# MİKROTREMOR KAYITLARINDA ENDÜSTRİYEL KAYNAKLI BASKIN TİTREŞİMLER

**E. Yalçınkaya[1] S. Tekebaş[2] ve A. Pınar[3]**

[1] *Doçent, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Doktora Öğrencisi, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*
[3] *Profesör, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*
*Email: eyalcin@istanbul.edu.tr*

**ÖZET:**

Bu çalışma; Yalova ili Hersek Deltası-Altınova bölgesinde toplanan mikrotremor kayıtlarında, endüstriyel kaynaklı baskın titreşimlerin ve H/V eğrileri üzerinde etkilerinin incelenmesini kapsamaktadır. Hersek Deltası, İzmit Körfezi'nin Marmara Denizi'ne açıldığı bölgede, körfezin güney kıyısını oluşturur. Deltanın bilinirliği 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sonrası, deprem kırığının deltayı geçip Marmara Denizi'ne uzandığı konusundaki tartışmalara dayanmaktadır. Bir diğer önemi, halen yapımı devam eden İzmit Körfezi geçiş projesinde yer alan körfez geçiş köprüsü güney ayağının konumlandırılacağı bölge olmasından gelir. Hersek Deltası mikrotremor kayıtları yaklaşık 10 $km^2$'lik bir alanda dört tanesi aynı noktada ve farklı zamanlarda olmak üzere 12 noktada toplanan gürültü kayıtlarından oluşmaktadır. Noktalardan bir tanesinde 24 saatlik kayıt alınırken, diğer noktalarda kayıt süreleri yaklaşık 30 dakikadır. Kayıtların toplanmasında Güralp CMG-6TD hız sismometresi kullanılmıştır. Mikrotremor kayıtlarının değerlendirilmesi sırasında bazı noktalarda kayıtların endüstriyel pik olarak nitelendirilebilecek titreşimler içerdiği tespit edilmiştir. Endüstriyel titreşimler bazı noktalarda H/V eğrilerinde keskin doruklara, bazı noktalarda ise çukurlara neden olurlar. Endüstriyel titreşimin frekansı tek bir frekansta olmayıp, noktalara göre de farklılıklar göstermektedir. Genel olarak temel titreşim frekansları 1.3 Hz, 1.5 Hz ve 1.7 Hz olup, bazı noktalarda bu frekansların harmonikleri de gözlenebilmektedir. Eğer bu titreşimlere neden olan dönen bir motor ise, devir sayısının yaklaşık 90 dev/dk olması gerekir. Bölgedeki tersaneler, askeri tesisler veya sulama yapıları potansiyel kaynağı oluşturur. Tanecik hareketleri belirgin bir kaynak yönüne işaret etmemektedir. İşitilebilir frekans aralığının altındaki düşük frekanslı bu gürültülerin hem kaynağının, hem de çevre üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ek çalışmalar gerektirir.

