



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi

Determination of the most suitable disposal option in the management of end of life tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE method

Yazar(lar) (Author(s)): Elif DURNA¹, Goncağül KOZ², Nevim GENÇ³

ORCID¹: 0000-0003-4478-2967

ORCID²: 0000-0001-5092-2271

ORCID³: 0000-0002-6185-1090

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Durna E., Koz G. ve Genç N., “Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 915-927, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.591100

Türkiye’de Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Belirlenmesi

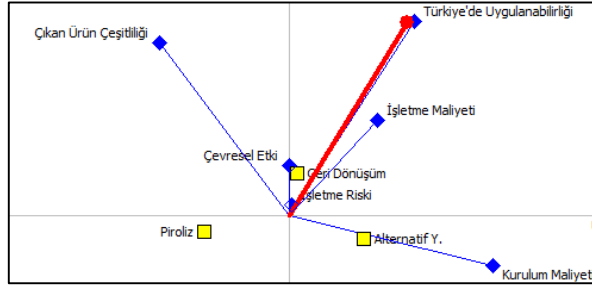
Determination of the Most Suitable Disposal Option in the Management of End of Life Tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Method

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) yönetiminde alternatif bertaraf metotlar değerlendirilmiştir./ Alternative methods have been evaluated for the management of end of life tires
- ❖ Alternatif yöntem, çok kriterli karar verme süreci olan bulanık PROMETHEE ile belirlenmiştir./ The alternative method is determined by fuzzy PROMETHEE, a multi-criteria decision making process.
- ❖ Alternatif yöntemler arasında geri dönüşüm alternatifi en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. / Among alternative methods, recycling has been determined as the most appropriate method.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada ömrünü tamamlamış atık lastiklerin yönetimi için direkt geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak değerlendirme alternatifleri değerlendirilmiştir. Alternatifler çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, işletme maliyeti, elde edilen ürün çeşitliliği ve Türkiye’de uygulanabilirlik kriterleri ile değerlendirilmiştir. / In this study, Direct recycling, pyrolysis and alternative fuel usage alternatives are evaluated for the management of end of life tires. Alternatives were evaluated with the criteria of environmental impact, operating risk, installation cost, operating cost, resulting product diversity and applicability in Turkey.



Şekil. GAIA düzlemi / Figure. GAIA plane

Amaç (Aim)

Çalışmada bulanık PROMETHEE yöntemi ile Türkiye için en uygun ömrünü tamamlamış lastik yönetim metodu belirlenmesi amaçlanmıştır. / The aim of the study was to determine the most suitable end of life tire management method for Turkey with fuzzy PROMETHEE method.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sözel ifadeler bulanık sayılara çevrilerek Visual PROMETHEE yazılımı ile analiz edilmiştir. / linguistic expressions are translated into fuzzy numbers and analyzed with Visual PROMETHEE software.

Özgünlük (Originality)

Ömrünü tamamlamış atık lastiklerin yönetimi için en uygun alternatif metot, sosyal, çevresel ve ekonomik kriterlerin birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. / The most appropriate alternative method for end of life tires has been determined by evaluating social, environmental and economic criteria together.

Bulgular (Findings)

Tüm kriterler birlikte dikkate alındığında metotların tercih edilebilirlik sıralaması geri dönüşüm>alternatif yakıt olarak kullanma>piroliz şeklinde belirlenmiştir. / When all the criteria were taken into account together, the preferability ranking of alternatives was determined as recycling>using as alternative fuel>pyrolysis, respectively.

Sonuç (Conclusion)

Her bir kriter eşit ağırlıkta değerlendirildiğinde en uygun metot olarak geri dönüşüm alternatifi belirlenmiştir. / When each criterion is evaluated equally, recycling alternative has been determined as the most suitable method.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Türkiye’de Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin PROMETHEE ve Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Elif DURNA*, Goncağül KOZ, Nevim GENÇ

Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 12.07.2019 ; Kabul/Accepted : 10.09.2019)

ÖZ

Sürdürülebilir bir atık yönetim yaklaşımının ekonomik, sosyal ve çevresel unsurların tümüne hizmet edebilmesi gerekir. Bu çalışmada atık lastiklerin yönetiminde direkt geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak değerlendirme alternatifleri değerlendirilmiştir. Sayılan bu alternatif metotlardan Türkiye için en uygun yöntem, çok kriterli karar verme süreci olan PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations) ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmiştir. En uygun alternatifin belirlenmesi için belirlenen 4 karar vericinin alternatif yöntemleri, çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, işletme maliyeti, elde edilen ürün çeşitliliği ve Türkiye’de uygulanabilirlik açısından değerlendirilmeleri istenmiştir. Karar vericilerin bu değerlendirme kriterlerine verdikleri cevaplar 5 noktalı karar ölçeği ve bulanık sayılar ile ifade edildikten sonra Visual PROMETHEE yazılımı ile çözümlenmiştir. Sonuçlara göre PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlenmeleri PROMETHEE I ve II analizleri dikkate alındığında alternatiflerin geri dönüşüm>alternatif yakıt olarak kullanım>piroliz şeklinde aynı tercih sıralamaları vermişlerdir, ancak PROMETHEE Rainbow analizinde alternatiflere etki eden pozitif ve negatif kriterlerde farklılıklar göstermiştir. Dilsel ifadelerin bulanık PROMETHEE ile daha hassas ifade edildiği düşünüldüğünden yukarıdaki analizlerine ek olarak GAIA görsel analizi ve GAIA web analizi gerçekleştirilmiştir. GAIA analizi ile, (i) geri dönüşüm alternatifinin çevresel etkiler, işletme riski, Türkiye’deki uygulanabilirliği ve işletme maliyeti açısından, (ii) piroliz alternatifinin ürün çeşitliliği açısından, (iii) alternatif yakıt olarak kullanma alternatifinin kurulum maliyeti açısından uygun olacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak en uygun alternatifinin geri dönüşüm alternatifi olduğu ve bu alternatifinin tercih edilebilirliğinde sadece kurulum maliyeti kriterinin negatif yönde etki ettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme, PROMETHEE, ömrünü tamamlamış lastik, geri dönüşüm, alternatif yakıt, piroliz.

Determination of the Most Suitable Disposal Option in the Management of End of Life Tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Method

ABSTRACT

A sustainable waste management approach should be able to serve all economic, social and environmental aspects. In this study, direct recycling, pyrolysis and alternative fuel usage alternatives were evaluated in the management of waste tires. The most suitable of these alternative methods for Turkey was determined using PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations), and fuzzy PROMETHEE, multi-criteria decision processes. To determine the most appropriate alternative, 4 decision makers were asked to evaluate alternatives in terms of environmental impact, operating risk, installation cost, operating cost, generated product diversity and applicability in Turkey. These evaluation criteria of decision makers were expressed with 5 point decision scale and fuzzy numbers and analyzed with Visual PROMETHEE software. According to the results, when the PROMETHEE I and II analysis of PROMETHEE and fuzzy PROMETHEE approaches were taken into consideration, the same order of alternatives was found as recycling> use as alternative fuel> pyrolysis. However, the PROMETHEE Rainbow analysis of the two approaches showed differences in positive and negative criteria affecting alternatives. GAIA visual analysis and GAIA web analysis were performed in addition to the above analyzes since linguistic expressions were thought to be expressed more sensitive with fuzzy PROMETHEE. It has been determined from GAIA visual analysis, (i) recycling alternative would be appropriate in terms of environmental impacts, operating risk, applicability in Turkey, and operating cost (ii) pyrolysis alternative would be appropriate in terms of the product diversity (iii) use as alternative fuel alternative would be appropriate in terms of installation cost. As a result, it is determined that the most suitable alternative is the recycling alternative and only the installation cost criterion has a negative effect on the preferability of this alternative.

