

# ZEMİN TİTREŞİMLERİ ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ İLE İNSAN HEDEFLERİN TESPİTİ

**Alper ERMIŞ, Ahmet Ayberk YURTTADUR, Tuncay KARAÇAY**

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara.  
[alperermis@hotmail.com](mailto:alperermis@hotmail.com), [karacav@gazi.edu.tr](mailto:karacav@gazi.edu.tr), [a.yurttadur@gmail.com](mailto:a.yurttadur@gmail.com)

(Geliş/Received: 12.05.2014; Kabul/Accepted: 18.11.2014)

## ÖZET

Hareket halindeki insanlar zemin üzerinde birbirlerini takip eden darbeler şeklinde zorlamalar oluştururlar. Darbeler sonucu zeminde bir takım düzensizlikler oluşur ve bu düzensizlikler sonucu oluşan titreşimler darbe kaynağından sismik dalgalar şeklinde yayılırlar. Zeminde oluşan bu titreşimlerinin ölçülmesi ve analizi ile insanların varlığının algılanması ve tespiti mümkündür. Bu çalışmada hedef tespiti amacıyla sismik sinyaller toplanmış ve belirli zaman aralıklarına bölünerek incelenmiştir. Bu sinyallerin ölçülebilmesi için bir deney altyapısı kurulmuş ve belirlenen ölçüm senaryoları dâhilinde bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları zaman ve frekans tanım bölgelerinde analiz edilmiştir. Kullanılan analiz yöntemleri ile insan adımı karakteristiği çıkarılmış, adım kaynaklı darbelerin zeminde oluşturduğu zorlamalar incelenmiş ve farklı yürüyüş stillerinde bir insanın oluşturduğu sismik sinyal bileşenleri tespit edilebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, titreşim analizi ile hedef tespiti ve tanımlaması yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sismik sinyaller, izinsiz girişlerin tespiti, titreşim analizi

## HUMAN INTRUDER DETECTION BY MEASURING AND ANALYSING GROUND VIBRATIONS

### ABSTRACT

People moving on a ground generate a consecutive impact which excites the ground and vibrations spread as seismic waves expanding from the source. Seismic level vibrations could be used to detect human intruders. In this study, ground vibrations are acquired and analyzed by dividing the time history into windowed segments. In order to collect vibration signal an experimental setup is formed and different scenarios are tested. Then, test results are analyzed in time and frequency domain. Tests are exposed the walking characteristics of human as well as ground vibrations propagation components. Results show that human intrusion can be identified by ground vibration measurement and analysis.

**Keywords:** Seismic signals, intruder detection, vibration analysis

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güvenlik uygulamalarında kullanılan yöntemler genel olarak iki başlık altında toplanabilir. Bu yöntemlerden ilki çevreye birtakım sinyal dalgaları göndermek ve bu dalgaların çevre ile olan etkileşimi sonucu geri yansyanlarını analiz ederek hedef tespiti yapmaktır. Aktif tespit teknolojisi olarak adlandırılan bu yöntem, sonar ve radar gibi sistemleri içermektedir. Aktif tespit yöntemleri çevreye yaydıkları dalgalardan dolayı yerleri ve varlıkları kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Ayrıca diğer yöntemlere göre

maliyetleri daha fazladır. Bir diğer yöntem ise ortamda halihazırda bulunan sinyalleri kayıt altına alarak bu sinyaller içerisinden tespit edilmek istenilen hedefe ait olanları kullanma prensibine dayalı pasif tespit teknolojisidir. Akustik, sismik ve kızılötesi sinyal sensörleri bu kategori içerisinde yer almaktadırlar.

İnsan ve araç tespiti çalışmalarında genellikle pasif tespit yöntemleri kullanılmaktadır. Hedef tespit ve sınıflandırma çalışmaları sismik dalgaların analizinin karışık olması nedeniyle akustik, görüntü ve kızılötesi

sinyallerin işlenmesine odaklanmıştır [1]. Sismik dalgalar zemin yapısına bağlı olarak değişik formlarda, hızlarda ve yönlerde yayılmaktadır bu da analizlerinde birtakım zorluklara yol açmaktadır [2]. Sismik sensörler ile insan tespiti yapılabilmesi için sismik dalgalar hakkında bilgi edinilmesi gerekmektedir. Sismik dalgalarla yapılan çalışmalar, yarı sonsuz esnek bir zemin yüzeyinin üzerinde deprem, patlama veya insan adımı sonucu oluşan darbe enerjisinin yaklaşık %70'inin Rayleigh dalgaları tarafından dağıtıldığını göstermektedir. Geri kalan %30 enerjinin ise cisim dalgaları tarafından yeryuvarı içerisine doğru dağıldığı anlaşılmıştır [3]. Bu nedenle zemin titreşimleri ile hedef tespiti amacıyla yapılan çalışmalarda yüzey dalgalarına ve özellikle Rayleigh dalgalarına önem verilmiştir.

Depremler ve volkanik patlamalar sonucu oluşan çeşitli türlerdeki sismik dalgalar üzerindeki araştırmalar, bu sismik dalgaların insan tespiti amacıyla kullanılmasına zemin hazırlamıştır. Sismik dalgaların insan ve taşıt tespiti için kullanılmasına 1990'lı yılların sonunda başlanmış ve 2000'li yıllarda bu konudaki çalışmalar giderek artmıştır.

Sismik dalgaların insan ve taşıt tespiti amacıyla yapılan çalışmalara Succi ve ark. öncülük etmişlerdir. Succi ve ark. bir adet üç eksenli jeofon kullanarak insan ve taşıt tespitini gerçekleştirmişlerdir. Zeminde ilerleyen sismik dalgaların 4 çeşit olduklarını belirtmişlerdir. Sismik dalgaların genel olarak zemin içerisinde hareketleri, yayılma şekil ve hızları hakkında çalışma yapmışlardır [4]. Succi ve ark. bu alandaki diğer çalışmalarında her insan adımının kendini zemindeki diğer gürültülerden ayıran bir karaktere sahip olduğunu ve karakteristik davranışın belirli bir periyotlarla tekrar ettiğini belirtmişlerdir. Önerine çıkan en önemli sorunun bu adım karakteristiğini diğer gürültülerden ayırmak olduğunu görmüşlerdir [5]. Bu bağlamda Tian ve Qi' nin [6] yaptığı çalışmalar elde edilen sismik sinyallerin spektral istatistikler ve dalgacık analizi yöntemleri ile analiz edilmesiyle hedef tespit sistemlerinin performansının ve doğruluk oranının büyük oranda yükseldiğini göstermiştir.

