

PROTOTİP EDDY AKIMI AYRIŞTIRICISI İLE BAZI DEMİRSİZ METALLERİN GERİ KAZANIM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Ahmet FENERCİOĞLU¹, Ali KARTAL²

¹Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., 60250 TOKAT

²Akyurt Nevzat Hüseyin Tiryaki Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, ANKARA

ahmet.fenercioglu@gop.edu.tr, alikartal5800@hotmail.com,

(Geliş/Received: 04.10.2013; Kabul/Accepted: 11.03.2015)

ÖZET

Demir içermeyen değerli metallerin ayrıştırılmasında eddy akımı yöntemi etkin olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle çalışan makineler Eddy Akımı Ayrıştırıcısı denilmektedir (EAA). Ayrıştırıcıda yüksek manyetik alanlı mıknatıslardan oluşan bir tambur yüksek hızlarda döndürülür. Böylece tambur; üzerindeki taşıyıcı banttan geçen metalde bir Eddy akımı oluşturur. Bu akım nedeniyle malzemede oluşan manyetik alan ile tambur alanı etkileşerek bir kuvvet meydana gelir. Bu kuvvet akan atık içerisinde malzemenin ayrışmasını sağlar. Malzemenin öz kütlesi, biçimi, boyutu, öz direnci, tamburun manyetik alan şiddeti, hızı ve kutup sayısı ayrıştırma kuvvetini belirler. Bu makalede Eddy akımıyla ayrıştırmanın temelini oluşturan yasalara, sistemin teorisine, tamburun yapısına yer verilmiştir. Deneysel kuvvet ölçümleri ile ayrıştırıcının performansının belirlenmesine çalışılmıştır. Prototip EAA tamburu 900 ve 2400 d/d arasında belirli hızlarda döndürülerek 50x40, 50x30 ve 50x20 mm boyutlarındaki 1,5 mm kalınlığında alüminyum, bakır ve pirinç test malzemelerinde oluşan kuvvetler ölçülmüştür. Kuvvet olarak en iyi sonuç 2400 d/d hızda 50x40 mm boyutlarında alüminyum malzemede elde edilmiştir. Elektriksel iletkenliğin yoğunluğa oranı en yüksek olan malzeme alüminyum olduğu için alüminyum ayrıştırmadaki verim daha yüksektir. Ayrıca verim deneylerinde 5-10 mm boyutlarında alüminyum ve bakır parçacıkların plastikte birlikte içerisinde bulunduğu 2 kg'lık atık ayrıştırma işleminde 1500 d/d hızın üzerinde %95'in üzerinde bir ayrıştırma başarıları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demirsiz metal ayrıştırıcı, eddy akımlı ayrıştırıcı, değerli metallerin geri dönüşümü, manyetik olmayan iletken malzemelerin ayrıştırılması

DETERMINATION OF RECYCLING PERFORMANCE OF SOME NON-FERROUS METALS VIA PROTOTYPE EDDY CURRENT SEPARATOR

ABSTRACT

Eddy current method has been used effectively on to separating valuable non-ferrous metals. It called eddy current separator (ECS) due to operates this method. Magnetic drum consisting high field magnets is rotated at high speeds. Thus, drum induces eddy current in the metal while it is passing over the carrier band of ECS. A force occurs due to the effects of this magnetic field and drum field. The force separates non-ferrous metals from the waste. Density, form, size, resistivity, of the materials, magnetic field intensity, speed, pole number of the drum determine separation force. This paper consist of fundamentals rules, theory of ECS system, drum structure. Performance determination was studied with experimental measurements on the prototype ECS. When the magnetic drum of prototype is rotated between 900 and 2400 rpm, separation forces are measured on the test materials such as the aluminium, the copper and the brass plate with the sizes 50x40, 50x30 ve 50x20 and their thicknesses are 1.5 mm respectively. The best force results are achieved with the materials 50x40 mm at the speed of 2400 rpm. Separation efficiency is better on the aluminium material because aluminium has higher rate of electrical conductivity per density. It has been also achieved efficiency over % 95 with the experiments of separation process with 2 kg waste which is included 5-10 mm copper, aluminium particles together plastic at higher than 1500 rpm speed.

Keywords: Non-ferrous metal separator, eddy current separator, valuable metals recycling, separation of conductive materials

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eddy akımı yöntemi, geri dönüşüm teknolojileri alanında, demir içermeyen bakır, alüminyum, altın, gümüş, pirinç gibi değerli metallerin ayrıştırılmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem ayırıştırıcı olarak ilk kez Eriez Magnetic firması tarafından 1969 yılında manyetik olmayan iletken malzemeleri ayırştırmak için tasarlanmış ve patent alınmıştır. İki tip olarak geliştirilen bu ayırıştırıcının birinci tipinde, malzemede darbeli elektromanyetik alan ile diğer tipinde ise sabit mıknatıslardan oluşan yüksek hızda dönen rotor ile eddy akımı oluşturarak ayırştırma yapılmıştır [1]. Günümüzde geri dönüşümün önem kazanması, geri dönüşüm teknolojileri alanında yapılacak çalışmalara değer katmaktadır. Özellikle ekonomik değeri yüksek değerli metallerin geri kazanılması ülke ekonomilerine önemli katkılar sağlamaktadır. Son on yıl içerisinde bu konuda uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar sınırlıdır, ülkemize ise oldukça az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bunlardan bazıları özet olarak aşağıda verilmiştir.

