




Plastik Atıkların Betonda Değerlendirmesindeki Güncel Durum

Mustafa Altuğ Peker¹ , Oğuzhan Atas^{1*} , Murat Aksel¹ 

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye.

*oguzhan.atas@alanya.edu.tr

Özet

Nüfusun hızlı artışı ve elektronik, otomotiv, ambalaj gibi sanayi ürünlerinde kullanılan hammaddeler plastik kullanımına olan talebi her geçen yıl artırmaktadır. Endüstriyel olarak kullanımı faydalı olan plastik ürünlerin ekonomik ömrünün tükenmesiyle çevresel ortamda kirliliğe sebep olmaktadır. Atık haline gelen plastik ürünler çeşitli yöntemlerle yeniden değerlendirilerek çevre kirliliği azaltılmak istenmektedir. Bu değerlendirmelerin başında; yakılarak enerji üretimi ve geri dönüşüm ile yeni ürün üretimi gelmektedir. Ancak bu dönüşüm yapılsa bile %35-55 oranında ciddi bir miktar atık depolanmak zorunda kalmaktadır. Depolanan plastik hacminin beton üretiminde değerlendirilerek atık miktarının azaltılması son derece ideal bir çözüm olabilmektedir. Bu derleme makalesinde literatürde plastik atıkların betonda kullanımı ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalar taze beton özellikleri, betonun mekanik özellikleri ve durabilite özellikleri olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda farklı birçok plastik türü, mikro, makro boyutta ve lif olarak kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar plastik türü, incelenen parametre ve beton performansına etkisi bakımından değerlendirilmiş ve sonuçlar kısmında verilmiştir. Bu konu hakkında çalışma yapan araştırmacılar için son derece faydalı bir derleme haline gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plastik Atık, Sürdürülebilirlik, Beton Mekanik Özellikleri, PET, HDPE, PP, PVC

Current Situation in the Evaluation of Plastic Wastes in Concrete

Abstract

The rapid increase in population and raw materials used in industrial products such as electronics, automotive, and packaging increase the demand for plastic use every year. Plastic products, which are useful for industrial use, cause pollution in the environment with the depletion of their economic life. It is desired to reduce environmental pollution by revaluing plastic products that have become waste through various methods. At the start of these evaluations, energy production, recycling, and making new things through incineration were talked about. Even if this conversion is completed, a significant amount of waste (35–55%) must be stored. Reducing the amount of waste by evaluating the stored plastic volume in concrete production can be an ideal solution. In this review article, studies on the use of plastic waste in concrete were examined in the literature. The examined studies evaluated the concrete properties, mechanical properties, and durability properties of concrete. In experimental studies, many different types of plastic have been used, such as micro, macro, and fiber. Studies in the literature have been evaluated in terms of the type of plastic, the parameter studied, and its effect on concrete performance, and are given in the results section. It has become an extremely useful compilation for researchers who will work on this subject.

Keywords: Plastic Waste, Sustainability, Mechanical Properties of Concrete, PET, HDPE, PP, PVC

Geliş/Received: 21 Ara 2022 / 21 Dec 2022

Kabul Ediliş/Accepted: 30 Ara 2022 / 30 Dec 2022

1. GİRİŞ

İnsanoğlu petrolü keşfedip, petrokimya konusunda ilerleme kaydedince doğal hammadde kullanılarak yapılan her tür ürünün yerini hızlı bir şekilde petrolden elde edilen veya farklı kaynaklı polimerlerin sentezlenmesiyle elde edilen plastikten ürünler almaya başlamıştır. Nüfus artışına ek olarak tüketim alışkanlıklarında değişim ve plastik sanayindeki sıçrama günümüzde plastiğin hemen hemen her ürünün içinde yer almasına neden olmuştur. Tekstil, kozmetik, otomotiv, elektronik, ambalaj sanayileri plastik kullanım alanının başını çekmektedir. Durabilitesi yüksek, üretimi kolay ve ucuz, korozyon gibi dış faktörler kaynaklı aşınmaya karşı dirençli olduğu için her tür sektörden talebin olduğu plastiğin yıllık üretim miktarı 2020 yılı için dünyada 360 milyon tonu aşmıştır ve bu değer 2050 yılında iki katına çıkması beklenmektedir [1], [2]. Çin, toplam üretim miktarının %32'sini üreterek plastik üretiminin başını çekmektedir. Plastik endüstriyel olarak ekonomik açıdan faydalı bir madde olmasına rağmen üretim, kullanım ve kullanım sonrasında plastikler çevresel ortama kirletici olarak girmektedirler. Bu kirleticilerin doğada çözünmesi içeriğine bağlı olarak binlerce yıl sürebilmektedir [3]–[5].

Plastiklerin endüstriyel amaçlarla kullanıma başlamasından 2015 yılına kadar üretilen tüm plastiğin %30'unun halen kullanılmakta olduğu, %12'sinin yakılarak enerji üretiminde kullanıldığı, %9'unun geri dönüştürüldüğü ve geri kalan miktarın ise çöp depo sahalarında ve çevre ortamına kirletici olarak karıştığı tahmin edilmektedir [6]. Gerek düzenli gerekse de vahşi depolama ile arazide biriktirilen plastik atık miktarının toplam üretilen plastiğin %35-%55 arasında olduğu tahmin edilmektedir [2], [7]. Arazide depolanan plastikler sebebiyle özellikle arazi bedellerinin yüksek olduğu bölgelerde yerel idareler arazi maliyetlerini karşılayamamakta ve yetersiz bütçeler sebebiyle vahşi depolama ile biriktirilen plastik atıklar hem yeraltı suyunu hem de yüzeysel drenajla tüm sucul ekosistemleri kirletmektedir. Özellikle nihai alıcı ortam olan deniz/göl gibi büyük kütleli su sistemine taşınan ve biriken hem kaynaktan hem taşınım sürecinde hem de alıcı ortamda çeşitli şekillerde çözünen (biyolojik, fiziksel, kimyasal) plastik atıklar, mikroplastik adı verilen ve 1 µm ile 5 mm arasında boyutlara sahip plastik parçacıklara ufalanırlar.

Yıllarca çeşitli araştırmacılarla farklı bölgelerde deniz ekosisteminde mikroplastik bildirimleri yapılmasına rağmen [8]–[11] konunun çevresel olarak önemi ancak Stefatos vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada ortaya konulmuş ve konunun detayları tartışılmıştır [12]. Günümüze değin pek çok farklı araştırma grubu konunun farklı boyutlarını incelemiştir. Deniz ekosistemi içinde mikroplastiklerle ilgili, mikroplastik kirleticilerin kaynaklarını ve kaynaktan önlenme yöntemleri [13], [14], karadan deniz alıcı ortamına taşınım süreçleri [15]–[17], plastik kirleticilerin deniz ortamındaki dağılımı ve taşınımı [18]–[21] ve ekosistem içindeki canlılara etkisi [22]–[24] incelenmiştir.

Kıyı bölgelerinde mikroplastik birikimi ve davranışı ile ilgili çalışmalar sürekli güncelliğini korumakta ve mikroplastiklerin yakın deniz bölgesi ve kıyı yakınındaki davranışlarına dair araştırmalar sürmektedir [25]–[28]. Bakaraki Turan vd. (2021) yılında yaptıkları istatistiksel çalışmada MP'lerle ilgili deniz ve okyanuslardaki araştırmaların son yıllarda artarak devam ettiğini göstermişlerdir. Ancak, bu araştırmaların yalnızca oldukça küçük bir kısmı (2020 yılı için yaklaşık %1'i) yakın kıyı bölgesindeki dalga - sediment - MP ilişkisini irdelemektedir [29].

Mikroplastikler çeşitli kaynaklardan yayıldıkları için farklı boyut, renk, yoğunluk ve polimer özellikleri sergilemektedir. Bu durum var olan problemi tanımla konusunda karşılaşılan bir zorluktur. Kaynaklarına göre, mikroplastikler birincil ve ikincil olarak sınıflandırılırlar. Birincil kaynaklı MP'ler, doğrudan su ortamına giriş yaparken, ikincil kaynaklı MP'ler büyük plastiklerin mekanik ufalanma, UV ışınları, mikroorganizmalar aracılığı ile parçalanma, kimyasal (örn., asidite) ve fiziksel etkilerle çözünme (örn., sıcaklık) gibi etkilerle ufalanması ile oluşurlar. Kozmetik, el işleri, tekstil ürünleri, gıda maddelerinde dahi kullanılan simler, senettik ürünlerden kopan lif ve iplikçikler ile plastik eşyaların döküntüleri, karayolu taşıtlarının lastikleri, kirletici gazlardaki plastik parçacıklar, günlük tüketim ürünlerinin çöplerinin parçalanmasıyla oluşan MP'ler sırasıyla birincil ve ikincil kaynaklara örnek olarak verilebilir [19], [21], [22], [30].

Genel olarak, üretim aşamasında plastikler kullanım amaçlarına göre farklı kimyasal formlarda ve değişik içeriklerde üretilirler. Kendi çevresel etkisine ek olarak içeriğine eklene flatant, ağır metal gibi sucül ekosisteme zarar verecek maddeler de MP'lerde bulunmaktadır. Plastik döküntüler, diklorodifeniltriokloroetan (DDT), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve polibromlu difenil eterler (PBDE'ler) gibi zararlı kimyasalları dünya çapında deniz suyundan kolayca biriktirerek, konsantrasyonlarını büyüklük sıralarına göre arttırlar [31]. Kendisinde ağır metal, flatant gibi katkı maddesi bulunduran MP'ler sucül ekosistem içinde hidrofobik toksik kirleticileri de kendisine yapıştırmaktadır. MP'ler boyutlarının küçüklüğü sebebiyle sucül ekosistemde yaygın olarak canlılar tarafından besin zannedilerek yutulmakta ve böylece besin zincirine bu şekilde giriş yapmaktadırlar [32]. Büyük su kütlelerinde akıntı, dalga, rüzgar vb. dış faktörlerle kolaylıkla taşınabilen ve doğada binlerce yıla yakın indirgenmemeleri nedeniyle MP'ler denizlerde ve okyanuslarda önemli bir kirlilik unsuru ve bir çevre tehdididir [30]. Türkiye kıyılarında yapılan araştırmalarda da besin ekosistemine girmiş yenilebilir balık türlerinin vücudundan toplanmış MP'lere dair çalışmalar bulunmaktadır [24].

