tutarak birçok

kemirgen ve sineğe ev sahipliği yapabilmekte ve beraberinde sürüngenlere yuva olmaktadır. Bu durum da o bölgelerdeki hem insan sağlığını olumsuz etkileyebilmekte hem de doğal habitatı bozabilmektedir.

Dünya genelindeki atık (hurda) lastiğin büyük bir çoğunluğunu (yaklaşık %88'ini) Çin, Avrupa Birliği ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Hindistan üretmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri (yaklaşık %96), Japonya (yaklaşık %91) ve Amerika Birleşik Devletleri (yaklaşık %89) ile mukayese edildiğinde kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüştürülmesi ve/veya geri kazanılması konusunda dünyadaki en gelişmiş bölgelerin başında gelmektedir (Sienkiewicz vd., 2012). Kauçuk lastiklerin, doğal bir şekilde doğada yok olmasının uzun zaman aldığı da göz önünde bulundurursak, bunların yeniden kullanımları veya geri dönüştürülmeleri yüksek derecede önem arz eden acil bir konudur (İpek vd., 2020; İpek & Mermerdaş, 2020). Çoğu ülkenin atıl durumdaki lastiklerin imhası ile ilgili politikaları, bunların toplanıp yönetilmeleri ile ilişkilidir. Bu atıl durumdaki lastikleri geri dönüştürmek için çok çeşitli geri dönüşüm veya yeniden kullanım yöntemleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bu bağlamda, kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüşümü kaplama yöntemiyle, enerji geri kazanımı yoluyla, piroliz tekniğiyle, ürün ve malzeme geri dönüşümü şeklinde olmak üzere beş yöntemle yapılmaktadır (Sienkiewicz vd., 2012).

Yeniden kaplama, lastiklerin ömrünü uzatmak için kullanılan, dış ve oluklardan oluşan eskimiş dış kısmının yenisiyle değiştirilerek kaplanması işlemidir. Ancak sahip oldukları zayıf yapıdan ötürü araba lastiklerinin yaklaşık %85'i kaplama işlemine genellikle uygun bulunmazken kamyon lastikleri daha iyi bakıldıkları ve daha sağlam bir yapıya sahip olduğundan, araba lastiklerinden daha yüksek oranda bu işleme uygun bulunur. Lastiklerin bu işleme uygun bulunmaması durumunda, lastikler atıl duruma gelerek imha edilmesi gereken bir malzeme statüsüne girer ve geri dönüşümü için başka bir yöntemin kullanılması gerekir. Atık lastiklerden, yakarak kurtulmak, yüksek miktarda (kalorifik değeri kömürünkünden nispeten daha yüksek) ısı enerjisi sağladığı için bu yöntemlerden en kolay, en pratik ve en karlı olanı olarak değerlendirilir (Holka & Jarzyna, 2017). Ayrıca kıyılmış lastiklerden oluşan diğer birçok katı yakıttan daha iyi bir enerji kaynağı olan bu madde, lastikten türetilmiş yakıt (tyre derived fuel, TDF) olarak adlandırılır. Klinker üretim fırını, tüm lastik bileşenlerinin tam

yanmasını sağlayan 1200 °C'den daha yüksek bir sıcaklığa gereksinim duyduğundan ve ayrıca bu fırınlar parçalanmış lastiklerin de kullanılmasına olanak sağladığından, çimento endüstrisinde TDF yaygın bir şekilde kullanılabilir (Sienkiewicz vd., 2012). Bununla beraber çimento endüstrisinde yakıt olarak lastik kullanımı, Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi'nin 2008 yılında yayınladığı rapora göre atmosferik emisyon standartlarına hâlâ uygundur (WBCSD, 2008). Bu nedenle, bu yakıt, çimento sektöründe klinker fırınlarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, buhar kazan ve fırınlarının, kömür ile birlikte yakılmasıyla ısıl verimini

arttırdığından, termik santrallerde, kağıt ve kağıt hamuru fabrikalarında, demir-çelik fabrikalarında ve endüstriyel kazanlarda (Sienkiewicz vd., 2012) öğütülmüş kauçuk atıkları ile beraber yakıt olarak da kullanılabilir (Singh vd., 2009). Ancak atık lastiklerin yanmasıyla yüksek miktarda zehirli, tehlikeli ve kirletici gazlar açığa çıktığından dolayı atıl vaziyetteki lastiklerin yakılarak yok edilmesi birçok ülkede ya yasaklanmış ya da yasalarla sınırlandırılmıştır (Holka & Jarzyna, 2017; Siddika vd., 2019). Tablo 1'de yakıt olarak kullanılan bazı maddelerin sağladığı kalorifik enerji ve buna bağlı CO₂ emisyonları verilmiştir.

Tablo 1. Bazı yakıtların kalorifik enerji miktarı ve yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları (Singh vd., 2009)

Table 1. Calorific energy amount of some fuels and CO₂ emissions from fuels (Singh et al., 2009)

Yakıt	Enerji (GJ/ton)	Emisyonlar	
		kg.CO ₂ /ton	kg.CO ₂ /GJ
Lastikler	32.0	2270	85
Kömür	27.0	2430	90
Hayvan fosili	32.4	3240	100
Dizel yakıt	46.0	3220	70
Doğal gaz	39.0	1989	51
Ahşap	10.0	1122	110

Kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüşümü için kullanılan bir diğer yöntem de oksidatif olmayan şartlar altında yüksek sıcaklıklarda kimyasal bağları parçalayarak organik maddenin kimyasal bileşimi ve fiziksel fazını termokimyasal bozunma aracılığıyla aynı anda ve geri dönüşümsüz bir şekilde değiştiren bir işlem olan (Martinez vd., 2013) pirolizdir. Bu bağlamda, piroliz yöntemi aracılığı ile atık lastik, piroliz yağı, karbon karası ve hidrokarbon gazı gibi değerli bileşenlere dönüştürülür. Atık lastiklerin piroliz yöntemiyle geri dönüştürülmesinin ilk aşamasını, atıl durumdaki lastiklerin tüm lastik olarak temizlenip reaktörün içine yerleştirilerek parçalanması oluşturur. Reaktörün fırına yerleştirilmesinden ve oksijeninin boşaltılmasından sonra termik işlem başlar. Bileşenlere bağlı olarak birkaç saat sürebilen depolimerizasyon/gaz giderme işlemi, reaktörün çalışıp lastiklerin homojen bir şekilde ısınmasıyla başlar. Lastiğin piroliz işlemi esnasında piroliz gazını yağdan ayıran yoğuşma gerçekleşir. Sonrasında, yoğuşmamış piroliz gazı, gaz temizleyiciden kükürt giderilsin ve temizlensin diye akıtılır. Akabinde, depolanması için bir gaz tankına pompalanan bu gaz, elektrik enerjisi üretiminde kullanılır. Bu esnada enerji veya hidrojen üretimi için ya da taze karbon siyahı

yapabilmek için ısıtma yağı olarak kullanılabilir diye yoğunlaşabilir hidrokarbon süzülür. Bütün bu lastik piroliz işleminin akabinde reaktör fırından çıkarılarak, pirolize edilmiş lastiklerdeki karbon kömürü ve çelik teller ayrılıp sonra temizlenmiş karbon kömürüne öğütme işlemi uygulanır. Karbon siyahı, öğütme işleminden sonra elde edilir. Piroliz yöntemi ile tamamı geri dönüştürülmüş atık lastikten, çelik, yağ, karbon siyahı ve yüksek kalorili yanıcı gaz olmak üzere dört ürün elde edilmiş olur. Piroliz yöntemiyle atıl durumdaki lastiklerin geri dönüştürülmesinde izlenen süreçlerin tamamı, çevreye zarar vermeden ve bir kirlilik oluşturmadan gerçekleştirilir.

Kullanım ömürlerini tamamlamış lastikleri, bir başka geri dönüştürme da lastiklerin lastik türevi ürünlerin imalatında kullanılmasıdır. ABD ve Avrupa'da, lastik türevi ürünlerin üretiminde, kullanım ömrünü tamamlamış lastikleri geri dönüştüren birçok şirket bulunmaktadır. Bu bağlamda, her şirket, atıl durumdaki araç lastikleri farklı bir alanda geri dönüştürüyor olmasına rağmen, bunlar; trafik ile ilgili ürünler, kaldırımlar, kaldırım taşları, yeşil yollar, patikalar, döşeme kaplama, spor alanı yüzey kaplaması ve oyun alanı kaplama malzemesi, paspas, suni çim, erişilebilirlik rampaları, hayvan bakım ürünleri,

peyzaj ve kauçuk malç, ve dış cephe kaplama malzemesi şeklinde alt başlıklar halinde kategorize edilmektedirler.

Son olarak, kullanım ömrünü tamamlamış lastikleri, kendilerinden elde edilen kırıntı ve yonga (parça) formlarında ucuz bir dolgu malzemesi olarak geri dönüştürmek de mümkündür. Bu amaçla lastikler, farklı koşullar altında gerekli boyutlarda lastik kırıntısı veya yonga elde etmek amacıyla mekanik olarak öğütülür (Karger-Kocsis vd., 2013). Bu yöntemler kendi içlerinde uygulama biçimi ve uygulama sıcaklığına göre değişkenlik gösterirken yaygın olarak doğrama ve kriyojenik öğütme, kırıntı lastik üretiminde kullanılan iki ana yöntemdir (Karger-Kocsis vd., 2013; Shu & Huang, 2014).

