

# BİLGİSAYARLI GÖRÜ TEKNİKLERİ KULLANILARAK ULAŞILABİLİR VE OTOMATİZE GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

B. Akdemir\*, S. E. Yüksel

Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, 06800 Ankara, Türkiye - (burakakdemir, eyuksel)@ee.hacettepe.edu.tr

**ANAHTAR KELİMELER:** Geri Dönüşüm, Makine Öğrenmesi, Termal Görüntüleme, Sınıflandırma, Bilgisayarlı Görü

## ÖZET:

Artan nüfus ve kontrolsüz şehirleşmenin etkisi ile insanoğlunun doğaya verdiği zarar gün geçtikçe daha vahim bir hal almaktadır. Bu yıkıcı etkide pay sahibi olan en büyük faktörlerden biri çöp sorunudur. Örneğin 2016 yılında insanlar tarafından yaklaşık 2.000.000.000.000 kg katı atık üretilmiştir. Bu problemin üstesinden gelmek için en önemli çözümlerden birinin geri dönüşüm olmasına rağmen, önerilen çözümler yeterince otomatize ve ulaşılabilir değildir. Kullanılan çözümler çoğunlukla insan gücü ve emeği temeline dayanmakta, hem maddi hem de iş gücü bakımından iyileştirmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu aşamadaki en büyük sorun materyallerin türlerine göre sınıflandırılmasıdır. Bilgisayarlı görü ve makine öğrenmesi alanlarındaki ilerlemeler sayesinde bu soruna hem daha teknolojik hem daha ulaşılabilir hem de insan hatasının en aza indirildiği çözümler üretmek mümkündür. Bu çalışmamızda, pahalı çöp ayrıştırma sistemlerine alternatif olarak, termal kamera ve yeni nesil bilgisayarlı görü yöntemleri kullanarak, materyalin cinsine göre renginden ve deseninden bağımsız olarak sınıflandırma yapan bir çerçeve sunulmuştur. Önerilen yöntemde materyal önce ışık kaynağı ile ısıtılmış, daha sonra aktif soğutmaya bırakılmış ve termal kamera ile gözlemlenmiştir. Termal kameradan alınan veri görüntü işleme teknikleri ile zenginleştirildikten sonra ayırt edici öznelikleri bulunmuş, güncel makine öğrenme teknikleri değerlendirilmiş ve maddenin sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sayede hem ulaşılabilir hem de otomatize bir sistem elde edilmesi, insan gücü ve maliyetten tasarruf edilmesi hedeflenmiştir. Sistemimizin başarısı kendi oluşturduğumuz veri kümesi üzerinden hesaplanmış ve sunulmuştur.

## ACCESSIBLE AND AUTOMATIZED RECYCLING SYSTEM USING COMPUTER VISION TECHNIQUES

**KEY WORDS:** Recycling, Machine Learning, Thermal Imaging, Classification, Computer Vision

## ABSTRACT:

With the increasing population and the effect of uncontrolled urbanization, the damage caused by humanity to nature is getting worse. One of the biggest factors that contribute to this destructive effect is the solid waste problem. Although the most important solution to overcome this problem is recycling, the proposed solutions are not sufficiently automated nor are they accessible. For instance, in 2016, approximately 2,000,000,000,000 kg of solid waste was produced by humans. Even though, recycling is the best remedy for that problem, the proposed solutions are neither automatized nor accessible enough. They usually rely on human effort and require improvement in terms of work force and cost. In the recycling stage, hardest task is classifying the materials according to their type. With recent progress in computer vision, it is possible to come up with a more reachable, technologically advanced solution which also minimizes the human error. In this study, we propose a framework that is an alternative to expensive solid waste classification approaches. In the proposed method, a thermal camera and new generation computer vision techniques are used to classify the material regardless of its colour and texture. Material to be classified is heated using a light source, then left for cooling while it is being observed by thermal camera. Images obtained from thermal camera are enhanced using image processing techniques, and their descriptive features are extracted. Then, these features are evaluated and the material is classified. In this way, it is aimed to achieve an automated accessible system, which would both save manpower and be financially economical. The success of our system is calculated and presented on a data set we collected in our lab.

## 1. GİRİŞ

Yaşadığımız çağda hızla artan nüfus ve tüketim çılgınlığı, katı atık sorununun giderek daha da ciddi bir hal almasına neden olmaktadır. (Minegaité, Liobikiené, 2019). Doğal kaynaklar üretim için kullanılmakta, hızla tüketilmekte ve son olarak da atılmaktadır. Ekonomik büyüme ve hayat standartlarındaki artış da bu duruma destek olmaktadır (Grazhdani, 2016). Doğru

yönetilemediği takdirde katı atık sorunu başta insan sağlığı olmak üzere ekosistem, biyolojik çeşitlilik gibi birçok değere olumsuz etki etmektedir (Mohammadi et al., 2019). Belirtilen sebepler katı atık yönetimini her zamankinden daha kritik bir hale getirmiştir (Stoeva, Alriksson, 2017).