Sadece su ekosisteminde değil havada [33], [34], toprakta [35], [36], kutuplarda bile [37], [38] mikroplastik kirliliğine rastlanmaktadır. Ayrıca insan metabolizmasında dahi mikroplastikler bulunmuştur [39]. Durumun ciddiyeti son derece yüksektir ve plastik atıkların mutlaka kontrol altına alınması ve üretilmiş plastiklerin mümkünse farklı şekillerde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yöntemlerden biri atık plastiklerin yapı teknolojilerinde kullanılmasıdır ve bu konuda son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmış ve araştırmalar devam etmektedir.

2. BETONDA ATIK PLASTİK KULLANIMI

Bu bölümde atık plastiğin beton ve harcın taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisinin yanı sıra dayanıklılık özelliklerini araştıran çalışmalar incelenmiştir. Polietilen Tereftalat (PET), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC) literatürde en sık kullanılan plastik türleridir. Literatürde çalışmalarda farklı türdeki bu plastiklerin harç ve betonda; agregata, lif ve filler yani dolgu malzemesi olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu atıkların çok az bir kısmı direkt olarak kullanılırken; büyük bir kısmı fiziksel ve/veya kimyasal geri dönüşüm teknikleriyle kullanılacak duruma getirilmiştir.

Atık plastiklerden agregata ve lif üretimi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. PET şişelerden lif üretilen bir yöntem kullanılarak, beton ve PET lifler, %3'e varan lif içeriğinde kolaylıkla karıştırılabilmektedir. Yapılan teslerde PET'in ıslanma direncinin PVA'dan daha düşük, PP'den daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca PET liflerin yanma testi sırasında hiçbir toksik gaz üretmediği görülmüştür. Önerilen yöntemle üretilen betonlar, Japonya'da kaldırım olarak ve Hishikari Madeni'nde ana kapı desteği olarak kullanılmıştır [40]. Geri dönüştürülmüş atık PET şişelerden üretilen ince agregata kullanılarak hafif agregalı betonun geliştirilmesi konusunda yapılan bir çalışmada ise kullanılan agregaların üretim süreçleri paylaşılmıştır [41].

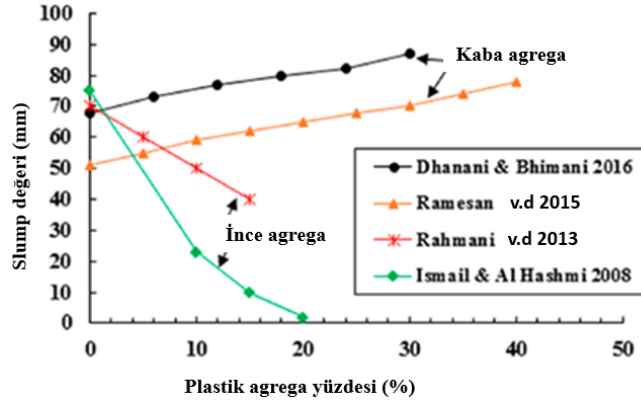
2.1 Taze Beton Özellikleri

Bir betonun sertleşmiş özellikleri taze betonun özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Beton karışımının kıvamı ve sıkıştırılması, nihai mukavemeti ve dayanıklılığı için hayati bir önem taşır. Bu nedenle taze betonun en önemli özellikleri işlenebilirliği ve kıvamıdır. Geri dönüştürülmüş veya atık plastikler, bir beton karışımına ince veya kaba agregata olarak eklendiğinde, betonun taze özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Bu bölümde, ince ve kaba agregata olarak geri dönüştürülmüş ve atık plastikler içeren betonun taze özellikleri araştırılmıştır.

2.1.1 İşlenebilirlik

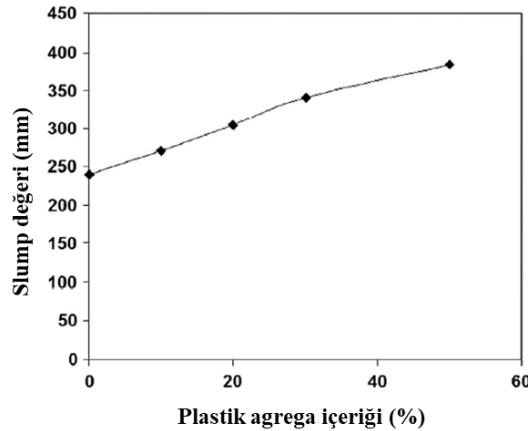
Betonda çökme, taze betonun işlenebilirliğini tanımlamak için yaygın olarak kullanılır. Agregata gradasyonu, agregaların şekli, su/çimento oranı ve karışımdaki akışkanlaştırıcı miktarı gibi faktörler betonun işlenebilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Çeşitli araştırmacılar, ince ve kaba agregata olarak atık plastiklerin betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmıştır [41]–[46]. Araştırma bulguları atık plastiklerin etkisi altında somut işlenebilirliğin çelişkili performanslarını göstermiştir.

Geri dönüştürülmüş atık plastiklerin betonda iri agrega olarak kullanıldığı çalışmalarda, sonuçlar geri dönüştürülmüş ve atık plastiklerin yüzdesi %40'a kadar arttıkça beton çökmesinin arttığını göstermiştir (Şekil 1). Çökmedeki artış, doğal iri agrega yerine kullanılan geri dönüştürülmüş plastik miktarı arttıkça, su emmenin azalması nedeniyle karışımdan daha fazla su elde edildiğini göstermektedir [47]–[49]. Kum, ince plastik atık agrega ile değiştirildiğinde ise şekilde gösterildiği gibi, işlenebilirlikte kaba plastik atık agregaya göre zıt bir eğilim gözlemlenir. İnce geri dönüştürülmüş plastik içeriği arttıkça betonun çökmesi azalır [48], [50], [51].



Şekil 1. İnce ve kaba plastik agregaların betonun çökmesine etkisi [48]

Geri dönüştürülmüş plastik atık içeren harcın çökmesi incelenmiştir [52]. Yapılan çalışmada, plastik atığın nehir kumu ile karşılaştırılması durumunda pürüzsüz bir dış yüzeye sahip olduğunu ve karışımın işlenebilirliğinin arttığını belirtilmiştir. Harç içeren plastik atıkların, kontrol karışımına kıyasla daha fazla çökme değerine sahip olduğu bulunmuştur (Şekil 2). Ayrıca harçtaki ince plastik atık agregalar yüzey alanını artırarak kendiliğinden yerleşen harcın işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Plastik atık agregalar suya dayanıklı yapılarından dolayı karışımın işlenebilirliğini artırmıştır.



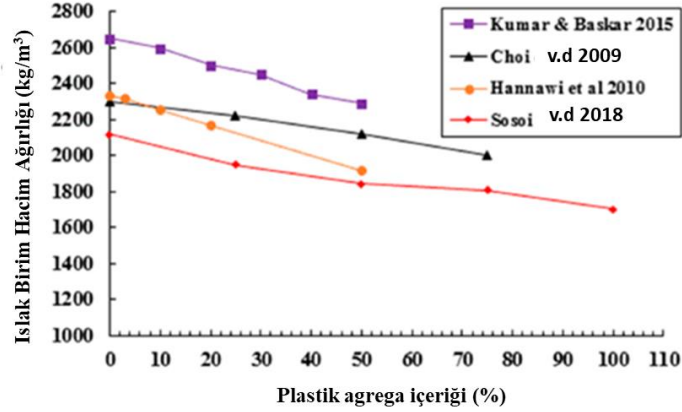
Şekil 2. Plastik atık miktarının harç akışkanlığına etkisi [52]

2.1.2 Kuru ve Doygun Birim Hacim Ağırlıkları

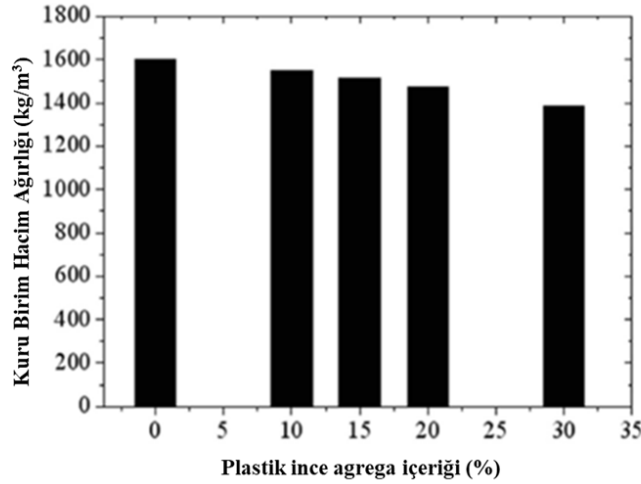
Betonun birim hacim ağırlığı, karışım bileşimlerinin özgül ağırlığına ve betonun kompasitesine bağlıdır. Atık plastikler, doğal agregalara kıyasla tipik olarak daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, ikame düzeyi ile orantılı olarak hem doygün hem de kuru birim hacim ağırlığının azalması beklenir. Plastik atık içeren kendiliğinden yerleşen harcın birim hacim ağırlığının nehir kumunun %50'si yerine geçene kadar sürekli azaldığını gözlemlenmiştir [52]. Plastik atık içeren betonun kuru ve doygün birim hacim ağırlıklarının plastik

atık agrega oranı arttıkça azaldığını belirtilmiştir [53]. Yapılan bir başka çalışmada ise, agrega olarak polikarbonatların ve PET atıkların dahil edilmesiyle harç ve betonun kuru ve doymun birim hacim ağırlığının azaldığı aktarılmıştır [54]. Bu sonuçlara göre, bir harç veya beton numunesinin birim hacim ağırlığındaki azalma, yapının toplam ağırlığını ve inşaat maliyetini azaltabilir.

Şekil 3 ve Şekil 4'te literatürdeki bazı çalışmalardaki kuru ve doymun birim hacim ağırlıklarının plastik atık içeriğiyle değişimi gösterilmiştir [48].



Şekil 3. Doymun birim hacim ağırlığının plastik atık içeriğiyle değişimi [41], [55]–[57]



Şekil 4. Kuru birim hacim ağırlığının plastik atık içeriğiyle değişimi [58]

2.1.3 Hava İçeriği

Atık plastik agrega içeren betonun hava içeriği ile ilgili çalışmalar literatürde az sayıdadır. Geleneksel ince agrega bulunan betonda ince agrega yerine farklı plastik agrega eklenerek farklı yüzdesel oranlardaki değerlerin hava içeriği karşılaştırılmıştır [59]. Bu çalışmada maksimum 4 mm boyutundaki plastik agrega kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, ince agregaların %20'sine kadar plastik agrega içeren çeşitli beton karışımlarının hava içeriklerinde önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte ince agreganın %30, %50 ve %100 oranında plastik agrega ile değiştirilmesi durumuna herhangi bir plastik içermeyen kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %110, %167 ve %387 daha yüksek hava içeriği bulunmuştur. Bu sonuçlar betona plastik agrega ilavesinin hava içeriğini arttırdığını ortaya koymaktadır.