Ancak tüm bu geri dönüşüm yöntemleri kendi içlerinde ya çevre dostu olmadığı için ya yüksek maliyetli olduğu için ya da sürdürülebilir bir çözüm üretmediği için, insanları, atık lastiklerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi için alternatif yöntemler aramaya teşvik etmiştir. Bu bağlamda, çok geniş bir uygulama alanına ve büyük bir endüstri hacmine sahip olan inşaat

mühendisliği projelerinde atıl durumdaki lastiklerin belirli formlarda kullanılması bu lastiklerden kurtulmak için etkili ve çevre dostu bir yöntem olarak düşünülmektedir. Dünya genelinde üretilen hazır beton (Türkiye’de 160 milyon ton, Avrupa’da 620 milyon ton (THBB, 2020), yaklaşık olarak dünyada 4.4 milyar ton (Hilburg, 2019) – 2019 yılı için) ve asfalt yol (Türkiye’de 46 milyon ton ve 300 Avrupa’da milyon ton (EAPA, 2018), ABD’de (Epps & Johnson, 2020) 375 milyon ton – 2017 yılı için) miktarları göz önünde bulundurulduğunda, atık kauçuk lastiklerin inşaat mühendisliğinin bu iki sektöründe kullanılmasının hem çok etkili hem de oldukça doğa dostu ve yenilikçi bir yol olacağı söylenebilir (Güneyisi, 2010; Dondi vd., 2014; İpek ve Mermerdaş, 2022). Doğal rezervlerden elde edilen hammadde sınırsız değildir; bu nedenle, katı atık yönetiminin üç R’si (*Reduce-Reuse-Recycle/Azalt-Yeniden Kullan-Geri Dönüştür*) olarak da bilinen atık hiyerarşisine uymak sürdürülebilir bir yaşam yaratmak için elzemdir (Achilleos vd., 2011). Atık lastiklerin geri dönüştürülmesinden elde edilmiş kauçuk parçacıklarının, inşaat mühendisliği uygulamalarındaki kullanım alanları özetle Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. İnşaat mühendisliği uygulamalarında parçalanmış atık lastiklerin geri dönüşüm malzemesi olarak kullanımı

Table 2. Use of shredded waste tires as recycling material in civil engineering applications

Uygulama alanı	Ayrıntılar
Beton teknolojisi	Özel beton üretiminde
	Kendiliğinden yerleşen beton
	Geçirimli beton
	Hafif beton beton
	Geri dönüşümlü agrega betonu üretiminde
	Hafif beton
Geoteknik uygulamaları	Harç üretiminde
	Yapısal olmayan (bölücü) blokların üretiminde
Ulaştırma teknolojisi	Zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde
	Zemin dolgu malzemesi olarak
	Asfalt yolların kaplama performansının iyileştirilmesinde

2. Atık lastiğin stoklama işlemi ve çevresel tehditler

2. The storage of waste tire and environmental threats

2.1. Lastiğin içeriği ve üretimi

2.1. Content and production of tire

Atık lastiklerin neden çevresel tehditler oluşturduğunu daha iyi anlayabilmek ve tahayyül edebilmek için lastiklerin içeriği ve üretiminin iyi bilinmesi gerekir. Termoset polimerler sınıfında yer alan araç lastikleri, ağırlıkça %60-65’ine kadar

kauçuk, %25-35’ine kadar karbon siyahı ve kalan kısmı ise hızlandırıcılar ve dolgu maddeleri olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bazı lifli malzemelerle yapılan C_xH_y , lastikli malzemelerin bir formudur. Binek araç ve kamyon lastiğinin üretiminde doğal ve sentetik kauçuk (örneğin bütül kauçuk ve stiren-bütadien kopolimer) karışımı kullanılır. Kendine özgü elastik özelliklere sahip olan doğal kauçuk hevea ağacından elde edilirken, toplam kauçuk ağırlığının yaklaşık %58’ini oluşturan sentetik kauçuk ise genellikle petrol bazlı ürünlerden elde edilmektedir (Shulman, 2004). Bu lastiklerin

karakteristik elastomerik polimerleri, lastiklerin temel materyali olan kauçuk ile sağlanır. Böylece, bünyesinde kauçuğun bulunması sayesinde dış kuvvetlerin tesiri altındayken kalıcı olmayan deformasyon gösterebilme davranışına sahip olurlar (Martinez vd., 2013). Öte taraftan, lastiğe aşınmaya karşı mukavemet ve direnç sağlayabilmek amacıyla yarı-grafit yapıların amorf bir karbonu olan karbon siyahı kullanılır. Tüm bunlara ek olarak, lastik üretiminde yumuşak ve işlenebilir bir kıvam elde edebilmek adına bir miktar uzatıcı yağ (aromatik, naftenik ve parafinik hidrokarbonların bir karışımı) kullanılır. Bunların dışında lastiğin kalan bileşeni yaklaşık %3 inorganik dolgu ve %7 ise organik dolgu maddesidir. Lastik imalatı esnasında, markaya göre ve lastiğin kullanım amacına bağlı olarak, yüzün üzerinde bileşen kullanılabilir (Mastral vd., 2000).

Tekerleğin hayatımıza girişinin üzerinden beş bin yılı aşkın bir süre geçmiş bulunmaktadır. İnsanlığın belirli dönemlerinde belirli malzemelerden üretilen tekerleğin günümüzdeki (tekerler+lastik) formuna,

kauçuk malzemesinin 18. yy.da keşfedilmesiyle ulaşılmıştır. Kauçuk malzemesi önceleri hortum, yapışkan, silgi, ve benzeri malzeme üretiminde kullanılması maksadıyla piyasaya sürülmüştür. Bu malzeme ile ekonomik bir şekilde araç lastiği üretebilme olanağı, Charles Goodyear'ın vulkanizasyonu keşfetmesiyle oluşmuştur. Kükürt ile ısıtıldığında, yapışkan ve yumuşak bir kıvamda olan kauçuk; akabinde belirli bir sertlik ve aynı zamanda elastiklik mertebesine ulaşarak lastik üretiminin temel taşı haline gelmektedir. Araç lastikleri ilk başlarda dolgulu bir formda üretilmekteydi, belirli bir süre bu formda kullanılan lastikler pnömatik lastik olarak adlandırılan, içerisinde basınçlı hava bulunan bir forma evrilmiştir. Taşıt lastikleri bünyesindeki kauçuğun içinde; çelik tel, reçine, yağ, elyaf ve çinko oksit bulundurmaktadır. Bu bağlamda taşıt lastiği üretiminde kullanılan malzemeler Tablo 3'de sunulmakta olup, tipik bir araç lastiğine ait kesit görünüşü ve otomobil lastiği üretiminde kullanılan malzemelerin yüzde dağılımı sırasıyla Şekil 1a ve 1b'de sunulmaktadır.

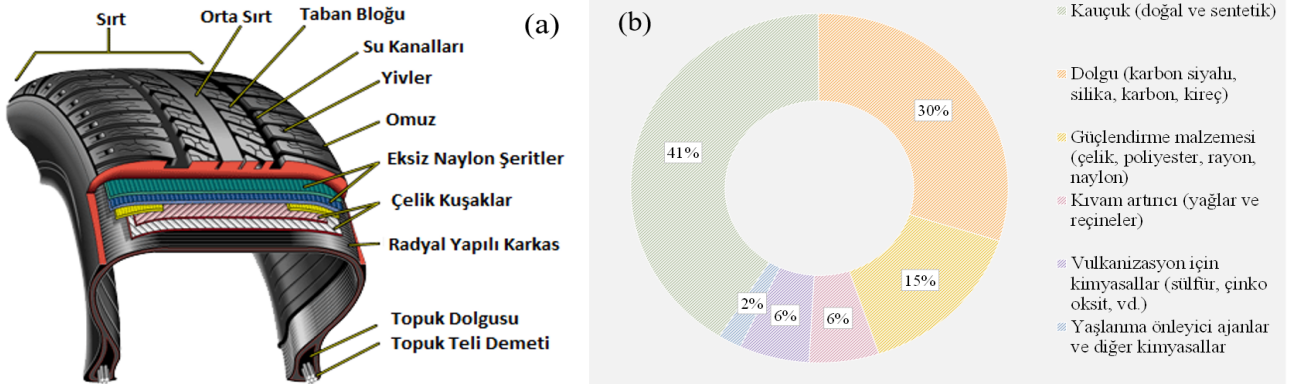
Tablo 3. Lastik üretiminde kullanılan malzemeler (Emiroğlu, 2006)

Table 3. Materials used in tire production (Emiroğlu, 2006)

Malzemeler	
1. Sentetik kauçuk	7. Kumaş: Polyester, Naylon
2. Doğal kauçuk	8. Pigmentler: Çinko oksit, Titanyum dioksit
3. Sülfür ve sülfür bileşikleri	9. Petrol mumları
4. Fenolik reçine	10. Yağ asitleri
5. Yağ: Aromatik, Naptenik, Parafinik	11. Atık malzemeler
6. Karbon siyahı	12. Çelik teller

İstanbul Sanayi Odası'nın Kauçuk Ürünleri İmalatı Sanayi raporuna göre Türkiye'de 2016 yılında 29 milyon adet üzerinde dış lastik üretimi yapılmış ve yaklaşık 21 milyon adet de ithal edilmiştir. Üretilen dış lastiklerin 18 milyon adete yakını ihraç edilmiş ve kalan da iç piyasada satılmıştır. Türkiye'de üretimi yapılan dış lastiklerin yaklaşık 20.84 milyon adeti otomobil lastikleri iken, yaklaşık 5.91 milyon adeti otobüs ve kamyon, 301 bin adeti bisiklet ve motosiklet ve 2.34 milyon

adeti de sanayi ve tarım araçları için üretilen lastiklerdir (İSO, 2018). Öte yandan Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı (PAGEV)'in 2017 yılı Türkiye Kauçuk Sektör İzleme Raporuna göre ise 2017 yılında 30 milyon adet dış lastik üretilmiş olup bunun yaklaşık 21.16 adet ise ihraç edilmiştir. Yine PAGEV'in raporuna göre 2017 yılında 20.83 milyon adet dış lastik ithal edilmiş böylece iç pazarda yaklaşık 29.68 milyon adet dış lastik satılmıştır (PAGEV, 2018).