Keywords: Multi criteria decision making, PROMETHEE, end of life tire, recycling, alternative fuel, pyrolysis.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta elif.durna@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektörünün ülkemiz ve dünya ekonomisinde önemli bir payı olup lastik üretim sektörü de otomotiv sektöründen doğrudan etkilenmektedir. Lastik üretimine paralel olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) bertarafı/ yönetimi de önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Dünyadaki en büyük çevre sorunlarından biri, otomotiv lastiklerinin atıklarının nihai olarak bertarafıdır [1]. Ülkemizde T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın, 25 Kasım 2006 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan 26357 sayılı "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğinde", ÖTL, faydalı ömrünü tamamladığı belirlenerek araçtan sökülün orijinal veya kaplanmış, bir daha araç üzerinde lastik olarak kullanılmayacak durumda olan ve üretim esnasında ortaya çıkan ıskarta lastikleri" olarak tanımlanmaktadır [2]. ÖTL'ler gelişmiş güzel depolanma durumunda sivrisinekler için bir üreme alanı sağlayarak sivrisinek kaynaklı hastalıkların yayılmasını kolaylaştırırken önemli miktarda hava kirliliği (yanma durumunda), toprak kirliliği ve son olarak, yüzey ve yeraltı suyu kirlenmesine neden olurlar. Lastikler yandığında, SO_x, NO_x, CO ve PAH'lar gibi önemli miktarda hava kirletici maddeleri ve As, Cd, Ni, Zn, Hg, Cr ve Va gibi ağır metaller ortaya çıkar [3,4]. Avrupa Birliğinde (AB) ÖTL yönetimi için çeşitli yasal mevzuatlar ve yönergeler incelendiğinde, ÖTL'lerin çöp alanlarında depolanması 2003 yılından itibaren yasaklanmış olup, 2006 yılına kadar boyutlarının azaltılarak depolanmasına izin verilmiş, 2006 yılından itibaren ise, ÖTL'lerin çöp toplama alanlarında depolanmasına hiçbir şekilde izin verilmemiştir. [5,6]. Ülkemizde ilgili yönetmelik ile birlikte ÖTL'lerin yönetiminde gerekli düzenlemelerin ve standartların sağlanması amaçlanmıştır. ÖTL Kontrolü Yönetmeliğine göre lastik üreticilerinin her yıl ürettikleri lastiğin bir kısmını geri toplamaları ve bertaraf edilmesi için çeşitli kurumlara vereceklerini taahhüt etmeleri gereklidir. Lastik üreticilerinin toplaması gereken bu miktarlar 2007'de % 30, 2008'de % 35, 2009'da % 40, 2010'da % 45 ve 2011'de % 50 olacak şekilde belirlenmiştir [7,2]. Dünyada her yıl 17 milyon ton kadar ÖTL oluşmakta olup Türkiye'de bu miktar yıllık 180.000–300.000 ton civarındadır [8]. Bu rakam 2008 yılı verilerine göre AB ülkelerinde 3,2 milyon ton civarındadır ve 2030 yılına kadar lastik kullanımının yaklaşık % 20 oranında artacağı tahmin edilmektedir [9,10,11]. "Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği ve Uygulamaları 2018" raporuna göre, 2017 yılında toplanması gereken ÖTL miktarı 236660 ton, geri toplanabilen ÖTL miktarı ise ancak 184313 ton olmuştur. Bu miktarın LASDER tarafından toplanan kısmı 163000 ton olup LASDER'in 2018 yılında topladığı ÖTL miktarı ise 178133 tondur. Toplanan bu miktarın 100000 tonu malzeme geri kazanımına, 16133 tonu pirolitik yağ kazanımına, 62000 tonu da enerji amaçlı çimento sektörüne ek yakıt olarak kazandırılmıştır [8,12]. ÖTL yönetiminde bertaraf seçenekleri kullanım amacına ve maliyete göre değişmekte olup, genel olarak uygulanan yöntemler şu şekilde sıralanabilir [5].

- Geri dönüştürme
- Yeniden kullanma
- Depolama
- Enerji/malzeme geri kazanımı

Türkiye'de ihraç edilen ve yeniden kaplanan miktarlar hariç 2008 yılında üretilen 200000 ton atık lastiğin %15'inin enerji geri kazanımında, %20'sinin inşaat sektörü veya malzeme geri kazanımında ve %60'ının depolama alanlarında ve diğer bertaraf yöntemleri ile giderildiği bildirilmiştir [10].

Atık lastiklerin değerlendirilmesinde çözüm aranırken çevreye zarar vermeyen tekniklerin kullanılması, hammaddeye dönüşüm sağlanması, ekonomik ve yaygın kullanıma uygun olması, kurulan endüstrilere zararın minimum seviyede tutulması ve elde edilen ürünün ticari değerinin olması gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır [7].

Bu çalışmada ÖTL yönetiminde artan atık miktarı, çevresel ortamlarda oluşturdukları zararlar ve ekonomik değeri olan ikincil maddelere dönüştürülebilme potansiyeli göz önüne alınarak en uygun olabilecek alternatif belirlenmiştir. Dünyada yaygın olarak kullanılan doğrudan değerlendirme (geri dönüşüm), piroliz ve alternatif yakıt olarak kullanma yöntemleri ele alınmıştır. En uygun yöntemin belirlenmesi aşamasında çok kriterli karar verme yaklaşımlarından olan bulanık PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations) yöntemi kullanılmıştır.

2. ATIK LASTİK YÖNETİMİNDE ALTERNATİF YÖNTEMLER (ALTERNATIVE METHODS IN WASTE TIRE MANAGEMENT)

2.1. Doğrudan ve Malzeme Olarak Değerlendirme / Geri Dönüşüm (Direct and Evaluation As Material / Recycling)

Günümüzde atık yönetiminin çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilirliğinin sağlanması için uygulanan atık yönetim hiyerarşisi sırasıyla, atığı kaynağında önleme, oluşumunu azaltma, tekrar kullanma, geri dönüşüm, atıktan enerji geri kazanımı ve bertaraf şeklindedir. Lastik üç boyutlu yapıya sahip bir çeşit polimer olup, doğal veya sentetik kauçuk, vulkanizasyon ajanı, dolgu maddesi olarak karbon siyahı ve patlamaya dayanıklı lastik ajanı gibi aramid lif ve vulkanizasyon aktivatörü olarak çinko oksit gibi katkı maddelerinden oluşmaktadır [13]. Bir otomobil lastiğinde %47 kauçuk, %21,5 karbon siyahı, %16,5 metal, %5,5 tekstil, %1 çinko oksit, %1 kükürt ve %7,5 katkı malzemeleri bulunmaktadır [14]. Lastikler ve diğer kauçuk ürünleri üretilip kullanıldığından beri hurda ya da kullanılmış lastik parçaları problem teşkil etmiştir. Kauçuk, dayanıklılığı ve yüksek miktarda tüketici sonrası ve üretim atığı nedeniyle büyük bir sorundur. Dünyada üretilen kauçuğun %10'u üretim sırasında, kalan kısım ise birkaç yıl içinde ömrünü tamamlayarak atık haline gelmektedir. Araç lastikleri ise bu atıklar içerisinde en büyük kısmı kaplamaktadır.

ÖTL'ler doğrudan değerlendirmeye tabi tutulduklarında hiçbir işleme tabi tutulmadan olduğu gibi kullanılırlar. ÖTL'ler iskelelerde, park alanlarında, yollarda, toprak dolgularında kullanılabilirdiği gibi kaplanıp yeni lastik üretiminde de kullanılabilirler [5, 10]. ÖTL'ler ayrıca mekanik parçalama ile çeşitli boyutlarda granül haline getirilerek, spor pistlerinde, çocuk oyun alanlarında ve bazı malzemelerin elastikliyini arttırmak için kullanılmaktadır [15].

ÖTL'lerin %80 lik bölümü malzeme geri kazanım amacıyla kullanılmaktadır [10]. Geri dönüşüme giren lastiklerden kauçuk granül, çelik tel ve tekstil parçacıkları elde edilmektedir. Ömrünü tamamlamış lastikler lastik öğütücü makinelerde kırılarak kauçuk ve çelik parçalara ayrıldıktan sonra çelik teller mıknatıslı bantlarda kauçuk ile ayrıştırılır. Bir geri dönüşüm tesisi; Hurda tel çekme makinesi, lastik şeritleme makinesi, parçalayıcı, kırma makinesi, aspiratörlü seperatör, kalibre makinesi, toz siklonu ve aspiratörü ekipmanlarından oluşmakta olup 1000 kg/sa kapasiteli bir tesis için 2019 yılı kurulum maliyetinin ülkemizde 1.330.000 TL olduğu, geri dönüşüm sonucu elde edilen ürünlerin satış fiyatlarının ise: Granül kauçuk (1-3 mm boyutlu)1-0,75 TL/kg, çelik tel 0,25-0,30 TL/kg, elek altı malzeme (sıfır tozu) 1,20 TL/kg olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemde ince kırıntı kauçuğun arka arkaya öğütme işlemi sırasında ortaya çıkan toz emisyonu sorun teşkil etmektedir. Sıfır tozu adı verilen ve en ince hali bile değerlendirilen bu toz da maddi kaynak sağlamaktadır. Kişisel koruyucu donanımların kullanılması ile işçi sağlığı ve iş güvenliği sağlanabilir.

2.2. Piroliz (Pyrolysis)

Atık lastiklerin hammadde olarak değerlendirilmesinde piroliz prosesinin önemli bir yeri vardır. Piroliz, organik maddelerin oksijensiz ortamda 500 – 800 °C'de, gaz, katı veya sıvı ürünlere dönüştürülmesi prosesidir. Pirolizde gerekli olan ısı miktarı, organik maddenin kimyasal yapısını bozacak ve yeni kimyasal maddelerin oluşumunu sağlayacak seviyede olmalıdır. ÖTL'lerin pirolizinden elde edilen ürünler pirolitik yağlar, karbon siyahı, çelik tel ve yanıcı gazlar olarak sıralanabilir [16]. Piroliz prosesinde gaz, sıvı ve katı ürün dağılımı proses sıcaklığı ve reaksiyon süresine göre değişmektedir. Bu ürünlerin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Pirolizden elde edilen ürünler farklı alanlarda kullanılmaktadır [5];

Karbon Siyahı: Kullanım alanı çok geniştir. Lastik üretiminde kauçuğa karıştırılır ve kablo, konveyör bant, hortum, paspas, siyah poşet, araba yedek parçaları, ısı yalıtım, kauçuk malzemelerde boya maddesi, taban malzemesi ve plastik üretiminde kullanılmaktadır

Pirolitik Yağ: Geri dönüştürülen lastiğin cinsine göre lastik miktarının 43%-45%'i oranında pirolitik yağ elde edilir. Pirolitik yağ mazot eşdeğeri bir üründür. Yakıt olarak, kullanılmaktadır [18].