Diğer bir taraftan Pakhomov ve ark. ise yaptıkları ilk çalışmalarda halihazırda kullanılan sismik sensörlerin yanlış alarm oranlarının yüksek olduğunu, çevresel şartlardan (rüzgarda sallanan ağaçlar, taşıt varlığı) etkilendiğini ve en önemlisi sensörlerin bölgeye kurulumu sırasında eğitilmiş personele ve uyulması gereken katı kurallara sahip olduğunu belirtmişlerdir [7]. Güvenilir bir sismik güvenlik ağı kurmak için insan adımı sinyal karakteristiğinin araştırılması gerektiğini belirten ve mevcut sistemlerin neden bu kadar yüksek oranda yanlış uyarı verdiğinin anlaşılmasının önemine dikkat çeken Pakhomov ve ark. ilerleyen çalışmalarında insan adımı karakteristiği üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu amaç doğrultusunda

çeşitli gürültü ve çevresel şartlar altında adım sinyallerinin kurtosisini araştırmışlardır. Birden fazla sensörden alınan veriyi toplayarak tek bir veri haline getirmişler ve bu durumda sinyal içindeki bozucu gürültülerin filtelenmesinin daha zor olduğunu deneylerle göstermişlerdir. Yaptıkları deneylerin birinde çalışan iki taşıtın varlığı durumunda insan adımı tespiti yapmaya çalışmışlar ancak kurtosis yönteminin bu durumda bir işe yaramadığını göstermişlerdir [8,9].

Çevresel şartların ve zeminin hedef tespiti üzerindeki etkilerinin incelenmesinden sonra Pakhomov ve ark. [10,11] araştırmalarını sismik sensörler üzerine yönlendirmişlerdir. Buna göre geliştirilen yazılımlar her ne kadar iyi olursa olsun sensör performansının düşük olmasının hedef tespitini ciddi oranda etkilemektedir. Bir hedef tespit sisteminin başarısını sinyal tespit ve işleme kalitesi belirlemektedir. Yüksek frekanslar söz konusu olduğunda hedef tespiti kolaylıkla yapılırken, sinyal frekansı 10 Hz'den düşük olduğu durumlarda bu durum zorlaşmaktadır. Bu sorunu fark eden Pakhomov [12], pasif ve aktif sensörlerle çeşitli senaryolara bağlı deneyler yapmıştır. Bu deneylerin bir sonucu olarak pasif sensörlerin tespit ve gözlemleme işlemlerinde kullanılması için düşük frekans sinyal işleminin hayati önem taşıdığını aynı şekilde bazı durumlarda aktif sistemlerinde düşük frekanslı sinyal işleme ihtiyacı duyduğunu göstermiştir.

Sismik sensörlerle hedef tespiti konusunda çalışmalar sadece Pakhomov ve ark. ile sınırlı kalmamıştır. Lan ve ark. Sismik sensörler kullanarak arazi şartlarında hareket halindeki bir taşıtı tespit etmek için çalışmalarda bulunmuşlardır. Yapılan bu çalışma sonucunda hedef tespit çalışmalarında, tatminkâr sonuçlar veren düşük güç tüketimli ve küçük boyutlu mikro elektronik – mekanik sensörlerin kullanılması önerilmiştir. Ayrıca bu çalışmalara bağlı olarak tek bir sensör çeşidi ile hedef tespitinde %100 doğruluk oranına ulaşamayacağını, akustik ve manyetik sensörler ile birlikte bir sensör takımının gerek duyulduğunu görmüşlerdir [13].

Mevcut çalışmalarda insan adımı tespiti için çok karışık algoritmalar kullanıldığını ve bu algoritmaların bir genel geçer özelliğe sahip olmadığını, sadece belirlenen şartlarda tespit yapabildiğini belirten Liang ve ark., insan adımı diğer sinyallerden ayırmak için Kurtosis kullanımı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Belirli bir çevre şartı için hazırlanan algoritmaların şartlar değiştiğinde yeniden düzenlenmesi gerektiğini söyleyen yazarlar, bu sorunu çözmek için kurtosis yönteminin kullanılmasını önermişlerdir. Çalışmalarında insan adımının anlık kuvvetler sonucu sinyal oluşturduğunu ve bu özelliği sayesinde diğer sinyal kaynaklarından ayırt edilebileceğini söylemişlerdir. Kurtosisin istatistiksel anlamını inceleyen yazarlar, makalelerinde

insan tespitinde kurtosis kullanımını hakkında detaylar vermişlerdir [14]. Kurtosisin incelenmesiyle hedef tespit etkinliğinin araştırılması için gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, Jin ve ark. [15], insan, hayvan ve taşıt hedeflerin tespiti üzerine bir takım deneyler gerçekleştirmişlerdir ve sinyallerin kurtosis değerlerinin incelenmesiyle bu hedeflerin birbirlerinden ayırt edilebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada hedef tespiti amacıyla insan adımları sonucu oluşan sismik sinyaller incelenmiştir. Bir ölçme ve veri toplama düzeneği kurularak yürüme ve koşma durumlarını kapsayan on iki farklı senaryo dâhilinde testler gerçekleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. Test sonuçları bilgisayar ortamına aktarılmış ve zaman, frekans ve zaman/frekans tanım bölgesi analiz yöntemleri ile hedef tespitine yönelik analizler yapılmıştır.

## 2. TİTREŞİM ANALİZİ İLE HEDEF TESPİTİ TEKNİKLERİ (INTRUDER DETECTION WITH VIBRATION ANALYSIS TECHNIQUES)

Zemin titreşimleri ile hedef tespitinin gerçekleştirilmesi için bu sismik sinyallerin zaman tanım bölgesinde, frekans tanım bölgesinde ve zaman-frekans tanım bölgesinde analiz edilmesi gerekmektedir. Her analiz yönteminin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu bölümde zemin titreşimleri ile hedeflerin tespit edilmesinde kullanılan analiz yöntemlerinden bazıları açıklanmıştır.

### 2.1. Zaman Tanım Bölgesi Analiz Teknikleri (Time Domain Analysis Techniques)

#### *Zirve Zirve Genliği*

Zirve zirve değeri bir sinyalin en yüksek pozitif ve en yüksek negatif genlik değerleri arasındaki fark olarak açıklanabilir. Bu değerin belirli bir anda ölçülmesi hedefin varlığı ya da yokluğu hakkında bilgi vermez, çünkü insan adımı sonucu zeminde oluşan sismik dalgalar anlık olarak oluşmaz [16]. Bu sebeple zirve-zirve değerlerinin belirli periyotlarda incelenmesi gerekmektedir.