Şekil 1. Binek lastiklerinin (a) kesitinin şematik gösterimi (Sullivan Tire, 2015) ve (b) üretiminde kullanılan materyallerin dağılımı (Continental, 2023)

Figure 1. Schematic representation of (a) section of passenger tires (Sullivan Tire, 2015) and (b) the distribution of the materials used in its manufacturing (Continental, 2023)

2.2. Atık lastiklerin depolanması ve çevresel etkileri

2.2. Storage and environmental effects of waste tires

Bir binek araç lastiğinin ağırlığı lastik genişliği, profil yüksekliği ve iniş çapına bağlı olarak yaklaşık 5 ile 20 kg arasında değişirken, kamyon/kamyonet ve otobüs lastiğinin ağırlığı ise 15 ile 100 kg arasında değişmektedir. Kullanılmış lastiklerin stok sahalarında tutulması, diğer yöntemlerin uygulanamayacağı durumlarda önerilmektedir. Günümüzde bazı ülkelerde ömrünü tamamlamış lastiklerin sahada depolanması yasaktır. AB ülkelerinde atıl durumdaki lastiklerin olduğu gibi stoklanmasına 2003 yılına kadar izin verilmekteydi. Ancak 2003 yılından sonra parçalarına ayrılması ve elenmesi işlemi yapıldıktan sonra depolanmasına müsaade edilmiştir. Ülkemizde ise 2006 yılından sonra kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin depolanması yasaklanmıştır. Bu durumu müteakip, son yıllarda atık lastiklerin geri dönüşümüyle ilgili çalışmaların sayısı günden güne artmıştır.

Katı atık kategorisinde yer alan atıl durumdaki lastikler, mevcut durumlarında tehlikeli atık olarak değerlendirilmeyebilir ancak çevreye ve canlıların sağlığına önemli mertebelerde zararlı etkilere sahip olma potansiyeli, hurda lastiklerin tehlikeli atık madde olarak ele alınması gerektiğini gösterir. Bu bağlamda, atıl durumdaki lastiklerin çevreye ve canlı yaşamına en önemli zararlı etkisi, lastik stoklarının olası yanma ve/veya yakılma durumunda ortaya çıkacaktır. Bu durumda toksik gazlar, ağır metaller ve madeni yağlar havaya, suya ve toprağa karışabilir. Her ne kadar atık lastiklerin, stok sahalarında depolanması yatırım-işletme maliyetini minimum seviyede tutarak yönetimde

kolaylık sağlıyor olsa da her zaman için potansiyel bir tehlike arz etmektedir.

Lastikler, daha önce de ifade edildiği üzere sadece kauçuktan değil nihai şeklini ve kullanım özelliklerini sağlayabilen diye çelik kayış ve tekstil kaplamaları da içermektedir. Karmaşık bir kompozit yapıya sahip olan geleneksel lastiğin geri dönüşümü, bileşenlerin ayrılmasının gerekliliğinden ötürü ciddi ve önemli bir problem teşkil etmektedir (Pehlken & Muller, 2009). Bunun yanı sıra, kullanım ömrünü arttırmak ve zorlu şartlara dayanıklı hale getirmek adına çok farklı kimyasal bileşimler ve çapraz bağlı kauçuk yapılarının oluşturulması lastikleri biyobozunmaya, fotokimyasal bozulmaya, kimyasal reaktiflere ve yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dirençli hale getirmiştir. Bu durum da atık lastiklerin geri dönüşümünü önemli bir ekonomik, teknolojik ve ekolojik zorluğa dönüştürmüştür (Sienkiewicz vd., 2012).

3. Beton için lastik agregası

3. Rubber aggregate for concrete

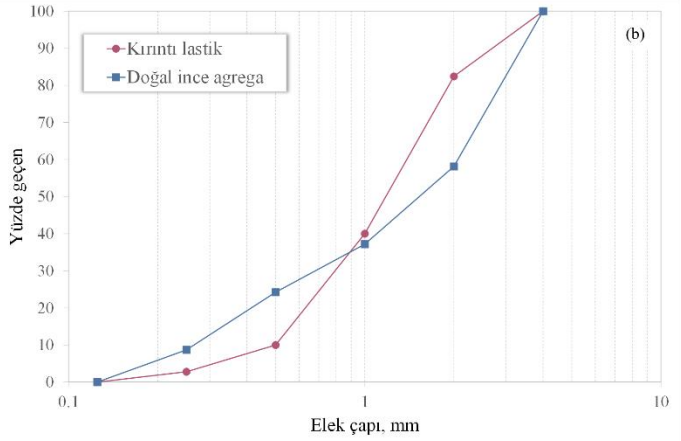
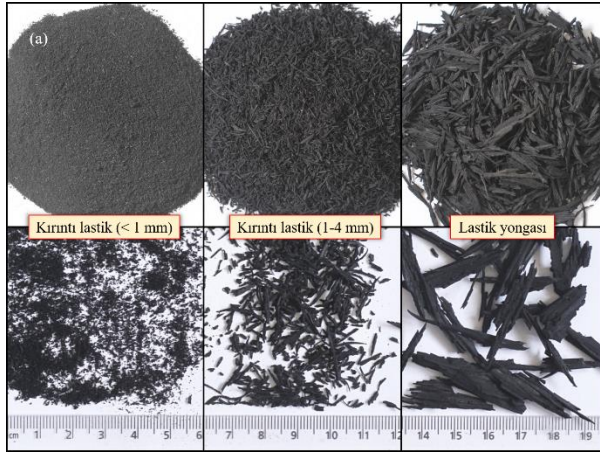
3.1. Lastik agregasının genel özellikleri

3.1. General properties of tire aggregate

Kullanım ömrünü tamamlamış lastikler, farklı kesme-öğütme işlemleri kullanılarak beton içerisinde iri veya ince agrega yerine kullanılmak üzere boyutsal açıdan uygun duruma getirilmelidir. Kullanım ömrünü çeşitli nedenlerden ötürü tamamlamış lastikler bütün şeklinde hurda lastik olarak tanımlanırken bunlar kesme makineleriyle kesildiği takdirde yırtık lastik olarak adlandırılır. Lastiklerin öğütülmesinden elde edilen parçacıklar ise boyutsal olarak lastik yongası veya kırıntı lastik olarak adlandırılıp sınıflandırılabilir. Lastik yongaları genelde boyutu 4 mm'den büyük

taneciklerden oluşurken kırıntı lastiği 4 mm'den küçük patiküllerden oluşur. Bu yüzden, genel olarak beton üretiminde lastik yongası iri agrega yerine ikame edilirken kırıntı lastik ise ince agrega yerine kullanılmaktadır.

Şekil 2a'de çalışmalarda kullanılan tipik lastik yongası ve farklı boyutlarda kırıntı lastiğine ait fotoğraflar sunulmaktadır. Ayrıca çalışmalarda kullanılan lastik agregasını, doğal agreganın sahip olduğu elek analizine uydurmak agrega gradasyonunda kararlılığı sağlamak açısından önem arz etmektedir. Ancak Şekil 2a'de gösterildiği üzere özellikle lastik yongasının tanecikleri yassı şekilli olduğu için bu tip lastik agregasında, doğal iri agreganın gradasyonuna benzer bir gradasyon elde etmek pek de mümkün



Şekil 2. (a) farklı boyutlardaki kırıntı lastik ve lastik yongasına ait fotoğraf görüntüleri ve (b) kırıntı lastik ve doğal ince agregaya ait gradasyon eğrileri (Güneyisi vd., 2016)

Figure 2. (a) photographic images of crumb rubber in different sizes and tire chips and (b) gradation curves of crumb rubber and natural fine aggregate (Güneyisi et al., 2016)

3.2. Betonun işlenebilirliğine etkisi

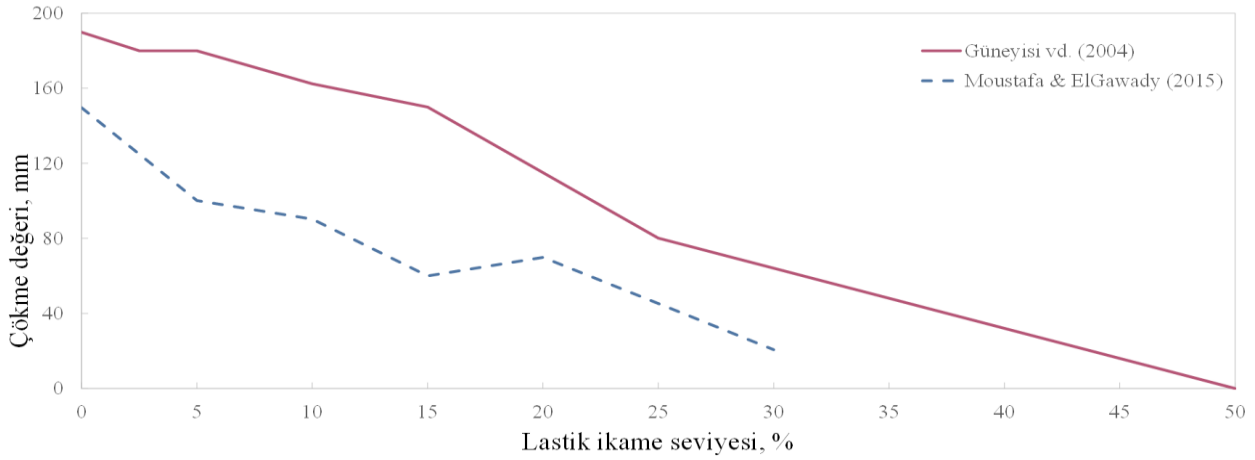
3.2. Its effect on the workability of concrete