Çelik Hurda Tel: Pirolize giren lastik ağırlığının % 10 miktarı kadar hurda çelik tel elde edilmekte olup hurdacılara ve haddehanelere satılmaktadır.

Çizelge 1. Atık lastiğin pirolizinden elde edilen ürünler (Products from pyrolysis of waste tires) [17]

Ürün	Bileşim	Isıl değer
Gaz	Düşük kükürt içerikli hidrokarbon karışımı	19-45MJ/m ³
Sıvı	Aromatik yağlar	42 MJ/kg
Katı	Karbon siyahı	28-33MJ/kg

Yanıcı Gaz: Piroliz işlemi sonrasında yoğunlaştırılmayan gazdır. Sistemde gerçekleştirilen piroliz işlemi ile %8-%10 oranında yanıcı gaz elde edilmesi beklenmektedir. Piroliz gazı doğal gaz ile karşılaştırılabilir nitelikte bir üründür [19].

Tayvan'da 36000 ton/yıl kapasiteli lastik piroliz tesisinde 13320 ton/yıl piroliz yağı, 12240 ton/yıl karbon siyahı, 5760 ton/yıl piroliz gazı, 4680 ton/yıl çelik elde edilmiştir. Geri dönüştürülmüş karbon siyahı ve piroliz yağın karbon ayak izleri 0,518 ve 0,311 kg CO₂/kg olarak verilmiştir. Bu değerler taze ürünle karşılaştırıldığında sadece üçte birini oluşturduğu belirlenmiştir [20]. Bu açıdan değerlendirildiğinde karbon ayak izinin azaltılmasında uygun bir yöntem olarak düşünülebilir.

Piroliz prosesi, piroliz reaktörü, yoğunlaştırma kuleleri, çelik ayırma ve karbon siyahı ünitelerinden oluşmakta olup 100 kg/saat kapasiteli bir tesisin kurulum maliyeti 2019 yılı için 4.729.000 TL olarak belirlenmiştir. Elde edilen ürünlerin Ülkemizdeki satış fiyatları şu şekildedir: mazot eşdeğeri 1500 TL/ton, karbon siyahı 550 TL/ton, çelik tel 350 TL/ton, yanıcı gaz 5 TL/m³ olduğu belirlenmiştir.

Piroliz sürecinden elde edilen yağlar, ülkemizde Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre 1. sınıf atık yağ kategorisine girmektedir [21]. Üretilen yağ, lisanslı firmalara geri dönüşüm için verilmektedir. Elde edilen ürünün atık sınıfına girmesi ise piroliz tesislerine ek bir yasal yükümlülük getirmiştir. Bu durum piroliz tesislerinin yaygınlaşmasını negatif yönde etkilemektedir.

Pirolizden kaynaklanabilecek önemli çevresel riskler; elde edilen yağın dökülmesi, oluşan tozların işçi sağlığı ve çevre üzerinde olumsuzlukları sayılabilmektedir. Piroliz atmosfer kirliliğine sebep olmaz. Sıvı sızdırmaz kaplar kullanılarak sıvı yakıtların sızıntısı önlenebilir. Piroliz sistemi yangın riski olan bir sistemdir ve bu da önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ancak pirolizin ekonomik faydaları oldukça dikkate değerdir: Metaller, sıvı hidrokarbonlar, karbon ve elemental sülfür gibi ikincil ham materyaller ekonomik getirisi olan ürünlerdir [19]. Piroliz yöntemi diğer geri kazanım yöntemlerine göre tesis kurulumu açısından daha pahalı ve daha zahmetli olduğu gibi, daha yüksek enerji maliyeti gerektiren bir yöntemdir. Ancak prosenin sürekliliği sağlanabilirse geri kazanım tekniği ve ekonomisi itibarı ile verimli bir yöntem olduğu düşünülebilir [10].

Piroliz diğer yakma ve gazlaştırma prosesleri ile karşılaştırıldığında ise düşük yatırım ve işletme maliyeti gibi bazı avantajlara sahiptir. Bu yüzden atık lastik bertarafında umut verici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [13].

2.3. Alternatif Yakıt Olarak Değerlendirme (Evaluation as Alternative Fuel)

Alternatif yakıt olarak değerlendirme ÖTL yönetimi için bir diğer alternatif olabilir. Benzersiz kalorifik değere (29-39 MJ/kg) sahip olan lastik atıkları özellikle çimento endüstrilerinde ve kağıt fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Atık lastiklerin yaklaşık %90'i organik maddeden ibarettir. Bu yüzden yakıt kaynağı olarak kullanılabilir niteliktedirler [22]. Yapılan çalışmalar %95 kömür ve %5 doğranmış lastik karışımı kullanılması durumunda CO ve NOx emisyonlarında önemli bir oranda azalma olduğunu göstermiştir [23]. Atık lastiğin 700 °C de yakılması sonucu emisyon değerleri incelendiğinde NOX içeriğinin 94-110 mg/g olduğu belirlenmiştir [24]. Bugün ülkemizde toplam yakıt içinde %40 oranında ÖTL kullanılmaktadır. ÖTL nin yanması sonucu enerji geri kazanımının yanı sıra silika ve çelik telin geri kazanımı da sağlanmaktadır [5].

Lastikler buhar kazanları ve çimento endüstrilerinde bütün halinde ve boyutları küçültülerek yoğun olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ÖTL, LASDER tarafından lastik üreticilerinden imha bedeli karşılığında alınmaktadır. Çimento fabrikaları ise bir bedel karşılığında LASDER'den ÖTL almaktadırlar. 2019 yılı itibarı ile 30'un üzerinde lisanslı geri kazanım firması bulunmaktadır ve en az 15 çimento fabrikası ÖTL'leri alternatif yakıt olarak kullanmaktadır [5]. Çimento fabrikaları doğranmış ve doğranmamış lastikleri ortalama olarak (5-10 cm boyutu için) 110-300 TL/ton ve 150-200 TL/ton arasında değişen fiyatlarda almaktadırlar. Atık lastiklerin alternatif yakıt olarak kullanılması yöntemi, lastik üreticileri için ekipman gereksinimi olmadığından ekonomik açıdan cazip bir seçenek olarak görülmektedir. Lastiklerin yakılması ile elektrik ve buhar üretilebilmektedir ancak önemli bir hava kirliliği oluşturacağından, etkili bir hava kirliliği kontrol ekipmanı kurulması gerekmektedir. Lastiğin ısı değeri kömüre göre daha yüksek olsada lastikler yakıldığında ortaya çıkan kükürt, azot dioksitler, PAH'lar ve diğer uçucular için emisyon kontrol cihazları kurulması gereklidir [5]. Lastiklerin ve çeşitli yakıtların emisyon miktarları Çizelge 2'de verilmiş olup lastiğin yaydığı emisyonun doğal gazdan fazla ve kömür ile yakın bir değer olduğu görülmektedir.

Lastik 850 °C de yakıldığında yaklaşık 80000 mg/kg benzen, 65000 mg/kg metan, yanısıra 5000 mg/kg civarında naftalin, piren, fenantren ve yaklaşık 2000 mg/kg stiren, floren, bifenil oluşur. Aynı sıcaklıkta piroliz işlemi sonrası çıkan emisyonlar ise yaklaşık 10000 mg/kg piren, 5000 mg/kg naftalin, 4000 mg/kg fenantren ve 4000 mg/floren şeklindedir [25].

Çizelge 2. Lastik ve çeşitli yakıtların ısı değerleri ve emisyon miktarları (Thermal values and emissions of tires and various fuels) [5]

Yakıt türü	Isıl değer (MJ/kg)	Emisyon değeri (kg CO ₂ /ton)
Odun	10,2	1122
Kömür	27	2430
Doğal gaz	39	1989
Motorin	46	3220
Lastik*	32	2270

(*): 1 ton ÖTL=1 ton iyi kalite kömür=0,7 ton fuel oil [8]

3. PROMETHEE VE BULANIK PROMETHEE YÖNTEMLERİ İLE KARAR VERME SÜRECİ (DECISION MAKING PROCESS WITH PROMETHEE AND FUZZY PROMETHEE METHODS)

PROMETHEE Brans ve Vincle (1985) tarafından ortaya konulan ve Brans ve ark. (1986) tarafından geliştirilen birçok kriterli karar verme yöntemidir.

