

# Geri dönüştürülmüş polietilenin tehlikeli atık yakma tesisi uçucu küllerinin depolanabilirliği üzerine etkisi: Yeni bir kompozit malzemeye doğru

## Effect of recycled polyethylene on storability of hazardous waste incinerator fly ashes: Towards a new composite material

Mahmut Kemal KORUCU<sup>1\*</sup>, Rıdvan YAMANOĞLU<sup>2</sup>, Erdem KARAKULAK<sup>2</sup>, Taner YILMAZ<sup>3</sup>,  
Nevin Gamze KARSLI YILMAZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.  
kemal.korucu@gmail.com

<sup>2</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.  
ryamanoglu@kocaeli.edu.tr, erdemkarakulak@kocaeli.edu.tr

<sup>3</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.  
taner.yilmaz@kocaeli.edu.tr

<sup>4</sup>Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.  
gamze.karsli@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 02.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 10.01.2017  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.31932  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Atık nihai depolama alanları; tehlikeli atıklar için 1. sınıf depolama alanları, tehlikesiz atıklar için 2. sınıf depolama alanları ve inert atıklar için 3. sınıf depolama alanları olmak üzere 3 genel kategori altında toplanabilir. Bununla birlikte, tehlikeli atık yakma tesisi uçucu külleri (HWI-FA) 1. sınıf depolama alanlarına bile kabul edilmeyen bir tehlike düzeyine sahiptirler. Bu çalışmanın temel amacı; bu küllerin tehlike potansiyelini bir taşıyıcı malzeme kullanarak azaltmaktır. Bu amaçla seçilen taşıyıcı malzeme geri dönüştürülmüş polietilendir (r-PE). Bu seçimin temel gerekçesi r-PE'nin ucuz, inert, kolay bulunabilir ve işlenebilir bir malzeme olmasıdır. Deneysel çalışmalarda 45 mikron altı ve 400 mikron altı olmak üzere iki farklı boyut dağılımında uçucu kül kullanılmıştır. Türkiye'nin ilk tehlikeli atık yakma tesisi olan İZAYDAŞ'dan elde edilen uçucu küllerin bu iki alt grubundan küller r-PE yapısına %15, 30 ve 45 gibi 3 farklı oranla ilave edilmiştir. Karışımların enjeksiyonu sonucu elde edilen kompozit örneklerinin (HWI-FA/r-PE) süzüntü, aşınma ve çekme dayanımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Süzüntü analizlerinden elde edilen bulgulara göre, 45 mikron altındaki partiküller için tüm HWI-FA/r-PE kompozitleri 2. sınıf bir depolama alanı için uygun olarak tespit edilmiştir. Benzer biçimde, 400 mikron altındaki dağılım için %45 karışım oranı dışındaki kompozitler 1. sınıf bir depolama alanı için uygun olarak tespit edilmiştir. 45 mikron altı için, külden %15 oranında içeren kompozitte aşınma dayanımı saf r-PE'ye göre artmış, öte yandan kül oranı arttıkça bu dayanım düşmüştür. 400 mikron altı için ise artan kül oranı, aşınma dayanımını düşürmüştür. Aşınma için elde edilen bu bulgular çekme dayanımları için de benzer sonuçlar vermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Aşınma, Çekme dayanımı, Geri dönüştürülmüş polietilen, Tehlikeli atık, Uçucu kül, Süzüntü testi

### Abstract

Landfills can be classified into three general categories: Class1-type landfills for hazardous wastes, Class2-type landfills for non-hazardous wastes, and Class3-type landfills for inert wastes. Besides, hazard potential of hazardous waste incinerator fly ashes (HWI-FA) is high to be accepted for Class1-type landfills. The main aim of this study is to lower the hazard potential of HWI-FAs with the help of a matrix material. For this purpose recycled polyethylene (r-PE) was chosen as matrix material. Being cheap, inert, easy to find and ease of processing are main reasons of choosing r-PE. Two different fly ash sizes were used in the experimental studies, first group was under 45 µm, second group was under 400 µm. Different amounts (15, 30 and 45 wt.-%) of HWI-FA obtained from the first hazardous waste incinerator of Turkey, İZAYDAS, were added to the matrix material. Composite specimens were produced in an injection molder. Standard leaching, wear and tensile tests were applied to the specimens. According to the findings, for particle size under 45 µm all HWI-FA/r-PE mixtures found to be suitable for Class2-type landfills. Similarly HWI-FA with particle size under 400 µm was suitable for Class1-type landfills except wt.-45% mixing ratio. Addition of HWI-FA (-45 µm) to r-PE first increases wear resistance of the material but increased ash content causes a decrease in the wear resistance of the PE. The increased size of ash particulates (-400 µm) effects wear resistance of the composite negatively. Similar results were also obtained for tensile tests.