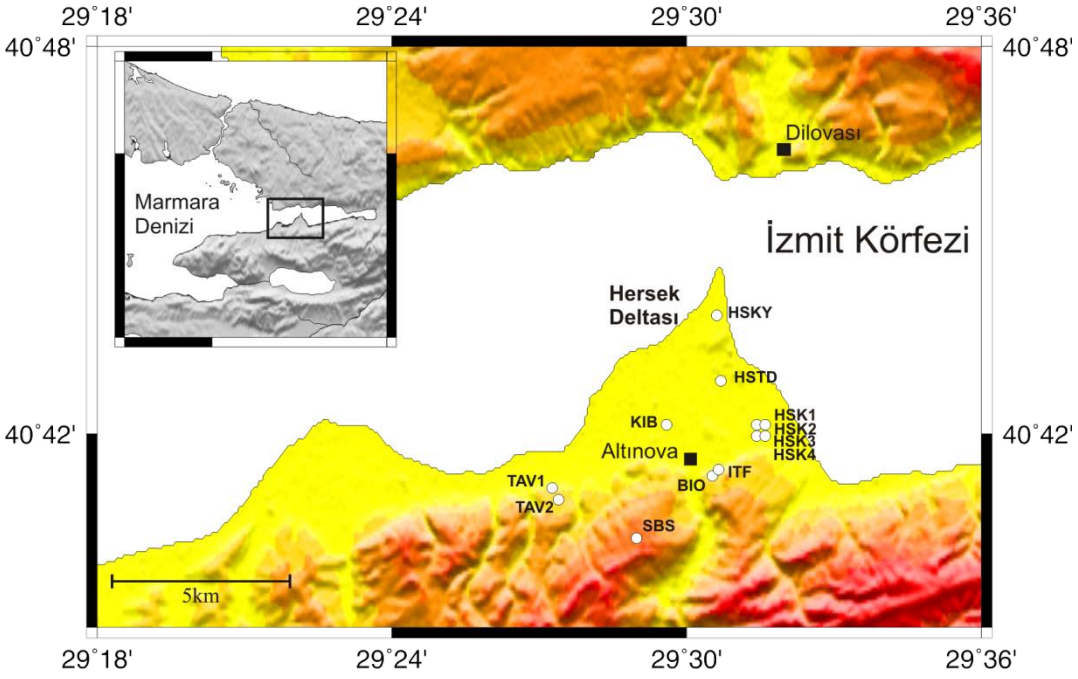
**ANAHTAR KELİMELER :** Mikrotremor, Hersek Deltası, endüstriyel titreşimler, H/V, düşük frekanslı gürültü

## 1. GİRİŞ

Yerkabuğu kendi içerisinde sürekli titreşim halindedir. Bu titreşimlerin kaynağını her türlü çevresel etmenler oluşturur. Bunların içerisinde güneş patlamaları, atmosferik kuvvetler, gel-git hareketi, jeotermal aktiviteler, yer altındaki sismik aktiviteler, okyanus dalgaları, meteorolojik fırtınalar, insan kaynaklı gürültüler (trafik, sanayi v.b) sayılabilir. Titreşim kaynakları doğal ve insani kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Titreşimlerin frekans içerikleri incelendiğinde, doğal kaynaklı gürültülerin düşük frekans bandında ($f$ < 1Hz) oldukları görülmektedir. Örneğin okyanustaki dalgalanmanın frekansı 0.2 Hz civarındadır. 0.5 Hz civarı daha yüksek frekanslar sahil şeridi boyunca dalgaların kıyıya çarpması sonucu elde edilen gürültünün frekansıdır. Atmosferik kuvvetler ise 0.1 Hz'ten de düşük frekans meydana getirirler. Genel olarak bu titreşimler mikroseismler olarak bilinir. Yüksek frekansa sahip gürültüler ise insan aktivitesi sonucu oluşan gürültülerden meydana gelmektedir. Bunun içerisine trafik, fabrikalar, endüstriyel faaliyetler v.s girmektedir. Kaynak genelde yer yüzeyinde bulunur ve gece/gündüz, hafta içi/hafta sonu değişkenliğine sahiptir. Bu titreşimler ise mikrotremor olarak adlandırılır.

Mikrotremorlar yakın zamanlara kadar kayıtlarda istenmeyen etkiler olarak nitelendirilirken, son yıllarda hem sığ, hem de derin yer altı yapılarının belirlenmesinde çok önemli bir yere sahip olmuşlardır. Ölçü toplamadaki çabukluğu, kolay uygulanabilir olması, maliyet açısından ucuz bir yöntem olması ve güvenilir bilgiler sağlaması açısından tercih edilen bir yöntemdir. Bilindiği gibi son yıllarda zemin hakim frekansının (veya periyodunun) belirlenmesinde H/V yöntemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. H/V mikrotremor tekniği ilk kez Nogoshi ve Igarashi (1971) tarafından ileri sürülmüş ve Nakamura (1989) ile genel bir hal almıştır. H/V tekniği çevresel titreşimlerin yatay ve düşey bileşenlerinin Fourier genlik spektrumları arasındaki oranı belirlemeye dayanmaktadır. Bunun için yerin titreşimi 3 bileşenli bir kayıtçı düzeneği ile belli bir süre dinlenir. Elde edilen bu kayıt çeşitli veri işlem aşamalarından geçirilerek yatay bileşenlerin spektrumlarının toplamı (H), düşey bileşen spektrum değerine (V) bölünerek, yatay/düşey (H/V) spektral oranı, yani zemin transfer fonksiyonu elde edilir. Elde edilen bu fonksiyondan yararlanılarak zemine ait hakim periyot bulunur.