PROMETHEE çok kriterli analizlerde kullanılan diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça basit bir sıralama metodu anlayışı ve uygulamasıdır. Sonlu alternatifler dizisinin çoklu ya da birbiriyle çelişen kriterleri olan problemlere iyi adapte edilmiştir [26]. a ve b olarak kabul edilen iki alternatifin kriterler bakımından karşılaştırılması yapılırken bir P fonksiyonu tercih edilir. Bu fonksiyon 0-1 aralığında değişen bir tercih derecesi içinde, belirli bir kriter bazında değerlendirilen iki alternatif arasındaki farkı açıklamaktadır. Bu P fonksiyonun genel gösterimi denklem 1'deki gibi ifade edilir.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)], & f(a) > f(b) \end{cases} \quad (1)$$

Seçilen tercih fonksiyonu ile alternatifler, kriter temelinde ikili olarak karşılaştırılır. PROMETHEE 'nin temel adımları aşağıdaki gibidir [26, 27, 28, 29].

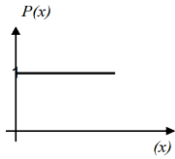
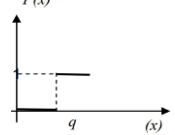
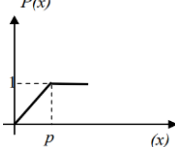
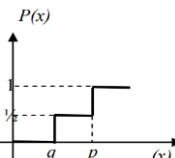
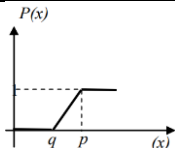
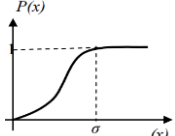
Adım 1: Her bir kriter için Brans (1982) tarafından belirlenmiş olan 6 adet tercih fonksiyonundan bir tanesi seçilir.

Adım 2: Adım 1 ile belirlenen tercih fonksiyonu ile alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılarak her alternatif için tercih indeksi denklem 2'deki eşitlik ile belirlenir.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \times P_j(a, b) \quad (2)$$

Burada w_j kriterin önem ağırlığını, n ise değerlendirme faktörü sayısını ifade eder.

Çizelge 3. PROMETHEE 'nin genelleştirilmiş tercih fonksiyonları (PROMETHEE's generalized preference functions) [30].

Tip	Parametre	Fonksiyon	Grafik, P(x)
Birinci Tip (Olağan)	-	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$	
İkinci Tip (U-tipi)	q	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ 1, & x > q \end{cases}$	
Üçüncü Tip (V-tipi)	p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{p}, & 0 \leq x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Dördüncü Tip (Seviyeli)	q,p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ \frac{1}{2}, & q \leq x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Beşinci Tip (Lineer)	q,p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ \frac{x-q}{p-q}, & q < x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Altıncı Tip (Gaussian)	σ	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ -x^2/2\sigma^2 \\ 1 - e, & x > 0 \end{cases}$	

Adım 3: Her alternatif için a alternatifi için pozitif (denklem 3) ve negatif akımlar (denklem 4) belirlenir.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (3)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a) \quad (4)$$

Pozitif akım bir alternatifin diğer alternatifler üzerinde nasıl bir üstünlük sağladığını gösterirken negatif akım o alternatife diğer alternatiflerin nasıl bir üstünlük sağladığını ifade eder. Dolayısıyla, $\Phi^+(a)$ ne kadar büyük ise ve $\Phi^-(a)$ ne kadar küçük ise alternatif o kadar üstün konuma gelir.

Adım 4: Hesaplanan pozitif ve negatif akımlar ile PROMETHEE I kısmi sıralama ve PROMETHEE II net sıralama gerçekleştirilir. a alternatifi ile b alternatifi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde olacaktır [31].

(a),(b)'den üstündür;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (5)$$

(a),(b)'den farksızdır;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (6)$$

(a) ile (b) karşılaştırılmaz;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) < \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (7)$$

PROMETHEE metodu sahip olduğu avantajlarına rağmen, girdilerin genellikle karar vericilerin düşünce ve tecrübelerine dayanması ve dilsel ifadelerle ifade edilmesi gereken durumların getirdiği belirsizlik açısından bir dezavantaja sahiptir. Bu belirsizliğin ortadan kaldırılması amacıyla PROMETHEE metodunun bulanık sayılarla birlikte geliştirilmiş versiyonu olan Bulanık PROMETHEE ortaya çıkmıştır. Yöntemin amacı, daha hassas ve daha belirgin sonuçlar elde edebilmektir. Bulanık PROMETHEE yöntemi, PROMETHEE yöntemindeki tüm işlemler bulanıklaştırılarak gerçekleştirilir; sadece kriter ağırlıkları ve tercih fonksiyonundaki tercih eşikleri kesin sayı olarak kalır. Bu çalışmada karar vericiler tarafından belirlenen dilsel ifadeler öncelikle 5 noktalı değerlendirme ölçeği kullanılarak PROMETHEE yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Bulanık PROMETHEE özellikle dilsel ifadelerin yer aldığı problemlerin çözümünde daha hassas sonuçların elde edilmesi için kullanıldığından üçgensel bulanık sayılar kullanılarak ayrıca bulanık PROMETHEE çözümü yapılmıştır.

4. METOT (METHOD)

Çalışmada atık lastik yönetiminde uygulanabilecek üç alternatif yöntem, geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak kullanım ele alınmıştır. Yöntemin seçiminde etkili olan kriterler ise çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye’de uygulanabilirlik ve işletme maliyeti olarak belirlenmiştir.

Alternatiflerin değerlendirilmesi için 4 karar verici tercih edilmiştir. Karar vericiler, lastik sektöründe görev yapan iki uzman kişi, konu üzerinde uzman bir öğretim üyesi ve İşyerinde Mühendislik Eğitimi lastik sektöründe tamamlamış bir çevre mühendisinden oluşmaktadır. Bu çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerin bertaraf alternatifinin belirlenmesi probleminin çözümünde öncelikle 5 noktalı değerlendirme ölçütü kullanılarak PROMETHEE yaklaşımı kullanılmıştır. Karar vericilerin kriter bazında öznel ve dilsel ifadeleri kullanıldığından 5 noktalı değerlendirme ölçeği yerine bulanık sayıların kullanılmasının çözümü daha hassas elde edileceği düşünülmüştür ve bulanık PROMETHEE çözümü yapılmıştır. Çalışmada Li (1999) tarafından önerilen beş dilsel değişkenin benimsendiği üçgensel bulanık sayı karşılıkları kullanılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Dilsel ifadelerle karşılık gelen bulanık sayılar ve 5 noktalı ölçek (Linguistic expressions and corresponding fuzzy numbers and 5 point scale) [32].

Dilsel ifadeler	Bulanık sayı karşılığı	5 noktalı ölçek
Çok Kötü	(0;0;0,25)	1
Kötü	(0;0,25;0,50)	2
Orta	(0,25;0,50;0,75)	3
İyi	(0,50; 0,75;1,00)	4
Çok İyi	(0,75;1,00;1,00)	5

Çizelge 5. Alternatiflerin karar vericilere göre 5 noktalı ölçek ile puanları (Scores of alternatives with 5-point scale according to decision makers)

Alternatif	Karar Verici	Çevresel Etkisi	İşletme Riski	Kurulum Maliyeti	Çıkan Ürün Çeşitliliği	Türkiye’de Uygulanabilirlik	İşletme Maliyeti
Geri Dönüşüm	k1	5	3	2	4	5	5
	k2	5	3	3	5	4	5
	k3	5	3	4	5	5	4
	k4	4	4	3	4	4	4
	Ortalama	4,75	3,25	3	4,5	4,5	4,5
Piroliz	k1	3	2	1	5	2	4
	k2	4	1	2	5	2	4
	k3	3	1	2	5	2	3
	k4	1	2	1	4	2	2
	Ortalama	2,75	1,5	1,5	4,75	2	3,25
Alternatif yakıt	k1	3	3	5	3	3	5
	k2	3	2	5	3	5	5
	k3	2	2	5	2	4	5
	k4	2	3	3	1	4	3
	Ortalama	2,5	2,5	4,5	2,25	4	4,5

PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlemesi Visual PROMETHEE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PROMETHEE çözümü için karar vericilerin dilsel ifadeleri 5 noktalı ölçeğe göre puanlanıp, her kriter için ortalamaları alınmıştır ve bu şekilde veri girişi yapılmıştır. Bulanık PROMETHEE çözümlemesi için ise karar vericilerin dilsel ifadeleri bulanık sayılarla ifade edilerek kriter bazında ortalamaları alınıp durulaştırma işlemi yapılmıştır. (a,b,c) olarak ifade edilen üçgensel bir bulanık sayının durulaştırma işlemi denklem 8’e göre yapılmıştır [33].

$$D = \frac{a+7b+c}{12} \quad (8)$$

Burada D durulaştırılmış değeri ifade etmektedir.

PROMETHEE çözümlemesi için 5 noktalı puanlamayla oluşturulan karar vericilerin cevaplarının ortalamalı Çizelge 5’deki gibidir.

Çalışmadaki karar vericilerin alternatifleri kriter bazında değerlendirmeleri sonucunda oluşturulan bulanık sayılar, bu sayıların ortalamaları ve durulaştırılmış değerleri ise Çizelge 6’da gösterilmiştir. Çizelgelerdeki k1,k2,k3,k4 4 adet karar vericiyi, D ise durulaştırılmış değerleri ifade etmektedir. Alternatiflerin kriterlere göre puanını temsil eden bu değerler ile PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlemeleri Visual PROMETHEE yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümleme yapılırken her kriterin önem derecesi aynı olarak kabul edilmiş ve her kriter derecesi maximum olacak biçimde ayarlanmıştır. Ayrıca tercih fonksiyonu olarak, tercihin bir kriter açısından ortalamanın üstünde değere sahip alternatiflerden yana kullanılmak istendiği, ancak bu değer altındaki değerlerin de ihmal edilmek istenmediği tercih fonksiyonu olan üçüncü tip (V tipi) tercih fonksiyonu seçilmiştir.