Katı atık yönetimi beş ana kısımdan oluşmaktadır. İlk adım katı atıkların üretiminin engellenmesidir. Buna örnek olarak

ATM'lerden işlem makbuzu almamak gösterilebilir. İkinci adım ise tekrar kullanmaktır. Örnek olarak tek kullanımlık poşet yerine bir fileyi birden fazla kez kullanmak verilebilir. Üçüncü aşama ise geri dönüşümdür. Kağıt, cam veya plastik şişeler bu aşamada en önemli olanlardır. Dördüncü aşama ise atıklardan enerji elde ederek enerjinin geri kazanılmasıdır. Katı atıklar yakılarak enerjinin geri dönüşü sağlanabilir. Son adım ise atıkların yok edilmesi gelir. Örneğin gömülmesi.

Katı atık yönetimi halkalarının en önemlilerinden biri katı atıkların geri dönüştürülmesidir. Bu kısımda her madde türüne göre farklı işlem göreceği için katı atıkların türlerinin tanımlanması ve atıkların sınıflandırılması kaçınılmazdır (Till et al., 2018). Bu işlemi icra etmek için bir çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin en yaygın olarak kullanılanı katı atıkların boyutlarına göre ayrılmasını hedefleyen eleme tanburu yöntemidir (Size separation of particulates in a trommel screen system, 2010). Adından da anlaşılacağı gibi bu yöntemde büyük bir tanbur kullanılır. Üzerinde açıklıklar olan bu tanbur sürekli döndürülür. İçerisine giren materyallerden ebatları açıklıktan büyük olanların içeride kalması sağlanır. Bu şekilde ayırma işlemi gerçekleştirilir (Ashkiki et al., 2019). Diğer bir yöntem ise hava akımını kullanarak yapılan ayırma yöntemidir. Bu ayırma yönteminde, katı atıklara hava akımı uygulanır. Kağıt, karton gibi özkütlesi düşük maddeler hava akımı ile hareketlenir ve metal, beton gibi özkütlesi yüksek materyallerden ayrılır (Sun et al., 2019). Manyetik ayırma katı atıkları ayırmak için kullanılan bir diğer yöntemdir. Adından da anlaşılacağı üzere bu yöntemde kuvvetli bir manyetik alan oluşturulur. Demir, çelik gibi ferromanyetik maddeler bu alan içerisine girdiğinde kuvvete maruz kalacakları için plastik, kağıt gibi ferromagnetik olmayan maddelerden ayrılırlar. Bu yöntem özellikle bakır gibi yarı kıymetli materyallerin ayrılmasında kullanılır (Hammerski et al., 2019). Bu yöntemde benzer bir diğer yöntemde ise elektrostatik yükler kullanılır. Bu sayede iletken maddelerin iletken olmayanlardan ayrıştırılması sağlanır (Touhami et al., 2019).

Anlatılan tekniklere ek olarak, termal kamera yardımı ile katı atık ayırma işlemi yapan otomatize bir sistem bulunmamaktadır (Gundupalli et al., 2017b). Termal kameraların katı atık ayırma sistemlerinde kullanımı hakkında çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada ayrıştırılacak maddeler karanlık ve sıcaklığı sabit ortamda tutulmuş, termal kamera ile gözlemlenmiştir. Aynı sıcaklıktaki farklı maddelerin farklı yayılım katsayıları olacağı için yayılım katsayısı kullanılarak ayırma işlemi yapılmıştır (Gundupalli et al., 2017a).

Bu bildiride yukarıda bahsi geçen yöntemlere alternatif olarak, termal görüntüleme teknikleri kullanan, plastik, metal ve kağıt materyallerin ayrılmasını sağlayan bir yöntem sunuyoruz. Termal kameralar materyal tanımlamada kullanılan diğer kameralara göre daha ucuzdur. Örneğin hiperspektral kameraların kullanıldığı teknikler, lazer teknolojisinin kullanıldığı teknikler, optik sıralama tekniklerinin kullanıldığı yöntemler daha pahalıdır (Artzai Picon, 2012), (Gurell et al., 2012), (Koyanaka, Kobayashi, 2011). Bu avantajın yanında önerilen yöntem materyallerin sabit bir sıcaklıkta kalmasını gerektirmemektedir.

Bu bildirinin en önemli katkısı i) ucuz, ulaşılabilir ve gerçekleştirilmesi kolay bir yöntem sunması ii) materyallerin belirli bir sıcaklıkta sabit kalmasını gerektirmediği için hızlı sonuç veren bir sistem sunmasıdır.

Bildirinin kalan kısmı şu şekildedir. 2 kısımda termal görüntülemenin temel ilkeleri ve sistemimizde kullanılan termal prensipler özetlenmiştir. 3 kısımda uygulamamızın düzeneği, 4 kısımda işleyişi, 5. kısımda yapılan çalışmalar anlatılmış, 6. kısımda ise sonuçlar verilmiş ve yorumlamaları yapılmıştır.