Bu çalışma; Yalova ili Hersek Deltası-Altınova bölgesinde toplanan mikrotremor kayıtlarında, endüstriyel kaynaklı baskın titreşimlerin ve H/V eğrileri üzerinde etkilerinin incelenmesini kapsamaktadır. Hersek Deltası, İzmit Körfezi'nin Marmara Denizi'ne açıldığı bölgede, körfezin güney kıyısını oluşturur (Şekil 1). Deltanın bilinirliği 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sonrası, deprem kırığının deltayı geçip Marmara Denizi'ne uzandığı konusundaki tartışmalara dayanmaktadır. Bir diğer önemi, halen yapımı devam eden İzmit Körfezi geçiş projesinde yer alan körfez geçiş köprüsü güney ayağının konumlandırılacağı bölge olmasından gelir. Hersek Deltası mikrotremor kayıtları yaklaşık 10 km$^2$'lik bir alanda 12 noktada toplanan gürültü kayıtlarından oluşmaktadır (Şekil 1). Ölçüm noktalarından dört tanesi (HSK1, HSK2, HSK3 ve HSK4) aynı yerde, farklı zamanlarda toplanan kayıtlardan oluşur. ITF noktasında 24 saatlik kayıt alınırken, diğer noktalarda kayıt süreleri yaklaşık 30 dakikadır. Kayıtların toplanmasında Güralp CMG-6TD hız sismometresi kullanılmıştır.




Şekil 1. Yalova-Hersek Deltası mikrotremor ölçüm noktaları.

## 2. ENDÜSTRİYEL KAYNAKLI TİTREŞİMLER

Daha çok kentsel alanlarda, H/V eğrilerinde bazen dar doruklar veya çukurlar görülür. Bu doruklar veya çukurlar çoğunlukla jeneratör, türbin, pompa gibi makinelerden üretilen endüstriyel kaynaklı etkilerdir. Bu etkiler iki belirgin karakteristik özellikleriyle tanınırlar (SESAME, 2004);

- Belirli bir alana etki ederler (kaynağından birkaç kilometre uzaklıklara kadar etki edebilirler).
- Özellikle mesai saatleri içerisinde kaynak süreklidir ve alınan kayıtların spektrum eğrileri (yuvarlatmasız) keskin bir doruğa sahiptir.

Aşağıda belirtilen aşamalar takip edilerek bir doruğun endüstriyel kaynaklı olup olmadığı kontrol edilebilir:

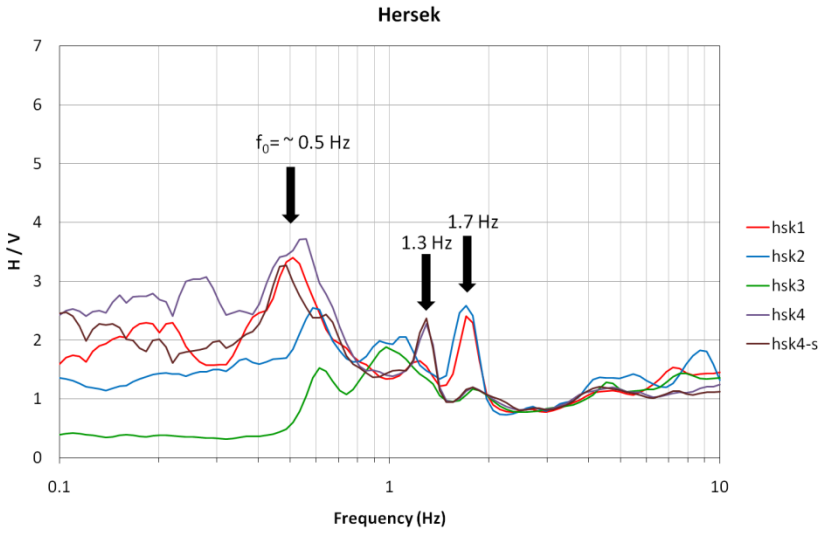
- Ham (filtre, yuvarlatma v.s yapılmamış) spektrumun her bir penceresine bakılır. Eğer herbir pencere, genellikle 3 bileşende de keskin bir doruk gösteriyorsa, %95 olasılıkla bu doruk endüstriyel kaynaklıdır.
- Diğer bir kontrol spektrumların yuvarlatma değerleri değiştirilerek yapılır. Endüstriyel kaynak durumunda H/V eğrisinde görülen doruk, yuvarlatma değeri küçüldükçe sivrileşir.
- Eğer aynı noktaya yakın birden fazla kayıt varsa, aynı frekansda bir doruğun olup olmadığına, genlikleri karşılaştırarak bakılır (ilgili doruğun genliği, değişmeyen yuvarlatma parametresi kullanılsa da, noktadan noktaya değişkenlik gösterebilir, hatta doruklar çukurluklara da dönüşebilirler).
- Diğer bir etkin kontrol yöntemi, doruğa neden olan frekanstaki titreşimin zaman içinde sönümlenip sönümlenmediğidir (Dunand ve diğ., 2002). Eğer sönüm değeri çok küçük ise, örneğin %5'in altında çıkıyorsa doruğun endüstriyel kaynaklı olduğu düşünülür.
- Tüm bu testlerden açık bir sonuça ulaşmak mümkün olmuyorsa, son olarak şu yapılabilir: Çalışma saatleri dışında veya tatil günlerinde bu dorukların görünüp görünmediğini kontrol etmek amacıyla sürekli ölçümler yapmak (24 saat boyunca veya 1 hafta süresince) bize daha fazla bilgi sunar. Fakat bir çok endüstriyel kaynağın 24 saat, 7 gün aralıksız çalıştığı unutulmamalıdır.

## 3. MİKROTREMOR VERİLERİNİN ANALİZİ

Kayıtların değerlendirilmesi sırasında Geopsy (SESAME, 2004) programı kullanılmıştır. Geopsy programına alınan kayıtlara öncelikle bir ortalama değer çıkarması uygulanmıştır. Kayıtlar 50 sn uzunluğunda pencerelere bölünerek spektrumları hesaplanmış, daha sonra spektrumlar *b* katsayısı 40 seçilerek Konno-Ohmachi yuvarlatması ile düzleştirilmişlerdir. Hesaplanan H/V eğrilerinin güvenilir olabilmesi için bütün noktalarda en az 10 pencere seçilmesine dikkat edilmiştir. H/V eğrilerinde aşırı saçılmalar gösteren pencereler elle silinmiş ve kalan eğrilerin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Şekil 2'de HSK noktasında dört farklı zamanda (2 Ekim, 8 Ocak, 23 Nisan ve 7 Temmuz) toplanan mikrotremor kayıtlarından elde edilen ortalama H/V eğrileri görülmektedir. Muhtemel zemin hakim frekansı 0.5 Hz civarında olmasına karşın, ölçümlerin tümü aynı frekansa işaret etmemektedir. Özellikle HSK3 ölçümüne ait H/V eğrisi diğer eğrilerden oldukça farklıdır. Bu sonuç H/V eğrilerinin zaman içinde durağan olmadığına işaret eder. H/V eğrilerindeki farklılaşmaların özellikle düşük frekanslarda görülmesi, zaman içinde mikrotremor kayıtlarının düşük frekans içeriklerinin değiştiğini gösterir. Muhtemel mevsimsel değişiklikler, deniz dalga hareketlerindeki değişiklikler bu sonucu doğuruyor olabilir.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan asıl dikkat çekici nokta, H/V eğrilerinde 1.3 ve 1.7 Hz'te görülen dar ve keskin doruklardır. HSK1 ve HSK2'de bu doruk 1.7 Hz'te, HSK4'te 1.3Hz'te görülürken, HSK3'te doruk hiç görülmemekte, bunun yerine 1.5 Hz civarında HSK4 ile birlikte bir çukur dikkati çekmektedir. Zamana bağlı olarak değiştiği anlaşılan H/V eğrilerindeki bu doruk ve çukurların endüstriyel bir etkiden kaynaklanıyor