Benzer sonuçlar başka çalışmalarda da bildirilmiştir. Düzensiz şekilli plastik agrega kullanımından dolayı betondaki hava içeriği artabilir. Hava içeriğindeki artış doğal kum ve plastik ince agreganın karışmaması

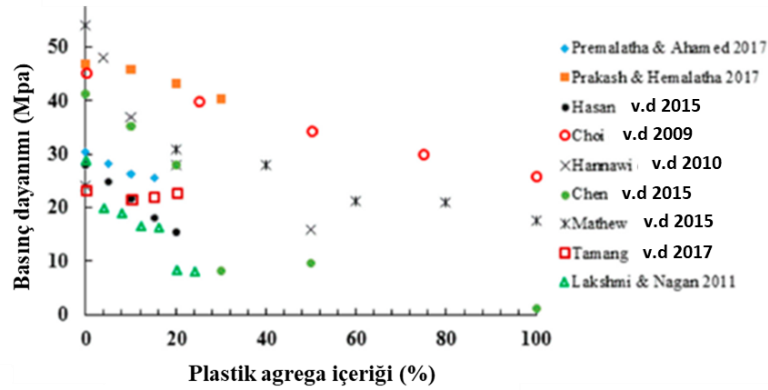
sonucu da ortaya çıkabilir. Ayrıca polimerlerin hidrofobik doğası gereği atık plastik agregaların yüzeyinde hava kabarcığı oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, bazı yazarlar bu tür karışımlarda hava sürükleyici katkıların kullanılmasını da önermektedir [60]–[62].

2.2 Mekanik Özellikler

Çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri pratik uygulamaya uygunluğunu gösteren en önemli parametrelerden biridir. Bu bölümde literatürdeki geri dönüştürülmüş atık plastik içeren beton ve harcın mekanik özelliklerinin özetlenmesi amaçlanmaktadır.

2.2.1 Basınç Dayanımı

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde plastik agrega içeren harç ve beton karışımının basınç dayanımı genellikle olumsuz etkilendiği görülmektedir. Pürüzsüz plastik agregalar ile çimento matrisi arasındaki zayıf bağlanmanın karışımı zayıflattığı görülmüştür [63], [64]. Benzer şekilde, çeşitli boyutlarda PET agrega kullanarak yapılan çalışmada basınç dayanımında azalma bulgusuna ulaşılmıştır [53]. Başka bir çalışmada araştırmacılar kullandıkları beton karışımındaki kumu %50 oranına kadar polivinil klorür (PVC) granülleri ile değiştirmiştir. Atık borulardan elde ettikleri bu granülleri bir işleme tabii tutmadan direkt olarak kullanmışlardır. Ürettikleri numuneler 28. günde referans beton ile karşılaştırıldığında %50 plastik agrega içeren karışımın yaklaşık %50 oranında daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Aynı beton karışımında %30 oranında plastik kullanıldığı durumda mukavemet azalması yaklaşık %25 olmuştur [65]. Hem kaba hem de ince agrega olarak farklı yüzdelerde atık plastik içeren betonun basınç dayanımını inceleyen bazı çalışmalar şekilde gösterilmiştir [48].



Şekil 5. Atık plastik agrega içeren betonların 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması [41], [56], [59], [66]–[70]

Literatürdeki az sayıdaki çalışmada ise plastik atık agregaların düşük oranda kullanılması durumunda basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Örneğin, hafif kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımında geri dönüştürülmüş plastik atık agreganın %20'den daha az kullanıldığı durumlar için bir artış bulunmuştur. Yüksek oranlarda plastik kullanıldığı durumlarda ise basınç dayanımındaki düşüş devam etmektedir. Yazarlar basınç dayanımındaki bu artışı atık plastik olarak kullandıkları endüstriyel plastik döşeme ve araba tamponlarına bağlamışlardır [58]. Benzer bir sonuç, başka çalışmalarda da elde edilmiştir. Atık PET plastiklerin doğrudan bir şekilde agrega olarak kullanıldığı çalışmada, plastik agreganın %10 oranına kadar değiştirilmesi durumu için artan bir basınç dayanımı bulmuşlardır. Yazarlar bu sonucu kırılmanın başladığı noktadaki plastik parçacıkların varlığına bağlamışlardır [71].

Betonda atık plastik liflerin kullanıldığı çalışmalarda da benzer bulgular rapor edilmiştir. Lifli betonun basınç dayanımı, lif içeriği ve uzunluk yüzdeleri arttıkça azalmıştır. 5 mm uzunluğundaki ve %0.5, %1, %1.5 ve %2 lif içeriğine sahip beton karışımları sırasıyla %5, %10, %15 ve %21 daha düşük basınç dayanımına ulaşmıştır. Aynı miktardaki lif içeriği için 10 mm ve 15 mm'lik lif uzunluklarında ise, sırasıyla

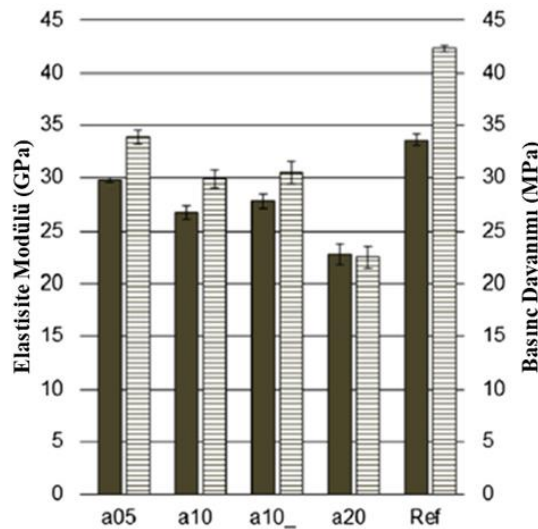
%8, %13, %18, %26 ve %8, %15, %21, %28 oranında daha düşük mukavemet değeri elde edilmiştir [72]. Lif oranı arttıkça betonun daha düşük basınç dayanımına sahip olmasının nedeni başka bir çalışmada tartışılmıştır. Çalışmanın sonucunda betona liflerin eklenmesiyle matristeki hava boşluklarının sayısının arttığı bunun da basınç dayanımında azalmaya yol açtığı belirtilmiştir. Ayrıca, plastik liflerin pürüzsüz yüzeylerinden dolayı çimento matrisi ile aralarında iyi bağlanma sağlanamamaktadır. Bundan dolayı aralarında zayıf bir ara yüzey bölgesi oluştuğu için dayanımın azalmasına sebep olmaktadır [48].

Plastik ve çimento esaslı malzemeler arasında kimyasal bağ olmadığı için plastik ve çimento arasındaki bağın geliştirilmesiyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Bağlanma özelliklerini geliştirmek için geri dönüştürülmüş plastiklerin farklı kimyasal türleri (oksitleyici kimyasallar) ile işlenmesini önermiştir. Yazarlar yaptıkları çalışmada atık HDPE (High Density Polyetylene) plastikleri çok ince parçalanmış halde dolgu olarak kullanmıştır. Parçalanmış plastikler; su, çamaşır suyu, çamaşır suyu + NaOH 'a maruz bırakılmış ve daha sonra betona ilave edilerek basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Çamaşır suyu+ NaOH karışımında bekletilmiş plastikten %0,5 (kütlece) kullanıldığında 28 gün sonunda referans betona göre benzer ama biraz daha iyi basınç dayanımı elde edildiği görülmüştür [73].

2.2.2 Elastisite Modülü

Plastik atık içeren betonun basınç dayanımı özelliklerine benzer şekilde, normal agreganın atık plastik agregaya ile değiştirilme yüzdeleri arttıkça betonun elastisite modülü doğrusal olarak azalmıştır [56], [71]. Plastiklerin düşük elastisite modülüne sahip olmaları bu sonuçtaki temel etkidir [74].

Agrega yerine plastiklerin lif olarak kullanıldığı durumlarda da sonuçlar farklı değildir. Betonda geri dönüştürülmüş PET'ten elde edilen liflerin kullanıldığı bir yöntem sunulmaktadır [75]. Geri dönüştürülmüş PET lif takviyeli betonun performansını araştırmak için, hacimce %0,5, %0,75 ve %1,0 lif oranları için polipropilen (PP) lif takviyeli beton ile üretilen numuneler karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve kısıtlanmış kuruma rötesi gibi malzeme özelliklerini ölçmek için uygun deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, lif oranı arttıkça hem basınç dayanımının hem de elastisite modülünün azaldığını göstermektedir. Başka bir çalışmada, yapısal betonda kullanılan geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) plastik liflerin potansiyel faydalarını araştırılmıştır. Betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri, yedi seri numunenin test edilmesiyle incelenmiştir. Betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü etkilenmemiştir [76]. Son olarak literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde atık plastik agregaya içeren betonun elastisite modülündeki düşüşün basınç dayanımındaki düşüşten daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 6) [60], [77].