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklıktan betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği, segregasyonu, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin perdahlanabilirliğine kadar tüm özellikler betonun işlenebilme özelliğini tanımlamakta kullanılır. Bundan dolayıdır ki betonun işlenebilirliği tek bir deney yöntemi ile tespit edilememektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmalar tüm bu özelliklerin birbiriyle belirli oranlarda ve şartlarda ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, taze betonun işlenebilme özelliklerini ölçmede kullanılan bazı deneysel yöntemlerle diğer işlenebilme özellikleri hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Çökme (slump) deneyi, bütün bu yöntemler arasında hem en yaygın kullanılanı hem de en pratik olanıdır. Ayrıca aynı çökme değerine sahip betonların

benzer ölçüde işlenebilirlik gösterdiği ve aynı amaçla kullanılabilecekleri kabul edildiği için bu deney yöntemi literatürde de, üretilen yeni tip betonların işlenebilirliği hakkında bilgi vermek için tercih edilmektedir. Bu bağlamda, lastik agrega kullanılarak üretilmiş betonların işlenebilirliğinin tespiti için yapılan çökme deneyi, lastik agrega ikamesinin betonun kıvamında azalmalara neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 3'te bazı araştırmacıların çalışmalarından elde edilen lastik agregası ikame seviyesine karşılık çökme değerindeki değişim gösterilmektedir (Güneyisi vd., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015). Şekilde verilen değerler incelendiğinde lastik agregasının ikame seviyesinin artışı çökme değerinde dolayısıyla betonun işlenebilirliğinde sistematik azalmalara neden olmaktadır. Joker vd. (2019), beton üretiminde %5, %10 ve %15 seviyelerinde kırıntı lastiği ikame etmişler ve bu seviyelerde bile çökme

değerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Alwesabi vd. (2020) ise %20 lastik agregası kullanımıyla çökme değerinde %25 azalma tespit etmişlerdir.

Bunun başlıca sebebi lastik agregası taneciklerinin betonun akışımı engelleyecek bir yapıda olması olabilir.

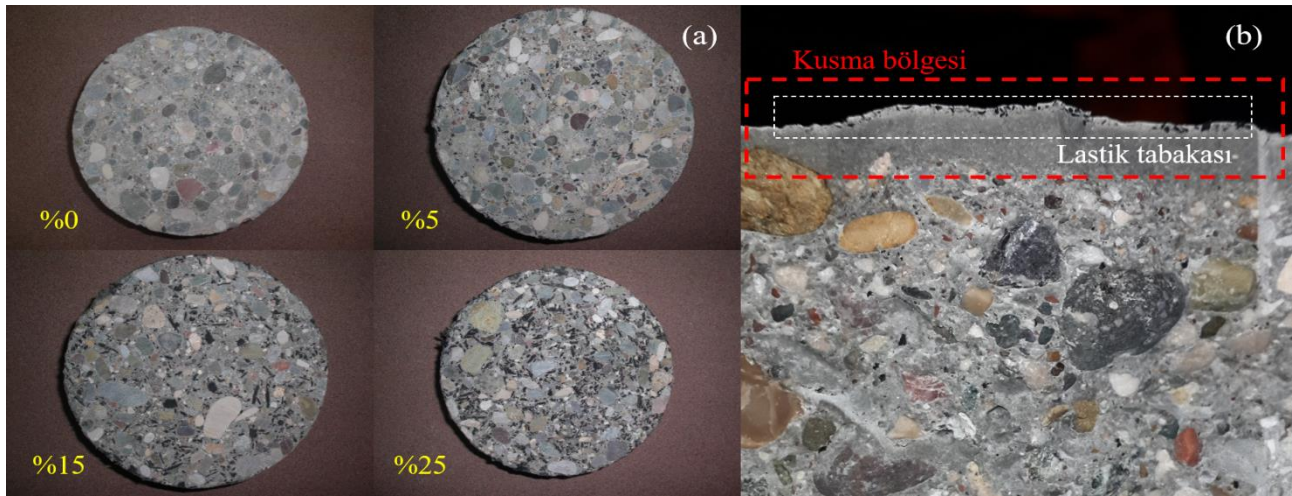


Şekil 3. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık çökme değerindeki değişim (Güneyisi vd., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015)

Figure 3. Slump values versus tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015)

Ayrıca betondaki akma olayı homojenlik ve kohezyon ile yakından ilişkilidir, lastik agregası taneciklerinin sahip olduğu yüzey özellikleri çimento hamuruyla arasında kohesif bir yapının oluşmasına engel olduğu için betonun kıvamında bir azalış oluşmaktadır. Elde edilen veriler çerçevesinde belirli lastik agregası seviyelerden sonra betonun kıvamındaki ciddi düşüş ve buna bağlı yüksek vibrasyon süresi gereksinimi doğurduğu söylenebilir. Sahip olduğu düşük özgül ağırlıktan ötürü de uzun süreli vibrasyon uygulaması lastik taneciklerinin yukarı yönde hareketine sebep olarak betonun homojenliğini

bozmaktadır. Bu durumu çözmek adına bazı araştırmacılar bir çökme değeri belirleyerek o değeri elde etmek adına akışkanlaştırıcı miktarını değiştirmişlerdir (Güneyisi vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015; Güneyisi vd., 2016). Şekil 4a'de iyi bir tasarıma sahip %5, %15 ve %25 agregası ikame seviyesine sahip betonlara ait kesit görüntüleri mevcuttur. Şekil 4b'de ise tasarımı iyi yapılmamış ve buna bağlı uzun süre vibrasyona maruz kalmış bir betonun üst bölgesindeki lastik agregası birikimi ve kumaya ait fotoğraf görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 4. (a) %0, %5, %15 ve %25 agregası ikame seviyesine sahip betonlara ait kesit görüntüleri ve (b) tasarımı iyi yapılmamış ve buna bağlı uzun süre vibrasyona maruz kalmış bir betonun kesit görüntüsü

Figure 4. (a) cross-sectional images of concretes with 0%, 5%, 15% and 25% aggregate replacement levels and (b) cross-sectional view of a concrete that was not well designed and exposed to vibration for a long time

3.3. Betonun birim ağırlığına etkisi

3.3. Its effect on the unit weight of concrete

Beton üretiminde doğal agrega yerine kullanılan lastik agregalar, doğal kaynakların tüketimini azaltması sağlamaktadır ayrıca sahip olduğu düşük özgül ağırlık sayesinde de betonun birim ağırlığını azaltmaktadır. [Thakur vd. \(2020\)](#) kırıntı lastiğini %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere 4 farklı ikame seviyesinde doğal ince agrega yerine kullanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre lastik agregası ikame seviyesindeki artışla birlikte betonun birim ağırlığında sistematik bir azalma olmuştur ve %20 lastik agregası kullanımında birim ağırlıkta yaklaşık %12'lik bir azalma gözlenmiştir. [Alwesabi vd. \(2020\)](#) da lastik agregasının betonun birim ağırlığını azalttığı sonucuna ulaşmış olup, çalışmalarında %20 lastik agregası ikamesinin yaklaşık %5'lik bir birim ağırlığı azalışına yol açtığını belirlemişler. [Thomas ve Gupta \(2015\)](#) ise benzer ikame seviyesindeki düşüşün %10 mertebelerinde olduğunu bildirmişlerdir. [Mustafa ve ElGawady \(2015\)](#) ise %30 lastik agregası ikamesinde %30'luk bir birim ağırlık azalması raporlamışlardır. Öte taraftan, [Uygunoğlu ve Topçu \(2010\)](#) atık lastik agregalarının, farklı su/çimento oranlarında üretilmiş kendiliğinden yerleşen harçların birim ağırlığına etkisini incelemiş olup, %50 kırıntı kauçuk ikamesi ile 1800-1900 kg/m³ seviyesinde olan kendiliğinden yerleşen harçların birim ağırlığının 1300-1600 kg/m³ seviyelerine düştüğünü rapor etmişlerdir.

3.4. Betonun reolojik davranışına etkisi

3.4. Its effect on the rheological behavior of concrete

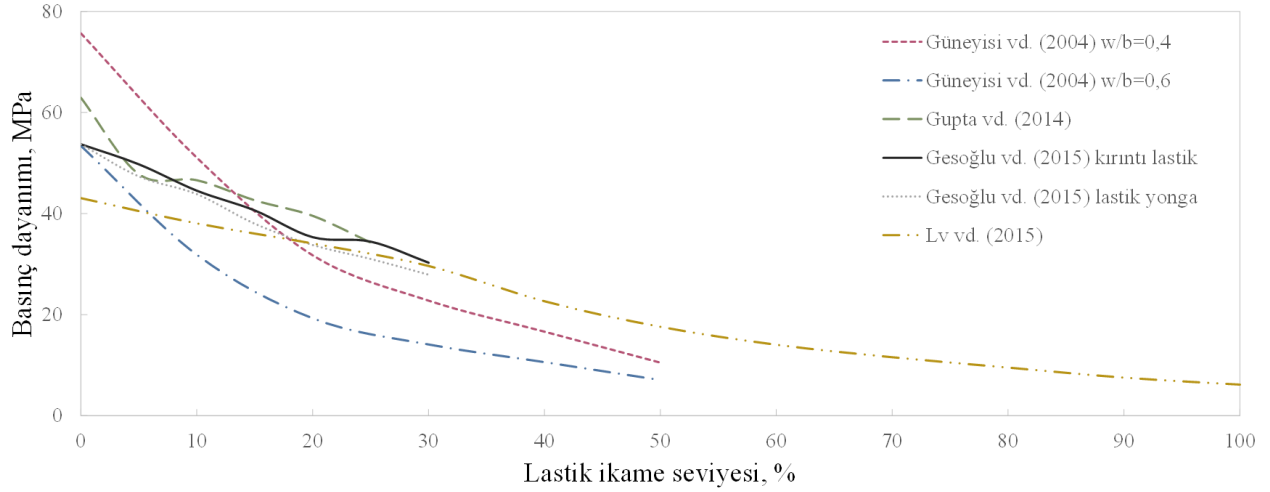
Reoloji üzerine çalışma yapan araştırmacılar tarafından reolojik davranış nezdinde incelenmesi en zor malzemelerden biri olarak tanımlanan taze beton, akışkanlığı hıza bağlı artan (tikotropik) bir malzemedir ([Tattersall & Banfill, 1983](#); [Güneyisi vd., 2016](#)). Betonun, reolojik davranışının tanımlanması onun işlenebilirliği hakkında daha fazla bilgi sağlayacağı için beton üretiminde kullanılan ilave malzemelerin reolojik davranış üzerindeki etkisi de araştırılması gereken önemli bir konudur. Bu bağlamda lastik atığının betonun reolojik davranışı üzerine etkisini konu alan çalışmalar kısıtlı olmakla beraber en kapsamlı çalışmalardan birini [Güneyisi vd. \(2016\)](#) lastik agregası ikameli kendiliğinden yerleşen betonun reolojik davranışını inceleyerek yapmıştır. Söz konusu çalışmada özel bir beton çeşidi olan kendiliğinden yerleşen betonun reolojik davranışını tanımlamak için Herschel-Bulkley ve