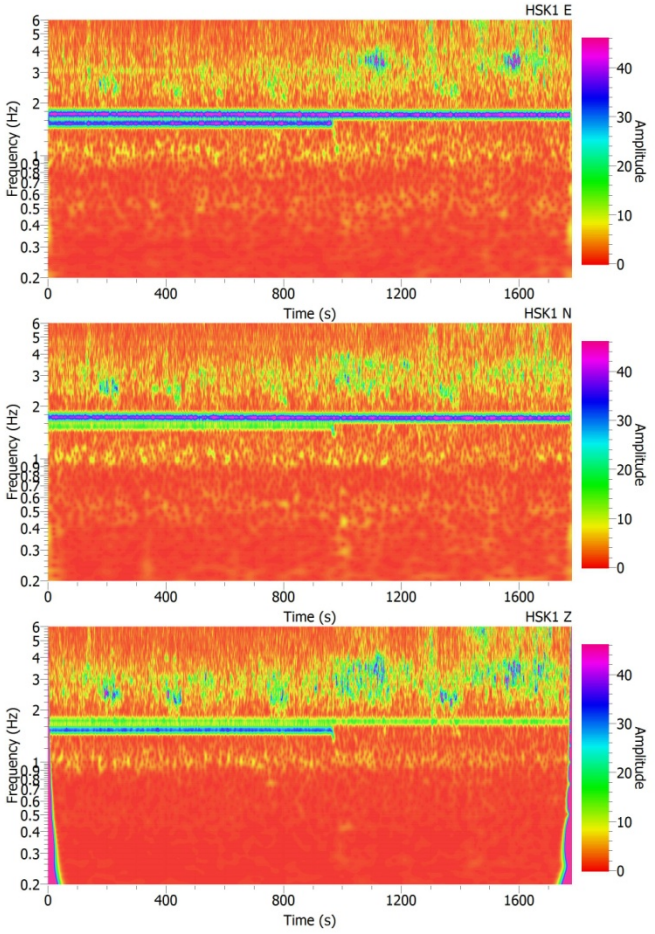



Şekil 2. HSK noktasında dört farklı zamanda (2 Ekim, 8 Ocak, 23 Nisan ve 7 Temmuz) kaydedilen mikrotremor kayıtlarından (hsk1, hsk2, hsk3, hsk4) elde edilen ortalama H/V eğrileri. HSK4 ölçümü iki farklı sismometre (hsk4 ve hsk4-s) kullanılarak elde edilmiştir.