**Keywords:** Fly ash, Hazardous waste, Leaching test, Recycled polyethylene, Wear, Tensile strength

## 1 Giriş

Günümüzde, uçucu kül (FA) gibi istenmeyen proses atıklarının nihai bertarafı bazı yasal zorunluluklar nedeniyle çok yüksek maliyetlere neden olabilmektedir. Özellikle atık depolama alanı inşası ve solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) maliyetleri olarak karşımıza çıkan bu sorun bu tip atıkların doğrudan bertarafı yerine yeniden kullanımını konu edinen araştırmaların da temel motivasyonudur. Uçucu küller; düşük

yoğunluklu malzeme üretimi, çimento takviyesi, asfalt, plastik ve kağıt gibi ürünlerde taşıyıcı malzeme olarak kullanım, tuğla ve cam gibi ürünler için ham madde desteği, bünyesindeki değerli metallerin geri kazanımı için işleme gibi pek çok alanda kullanım imkanı bulan bir son üründür [1]-[3]. Birim yakıt başına en yüksek FA oluşumu, termik santraller gibi enerji üretimi proseslerinde meydana gelir (birim yakıt başına %60-90 arasında uçucu kül oluşumu [4]). Bu kadar büyük bir kütlelenin yeniden kullanımına yönelik yoğun bir araştırma

zemininin oluşmuş olması da beklenen bir sonuçtur. Bu anlamda söz konusu uçucu küllerin yeni ürünlere dönüştürüldüğü veya ürünlerin malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanıldığı pek çok çalışmaya ulaşmak mümkündür [5]-[18]. Öte yandan demir çelik üretimi ve atık yakma prosesleri sonucu oluşan FA'lar için ise bu yönelim daha sınırlıdır [19]. Özellikle, atık yakma tesislerinde birim yakıt (atık) miktarının %1.5-4.5 gibi düşük bir miktarının uçucu küle dönüştüğü [20] ve bu küllerin tehlike sınıflarının diğer benzerlerine nazaran oldukça yüksek olduğu [21] düşünüldüğünde bu alandaki çalışmaların görece azlığı daha da anlaşılabilir hale gelir.

Atık yakma tesislerinin uçucu küllerinin doğrudan depolama alanlarına gitmesini önlemek için çeşitli biçimlerde kullanımıyla ilgili çalışmalara rastlamak mümkündür. Öte yandan bu çalışmalar özellikle evsel atık yakma tesisi uçucu küllerine yoğunlaşırken [22]-[31], tehlikeli atıklar konusunda belirgin bir eksiklik söz konusudur. Bunun yanında tehlikeli atık yakma küllerinin depolanmadan önce S/S uygulamasında kullanımına yönelik çok sayıda çalışma söz konusuyken [32] bu tip küllerin kompozit malzeme geliştirme için kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Bu geliştirme işleminin geri dönüştürülmüş taşıyıcı yapılarla karıştırılarak yapılmasına da rastlamak oldukça zordur.

Bu çalışmanın temel amacı; bir tehlikeli atık yakma tesisinden kaynaklanan uçucu küllerin ucuz bir taşıyıcı ile karıştırılarak külün tehlike sınıfının düşürülmesi ve/veya karışımın yapısının güçlendirilerek yeni bir malzemenin üretilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla bu çalışmada seçilen taşıyıcı yapı saf polietilen atıklardan geri dönüştürülen geri dönüştürülmüş polietilendir. Literatürde polietilen ve uçucu kül karışımlarıyla ilgili bazı çalışmalara ulaşmak mümkün olsa da bu çalışmalar da [33]-[39] ağırlıklı olarak enerji üretimi uçucu külleri ve saf polietilen ile ilişkilidir. Bu anlamda bu çalışma tehlikeli atık yakma tesisi uçucu küllerinin yeniden kullanımı alanına yeni bir katkı sunma arayışındadır.

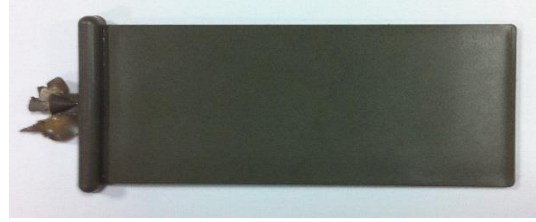
## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Kompozitlerin hazırlanması

Çalışmada kullanılan uçucu küller Türkiye'nin ilk klinik ve tehlikeli atık yakma tesisi olan İZAYDAŞ'tan temin edilmiştir. Kocaeli'nde kurulu bulunan tesis 35000 ton/yıl atık yakma kapasitesine sahiptir. Tehlikeli atık bertaraf etmenin yanında atık gazdan enerji üretimi de sağlayan tesiste atık gazın işlem gördüğü üniteler; ikinci yakma odası, boiler, elektrostatik filtre (ESP), yıkayıcılar ve bir aktif karbon yatağı şeklindedir. Tesise ait uçucu küller sözü edilen boiler ve ESP ünitelerinde oluşmaktadır [40]-[43].

Çalışma için tesisten alınan ESP uçucu külleri (HWI-FA), piyasada satılan geri dönüştürülmüş polietilen granülleri (r-PE) ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Karışımlar, kül içeriği %15, %30 ve %45 olacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışmalarda külün 45 mikrometre elek çaplı bir elekten geçebilen kısımları (0-45 µm arası) ve 400 mikrometre elek çaplı bir elekten geçebilen kısımları (0-400 µm arası) ayrı ayrı kullanılmıştır. Buna göre; çalışma süresince "A" (r-PE ve 45 mikron altı HWI-FA karışımı) ve "B" (r-PE ve 400 mikron altı HWI-FA karışımı) numune yapısı olarak adlandırılacak iki tür numune grubu hazırlanmıştır (A+15, B+15, A+30, B+30, A+45, B+45). Ayrıca, bir grup numune de referans olması açısından sadece r-PE'den oluşacak şekilde (%0 kül içeriği) üretilmiştir.