Lungu ve Rem [2] 5 mm den daha küçük metal parçacıklar içeren elektroteknik atıkların ayrıştırılması için yeni tip ve tek-disk olarak adlandırılan bir EAA öngörmüşlerdir. Bu tasarımda yatay pozisyonlu döner tip bir manyetik disk ile küçük parçacıkların ayrıştırılması için deneyler yapılmıştır. Deneyler bakır-kurşun ve bakır-alüminyum karışımları ile yapılarak sistemin performansı test edilmiştir. Fenercioğlu ve Kurt'un yaptığı çalışmada [3] ayırıştırıcıda, yüksek hızlarda döndürülen sabit mıknatıslardan oluşan bir rotor ile malzemede eddy akımı oluşturulduğu ve bu akıma maruz kalan demirsiz metallerde onların öz kütle ve öz dirençlerine göre farklı eddy akımları ve kuvvetler oluştuğu ifade edilmiştir. Bu şekilde alüminyumun geri kazanımı durumunda ortaya çıkan hammaddenin ekonomik değeri ve enerji verimliliği üzerine etkileri incelenmiştir. Zhang ve ark. [4] yaptıkları çalışmalarında; yeni geliştirilen iki tamburlu EAA'yı ECSIM programı ile simüle etmişlerdir. Simülasyon çalışmalarında parçacıkların yatay olarak yer değiştirmesi ölçülmüştür. İki tamburlu EAA'nın küçük parçacıkları ayırştırmada avantajlı olduğu ifade edilmiştir. Zhang ve Ark.'nın [5] yaptığı çalışmada malzemede oluşan manyetik itme kuvveti modellenmiştir. Bir EAA için ayırştırmada başlıca kriter malzemenin yoğunluğunun (ρ), elektriksel iletkenliğe (σ) oranı (σ/ρ) olduğunu belirtmiştir. Burada yoğunluk başına iletkenliği daha yüksek olan malzemeler daha kolay bir şekilde ayrıştırılmaktadır. Böylece küçük parçacıkların ayrıştırılma oranının yüksek olduğu görülmektedir.

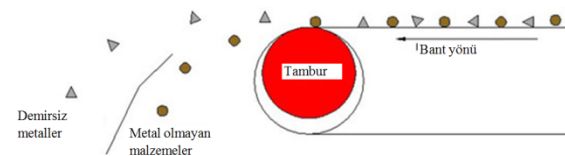
Wang ve ark. [6] tarafından yapılan çalışmada, malzeme besleme, konveyör bandı ve tambur hızının ayarlanması sonucunda, ayırştırma veriminin arttığı

belirtilmektedir. Yapılan deneylerde 2-5 mm boyutunda ve çeşitli ağırlıklardaki alüminyum ve plastik karışımı içerisinde malzeme ayrıştırılması sırasında tamburun hızı ve konveyör bantın dönüş hızı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda mıknatıslı rotorun 25 Hz'de, konveyör bantın ise 8 Hz'de döndürüldüğünde verimin %95'in üzerinde olduğu sonucuna varılmıştır [6]. Hacifazlıoğlu [7] yaptığı çalışmada ise eddy akımlı ayırıştırıcılar sayesinde, alüminyum gibi demir içermeyen ve yeni geliştirilen manyetik sıvılarla platin grubu metallerin etkili bir şekilde zenginleştirildiğini tespit etmiştir.

2. MATERYAL YÖNTEM (MATERIAL METHODS)

2.1. Eddy Akımı Ayırıştırıcısının Teorisi (Theory of Eddy Current Separator)

Demir içermeyen değerli iletken malzemelerin ayrıştırılması için, eddy akımı etkin bir yöntemdir. Eddy akımı prensibi; bir iletken malzeme değişken bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde manyetik akı tarafından kesilerek Faraday kanununa göre malzemede bir elektrik yükü indüklenir. Kapalı devre olan malzemede Eddy akımı olarak adlandırılan girdap şeklinde akımlar geçer. Bu akımların etkisi ile malzemede Ampere kanununa göre manyetik alan oluşmaktadır. Bu alan mıknatıs bloklarından oluşan rotorun manyetik alanından etkilenir. Her iki alanın etkisi ile Biot-Savart yasasına göre malzemede kuvvet oluşur. Bu itme kuvveti ile malzeme ürtün akışından dışarıya atılır. Bu durumu açıklayan prensip şeması Şekil 1'de verilmektedir. Eddy akımının genliğini, frekansını ve fırlatma kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen parametreler malzemenin cinsi, öz kütlesi, özdirenci, biçimi, boyutları, tambur ile malzeme arasındaki hav aralığı, rotorun hızı ve kutup sayısıdır.



Şekil 1. EAA prensip şeması (Principial scheme of ECS)

Faraday indüksiyon yasasına göre değişken manyetik alana maruz kalan parçacıkta indüklenen akım Eş.1.'de verilmiştir. Burada manyetik akının zamana göre değişim hızı $\frac{dB}{dt}$ 'nin ve eddy akımının büyüklüğünü belirlemektedir [8-10].