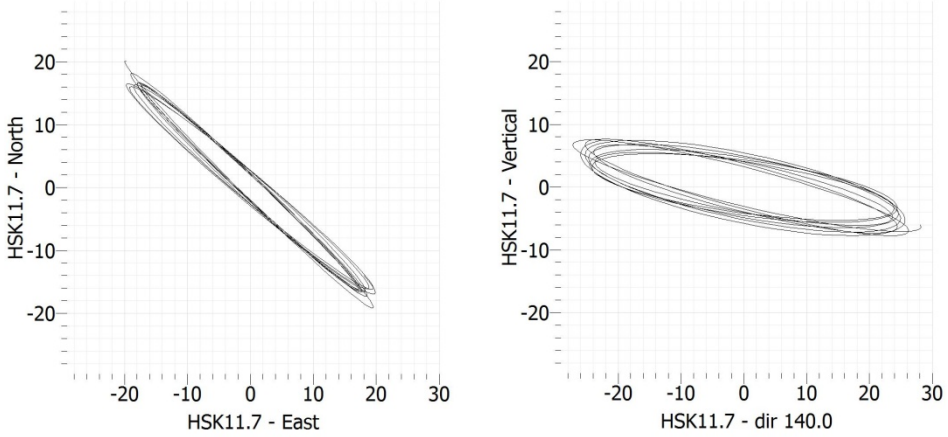
olabileceği düşüncesiyle kayıtların spektral içerikleri incelenmiştir. Şekil 3'te örnek olarak HSK1 noktasında alınan mikrotremor kaydına ait zamana bağlı frekans içeriği gösterilmektedir. Görüldüğü gibi 1.5 ve 1.7 Hz'te baskın titreşimler açık olarak dikkati çekmektedir. 1.5 Hz civarında olan titreşimin belirli bir zamanda aniden kesilmesi, genliklerinin zaman içinde sönümlenmeden aynı kalması titreşimlerin kaynaklarının endüstriyel olduğunun göstergesidir.

Hersek Deltası'nda kaydedilen tüm noktalarda benzer titreşimlere rastlanılmıştır. Titreşimlerin temel frekansları 1.3 Hz, 1.5 Hz ve 1.7 Hz olarak gözlenmiştir. Bazı noktalarda bu frekansların sadece biri hakim olurken, bazı noktalarda ise bu frekansların harmoniklerinin de görülmesi mümkün olmuştur. Hersek Deltası dışında titreşimin genliği azalarak kaybolması titreşimin kaynağının Hersek Deltası içinde olabileceğini göstermektedir.