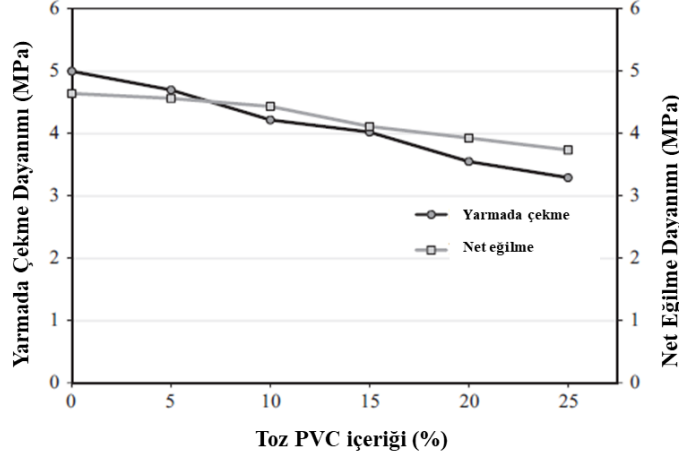
Şekil 6. Atık plastik agregaya kullanılan betonların elastisite modülü-basınç dayanımı karşılaştırması [60]

2.2.3 Eğilme/çekme Özellikleri

Harç veya betonun eğilme mukavemeti, karışıma plastik eklenmesinden olumsuz olarak etkilenmektedir. Plastik atık içeren harçların eğilme mukavemeti, plastik atık içeriğinin artmasıyla genellikle azalmaktadır[52]. Geri dönüştürülmüş atık PE ve PVC agrega içeren harç numuneleri üzerinde yapılan bir çalışmada artan plastik oranıyla kontrol numunesine göre eğilme mukavemetinde yaklaşık üç kat azalma olduğunu belirtilmiştir [78]. Geri dönüştürülmüş PET ve PC (polikarbonat) plastik agrega içeren harcın eğilme mukavemetinin kontrol karışımına göre değişmediğini gözlemlenmiştir [54]. Başka bir araştırma, sırasıyla %25, %50 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş PVC plastik atık agrega içeren harcın eğilme mukavemetinde yine sırasıyla %20, %23 ve %54 azalma olduğu sonucuna varmıştır [79]. Eğilme mukavemetinde bu azalmaların sebebi çimento esaslı malzeme ile plastik atık arasındaki zayıf bağdan kaynaklanıyor olabilir.

Harç ve beton numunelerinin yarmada çekme mukavemeti artan plastik atık oranıyla azalmaktadır. Geri dönüştürülmüş PET agrega içeren betonun yarmada çekme mukavemetinde azalma gösterdiğini belirtilmiştir [80]. Benzer şekilde, çeşitli oranlarda ince ve kaba agrega olarak PET kullanılan çalışmalarda, yarmada çekme mukavemetinde azalma tespit edilmiştir [53]. Başka bir çalışma da PVC atık agregalı beton üzerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir [65].

Sadece PET ince agrega içeren harcın eğilme ve çekme dayanımlarını PET ve kumun birlikte kullanıldığı harç ile karşılaştırılmıştır [81]. PET ve kum agregalarının bir arada kullanıldığı harçların mukavemeti, sadece PET agrega içeren harçlardan daha yüksek çıkmıştır. Yazarlar PET agregaları hiçbir işleme tabi tutmadan doğrudan kullanmıştır. Yapılan başka bir çalışmada, betondaki PVC tozu içeriği arttıkça, betonun nihai yarmada çekme ve eğilme mukavemetinin kademeli olarak azaldığını gözlemlenmiştir (Şekil 7). Bu sonuçların sebebi genellikle atık agrega plastik ilavesiyle basınç dayanımında olan azalmayla benzer şekilde plastik agregalar ve çimento matrisi arasındaki zayıf ara katmana bağlanmıştır[77].

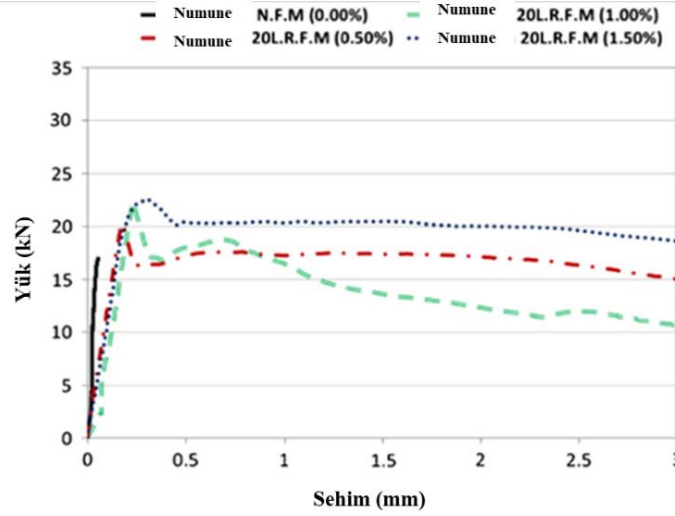


Şekil 7. PVC tozu içeriğine bağlı olarak eğilme ve çekme dayanımlarındaki değişim [77]

Bazı yazarlar, belli düzeyde plastik içeriğinin betonun eğilme/çekme mukavemetini artırabileceğini bildirmiştir. Doğal agregaların bir kısmı yerine atık geri dönüştürülmüş plastik agrega kullanılmasının betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımını %15-20 civarında artırabileceği gözlemlenmiştir [58]. Benzer bulgular atık ve geri dönüştürülmüş atık plastik agrega kullanan başka çalışmalarda da elde edilmiştir. Bununla birlikte atık plastik agregaların %20'den daha fazla kullanılması, yine de eğilme ve çekme mukavemetinde azalmaya yol açmıştır [49], [71], [82].

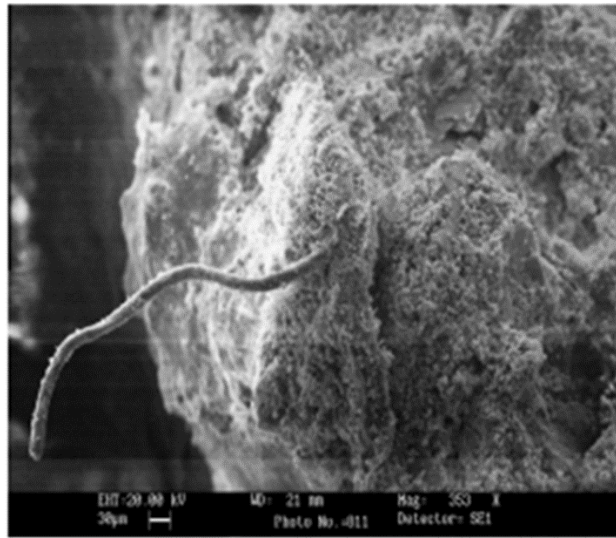
Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) plastik lif kullanarak yapılan bir çalışmada, eğilme dayanımında %3 ila %14 arasında artış gözlemlenmiştir [76]. Geri dönüştürülmüş plastik atık liflerinin Portland çimento harcının eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için laboratuvar

deneyler yapılmıştır [83]. Deneysel sonuçlar, kontrol harcına kıyasla, plastik liflerle güçlendirilmiş harçların eğilme tokluğunda yaklaşık 26 ila 61 kat, eğilme mukavemetinde ise %6 ila %84 arasında önemli bir artış olduğunu göstermiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Lifsiz ve farklı oranlarda geri dönüştürülmüş atık plastik lif içeren betonların eğilme dayanımlarının karşılaştırması [83]

Ayrıca, betonda bir miktar plastik agrega kullanımının sünekliği artırma eğiliminde olabileceğini bu bölümde belirtmekte fayda vardır. Ancak bu durum tamamen kullanılan plastiğin türü ile ilgilidir. Bu nedenle ihtiyaca bağlı olarak, daha iyi performans için uygun plastik türleri kullanılmalıdır. Eğilme kapasitesinin düşük plastik atık agrega (PET ve PC) kullanım yüzdelerinde arttığı, ancak plastik agrega içeriğinin normal agrega ile aynı seviyeye yani %50'ye ulaştığında ise daha fazla oranda arttığı belirtilmiştir [84]. Bu sonuç plastik/çimento matrisi ara yüzünün mikro çatlakların yayılmasına engel olmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte plastik agregaların kendileri de mikro çatlakların yayılmasını önleyip birleşmelerini geciktirebilir. Başka bir çalışmada ise geri dönüştürülmüş atık plastiklerin bir bölümünün kısa liflere benzer bir şekle sahip olduğu (Şekil 9) ve malzemeye bir miktar tokluk sağlayarak çatlaklı belirli bir dereceye kadar köprüleyebildiği öne sürülmüştür [85].



Şekil 9. Atık plastiğin lif benzeri şeklinin SEM görüntüsü [85]

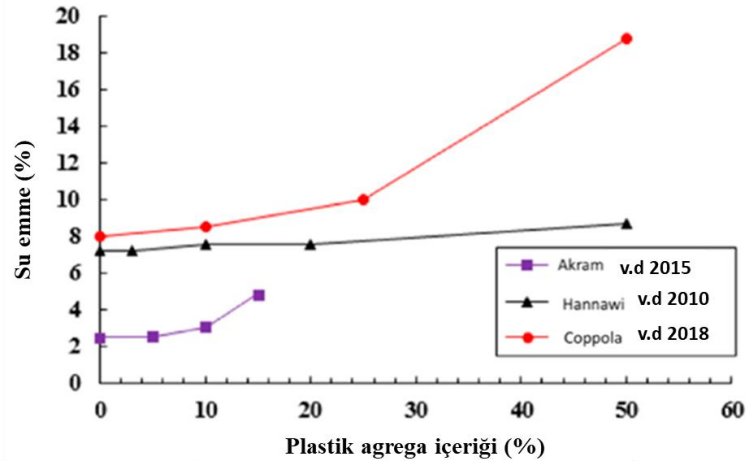
2.3 Durabilite Özellikleri

Betonun durabilitesi yani dayanıklılığı, sıvı ve gazların beton içerisine geçmesiyle doğrudan ile ilgilidir. Atık malzemelerin betonda kullanılması için geri dönüştürülmesi veya doğrudan kullanımı olası kirleticilerin mevcudiyeti nedeniyle durabiliteyi etkileyebileceğinden önemlidir. Mevcut araştırmalar, plastik agregaların doğal agregalar gibi iyi bir dayanıklılığa sahip olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte bazı çalışmalar, betona başka özel malzemeler karıştırılarak veya plastiğin özellikleri değiştirilerek dayanıklılığın geliştirilebileceğini belirtmiştir [48].

Bu bölümde, atık plastik içeren betonun durabilitesi üzerinde yapılan araştırmalar incelenmiştir.