modifiye Bingham modelleri kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun kayma katılaşması davranışı sergilediği ve lastik agregasının kullanımıyla ve ikame seviyesinin arttırılmasıyla beraber daha az akışkan kıvamda bir beton elde edildiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Herschel-Bulkley modelinde “n” katsayısı, modifiye Bingham modelinde ise “c/μ” katsayısı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Söz konusu katsayılardan “n”nin 1’den büyük olması ve “c/μ”nün de 0’dan büyük olması akışkanın kayma incelenmesi davranışı gösterdiği manasına gelmektedir. Çalışmadaki katsayılara bakıldığında “n” katsayısının 1.1 ile 1.6 arasında, “c/μ” katsayısının da 0.2 ile 1.8 arasında değiştiği görülmektedir. Kırıntı kauçuk ikameli betonların daha düşük katsayıları sahip olduğu kauçuk yongası kullanılarak üretilen betonların ise daha yüksek katsayıları sahip olduğu da çalışmada belirtilen bir diğer noktadır. Lastik ikamesiyle daha az akışkan kıvamda bir çimento esaslı kompozit elde edildiği yönünde benzer bir bulguya, [Thakare vd. \(2020\)](#) tarafından yapılan ve lastik atığı takviyeli kendiliğinden yerleşen harçların incelendiği çalışmada da ulaşılmıştır.

3.5. Betonun dayanım ve elastisite modülüne etkisi

3.5. Its effect on the strength and modulus of elasticity of concrete

Üretilen lastik takviyeli betonların, kolon, kiriş, döşeme gibi taşıyıcı elemanların üretiminde kullanılabilmesi için basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmiş olması gerekmektedir. Özellikle geleneksel betonda olduğu gibi basınç dayanımı betonun birçok mekanik ve durabilite özelliği hakkında bilgi vereceği için basınç dayanımının iyi bir şekilde tespit edilip değerlendirilmiş olması gerekir. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda, lastik agregasının beton üretiminde doğal agrega yerine kullanımının, betonun basınç dayanımını olumsuz bir şekilde etkilediği genel olarak bildirilen bir bulgudur. Bu olumsuz etkinin sayısal olarak ifade edilebilmesi açısından ikame seviyesine göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 5’te sunulmaktadır. [Gesöglü vd. \(2015\)](#) ince ve iri lastik agregasının basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmış olup %30 ikame seviyesine kadar değişimini incelemişler ve sonuç olarak iri lastik agregasının ince olandan daha fazla basınç dayanımını düşürdüğünü birlikte kullanımının ise ayrı ayrı kullanımından daha fazla olumsuz etkilediğini rapor etmişlerdir.



Şekil 5. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık basınç dayanımındaki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gupta vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015; Lv vd., 2015)

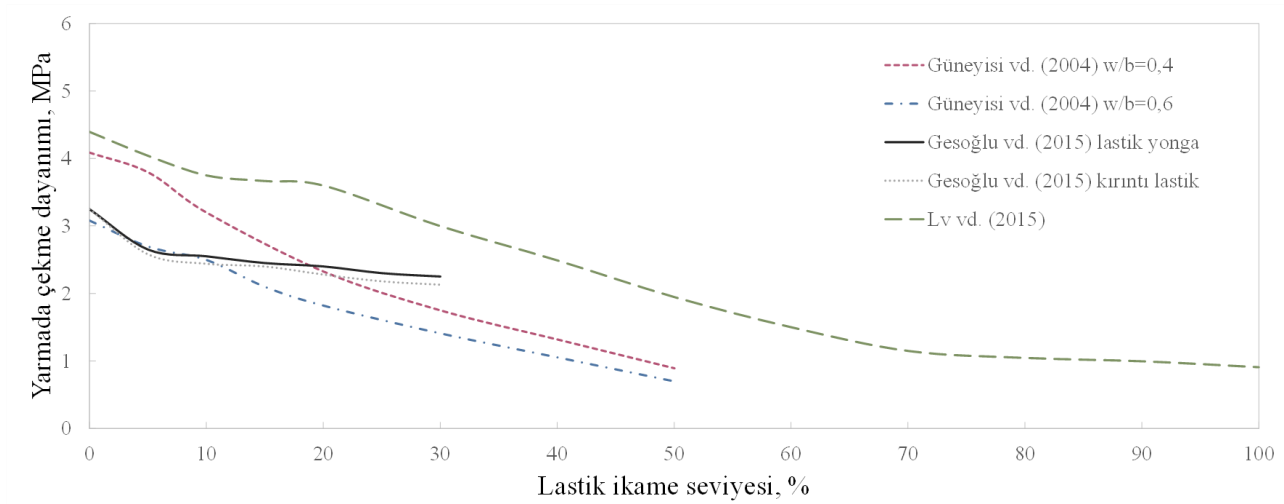
Figure 5. Variation in compressive strength with respect to tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gupta et al., 2014; Gesoğlu et al., 2015; Lv et al., 2015)

Lastik agregası ikame seviyesinin ve su-bağlayıcı oranının basınç dayanımı üzerine etkisini inceleyen Güneyisi vd. (2004) ise lastik agregası miktarını arttırmanın, basınç dayanımını sistematik bir şekilde azalttığını ve %50 ikame seviyesinde her iki su-bağlayıcı oranı için (0.4 ve 0.6) basınç dayanımında %80'den fazla düşüşe neden olduğunu bildirmişler. Gupta vd. (2014) ve Lv vd. (2015) de atık lastik miktarını arttırmanın basınç dayanımında düzenli bir düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir. Bu durumun başlıca sebeplerinden biri çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki arayüz bölgesinin doğal agregayla arasında oluşandan daha büyük olmasıdır. Lastik partikülleri ile çimento hamuru arasındaki bağ, kauçuklaştırılmış betonun mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktördür (Karakurt, 2015). Ayrıca lastik agregasının yumuşak yapısı yük tesiri altındayken normal agregası ve sertleşmiş çimento hamuruna kıyasla daha fazla gerinme performansı sergileyecektir. Bu da lastik agregasının bulunduğu yerlerde yükün büyük bir kısmının çimento hamuru veya doğal agregalar tarafından taşınacağı, lastik agregasının yük taşımaya yüksek gerinme seviyelerinde katılacağı ancak bu gerinme seviyelerinde ise çimento hamurunun çoktan çatladığı ve betonun bütünlüğünün bozulduğu anlamına gelmektedir. Bundan ötürü lastik agregası kullanımı betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bundan dolayı belirli ikame seviyelerinden sonra kullanımı yapısal amaçlı beton üretimine olanak vermemektedir. Sonuç olarak betonun basınç dayanımının, lastik agregası miktarı, boyutu ve şekli gibi birçok faktörden etkilendiği söylenebilir.

Basınç dayanımında olduğu gibi genel olarak betonun hem yarmada çekme hem de eğilmede çekme dayanımı lastik agregası ikamesi ile azalmaktadır. Şekil 6'da bazı çalışmalardan elde edilen lastik agregası ikame seviyesine karşılık yarmada çekme dayanımındaki değişim verilmektedir. Gesoğlu vd. (2015), kırıntı lastiğinin yarmada çekme dayanımını lastik yongasına oranla daha fazla düşürdüğü sonucuna ulaşmışlar. Ancak iki çeşit lastik agregasında da ikame seviyesi arttıkça yarmada çekme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Güneyisi vd. (2004) de su-bağlayıcı oranı gözetmeksizin lastik agregasının ikame seviyesinin arttırılmasıyla yarmada çekme dayanımında azalma olduğunu bildirmişlerdir. %50 lastik agregası ikame seviyesinde, yarmada çekme dayanımında %75'ten fazla düşüş rapor edilmiştir. Oysa Lv vd. (2015) benzer bir düşüş oranını %100 ikame seviyesinde gözlemlemişler. Hesami vd. (2016) ise %5, %10 ve %15 lastik agregası ikame seviyelerinde yarmada çekme dayanımında sırasıyla %2, %6 ve %14 mertebelerinde düşüş olduğunu bildirmişler. Alwesabi vd. (2020) ise doğal agregası yerine %20 lastik agregası kullanımıyla yarmada çekme dayanımında yaklaşık %25'lik bir düşüş rapor etmişler. Betonun yarmada çekme dayanımındaki bu düşüşün nedeni lastik agregasının basınç dayanımındaki azalma nedenleriyle benzerdir. Yükleme esnasında çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki arayüz yüklemenin artmasıyla büyür ve lastik agregası sahip olduğu yumuşak yapıdan ötürü bir boşlukmuş gibi davranır. Bu da o bölgede gerilme yoğunlaşmalarına neden olup kırılmaya yol açmaktadır. Basınç ve yarmada çekme dayanımındaki azalma eğilimi eğilmede

çekme dayanımında da gözlenmiştir. Ancak lastik agregasının betonun eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili elde edilen bulgular basınç ve yarmada çekme dayanımları kadar genelleştirilebilecek bulgular değildirler. Mesela, Zaleska vd. (2019), beton üretiminde %10, %20 ve %30 seviyelerinde lastik agregasını doğal agrega yerine kullanmışlar ve eğilmede çekme dayanımında sistematik bir azalış gözlemlemişler. %30 ikame seviyesindeki dayanımdaki azalmayı da %75 olarak rapor etmişler. Benzer şekilde, Su vd. (2015) de eğilmede çekme dayanımında

%12'lik bir azalışı %20 lastik agrega ikame seviyesinde rapor etmişler. Oysa, Jokar vd. (2019) %5 lastik agregası ikame seviyesinde eğilmede çekme dayanımında %25'lik bir artış gözlemlemişken bu seviyeden sonra kontrol numunesine göre bir azalış bildirmişler. Buna benzer bir bulguyu Emiroğlu vd. (2011) de rapor etmişler. Öte yandan, Mohamad ve Adamu (2018) %10, %20 ve %30'luk ikame seviyelerinde lastik agregası kullanımının eğilmede çekme dayanımını sırasıyla %39, %9 ve %3 mertebelerinde arttırdığını rapor etmişler.

