

TEKNOFEST

HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ
FESTİVALİ

ÇEVRE VE ENERJİ TEKNOLOJİLERİ YARIŞMASI

PROJE DETAY RAPORU

TAKIM ADI: Geleceğin Sesi

PROJE ADI: METALLERİN TİTREŞİMLERİNİN YAYDIĞI SES DALGALARINDAN YARARLANILARAK METALLERİN KENDİLERİNE ÖZGÜ FREKANSLARININ KEŞFEDİLİP KİMLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

BAŞVURU ID: 419896

İÇİNDEKİLER

1. Proje Özeti.....	1
2. Problem/Sorun.....	2
3. Çözüm.....	2
4. Yöntem.....	4
5. Yenilikçi ve İnovatif Yönü.....	9
6. Uygulanabilirlik.....	9
7.Tahmini Maliyet ve Zaman Planlaması.....	10
8.Proje Fikrinin Hedef Kitlesi.....	10
9.Riskler.....	11
10.Kaynakça.....	12

PROJE ÖZETİ

Bu çalışmada elementlerin tayin edilmesi yolunda farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Daha önce kullanılan yöntemlerin yetersiz kaldığı noktaları kapatmak ve alternatif bir analiz yöntemi sunmak için element tayinine farklı bir bakış açısıyla yaklaşarak ses dalgalarından yararlanılmıştır. %99,47 saflıkta Cu, Al ve Zn elementlerinden oluşan metal plakalar, kurulan deney düzeneğine sabitlenerek her birine servo yardımıyla stabil bir biçimde vurulmuştur. Plakalardan çıkan sesler kayıt edilerek geliştirdiğimiz bilgisayar programı tarafından frekansları analiz edilmiştir. Sistemin işleyiş mantığı plakalara sabit hızla vurularak çıkan sesin kaydedilmesine dayanır. Sonrasında elde edilen sesler analiz edilerek hangi plakanın hangi elementi içerdiği tespit edilir.

Her üç elemente (Cu, Al, Zn) ait plakadan kırkar farklı ses örneği alınarak her bir elementin eğilimli olduğu frekans değerleri gözlemlenmiştir. Zn elementinin %100 oranla 52 Hz frekansında yoğunlaşan ses dalgaları yaydığı, Al elementinin %97,5 oranla 94-96 Hz frekans aralığında yoğunlaşan ses dalgaları yaydığı, Cu elementinin %100 oranla 28-30 Hz frekans aralığında yoğunlaşan ses dalgaları yaydığı tespit edilmiştir. Böylece her bir elementin özel, parmak izi frekansları olduğu ortaya konulmuştur. Elementlerin tanımlanması sürecinde gerek ekonomik açıdan yük getiren gerekse sağlık açısından tedbir alınmasını gerektiren ve ayrıca bazı elementleri yeterli doğrulukta tanıyamayan XRF benzeri yöntemlere bir alternatif olarak ses dalgalarının element tayini işleminde kullanılabileceği gösterilmiştir. Son olarak çalışmanın hangi yönlerde geliştirilmesi gerektiğine ilişkin öneriler sunulmuştur.

PROBLEM / SORUN

Elementlerin tanımlanması ve analizi günümüze dek atomik düzeydeki özellikler kullanılarak yapılmıştır. Yaptığımız çalışma bu yöntemlere farklı bir açıdan bakarak elementlerin yaydıkları sesin frekansından yararlanmaktadır. XRF ve benzeri yöntemlerin getirdiği problemlere çözüm bulmak için “Acaba elementlerin çıkardığı seslerin frekansları birbirinden farklı mıdır?” sorusu etrafında bir deney planlanıp sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Projenin temel amacı, metallerin tanınması ve analiz edilmesinde ekonomik ve orijinal bir yöntem sunmaktır. Bu projenin sonraki aşamalarda alışımların içeriğinin analiz edilip yüzde olarak sonuçlara dökülmesi hedeflenmektedir. Yapılan araştırmalarda analiz, tayin ve ayırt edilme işlemlerinin maliyetli çalışmaları gerektirdiği fark edilmiştir. Metallerin tayin edilmesinin ve birbirinden ayırt edilebilmesinin bu özgün yolunda yalnızca metale vurulması ve çıkan sesin kaydedilmesi gerekli olduğundan dolayı maliyeti düşürmek konusunda başarılı bir sonuca varılmıştır. Atomik düzeyde bir müdahale veya işlem gerekmeden metallerin kimlikleri ortaya çıkarılabilmektedir.