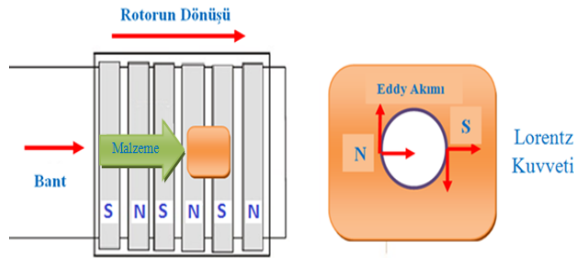
$$\vec{\nabla} \times \vec{J} = -\sigma_p \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Burada J akım yoğunluğu ve σ_p parçacığın öz iletkenliği, B manyetik akı yoğunluğu ve t zamandır. İndüksiyon akımının yönü Lenz kanunu ile belirlenir. Bu kanununa göre; indüksiyon akımının yönü kendisini meydana getiren alana zıttır. Bu karşıt manyetik alanlar, iletkenin bir doğrusal yüzey elemanı

(ds) üzerinde Eş.2 ile verilen itici bir Lorentz kuvveti üretir [8].

$$\vec{F}_L = Id\vec{s} \times \vec{B} \quad (2)$$

Burada I iletkenen geçen akımdır. Bu kuvvet parçacığın hareketini sağlar ve yolundan saptırır. Malzemede eddy akımı ile ayırıştırma sağlayan kuvvet Şekil 2'de görülen döner tamburlu tip EAA üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2. Döner tamburlu eddy-akım ayırıştırıcısının üstten görünüşü (Top view of the rotary drum eddy current separator)

Eddy akımı nedeniyle parçacıklara etki eden kuvveti hesaplamak için Rem ve ark. [7] tarafından geliştirilen dipol modeli ve harici manyetik alanlar sonucu oluşan Lorentz kuvveti Eşitlik 3'de ifade edilmektedir [8].

$$F_{Lp} = \mu_M \nabla B \quad (3)$$

Burada F_{Lp} Lorentz kuvveti (N), μ_M manyetik momenti (Nm) ve B harici manyetik akı yoğunluğunu (T) olarak ifade etmektedir. Parçacıkta oluşan moment ise $\mu_M = M_p V_p$ ile bulunmaktadır [8]. Burada M_p parçacığın mıknatıslanması, V_p ise m/s olarak hızıdır. Eşitlik 2'de olduğu gibi verilen ve bir parçacığa etki eden kuvveti belirlemek için, manyetik sistem tarafından üretilen manyetik alan hesaplanmaktadır. Tambur eksenine göre silindirik bir koordinat sistemi (r, ϕ, z) içerisindeki manyetik indüksiyon bileşenleri Eş.4 ve Eş.5 ile elde edilmektedir [8,9].

$$B_r = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \left(\frac{r}{R_{drum}}\right)^{-(2n+1)k-1} \sin[(2n+1)k(\phi - \omega_{drum}t)] \quad (4)$$

$$B_\phi = \sum_{n=0}^{\infty} -b_n \left(\frac{r}{R_{drum}}\right)^{-(2n+1)k-1} \cos[(2n+1)k(\phi - \omega_{drum}t)] \quad (5)$$

Burada, b_n Forier katsayısı, R_{drum} tambur yarıçapı, k tamburdaki mıknatıs çifti sayısı ve ω_{drum} tamburun açısal hızını ifade etmektedir. Fourier katsayısı, parçacığın, manyetik kutup yüzeyinden uzaklığının bir fonksiyonu olarak manyetik alan şiddeti ile belirlenmektedir [8]. Parçacık üzerine etki eden teğet F_{Lpt} ve radyal F_{Lpr} kuvvetleri, Eş. 4 ve Eş. 5 temel alınarak Eş. 6 ve Eş.7 ile formüle edilmiştir [8-10].

$$F_{Lpt} = \frac{2\pi s V_p}{\mu_0 w} \frac{(k\omega_{drum} + \Omega)\tau}{1 + (k\omega_{drum} + \Omega)^2 \tau^2} B^2 \quad (6)$$

$$F_{Lpr} = \frac{2\pi s V_p}{\mu_0 w} \frac{(k\omega_{drum} + \Omega)^2 \tau^2}{1 + (k\omega_{drum} + \Omega)^2 \tau^2} B^2 \quad (7)$$

Burada, w mıknatısların bir çiftinin genişliğini, s ayırıştırılacak parçacığın şekil faktörünü ve Ω ise dönen parçacığın açısal hızıdır. Tanecik içindeki manyetik alanın bozulmasına neden olan karakteristik zaman τ dir ve Eşitlik 8'de olduğu gibi hesaplanmaktadır [8,11].

$$\tau = \mu_0 \sigma_p s b^2 \quad (8)$$

Burada b parçacığın yarıçapıdır. Parçacıktaki moment yöntemi ile Eş.9 kullanılarak bulunmaktadır [8,11].

$$T = \frac{s V_p}{\mu_0} \frac{(k\omega_{drum} + \Omega)\tau}{1 + (k\omega_{drum} + \Omega)^2 \tau^2} B^2 \quad (9)$$