Çizelge 6. Karar vericilerin değerlendirmelerine karşılık gelen bulanık sayılar, ortalamaları ve durulaştırılmış halleri (Fuzzy numbers, averages and clarified states corresponding to decision-makers' evaluations)

		Çevresel Etki			İşletme Riski			Kurulum Maliyeti			Çıkan Ürün Çeşitliliği			Türkiye'de Uygulanabilirlik			İşletme Maliyeti		
Geri Dönüşüm	k1	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0	0,25	0,05	0,5	0,75	1	0,75	1	1	0,75	1	1
	k2	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,5	0,75	1	0,75	1	1
	k3	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	1	0,75	1	1	0,75	1	1	0,5	0,75	1
	k4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
	Ort.	0,68	0,94	1	0,31	0,56	0,81	0,25	0,5	0,64	0,625	0,88	1	0,63	0,88	1	0,63	0,88	1
	DF	0,6875			0,4218			0,3656			0,6458			0,6458			0,6458		
Piroliz	k1	0,25	0,5	0,8	0	0,25	0,05	0	0	0,25	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,5	0,75	1
	k2	0,5	0,75	1	0	0	0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,1	0,5	0,75	1
	k3	0,25	0,5	0,8	0,5	0,75	1	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,25	0,5	0,75
	k4	0	0	0,3	0	0,25	0,05	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0	0,25	0,5	0	0,25	0,5
	Ort.	0,25	0,44	0,7	0,125	0,31	0,34	0	0,125	0,38	0,688	0,94	1	0	0,25	0,4	0,31	0,56	0,81
	DF	0,3333			0,2208			0,1041			0,6875			0,1781			0,4218		
Alternatif Yakıt	k1	0,25	0,5	0,8	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,8	0,75	1	1
	k2	0,25	0,5	0,8	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,75	1	1
	k3	0	0,25	0,5	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,5	0,75	1	0,75	1	1
	k4	0	0,25	0,5	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75
	Ort.	0,125	0,38	0,6	0,125	0,38	0,63	0,63	0,875	0,94	0,125	0,31	0,56 2	0,5	0,75	0,9	0,63	0,88	0,94
	DF	0,2812			0,2812			0,6406			0,2395			0,5572			0,6406		

5. BULGULAR (RESULTS)

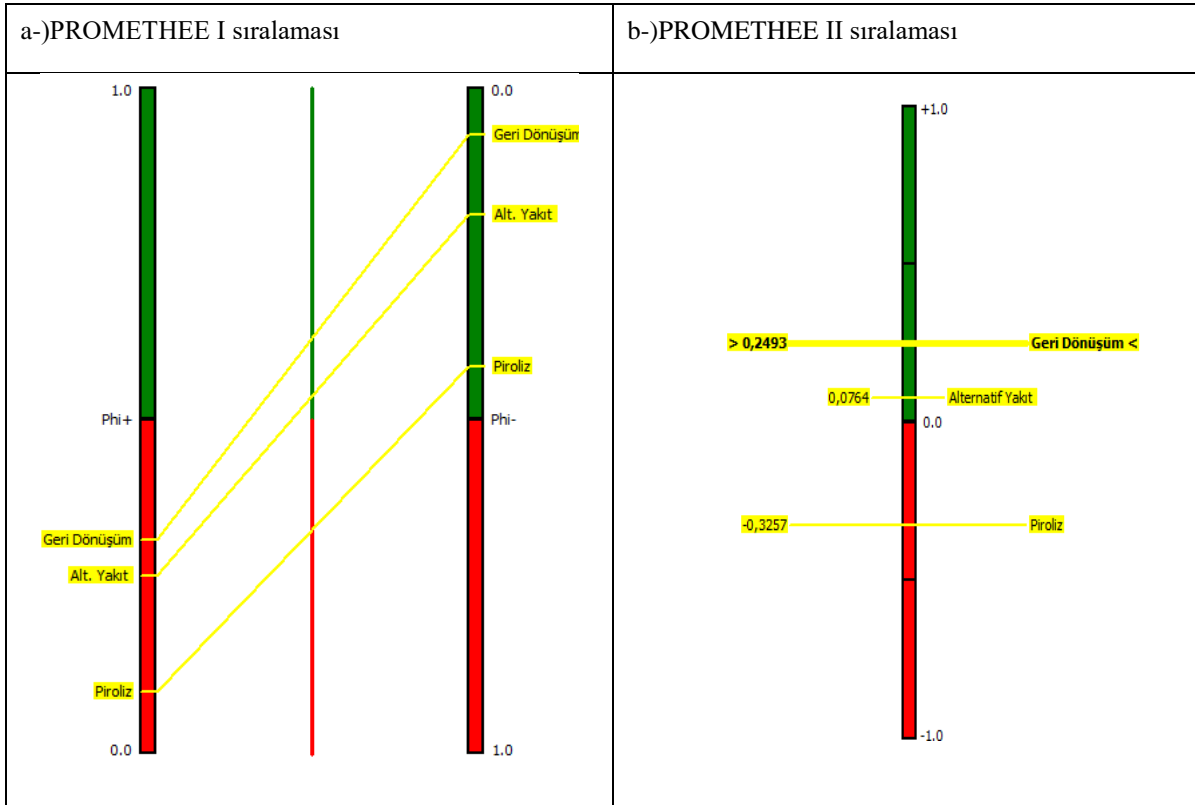
5.1. PROMETHEE I Kısmi Sıralama ve PROMETHEE II Net Sıralama (PROMETHEE I (Partial Sorting) and PROMETHEE II Net Sorting)

PROMETHEE I kısmi sıralaması yapılırken her bir alternatif için +1 ile -1 arasında, pozitif ve negatif akımlar hesaplanmaktadır. Pozitif akımlar bir alternatifin diğerlerine olan üstünlüğünü gösterir. PROMETHEE II'de, ise pozitif ve negatif akımların farkı ile ortaya çıkan net akımlar ile daha net bir sıralama elde edilir. PROMETHEE II'de 0 ile +1 arasında yer alan alternatifler sıralamada daha önlerde yer alacak alternatiflerdir.

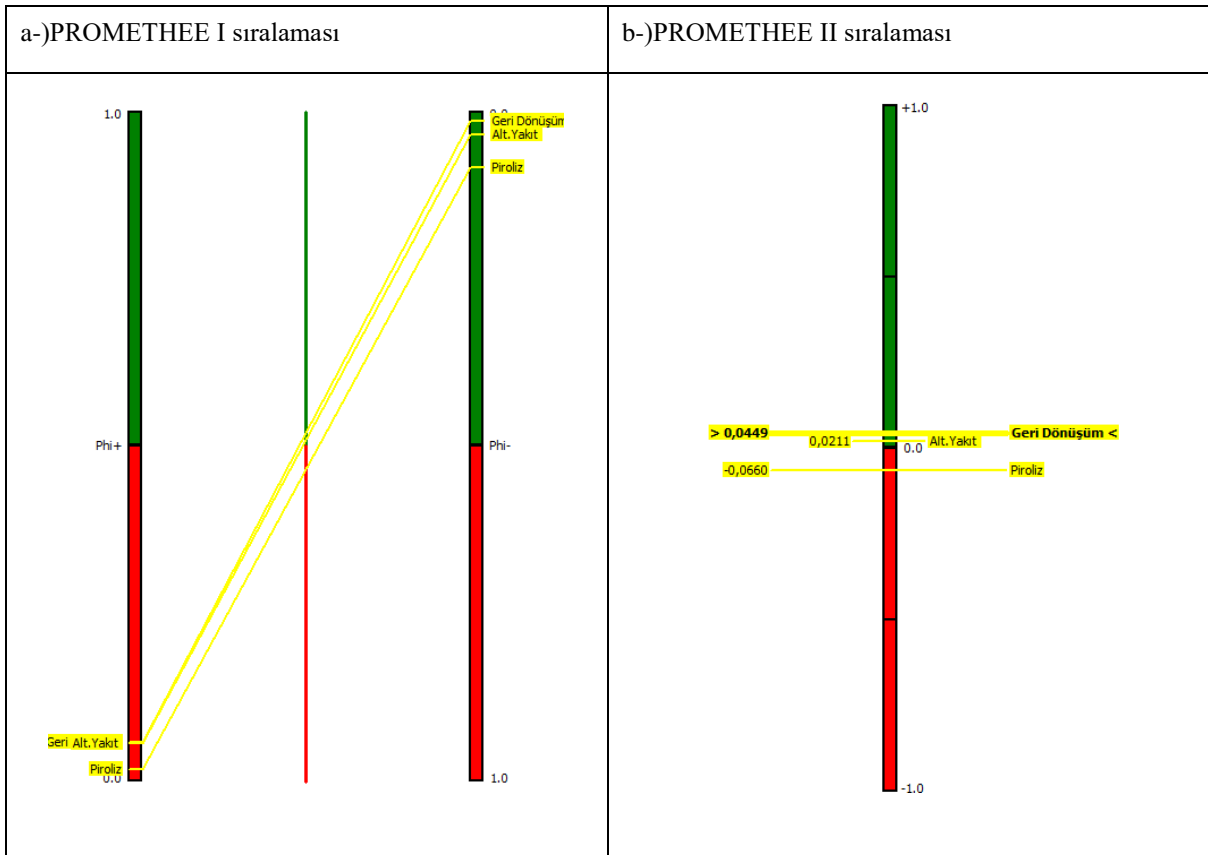
5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE I ve II sıralamaları Şekil 1'de, bulanık sayılar ile gerçekleştirilen bulanık PROMETHEE I ve II sıralamaları ise Şekil 2'de verilmiştir. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE analiz sonuçlarında pozitif akımlara bakıldığında en iyi alternatifler geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatiflerinin olduğu belirlenmiştir. Bu iki alternatif her iki çözümlemeye de