## 2. TERMAL GÖRÜNTÜLEME

Termal görüntüleme, mutlak sıfır (-273.15°) sıcaklığının üzerindeki bütün objelerin yaydığı görünmez radyasyonun analiz ve öznelik çıkarmak için görünür hale getirilmesidir. Termal görüntüleme teknolojilerinde, ışığı yapan objenin yaydığı radyasyon, kamera lensi ile toplanarak dedektörün üzerine odaklanır. Daha sonra dedektör tarafından ölçüm yapılır. Termal görüntüleme işleminde, saydam cisimler hariç, sadece yüzey sıcaklığı ölçülebilir. (Michael Vollmer, 2018). Ölçüm esnasında dedektör, radyasyonu elektrik akımına dönüştüren bir dönüştürücü olarak görev yapar. Bu aşamadan sonra elde edilen veri görüntü işleme ve bilgisayarlı görsel teknikleri ile işlenebilir.

Termal görüntüleme, özünde askeri amaçlar için geliştirilmiş olsa da, havacılık, tarım, tıp gibi farklı alanlarda da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, yapıların izolasyon denetimi veya bozuk elektrik bileşenlerinin tespiti basit bir termal kamera ile kolayca yapılabilir (Williams, 2009).

Bu bildiride de termal kameralar katı atıkların sınıflandırılması için kullanılmıştır. Plastik, metal ve kağıt materyaller ısıtıcı lamba kullanılarak ısıtılmış, daha sonra soğumaya bırakılarak termal kamera ile gözlemlenmiştir. Bahsedilen maddeler termal özellikleri farklı olduğu için süreç içerisinde farklı davranmışlardır. Davranışlarındaki farklılıklar kullanılarak ayırt edilmişlerdir. Isıtıcı lambaların ısıyı iletmesi büyük ölçüde radyasyon ile olur. Lambalardan elde edilen enerji temas ettiği objelere aktarılır ve objenin sıcaklığı artmış olur. Farklı materyallerin ısı sızmaları farklı olduğu için eşit enerji aldıklarında sıcaklıklarındaki değişim de farklı olacaktır. Sistemimiz bu prensip üzerine inşa edilmiştir.

## 3. DÜZENEK

Deney düzeneğimiz bir adet FLIR T-400 kameradan, iki adet 100 Watt Osram R80 ısıtıcı lambadan ve lambaların oturtulduğu tabladan oluşmaktadır. Tablanın üst kısmına eğim verilerek lambaların daha verimli şekilde kullanılması sağlanmıştır. Bu tabla, lambalar objelerden 20 cm geride olacak şekilde ayarlanmıştır. Önerdiğimiz sistem, teste tabi tutulacak objelerin içinde bulunacağı herhangi bir muhafaza gerektirmemektedir. Tüm deneyler oda koşullarında icra edilmiştir. Her deneyde iki obje teste tabi tutulmuş, bu objelerin her biri için objenin tam karşısına gelecek şekilde bir ampul konumlandırılmıştır. Buna ek olarak, lambalara enerji eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Objelerin sıcaklıklarındaki değişimler lambalardan 50 cm geride bulunan termal kamera ile kaydedilmiştir. Aşağıdaki şekilde sistemimiz görsel olarak anlatılmıştır.



Şekil 1. Isı lambaları ve termal kameradan oluşan sistemimizin kurgusu.

#### 4. MATERYALLER

Şekil 1'de görüleceği gibi sistemimiz oda ışığında ve koşullarında, herhangi bir muhafaza olmaksızın çalışabilmektedir. Lambalar enerjileri objelere en fazla enerjiyi aktaracak şekilde, yani tam karşısına ve objelerin merkezine bakacak şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan objeler plastik, metal ve karton olmak üzere üç çeşittir ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2. Farklı renkte ve desende olmak üzere iki plastik, dört metal, iki karton maddeden oluşmuş toplamda sekiz farklı obje kullanılmıştır.

Şekil 2'de görüldüğü üzere, aynı renkte ancak farklı renklerde materyaller mevcuttur. Örneğin kırmızı renkten metal plastik ve karton; yeşil renkten plastik ve metal bulunmaktadır.

#### 5. UYGULAMALAR

Önerilen yöntemin denenmesi için belirtilen düzenek kurulduktan sonra, lambalara henüz enerji verilmeden, termal kamera ile kayıt yapılmaya başlanır. Bir süre sonra, ısı lambalarına enerji verilerek objelerin sıcaklıklarının yükselmesi sağlanır. Bu işleme yaklaşık olarak 10 saniye boyunca devam edilir. Isıtılan objeler hiç bir aktif soğutma elementi kullanmaksızın kendiliğinden soğumaya bırakılırken gözleme devam edilir. Bu işlemin sonunda elde edilen termal görüntüler kullanılarak objelerin hangi maddeden yapıldığı tahmin edilir.

##### 5.1 Sıcaklık Değerlerinin Elde Edilmesi

Termal kameradan alınan görüntüler yatay ekseninde 320 piksel, dikey ekseninde 240 piksel çözünürlüğünde, saniye 30 kare olma özelliğine sahiptir. Termal kameradan gelen görüntü tek kanallı olmasına rağmen daha net ve anlaşılabilir görseller elde etmek adına renk haritası kullanarak renklendirilmişlerdir. Bu renk haritası sayesinde, sıcaklığı yüksek bölgeler kırmızı, düşük bölgeler mavi tonlarında görünmektedir. Aşağıdaki şekilde bu işlem sonucunda elde edilen iki tipik kare gösterilmektedir.