2.3.1 Su Emme ve Porozite

Atık plastik içeren betonun dayanıklılığını değerlendirmek için çeşitli araştırmacılar tarafından beton numuneleri üzerinde su emme ve porozite deneyleri yapılmıştır. Elektronik atık plastik içeren beton üzerinde su emmeyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elektronik atık (e-atık), kullanım ömrünü doldurmuş buzdolabı, radyo, televizyon, klima, cep telefonu, bilgisayar ve diğer birçok elektronik aletten oluşmaktadır. Yapılan bir çalışmada su emme değeri, betondaki geri dönüştürülmüş elektronik atık plastik içeriği arttıkça katlanarak artmıştır. %15 oranında kaba e-atık içeren betonda referans betona göre %100'e yakın daha yüksek su emme görülmüştür [86]. Başka bir çalışmada araştırmacılar hafif harç üretiminde kullandığı karışımdaki doğal kumu %10, %25 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş atık plastik agrega ile değiştirmiştir. %10 oranında plastik agrega kullanılması durumunda referans numune ile benzer miktarda su emme değeri elde edilmiştir. Ancak karışımın plastik yüzdesi arttıkça su emme artmaktadır. %50 oranında plastik kullanılan harcın referans numuneye göre %117 daha yüksek su emdiği belirlenmiştir. Plastik agregaların neden olduğu daha yüksek miktardaki porozite, betonun su emmesindeki bu değişikliğin sebebidir [87]. %20 oranında PE ve PVC plastik agrega içeren beton üzerinde yapılan deneylerde 28. günde yaklaşık %200 ve %140 daha yüksek porozite bulunmuştur [78]. Bazı çalışmanın plastik agrega içeriği arttıkça su emmenin arttığını gösteren grafik şekilde verilmiştir.



Şekil 10. Su emme kapasitesinin atık plastik agrega ile değişimi [56], [86], [87]

Yığma duvar harcında geleneksel agregalar yerine belli yüzdelerde PET şişe granüllerinin kullanımını araştırılmıştır. Atık PET şişeler toplanmış ve duvar harcı bileşimine eklenmeden önce boyut küçültmeye ve bazı kimyasal işlemlere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, harç bileşimine kum yerine atık PET granüllerin eklenmesiyle basınç dayanımının azaldığını ve harcın su emme ve porozitesinin arttığını göstermiştir [88].

2.3.2 Donma Çözünme Direnci

Donma ve çözünme direnci, malzemenin döngüsel donma ve çözünmeye karşı dayanma özelliği olarak tanımlanabilir. Herhangi bir malzemenin dayanıklılığını tanımlayan en önemli parametrelerden biridir.

Harç ve beton numunelerinde atık polistiren köpük plastiklerin ince ve kaba agrega formunda kullanımı üzerinde çalışılmış ve atık plastik oranı arttıkça donma direncinin ve buna bağlı olarak da dayanıklılığın arttığını bulunmuştur [89]. Benzer şekilde harçta kullanılan atık polistiren köpük plastik agregaların donma-çözülme direncini artırdığını gözlemlenmiştir [90]. Bu çalışmalarda atık polistiren köpükler parçalanıp fırınlandıktan sonra agrega olarak kullanılmıştır.

2.3.3 Rötire

Rötire, dış yükler uygulanmadan önce bile betonun çatlamasına neden olabildiği için kontrolü çok önemlidir. Literatürde atık geri dönüştürülmüş plastik agregaların betonun rötiresi üzerindeki etkisi araştırıldığında çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Bazı yazarlar, karışımda artan atık geri dönüştürülmüş plastik oranı ile rötrenin de arttığını bildirmiştir. Rötire çimento hamurunun büzülmesi ve agrega içeriği ve sertliği olmak üzere temelde iki malzeme parametresine bağlı olduğu için bu davranış beklenebilir. Agregalar büzülmediği için betonda içsel kısıtlamalara yol açarlar. Bu nedenle daha sert agregalar aslında daha düşük büzülme yani rötire anlamına gelir. Geri dönüştürülmüş atık plastik agregalar, doğal agregalardan daha yumuşak olduğundan, bu tip agrega kullanımının rötirede bir artışa yol açması beklenir [48].

Yapılan bir çalışmada, betonda %100 oranında atık PET agrega kullanılması durumunda kuruma rötiresinde %50 PET agrega içeren betona göre %56'lık bir artış kaydedildiğini bildirilmiştir [81]. Bir başka çalışmada, %20 atık PET agrega içeren betonda referans betona kıyasla kuruma rötiresinde %20'lik bir artış ölçülmüştür [91]. Betonda artan geri dönüştürülmüş atık PET agrega içeriği ile daha yüksek rötire gözlemlenmiştir [84]. Plastik agrega içeren betonun daha yüksek rötire değerine sahip olması plastik agregaların geleneksel agregalara göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasıyla açıklanabilir.

Bazı yazarlar ise genel genelin aksine betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregaların eklenmesi sonucu kuruma rötiresinde azalma olduğunu belirtmiştir [92]. Bu durumu atık agregaların geçirimsiz doğası gereği agregalar tarafından emilen su miktarını azaltmasına ve böylece betonda çimento hidrasyonu için daha fazla serbest su kalmasına bağlamışlardır. Kuruma rötiresine betonda su kaybının sonucu olarak ortaya çıkan çekme kuvveti neden olduğu için plastik agregaların geçirimsizliği sonucu betonda kuruma rötiresi azalabilir.

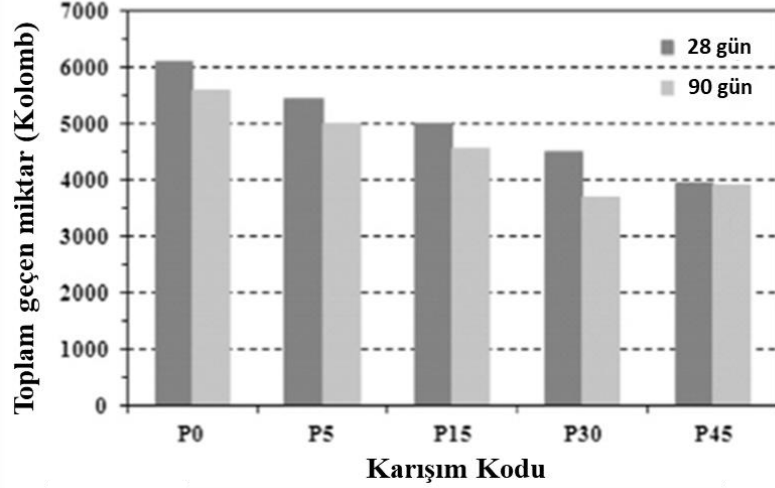
Beton veya harca atık plastik agrega eklenmesinin bir sonucu olarak kuruma rötiresindeki artış literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak bildirilmesine rağmen, aynı zamanda kısıtlanmış rötire çatlaklarında ise azalmaya neden olmuştur. Geri dönüştürülmüş atık PET agrega eklenmesi sonucu harçtaki kısıtlanmış rötire çatlaklarının daha geç ortaya çıktığını ve genişliklerinin de azaldığı bildirilmiştir [84]. Geri dönüştürülmüş atık HDPE agregalar ile de benzer bulgular elde edilmiştir [93]. Bu sonuçlar, atık plastik agregaların çatlak oluşumundan önce deformasyon kapasitesini iyileştirmesine bağlanmıştır. Ayrıca, PET pul şeklindeki parçacıklar lif gibi davranarak köprüleme yapmış ve çatlak açıklığını kısıtlamıştır [48].

Lifler de ise durum agregalara göre daha farklıdır. Kuruma rötiresinden kaynaklanan çatlakların geri dönüştürülmüş PET liflerin çatlak kontrol ve köprüleme özellikleri sayesinde düz betona göre daha iyi olduğunu belirtilmiştir [75]. Geri dönüştürülmüş HDPE liflerin rötire çatlaklarını azaltıp betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirerek performansa katkıda bulunduğu belirtilmiştir [76]. Geri dönüştürülmüş plastik atık lif içermeyen kontrol numunelerine kıyasla, artan miktarda lif ile güçlendirilmiş harç numunelerin plastik rötire çatlaklarında önemli bir azalma olduğunu belirtilmiştir [83]. Plastik lifler çimento esaslı malzemelerin sünekliğini iyileştirmekte ve köprüleme etkisi sonucu çatlakların büyümesini engellemektedir.

2.3.4 Klor Penetrasyonu

Atık veya geri dönüştürülmüş atık plastik içeren betonun klor penetrasyonuna direnci konusunda çelişkili sonuçlar bildirilmiştir. Doğal ince agreganın bir kısmının atık PVC granüller ile değiştirilmesiyle hazırlanan sertleşmiş betonun 28 ve 91 günlük klor iyonu penetrasyonuna karşı direncini araştırılmıştır [65]. Betonun klor iyonu geçirgenliğine karşı direnci, kür süresi ve PVC içeriğindeki artışla artmıştır (Şekil 11). Doğal agreganın %45 oranında PVC granüller ile değiştirilerek hazırlanan ve 28 gün kürlenmiş betonda, atık PVC

granül içermeyen ve aynı kür ortamında olan betona kıyasla klor geçişinde yaklaşık %36'lık bir azalma bulmuşlardır. Yazarlar betonun klorür iyonu penetrasyonuna karşı direncindeki artışı iyonun geçişini engelleyen geçirimsiz PVC granüllerine bağlamaktadır.



Şekil 11. Çeşitli oranlara atık plastik içeren betonun klor penetrasyonuna karşı gösterdiği direncin karşılaştırması [65]

Beton karışımındaki doğal kaba agreganın bir kısmı yerine atık poliüretan (PUR) köpük içeren betonun klorür difüzyon katsayıları değerlendirilmiştir [43]. Yazarlar, PUR plastik agregası içeren betonun yalnızca doğal agregası içeren referans betona göre daha düşük bir klorür difüzyonuna sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bazı yazarlar ise aksi yönde bulgular elde etmiştir. Betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregası eklenmesiyle klor penetrasyonuna karşı dirençte küçük bir azalma bulunmuştur. Ancak araştırmacılar yaptıkları çalışmada %5 oranına kadar, yani düşük miktarlarda atık plastik agregası kullanmıştır [93]. Artan atık geri dönüştürülmüş plastik agregası oranıyla klor penetrasyonunun arttığını bildirilmiştir [92]. Davranışın neden böyle olduğuna dair bir açıklama yapmalarına rağmen bu sonucun artan boşluk oranına bağlı olduğu düşünülebilir. Betona plastik agregası eklenmesiyle hava içeriğinin artabileceği daha önceki bölümlerde tartışılmıştı. Hava içeriğiyle birlikte boşluk oranı artan betonda daha yüksek klor girişi beklenebilir. Betona klor penetrasyonu kürle doğrudan ilgilidir. Kür koşullarının iyi olması sonucu betonun mikro yapısı daha yoğun olur ve klor penetrasyonu engellenir.