birbirine yakın değerler almıştır. Piroliz alternatifi ise diğer alternatiflere göre daha düşük pozitif akım değeri almıştır. PROMETHEE I sıralamasında negatif akımlar alternatifi diğer alternatifler tarafından nasıl bastırıldığını ve ne ölçüde zayıf kaldığını göstermektedir. Bir alternatifi negatif akım değeri ne kadar küçük ise o kadar tercih edilebilir. Şekil 1 ve 2'ye bakıldığında geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatifleri 0'a daha yakın değerler almıştır. Geri dönüşüm alternatifi negatif akımlarda alternatif yakıttan daha tercih edilebilir olmuştur. Piroliz alternatifi ise 1'e daha yakın akım değeri olarak negatif akımlara göre de en az tercih edilen alternatif olmuştur. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE analizlerinde alternatiflerin sıralaması değişmemiş ancak bulanık PROMETHEE analizi ile daha hassas analiz sonuçlarının elde edilebileceği net skor akım değerlerine bakılarak söylenebilir.

PROMETHEE I ve II analizi ile alternatiflerin net sıralaması Geri dönüşüm - Alternatif yakıt olarak kullanım - Piroliz şeklinde olmuştur.



Şekil 1. 5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE analizinde PROMETHEE I kısmi ve PROMETHEE II net sıralaması (PROMETHEE I partial and PROMETHEE II net ranking in PROMETHEE analysis performed with 5-point scaling)



Şekil 2. Bulanık PROMETHEE analizinde PROMETHEE I kısmi ve PROMETHEE II net sıralaması (PROMETHEE I partial and PROMETHEE II net ranking with fuzzy PROMETHEE analysis)

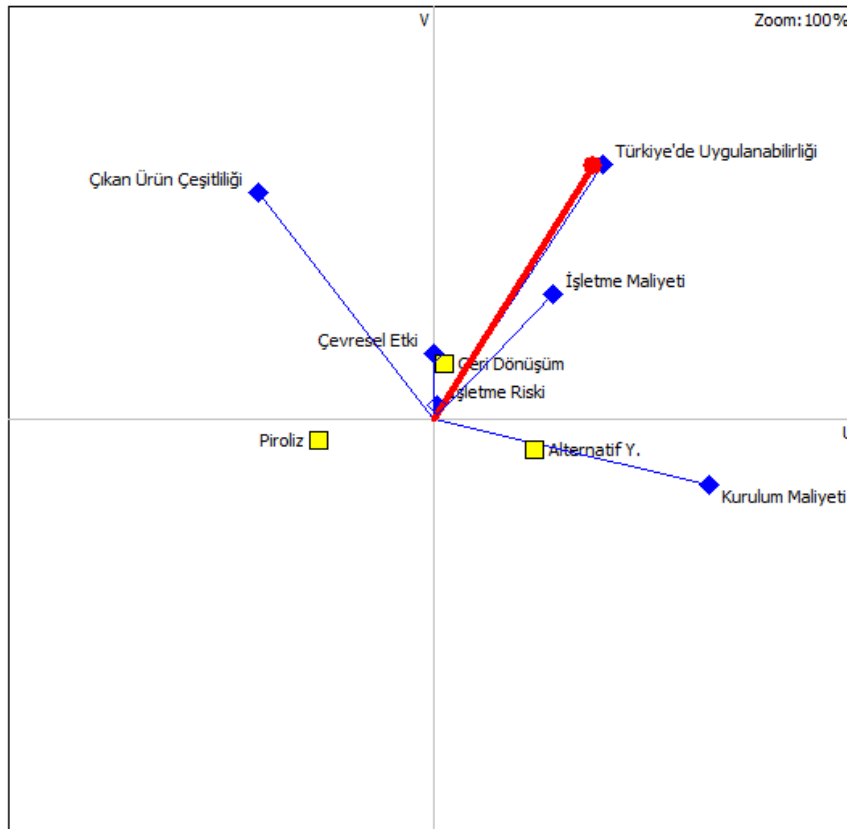
5.2. GAIA Görsel Analizi (GAIA Visual Analysis)

GAIA düzlemi, PROMETHEE sonuçlarının bir uzantısı olarak görsel ve etkileşimli bir prosedürle gösterimini ifade eder [29]. GAIA düzlemi üzerinde alternatifler nokta, kriterler de vektör olarak gösterilmektedir. Ayrıca kırmızı vektör ile gösterilen karar çizgisi karar vericiye en uygun alternatifleri işaret etmektedir. Bu çizgiye yakın olan alternatifler kabul edilebilirdir. Kriterlere yakın olan alternatifler, ele alınan kriter için öncelikli olarak tercih edilmesi gereken alternatifleri belirtmektedir. Bu çalışmada GAIA düzlemi bulanık PROMETHEE analizi için gerçekleştirilerek Şekil 3'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi optimum karar yönünde geri dönüşüm alternatifini yer almaktadır ve bu durum PROMETHEE II'nin sıralama sonuçları ile uyumludur. Çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye'de uygulanabilirlik ve kurulum maliyeti kriterlerini gösteren vektörler uzun olduğu için, bu kriterlerin alternatifin belirlenmesinde ayrıştırıcı özelliği olduğunu ve karar çubuğunu etkilemedeki öneminin fazla olduğunu göstermektedir. Eğer kriterlerin ayrıştırma gücü az ise kriter vektör uzunluğu kısa olacaktır. Aynı istikameti gösteren vektörler benzer özellik gösteren kriterlere aittir. Farklı istikameti gösteren kriter çubukları ise birbiri ile çelişen kriterlere aittir [30]. GAIA görsel analizinde tam sıralamada alternatifler arasından öne çıkan geri dönüşüm alternatifini çevresel etki, işletme riski ve işletme maliyeti kriterlerinin tercihlerine daha yakın olurken diğer kriterlere uzak kalmıştır. Diğer alternatifler ile

karşılaştırıldığında en iyi tercih geri dönüşüm uygulaması olmuştur. Piroлиз ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatifleri ise tercih edilmeyen alternatifler olmuştur.

5.3. PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow)

Bu analiz yönteminde, her bir alternatif çubuk grafik olarak gösterilmektedir. Her dilim, bir kriterin katkısı (akış değeri kriterin ağırlığının çarpımı) ile alternatifin Phi net akış değerine orantılıdır. Olumlu dilimler yukarı doğru gözüktür ve olumlu özelliklere karşılık gelir. Negatif dilimler ise aşağı doğru gözüktür ve olumsuz noktaları ifade eder [34]. PROMETHEE Rainbow analizi 5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE ve bulanık sayılarla gerçekleştirilen bulanık PROMETHEE analizleri için sırasıyla Şekil 4 ve 5 'te sunulmuştur. Analizde alternatiflerden pozitif kriteri fazla olan daha tercih edilebilir alternatifini ifade etmektedir. 5 noktalı ölçek ile gerçekleştirilen PROMETHEE analizine göre Şekil 4'de görüldüğü gibi geri dönüşüm alternatifini için hiçbir kriter negatif kısımda kalmamıştır. Alternatif yakıt alternatifini için ise çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri bu alternatifin seçiminde negatif etki göstermiştir. Piroлиз alternatifini için ise çıkan ürün çeşitliliği kriteri dışındaki bütün kriterler bu seçim için negatif etki göstermiştir. Şekil 5' de verilen ve bulanık PROMETHEE çözümlemesi ile elde edilen PROMETHEE Rainbow analizinde çıkan sonuçlara göre ise geri dönüşüm alternatifinin seçimine kurulum