Kül-polietilen karışımları ve referanslar 3 dk. boyunca iki adet vidalı karıştırma mili bulunan karıştırıcı içerisinde (15 ml Micro-compounder, DSM Xplore, The Netherlands) polietilenin ergime sıcaklığının üzerinde seçilen bir sıcaklıkta (180 °C) karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı millerin dönüş hızları 100 rpm olarak sabit tutulmuştur. Karıştırma işleminin ardından erimiş haldeki karışım bir enjeksiyon kalıplama cihazına aktarılmıştır. Bu cihazda 10 bar enjeksiyon ve tutma basıncı kullanılarak 80 x 40 x 20 mm boyutlarına sahip numuneler üretilmiştir. Enjeksiyon işlemi sırasında erimiş karışımın sıcaklığı 180 °C, kalıp sıcaklığı ise 25 °C olarak ayarlanmıştır. Açıklanan bu proses ile üretilmiş numunelerin bir örneği Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1: %30 oranında 45 µm altı kül içeren numune (A+30).

### 2.2 Analizler

Türkiye'de bir atığın düzenli depolama tesisine kabulü için gereken kriterler "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" [44] tarafından düzenlenir. Yönetmeliğe göre 1. sınıf düzenli depolama tesislerine sadece ilgili kriterlere uyan tehlikeli atıklar, 2. sınıf düzenli depolama tesislerine Belediye atığı, ilgili kriterlere uyan değişik kaynaklı tehlikesiz atıklar, bu tehlikesiz atıklarla aynı özütleme özellikleri ve davranışları gösteren ve kriterlere uyan katılaştırılmış veya camlaştırılmış atıklar gibi reaktif olmayan ve kararlı tehlikeli atıklar, 3. sınıf düzenli depolama tesislerine ise yalnızca inert atıklar kabul edilir. Kriterleri sağlayamayan yani "depolanamaz" olan bir atık mutlaka bir ön işleme muamele edilmek zorundadır.

Yönetmelik [44] yukarıda sözü edilen kriterlerin kontrolü için DIN 38414-S4 (EN12457) standart süzünü testini zorunlu kılar. Bu test için sıvı/katı oranı 10:1 olacak şekilde hazırlanan eluat 24 sa. çalkalanıp 0.45 µm membran filtrede süzülür. Dünya genelinde daha yaygın olarak kullanılan süzünü testi ise "the synthetic precipitation leaching procedure (SPLP)" olarak bilinen ve EPA Method 1311-TCLP'nin bir türevi olan testtir. Bu test, sıvı/katı oranı 20:1 olan bir hazırlama işleminde, 60/40 (w/w) oranında sülfürik asit/nitrik asit içeren bir sıvıyla 18 sa.'lik çalkalama işlemini içerir. TCLP metodu, depolama alanlarının sızıntı suyunda yoğun bir biçimde bulunduğu bilinen asetik asit varlığını taklit eden bir yöntemken, bu çalışmada kullanılan SPLP metodu atmosferdeki azot ve kükürt oksitlerden kaynaklanabilecek bir asit yağmuruna maruziyetin taklit edildiği bir yöntemdir. Bu çalışmada, tüm numuneler için EN12457 metodunun yanı sıra, numunelerin asitli bir ortamdaki davranışının da gözlemlenebilmesi için SPLP olarak bilinen metot da uygulanmıştır. Süzünü analizlerinde; numuneler standartların gerektirdiği küçüklükte parçalanmıştır. Parça boyutları SPLP için 9.5 mm'den küçük istenirken bu değer EN12457 yöntemi için 10 mm'den küçüktür. Yönetmelikte [44] ise bu değer 4 mm olarak istenmektedir.

EN12457 ve SPLP metotları için istenilen en küçük boyutlarda parçalanmış numuneler 90 rpm hızda, standartların gerektirdiği süreler (18 sa. ve 24 sa.) kadar çalkalanmış ve

süzüntüler ayrılmıştır. Yalnızca bir kez çalkalamanın numunelerin gerçek değerlerini yansıtır yansıtmadığını denetlemek için aynı numuneler 2. kez çalkalama işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen tüm süzüntüler ayrı ayrı 0.45 µm filtre kağıdıyla filtrelenmiş ve sağlıklı bir muhafaza için, TS EN ISO 5667 standardının bir gereği olarak yüksek saflıkta nitrik asitle tamponlanmıştır. Süzüntülerin ağır metal analizleri Perkin Elmer BRC-E-3 marka ICP-MS sistemiyle, iyon analizleri ise Dionex/ICS/1100 marka iyon kromatografi sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen ağır metal ve iyonlar; krom, nikel, bakır, çinko, arsenik, selenyum, molibden, kadmiyum, bakır, antimon, civa, kurşun, florür ve klorür şeklindedir.