#### *Karelerin Ortalamasının Karekökü*

Karelerin Ortalamasının Karekökü (KOK), değişken değerlerin büyüklüğünün ölçülmesinde kullanılan istatistiksel bir ölçüdür. Yani ortalaması sıfır olan bir salınının standart sapması anlamına gelmektedir.  $n$  sayıdaki değişkenin KOK değeri Eş.1 ile hesaplanır;

$$x_{KOK} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (1)$$

#### *Crest Faktörü*

Bir zaman sinyali içerisindeki en büyük değer KOK'a oranı Crest faktörü olarak tanımlanmaktadır (Eş. 2). Titreşim analizinde crest faktörünün incelenmesi zaman sinyali içerisinde ne kadar darbe içeriği olduğu hakkında bilgi verecektir. Zeminde yürüyen bir insanın zeminde belirli periyotlarda darbeler oluşturduğu göz önüne alındığında, crest faktörü değerinin belirli zaman aralıklarında incelenmesi hızlı ve basit bir çözümleme tekniği olarak görülebilir.

$$C = \frac{|x|_{Zirve}}{x_{KOK}} \quad (2)$$

#### Kurtosis

Kurtosis, bir veri grubunun, ortalama değer etrafındaki dağılımını gözlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir ölçüdür. Yani crest faktör gibi, sinyalin darbe içeriğini tespit etmekte kullanılır. Kurtosis matematiksel olarak  $(\text{ortalama})^4 / (\text{KOK})^4$  olarak tanımlandığından darbe içeriğine daha hassastır.

### 2.2. Frekans Tanım Bölgesi Analiz Teknikleri (Frequency Domain Analysis Techniques)

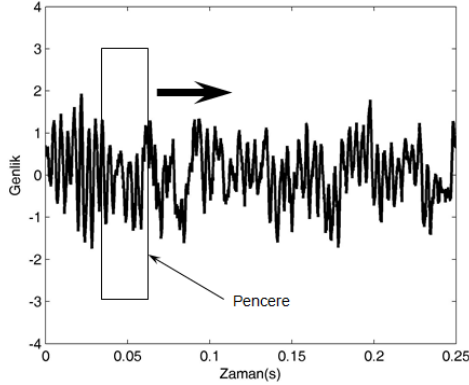
Titreşim analizi uygulamalarının büyük bir çoğunluğunda elde edilen sinyalin frekans bilgisine ihtiyaç duyulur. Sinyallere matematiksel dönüşüm işlemleri uygulanarak, frekans ve genlik bilgileri elde edilebilir.

Sinyaller içerisindeki frekans bilgilerinin elde edilmesi için kullanılan en yaygın metot Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) dür. HFD ile gerçekleştirilen matematiksel dönüşüme frekans spektrumu da denmektedir. Spektrum analizi zemin titreşimleri ile hedeflerin tespit edilmesinde az da olsa kullanılan bir yöntemdir [1, 10, 12]. Ancak zemin titreşim verilerinin ölçülmesi sinyal kalitesinin spektruma oldukça etki ettiği görülmüştür. Özellikle sensörün yerleştirildiği pozisyon ve veri alımı sırasında oluşan gürültü, spektrumun kalitesine ve içeriğine oldukça etki eder [15].

### 2.3. Zaman/Frekans Analiz Teknikleri (Time/Frequency Domain Analysis)

Zemin titreşimi sinyalleri ile hedef tespitinde spektrum analizinin getirdiği zaman bilgisi ve dolayısıyla mesafe bilgisi kısıtlamalarından kurtulmak için sinyalin zamana bağlı spektrumunun elde edilmesi gerekmektedir. Gabor tarafından 1946 geliştirilmiş Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ile frekans içeriğinin zamana bağlı değişimi elde edilebilmektedir [17]. Bu yöntem  $x(t)$  sinyalinin spektrumunun,  $g(t)$  pencere fonksiyonu ile analiz edilmektedir.

KZFD'de pencere fonksiyonu  $t=0$  anında sinyalin başlangıcına yerleştirilir. Pencere içerisinde bulunan sinyale Fourier dönüşümü uygulanır ve pencere sağa kaydırılır. Sinyalin sonuna kadar bu işleme devam edilir (Şekil 1).



**Şekil 1.** Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (Short Time Fourier Transform)

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

Hedef tespitinin açık alanlarda yapılması üzerinde durulduğundan deneyin gerçekleştirilmesi için açık arazi kullanılmıştır. İnsan adımı sonucu oluşan sismik sinyal karakteristiğinin değişimini incelemek amacıyla Tablo 1'de verilen ölçüm senaryoları gerçekleştirilmiştir. Tablodaki "0" (sıfır) noktası

ölçüm için kullanılan sensörün konumunu, eksi ve artı yönler ise sensörden olan aksi istikametlerdeki mesafeyi ifade etmektedir. Analiz sonuçlarının doğruluğunun artırılması için gerçekleştirilen bütün yürüyüş senaryoları aynı yürüyüş yolunda gerçekleştirilmiştir.

Sismik dalgaların analizi için kullanılan ölçme veri toplama sistemi Şekil 2.'de verilmiştir. Ölçüm sistemi ivmeölçer, ivmeölçeri zemine sabitlemek için kullanılan kazık, sinyal koşullandırıcı, bağlantı bloğu, veri toplama kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır.



(a) (b)

**Şekil 3.** (a) Kazık, (b) ivmeölçerin üzerine bağlanması (a) Spike, (b) attaching of the accelerometer)

İnsan adımı sonucu oluşan ve zemine iletilen sismik dalgaları tespit ederek bunları elektrik sinyaline çevirmesi için bir adet B&K 4370V yük tipi ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçeri zemine sabitlemek ve iletilen sismik dalgaları ölçebilmek için Şekil 3'de gösterilen bir metal kazık kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Ölçüm senaryoları (Measurement scenarios)