Eddy-akım kuvvetleri ve oluşan tork, manyetik alanın karesine bağlı olduğu Eş. 9'da olduğu gibi görülebilmektedir. Seramik ferrit doğal mıknatıslar yerine nadir toprak elementi mıknatısların (Neodyum) kullanılması ile ayırıştırma gücünde belirgin bir artış görülmektedir [8]. Şekil 2'de görülen döner tamburlu eddy akım ayırıştırıcısında, döner mıknatıslı tamburun değişken manyetik alanının yol açtığı itici kuvvet Eş.10 ve Eş.11 ile daha sade biçimde verilmiştir [6].

$$F_r = H^2 f \times \frac{m\sigma}{\rho s} \quad (10)$$

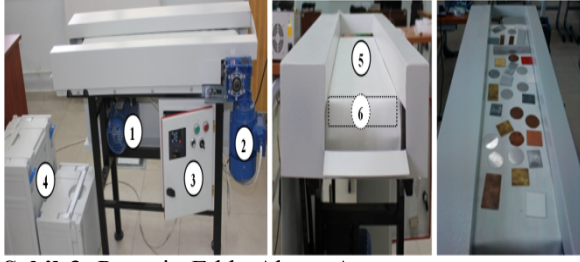
$$f = \frac{np}{2} \quad (11)$$

Burada F_r itme kuvvetini, H Manyetik alan şiddetini, f manyetik alan frekansını, n mıknatıs tamburun hızını, p manyetik kutup sayısını, m kütleyi, σ iletkenlik oranını, s malzemenin şekil faktörünü ve ρ yoğunluğu ifade etmektedir. Farklı malzemeler için, bileşik kuvvet malzeme özellikleri ile ilgilidir ve $\frac{\rho}{\sigma}$ oranı itme kuvvetin boyutunu ve ayırıştırma zorluğunun derecesini belirlemektedir [6].

2.2. Prototip Eddy Akımı Ayırıştırıcısı (Prototype of Eddy Current Separator)

Prototip eddy akım ayırıştırıcısı bir yüksek lisans tezi olarak tasarlanmış ve deneysel amaçlı olarak imal edilmiştir. Şekil 3'de görülmektedir. Bant sistemi, mıknatıs tambur, gövde ve kontrol panosundan oluşmaktadır. Bant sistemi ayırıştırılacak malzemeleri 0.2 m/s sabit hızla taşıyarak mıknatıs tambur üzerinden geçirmektedir. Tambur, bant ile arasında 1 mm hava aralığı olacak şekilde makineye yerleştirilmiştir. Banda temas etmeden uç kısımda yüksek hızla dönmekte olup demirsiz metaller üzerinde eddy akımının ve kuvvetin oluşmasını

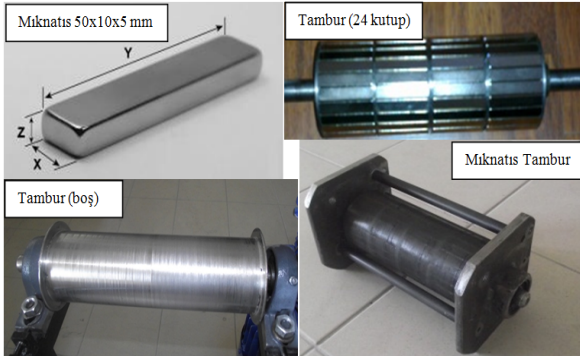
sağlar. Bu nedenle ayrıştırıcısının en önemli parçası mıknatıslı tamburdur [11].



Şekil 3. Prototip Eddy Akımı Ayrıştırıcısı (Prototype of Eddy Current Separator)

1. Tambur motoru 2. Bant motoru 3. Kontrol panosu 4. Ayrıştırılmış ürün kutuları 5. Konveyör bant 6. Mıknatis tambur

Eddy akımının genliğinin yüksek olması $d\phi/dt$ 'den dolayı akımın frekansına bağlıdır. Bu nedenle tambur 24 kutuplu olarak tasarlanmıştır. Bu durumda tambur dakikada 1500 d/d olarak döndürüldüğünde malzemede oluşan eddy akımının frekansı 600 Hz olmaktadır. N52 sınıf neodyum çubuk mıknatıs kullanılmıştır. Tamburun yapısı Şekil 4'de gösterilmiştir [11].



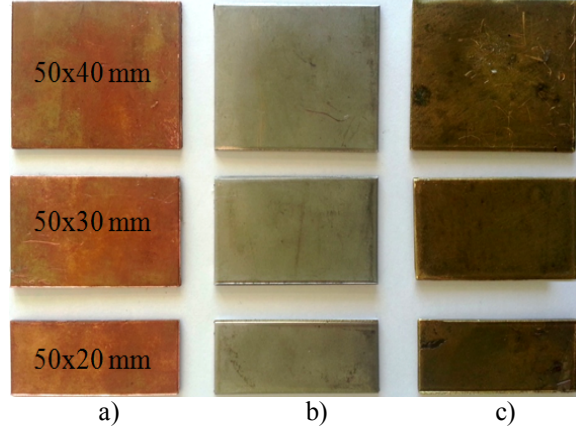
Şekil 4. Mıknatıslı tamburun yapısı (Structure of magnetic drum)

Eddy akımı ayrıştırıcısının oluşturduğu itme kuvveti ve malzemenin ayrıştırma verimi gibi bulgulara ulaşmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla 50x40 mm, 50x30 mm ve 50x20 mm boyutlarında 1,5 mm kalınlığında, birbirleri ile eşit hacimlerde alüminyum, bakır ve pirinçten yapılmış test malzemeleri kullanılmıştır.