Farklı boyut aralığı ve miktarda kül ilavelerinin, üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla numunelere aşınma ve çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. Aşınma testleri Nanovea MT/60/NI model ball-on-disc tipi bir cihaz kullanılarak ASTM G99-05 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma testlerinde yük 50 N, sürtme mesafesi 100 m ve sürtme hızı 0.07 m/s olarak sabit tutulmuştur. Aşınma testi uygulanan numuneler test öncesi ve sonrasında 0.1 mg hassasiyete sahip terazi ile tartılarak test sırasında oluşan ağırlık kaybı değerleri belirlenmiştir. Çekme dayanımı testleri ise Lloyd Instrument/LRX Plus model bir test cihazında ASTM D638-10 standartlarına göre ve 5 mm/min. piston hızında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan küller, Jeol/6060 marka cihazla EDX kantitatif analizine tabi tutulmuştur.

### 3 Sonuçlar ve değerlendirme

EN12457 ve SPLP süzüntü analizleri ile elde edilen ağır metal ve iyon sonuçlarının yanı sıra mevzuatta verilen sınır değerler ve tüm numune tiplerinin mevzuat açısından depolanabilirlik sınıflarını gösteren sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. İkinci

çalkalama sonuçlarının tamamı birinci çalkalama sonuçlarına göre depolanabilirlik sınıfları açısından bir değişime neden olmadığı için tabloda sunulmasına gerek görülmemiştir.

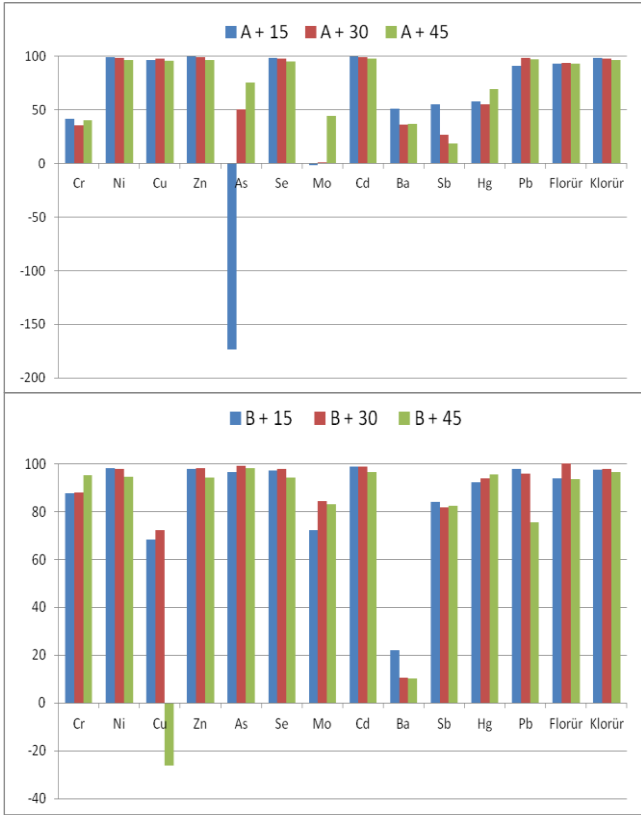
Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere, numunelerde kullanılan r-PE yapısının kendisi yönetmeliğin "inert" tanımına giren bir atık olup 3. sınıf depolama alanları için uygundur. Mevcut haliyle hiçbir depolama alanına alınmayacak olan tehlikeli atık yakma uçucu külünün 45 µm altındaki yapısı ise; tüm kompozitler için 2. sınıf depolama alanına uygun hale getirilmiştir. Benzer biçimde, mevcut haliyle hiçbir depolama alanına alınmayacak olan tehlikeli atık yakma uçucu külünün 400 µm altındaki yapısı; %15 ve 30 kül katkısı için 1. sınıf depolama alanına uygun hale getirilmiştir. Yüzde 45 katkı oranı için ise depolanabilirlikte herhangi bir iyileşme sağlanamamıştır.

Şekil 2; kompozit numunelerin ağır metal ve iyon salınımlarının, numunede kullanılan r-PE ve külün tek başına yaptıkları salınımların toplamına oranlanması ile bulunan salınım azaltma yüzdelerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere hemen her kompozit yapı ve her kirletici parametre için belirli düzeyde bir tutma kapasitesi sağlayan yeni yapılar (kül+PE) yalnızca A+15 numunesinde arsenik ve B+45 numunesinde bakır salımı artışına neden olmaktadır.

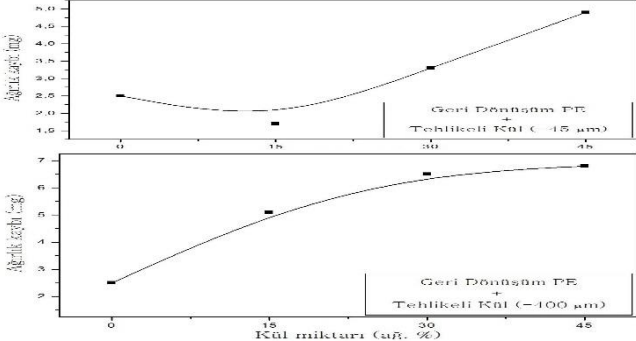
Numunelere uygulanan aşınma testlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te sunulmuştur. Grafiklerden de görülebileceği gibi küçük boyutlu (-45 µm) kül ilavesi yapıldığında malzemenin aşınma sırasında oluşan ağırlık kaybı %15 katkı miktarı için azalmaktadır. Ancak kül miktarı %15'in üzerine çıktığında aşınma dayanımı negatif olarak etkilenmektedir. EDX bulgularına göre çalışmada kullanılan kül partiküllerinin kimyasal kompozisyonunu ağırlıkça %36 O, %4 Mg, %5 Al, %9 Si, %1 S, %0.1 K, %17 Ca, %1 Ti, %27 Fe oluşturmaktadır.