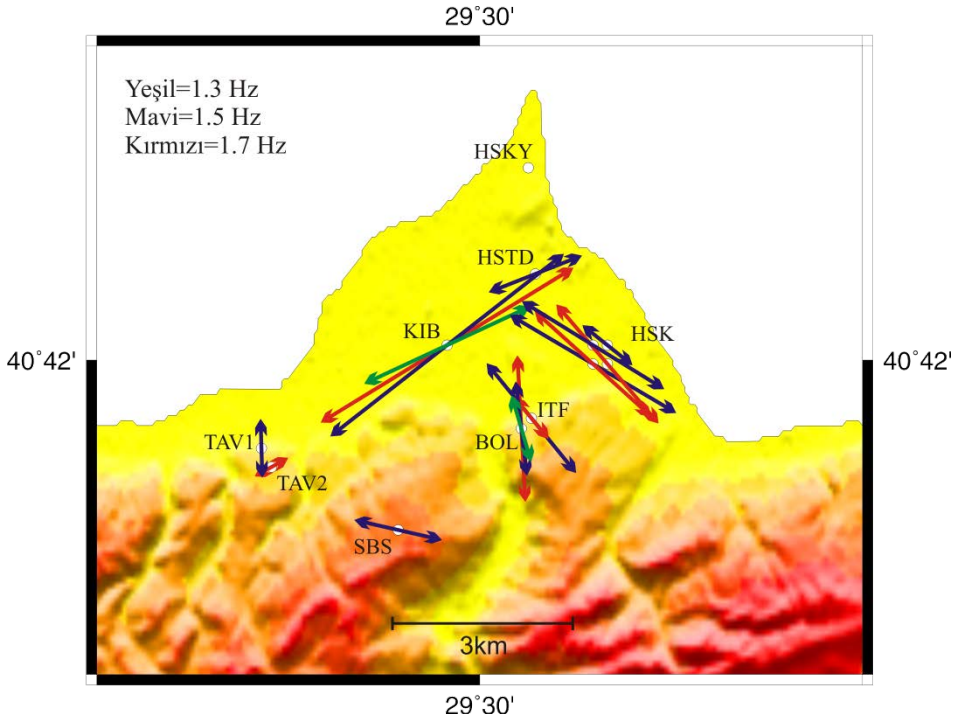
Kaynağın yerinin belirlenmesine yönelik olarak her bir noktada tanecik hareketleri kontrol edilerek titreşimin yayılım yönü belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla endüstriyel titreşim frekansı, bir bant geçişli filtre kullanılarak diğer sinyallerden ayırt edilmeye çalışılmıştır. Örneğin 1.5 Hz endüstriyel titreşimi, kayıt içinden ayırt edebilmek için köşeleri 1.4 Hz ve 1.6 Hz'te olan ve dikliği 6 birim olan bir Butterworth bant geçişli filtre uygulanmıştır. Daha sonra yatay ve düşey düzlem tanecik hareketleri çizdirilmiştir. Şekil 4'te örnek olarak HSK1 noktasında 1.7 Hz endüstriyel titreşimin yatay ve düşey düzlem tanecik hareketleri gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, yatay düzlemde tanecik hareketi KB-GD yönlü bir titreşimi işaret ederken, düşey bileşen hareket genliği yataya göre oldukça düşüktür. Titreşimi oluşturan sismik dalga türü bilinmediği için (cisim dalgası P veya S, ya da yüzey dalgası Raylaigh veya Love) tanecik hareketinin yayılım yönüne dik veya paralel ortaya çıkacağı tahmin edilememektedir. Bu nedenle tüm istasyonlardaki tanecik hareketleri birlikte kontrol edilerek bir yayılım yönü tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 5 her bir noktada ve farklı frekanslar için (yeşil=1.3 Hz, mavi=1.5 Hz ve kırmızı=1.7 Hz) titreşim yönlerini göstermektedir. Okların uzunlukları titreşimlerin genlikleriyle orantılıdır. Titreşimler en büyük genliğe KIB istasyonunda sahip olması, kaynağın bu noktaya yakın olabileceğini gösterir. Fakat doğru bir karşılaştırma için kayıtların eş zamanlı olarak alınması gerektiği unutulmamalıdır. HSK noktası kayıtlar titreşim genliğinin zaman içinde değiştiğini fakat yönünün




Şekil 3. HSK1 noktası üç bileşen mikrotremor kaydı zaman-frekans spektrumu.




Şekil 4. HSK1 kaydı 1.7 Hz titreşim için yatay düzlem (sol grafik) ve düşey düzlem (sağ grafik) tanecik hareketleri.




Şekil 5. Mikrotremor ölçüm noktalarında belirlenen endüstriyel titreşimler için tanecik hareketleri. Yeşil oklar 1.3 Hz, mavi oklar 1.5 Hz ve kırmızı oklar 1.7 Hz titreşimler için tanecik hareket yönlerini gösterir. Okların uzunlukları titreşim genlikleriyle orantılıdır.