2.3.5 Karbonatlaşma

Çeşitli tipteki çimento harçlarının karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Sadece PET agregası içeren harcın 28 gün ve daha sonrasındaki kür için karbonatlaşma derinliği, PET ve kum agregası içeren harca göre daha düşük olmuştur. Yazarlar, sadece PET agregası içeren harca göre kum ve PET karışımı içeren harcın daha gözenekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu porozitesi yüksek harç, PET ve kum agregalarının birbirleriyle yeterince iyi birleşmemesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır [81]. Betonda kullanılan geri dönüştürülmüş atık PET ve PVC agregası içeriği arttıkça beton numunelerinin karbonatlaşma derinliğinin de arttığı bulunmuştur [78], [92].

2.3.6 Isıl İletkenlik

Betonun ısıl iletkenliğinin doğal agregaların atık plastiklerle değiştirilmesinden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Bu konuda yapılan birkaç çalışmada araştırmacılar, betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregası eklenmesi sonucunda betonun ısıl iletkenliğinde bir azalma olduğunu belirtmiştir. Termal

iletkenliğin kuru birim hacim ağırlığı ile orantılı olduğunu gözlenmiştir [60]. Yazarlar bu düşüşü atık plastik agregaların kuma kıyasla daha düşük termal iletkenliğe sahip olmasına bağlarken başka yazarlar [85] plastik ilavesiyle betondaki hava boşluklarının artmasına bağlamıştır. Sonuç olarak, plastik atık agregaya içeren beton, doğal agregaya içeren betona kıyasla önemli ölçüde daha iyi yalıtım özelliklerine sahiptir.

2.3.7 Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç

Farklı yüksek sıcaklıklarda (hem ince hem de iri agregaya olarak) farklı yüzdelerde PET içeren betonun basınç dayanımı araştırılmıştır [94]. Betondaki PET agregaya içeriği ve sıcaklık arttıkça mukavemet kademeli olarak azalmıştır. Yazarlara göre dayanımın düşük olmasının nedeni, dengesiz bir ısıl eğime yol açan ve çimento matrisinde çatlakların oluşmasına neden olan PET agregaya içeren betonun gözenekli yapısıdır. Ayrıca, PET agregaların termal bozunması da matriste ayrılmaya yol açarak erken çatlaklara neden olabilir ve mukavemet düşebilir.

3. ATIK PLASTİKLERİN BETONDA KULLANIMININ SONUÇLARI

Çimento esaslı malzemelerde atık plastik kullanımı ilgili yapılan literatür taramasına dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Atık plastik kaba agregaya içeriği belli bir orana kadar arttıkça işlenebilirlik artar. Bu seviyenin üzerinde ise azalır. İşlenebilirlik; parçacık şekline, boyutuna, pürüzlülüğüne, karışımın su-çimento oranına ve çimento hamuru miktarına bağlı olarak etkilenebilir.
- Atık plastik agregaların düzensiz şekli, doğal kumla iyi karışamaması ve plastiğin hidrofobik doğası nedeniyle betonun hava içeriğinde artışa neden olarak gözenekli bir yapı oluşturur.
- Atık plastik agregaya içeriğindeki artış hem plastik agregaların hafifliğine hem de oluşan gözenekli yapıya bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığını azaltır.
- Atık plastik agregaya oranındaki artışla birlikte basınç dayanımında kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Ancak bazı çalışmalar, düşük seviyelerde atık plastik kullanılması durumunda basınç dayanımında bir artış olduğunu göstermiştir.
- Atık plastiklerin lif olarak kullanılması durumunda betondaki lif oranı ve lif uzunluğuna bağlı olarak basınç dayanımında azalma olmuştur.
- Betonun elastisite modülü, atık plastik agregaya içeriği arttıkça doğrusal olarak azalmaktadır. Ancak elastisite modülündeki bu düşüş basınç dayanımındaki düşüşe göre daha azdır.
- Atık plastik içeren betonun eğilme ve yarmada çekme mukavemetinde bir azalma olduğu görülmüştür. Ancak doğal agreganın %20'den az atık plastik lif ile değiştirilmesi durumunda eğilme/çekme özelliklerinde orta düzeylerde bir artış elde edilebilir.
- Atık plastik agregaya kullanılması ile betonun sünekliği önemli ölçüde artmıştır.
- Atık plastik ilavesi betondaki rötre çatlaklarının artmasına, betonun daha fazla su emmesine, betona daha fazla klor girişine ve betonun daha düşük ısı iletkenliğe sahip olmasına sebep olmuştur.

Literatür araştırmasında atık plastiğin herhangi bir geri dönüşüm sürecine maruz bırakılmadan direkt olarak betona eklenmesiyle yapılan çalışmaların sayısı, geri dönüştürülmüş atık plastik kullanılan çalışmalara göre oldukça azdır. Konuyla ilgili yapılan derleme çalışmalarda da bu bölümde olduğu gibi bu iki tip atık agregaları içeren çalışmalar birlikte değerlendirilmiştir. Atıkların direkt olarak kullanıldığı çalışmalara bakıldığında tamamına yakınında kolay ulaşılabirliği sebebiyle PET ve PVC plastikler kullanılmıştır. Az sayıdaki çalışmada ise kullanılan atığın geri dönüşüm süreciyle ilgili herhangi bir bilgi verilmemiştir. Farklı tür plastik atıkların doğrudan kullanıldığı çalışmalar literatürde eksik görülmüştür. Yapılan literatür araştırmasında bulunan bazı çalışmaların çeşitli parametrelere göre listelenip özetlenmiş hali aşağıdaki tabloda da verilmiştir.

Tablo 1. Literatür taramasında bulunan çalışmaların çeşitli parametrelere göre listesi

Parametre	Plastik	Çalışma ve Bulgu
İşlenebilirlik	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Dhanani ve Bhimani (2016) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
İşlenebilirlik	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Ramesan vd. (2015) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
İşlenebilirlik	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Rahmani vd. (2013) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik azaldığını aktarmıştır.
İşlenebilirlik	Belirtilmemiş (İnce Agregası)	Ismail ve Al Hashmi (2008) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik azaldığını aktarmıştır.
İşlenebilirlik	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013), birim hacim ağırlığının en fazla %50 oranında doğal agrega yerine plastik atık kullanılması durumunda sürekli azaldığını gözlemlemiştir.
Birim Hacim Ağırlığı	PC (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Hannawi ve Agbodjan (2015) birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Choi vd. (2009) birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Sosoi vd. (2018) betonun birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Hava İçeriği	HDPE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Chen vd. (2015) betondaki atık plastik yüzdesi arttıkça hava içeriği arttığını belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PET ve PC (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2010) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	HDPE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Chen vd. (2015) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	E-Plastik (Kaba Agregası)	Lakshmi ve Nagan (2010) düşük plastik oranlarında az miktarda atık olduğunu, plastik miktarı arttıkça ise dayanımın azaldığını belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Mathew vd. (2013) %22 oranında plastik atık kullanılması durumunda plastik atık içeren betonun en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Prakash ve Hemalatha (2019) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PP (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Yang vd. (2015) basınç dayanımında plastik atığın %20'den az kullanıldığı durumlar için bir artış bulmuştur. Plastik oranı arttıkça düşüş elde edilmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Doğrudan Lif)	Bhogayata ve Narendra (2018) betonun basınç dayanımı, lif içeriği ve uzunluk yüzdeleri arttıkça azalmıştır.
Elastisite Modülü	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Premalatha ve Ahamed (2017) plastik arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PET (Doğrudan Kaba Agregası)	Hossain ve Shaad (2016) plastik atık arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009) plastik atık arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Kim vd. (2010) plastik atık lif arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Pešić vd. (2016) plastik atık lif arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013), plastik atık içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının azaldığını belirtmiştir.

Eğilme/Çekme	PE ve PVC (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Ruiz-Herrero vd. (2016), plastik atık içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının üç kata kadar azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Albano vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla yarmada çekme dayanımının azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla yarmada çekme dayanımının azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Akçaözoğlu vd. (2010) PET atık ve kum agreganın birlikte kullanıldığı harçların dayanımının, PET içerenden fazla olduğunu bildirmiştir.
Eğilme/Çekme	PP (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Yang vd. (2015) %15'e kadar plastik atık kullanımının betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımını artırabileceğini belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan Kaba Agregası)	Hossain ve Shaad (2016) %10 oranında plastik atık kullanımında referans beton ile aynı çekme dayanımı elde etmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Al-Tulaian vd. (2016) plastik lif içeren harçların eğilme mukavemetinde ise %6 ila %84 arasında bir artış olduğunu göstermiştir.
Eğilme/Çekme	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Pešić vd. (2016) plastik lif kullanarak yaptıkları çalışmada, eğilme dayanımında %3 ila %14 arasında artış gözlemlenmiştir.
Eğilme/Çekme	PET ve PC (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2013) eğilme kapasitesinin düşük plastik atık agregası (PET ve PC) kullanım yüzdelerinde arttığını belirtmiştir.
Su Emme ve Porozite	PP ve PE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Coppola vd. (2018) karışımın plastik yüzdesi arttıkça su emmenin arttığını belirtmiştir.
Su Emme ve Porozite	PE ve PVC (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Ruiz-Herrero vd. (2016) PE ve PVC plastik atık içeren beton üzerinde yaptığı deneylerde %200 ve %140 daha yüksek porozite bulmuştur.
Donma Çözünme	EPS (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Kan ve Demirboğa (2009), atık plastik oranı arttıkça donma direncinin ve buna bağlı olarak da dayanıklılığın arttığını bulmuşlardır.
Rötre	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Akçaözoğlu vd. (2010) %50 atık agregası içeren betona göre tamamen atık agregası içeren betonun kuruma rötresi %56 artmıştır.
Rötre	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vs. (2013) kuruma rötresinde azalma olduğunu belirtmiştir. Bunu plastik atık agreganın geçirimsizliğine bağlamıştır.
Rötre	PET ve PC (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2013) harçtaki kısıtlanmış rötre çatlaklarının daha geç ortaya çıktığını ve genişliklerinin de azaldığını bildirmiştir.
Rötre	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Kim vd. (2010) kuruma rötresinden kaynaklanan çatlakların atık liflerin çatlak kontrol ve köprüleme özellikleri sayesinde iyileştiğini belirtmiştir.
Klor Penetrasyonu	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla klor geçişinin azaldığını bildirmiştir.
Klor Penetrasyonu	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vd. (2013), artan atık plastik agregası oranıyla klor penetrasyonunun arttığını bildirmiştir.
Karbonatlaşma	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vd. (2013), artan atık plastik agregası oranıyla karbonatlaşma derinliğinin arttığını belirtmiştir.
Isıl İletkenlik	PET, PE, PVC, PP, PS (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Jacob-Vaillancourt ve Sorelli (2018) atık plastiğin artmasıyla betonun ısı iletkenliğinde bir azalma olduğunu belirtmiştir.
Yüksek Sıcaklık	PET (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Saxena vd. (2018) plastik atık içeriği ve sıcaklık arttıkça dayanımın kademeli olarak azaldığını belirtmiştir.