Tablo 1: Numunelerin depolanabilirlik türleri.

YÖNTEM. NUMUNE. SINIR DEĞERLER	KONSANTRASYONLAR (mg/L)													DEPOLAMA		
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Sb	Hg	Pb	F		Cl	
EN12457 YÖNTEMİ	A + 15	0.007	0.005	0.020	0.282	0.002	<0.001	0.016	0.006	0.101	0.001	0.001	0.131	0.530	2.225	2. Sınıf Alan İçin Uygun
	A + 30	0.008	0.007	0.012	0.792	<0.001	<0.001	0.016	0.023	0.132	0.001	0.001	0.022	0.456	2.754	2. Sınıf Alan İçin Uygun
	A + 45	0.007	0.024	0.023	3.812	<0.001	<0.001	0.009	0.079	0.131	0.001	0.001	0.039	0.524	4.524	2. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 15	0.001	0.047	0.116	9.380	<0.001	0.001	0.002	0.114	0.150	<0.001	<0.001	0.066	0.508	3.714	1. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 30	0.001	0.052	0.101	7.627	<0.001	0.001	0.001	0.099	0.173	<0.001	<0.001	0.122	<0.001	3.007	1. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 45	<0.001	0.141	0.460	25.936	<0.001	0.002	0.001	0.317	0.173	<0.001	<0.001	0.727	0.532	5.176	Depolanamaz
	HWI-FA (-45 µm)	0.012	0.640	0.529	108.086	0.001	0.010	0.015	3.620	0.140	0.001	0.002	1.464	7.496	131.60	Depolanamaz
	HWI-FA (-400 µm)	0.008	2.594	0.363	461.926	0.001	0.031	0.007	8.854	0.125	0.002	0.002	2.973	8.187	142.89	Depolanamaz
	r-PE	0.001	<0.001	0.002	0.142	<0.001	0.001	<0.001	0.001	0.069	<0.001	<0.001	0.018	<0.001	5.997	3. Sınıf Alan İçin Uygun
		A + 15	0.026	0.067	0.219	2.663	0.015	<0.001	0.031	0.016	0.152	0.005	0.003	0.850	0.450	2.339
SPLP YÖNTEMİ	A + 30	0.057	0.064	0.282	4.532	0.034	<0.001	0.058	0.031	0.181	0.006	0.003	0.893	0.409	2.441	2. Sınıf Alan İçin Uygun
	A + 45	0.098	0.085	0.687	4.065	0.074	0.001	0.115	0.080	0.191	0.010	0.005	0.930	0.827	3.377	2. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 15	0.047	0.069	0.433	7.666	0.031	<0.001	0.044	0.070	0.188	0.004	0.002	1.240	0.454	3.004	1. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 30	0.056	0.088	0.485	7.404	0.028	<0.001	0.048	0.067	0.192	0.005	0.003	1.658	0.494	2.678	1. Sınıf Alan İçin Uygun
	B + 45	0.121	0.149	1.486	20.929	0.065	0.002	0.097	0.181	0.083	0.008	0.003	2.018	1.171	4.104	Depolanamaz
	HWI-FA (-45 µm)	0.059	0.634	3.799	133.278	0.718	0.011	0.441	1.759	0.197	0.033	0.011	0.101	4.620	64.522	Depolanamaz
	HWI-FA (-400 µm)	0.182	1.939	14.137	430.505	0.760	0.030	0.231	4.422	0.171	0.035	0.007	0.241	3.947	66.411	Depolanamaz
	r-PE	0.009	0.006	0.072	0.305	0.001	<0.001	0.001	0.003	0.243	<0.001	<0.001	0.048	<0.001	4.258	3. Sınıf Alan İçin Uygun
		0.05	0.04	0.2	0.4	0.05	0.01	0.05	0.004	2	0.006	0.001	0.05	1	80	3. Sınıf Tesis Limitleri
		1	1	5	5	0.2	0.05	1	0.1	10	0.07	0.02	1	15	1500	2. Sınıf Tesis Limitleri
	7	4	10	20	2.5	0.7	3	0.5	30	0.5	0.2	5	50	2500	1. Sınıf Tesis Limitleri	



Şekil 2: Kompozitlerin sağladığı salınım azaltma oranları (%).