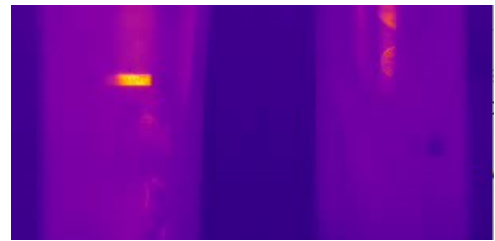
(a)



(b)

Şekil 3. Objelere ısı uygulanmadan önceki ve bir süre ısı uygulandıktan sonraki kareler. Sıcaklığı yükselen kısımlar kırmızı ve tonlarında, diğer bölgeler ise mavi ve mor tonlarındadır.

İlk aşamada, görüntüden elde edilen karelerden dikeyde 50. pikselden 200. piksele yatayda ise ilk pikselden 300. piksele kadar olacak şekilde ilgi bölgesi çıkarılır. Bu işlemin amacı hem hesaplama eforunu azaltmak, hem de zaman göstergesi gibi fazlalıklardan kurtulmaktır. Şekil 4 bu kareye örnek olarak verilmiştir.

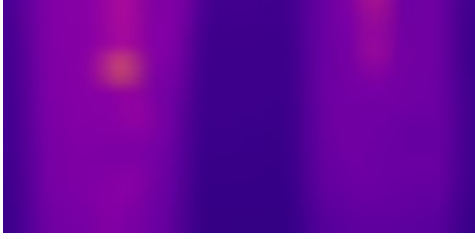


Şekil 4. İlgi alanı

Sonraki adımlarda kullanılacak bölütleme algoritmasının daha kararlı çalışmasını sağlamak adına bir önceki adımda elde edilen kareye Gauss yumuşatma uygulanır. Bu adımda görüntünün netliğinden fedakarlık yapılarak sistemin daha kararlı çalışması sağlanmıştır. Ancak sistemimizde karakter tanıma benzeri işlemler yapılmadığı için bu fedakarlığın sistemimiz için bir maliyeti yoktur.

Elde edilen karenin içindeki objelerin arka plandan ayrılması, sonrasında ise objelerin kare içindeki yerlerine göre sıcaklık ölçümü yapılacak alanın bulunması gerekmektedir.

Bu işlemin ilk adımı olarak Gauss yumuşatma uygulanmış



Şekil 5. Gauss yumuşatma uygulanmış kare.

kareye SLIC bölütleme algoritması uygulanır. Bu algoritmada, işlenecek görüntü L, a, b renk uzayında ifade edilir. Yataydaki ve düşeydeki konumu da kullanılarak 5 boyutlu bir uzaya konumlandırılır. Daha sonra birbirlerine yakın olan pikseller gruplanarak süperpikseller elde edilir. Bu işlem, derlitopluluk (compactness) ve toplam elde edilmek istenen süperpiksel sayısı olmak üzere 2 parametreyi de girdi olarak alır. Derlitopluluk süperpiksellerin şeklinin ne kadar düzenli olacağını ifade eder (Radhakrishna Achanta, Süsstrunk, June 2010). Sistemimizde derlitopluluk 10, toplam süperpiksel sayısı ise 300 olarak seçilmiştir. Bu adımın sonucu şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. SLIC algoritması kullanılarak elde edilmiş görüntü.

Bir sonraki adımda, süperpiksellerden oluşan görüntü gri tonlarına dönüştürülür, bu görüntünün ortalaması alınır ve son olarak, ortalamanın üzerinde kalan bölgeler bir diğer bölgeler sıfır olacak şekilde ikili nicemleme (binary quantization) yapılır. Bu işlemin sonucunda arka plan ve ön plan ayrımı tamamlanmış, ön plan 1 arka plan 0 olarak ifade edilmiştir. Daha sonraki adımlarda ikili nicemlemenin sonucu objelerin konumlarını ayırt etmek için kullanılacaktır. Bu işlemin sonucunda oluşan kare şekil 7'de gösterilmiştir.



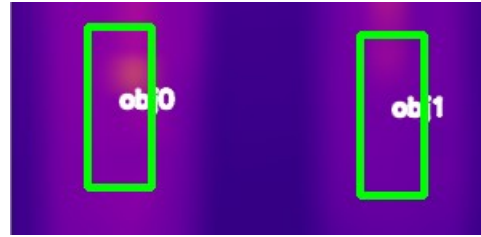
Şekil 7. İkili nicemleme sonucunda oluşan kare. Görüldüğü üzere objeler beyaz arka plan siyah olarak ifade edilmiştir.