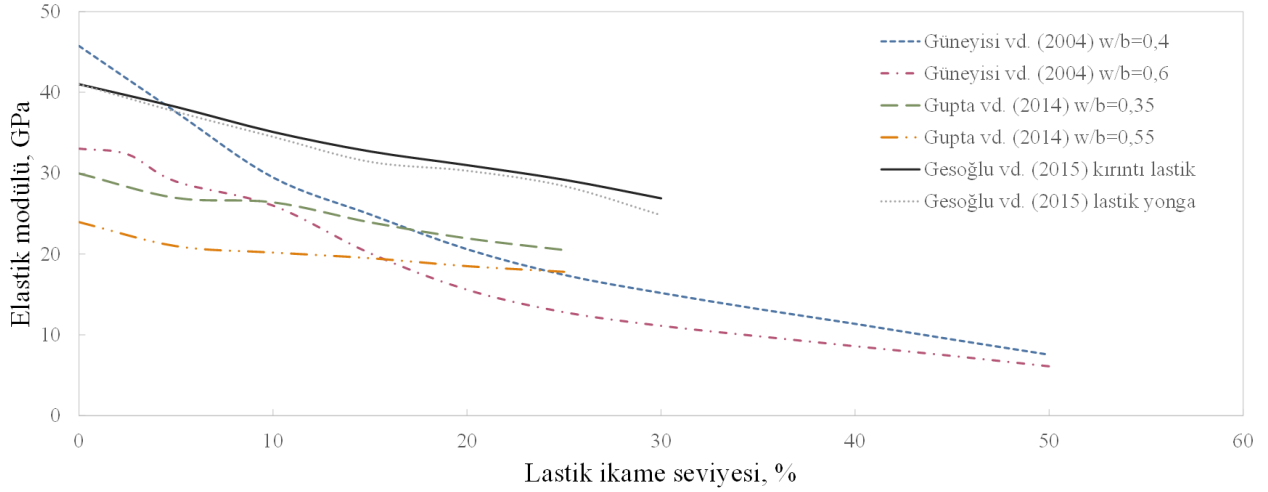


Şekil 6. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık yarmada çekme dayanımındaki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gesoğlu vd., 2015; Lv vd., 2015)

Figure 6. Variation in splitting tensile strength with respect to tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gesoğlu et al., 2015; Lv et al., 2015)

Literatürde yer alan çalışmalar, beton üretiminde lastik agregası kullanımının, betonun elastik modülünü düşürdüğünü bildirmektedir. Bu durumun asıl sebeplerinden biri lastik taneciklerinin düşük elastik modüle sahip olması ve sünek bir malzeme olmasından ötürü yüksek miktarda enerji emip dağıtabilmesidir, ayrıca lastik agregası miktarının artmasıyla beraber betonun içinde hapsedilen hava miktarının artması da bu durumun sebeplerinden olabilir (Assaggaf vd., 2021). Yapılan çalışmaların bazılarında elde edilen veriler ışığında lastik agregası ikame seviyesine bağlı elastik modülündeki değişim Şekil 7'de sunulmaktadır. Görüleceği üzere lastik ikame seviyesindeki artış betonun elastik modülünde de sistematik bir azalmaya sebep olmaktadır. Ancak bu durum olumsuz gibi algılanıyor olsa da kabul edilebilir seviyelerde olması şartıyla betona

süneklik ve esneklik de kazandırmaktadır (Topçu & Avcular, 1997). Gesoğlu vd. (2015), yaptıkları çalışmada lastik yongasının yani iri agrega yerine kullanılan kırıntı lastikten yani ince agrega yerine kullanılan daha fazla elastik modülü düşürdüğünü bildirmişler. Öte yandan, Güneyisi vd. (2004) ve Gupta vd. (2014) su-bağlayıcı oranı gözetmeksizin lastik agrega ikame seviyesinin artırılması betonun elastik modülünü ciddi oranlarda düşürdüğü sonucuna varmışlar. Yang vd. (2019) ise kendiliğinden yerleşen betonun elastik modülünde, %10, %20 ve %30 lastik agrega ikame seviyelerinde sırasıyla %14, %26 ve %40'lık bir azalış rapor etmişler. Jokar vd. (2019) ise bu mertebelerde azalışları normal betonda sırasıyla %5, %10 ve %15'lik lastik agrega ikame seviyelerinde gözlemlemişlerdir.



Şekil 7. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık elastik modülündeki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gupta vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015)

Figure 7. Variation in elastic modulus with respect to rubber aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gupta et al., 2014; Gesoğlu et al., 2015)

3.6. Betonun kırılma parametrelerine etkisi

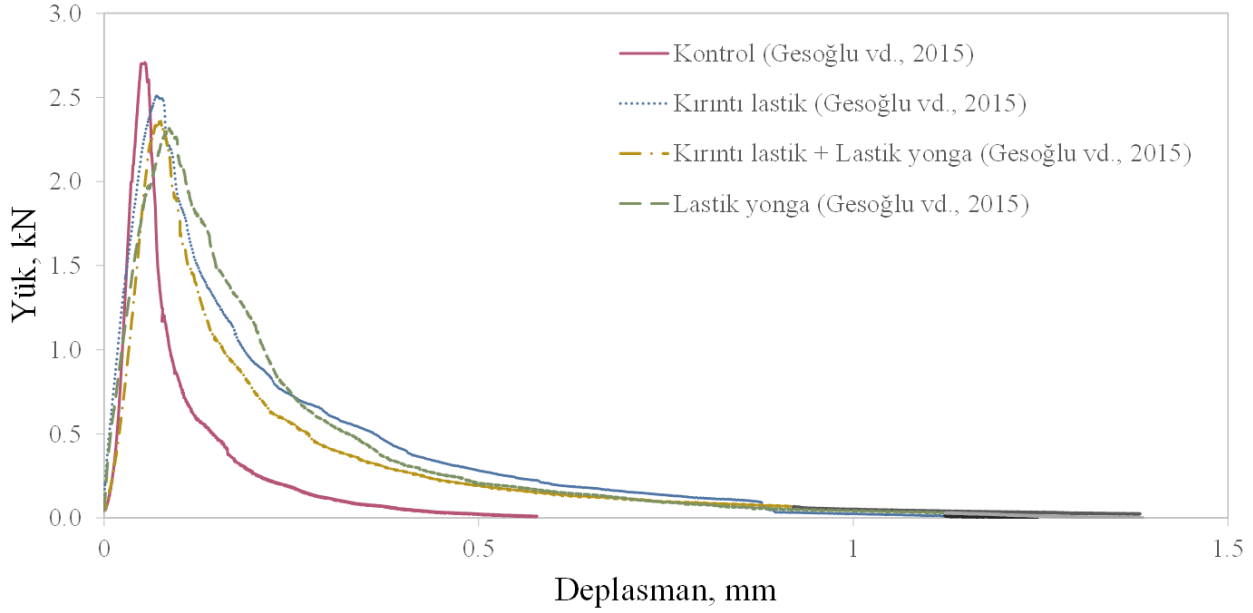
3.6. Its effect on the fracture parameters of concrete