4. SONUÇ

Dünyada üretilmiş ve üretilecek plastiklerin büyük bir kısmı kullanım ömrünü tamamladığında ya alıcı ortamı kirletmekte ya da depo sahalarında alan işgal etmektedirler. Bu durum plastik atıkların azaltılması, geri dönüştürülmesi ve başka kullanım alanlarında değerlendirilmesi için gerekli çalışmaların önemini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında plastik atıkların inşaat teknolojisinde beton içerisinde kullanılması yoluyla atıkların yapılarda depolanması üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Bu durum hem atıkların güvenle depolanabileceği yeni alanlar yaratılması hem de hammadde maliyetlerinden tasarruf edilmesine imkân sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalarda kolay ulaşılabilirliği sebebiyle genellikle PET ve PVC plastikler kullanılmıştır. Bunların dışında HDPE ve PP de literatürde sıklıkla kullanılmıştır. Günümüzde üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle birlikte yaygın olarak kullanılan PLA (Polilaktik Asit) biyoplastik bir malzemedir. PLA'nın beton içerisinde kullanımı benzer şekilde araştırılmaya gerek duymaktadır.

Konu hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla geri dönüştürülmüş plastik atıklar kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Plastik atıkların herhangi bir dönüşüm işlemine tabi tutulmadan direkt olarak kullanımı veya tam dönüşüm süreci yerine kısmi ısıl işlem uygulanması ve/veya mekanik parçalama gibi basit proseslerle kullanılabilir hale getirilmesi sonucunda betonun mukavemeti başta olmak suretiyle farklı etkileri halen araştırmaya muhtaç bir konudur. Bu durum geri dönüşüm maliyetlerinin de ortadan kaldırılması ve böylece uygulamanın düşük maliyetli bir sürece dönüşmesi açısından önemlidir. Hatta bu konuda kısa ve orta vadede çevresel koşullara maruz kalmış gerek su, toprak vb. kontrolsüz ortamlarda bulunan plastik atıkların hem de yeni oluşmuş plastik atıkların karşılaştırmalı değerlendirmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

REFERANSLAR

- [1] Plastics Europe, "Plastics the fact 2021", *Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.*, ss. 1-34, 2021.
- [2] F. Field Actions Science Reports, "Plastics Recycling Worldwide : Current Overview and Desirable", *Reinventing Plastics*, sy 19, s. 11, 2019.
- [3] J. Dullius, C. Ruecker, V. Oliveira, R. Ligabue, ve S. Einloft, "Chemical recycling of post-consumer PET: Alkyd resins synthesis", *Prog Org Coat*, c. 57, sy 2, ss. 123-127, Eki. 2006, doi: 10.1016/j.porgcoat.2006.07.004.
- [4] J. D. Badia, E. Strömberg, S. Karlsson, ve A. Ribes-Greus, "The role of crystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET)", *Polym Degrad Stab*, c. 97, sy 1, ss. 98-107, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.008.
- [5] S. Papong vd., "Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective", *J Clean Prod*, c. 65, ss. 539-550, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.030.
- [6] R. Geyer, J. R. Jambeck, ve K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Sci Adv*, c. 3, sy 7, Tem. 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [7] J. Siddiqui ve G. Pandey, "A Review of Plastic Waste Management Strategies", *Int. Res. J. Environment Sci. International Science Congress Association*, c. 2, sy 12, ss. 84-88, 2013.
- [8] R. J. Morris, "Floating plastic debris in the Mediterranean", *Mar Pollut Bull*, c. 11, sy 5, s. 125, 1980, doi: 10.1016/0025-326X(80)90073-9.
- [9] A. Golik ve Y. Gertner, "Litter on the israeli coastline", *Mar Environ Res*, c. 33, sy 1, ss. 1-15, 1992, doi: 10.1016/0141-1136(92)90002-4.
- [10] B. S. Galil, A. Golik, ve M. Türkay, "Litter at the bottom of the sea: A sea bed survey in the Eastern Mediterranean", *Mar Pollut Bull*, c. 30, sy 1, ss. 22-24, 1995, doi: 10.1016/0025-326X(94)00103-G.
- [11] J. G. Shiber, "Plastic pellets on the coast of Lebanon", *Mar Pollut Bull*, c. 10, sy 1, ss. 28-30, 1979, doi: 10.1016/0025-326X(79)90321-7.
- [12] A. Stefatos, M. Charalampakis, G. Papatheodorou, ve G. Ferentinos, "Marine debris on the seafloor of the Mediterranean Sea: Examples from two enclosed gulfs in western Greece", *Mar Pollut Bull*, c. 38, sy 5, ss. 389-393, 1999, doi: 10.1016/S0025-326X(98)00141-6.
- [13] M. Bergmann, L. Gutow, ve M. Klages, *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3.

- [14] R. Coyle, G. Hardiman, ve K. O. Driscoll, “Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, c. 2, s. 100010, 2020, doi: 10.1016/j.cscee.2020.100010.
- [15] J. R. Jambeck vd., “Plastic waste inputs from land into the ocean”, *Ciencia*, c. 347, sy 6223, ss. 768-771, 2015.
- [16] M. Siegfried, A. A. Koelmans, E. Besseling, ve C. Kroeze, “Export of microplastics from land to sea. A modelling approach”, *Water Res*, c. 127, ss. 249-257, 2017, doi: 10.1016/j.watres.2017.10.011.
- [17] L. C. M. Lebreton, J. Van Der Zwet, J. W. Damsteeg, B. Slat, A. Andrady, ve J. Reisser, “River plastic emissions to the world’s oceans”, *Nat Commun*, c. 8, ss. 1-10, 2017, doi: 10.1038/ncomms15611.
- [18] M. Bergmann, L. Gutow, ve M. Klages, *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3.
- [19] J. P. da Costa, P. S. M. Santos, A. C. Duarte, ve T. Rocha-Santos, “(Nano)plastics in the environment - Sources, fates and effects”, *Science of the Total Environment*, c. 566-567, ss. 15-26, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.041.
- [20] M. Wagner ve S. Lambert, “Modeling the Fate and Transport of Plastic Debris in Freshwaters: Review and Guidance”, içinde *Freshwater Microplastics - The Handbook of Environmental Chemistry*, 2018, s. 302. doi: 10.1007/978-3-319-61615-5.
- [21] H. S. Auta, C. U. Emenike, ve S. H. Fauziah, “Distribution and importance of microplastics in the marine environment A review of the sources, fate, effects, and potential solutions”, *Environ Int*, c. 102, ss. 165-176, 2017, doi: 10.1016/j.envint.2017.02.013.
- [22] S. B. Sheavly ve K. M. Register, “Marine debris & plastics: Environmental concerns, impacts and solutions”, *J Polym Environ*, c. 15, sy 4, ss. 301-305, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0074-3.
- [23] S. Gündoğdu, İ. N. Yeşilyurt, ve C. Erbaş, “Potential interaction between plastic litter and green turtle *Chelonia mydas* during nesting in an extremely polluted beach”, *Mar Pollut Bull*, c. 140, sy January, ss. 138-145, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.01.032.
- [24] S. Gündoğdu, C. Çevik, ve N. Temiz Atas, “Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tracts of some edible fish species along the Turkish coast”, *Turkish Journal of Zoology*, c. 44, sy 4, ss. 312-323, 2020, doi: 10.3906/zoo-2003-49.
- [25] D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, ve M. Barlaz, “Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, c. 364, sy 1526, ss. 1985-1998, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0205.
- [26] M. A. Browne vd., “Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks”, *Environ Sci Technol*, c. 45, sy 21, ss. 9175-9179, 2011, doi: 10.1021/es201811s.
- [27] S. Gündoğdu ve C. Çevik, “Micro- and mesoplastics in Northeast Levantine coast of Turkey: The preliminary results from surface samples”, *Mar Pollut Bull*, c. 118, sy 1-2, ss. 341-347, 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.03.002.
- [28] A. Cózar vd., “Plastic accumulation in the mediterranean sea”, *PLoS One*, c. 10, sy 4, ss. 1-12, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0121762.
- [29] N. Bakaraki Turan, H. Sari Erkan, ve G. Onkal Engin, “Current status of studies on microplastics in the world’s marine environments”, *J Clean Prod*, c. 327, sy May, s. 129394, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129394.
- [30] A. L. Andrady, “Microplastics in the marine environment”, *Mar Pollut Bull*, c. 62, sy 8, ss. 1596-1605, 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
- [31] E. L. Teuten vd., “Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, c. 364, sy 1526, ss. 2027-2045, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0284.
- [32] K. L. Law ve R. C. Thompson, “Microplastics in the seas”, *Science (1979)*, c. 345, sy 6193, ss. 144-145, Tem. 2014, doi: 10.1126/science.1254065.
- [33] J. Munyaneza vd., “A review of atmospheric microplastics pollution: In-depth sighting of sources, analytical methods, physiognomies, transport and risks”, *Science of The Total Environment*, c. 822, s. 153339, May. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153339.
- [34] Z. Liu vd., “Distribution and possible sources of atmospheric microplastic deposition in a valley basin city (Lanzhou, China)”, *Ecotoxicol Environ Saf*, c. 233, s. 113353, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113353.
- [35] M. Sajjad vd., “Microplastics in the soil environment: A critical review”, *Environ Technol Innov*, c. 27, s. 102408, Ağu. 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102408.
- [36] G. S. Zhang ve Y. F. Liu, “The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China”, *Science of The Total Environment*, c. 642, ss. 12-20, Kas. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.