Malzeme bandın hareketi ile tamburun üzerinden geçerken hava aralığının en dar olduğu bölgede enine olarak manyetik alana maruz kalır. Bu nedenle malzemenin eni fırlatma kuvvetinde etkili olduğu için 20, 30 ve 40 mm olarak değişken alınmıştır. Boyu ise sabit olarak 50 mm'dir. Test malzemeleri Şekil 5'de ağırlıkları ise Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Test malzemelerinin ebatları ve ağırlıkları (Dimensions and weight of test materials)

Malzeme Ebatları (mm)	Malzeme Cinsi ve Kütlesi (g)		
	Bakır	Alüminyum	Pirinç
50X40	26,81	7,76	25,58
50X30	20,11	5,82	19,18
50x20	13,40	3,87	12,79



Şekil 5. Test malzemeleri a) bakır b) alüminyum c) pirinç (Test materials a) copper b) aluminium c) brass)

Bu malzemelerde oluşan itme kuvvetini ölçmek için malzemeler dinamometreye bağlanmıştır. Eddy akım ayrıştırıcısında malzemede oluşan fırlatma kuvvetini ölçmek için 10 mg hassasiyete sahip dijital dinamometre kullanılmıştır. Ayrıştırıcının konveyör bandı hareketsiz bırakılarak, dinamometre bant üzerine sabitlenmiştir. Sabitlenen dinamometrenin ucuna ayrıştırılacak olan test malzemesi Şekil 6'daki gibi bağlanmıştır [11].



Şekil 6. Dinamometre ile kuvvet ölçümü (Measuring force with dynamometer)

Bu test malzemeleri, mıknatıslı tamburun manyetik alanına sokularak farklı dönme hızlarında malzemede oluşan kuvvetler ölçülmüştür. Bu ölçme işleminde malzemenin tamburdan fırlaması esnasında, malzeme dinamometre tarafından tutulmuş olup fırlaması engellenmiştir. Malzemenin maksimum kuvvetle askıda kaldığı bu noktada oluşan fırlatma kuvvetleri, tamburun 900, 1200, 1500, 1800, 2100 ve 2400 d/d hızlarında çalışırken ölçülmüştür.

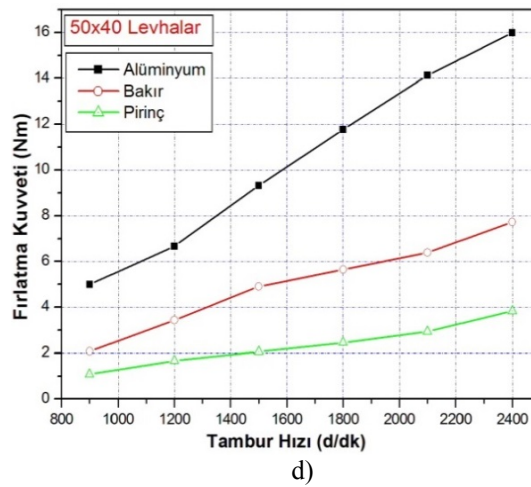
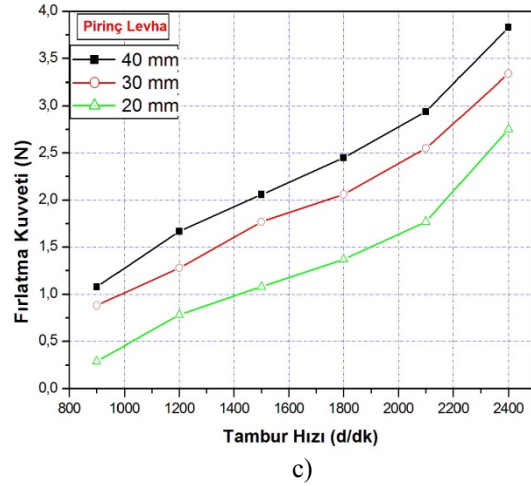
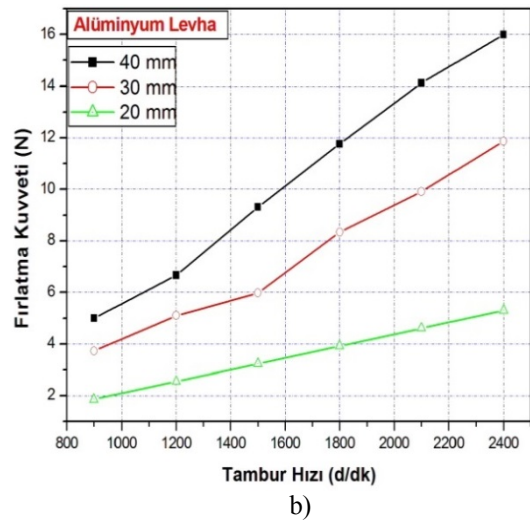
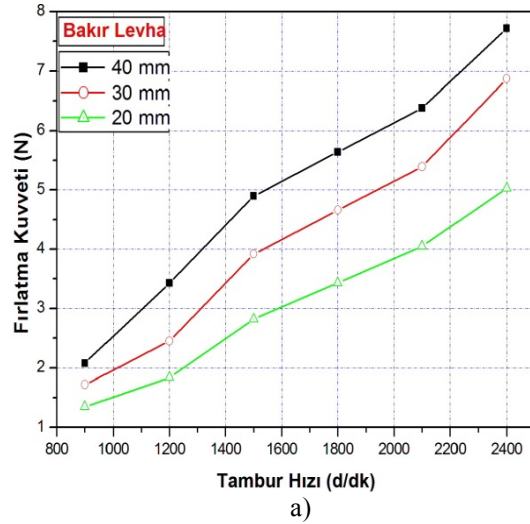
İkinci deney olarak, eddy akımı ayırıştırıcısının verimini hesaplamak için 500 gr'ı plastik olmak üzere, 2000 gr ağırlığında farklı cins ve ebatlarda hazırlanmış manyetik olmayan (demir içermeyen) iletken metaller ve plastik karışımı ayırıştırılmıştır. Motor sürücüsü ile mıknatıslı tambur 900, 1200, 1500, 1800, 2100 ve 2400 d/d hızlarda döndürülerek ayırıştırma işlemi yapılmıştır.