Modern jeolojide elementlerin kimliklerinin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasında fiziksel özellikleri kullanma (sertlik, parlaklık, renk, çizme, özgül ağırlık, klivaj ve çatlama, saydamlık, tat, asit reaksiyonu, manyetizma, kristal şekli) [1], atomik spektroskopi, XRF (X-Ray Fluorescence), PIXE (Particle-induced X-ray emission), XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy), Auger elektron spektroskopisi ve kimyasal metotlar yer alır. Bu yöntemler arasında popüler olan ve yüksek hassasiyetle element tayini yapan XRF cihazı, alınan örneğe X-ışınları gönderir ve atomu uyarır. Elektron temel hale geri dönerken foton yayar. Her atomun enerji seviyeleri kendisine özgü olduğundan salınan enerji atomun kimliğini belirler. [2]

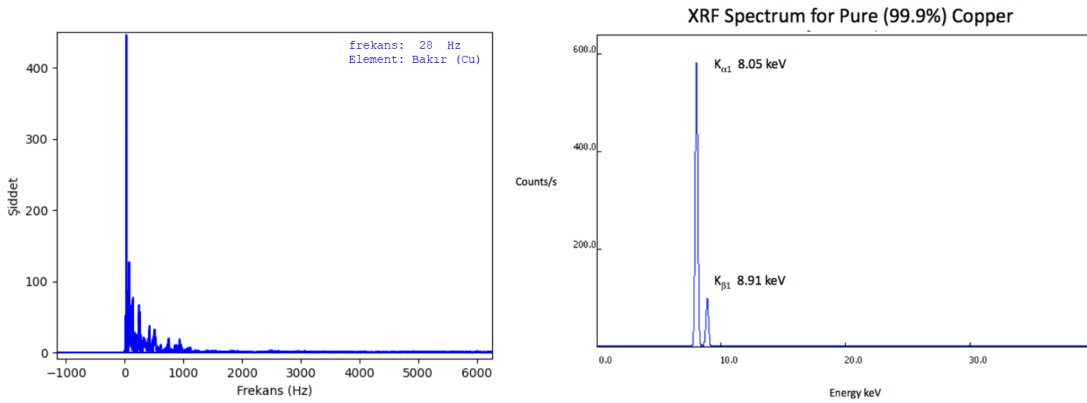
XRF, günümüzde kullanılan en popüler yöntem olmasına karşın birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan biri belli bir doz limiti üzerinde iyonize edici radyasyon olan X-ışınlarının insan sağlığına olumsuz etkiler yaratmasıdır. [3] Buna ek olarak XRF cihazı fiyatları 15000 dolar ve 40000 dolar arasında değişen pilleri 3000 dolar civarındadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda XRF ve benzeri yöntemlere alternatif bir çözüm arama ihtiyacı doğmuştur. Bu çözümün insan sağlığını tehlikeye atmayan, ekonomik ve incelenen örneklerde bozunmaya neden olmayan bir yöntem olmasına dikkat edilmiştir.

ÇÖZÜM

Bu çalışmada ses dalgalarından yararlanılarak elementlerin ayırt edilebileceği hipotezi ortaya atılmıştır. Bu yöntem araştırılırken metallere odaklanılmıştır. Geliştirilen yöntem sayesinde üzerinde çalışılan örnekler sabit bir hızla vurularak çıkan sesin kayıt altına alınıp frekans analizinin yapılması elementin tanımlanması için yeterli olmuştur. Deneyde kullanılacak metaller seçilirken Marmara Üniversitesi Fizik Bölümü ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki farklı akademisyenlerle görüşülmüştür. Görüşmelerin ardından örnek olarak Zn, Al ve Cu metalleri

deneyde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu üç matelden aynı boyutlarda plakalar kesilerek deney düzeneğine sabitlenmiş ve bir servo motor yardımıyla her birine eşit kuvvetle vurularak çıkardıkları seslerin frekans analizi yapılmıştır.