Test No:	Yürüyüş Mesafesi	Yürüme Modu	Çıkış Değeri ( $V/ms^{-1}$ )	Hedef Cinsi ve Sayısı
Test-1	30m'den 0'a	Yürüme	31,6	1 Erkek
Test-2	0'dan 30m'ye	Yürüme	31,6	1 Erkek
Test-3	-30m'den 30m'ye	Yürüme	31,6	1 Erkek
Test-4	30m'den 0'a	Koşu	31,6	1 Erkek
Test-5	0'dan 30m'ye	Koşu	31,6	1 Erkek
Test-6	-30m'den 30m'ye	Koşu	31,6	1 Erkek
Test-7	-30m'den 30m'ye	Yürüme	31,6	1 Erkek 1 Kadın
Test-8	30m'den 0'a	Yürüme	31,6	1 Erkek 1 Kadın
Test-9	-30m'den 30m'ye	Yürüme	31,6	1 Erkek
Test-10	-30m'den 30m'ye	Koşu	31,6	1 Erkek
Test-11	0'dan 30m'ye	Yürüme	100	1 Erkek
Test-12	30m'den 0'a	Koşu	100	1 Erkek



**Şekil 2.** Ölçüm yapılan arazi ve ölçüm sistemi (The Measurement field and measurement system)

Kazığın üst tarafı düz olarak imal ettirilmiş ve ivmeölçerin üzerine tam olarak yapışabilmesi için yüzeyi işlenmiştir. İvmeölçeri kazığa sabitlemek için mıknaş özelliği bulunan ara parça kullanılmıştır. Kazık toprak zemine tam dik olarak saplanmıştır. İvmeölçer, kalkanlanmış bir veri iletim kablosu ile B&K Nexus 2692 model bir sinyal koşullandırıcıya bağlanmıştır. İvmeölçerden gelen sinyaller 0,1 Hz yüksek geçirgen ve 100 Hz alçak geçirgen filtreden geçirilmiştir. Bu filtrelerin kullanılış amacı ölçülen ham veri içerisindeki gürültüleri en aza indirerek sinyal gürültü oranını artırmaktır ve sinyal içerisindeki kullanılmayan yüksek frekanslı sinyallerin spektral analizi sırasında ortaya çıkarabilecek aliasing problemini önlemektedir. Bu sayede analiz için kullanılacak ölçüm verilerindeki orijinal sinyal bileşeninin baskınlığı artacaktır.

Sinyal koşullandırıcı aynı zamanda yükseltici özelliğine de sahiptir. İvmeölçerden gelen sinyaller normalize çıkış değeri 31,6 ( $V/ms^2$ ) ve 100 ( $V/ms^2$ ) olacak şekilde yükseltilmiştir. Bu yükseltme sinyalin kendisiyle birlikte gürültüyü de yükseltmektedir. Fakat kullanılan analiz teknikleri ile gürültü içerisinden anlamlı sinyaller ayıklanmış ve analiz edilmiştir.

Sinyal koşullandırıcıdan gelen sinyaller IOtech DBK-40/ Daq/112B (Bağlantı bloğu+ veri toplama kartı) veri toplama seti ile bir taşınabilir bilgisayarda toplanmıştır. Ölçüm örnekleme frekansı 3000 Hz olarak ayarlanmıştır. Bu örnekleme frekansı daha önce yapılan çalışmalar ve örnek olarak yapılmış öncül testler de dikkate alınarak belirlenmiştir. 0-1000 Hz aralığındaki frekansların incelenmesi için Nyquist frekansı da gözetilerek örnekleme frekansı 3 kat yüksek değere ayarlanmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

##### 4.1. Zaman Tanım Bölgesi Analizleri (Time Domain Analysis)

Ölçüm senaryolarına göre toplanan tüm veriler zaman tanım bölgesi analizlerine tabi tutulmuşlardır. Bu amaçla test verilerinin genlik, genliklerin Karelerin ortalamasının karekökü (KOK), crest faktörü ve kurtosis değerlerindeki değişimleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Zaman tanım bölgesi analizleri ile hedef tespiti gerçekleştirilmek istendiğinde test verileri bir bütün olarak ele alınmaz. Test verilerinin ölçümü yapıldığı sürenin tamamı üzerinden genlik, KOK, crest faktörü ve kurtosis değerlerinin bulunması ve yorumlanması bir değer taşımamaktadır. Bu yüzden her bir test sonucu elde edilen sismik veriler, belirli zaman periyotlarına ayrılarak analiz edilmiştir.

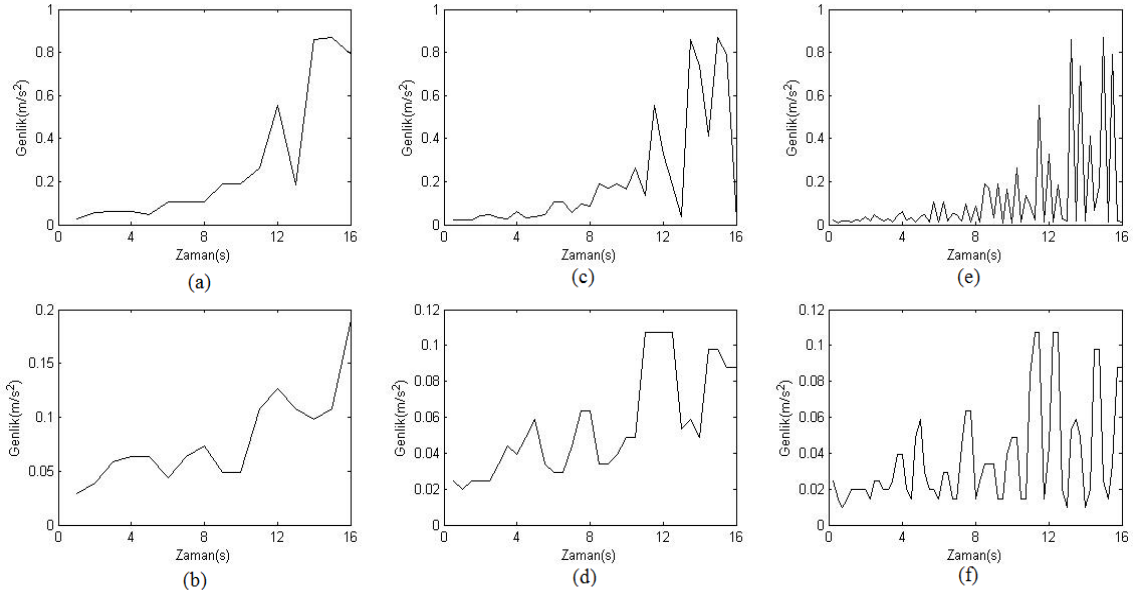
Pencereleme olarak adlandırılan bu yöntem ile hareketli hedefin yaklaşması ya da uzaklaşması belirli zaman adımlarında takip edilebilmektedir. Zaman sinyallerinin incelenmesinde pencere genişliği ve pencerelerin birbirleri üzerine bindirilmesinin analiz sonuçlarını etkilemektedir.