Objelerin yerlerini tespitten sonraki adım ise objelerin sıcaklıklarının ölçüleceği ilgi alanlarının çıkarılmasıdır. Bu işlem için objelerin merkezleri bulunmuş ve etrafına sınırlayıcı kutu çizilmiş ve kutunun içerisinde kalan piksel değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Bu işlemin ilk adımı, ikili bölütleme sonucunda elde

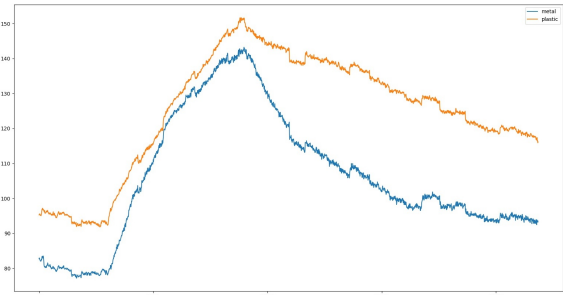
edilen görüntünün kümeleme algoritması ile gruplanması sonrasında ise her grubun merkezinin bulunmasıdır. Kümeleme algoritması olarak kOrtalamlar yöntemi kullanılmıştır. Bu algorithmada küme sayısı belirlenir, her nokta en yakın kümeye atanır, küme merkezi hesaplanır ve bu işlemler bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrarlanır (Jiawei Han, 2012).

Sistemimizde küme sayısı iki olarak belirlenmiştir. İşlem süresini azaltmak için küme merkezlerinin başlangıç konumları seçilmiş ve en çok tekrarlamaya sayısı 10 ile sınırlandırılmıştır. Bulunan küme merkezlerini tam orta noktaya koyacak şekilde, 40 piksel genişliğinde 100 piksel yüksekliğinde kutular Gauss yumuşatma görüntüsüne çizilmiştir. Bu işlemin sonucunda oluşan görüntü şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Objelerin merkezleri çevreleyen kutular.

Gauss yumuşatma görüntüsünde, çizilen kutuların içerisinde kalan piksellerin ortalama değeri bize objenin ortalama sıcaklığı hakkında bilgi verir. Bu değer saniyede 30 kez hesaplanır ve depolanır. Farklı maddelerin ısı özellikleri farklı olduğu için bu değerlerdeki değişimler de farklı olacaktır. Şekil 9 buna örnek olarak verilmiştir.



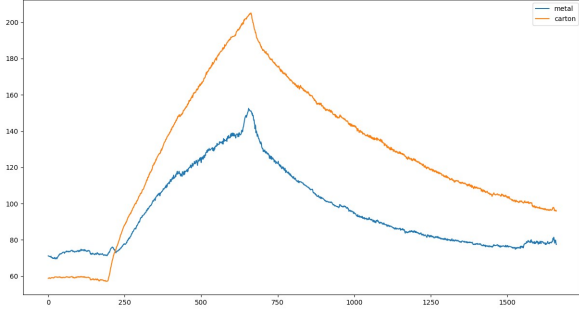
Şekil 9. Bir metal ve bir plastik objenin zamana bağlı ortalama piksel değeri değişim grafiği. Metal mavi, plastik turuncu ile ifade edilmiştir.

Yukarıdaki figürde metalin ve plastiğin ilgi alanındaki ortalama sıcaklık değişimi verilmiştir. Objelerin ısıtılma süreci başladığı anda ortalama sıcaklık da artmaya başlamıştır. Ortalama sıcaklıkların tepe noktası ısıtıcı lambaların güçlerinin kapatıldığı andır. Bu andan sonra metal ve plastiğin farklı ısı özellikleri göstermiştir ve metal plastiğe göre daha hızlı soğumuştur. Sistemimiz bu farklılıkları gözlemleyerek tahmin yapmaktadır.

## 5.2 Sıcaklık Değerlerinin Yorumlanması

Objelerin sıcaklık değerlerini kullanarak maddenin türünü tahmin etmek için sıcaklık değerlerinden öznitelikler çıkartılıp, bu öznitelikler bir sınıflandırma algoritmasına sokulmuştur. Şekil 9'da metalin ve plastiğin soğuma sırasında gösterdikleri farklılıkların, ısınma anında gösterdikleri farklılıktan daha belirgin olduğunu görülmüştür. Bu sebepten dolayı metal ve plastik objelerin ayrılmasında soğuma anı göz önüne alınmıştır.

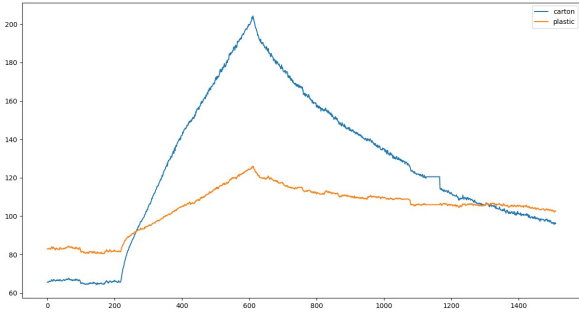
Karton ve metal için aynı deney tekrarlanmış ve sonuç aşağıda gösterilmiştir. Isıtıcı lambaların yakıldığı an sıcaklık değerlerinin yükselmeye başladığı ana, kapatıldığı an ise sıcaklık değerlerinin tepe noktasına denk gelmektedir.