Her metalin fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklıdır. Elementlerin proton sayılarının farklı olması, elektronlarının etkili olduğu sahanın farklı olmasına sebep olur. Bunun sonucunda atomlar farklı biçimlerde bir araya gelerek farklı yapılar oluştururlar. Atomların istiflenme biçimi metallerin fiziksel özelliklerini belirler. [4] Bu deneyde kullanılan Al ve Cu elementlerinin istiflenme biçimi (kübik sıkı istifli metal) [5] aynı olmasına rağmen farklı frekanslarda titreşmişlerdir. Dolayısıyla frekans farkının yalnızca istiflenmeye bağlı değil aynı zamanda atomların bireysel yapılarına da bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Grafik Seti - 1

Deney sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılarak plakaların çıkardığı seslerin şiddet-frekans grafiği yazdığımız program tarafından çizilmiş ve metaller ayırt edilmiştir. Yukarıdaki grafiklerde bakır ses frekans analizi (solda) ve XRF sonucu (sağda) gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ses analizinde oldukça belirgin bir frekans değeri öne çıkmaktadır. (Grafik Seti - 1)

Tartışma

Yapılan deneyler neticesinde sabit koşullarda her bir metalin kendine has bir frekans aralığı olduğu saptanmıştır. Ayrıca sunulan yöntem ile element tanımlama ve analiz etmeye bambaşka bir bakış açısıyla yaklaşmıştır. Atomik düzeyde inceleme veya müdahalelere gerek kalmadan ses dalgası kullanılarak analiz yapılmasına olanak sağlanmıştır. Bulunan yeni tanımlama yöntemi sayesinde en ucuz şekilde element tanıma ve analiz etme işleminin gerçekleştirilmesi yolunda ilerleme kaydedilmiştir.

Ele	% I	$\pm 2\sigma$
Al	48.33	3.52
Mn*	16.26	2.31
Fe*	9.88	1.43
Cu*	8.60	1.88
Si	4.95	0.99
Zn*	4.52	0.99
Nb	2.35	0.53
Mo	1.75	0.42

Şekil - I

Deneyin son aşamasında, %75 alüminyum içerdiği bilinen bir plaka, XRF cihazı kullanılarak analiz edilmiştir. XRF cihazının verdiği sonuç %48.33 olarak kaydedilerek alüminyum elementi üzerinde hata payının olduğu kanıtlanmıştır (Şekil - I). Bu gözlemin ardından %75 alüminyum içeren aynı plaka ses frekansı ile analiz edilmiştir. Sonuçların saf alüminyumdan farklı bir frekans değerinde (~65 Hz) olduğu görülerek plakanın saf olmadığı anlaşılmıştır. Buradan yola çıkılarak alaşımların analiz edilmesinde de ses frekans yönteminin kullanılabileceği fikri doğmuştur.

YÖNTEM

Deney düzeneği kurulup çalışmaya başlanmadan önce problem, hipotez; sabit tutulan, bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Bu sayede deney optimum kontrol seviyesinde yapılmıştır.

Problem: Saf metaller çıkardıkları ses frekansı sayesinde tanınabilir mi?

Hipotez: Sabit bir düzenek kurulduğu zaman, farklı metallerin çıkardığı sesin frekans değeri farklı olacak ve tanınabilecektir.

Bağımlı Değişken: Kaydedilen sesin frekansı

Bağımsız Değişken: Metalin cinsi

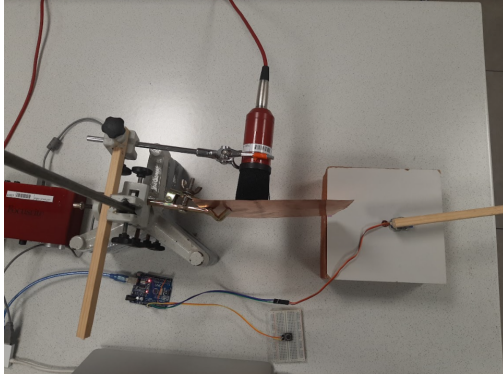
Sabit tutulan değişken: Mikrofon uzaklığı, ortam sessizliği, levha boyutları, vuruş hızı

Deneyde kullanılan materyaller:

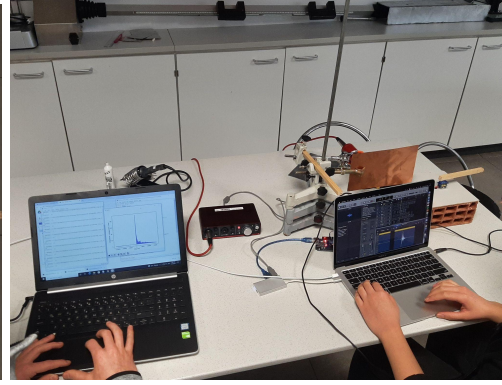
- 1) **Saf Al, Cu ve Zn levhalar:** 20x13x0,5 cm ölçülerinde üç farklı elemente ait saf (%99,47) plaka kesilmiştir
- 2) **Metal kola kutusu:** Saf olmayan metallerin ölçümünü test etmek yolunda plakalarla aynı ölçülerde kesilip önce XRF, daha sonra ise kurulan deney düzeneği ile ölçüm yapılmıştır.
- 3) **Focusrite mikrofon ve 2i2 Ses Kartı:** Okulun müzik bölümünden temin edilmiştir.
- 4) **Logic Pro X:** Ses kayıtlarının yapılmasında ve dijital ses iş istasyonu (DAW) olarak kullanılmıştır.
- 5) **Sabitleyici ayak:** Okulun fizik laboratuvarından temin edilmiştir. Levhaların sabitlenmesinde kullanılmıştır.
- 6) **XRF cihazı:** Marmara Üniversitesinden metal levhaların saflığını ölçmek için temin edilmiştir. Cihaz, element içeriklerini yüzde olarak vermektedir.
- 7) **Arduino, servo ve buton:** Plakalara stabil bir şekilde vurmak amacıyla butona basıldığında eşit hızla dönen bir servo düzeneği kurulmuştur. Malzemeler okulun bilgisayar laboratuvarından alınmıştır.
- 8) **Yazdığımız bilgisayar programı:** Çıkan sesin frekansını analiz edebilmek için python dilinde yazılmıştır.

Deney Düzeneği

Metal plakaların içerdiği elementleri tanıyabilmek amacıyla Şekil - I'deki düzenek hazırlanmıştır. Düzenekte okulumuzun fizik laboratuvarından aldığımız destek ayak üzerine iki sabitleyici kaskaç monte edilmiştir; biri mikrofonu sabitlerken diğeri levhayı Arduino kullanılarak butona basılınca her seferinde aynı hızla dönen bir servo düzeneği kurulmuştur. Servo, dikdörtgenler prizması şeklindeki bir tahta bloğun üzerine silikonlanmıştır. Servonun üst kısmına tahta çubuk sabitlenmiştir. Mikrofon, sesi en temiz ve doğru şekilde elde edebilmek için focusrite scarlett 2i2 ses kartına bağlanmıştır. Ses kartından alınan ses bilgisayara gönderilip dijital ses işleme istasyonu olarak kullandığımız Logic Pro X' a



Şekil - II



Şekil - III

yönlendirilmektedir. Ses işleme istasyonu sesi doğru formatta kayıt altına alabilmek için kullanılmıştır. Alınan kayıt, yazdığımız programa aktarılarak program tarafından frekansı analiz edilmiştir. Temin edilirken saf olduğu bilinen Cu ve Zn plakalar Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesindeki XRF cihazı ile onaylanmıştır. Ancak alüminyumun atom numarası 13 olduğundan girişte belirtildiği gibi XRF cihazı tarafından yeterli ölçüde tanımlanamamıştır. (Şekil - IV)

Ele	%	±2σ
Zn	99.47	0.51
Si	0.352	0.051
Nb	0.083	0.012
Mo	0.047	0.014
Fe	0.017	0.008
Zr	0.013	0.005

(Zn plakaya ait XRF sonucu)