yaklaşık aynı kaldığını gösterir. Tüm noktalardaki titreşim hareketi yönlerinin tek bir yöne işaret etmemesi kaynak yönünün belirlenmesine izin vermez. Veya kaynağın tek olmadığının göstergesi olabilir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Hersek Deltası'nda 12 noktada toplanan mikrotremor ölçümleri endüstriyel kaynaklı baskın titreşimler içerirler. Bu titreşimler, bileşenlerde sahip oldukları genliklere bağlı olarak H/V eğrilerinde farklı etkilere neden olurlar. Genliklerin yatay bileşende yüksek olması H/V eğrilerinde keskin doruklara neden olurken, tersi durum H/V eğrilerinde çukurlar oluşturur. Titreşimlerin frekansları temel olarak 1.3 Hz, 1.5 Hz ve 1.7 Hz'te görülürken, bazı ölçüm noktalarında temel frekansların harmoniklerini de ayırt etmek mümkündür. Endüstriyel titreşimin genliği ve frekansı ölçüm noktalarına göre ve zamana göre farklılıklar gösterir. Örneğin HSK noktasında değişik zamanlarda yapılan ölçümlerde bazen 1.5 Hz ve 1.7 Hz titreşimler hakim iken, bazen bunlar kesilmekte, bunlara ek olarak 1.3 Hz titreşim hakim olabilmektedir. Titreşimler genellikle yatay bileşende baskın olmakla birlikte, zaman içinde farklı bileşenlerde en büyük genlikler verebilmektedir. Farklı frekanslarda titreşim üretiyor olması, kaynağın birden çok olabileceği gibi farklı dönüş hızlarına sahip tek bir kaynağı da gösteriyor olabilir. Titreşimin aniden başlaması ve durması motorsal bir güce işaret edebilir. 1.5 Hz frekanslı titreşim ele alınırsa bu kaynağın dakikada devir sayısının 90 olmasına işaret eder. Hersek Deltası dışında endüstriyel titreşimin genliğinin azalarak kaybolması kaynağın Hersek Deltası içinde olduğuna işaret eder. Titreşime oluşturan dalgaların cisim dalgası veya yüzey dalgası olduğu bilinmemektedir. Ölçüm noktalarındaki tanecik hareketlerinin tek bir yöne işaret etmemesi kaynak yönünün belirlenmesine imkan vermemektedir.

Hersek bölgesi sanayi ve tarımın birlikte yapıldığı bir bölgedir. Deltanın sağ kenarında askeri bir eğitim merkezi, sol kenarında ise tersaneler yer alır. Ayrıca bölge içinde yoğun sulama çalışmaları bulunur. Dolayısıyla titreşimin kaynağı bunlardan herhangi birisi veya birileri olabilir.

Bahsettiğimiz endüstriyel titreşimlerin frekanslarının 20 Hz'in altında olması nedeniyle insan kulağı tarafından işitilemez gürültülerdir. Bu tür düşük frekanslı gürültülerin insanlar üzerinde yarattığı etkiler literatürde çokça tartışılmıştır. Bunlara bir örnek Pierpont (2004) çalışmasıdır. Pierpont (2004) çalışmasında rüzgar türbinlerinin yaydıkları düşük frekanslı gürültüler nedeniyle yakın çevrede yaşayan insanlar üzerinde neden olduğu olumsuz etkileri "rüzgar türbini sendromu" olarak adlandırmıştır. Styles ve diğ. (2005)'in belirlediği rüzgar türbinlerinin neden olduğu titreşim frekansları, Hersek Deltası'nda belirlenen titreşim frekanslarıyla benzerdir. Fakat Hersek Deltası'nda herhangi bir rüzgar türbini gözlenmemiştir. Sonuç olarak; hem endüstriyel gürültünün kaynağı hem de gürültünün çevrede yaşayan insanlar üzerindeki etkileri potansiyel araştırma konuları olarak gözükmektedir.

## KAYNAKLAR

Dunand, F., Bard, P.-Y., Chatelin, J.-L., Guéguen, Ph., Vassail, T., Farsi, M.N. (2002). Damping and frequency from randomec method applied to in-situ measurements of ambient vibrations: Evidence for effective soil structure interaction. *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*. Paper 869.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, **30-1**, 25-30.

Nogoshi, M. ve Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) *(in japanese with english abstract)*. *Jour. Seism. Soc. Japan*, **24**, 26-40.

Pierpont, N. (2004). Wind Turbine Syndrome. Published by K Selected Books.

SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements processing and interpretation. *Europan Research Project*.

Styles, P., Stimpson, I., Toon, S., England, R., Wright, M. (2005). Microseismic and infrasound monitoring of low frequency noise and vibrations from windfarms. http://geophysics.esci.keele.ac.uk/Research/wind/.