Her hızda ayırıştırılan malzeme miktarı tartılıp toplam demirsiz metal malzeme miktarına oranlanarak verim hesaplanmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

3.1. Deneysel Veriler (Experimental Data)

Eddy akımı ayırıştırıcısı, prototipi üzerinde yapılan birinci deney çalışması sonucunda elde edilen kuvvet ölçümleri her test malzemesi için ayrı ayrı grafikler halinde Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Fırlatma kuvveti ölçümleri a) Bakır b) Alüminyum c) Piriç d) 50x40 mm (Measurements of throwing force a) Copper b) Aluminium c) Brass d) 50x40 mm)

Bakır, alüminyum ve piriç test malzemeleri kendi içerisinde boyutlar dikkate alınarak tambur hızına göre fırlatma kuvveti grafikleri çizilmiştir. Şekil 7 d)'de ise aynı boyuttaki (50x40) farklı malzemelerin tambur hızına göre fırlatma kuvveti grafikleri çizilerek birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre aynı ebatlardaki farklı malzemelerde aynı hız değeri için oluşan kuvvetler birbirinden farklıdır. Malzeme ebatları ve mıknatıslı tamburun dönme hızı, aynı olduğu halde oluşan kuvvetlerin farklı olmasının nedenleri malzeme cinsinin, boyutların, elektriksel iletkenliğin ve yoğunluğunun farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Zhang ve ark. [5] bir eddy akımı ayırıştırıcısı için başlıca kriter olarak yoğunluğun, elektriksel iletkenliğe oranı σ / ρ olduğunu belirtmektedir. Deneyde kullanılan test malzemeleri bu açıdan incelendiğinde σ / ρ oranı en yüksek olan alüminyumun ayırıştırma başarısının daha yüksek olduğu Tablo 2'den de anlaşılmaktadır. Böylece elektriksel iletkenliği yüksek ve öz kütlesi düşük olan malzemeler daha kolay ayırıştırılabilmektedir. Ayrıca malzeme boyutları büyüdükçe indüklenen eddy akımı

ve manyetik alanı oluşturan yüzey büyüdüğü için ayırıştırma kuvvetinin arttığı Şekil 7'deki grafiklerden görülmektedir [5].

Tablo 2. Test malzemelerindeki σ / ρ oranları (σ / ρ rates of test materials)

Malzeme	İletkenlik (σ) (siemens)	Öz kütle (ρ) (g/cm ³)	σ / ρ
Alüminyum	35	2,59	13,51
Bakır	58	8,94	6,48
Pirinç	17	8,53	1,99

Deneyde tamburun hızı artıkça, ölçülen kuvvetin de arttığı Şekil 7'de görülmektedir. Örneğin 50x30 mm alüminyum malzeme ayırıştırılırken mıknatıslı tambur 900 d/d ile döndürüldüğünde ölçülen kuvvet 3,73 N iken, 2400 d/d hızda ölçülen kuvvet 11,87 N dur. Mıknatıslı tamburun hızı artıkça değişken manyetik alanın frekansı arttığı için Faraday yasasına göre oluşan eddy akımının genliği ve dolayısıyla etkiyen kuvvet de artmaktadır.

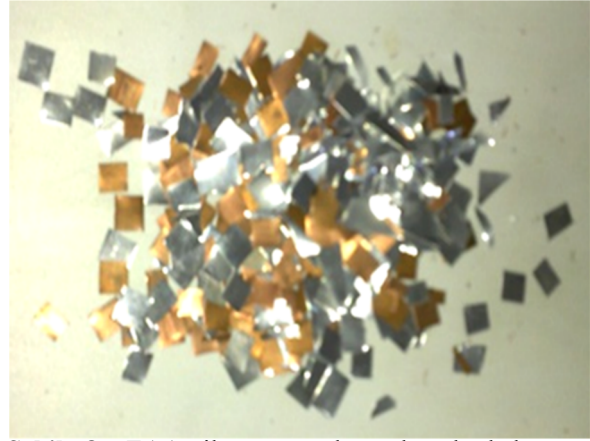
İkinci deneyde Eddy akımı ayırıştırıcısının verimine yönelik testler yapılmıştır. Bu deneyde karışım halinde 2 kg ağırlığında, 5-10 mm'den 50-100 mm'ye kadar farklı boyut ve biçimlerdeki alüminyum, bakır ve pirinç malzemeleri ayırıştırılmıştır. Tablo 3'de Eddy akımı ayırıştırıcısı prototipinin farklı çalışma hızlarında elde edilen verimi gösterilmektedir. Bu uygulamada mıknatıslı tamburun dönüş hızının 1200 d/dk ve üzerinde olduğunda, ayırıştırıcının %90 üzerinde bir verimle çalıştığı görülmektedir [11].