Şekil - IV

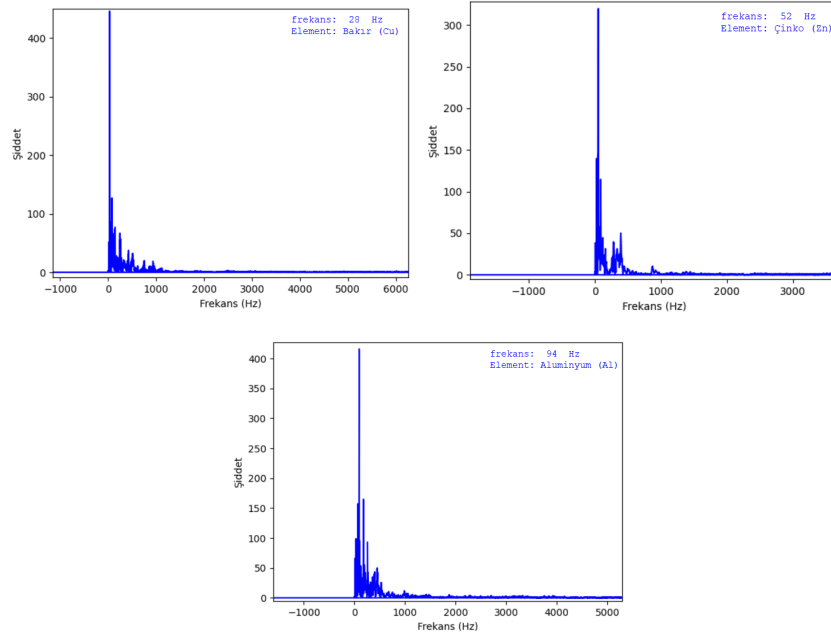
Deney düzeneği kurulduktan sonra eşit ölçülerdeki levhalar sırayla düzeneğe sabitlenmiştir. İlk olarak Al elementi üzerinde test yapılmıştır. Butona basılarak servonun dönmesi sağlanmış ve bu eylem aralıklarla 40 kez tekrarlanmıştır. Sonrasında saf Cu ve Zn içeren levhalar ile deney devam edilerek aynı işlem tüm levhalara yapılmıştır. Tutarlılığın test edilmesi amacıyla düzenek bozulup tekrar kurularak birkaç kez aynı işlem tekrarlanmıştır. Sesler kaydedilip yazdığımız program ile frekanslar analizleri yapıldığında her elementin tutarlı biçimde her seferinde kendine özgü frekansta ses dalgaları yaydığı gözlenmiştir, bu konudaki detaylar “BULGULAR” bölümünde açıklanmıştır.

Bulgular

Eşit ölçülerdeki saf (%99,47) Cu, Zn ve Al elementlerin analiz edilmesi sonucunda, Zn elementinin 52 Hz, Al elementinin 94 Hz, Cu elementinin 30 Hz frekansında ses dalgası yaymaya meyilli olduğu sonucuna varılmıştır. (Grafik seti -II) Tablo I 'den görülebileceği gibi, üzerinde çalışma yapılan her bir element plakasının farklı bir frekans aralığında, tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Elementler	Tüm değerler (Hz)	Ortalama Değer
Al	94 Hz (30 kez) - 96 Hz (9 kez) - 68 Hz (1 kez)	93.80 Hz
Cu	30 Hz (33 kez) - 28 Hz (7 kez)	29.65 Hz
Zn	52 Hz (40 kez)	52 Hz

Tablo I: Al,Cu ve Zn elementlerinden oluşan plakaların servo ile vurulması sonucunda meydana getirdikleri frekans değerleri



Grafik seti - II

(Grafikler yazdığımız program tarafından çizdirilmiştir)

Araştırma sonucunda XRF ve benzeri element tayin ve analizi yöntemlerine alternatif ve tercih edilebilir bir yöntem geliştirilmiştir. Metallerin birbirinden ayırt edilmesi ve tanınması yolunda yaydıkları seslerin frekansından yararlanılabileceği ortaya atılmıştır.

Bilgisayar Programı:

Yazdığımız program, kayıt altına aldığımız ses dosyasını dalga formundan, frekans formuna çevirirken FFT kullanmaktadır [6]. Python 3.8’de yazdığımız program, “scipy, pylab, matplotlib, numpy, soundfile” kütüphanelerinden yardım almaktadır.

```
from scipy import arange
import pylab
import matplotlib
import numpy, scipy
import soundfile

matplotlib.use('tkagg')

file_path = 'TUBITAK_deneysel/Zn#6.wav'

ses_ornekleri, rate = soundfile.read(file_path, dtype='int16')
ornek_sayisi = len(ses_ornekleri)

#kesitlerden elde edilen frekansların listesi
frekans_deger_listesi = numpy.arange(ornek_sayisi) * rate/ornek_sayisi

#FFT verilerinin hesaplanması
fft_verisi = scipy.fft.fft(ses_ornekleri)

#Sesteki yansımayı engellemek için
frekans_deger_listesi = frekans_deger_listesi[range(ornek_sayisi//2)]
islenmis_veri = fft_verisi/ornek_sayisi
siddet_degerleri = islenmis_veri[range(len(fft_verisi)//2)]
siddet_degerleri = numpy.abs(siddet_degerleri)

#Grafik çizimi
x_ekseni_verileri = frekans_deger_listesi
y_ekseni_verileri = siddet_degerleri

#En yoğun frekansı belirlemek
max_y = max(siddet_degerleri) # maksimum y degerinin bulunması
maksimum_degerin_indeksi = numpy.where(max_y == y_ekseni_verileri)
max_x = frekans_deger_listesi[maksimum_degerin_indeksi] # maksimum y degerine denk gelen x degerinin bulunması
frekans_degeri = int(max_x) + 0.5
print("Frekans: ", round(frekans_degeri), " Hz")

#Elementi tanımlamak
if frekans_degeri <= 100 and frekans_degeri >= 89:
    print("Element: Alüminyum (Al)")
elif frekans_degeri <=35 and frekans_degeri >= 25:
    print("Element: Bakır (Cu)")
elif frekans_degeri <= 58 and frekans_degeri >=48:
    print("Element: Çinko (Zn)")

pylab.plot(x_ekseni_verileri, y_ekseni_verileri, color='blue')
pylab.xlabel('Frekans (Hz)')
pylab.ylabel('Frekans Şiddeti')
pylab.show()
```

Şekil - V

Program, belirtilen ses dosyasını açtıktan sonra küçük parçalar halinde sesi analiz ederek scipy (<https://docs.scipy.org/doc>) yardımıyla FFT dönüşümünü gerçekleştirir. Sonrasında elde edilen verileri grafiğe dökerek baskın frekansı ortaya çıkarır. Yaptığımız analizler sonucunda elementlerden elde ettiğimiz verilere göre “Elementi tanımlamak” adlı bölüm eklenerek, programın elementi tanıyıp ekrana yazdırması sağlanmıştır. Kodun tamamı Şekil-V de gösterilmiştir.

YENİLİKÇİ (İNOVATİF) YÖNÜ

Geliştirilen proje, tayin ve analiz sürecine farklı bir boyut kazandırarak ses frekansını kullanmıştır. Diğer yöntemler gibi atomik düzeyde müdahale ve ölçüm yapmaya ihtiyaç duymayan bu yolun yalnızca ses frekansını kullanmasının yeterli olması projemizin özgün yanlarından biridir. Ayrıca araştırma yapılırken Python dilinin kullanılması ve FFT yöntemi ile frekansın belirlenmesi, yenilikçi bir analiz elde edilmesini sağlamıştır.

UYGULANABİLİRLİK

Ekonomik olarak çok az maliyeti olması sistemimizin uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu sayede projemiz element tayini ve analizini daha erişilebilir kılmaktadır. Projemizde kullanılan deney düzeneği daha taşınabilir bir sistem olarak geliştirilip kullanımı diğer sistemlere kıyasla daha basittir. Aynı zamanda deney sonucunda elde ettiğimiz verilerle birlikte projemizin prensibini kullanan daha geniş çaplı metal analizi yapan cihazlar üretilebilir. Ses frekansıyla element tayini yapılması hiçbir sağlık riski taşımadığından dolayı ekstra koruyucu önlemlerin alınması ihtiyacı yok olmuş olur.

TAHMİNİ MALİYET VE ZAMAN PLANLAMASI

İşin Tanımı	Aylar (2021-2022)						
	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat	Mart	Nisan
Yöntemin Belirlenmesi	x	x	x	x			
Literatür Taraması		x	x	x	x	x	x
Laboratuvar Çalışması					x	x	x
Verilerin Değerlendirilmesi				x	x	x	x
Proje Raporu							x

Geliştirdiğimiz proje sistematik bir biçime getirildiğinde yaklaşık olarak 200 \$ lik maliyeti olacağı hesaplanmıştır. Sistemin kurulması için yalnızca tutucu bir ayak, mikrofon ve sabit hızla vuran bir sistem gerektiği için maliyeti oldukça düşüktür. XRF gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında bu oldukça düşük bir bütçeyle bu işi gerçekleştirmek anlamına gelir. Sistemimiz 200 \$ ile profesyonel bir biçimde kurulabilecekken XRF cihazının maliyeti 15.000 - 40.000 \$ arasında değişmektedir.