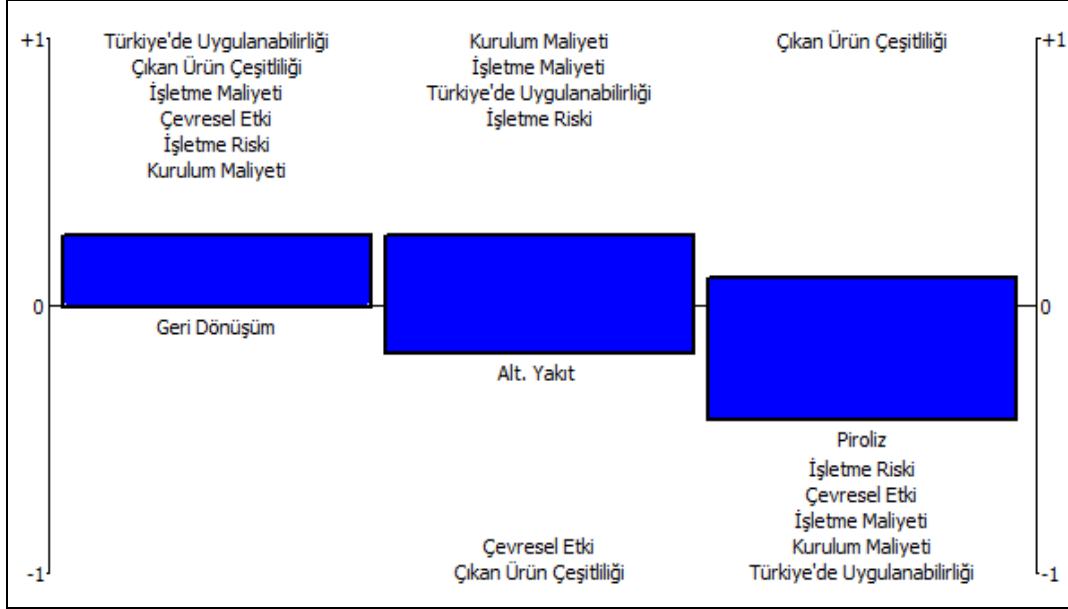
Şekil 3. Bulanık PROMETHEE analizinde GAIA düzlemi (GAIA plane in fuzzy PROMETHEE analysis)

maliyeti dışında ki tüm kriterler pozitif etki etmiştir: Her bir alternatifin pozitif yönde kalan kriterleri dikkate alındığında alternatiflerin tercih edilebilir sıralamalarının geri dönüşüm> alternatif yakıt olarak kullanma>piroliz şeklinde olduğu ortaya çıkmaktadır.

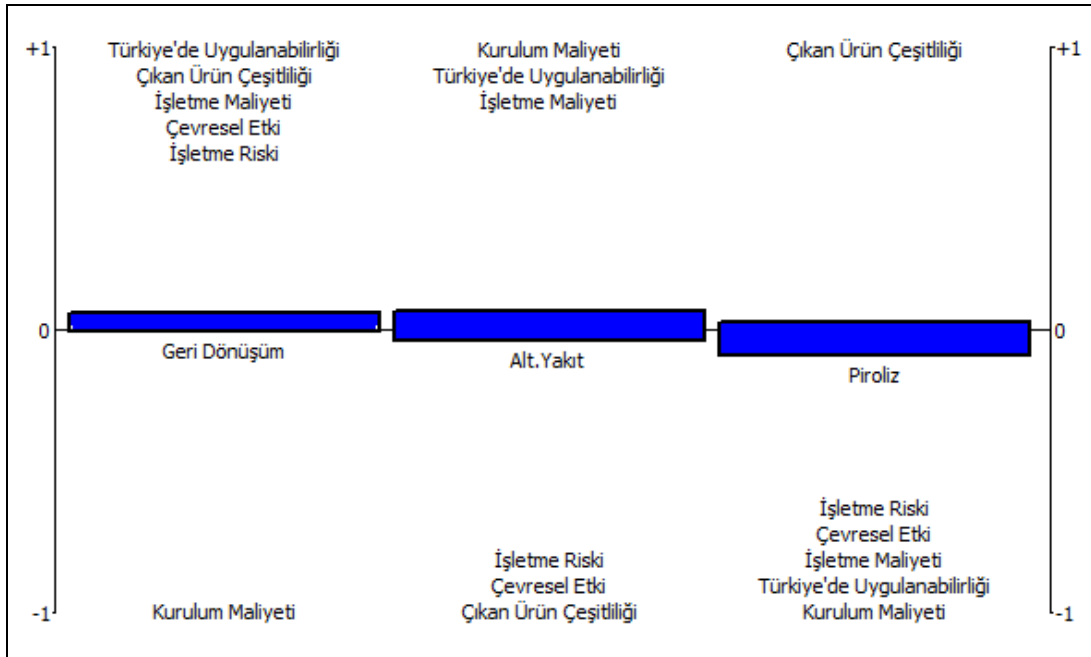
alternatifinde işletme riski kriterinin de negatif yönde etki ettiği görülmüştür.

5.4. GAIA Web Analizi (GAIA Web Analysis)

Bulanık PROMETHEE analizinin klasik PROMETHEE'ye kıyasla daha hassas sonuçlar verdiği



Şekil 4. 5 noktalı ölçek ile değerlendirilen PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow evaluated with 5-point scale)



Şekil 5. Bulanık sayılarla değerlendirilen PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow evaluated with fuzzy numbers)

PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yaklaşımlarının PROMETHEE Rainbow analizlerine bakıldığında birbirinden farklı olarak geri dönüşüm alternatifinin bulanık çözümlemesinde negatif etki eden kriterin kurulum maliyeti olduğu görülmüştür. Ayrıca bulanık çözümleme ile alternatif yakıt olarak kullanım

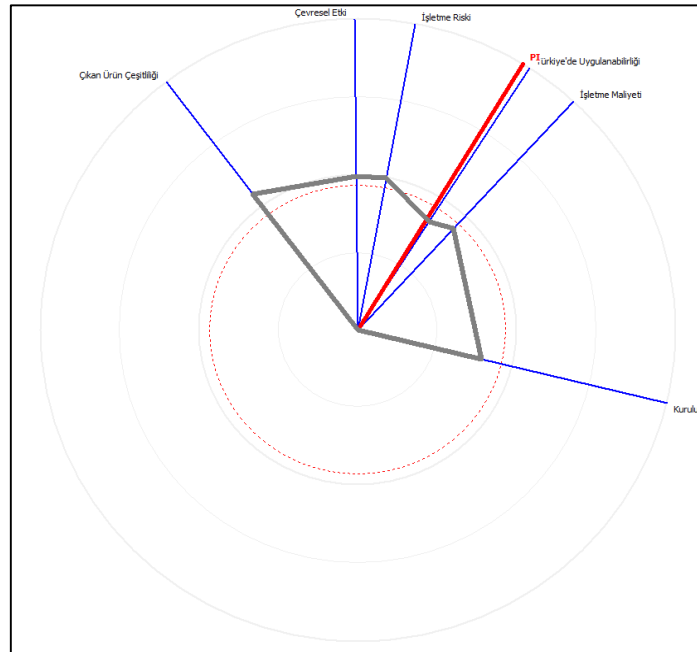
düşünüldüğünden, bulanık PROMETHEE çözümlemesi ayrıca GAIA web analizi ile de değerlendirilmiştir. Bu analiz örümcek ağı görünümünde bir analiz metodu olup, kriterler ekranın merkezinde eşit aralıklarla yerleştirilmektedir. GAIA Web'de ölçüt eksenleri GAIA düzlemindeki gibidir. Her bir boyut için radyal mesafe,

net akım değerine karşılık gelmektedir (merkezde -1, dıştaki daire üzerinde +1). "Yuvarlanmış" seçeneği eksenler arasında çizilen düz çizgileri eğrilerle değiştirerek daha pürüzsüz ve daha tutarlı bir şekil kazandırır. Tüm kriterlerin eşit puanlara sahip olduğu bir alternatif, çokgen yerine bir daire olarak gösterilmektedir. "Karar Eksenini" seçeneği Karar Ekseninin konumunu ve eylemlerin çok kriterli net akış skoruna karşılık gelen noktaları göstermektedir

(akım pozitifse yeşil, negatif ise kırmızı) [34]. GAIA Web analizinde geri dönüşüm ve piroliz alternatifleri karşılaştırılmıştır ve sonuçları Şekil 5 ve 6 da verildiği gibidir. Geri dönüşüm için tüm kriterler merkez çizgisinde olduğu ve pozitif olduğu için yeşil renk aldığı görülmektedir. Piroliz alternatiflerinin GAIA Web analizi olumsuz bir sonuç vermekte olup bu sebeple kırmızı renk almaktadır



Şekil 6. Geri dönüşüm alternatifinin GAIA Web analizi (GAIA Web analysis of recycling alternative)



Şekil 7. Piroliz alternatifinin GAIA Web analizi (GAIA Web analysis of pyrolysis alternative)

6. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Ömrünü tamamlamış lastik miktarının artması, deponi alanlarında depolanamaması ve geri dönüşüm sektöründe önemli bir hammadde ve enerji kaynağı olarak düşünülmesi, bu atıklara ekonomik, sosyal ve çevresel bir yönetim anlayışının getirilmesini gerekli kılmıştır. Bu çalışmada ÖTL yönetiminde uygulanan geri dönüşüm, alternatif yakıt olarak kullanma ve piroliz alternatifleri ele alınarak, PROMETHEE yöntemi ile ülkemiz için uygun olabilecek alternatif yöntem belirlenmiştir. Yöntemin belirlenmesinde çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye’de uygulanabilirliği ve işletme maliyeti kriterleri dikkate alınmıştır. Karar vericilerin her bir alternatif için kriterler dahilinde verdikleri yanıtlar bulanık hale getirilip ortalamaları alınarak durulaştırılmıştır. Visual PROMETHEE programı ile çözümlene sonrası aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

-PROMETHEE I analizinde hem PROMETHEE hem de bulanık PROMETHEE çözümlemesinde pozitif akımlar ile geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatiflerinin pozitif üstünlük gösterdikleri, negatif akım skalasında ise geri dönüşüm prosesinin diğer iki alternatiften uzaklaşarak daha tercih edilebilir olduğu görülmüştür.