Şekil 4'de pencere genişliğine ve pencerelerin birbiri üzerine bindirilmesine bağlı olarak, Test-1 verilerinin zirve-zirve değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.

Şekil 4.a ve 4.b incelendiğinde geniş pencere boyutunda (pencere genişliği: 1 s) 8. s den itibaren genliklerin zirve-zirve değerlerinde görülen artışlar dikkate alındığında bir hedefin sensöre yaklaştığı hakkında kesin bir bilgiye sahip olunamamaktadır. Şekil 4.c ve 4.d'de gösterildiği gibi test verileri, insan adımının yaklaşık olarak 2 Hz civarında olduğu göz önüne alınarak [3,4] 0,5 s pencere genişliklerinde incelenmiştir. Bu pencere genişliği ile yapılan analizlerde grafikte görüldüğü gibi 8. s den itibaren zirve-zirve genliklerinde artışların bir hedefin sensöre yaklaştığı gözlemlenmektedir. Ancak bu pencere genişliğinde insan adımı sonucu oluşan darbeler bölünebileceğinden test verileri 0,25 s pencere genişliklerinde incelenmiştir. Şekil 4.e'de görüldüğü gibi 0,25 s pencere genişliğinde insan adımı sonucu oluşan darbeler belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve 6. s'den sonra bir hedefin sensöre yaklaştığı söylenebilmektedir. Aynı pencere boyutunda üst üste bindirme yapıldığında ise Şekil 4.f'deki grafikte görüldüğü gibi yaklaşan hedefin adımları tespit edilebilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında bundan sonraki analizlerde de 0,25 s pencere genişliği ve %50 üst üste bindirme uygulanmıştır.

Şekil 5. Test-1 verilerinin KOK değerlerinin zamanla değişimi göstermektedir. Grafikteki dalgalanma, test verileri içerisindeki zeminden gelen çok düşük frekanslı bileşenlerden kaynaklanmaktadır. KOK değerlerinin değişimine göre hedef tespiti yapılmak istendiğinde ilk hareketlenmenin 5 saniye civarlarında olduğu görülmektedir. Ancak 8. saniyeden sonra bir hedefin sensöre doğru yaklaştığı anlaşılmaktadır. Genliklerin KOK değerleri, zirve-zirve değerleri ile paralel bir davranış göstermektedir.

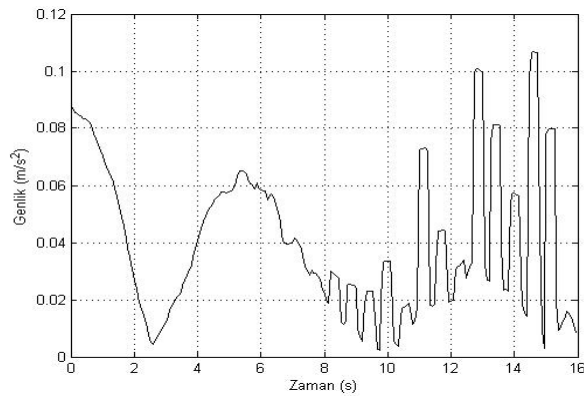
Genliklerin büyüklükleri ile ilgili değerlendirmenin yanı sıra darbe içeriği ile de ilgili daha fazla veri sağlayabilmek amacıyla sismik verilerin crest faktörü ve değerleri de hesaplanmıştır. Test-1 verilerinin Crest faktörü değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafığe ilk bakıldığında dikkati çeken 2-3 saniye aralığındaki ani yükseltilerdir. Bu yükselişin genlik değişimini gösteren şekillerde görülmemiş olmasının nedeni crest faktörünün darbe içeriğine hassas olmasıdır. 2. saniyeden sonra bir hedefin sensöre yaklaştığı anlaşılabilmektedir.



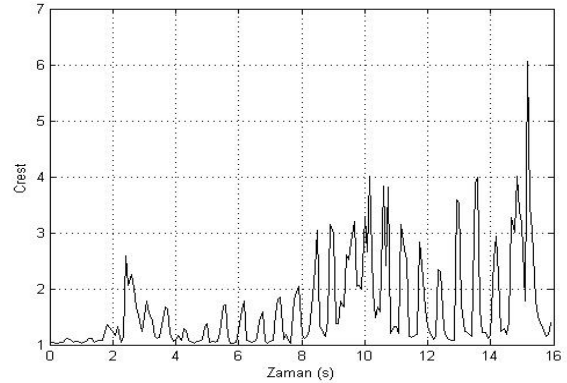
**Şekil 4.** Test-1 verileri genliklerinin zirve-zirve değişimlerinin zamanla değişimi: (a) pencere boyutu: 1 s üst üste bindirme : %0 (b) pencere boyutu: 1 s üst üste bindirme: %50 (c) pencere genişliği: 0,5 s üst üste bindirme: %0 (d) pencere genişliği: 0,5 s üst üste bindirme: %50 (e) pencere genişliği: 0,25 s üst üste bindirme: %0 (f) pencere genişliği: 0,25 s üst üste bindirme : %50 (Changing Test-1 variables peak tp peak values over time: (a) window size: 1 s overlap: %0 (b) window: 1 s overlap: %50 (c) window size: 0,5 s overlap: %50 (d) window size: 0,5 s overlap: %50 (e) window: 0,25 s overlap: %0 (f) window size: 0,25 s overlap: %50)

Crest faktörü gibi kurtosis değeri de darbe içeriğine hassastır. İnsan adımları zeminde darbeler şeklinde sismik sinyaller oluşturduğundan, bu darbelerin tespiti kurtosis değerlerinin incelenmesi ile daha rahat bir şekilde yapılabilmektedir.