Şekil 10. Bir metal ve bir karton objenin zamana bağlı ortalama piksel değeri değişim grafiği. Metal mavi, karton turuncu ile ifade edilmiştir.

Yukarıdaki şekilden gözlemleneceği üzere, metal ve karton objelerin sıcaklık değerlerinin farklılaştığı bölge ısınma tarafında daha barizdir. Isıtıcı lambalar yakıldıktan sonra kartonun sıcaklığı daha hızlı ve daha fazla yükselmiştir.

Karton ve plastik için aynı düzenek kurulup aynı prosedür icra edildiğinde ise şekil 11 elde edilmiştir.



Şekil 11. Bir karton ve bir plastik objenin zamana bağlı ortalama piksel değeri değişim grafiği. Karton mavi, plastik turuncu ile ifade edilmiştir.

Plastik ve karton maddelerin sıcaklık değişimleri gözlemlendiğinde bu ikilinin de ısınma aşamasında, tıpkı karton ve plastik durumunda olduğu gibi ayırt edilebileceği gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında teste tabi tutulan objenin plastikten mi, metalden mi yoksa kartondan mı yapıldığını anlamak için öncelikle ısınma aşamasında karton olup olmadığını, ikinci aşamada ise soğuma esnasındaki davranışlarından metal mi yoksa plastik mi olduğunu anlama yoluna gidilmiştir.

### 5.3 Özniteliklerin Çıkarılması

Yukarıda farklılık gösteren sıcaklık grafiklerinin yorumlanması için tasvir gücü yeterince yüksek özniteliklerin anlamlı bölgelerden çıkarılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Öznitelik olarak, metal ve plastiğin kartondan ayrılması sırasında sıcaklık grafiğinin yükselen kısmı kullanılacağı için bu bölgede kullanılacak olan öznitelikler, özniteliği belirlenecek olan nokta ile ilerisine doğru olan 25 ardışık noktanın her biri ile arasındaki sıcaklık farkı olarak seçilmiştir. Kısacası yükselen sıcaklık değerlerinde kullanılan öznitelikler 1 deki gibidir.

$$F[i] = X[i] - X[i + n] \quad n = 1 : 25 \quad (1)$$

Plastik ve metal kartondan ayrıldıktan sonra, plastik ve metali birbirinden ayırmak için sıcaklığın düşmeye başladığı alanda kullanılacak öznitelikler, özniteliği çıkarılacak nokta ile 25 nokta gerisine kadar olan bütün noktalar arasındaki fark olarak seçilmiştir. Kısaca aşağıdaki denklem ile gösterilebilir:

$$F[i] = X[i] - X[i - n] \quad n = 1 : 25 \quad (2)$$

Her öznitelik belirtilen koşullarda çıkarılmış ve belirtilen amaç için kullanılmıştır. Daha açıklayıcı olmak gerekir ise, sıcaklığın arttığı anlarda denklem 1'deki öznitelik çıkarılacak, kartonu metal ve plastikten ayırt etmek amacı ile kullanılacaktır. Denklem 2 ile ifade edilen öznitelik ise sıcaklığın düşmekte olduğu anlarda çıkarılacak ve metal ile plastiği birbirinden ayırt etmek için kullanılacaktır.

### 5.4 Sınıflandırıcının Eğitilmesi

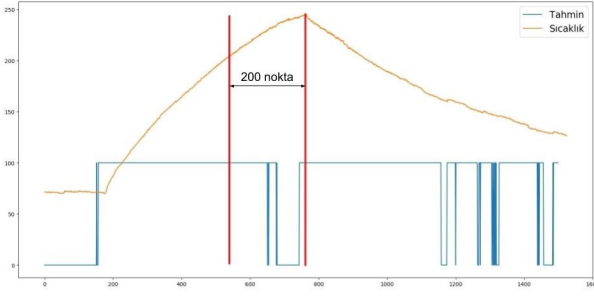
Sınıflandırıcı, daha önce anlatıldığı gibi, çıkarılan öznitelikleri değerlendirecek ve objenin materyali hakkında bir tahmin yapacaktır. Daha önce de bahsedildiği gibi sistemimizde iki tane sınıflandırıcı vardır ve herbiri kendisi için dizayn edilmiş öznitelikleri kullanmaktadır. Bir tanesi metal ve plastiği kartondan ayıracak, diğeri ise plastik ve metali birbirinden ayıracaktır. Sınıflandırıcı olarak destek vektör makineleri seçilmiştir. Bu teknikte ayrımı yapılacak olan gruplar arasındaki marjini en büyük yapan sınır seçilir (Bishop, 2006). Buna ek olarak öznitelik boyularını artıran kernel yöntemi de kullanılabilir.

Plastik ve metali kartondan ayırt eden sınıflandırıcı eğitilirken kartondan çıkarılan özniteliklere pozitif etiketi, plastik ve metalden çıkarılan özniteliklere negatif etiketi verilmiş ve eğitime işlemi bu şekilde tamamlanmıştır. Toplamda on tane karton, on tane karton olmayan objenin ısıtılması esnasında elde edilen veri kümesi kullanılmıştır. Plastik ile metali birbirinden ayırt eden sınıflandırıcı için kullanılan veri kümesinde ise on altı adet metal, on iki adet plastik maddenin soğuma süresince çıkarılan öznitelikler kullanılmıştır.