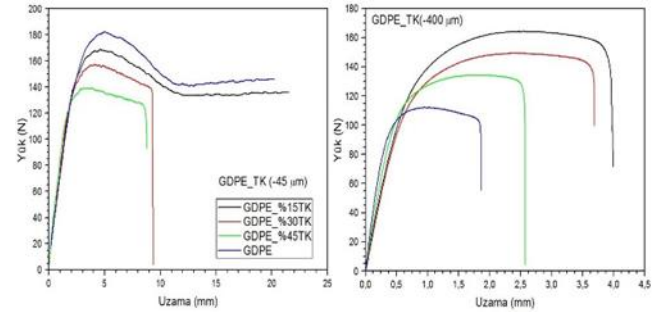


Şekil 3: Numunelerin aşınma testi ağırlık kaybı sonuçları.

Bu kompozisyonlardan ötürü sahip olduğu oksit yoğunluğu küle polietilen malzemeye göre daha yüksek sertlik ve aşınma dayanımı sağlar. Yapılan kül ilavesiyle polietilenin aşınma dayanımının artmasının sebebi yüksek sertliğe sahip bu partiküllerin varlığıdır. Ancak, kül oranı arttığında kül ve polietilen arasındaki tutunma kuvvetinde düşüş ve külün toplanması gibi problemlerden dolayı malzemenin aşınma dayanımı olumsuz etkilenmektedir. Büyük boyutlu (-400 µm) kül ilavelerinde ise üretilen malzemelerin aşınma dayanımının tüm kül katkı oranları için kül ilave edilmemiş polietilene göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kül boyutunun büyük olması polietilen malzeme ile kül arasında tutunma sorunları yaşanması ve aşınma testleri sırasında sert kül partiküllerinin kırılıp numune yüzeyinden uzaklaşması ile sonuçlanmıştır.

Şekil 4; çalışmada kullanılan numunelerin çekme dayanımı testinde elde edilen yük-uzama bulgularını göstermektedir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere her iki kül boyutu grubu için de polietilen içerisine yapılan kül ilave miktarlarının artması

A+15 numune bileşimi dışında malzemenin kopma yükü ve uzamasında düşüşe sebep olmuştur. Genel olarak polimer malzemeler içerisine yapılan mikro boyutlu partikül ilaveleri polimer malzemelerin yük taşıma kapasitesini artırıcı yönde etkide bulunur. Ancak ilave edilen partikülün polimer malzemenin mekanik özelliklerini ne yönde etkileyeceği polimer malzeme ile partikül arasındaki tutunmaya bağlıdır. Eğer polimer malzeme ile katkı partikülleri arasındaki tutunma iyi ise polimer kendi üzerine uygulanan yükü partiküller üzerine transfer ederek partiküllerin kendisine göre daha yüksek olan yük taşıma kapasitesinden faydalanır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar A+15 karışımı dışında kül ilavesinin artışı ile mekanik özelliklerin zayıfladığını göstermektedir. Bu sonuçlar kül partikülleri ile polietilen matris arasındaki tutunmanın zayıf olduğunun bir göstergesidir. Yeni çalışmalarda kül-polietilen ara yüzeyinde daha iyi tutunma sağlayacak farklı yüzey aktif ilaveler ile bu özelliğin geliştirilmesi mümkün olabilir.



Şekil 4: Çekme dayanımı testi yük-uzama bulguları.

Bu çalışmada sunulan bulgular uzun soluklu bir araştırma çalışmasının başlangıç verileridir. Elde edilen bu bulgular, tehlikeli atık yakma tesislerinden kaynaklanan uçucu külürün 1. ya da 2. sınıf depolama tesislerine doğrudan gidebilmesi için, külün ucuz bir malzeme olan geri dönüştürülmüş polietilene tutturulmasının önemli avantajlar sağlayabileceği açıkça göstermiştir. İlerleyen çalışmalarda, bu karışımındaki kül oranının daha da artırılabilmesi için araştırmalar yürütülecektir. Ayrıca, bazı kompozitlerde ortaya çıkan ağır metal salınım artışlarının nedenlerinin sorgulanması bilimsel anlamda yeterli veri olmadığından ilerleyen çalışmalara bırakılmak durumundadır. Çalışmada üretilen kompozitlerin aşınma ve çekme dayanımı özelliklerinin, saf r-PE'ye göre iyileştirdiğini söylemek oldukça güçtür. Bu iki mekanik özellik için anlamlı iyileşmeler yalnızca A+15 yapısı yani %15 oranında 45 mikrometre altı kül içeren kompozit yapı için sağlanmıştır. Bu iyileşmenin, mühendislik açısından avantaj sağlayabilecek kullanımlara imkân verebilecek yeni bir malzemenin üretiminin yolunu açıp açmayacağı ise yine ilerleyen çalışmalarda ısı, elektrik, akustik ve benzeri malzeme özelliklerinin irdelenmesi ile tespit edilebilecektir.