Modern kırılma mekaniğince yarı kırılğan (quasi-brittle) olarak tanımlanan betonun enerji yutma kapasitesi ve buna bağlı kırılma mekaniği parametrelerinin tespit edilmesi son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı olmuştur (Gesoğlu vd., 2015). Özellikle lif takviyeli betonların sergilemiş oldukları üstün enerji yutma performansı akıllara lastik agrega taneciklerinin de benzer bir etkiyi yaratıp yaratmayacağı sorusunu getirmiştir. Bu bağlamda en kapsamlı çalışmalardan birini Gesoğlu vd. (2015) gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, kırıntı lastiğin ve lastik yongasının hem ayrı ayrı hem de birlikte kullanımının 6 farklı ikame seviyesindeki etkisini incelemişler. Çalışmada, lastik agregası kullanımının betonun kırılma enerjisini %5, %10 ve %15 ikame seviyelerinde sistematik bir şekilde arttırdığını ancak %15'den sonra ise bu ikame seviyesine göre azaltmaya başladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum her üç tip kullanımda da benzer bir eğilim göstermekle beraber en iyi performans kırıntı lastik kullanımında elde edilmiştir. Yine bu çalışmada sunulan yük-deplasman grafiklerine bakıldığında (Şekil 8'de %5'lik ikame eğrileri sunulmaktadır), betonun çatlama noktası olarak adlandırılan tepe noktasında lastik agregasıyla beraber bir düşüş oluşmuştur. Bu düşüşe rağmen kırılma enerjisindeki artışın sebebi; yalın beton 0.5 mm'lik deplasman seviyelerine kadar dayanabiliyorken, lastik ikameli betonlar ise 1 mm'den fazla deplasman performansı göstererek ve çatlama

noktasından sonra yük-deplasman eğrisinde daha yumuşak bir iniş sergileyip daha yüksek enerji emme performansı göstermiş olması olabilir. Ancak Karunarathna vd. (2021), Gesoğlu vd. (2015)'nin çalıştığı lastik agregası tipinde ve boyutunda agregalarla yaptıkları çalışmada lastik yongası olarak adlandırılacak agreganın kullanımında daha yüksek kırılma enerjisi elde etmişlerdir. Gesoğlu vd. (2014), yaptıkları bir başka çalışmada geçirimli beton olarak bilinen özel bir betonun üretiminde ince kırıntı lastik ve kırıntı lastik olarak adlandırdıkları iki farklı boyutta kırıntı lastik ve lastik yongası kullanmışlar. Bu çalışmada geçirimli betonun kırılma enerjisi ile ilgili bulgularda ise kırıntı lastik ve lastik yongasının %10 seviyesine kadar kırılma enerjisini arttırdığını bu seviyeden sonra görece düşüşlerin yaşandığını ancak bu iki lastik agregasının birlikte kullanımıyla %20 ikame seviyesine kadar düzenli bir artış olduğu görülmektedir. Oysa ince kırıntı lastiği diye adlandırdıkları agrega çeşidinde ise sistematik bir düşüşün olduğu bildirilmiştir. Kırılma enerjisi gibi betonun kırılma parametrelerinden biri olarak ele alınabilecek özelliği enerji absorbe etme kapasitesi olarak da tanımlanan betonun tokluğudur (toughness). Bu bağlamda lastik agregasının beton üretiminde kullanımının bu özelliğini nasıl etkilediği araştırmacıların ilgi noktası olmuştur. Mohammed ve Adamu (2018), %10 lastik agrega içeren betonların, lastik agrega içermeyen kontrol karışımına göre daha yüksek bir enerji emme kapasitesine sahip olduğunu bildirmişler, öte yandan, %20 ve %30 ikame seviyelerinde ise %10 seviyesine oranla enerji emme kapasitesinde düşüş

gözlemlenmişler. Oysa [Jokar vd. \(2019\)](#), betonun enerji emme kapasitesindeki artışı %5'lik lastik agrega ikame seviyesinde rapor etmiş ve bu seviyeden sonra kontrol karışımına oranla %10-20'lik düşüş gözlemlenmişler. Öte yandan, [Su vd. \(2015\)](#), %20 lastik agregası ikame seviyesinde enerji emme kapasitesinde %12'lik bir azalış

bildirmişken, [Alwesabi vd. \(2020\)](#) aynı ikame seviyesinde %35'lik bir düşüş rapor etmişlerdir. [Khaloo vd. \(2008\)](#), %12.5, %25, %37.5 ve %50 ikame seviyelerinde düzenli artış bildirmişken [Medina vd. \(2017\)](#), %20, %40, %60, %80 ve %100 lastik agregası ikame seviyelerinde sistematik bir azalış rapor etmişler.



Şekil 8. Lastik agregası tipine göre betonun yük-deplasman eğrisi ([Gesoglu vd., 2015](#))

Figure 8. Load-displacement curve of concrete per rubber aggregate type ([Gesoglu et al., 2015](#))

3.7. Betonun aşınma direncine etkisi

3.7. Its effect on the wear resistance of concrete

Betonun yüzey karakteristiğinin belirlendiği aşınma direnci testi, özellikle betonun yaya trafiğinin yoğun olduğu, ağır yük taşımacılığının bulunduğu ve diğer aşındırıcı malzemelere maruz kaldığı durumlarda bilinmesi gereken bir mekanik özelliktir. Sıklıkla sürtünmeden, kaymadan, çarpmadan ve silmeden kaynaklı malzeme aşınması, kopması ve dökülmesi betonun aşınmaya karşı direnci ile ilişkilidir. Bundan ötürü üretilecek özel beton çeşitlerinin aşınma direncinin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Genel olarak literatürde yer alan çalışmalarda lastik ikamesinin betonun aşınma direncini iyileştirdiği yönünde bir sonuç bildirilmiştir ([Kang vd., 2012](#); [Gesoglu vd., 2014](#); [Medina vd., 2017](#); [Mohammed & Adamu, 2018](#)). Bu durumun başlıca sebeplerinden biri lastik taneciklerinin sahip olduğu yumuşak dokudan ötürü sürtünme, kayma, çarpma ve silme gibi etkilere karşı aşınma direncine sahip olması olabilir. Oysa [Abdelmonem vd. \(2019\)](#), betonun aşınma direncinde, %10, %20 ve %30 lastik agrega ikame seviyelerinde %47'ye kadarlık düşüş bildirmişler. Benzer şekilde [Bisht ve Ramana \(2017\)](#), beton üretiminde %5 mertebelerinde lastik

agrega kullanımının, betonun aşınma direncini %18 mertebelerinde azalttığını rapor etmişler. Bu tarz bulgular elde eden araştırmacılar ise bu durumu çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki düşük adezyon ile ilişkilendirmişlerdir.

3.8. Atık lastik ikameli betonların endüstriyel uygulamaları

3.8. Industrial applications of waste rubber substituted concretes

Hafif olup iyi bir ses emme kapasitesine ve uygun termal özelliklere sahip olması atık lastikleri hem hafif hem de ses ve termal özellikler nezdinde iyi bir performansa sahip yapı elemanı üretimi noktasında alternatif bir malzeme konumuna taşımaktadır. Bu bağlamda, SmartWall (akıllı duvar) olarak adlandırılan tipik betondan farklı olarak üretiminde doğal agreganın yanı sıra atık lastik agregası da kullanılan prefabrik beton duvar panel sistemler, atık lastiğin beton teknolojisinde kullanıldığı endüstriyel uygulama örnekleri arasında yer almaktadır. Bu duvar sistemler, yaklaşık 10 cm kalınlığında açılı çıkıntılı bir yüzeye sahip panellerden oluşmaktadır. Bu çıkıntılı ve açılı yüzeyler sayesinde yatay ses yansımaları azaltılarak daha iyi gürültü azaltma performansı

elde edilir. Ayrıca panellerin betonunun üretiminde renk pigmentleri kullanılarak çeşitli renklerde panellerin üretilmesi de mümkündür (Topçu & Unverdi, 2018). Öte taraftan, geleneksel betona nazaran sahip olduğu düşük mekanik özelliklerden ötürü atık lastik içeren betonlar, yapısal amaçlı olmayan uygulamalarda kullanım olanağı bulmaktadır. Bunlar arasında, en başta mukavemet beklentisi düşük olan özellikte temel altı, tevsiye ve dolgu yerlerinde kullanılan grobeton gelmektedir. Ayrıca kaldırımlarda kilit taşı olarak ve kaymaz rampa üretiminde yine atık lastik takviyeli betonlar kullanılmaktadır. Bu betonların bir diğer endüstriyel uygulama örneği iste kara ulaşımında özellikle araç trafiğini ayırmak için kullanılan beton bariyerlerdir (Tomosawa vd., 2005). Ayrıca atık lastik agrega kullanılarak üretilen betonların enerji dağıtma özelliğinden ötürü kurşun geçirmez beton levhaların verimini arttırmak amacıyla bu panellerin üretiminde en dış katman olarak da kullanılabilir (Sukontasukkul vd., 2013).

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Yukarıda derlenen bilgiler ışığında beton üretiminde lastik agregasının kullanımının betonun hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini etkilediği sonucuna varılabilir. Lastik agregasının hem boyutunun, şeklinin ve yüzey özelliklerinin hem de ikame oranının taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkilediği görülmektedir. Ancak lastik agregasının, bu özellikleri ne derecede etkilediği ile ilgili kesin bir bilgi vermek mümkün değildir. Bununla beraber literatürde yer alan bulgular neticesinde yine de bazı genellemeler yapılabilir. En temel seviyede yapılacak genelleme betonun işlenebilirliği ile ilgilidir; lastik agregasının kullanımıyla betonun işlenebilirliğinde azalma olduğu bütün çalışmalarda belirtilen bir etkidir. Ayrıca yine çalışmalarda basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ile ilgili genel bir azalma eğilimi belirtilmişken, eğilmede çekme dayanımıyla ilgili kesin bir etkiden bahsedilememektedir. Yine betonun elastisite modülünün ve birim ağırlığının lastik agregası ikamesiyle beraber azaldığı ile ilgili de genel bir bulgudan bahsetmek mümkündür. Betonun kırılma enerjisi veya enerji emme kapasitesi ile ilgili de bulgular birbirleriyle örtüşmemektedir. Lastik agregası ikamesi ile bu özelliklerde sürekli bir azalıştan bahsedilebileceği gibi sürekli bir artış hatta belirli bir seviyeye kadar artış ve sonrasında da azalıştan da bahsedilebilir. Son olarak bu çalışma kapsamında lastik agregasının beton üretiminde kullanımının betonun aşınma direncini nasıl etkilediği ile ilgili de literatürdeki çalışmalar

derlenmiş olup eğilmede çekme ve kırılma parametrelerinde olduğu gibi genel bir kanıya varılamamıştır.