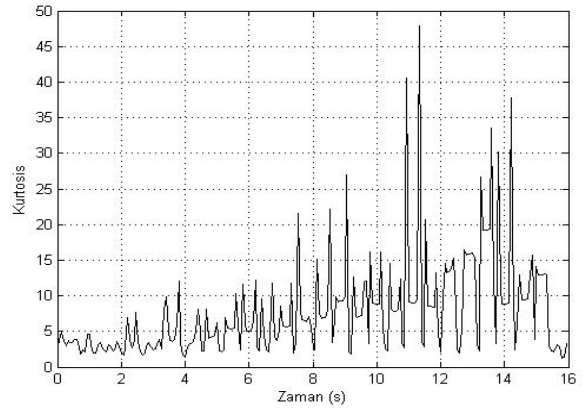
Şekil 7’de Kurtosis değerinin zamanla değişimi verilmiştir. Hedef adımlarının olmadığı durumda çevresel gürültünün kurtosis değeri yaklaşık 3 civarı olarak bulunmuştur. Eşik değeri 4 olarak belirlenirse, 1. saniyeden itibaren bir hedefin sensöre yaklaştığı söylenebilir. 2. saniyeden sonra kurtosis değerinin 7’nin üzerine çıkması kesin olarak bir hedefin sensöre yaklaştığını belirtmektedir. Ayrıca hedefin 15. saniyeden sonra durduğu Kurtosis değerinin 4’ün altına inmesinden anlaşılabilir.



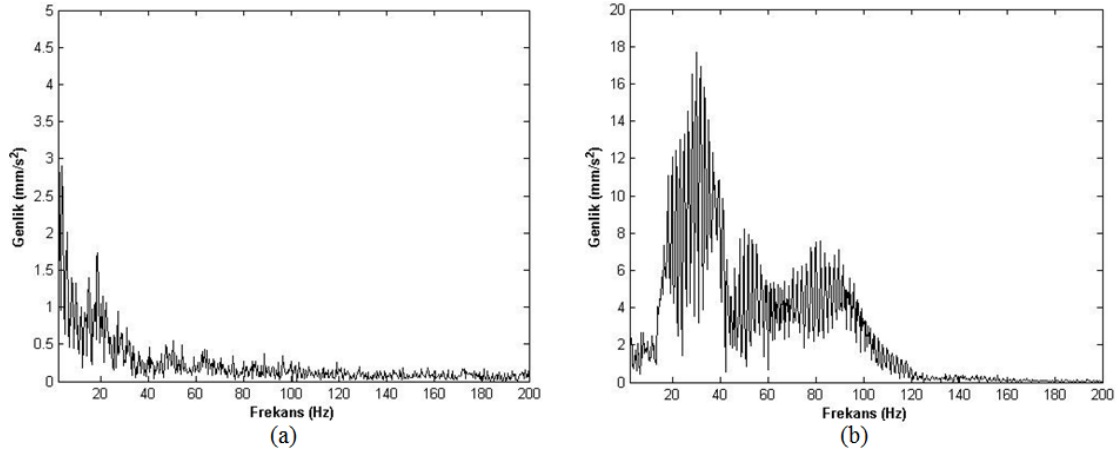
**Şekil 5.** Test-1 verileri genliklerinin KOK değerlerinin zamanla değişimi: (Changing Test-1 variables amplitude RMS value over time)



**Şekil 6.** Test-1 verileri Crest faktörü değerlerinin zamanla değişimi (Changing of Test-1 variables Crest Factor value over time)



**Şekil 7.** Test-1 verileri Kurtosis değerlerinin zamanla değişimi (Changing of Test-1 variables Kurtosis magnitudes over time)



**Şekil 8.** Test-1 verileri titreşim spektrumları: (a) 0-2 sn aralığındaki titreşim sepektrumu (b) 14-16 sn aralığındaki titreşim spektrumu (Vibration spectrum of Test-1 variables: (a) Vibration spectrum between 0-2 s ( b) Vibration spectrum between 14-16 s)

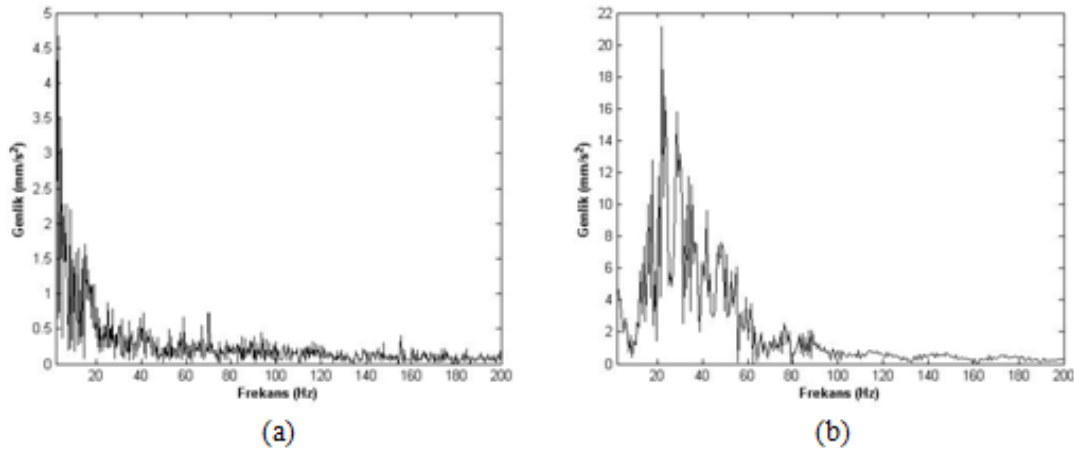
#### 4.2. Frekans Tanım Bölgesi Analizleri (Frequency Domain Analysis)

Ölçüm verilerinin frekans tanım bölgesinde incelenebilmesi için zaman sinyali eşit zaman aralıklarına ayrılmıştır. Her bir zaman aralığına MATLAB yazılımı kullanılarak HFD uygulanmış ve titreşim spektrumları oluşturulmuştur. Spektrum analizi için ilk olarak diğer sonuçlarla uyumlu olması amacıyla Test-1 senaryosuna göre toplanan veriler seçilmiştir. Zaman bölgesi analizlerinde olduğu gibi veriler içerisindeki DC bileşenler çıkarılmıştır. Sensöre doğru yaklaşan hedef adımlarının ölçüldüğü Test-1 senaryosu verilerine yapılan spektrum analizi sonucunda hedefin sensöre yaklaşmasıyla birlikte çeşitli frekans bantlarındaki titreşim genliklerinin arttığı görülmüştür.

Hedefin en sensöre en uzak olduğu 0-2 sn aralığının gösterildiği Şekil 8.a'da ve en uzak olduğu 14-16 sn aralıklarının spektrumlarının gösterildiği Şekil 8.b.'de görüldüğü gibi özellikle 20-40 Hz frekans aralığındaki titreşim genlikleri incelendiğinde hedefin

sensörden en uzak olduğu zaman ile en yakın olduğu zaman arasında yaklaşık 10 katlık bir büyüme olduğu görülmektedir. Bu durum insan adımı sonucu oluşan zemin titreşimlerinin belirtilen frekans aralığında oluştuğunu göstermektedir.

