

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK SİSMOLOJİSİNDE  
YÜZEY DALGASI YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Diğdem ACAREL**

**Anabilim Dalı : Jeofizik Mühendisliği**

**Programı : Jeofizik Mühendisliği**

**TEMMUZ 2003**

**MÜHENDİSLİK SİSMOLOJİSİNDE  
YÜZEY DALGASI YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Diğdem ACAREL  
505001502**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 19 Haziran 2003**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 27 Haziran 2003**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Argun KOCAOĞLU  
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Aysun BOZTEPE-GÜNEY (İ.T.Ü.)  
Doç.Dr. Serdar ÖZALAYBEY (TÜBİTAK)**

**TEMMUZ 2003**

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını hazırlarken, bilgi birikimi ile bana rehber olan ve tükenmeyen sabrı ile yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Argun Kocaoğlu' na teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca, yardımlarını esirgemeyen tüm öğretim görevlilerine, “Yeşilyurt ve Avcılar’ da Deprem Yer Tepkisinin Çok Kanallı Mikrotremor Kayıtlarının Analizi ile Belirlenmesi” konulu yüksek lisans tezinde elde ettiği sonuçlarla, çalışmama katkıda bulunan H. Ebru Bozdağ’ a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve son olarak tüm arkadaşlarıma sevgilerle...

Temmuz 2003

Diğdem ACAREL

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                         |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                                                      | <b>v</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                                                    | <b>vi</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                                                    | <b>vii</b>  |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                                                   | <b>x</b>    |
| <b>ÖZET</b>                                                                                             | <b>xii</b>  |
| <b>SUMMARY</b>                                                                                          | <b>xiii</b> |
| <br>                                                                                                    |             |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                                                         | <b>1</b>    |
| <br>                                                                                                    |             |
| <b>2. UZAMSAL ÖZİLİŞKİ YÖNTEMİ</b>                                                                      | <b>5</b>    |
| 2.1 Uzamsal Özilişki Yönteminin Teorik Esasları                                                         | 6           |
| 2.1.1 Bir boyutlu dispersif dalgalar                                                                    | 6           |
| 2.1.2 İki boyutlu dispersif dalgalar                                                                    | 7           |
| 2.2 Uzamsal Özilişki Yönteminin Yapay Verilerle İncelenmesi                                             | 9           |
| 2.2.1 Yapay verilerin üretilmesi                                                                        | 9           |
| 2.2.2 Özilişki yöntemi ile faz hızının elde edilmesi                                                    | 11          |
| 2.2.3 Alıcı sayısının belirlenmesi                                                                      | 16          |
| 2.2.4 Eşkenar üçgen dizilimler ile yapılan analizler                                                    | 20          |
| 2.2.5 Faz hızı elde edilirken kullanılan diğer bir yol                                                  | 22          |
| 2.2.6 Farklı bir hız yapısına ait dispersiyon eğrisinin incelenmesi                                     | 24          |
| 2.2.7 Sinyal/gürültü oranının etkisinin incelenmesi                                                     | 25          |
| 2.2.8 Özilişki yönteminde farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının etkisi                        | 27          |
| 2.2.9 Eşkenar üçgen dizilimleri genelleştirerek yapılan analizler                                       | 30          |
| 2.3 Özilişki Yöntemi ile Yapılan Gerçek Veri Analizleri                                                 | 31          |
| 2.3.1 Avcılar verilerinin analizi                                                                       | 32          |
| 2.3.1.1 Verilerin toplanması ve özellikleri                                                             | 32          |
| 2.3.1.2 Analiz sonuçları                                                                                | 32          |
| 2.3.2 Yeşilyurt verilerinin analizi                                                                     | 34          |
| 2.3.2.1 Verilerin toplanması ve özellikleri                                                             | 35          |
| 2.3.2.2 Analiz sonuçları                                                                                | 35          |
| 2.4 Sonuçlar                                                                                            | 38          |
| <br>                                                                                                    |             |
| <b>3. DİZİLİM-İŞLEME (FREKANS ORTAMI IŞIN BİÇİMLENDİRME) YÖNTEMLERİ</b>                                 | <b>41</b>   |
| 3.1 Frekans Ortamı Işın Biçimlendirmenin Temel Esasları                                                 | 42          |
| 3.1.1 Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirmenin teorik esasları                                       | 42          |
| 3.2 Klasik Frekans Ortamı ışın Biçimlendirmenin Yapay Verilerle İncelenmesi                             | 43          |
| 3.2.1 Alıcı sayısının belirlenmesi                                                                      | 43          |
| 3.2.2 Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirmede farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının etkisi | 45          |
| 3.2.2.1 MUSIC yöntemi ile dairesel dizilim verilerinin incelenmesi                                      | 49          |
| 3.2.3 Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme ile yüksek modların incelenmesi                          | 51          |