Tüm bunların ışığında şu sonuca varılabilir, her ne kadar literatürde zaman zaman birbiriyle tamamen örtüşmeyen bulgular söz konusu olsa da yüksek oranlarda lastik agrega ikamesinin, hem taze hem de sertleşmiş betonun bütün özelliklerini kötüleştirdiği sonucu mevcuttur. Bu yüzden bu tip bir agreganın beton üretiminde kullanımı kullanılacak lastik agregasının karakteristiği ile yakından ilişkili olduğu için kullanımdan önce detaylı bir deneysel çalışma yapılması ve bu deney sonuçlarına göre bir değerlendirme yapılması daha sağlıklı ve doğru olacaktır. Bununla birlikte lastik agregalı betonun yüksek mekanik özellik gereksinimi duyulmayan işlerde kullanılmasının bu atığın geri dönüşümünde görece olarak en güvenli ve etkili yöntem olduğu söylenebilir.

Yazar katkısı

Author contribution

Süleyman İPEK – Araştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak, Yazma - inceleme ve düzenleme. **Kasım MERMERDAŞ** – Proje yönetimi, Denetim, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak. **Alparslan ULUSOY** - Araştırma, Kaynaklar, Yazma - orijinal taslak. **Yusuf İŞIKER** – Araştırma, Denetim, Yazma - orijinal taslak.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

References

Abdelmonem, A., El-Feky, M.S., Nasr, E.A.R., & Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227, 116660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>

- Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O., & Kallis, S. (2011). Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost. *Sustainability*, 3, 965-983. <https://doi.org/10.3390/su3070965>
- Al-Osta, M.A., Al-Tamimi, A.S., Al-Tarbi, S.M., Al-Amoudi, O.S.B., Al-Awsh, W.A., & Saleh, T.A. (2022). Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: Mechanical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, 45, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103399>
- Alwesabi, E.A.H., Bakar, B.H.A., Alshaikh, I.M.H., & Md Akil, H. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre. *Construction and Building Materials*, 233, 117194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194>
- Assaggaf, R.A., Ali, M.R., Al-Dulaijan, S.U., & Maslehuddin, M. (2021). Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1753-1798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019>
- Bisht, K. & Ramana, P.V. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 811-817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- Continental: Tyre basics passenger car tyres. (2021, 20 October). <https://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/606132/d2e4d4663a7c79ca81011ab47715e911/download-tire-basics-data.pdf>
- Dondi, G., Tataranni, P., Pettinari, M., Sangiorgi, C., Simone, A., & Vignali, V. (2014). Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 68, 370-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.093>
- EAPA: Asphalt in figures 2017. (2021, 20 October). <https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017/>
- Emiroğlu, M. (2006). *Atık taşı lastiğin beton içerisinde kullanımı ve betonun karakteristiklerine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Emiroğlu, M., Aydın, M., & Yıldız, S. (2011). Lastik Agregalı Betonların Yük Altındaki Gerilme Davranışlarının İncelenmesi. *International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey.
- Epps, J.A. & Johnson, D. (2021, 20 October). The advancement of asphalt pavements over the last 50 years. *The Magazine of the Asphalt Institute*. <http://asphaltmagazine.com/the-advancement-of-asphalt-pavements-over-the-last-50-years/>
- ERTMA - European Tyre & Rubber Manufacturers' Association: Tyres. (2021, 20 October). <http://www.etrma.org/tyres>
- Gesoğlu, G., Güneyisi, E., Hansu, O., İpek, S., & Asaad, D.S. (2015). Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 1113-1121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.030>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>
- Güneyisi, E. (2010). Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. *Materials and Structures*, 43, 1037-1048. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9564-1>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaş, K., & İpek, S. (2014). Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2(3), 193-207. <http://dx.doi.org/10.12989/acc.2014.2.3.193>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Naji, N., & İpek, S. (2016). Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 9-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.003>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309-2317. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.005>
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R.K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>

- Hesami, S., Hikouei, I.S., & Emadi, S.A.A. (2016). Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Cleaner Production*, 133, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079>
- Hilburg, J. (2021, 20 October). *Concrete production produces eight percent of the world's carbon dioxide emissions*. The Architects' Newspaper. <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions>
- Holka, H. & Jarzyna, T. (2017). Recycling of car tires by means of waterjet technologies. *AIP Conference Proceedings*, 1822, 020008. <https://doi.org/10.1063/1.4977682>.
- İpek, S., Diri, A., & Mermerdaş, K. (2020). Recycling the low-density polyethylene pellets in the pervious concrete production. *Journal of Materials Cycle and Waste Management*, 23, 272-287. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01127-x>.
- İpek, S. & Mermerdaş, K. (2020). Studying the impact of crumb rubber on the setting time of self-compacting mortar. *9th International Conference on Engineering & Natural Sciences*, Ankara, Turkey (pp. 210-222).
- İpek, S. & Mermerdaş, K. (2022). Atık lastik agregasının geopolimer harcın taze özellikleri üzerine etkisi. *16th MAS International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Mardin, Turkey (pp. 500-510).
- ISO – İstanbul Sanayi Odası. (2018). *Kauçuk ürünleri imalat sanayi: Küresel rekabette İstanbul Sanayi Odası meslek komiteleri sektör stratejileri projesi*. https://www.iso.org.tr/sites/1/upload/files/kaucuk_sanayi_raporu_web_v2-8712.pdf
- Jokar, F., Khorram, M., Karimi, G., & Hataf, N. (2019). Experimental investigation of mechanical properties of crumbed rubberconcrete containing natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 208, 651-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.063>
- Kang, J., Zhang, B., & Li, G. (2012). The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 27, 1144-1148. <https://doi.org/10.1007/s11595-012-0619-8>
- Karakurt, C. (2015). Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17, 422-433. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0263-9>
- Karger-Kocsis, J., Meszaros, L., & Barany, T. (2013). Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Materials Science*, 48(1), 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2>
- Karunarathna, S., Linforth, S., Kashani, A., Liu, X., & Ngo, T. (2021). Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128230>
- Khaloo, A.R., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>
- Lv, J., Zhou, T., Du, Q., & Wu, H. (2015). Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 91, 145-149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.038>
- Martinez, J.D., Puy, N., Murillo, R., Garcia, T., Navarro, M.V., & Mastral, A.M. (2013). Waste tyre pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Mastral, A.M., Murillo, R., Calle'n, M.S., Garcia, T., & Snape, C.E. (2000). Influence of process variables on oils from tyre pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuel*, 14, 739-744. <https://doi.org/10.1021/ef990183e>
- Medina, N.F., Medina, D.F., Hernandez-Olivares, F., & Navacerrada, M.A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Construction and Building Materials*, 144, 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>
- Mhaya, A.M., Huseien, G.F., Abidin, A.R.Z., & Ismail, M. (2020). Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes. *Construction and Building Materials*, 256, 119505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119505>
- Mohammed, B.S. & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234-251.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>
- Moustafa, A. & ElGawady, M.A. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Construction and Building Materials*, 93, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- PAGEV. (2018). *Türkiye kauçuk sektör izleme raporu – 2017*. <https://pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebli%C4%9F%20Bilg.%203/Kau%C3%A7uk%20Sekt%C3%B6r%20C4%B0zleme%20Raporu%202017.pdf>
- Pehlken, A. & Muller, D.H. (2009). Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modeling. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.008>
- Shu, X. & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Shulman, V.L. (2004). *Tyre recycling, Rapra review reports*, 15(7). http://dl.mozh.org/up/Tyre_Recycling.pdf
- Siddika, A., Al Mamun, Md A., Alyousef, R., Amran, Y.H.M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
- Sienkiewicz, M, Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32, 1742-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
- Singh, S., Nimmo, W., Gibbs, B.M., and Williams, P.T. (2009). Waste tyre rubber as a secondary fuel for power plants. *Fuel*, 88, 2473-2480. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.026>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.C., Ghataora, G.S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Premanoch, P., Sappakittipakorn, M., and Banthia, N. (2013). Use of high content crumb rubber from wasted tire in bulletproof concrete panels. *1st International Conference in Concrete Sustainability*, Tokyo, Japan.
- Sullivan Tire: Anatomy of a tire. (2021, 20 October). <https://www.sullivantire.com/learn/tire-classroom/anatomy-of-a-tire>
- Tattersall, G.H. & Banfill, P.F.G. (1983). *The Rheology of Fresh Concrete*. London: Pitman.
- Thakare, A.A., Siddique, S., Sarode, S.N., Deewan, R., Gupta, V., Gupta, S., & Chaudhary, S. (2020). A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 262, 120745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745>
- Thakur, A., Senthil, K., Sharma, R., & Singh, A.P. (2020). Employment of crumb rubber tyre in concrete masonry bricks. *Materials Today: Proceedings*, 32(4), 553-559. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.106>
- THBB: *Dünyada sektör*. (2021, 20 October). <https://www.thbb.org/sector/dunyada-sektor/>
- Thomas, B.S. & Gupta, R.C. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>
- Tomosawa, F., Noguchi, T., & Tamura, M. (2005). The way concrete recycling should be. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1), 3-16. <https://doi.org/10.3151/jact.3.3>
- Topçu, İ.B. & Avcular, N. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1135-1139. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00115-4)
- Topçu, İ.B. & Unverdi, A. (2018). Scrap tires/crumb rubber. In R. Siddique, & P. Cachim (Eds), *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (ss. 51-77). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00002-X>
- Uygunoğlu, T. & Topçu, İ.B. (2010). The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1141-1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027>
- WBCSD: *Managing end-of-life tires*. (2021, 19 October).

<http://docs.wbcsd.org/2008/08/EndOfLifeTires-FullReport.pdf>

Yang, G., Chen, X., Guo, S., & Xuan, W. (2019). Dynamic mechanical performance of self-compacting concrete containing crumb rubber under high strain rates. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 3669-3681. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0024-3>

Zaleska, M., Pavlikova, M., Citek, D., & Pavlik, Z. (2019). Mechanical and thermal properties of light-weight concrete with incorporated waste tire rubber as coarse aggregate. *AIP Conference Proceedings*, 2170, 020026. <https://doi.org/10.1063/1.5132745>