PROJE FİKRİNİN HEDEF KİTLESİ

1. Geri dönüşüm uygulamalarında metal ve alaşımların en doğru ve en ucuz biçimde gruplandırılarak kaynak kaybının önüne geçilmesi konusunda ses frekansının kullanılması için çalışmalar yapılması önerilmektedir.
2. Kuyumcu ve müşterilerin, metal alışverişlerini güvenli bir şekilde yapabilmesi için metallerin tayininde bu yöntem önerilmektedir.
3. Görme engellilerin metal ayırma ve gruplandırma benzeri iş kollarına katılımının sağlanması hedefiyle bu yöntemin geliştirilerek kullanılması önerilmektedir.
4. Farklı kompozisyonlara sahip, saf olmayan metal ve alaşımların analiz edilmesi üzerine araştırma yapılması önerilmektedir.

RİSKLER

Metallerin tayini ve analizinde kullanılan bu yöntem uygulanabilir olmasının yanında bazı küçük riskler de getirmektedir. Ses kaydına dayanan bir sistem olmasından dolayı ortamın oldukça sessiz olması doğru bir analiz için şarttır. Başka seslerin alınan kayda karışması durumunda alınan kaydın ses frekansı doğru bir şekilde tanınmayacaktır. Bu elementin yanlış tayin edilmesine sebep olabilir.

KAYNAKÇA

Van Grieken & Injuk. (1998). CURRENT APPLICATIONS OF XRF AND MICRO-XRF TECHNIQUES IN ENVIRONMENTAL AND INDUSTRIAL FIELDS. Industrial and environmental applications of nuclear analytical techniques, 29-38.

<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20024919>

Earth Materials - MINERAL IDENTIFICATION (2020). OpenGeology

<https://opengeology.org/historicalgeology/tools-of-historical-geology/earth-materials-mineral-identification>

[1] Using Characteristics of Minerals to Identify Them (2022). Illinois State Geological Survey

<https://isgs.illinois.edu/outreach/geology-resources/using-characteristics-minerals-identify-them>

[2] Brouwer, P. (2010). Theory of XRF. Indian Institute of Science Education and Research

Bhopal <https://home.iiserb.ac.in/~ramyasr/files/Manuals/XRF.pdf>

[3] Generic Risk Assessment for XRF Analyzers (2018). University of Edinburgh

<http://www.docs.csg.ed.ac.uk/Safety/rpu/ra/ra8.pdf>

[4] Structures of Metals (2003). University of Washington Departments Web Server

https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/Metals/metalstructure.htm

[5] The Structure of Metals (1999). Purdue University

<https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch13/structure.php>

[6] Fast Fourier Transform (2022) ScienceDirect

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fast-fourier-transform>

XRF Spectrum Copper (2016) XRF Research, Inc.

<http://www.xrfresearch.com/xrf-spectrum-copper/>

Wu, Keegan & Behan. (2021) Migration analysis of Cr, Ni, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, and Mo in internet-bought food serving stainless-steel utensils by ICP-MS and XRF.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34180783/>

Gu & Li. (2001). Determination Of Fe,Al,Ca In Silicon Metal By XRF Spectrometry

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12945298/>

Nieminen, Niistö & Lappalainen. (1995). Determination of P/Al ratio in phosphorus-doped aluminium oxide thin films by XRF, RBS and FTIR

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01244850>

Ebel H., Ebel M., Svagera R., Heller M. & Kaitna R. (2019). Angle-Dependent XRF For The Analysis Of Thin Al(X)Ga(1-X)As Layers On Gaas And Thin Zn Layers On Steel

<https://www.cambridge.org/core/journals/advances-in-x-ray-analysis/article/abs/angle-dependent-xrf-for-the-analysis-of-thin-alxgalxas-layers-on-gaas-and-thin-zn-layers-on-steel/824893FA53ACED7A3B67055D6BE84FB5>