Spektrum analizi ile birden fazla hedef tespiti yapmak amacıyla 1 erkek ve 1 bayanın sensöre yürüyerek yaklaştığı durumu temsil eden Test-8 senaryosu ile toplanan veriler analiz edilmiştir. Şekil 9.a incelendiğinde hedefler sensörden en uzak konumda bulunduğu 0-2 sn zaman aralığındaki titreşim spektrumunda 5 Hz civarlarındaki frekans genliklerinin tepe yaptığı görülmektedir. Bir erkek ve bir bayan yürüyerek sensöre yaklaşıp durdukları 16-18 sn aralığının titreşim spektrumları ise Şekil 9.b'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde hedeflerin sensöre yaklaşmasıyla birlikte frekans genliklerinin yaklaşık olarak 4 kat arttığı görülmektedir. Spektrum analizi dönel makinaların arıza tespitinde ve makine titreşimlerin incelenmesinde uygun sonuçlar vermesine rağmen insan yürüyüşünün tespitinde faydalı etkin bir sonuç vermemiştir. Spektrum analizi



**Şekil 9.** Test-8 verileri titreşim spektrumları: (a) 0-2 sn aralığındaki titreşim sepektrumu (b) 16-18 sn aralığındaki titreşim spektrumu (Vibration spectrum of Test-1 variables: (a) Vibration spectrum between 0-2 s ( b) Vibration spectrum between 16-18 s)

sonuçları incelendiğinde insan adımları sebebiyle oluşan darbe zorlaması zeminde özellikle 20-50 Hz frekans aralığında tepki veren bir cevap oluşturmaktadır. Bu bulgu literatürde yapılan benzer çalışmalarla da uyum göstermektedir [5,10]. Dolayısıyla tek bir erkeğin ve bir erkek ve bayanın birlikte yürüdüğü iki ayrı test senaryosunun analizleri incelendiğinde spektrum analizi yöntemi ile birden fazla hedef varlığının tespit edilemeyeceği görülmektedir. İnsan adımı sonucu oluşan titreşim sinyalleri insanın (hedefin) sensörden olan uzaklığına, yürüdüğü zeminin yapısına ve çevre koşulları gibi çeşitli değişkenlere göre büyük farklılık göstermektedir [9,11,14]. Bu nedenle spektrum analizi ile yürüyen bir insanın adımları sonucu oluşan zemin titreşim karakteristiğinin tam olarak oluşturulması mümkün olmamıştır.

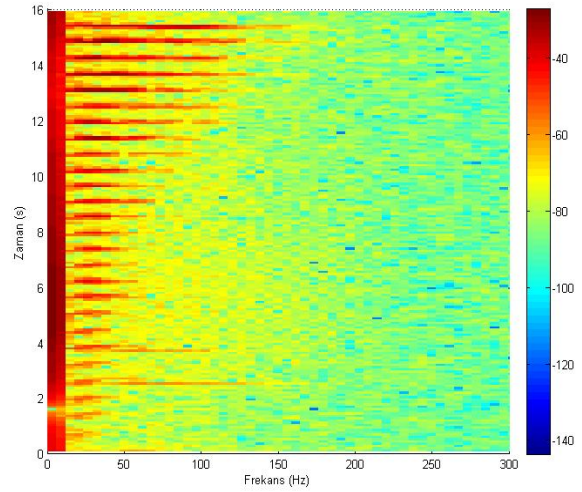
### 4.3. Zaman/Frekans Tanım Bölgesi Analizleri (Time/Frequency Domain Analysis)

Spektral analizde sinyal içerisindeki tüm frekans bileşenlerini görüntülenir. Ancak spektrumda zaman (dolayısıyla mesafe) konusundaki bilgi kaybolmaktadır. Bu sebeple hedefin göreceli olarak konumunu belirlemek mümkün olmamaktadır. Yürüyen insanın sensöre olan uzaklığının değişimi ile birlikte zeminde oluşan titreşim sinyallerinin genliklerinde ve baskın frekans bantlarında ciddi değişimler olmaktadır. Bu nedenle sinyal içerisindeki frekans bileşenleri kadar, bu frekansların hangi zamanlarda oluştuğu bilgisi de önemlidir.

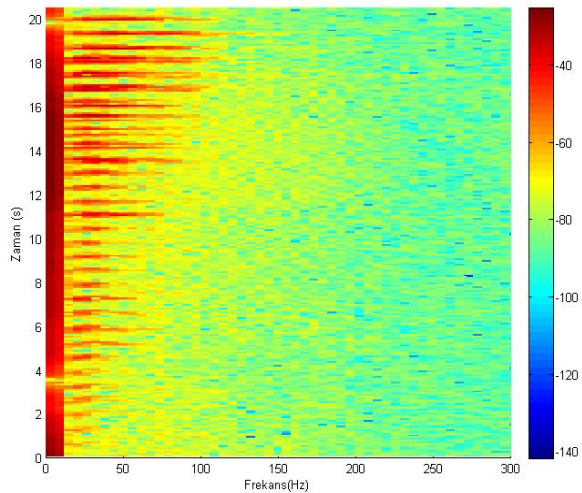
Titreşim sinyalleri analizi ile hedef tespiti yapılmak istendiğinde spektral analizin getirdiği bu kısıtlamadan kurtulmak için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) yönteminin kullanılmıştır. Şekil 10'da Test-1 verilerine dar pencere boyutlu KZFD uygulanması görülmektedir. Dar pencerelerin kullanılması yüksek frekans bileşeni daha baskın olan sinyallerde olumlu sonuç verebilir ancak Test-1 verilerinde olduğu gibi frekans bileşenleri düşük frekans bantlarında yoğunlaşmış sinyallerde düşük frekans çözünürlüğüne sebep olmuştur. Buna rağmen hedef adımları sonucu oluşan frekans bileşenleri görülebilmektedir. Spektrum analizindeki sonuçlarla uyumlu olarak hedef, sensöre yaklaştıkça frekans değerlerinde artış görülmektedir.