Her iki sınıflandırıcı için de çekirdek olarak radyal temel (radial basis) fonksiyonları kullanılmış, hataların ne kadar ciddi cezalandırılacağını belirleyen C değeri ise 1 olarak seçilmiştir. Kartonlu plastik ve metalden ayıran sınıflandırıcıda karton öznitelikleri için 436, karton olmayan öznitelikler için 438 destek vektörü bulunmuş, metal ve plastiği birbirinden ayıran sınıflandırıcıda metal öznitelikleri için 720, plastik öznitelikleri için 773 destek vektörü bulunmuştur.

### 5.5 Sınıflandırıcının Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Eğitilen sınıflandırıcılardan kartonu metal ve plastikten ayırt etmek için kullanılan kendisi için tasarlanmış öznitelikler sıcaklık verisinden çıkarılarak verilir. Sınıflandırıcı, kendisine verilen öznitelikleri kullanarak her nokta için tahminde bulunur. Bu tahminlerin sıcaklığın en yüksek olduğu noktadan geriye doğru olan 200 tanesini alır. Unutulmamalıdır ki kartonu diğer maddelerden ayırmak için bu aralık kullanılmaktadır. Eğer karton olarak tahmin edilenlerin sayısı fazla ise objenin karton olduğu belirtilir. Şekil 12'de turuncu renk ile sıcaklık değerleri, mavi renkle ise yapılan tahminler ifade edilmiştir. Kırmızı

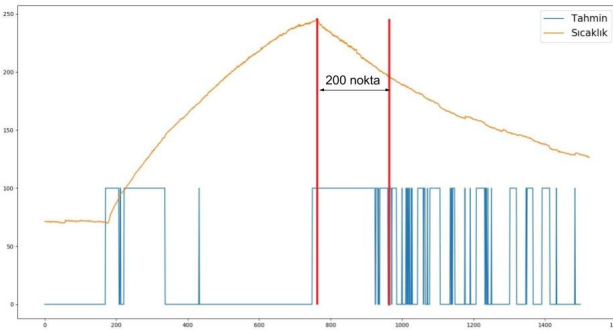


Şekil 12. Turuncu: Objeye ilişkin sıcaklık değeri, Mavi: Sınıflandırıcının tahmini, Kırmızı çizgiler: Sıcaklığın en yüksek olduğu yer ve 200 nokta gerisi.

dikey çubuklar ise sıcaklığın en yüksek olduğu yer ile 200 nokta gerisini göstermektedir.

Bu örnekte 200 noktanın 131'i karton olarak tahmin edildiği için obje karton olarak belirlenmiştir. Örnekte kullanılan veri eğitim kümesinde yoktur ve tahmin doğrudur.

Plastik ile metali ayırt edilmesi için kullanılan sınıflandırıcı da benzer şekilde çalışmaktadır. Bu kez öznelikler denklem 2'de gösterildiği gibi çıkarılır, sınıflandırıcıya yollar ve sınıflandırıcıdan tahminler alınır. Sınıflandırıcıdan alınan tahminlerin sıcaklığın en yüksek değere ulaştığı yer ile 200 nokta sonrası arasında olan kısmındaki değerler sayılır. Unutulmamalıdır ki metal ve plastik birbirinden bu aralıkta ayrılmaktadır. Eğer pozitif tahminler çok ise objenin metalden oluştuğu, negatif tahminler çok ise plastikten oluştuğu sonucuna varılır.



Şekil 13. Turuncu: Objeye ilişkin sıcaklık değeri, Mavi: Sınıflandırıcının tahmini, Kırmızı çizgiler: Sıcaklığın en yüksek olduğu yer ve 200 nokta sonrası.

Yukarıdaki örnekte toplam 200 tahminden sadece 4 tanesi plastik, kalan 196 tanesi metal lehinedir. Sonuç olarak obje büyük bir fark ile metal olarak tahmin edilmiştir ve tahmin doğrudur. Kullanılan veri eğitim kümesinde mevcut değildir.

## 6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Sistemimiz eğitim veri kümesinde bulunmayan 22 obje kullanılarak test edilmiştir. Test için kullanılan 10 karton objenin ve 5 plastik objenin hepsi doğru sınıflandırılmış, 7 metalden 6 tanesi doğru sınıflandırılmıştır. Kullanılan sistemde objelerin renkleri farklı dahi olsa, aynı maddeden olduğu sürece doğru sınıflandırıldığı gösterilmiştir.

Önerilen sistem kapalı bir hazne gerektirmediği ve deneyler oda şartlarında gerçekleştirildiği için kullanım ve gerçekleştirme açısından kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca öznelikler objenin bir referans noktası ile arasındaki sıcaklık farkına dayanmadığı için sürekli aynı sıcaklıkta bir referans noktası gereksinimi de yoktur. Buna ek olarak, objelerin belirli bir sıcaklık değerinde sabit tutulması ihtiyacı da yoktur.