Tablo 3. Eddy akımı ayırıştırıcısının verimi (Efficiency of Eddy current separator)

Tambur Hızı (d/dk)	Ayırıştırılan Metal	Kayıp Metal	Ayırıştırılan Toplam Malzeme	Verim
900	1300 g	200 g	1800 g	%90
1200	1330 g	170 g	1830 g	%91,5
1500	1380 g	120 g	1880 g	%94
1800	1420 g	80 g	1920 g	%96
2100	1420 g	80 g	1920 g	%96
2400	1440 g	60 g	1940 g	%97

Burada düşük hızlarda ayırıştırılmayan ve kayıp metal olarak nitelendirilen 5-10 mm boyutlarında küçük bakır ve alüminyum parçacıklarıdır. Küçük boyutlarda değerli metallere en verimli şekilde ayırıştırılması için, mıknatıslı tamburun dönüş hızının 1500 d/d ve üzerinde olması gerektiği görülmüştür. Daha düşük ebatları parçacıkları ayırıştırılması için bantın taşıdığı malzeme miktarı, bant dönüş hızı ve mıknatıslı tamburun dönüş hızının ayarlanması gerekmektedir. Yapılan prototipte, konveyör bant hızı

0.2 m/s olarak redüktör ile sabitlenmiştir. Ayırıştırıcı bu şartlarda yüksek verimde ayırıştırma yapabildiği için bu hız yeterli kabul edilmiştir. Ayırıştırıcının mekanik sınırlarından dolayı 2400 d/d den daha yüksek tambur hızlarında deney yapılamamıştır. Granül halindeki malzemelerin ayırıştırılması daha yüksek hızlarda mümkündür. Küçük boyuttaki parçacıkların ayırıştırılabilmesi için ayrı bir deney yapılmıştır. Bu deney ile 1500 d/d'dan daha yüksek hızlarda 5-10 mm boyutlarında alüminyum ve bakırdan oluşan malzemelerin ayırıştırılabilmesi sağlanmıştır. Ayırıştırılmış küçük malzemeler Şekil 8'de görülmektedir [11].



Şekil 8. EAA ile ayırıştırılmış küçük bakır ve alüminyum parçacıklar (Small copper and aluminium particles which are separated by ECS)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Atıklar içerisinde demir içermeyen (ferromanyetik olmayan) değerli metallere ayırıştırabilen bir prototip EAA üzerinde laboratuvar ortamında deneyler yapılarak, ayırıştırma sırasında malzeme üzerinde oluşan ayırıştırma kuvveti, ve ayırıştırma verimi incelenerek küçük parçacıkların ayırıştırılması test edilmiştir. Bunun için belirli ebatlarda hazırlanmış bakır, alüminyum ve pirinç gibi test malzemeleri üzerinde oluşan fırlatma kuvvetleri bir deney düzeneği içerisinde dinamometre ile ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda malzemedan ve ayırıştırıcıdan kaynaklanan etkenlerin ayırıştırma kuvvetini belirleyici olduğu deneylerle doğrulanmıştır. Malzemenin cinsi, biçimi, elektriksel iletkenliği, öz kütlesi, boyutları malzemedan kaynaklanan etkilere, Yoğunluk başına iletkenliği daha yüksek olan malzemelerin daha kolay bir şekilde ayırıştırıldığı test edilmiştir. Tambur ve malzeme arasındaki hava aralığı, mıknatıslı tamburun hızı, mıknatısların manyetik alan şiddeti ve kutup sayısı ayırıştırıcının tasarımından kaynaklanan ve kuvveti etkileyen faktörlerdir. Tamburun hızı ve kutup sayısı Faraday yasasındaki $d\phi/dt$ 'den dolayı malzemedan oluşan eddy akımının genliğini artırmaktadır. Böylece Ampere yasasına göre bu akımdan dolayı oluşan manyetik alanın artışı Biot-Savart kanununa göre malzemedan oluşan fırlatma kuvvetini artırmaktadır. Deneyler

sırasında mıknatıslı tamburun hızı 900-2400 d/d hızları arasında değiştirilerek, ayırıştırılan test malzemeleri üzerindeki kuvvetler ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hız arttıkça itme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Böylece tambur hızının Eddy akımının genliğine ve malzemede oluşan kuvvete olan etkisi belirlenmiştir. 50x40, 50x30 ve 50x20 mm ebatlarındaki bakır, alüminyum ve pirinçten oluşan test malzemeleri ile yapılan deneylerde, manyetik alana maruz kalan malzeme yüzeyi küçüldükçe oluşan kuvvetin azaldığı görülmüştür. Malzeme boyutunun küçülmesi ile indüklenen Eddy akımı azalmaktadır. Akımın azalması ile malzemede oluşan manyetik alan da azalarak ayırıştırma kuvvetinin düşmesine neden olmaktadır. Malzemeler küçüldükçe ayırıştırmanın zorlaştığı bu deneylerden anlaşılmaktadır.