Türkiye açısından bakıldığında, ilgili yönetmeliğin [44] inert atık tanımı "fiziksel, kimyasal veya biyolojik olarak önemli derecede herhangi bir değişime uğramayan, çözünmeyen, yanmayan, fiziksel veya kimyasal olarak reaksiyona girmeyen, biyolojik bozunmaya uğramayan veya temas ettiği maddeleri çevreye veya insan hayatına zarar verecek şekilde etkilemeyen ve toplam sızıntı kabiliyeti ve ekotoksitesitesi önemsiz miktarda olan, özellikle yüzeysel su ve yeraltı suyu kirliliği tehlikesi yaratmayan atıklar" şeklindedir. Bu çalışmada geri dönüştürülmüş polietilen için "inert" ifadesinin tercih edilmesi yönetmeliğin bir gerekliliğidir. Yine aynı yönetmelik gerek bu

inert atıkların kabul edilebileceği 3. sınıf depolama alanları gerekse de 2. ve 3. sınıf depolama alanları için oldukça kapsamlı uygunluk testleri ister. Örneğin bu çalışmada gerçekleştirilen ağır metal ve iyon analizlerinin yanı sıra yönetmelik çözülmüş organik karbon, toplam çözünen katı, yanma kaybı, toplam organik karbon, BTEX, PCB ve mineral yap içerikleri gibi başka parametrelerin de analiz edilmesini gerektirir. Öte yandan yönetmeliğin 21. maddesi, depolama alanları için uygunluk tayininde en azından özütleme testini zorunlu kılar. Bu anlamda bu çalışmada elde edilen uygunluk sonuçları mutlak birer sonuç olmamakla birlikte en temel düzeydeki uygunluk testi gerekliliklerini karşılamaktadır. Son olarak, yönetmelik depolama alanlarına uygunluk açısından değerlendirilecek atıklar için "monolitik olmayan yapılar" ifadesini kullandığı için çalışmada yapılan analizler kompozitler için gereksiz olarak değerlendirilebilir. Ancak, kullanılan kül ve r-PE yapıları birer granüler atık olduğundan araştırma aşamasında bu tür bir değerlendirme kaçınılmazdır.

#### 4 Teşekkür

Bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından desteklenen 2012/055 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

#### 5 Kaynaklar

- [1] Reijnders L. "Disposal, uses and treatments of combustion ashes: a review". *Resources, Conservation and Recycling*, 43(3), 313-336, 2005.
- [2] Malik A, Thapliyal A. "Eco-friendly fly ash utilization: potential for land application". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(4), 333-366, 2009.
- [3] Zacco A, Borgese L, Gianoncelli A, Struis RP, Depero LE, Bontempi E. "Review of fly ash inertisation treatments and recycling". *Environmental Chemistry Letters*, 12(1), 153-175, 2014.
- [4] Yang C, Wang T, Liu P, Shi H, Xue D. "Preparation of well-defined blackberry-like polypyrrole/fly ash composite microspheres and their electrical conductivity and magnetic properties". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 13(5), 112-118, 2009.
- [5] Bankowski P, Zou L, Hodges R. "Using inorganic polymer to reduce leach rates of metals from brown coal fly ash". *Minerals Engineering*, 17(2), 159-166, 2004.
- [6] Li G, Wu X. "Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars". *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1128-1134, 2005.
- [7] Yang YF, Gai GS, Cai ZF, Chen QR. "Surface modification of purified fly ash and application in polymer". *Journal of Hazardous Materials*, 133(1), 276-282, 2006.
- [8] Chaowasakoo T, Sombatsompop, N. "Mechanical and morphological properties of fly ash/epoxy composites using conventional thermal and microwave curing methods". *Composites Science and Technology*, 67(11), 2282-2291, 2007.
- [9] Ghosh A, Subbarao C. "Strength characteristics of class f fly ash modified with lime and gypsum". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 757-766, 2007.
- [10] Wu HC, Sun P. "New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer". *Construction and Building Materials*, 21(1), 211-217, 2007.
- [11] Alvarez-Ayuso E, Querol X, Plana F, Alastuey A, Moreno N, Izquierdo M, Font O, Moreno T, Dize S, Vazquez E, Barra M. "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes". *Journal of Hazardous Materials*, 154(1), 175-183, 2008.
- [12] Miyake M, Kimura Y, Ohashi T, Matsuda M. "Preparation of activated carbon-zeolite composite materials from coal fly ash". *Microporous and Mesoporous Materials*, 112(1), 170-177, 2008.
- [13] Anagnostopoulos IM, Stivanakis VE. "Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates". *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 329-336, 2009.
- [14] Das K, Ray D, Adhikary K, Bandyopadhyay NR, Mohanty AK, Misra M. "Development of recycled polypropylene matrix composites reinforced with fly ash". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(4), 510-517, 2010.
- [15] Kockal NU, Ozturan T. "Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes". *Journal of Hazardous Materials*, 179(1), 954-965, 2010.
- [16] Nath DCD, Bandyopadhyay S, Boughton P, Yu A, Blackburn D, White C. "High-Strength biodegradable poly (vinyl alcohol)/fly ash composite films". *Journal of Applied Polymer Science*, 117(1), 114-121, 2010.
- [17] Zhang P, Li Q, Zhang H. "Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(16), 1349-1358, 2011.
- [18] Xie J, Wu S, Pang L, Lin J, Zhu Z. "Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage". *Construction and Building Materials*, 30, 340-346, 2012.
- [19] Acharya SK, Mishra SC. "Weathering behavior of fly-ash jute polymer composite". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(12), 1201-1210, 2007.
- [20] Chang FY, Wey MY. "Comparison of the Characteristics of Bottom and Fly Ashes Generated from Various Incineration Processes". *Journal of Hazardous Materials*, 138, (3), 594-603, 2006.
- [21] Veli S, Kirli L, Alyüz B, Durmusoğlu E. "Characterization of bottom ash, fly ash, and filter cake produced from hazardous waste incineration". *Polish Journal of Environmental Studies*, 17(1), 139-145, 2008.
- [22] Fuoco R, Ceccarini A, Tassone P, Wei Y, Brongo A, Francesconi S. "Innovative stabilization/solidification processes of fly ash from an incinerator plant of urban solid waste". *Microchemical Journal*, 79(1), 29-35, 2005.
- [23] Al-Rawas AA, Wahid Hago A, Taha R, Al-Kharousi K. "Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars". *Building and Environment*, 40(9), 1261-1266, 2005.
- [24] Lin KL. "Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag". *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1810-1816, 2006.
- [25] Shi HS, Kan LL. "Characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash-cement matrices and effect of mineral admixtures on composite system". *Construction and Building Materials*, 23(6), 2160-2166, 2009.