-PROMETHEE II analizi ile geri dönüşüm alternatifinin diğer alternatiflerden çok daha fazla tercih edilebilir olduğu görülmüştür. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE ile alternatiflerin PROMETHEE I kısmı ve PROMETHEE II net sıralamaları aynı olduğu belirlenmiştir. Ancak bulanık PROMETHEE ile gerçekleştirilen analizlerde alternatif sıralamalarının birbirine çok daha yakın olduğu görülmektedir.

*Bulanık PROMETHEE ile gerçekleştirilen GAIA analizinden en uygun alternatif olan geri dönüşüm alternatifinin seçilmesinde en çok “Türkiye’de uygulanabilirlik” kriterinin etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

*PROMETHEE Rainbow analizi ile alternatif seçimlerinin hangi kriterler ile tercih edilebilir (pozitif yönde etki) hangi kriterler ile tercih edilemez (negatif yönde etki) durumunda oldukları belirlenmiştir. PROMETHEE ile elde edilen sonuçlara göre geri dönüşüm alternatifini hiçbir kriter negatif yönde etkilememiştir. Alternatif yakıt olarak kullanım alternatifini için ise çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri negatif etki göstermiştir. Piroliz alternatifi için ise çıkan ürün çeşitliliği kriteri dışındaki bütün kriterler bu seçim için negatif etki göstermiştir. Bulanık PROMETHEE ile ise farklı olarak en uygun alternatif olan geri dönüşüm prosesinin seçilmesinde kurulum maliyetinin negatif yönde etki ettiği, diğer kriterlerin tümünün seçim işlemini pozitif yönde etkilediği belirlenmiştir. Alternatif yakıt olarak kullanım alternatifinin seçimini işletme riski, çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri negatif yönde etkilerken, kurulum ve işletme maliyeti ile Türkiye’de uygulanabilirlik kriterleri pozitif yönde etkilemiştir.

Piroliz yönteminin seçimini ise sadece çıkan ürün çeşitliliği kriteri pozitif yönde etkilemiş ve diğer tüm kriterler negatif yönde etki etmiştir.

*GAIA Web analizinde geri dönüşüm prosesinin uygun olduğunu destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak ÖTL yönetiminde belirlenen kriterler dahilinde her kriterin eşit ağırlıkta değerlendirildiği varsayıldığında geri dönüşüm işleminin tercih edilmesinin doğru olacağı belirlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Herrera-Sosa E.S, Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C., Cruz-Zaragoza E., Ureña-Núñez F. “Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete”. *International Journal of Polymer Science*, (2015):8, (2015).
- [2] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin (ÖTL) Kontrolü Yönetmeliği. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editor/dosya/OmrTamLastKontYonSonHali2.docx>. Yayın tarihi: 25 Kasım 2006. Erişim tarihi: 15 Mayıs 2019.
- [3] Symeonides D., Loizia P., Zorpas A.A. “Tire waste management system in cyprus in the framework of circular economy strategy”. *Environmental Science and Pollution Research*, (1):1-16, (2019).
- [4] Shalaby A., Khan R.A. “Design of unsurfaced roads constructed with large-size Shredded Rubber Tires: A Case Study”. *Resources, Conservation and Recycling*, (44): 318-332, (2015).
- [5] Yakaboylu O. “Atık lastik yönetimi ve atık lastik prolizi model tesisi için yapılabirlik çalışması”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [6] The Council of the European Union, Council Directive on The Landfill of Waste 1999/31/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:31999L0031>. Yayınlanma tarihi: 26 Nisan 1999. Erişim tarihi: 18 Mayıs 2019.
- [7] Karabörk F., Akdemir A. “Atık taşı lastiklerinin devulkanizasyonla geri kazanımı”. *Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (3):21-35, (2011).
- [8] Eryılmaz H., Demirarslan K.O. “Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) sınıflandırılarak geri dönüşümünün araştırılması”. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 2(1): 50-56, (2019).
- [9] Karabörk F., Akdemir A. “Atık taşı lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (29): 29-40, (2012).
- [10] Lasder Lastik Sanayicileri Derneği. <http://www.lasder.org.tr/>(Erişim Tarihi: 15.05.2019).

- [11] Abbaspour M., Aflaki E., Nejad F.M. "Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement". *Journal of Cleaner Production*, (207): 1059-1071, (2019).
- [12] Anonim. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/hurda-178-bin-133-ton-lastik-geri-kazandirildi/1410346>. Yayınlanma Tarihi: 06 Mayıs 2019. Erişim Tarihi: 5 Eylül 2019.
- [13] Zhang X., Li H., Cao Q., Jin L., Wang F. "Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black". *Waste Management & Research*, (36): 436-444, (2018).
- [14] Evans A., Evans R. "The composition of a tyre: typical components. *The Waste & Resources Action Programme*. UK, (2006).
- [15] UNEP, Basel Convention, Revised Technical Guidelines on Environmentally Sound Management of Used Tires. <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-OEWG-6-INF-6.English.pdf>. Yayınlanma tarihi: 3 Haziran 2007. Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2019. Bazel, İsviçre.
- [16] Adhikari B., De D., Maiti S. "Reclamation and recycling of waste rubber". *Progress in Polymer Science*, (25): 909-948, (2000)
- [17] Karabörk F. "Atık araç tekerlek lastiklerinde mikrodalga devulkanizasyon parametrelerinin lastiğin mekanik özelliklerine etkileri. *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [18] Czajczyńska D., Krzyżyńska R., Jouhara H., Spencer N. "Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: a review". *Energy*, (134):1121-1131, (2017).
- [19] Smelik R., Vilamová Š., Chuchrová K., Kozel R., Király A., Levit A., Gajda J. "complex processing of rubber waste through energy recovery". *Acta Montanistica Slovaca*, (20): 290-297, (2015).
- [20] Tsai W.T., Chen C.C., Lin Y.Q., Hsiao C.F., Tsai C.H., Hsieh M.H. "status of waste tires' recycling for material and energy resources in taiwan". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, (19): 1288-1294, 2017.
- [21] Anonim. Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği. <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.12290&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=at%20C4%20B1k%20ya%20C4%20Flar>. Yayınlanma Tarihi: 21 Ocak 2004. Erişim Tarihi: 22 Mayıs 2019.
- [22] Derakhshan Z., Ghaneiana T.M., Mahvib H.A., Contid O.G., Faramarziane M., Dehghanif M., Ferranted M. "A new recycling technique for the waste tires reuse". *Environmental Research*, (158): 462-469,(2017).
- [23] Rowhani A., Rainey T., "Scrap tyre management pathways and their use as a fuel—a review". *Energies*, (9): 888, (2016).
- [24] Migas, P., Baron J. "Emission parameters on the example of burning rubber waste, coal and biomass". *Przemysł Chemiczny*, (97): 629-632, (2018).
- [25] Conesa J.A., Font R., Fullana A., Martín-Gullón I., Aracil I., Gálvez A., Moltó J., Gómez-Rico M.F. "Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, (84): 95-102, (2009).
- [26] Gul M., Celik E., Taskin Gumus A., Guneri A.F. "A fuzzy logic based promethee method for material selection problems". *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, (7): 68-79, (2018).
- [27] Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. "How to select and how to rank projects: the promethee method". *European Journal of Operational Research*, (24): 228-238, 1986.
- [28] Tuzkaya G., Gülsün B., Kahraman C., Özgen D. "An Integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application". *Expert Systems with Applications*, (37): 2853-2863, (2010).
- [29] Behzadian M., Kazemzadeh R.B., Albadvi A., Aghdasi M. "PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications". *European Journal of Operational Research*, (200):198-215, (2010).
- [30] Genç T. "PROMETHEE yöntemi ve GAIA düzlemi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (15): 133-154, (2013)
- [31] Şenkayas H., Hekimoğlu H. "Çok kriterli tedarikçi seçimi problemine promethee yöntemi uygulaması". *Verimlilik Dergisi*, (2): 63-80,(2013)
- [32] Li R.J. "Fuzzy method in group decision making". *Computers & Mathematics with Applications*, (38): 91-101, 1999.
- [33] Elizabeth S., Sujatha L. "Project scheduling method using triangular intuitionistic fuzzy numbers and triangular fuzzy numbers". *Applied Mathematical Sciences*, (9): 185-198, (2015).
- [34] Güney, C. "Visual PROMETHEE ile yatırımcılar açısından sektörlerin değerlendirilmesi". *TURAN-SAM Uluslararası Bilimsel Hakemli Dergisi*, (9): 1308-8041, (2017).