Bir erkek ve bir bayanın yürüyerek sensöre yaklaştığı durumu temsil eden Test-8 verilerinin KZFD analizi sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Yürüyen insanlar sensöre yaklaştıkça diğer KZFD analiz sonuçları ile benzer şekilde frekans bantlarında genişleme gözlemlenmiştir. En yüksek genlik tepeleri 10-50 Hz aralığında oluşmuştur. 14. saniyeden itibaren frekans tepeleri arasındaki mesafenin değiştiği görülmektedir. Tepelerin oluşması sırasında geçen süreye bakıldığında bu tepelerin tek bir insanın yürüyüş ritminden çok daha hızlı oluştuğu görülmekte ve bu durum birden fazla insanın sensöre yaklaşması olarak

yorumlanabilmektedir. Ancak KZFD analizindeki çözünürlük sıkıntısından dolayı birbirinden farklı iki insan adımı sonucu oluşan frekans bileşenlerini birbirinden ayırmak tam olarak mümkün değildir.



Şekil 10. Test-1 verilerine KZFD uygulanması (STFT analysis of Test-1 Data)



Şekil 11. Test-8 verilerine KZFD uygulanması (STFT analysis of Test-8 Data)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yaya olarak ilerleyen bir insanın adımları sonucu oluşan sismik sinyaller incelenmiştir. Sismik sinyallerin ölçülebilmesi için deney alt yapısı kurulmuş ve belirlenen ölçüm senaryoları dâhilinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneyler ile elde edilen sismik sinyallere bilgisayar ortamında zaman, frekans ve zaman/frekans tanım bölgesi analiz yöntemleri uygulanmış ve yaya olarak ilerleyen insanın ölçüm noktasına olan göreceli konumu tespit edilmiştir.

Yapılan analizlerde zaman tanım bölgesi analiz yöntemleri olan genliklerin zirve-zirve değerleri, KOK, crest faktörü ve kurtosis değerlerinin tüm ölçüm verileri üzerinden değişiminin incelenmesinin



bir değer taşımadığı ve belirli zaman periyotlarında incelenen bu değerlerin hedef tespitinde kullanılabileceği görülmüştür. Darbe içeriğine daha hassas olan kurtosis değerinin değişimi incelendiğinde ve eşik değeri olarak 4 seçildiğinde diğer skaler parametrelere göre daha uzaktan hedef tespitinin yapılabileceği anlaşılmıştır. Hedefin sensöre yaklaşmasıyla kurtosis değerinin katlanarak arttığı görülmüş bu sayede hedefin sensöre yaklaşım uzaklaşması hakkında yorum yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Spektrum analizleri incelendiğinde hedef sensöre yaklaştıkça incelenen frekans genliklerinin tümünde bir artış olduğu görülmüş, ancak bu değişimlerin bir insan adımı sonucu oluşup oluşmadığına sadece bu yöntemin incelenmesi ile karar verilemeyeceği anlaşılmıştır. Hedef tespitinde KZFD analiz yönteminin kullanılması ile sinyal içerisinde zaman bileşenin kaybolmasının önüne geçilmiştir. Bu sayede hedef adımları sonucu oluşan frekans bileşenlerinin ölçüm süresi içerisinde hangi zaman aralıklarında oluştuğu görülebilmektedir. Frekans bileşenlerinin insan adımına uygun şekilde tepeler oluşturduğu görülmüş ve bu tepeler arasındaki zaman ölçülerek insanın (hedefin) yürüyüş frekansının yürüyüş modlarına göre 1-4 Hz arasında değiştiği görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Pakhomov, A., “Low-Frequency Signals Detection and Identification as a Key Point of Software for Surveillance and Security Applications”, **Proceedings of SPIE**, No 7666, 1-8, 2010.
2. Bormann, P., Engdahl, B. ve Kind, R., “Seismic Wave Propagation and Earth models”, **New Manual of Seismological Observatory Practice**, Editör: Bormann, P., International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), 1-105, 2012.
3. Miller, G. F. ve Pursey, H., “On the Partion of Energy Between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid”, **Proc. Rpy. Soc. London**, No A-233, 55-69, 1955.
4. Succi, G., Prado, G., Gampert, R., Pedersen, T. ve Dhalival, H., “Problems in Seismic Detection and Tracking”, **Proceedings of SPIE**, No 4040, 165-173, 2001.
5. Succi, G., Clapp, D., Gampert, R. ve Prado, G., “Footstep Detection and Tracking”, **Proceedings of SPIE**, No 4393, 22-29, 2001.
6. Tian, Y., “**Target Detection and Classification Using Seismic Signal Processing in Unattended Ground Sensor Systems**”, Yüksek Lisans Tezi, University of Tennessee, Knoxville, 2001.
7. Pakhomov, A., Sicignano, A., Sandy, M. ve Goldburt, T., “A Novel Method for Footstep Detection with an Extremely Low False Alarm Rate”, **Proceedings of SPIE**, No 5090, 186-193, 2003.
8. Pakhomov, A., Sicignano, A., Sandy, M. ve Goldburt, T., “Seismic Footstep Signal Characterization”, **Proceedings of SPIE**, No 5071, 297-305, 2003.
9. Pakhomov, A. and Goldburt, T., “Seismic Signals and Noise Assessment for Foot Step Detection Range Estimation in Different Environments”, **Proceedings of SPIE**, No 5417, 87-98, 2004.
10. Pakhomov, A., Sicignano, A., Sandy, M. ve Goldburt, T., “Current Seismic Issues for Defense and Security Applications” **Proceedings of SPIE**, No 5403, 576-581, 2004.
11. Pakhomov, A., Pisano, D., Sicignano, A. ve Goldburt, T., “High Performance Seismic Sensor Requirements for Military and Security Applications” **Proceedings of SPIE**, No 5796, 117-124, 2005.
12. Pakhomov, A. ve Goldburt, T., “New Seismic Sensors for Footstep Detection and Other Military Applications”, **Proceedings of SPIE**, No 5403, 463-468, 2004.
13. Lan, J., Nahavandi, S., Lan, T. ve Yin, Y., “Recognition of moving ground targets by measuring and processing seismic signal” **Measurement**, No 37, 189-199, 2005.
14. Liang, Z., Wei, J., Zhao, J., Liu, H., Li, B., Shen, J. ve Zheng, C., “The Statistical Meaning of Kurtosis and Its New Application to Identification of Persons Based on Seismic Signals” **Sensors**, No 8, 5106-5119, 2008.
15. Jin, X., Sarkar, S., Ray, A., Gupta, S. ve Damarla, T., “Target detection and classification using seismic and PIR sensors” **IEEE Sensors Journal**, Cilt 12, No 6, 1709-1718, 2012.
16. Ermiş, A., **İzinsiz Girişlerin Zemin Titreşimlerinin Ölçümü Ve Analizi İle Tespiti**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
17. Ağaoğlu, E. A., **Sayısal Süzgeç Tasarımı ve Uygulamaları**, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.