Bu bildiriye hızla ivmelenecek büyüyen katı atık problemine, otomatize çözüm sunacak bir çerçeve önerilmektedir. Bu çalışma ile farklı renkte katı atıkların, aynı maddeden yapıldığı sürece aynı muameleyi gördüğünü ve aynı şekilde sınıflandırıldığı gösterilmiştir. Önerdiğimiz yöntem sınıflandırılacak objelerin bir referans noktası ile ya da birbiri ile arasındaki sıcaklık farkına dayanmamaktadır. Bunun yerine objelerin ısınma ve soğuma rutinleri süresince kendi sıcaklığındaki değişimlere dayanmaktadır. Bilgimiz dahilinde, önerdiğimiz çözüm katı atık sınıflandırmasında termal kamera ile sıcaklık değişimlerinin gözlemlendiği ve bu şekilde sınıflandırmanın yapıldığı ilk çalışmadır. Sistemimizde kullanılan python kodları ve veriler şu adresten elde edilebilir (<https://github.com/akde/recycle>, 2019).

## KAYNAKLAR

- Artzai Picon, Aranzazu Bereciartua, Jone Echazarra Ovidiu Ghita Paul F. Whelan Pedro M. Iriondo, 2012. Real-time hyperspectral processing for automatic nonferrous material sorting. *Journal of Electronic Imaging*, 21, 1 - 10 - 10.
- Ashkiki, Alireza Rajabpour, Felske, Christian, McCartney, Daryl, 2019. Impacts of seasonal variation and operating parameters on double-stage trommel performance. *Waste Management*, 86, 36 - 48.
- Bishop, Cristopher M., 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Grazhdani, Dorina, 2016. Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. *Waste Management*, 48, 3 - 13.
- Gundupalli, Sathish Paulraj, Hait, Subrata, Thakur, Atul, 2017a. Multi-material classification of dry recyclables from municipal solid waste based on thermal imaging. *Waste Management*, 70, 13 - 21.
- Gundupalli, Sathish Paulraj, Hait, Subrata, Thakur, Atul, 2017b. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management*, 60, 56 - 74. Special Thematic Issue: Urban Mining and Circular Economy.
- Gurell, J., Bengtson, A., Falkenström, M., Hansson, B.A.M., 2012. Laser induced breakdown spectroscopy for fast elemental analysis and sorting of metallic scrap pieces using certified reference materials. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 74-75, 46 - 50. 6th Euro-Mediterranean Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy (EMSLIBS 2011).
- Hamerski, Fernando, Krummenauer, Alex, Bernardes, Andréa M., Veit, Hugo M., 2019. Improved settings of a corona-electrostatic separator for copper concentration from waste printed circuit boards. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 102896.

<https://github.com/akde/recycle>, 2019. <https://github.com/akde/recycle>, Last accessed on 2019-04-22.

Jiawei Han, Micheline Kamber, Jian Pei, 2012. *Data Mining Concepts and Techniques*.

Koyanaka, Shigeki, Kobayashi, Kenichiro, 2011. Incorporation of neural network analysis into a technique for automatically sorting lightweight metal scrap generated by ELV shredder facilities. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 515 - 523.

Michael Vollmer, Klaus-Peter Möllmann, 2018. *Infrared Thermal Imaging*.

Minelgaitè, Audronè, Liobikienè, Genovaitè, 2019. Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours. *Science of The Total Environment*, 667, 86 - 93.

Mohammadi, Maryam, Jämsä-Jounela, Sirkka-Liisa, Harjunkoski, Iiro, 2019. Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. *Computers Chemical Engineering*, 123, 155 - 169.

Radhakrishna Achanta, Appu Shaji, Kevin Smith Aure-lien Lucchi Pascal Fua, Süsstrunk, Sabine, June 2010. Slic superpixels. Technical report, EPFL TechnicalReport 149300.

Size separation of particulates in a trommel screen system, 2010. Size separation of particulates in a trommel screen system. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 1214 - 1221.

Stoeva, Katya, Alriksson, Stina, 2017. Influence of recycling programmes on waste separation behaviour. *Waste Management*, 68, 732 - 741.

Sun, Zhanpeng, Sun, Guogang, Peng, Peiying, Liu, Qinggang, Yu, Xinqi, 2019. A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 141 - 149.

Till, Zoltán, Varga, Tamás, Sója, János, Miskolczi, Norbert, Chován, Tibor, 2018. Kinetic identification of plastic waste pyrolysis on zeolite-based catalysts. *Energy Conversion and Management*, 173, 320 - 330.

Touhami, S., Aksa, W., Maammar, M., Zeghloul, T., Medles, K., Dascalescu, L., 2019. Numerical simulation of the behavior of insulating particles in a free fall tribo-electrostatic separator with four vertical cylindrical electrodes. *Journal of Electrostatics*, 97, 8 - 14.

Williams, Thomas L., 2009. *Thermal Imaging Cameras*. CRC Press.