Sistemin verimine yönelik yapılan deneylerde, mıknatıslı tamburun dönüş hızının ayırıştırılan malzeme miktarına etkisi olduğu tespit edilmiştir. Prototipin mıknatıslı tamburu yaklaşık 900-1200 d/d hızlarında çalıştığında, ayırıştırma verimi %90 civarında olup 5-10 mm boyutlarında küçük parçacıklar yeterince ayırıştırılamamıştır. Tambur hızı 1500 d/d ve üzerindeki ayırıştırma elde edilen verim %94'ün üzerindedir ve küçük parçacıklar büyük ölçüde ayırıştırılabilmektedir. Ayrıca konveyör, bant yüzeyine düzgün dağılmamış yığın halinde atık malzeme taşıdığı, ayırıştırma veriminin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle malzemelerin bant üzerine düzgün olarak dağıtılması gerekmektedir. Bunun için uygun bir yükleyici ya da vibratör kullanılması önerilmektedir.

Deneylerde alınan verilere göre yapılan prototip genel olarak 5-10 mm'den büyük ferromanyetik olmayan değerli metalleri, %90'nın üzerinde bir verimle ayırıştırılabilmektedir. Yapılan eddy akımı ayırıştırıcısı prototipinde, konveyör bantın hızı 0,2 m/s olarak sabit tutulmuştur. Bantın hızlı olması durumunda malzeme daha kısa süre içerisinde tamburun alanına maruz kalacağı için ayırıştırılacak değerli metaller üzerinde eddy akımı ve kuvvet oluşumunu olumsuz etkileyecektir. Ancak büyük malzemelerde bant hızının belirli bir değere kadar artması büyük malzemelerin ayırıştırılmasında verime etkisi dikkate değer olmayacaktır. Banttaki hız değişikliği birim zamanda ayırıştırılacak malzeme miktarını etkileyecektir. Öngörülen ayırıştırıcı ile endüstriyel atıkların bol bulunduğu talaşlı üretim yapan imalat sektöründe ve evsel atıkların daha çok bulunduğu belediyelere ait çöplüklerde atık halde bulunan alüminyum, bakır, pirinç gibi değerli metallerin ayırıştırılarak hammadde üretimine geri dönüşümü sağlanabilir. Bu şekilde geri dönüşümle değerli metallerin geri kazanılması ile hammadde tedariğine, ekonomiye, doğal kaynakların tüketiminin azalmasına, enerji tasarrufuna ve çevreye önemli katkıları olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2012/62 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dobney, S.J., "Eddy Current Separators", **IEE Colloquium on Permanent Magnet Machines and Drives**, London, Cilt 9, 1-3, 5 Şubat 1993.
2. Lungu, M., Rem, P., "Eddy-Current Separation of Small Nonferrous Particles By A Single-Disk Separator with Permanent Magnets", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 39, No 4, 2062-2067, 2003.
3. Fenercioğlu, A. ve Kurt, Ü., "Manyetik Olmayan İletken Malzemelerin Ayırıştırılmasında Eddy Akımı Yönteminin Kullanılması ve Alüminyumun Geri Kazanılması Örneği", **UMES 2007**, Kocaeli, Cilt 2, 712-715, 20-22 Haziran 2007.
4. Zhang, S., Rem, P.C. ve Forssberg, E., "Particle Trajectory Simulations Of Two-Drum Eddy Current Separators", **Resources Conversation & Recycling**, Cilt 26, 71-90, 1999.
5. Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B., Moss, W., "Separation Mechanisms and Criteria of A Rotating Eddy-Current Separator Operation", **Resources Conversation & Recycling**, Cilt 25, 215-232, 1999.
6. Wang, Q., Zhao, Y., Jiao, H., Zhang, H., "Effects of Operation Parameters of Eddy Current Separator on Aluminium Separation", **7th World Congress on Recovery, Recycling and Re-integration**, Pekin, Çin, 2005.
7. Hacıfazlıoğlu, H., "Manyetik Ayrımadaki Son Gelişmeler ve Alternatif Manyetik Ayırıcı Tiplerinin Tanıtılması", **İstanbul Yer Bilimleri Dergisi**, Cilt 24, No 1, 75-93, 2011.
8. Svoboda, J., **Magnetic Techniques for the Treatment of Materials**, Kluwer Academic Publishers, A.B.D., 2004.
9. Rem, P., Beunder, E.M. ve Akker, A.J., "Simulation of Eddy-current Separators", **IEEE Transaction on Magnetics**, Cilt 34, No 4, 2280-2286, 1998.
10. Zhang, S., Rem, P.C. ve Forssberg, E., "The Investigation of Separability of Particles Smaller Than 5 mm By Eddy-Current Separation Technology, Part I: Rotating Type Eddy-Current Separators". **Magnetic and Electrical Separation**, Cilt 4, 233-251, 1999.
11. Kartal, A., "Değerli Metallerin Eddy Akımı Yöntemiyle Ayırıştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