- [26] Bontempi E, Zacco A, Borgese L, Gianoncelli A, Ardesi R, Depero LE. "A new method for municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash inertization, based on colloidal silica". *Journal of Environmental Monitoring*, 12(11), 2093-2099, 2010.
- [27] Chen HJ, Wang SY, Tang CW. "Reuse of Incineration Fly Ashes and Reaction Ashes for Manufacturing Lightweight Aggregate". *Construction and Building Materials*, 24(1), 46-55, 2010.
- [28] Jin MT, Huang CJ, Chen L, Sun X, Wang LJ. "Immobilization of MSWI fly ash with geopolymers". *Advanced Materials Research*, 150, 1564-1569, 2011.
- [29] Wu K, Shi H, Guo X. "Utilization of municipal solid waste incineration fly ash for sulfoaluminate cement clinker production". *Waste Management*, 31(9), 2001-2008, 2011.
- [30] Colangelo F, Cioffi R, Montagnaro F, Santoro L. "Soluble salt removal from MSWI fly ash and its stabilization for safer disposal and recovery as road basement material". *Waste Management*, 32(6), 1179-1185, 2012.
- [31] Besco S, Brisotto M, Gianoncelli A, Depero LE, Bontempi E, Lorenzetti A, Modesti M. "Processing and properties of polypropylene-based composites containing inertized fly ash from municipal solid waste incineration". *Journal of Applied Polymer Science*, 130(6), 4157-4164, 2013.
- [32] Malviya R, Chaudhary R. "Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: a review". *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 267-276, 2006.
- [33] Atikler U, Basalp D, Tihminlioğlu F. "Mechanical and morphological properties of recycled high-density polyethylene, filled with calcium carbonate and fly ash". *Journal of Applied Polymer Science*, 102(5), 4460-4467, 2006.
- [34] Ahmed SFU, Maalej M, Paramasivam P. "Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash". *Construction and Building Materials*, 21(5), 1088-1097, 2007.
- [35] Satapathy S, Nag A, Nando GB. "Thermoplastic elastomers from waste polyethylene and reclaim rubber blends and their composites with ash". *Process Safety and Environmental Protection*, 88(2), 131-141, 2010.
- [36] Deepthi MV, Sharma M, Sailaja RRN, Anantha P, Sampathkumaran P, Seetharamu S. "Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene-fly ash cenospheres composites". *Materials and Design*, 31(4), 2051-2060, 2010.
- [37] Khan MJ, Al-Juhani AA, Shawabkeh R, Ul-Hamid A, Hussein IA. "Chemical modification of waste oil fly ash for improved mechanical and thermal properties of low density polyethylene composites". *Journal of Polymer Research*, 18(6), 2275-2284, 2011a.
- [38] Khan MJ, Al-Juhani AA, Ul-Hamid A, Shawabkeh R, Hussein IA. "Effect of chemical modification of oil fly ash and compatibilization on the rheological and morphological properties of low-density polyethylene composites". *Journal of Applied Polymer Science*, 122(4), 2486-2496, 2011b.
- [39] Yıldız T, Yıldız C. "Soma termik santrali uçucu kül ve polipropilen atıklarının yeni bir malzeme üretiminde değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 163-169, 2011.
- [40] Bakoglu M, Karademir A, Ayberk S. "Partitioning characteristics of targeted heavy metals in IZAYDAS hazardous waste incinerator". *Journal of Hazardous Materials*, 99(1), 89-105, 2003.
- [41] Karademir A, Bakoglu M, Ayberk S. "PCDD/F removal efficiencies of electrostatic precipitator and wet scrubbers in IZAYDAS hazardous waste incinerator". *Fresenius Environmental Bulletin*, 12, 1228-1232, 2003.
- [42] Karademir A, Korucu MK, "Assessment of emissions and removal of pcdd/fs at start-up periods in a hazardous waste incinerator". *Journal of the Air and Waste Management Association*, 63(7), 788-795, 2013.
- [43] Korucu MK, Karademir A. "An evaluation of PCDD/Fs mass flux from a hazardous waste incinerator: the need for a reasonable start-up procedure". *Combustion Science and Technology*, 187(3), 458-468, 2015.
- [44] Çevre ve Orman Bakanlığı. "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik". Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Atık Yönetimi Dairesi, Ankara, Türkiye, 27533, 2010.