- [37] P. S. Ross vd., “Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs”, *Nat Commun*, c. 12, sy 1, ss. 4-12, 2021, doi: 10.1038/s41467-020-20347-1.
- [38] E. Rota, E. Bergami, I. Corsi, ve R. Bargagli, “Macro- and Microplastics in the Antarctic Environment: Ongoing Assessment and Perspectives”, *Environments - MDPI*, c. 9, sy 7, ss. 1-17, 2022, doi: 10.3390/environments9070093.
- [39] H. A. Leslie, M. J. M. van Velzen, S. H. Brandsma, A. D. Vethaak, J. J. Garcia-Vallejo, ve M. H. Lamoree, “Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood”, *Environ Int*, c. 163, s. 107199, May. 2022, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.
- [40] T. Ochi, S. Okubo, ve K. Fukui, “Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber”, *Cem Concr Compos*, c. 29, sy 6, ss. 448-455, Tem. 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002.
- [41] Y. W. Choi, D. J. Moon, Y. J. Kim, ve M. Lachemi, “Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles”, *Constr Build Mater*, c. 23, sy 8, ss. 2829-2835, Ağu. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.
- [42] H. A. Bulut ve R. Şahin, “A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste”, *Compos Struct*, c. 178, ss. 50-62, Eki. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.058.
- [43] A. ben Fraj, M. Kismi, ve P. Mounanga, “Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete”, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010i.
- [44] M. Frigione, “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete”, *Waste Management*, c. 30, sy 6, ss. 1101-1106, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
- [45] S. M. Hama ve N. N. Hilal, “Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, c. 6, sy 2, ss. 299-308, Ara. 2017, doi: 10.1016/j.ijse.2017.01.001.
- [46] B. Jaivignesh ve A. Sofi, “Study on Mechanical Properties of Concrete Using Plastic Waste as an Aggregate”, içinde *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ağu. 2017, c. 80, sy 1. doi: 10.1088/1755-1315/80/1/012016.
- [47] A. Ramesan, S. S. Babu, ve A. Lal, “Performance of Light-Weight Concrete with Plastic Aggregate”, 2015. [Çevrimiçi]. Available: www.ijera.com
- [48] A. J. Babafemi, B. Şavija, S. C. Paul, ve V. Anggraini, “Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review”, *Sustainability (Switzerland)*, c. 10, sy 11. MDPI, Eki. 25, 2018. doi: 10.3390/su10113875.
- [49] G. v. Dhanani ve P. D. Bhimani, “Effect of Use Plastic Aggregates as Partial Replacement of Natural Aggregates in Concrete with Plastic Fibres”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, [Çevrimiçi]. Available: www.irjet.net
- [50] E. Rahmani, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, H. Allahyari, ve I. M. Nikbin, “On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles”, *Constr Build Mater*, c. 47, ss. 1302-1308, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- [51] Z. Z. Ismail ve E. A. AL-Hashmi, “Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement”, *Waste Management*, c. 28, sy 11, ss. 2041-2047, Kas. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
- [52] B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, ve M. Maallem, “The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties”, *Constr Build Mater*, c. 43, ss. 436-442, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.
- [53] N. Saikia ve J. de Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 34, ss. 385-401, Eyl. 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [54] K. Hannawi ve W. Prince-Agbodjan, “Transfer behaviour and durability of cementitious mortars containing polycarbonate plastic wastes”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 19, sy 4, ss. 467-481, Nis. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.960100.
- [55] K. S. Kumar ve K. Baskar, “Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries”, *J Mater Cycles Waste Manag*, c. 17, sy 4, ss. 718-724, Eki. 2015, doi: 10.1007/s10163-014-0303-5.
- [56] K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, ve W. Prince, “Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates”, *Waste Management*, c. 30, sy 11, ss. 2312-2320, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.028.
- [57] G. Sosoi, M. Barbuta, A. A. Serbanoiu, D. Babor, ve A. Burlacu, “Wastes as aggregate substitution in polymer concrete”, içinde *Procedia Manufacturing*, 2018, c. 22, ss. 347-351. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.052.

- [58] S. Yang, X. Yue, X. Liu, ve Y. Tong, “Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles”, *Constr Build Mater*, c. 84, ss. 444-453, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038.
- [59] C.-C. Chen, N. Jaffe, M. Koppitz, W. Weimer, ve A. Polocoser, “CONCRETE MIXTURE WITH PLASTIC AS FINE AGGREGATE REPLACEMENT”, 2015.
- [60] C. Jacob-Vaillancourt ve L. Sorelli, “Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams”, *Constr Build Mater*, c. 182, ss. 561-572, Eyl. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083.
- [61] W. C. Tang, Y. Lo, ve A. Nadeem, “Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete”, *Cem Concr Compos*, c. 30, sy 5, ss. 403-409, May. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002.
- [62] R. Ravindrarajah, “Institute for Research in Construction”, 1999.
- [63] S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas, ve A. Faqiri, “Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review”, *Waste Management*, c. 113. Elsevier Ltd, ss. 157-175, Tem. 15, 2020. doi: 10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [64] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, ve A. Alaskar, “Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 253. Elsevier Ltd, Ağu. 30, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
- [65] S. C. Kou, G. Lee, C. S. Poon, ve W. L. Lai, “Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes”, *Waste Management*, c. 29, sy 2, ss. 621-628, Şub. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
- [66] J. Premalatha ve S. A. Ahamed, “EXPERIMENTAL STUDY ON CONCRETE WITH PLASTIC AGGREGATES”, *SSRG International Journal of Civil Engineering- (ICRTCETM-2017)*, ss. 358-363, 2017, [Çevrimiçi]. Available: www.internationaljournalsrsg.org
- [67] W. L. Tamang Thingh, T. Wangmo, K. T. Darjay, K. S. Phuntsho, P. Namgyal, ve U. Wangchuk, “Use of Plastics in Concrete as Coarse Aggregate”, *International Journal of Education and applied research*, c. 7, sy 2, ss. 9-13, 2017.
- [68] R. Lakshmi ve S. Nagan, “INVESTIGATIONS ON DURABILITY CHARACTERISTICS OF E-PLASTIC WASTE INCORPORATED CONCRETE”, 2011. [Çevrimiçi]. Available: www.SID.ir
- [69] M. Prakash ve B. Hemalatha, “Replacement of Waste Material in Concrete using Recycled Plastic”, *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE)*, c. 6, sy 3, ss. 41-46, 2019.
- [70] P. Mathew, S. Varghese, T. Paul, ve E. Varghese, “Recycled Plastics as Coarse Aggregate for Structural Concrete”, *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, c. 2, 2013, [Çevrimiçi]. Available: www.ijirset.com
- [71] A. M. Azhdarpour, M. R. Nikoudel, ve M. Taheri, “The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; A laboratory evaluation”, *Constr Build Mater*, c. 109, ss. 55-62, Nis. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- [72] A. C. Bhogayata ve N. K. Arora, “Impact strength, permeability and chemical resistance of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers”, *Constr Build Mater*, c. 161, ss. 254-266, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.135.
- [73] T. R. Naik, S. S. Singh, C. O. Huber, ve B. S. Brodersen, “Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites”, *Cem Concr Res*, c. 26, sy 10, ss. 1489-1492, 1996, doi: 10.1016/0008-8846(96)00135-4.
- [74] L. Ferreira, J. de Brito, ve N. Saikia, “Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate”, *Constr Build Mater*, c. 36, ss. 196-204, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098.
- [75] S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim, J. H. J. Kim, ve Y. C. Song, “Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete”, *Cem Concr Compos*, c. 32, sy 3, ss. 232-240, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
- [76] N. Pešić, S. Živanović, R. Garcia, ve P. Papastergiou, “Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres”, *Constr Build Mater*, c. 115, ss. 362-370, Tem. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050.
- [77] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. Etlı, ve M. Alhassan, “Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder”, *Constr Build Mater*, c. 140, ss. 562-569, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139.
- [78] J. L. Ruiz-Herrero vd., “Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste”, *Constr Build Mater*, c. 104, ss. 298-310, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005.

- [79] C. Aciu, D. A. Ilutiu-Varvara, D. L. Manea, Y. A. Orban, ve F. Babota, “Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars”, içinde *Procedia Manufacturing*, 2018, c. 22, ss. 274-279. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.042.
- [80] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, ve A. Gutiérrez, “Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios”, *Waste Management*, c. 29, sy 10, ss. 2707-2716, Eki. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- [81] S. Akçaözöğlü, C. D. Atiş, ve K. Akçaözöğlü, “An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete”, *Waste Management*, c. 30, sy 2, ss. 285-290, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.
- [82] R. Umadevi, C. R. Shashi Kiran, ve S. S. Sahana, “Recycled Plastics and Crushed Rock Powder As Coarse Aggregate and Fine Aggregate in Structural Concrete”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT)*, c. 3, sy 19, 2015, [Çevrimiçi]. Available: www.ijert.org
- [83] B. S. Al-Tulaian, M. J. Al-Shannag, ve A. R. Al-Hozaimy, “Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar”, *Constr Build Mater*, c. 127, ss. 102-110, Kas. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131.
- [84] K. Hannawi, W. Prince, ve S. K. Bernard, “Strain Capacity and Cracking Resistance Improvement in Mortars by Adding Plastic Particles”, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.
- [85] F. Iucolano, B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, ve R. Cioffi, “Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties”, *Mater Des*, c. 52, ss. 916-922, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.025.
- [86] A. Akram, C. Sasidhar, ve K. Mehraj Pasha, “E-Waste Management by Utilization of E-Plastics in Concrete Mixture as Coarse Aggregate Replacement”, *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, c. 04, sy 07, ss. 5087-5095, Tem. 2015, doi: 10.15680/ijirset.2015.0407008.
- [87] B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato, P. Scarfato, ve L. di Maio, “Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates”, *Constr Build Mater*, c. 170, ss. 200-206, May. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083.
- [88] M. M. Rahman, M. A. Mahi, ve T. U. Chowdhury, “Utilization of waste PET bottles as aggregate in masonry mortar”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, c. 2, sy 11, ss. 1030-1035, 2013, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259646892>
- [89] A. Kan ve R. Demirboğa, “A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates”, *J Mater Process Technol*, c. 209, sy 6, ss. 2994-3000, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017.
- [90] V. Ferrándiz-Mas ve E. García-Alcofel, “Durability of expanded polystyrene mortars”, *Constr Build Mater*, c. 46, ss. 175-182, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029.
- [91] M. B. Hossain, P. Bhowmik, ve K. M. Shaad, “Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material”, 2016.
- [92] R. v. Silva, J. de Brito, ve N. Saikia, “Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates”, *Cem Concr Compos*, c. 35, sy 1, ss. 23-31, Oca. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
- [93] P. Soroushian, A. I. Eldarwish, A. Tlili, ve K. Ostowari, “Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete”, *Magazine of Concrete Research*, c. 51, sy 1, ss. 27-33, 1999.
- [94] R. Saxena, S. Siddique, T. Gupta, R. K. Sharma, ve S. Chaudhary, “Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste”, *Constr Build Mater*, c. 176, ss. 415-421, Tem. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019.