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 Klasik Frekans Ortamı Işın Biçimlendirme ile Özilişki Yönteminin Gerçek Veriler Kullanılarak Karşılaştırılması | 53        |
| 3.4 Sonuçlar                                                                                                       | 54        |
| <b>4. IŞIN PARAMETRESİ-KESME ZAMANI DÖNÜŞÜMÜ (SLANT-STACK)</b>                                                     | <b>56</b> |
| 4.1 $p$ - $\tau$ Dönüşümünün Teorik Esasları                                                                       | 57        |
| 4.1.1 $p$ - $\tau$ dönüşümü ile faz hızı dispersiyon eğrisinin elde edilmesi                                       | 58        |
| 4.2 $p$ - $\tau$ Dönüşümünün Yapay Verilerle İncelenmesi                                                           | 60        |
| 4.2.1 Alıcı sayısının incelenmesi                                                                                  | 61        |
| 4.2.2 Sinyal/gürültü oranının etkisinin incelenmesi                                                                | 63        |
| 4.2.3 $p$ - $\tau$ dönüşümünde farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının etkisi                              | 64        |
| 4.2.4 $p$ - $\tau$ dönüşümü ile yüksek modların incelenmesi                                                        | 65        |
| 4.3 $p$ - $\tau$ Dönüşümü ile Yapılan Gerçek Veri Analizleri                                                       | 67        |
| 4.4 Sonuçlar                                                                                                       | 69        |
| <b>5. YÜZEY DALGALARININ ÇOK KANALLI ANALİZİ</b>                                                                   | <b>70</b> |
| 5.1 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinin Teorik Esasları                                                      | 71        |
| 5.2 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinde Arazi Parametrelerinin Seçilmesi                                     | 72        |
| 5.3 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinin Yapay Verilerle İncelenmesi                                          | 73        |
| 5.3.1 YDÇA, klasik FOIB ve $p$ - $\tau$ dönüşümünün birlikte incelenmesi                                           | 74        |
| 5.3.2 Sinyal/gürültü oranının etkisinin incelenmesi                                                                | 75        |
| 5.3.3 YDÇA ile yüksek modların incelenmesi                                                                         | 76        |
| 5.4 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi İle Gerçek Veri Analizi                                                 | 77        |
| 5.5 Sonuçlar                                                                                                       | 78        |
| <b>6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA</b>                                                                                     | <b>80</b> |
| 6.1 Sonuçlar                                                                                                       | 83        |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                                                   | <b>86</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                                                                    | <b>89</b> |

## **KISALTMALAR**

**FOIB** : Klasik Frekans Ortamı Işın Biçimlendirme

**MUSIC** : Multiple Signal Classification

**YDÇA** : Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi

**YDSA** : Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                  | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 1.</b> Birinci tür, 0. dereceden Bessel fonksiyonun kök ve<br>ekstremum değerleri ..... | 15              |
| <b>Tablo 2.</b> Sonuçlar.....                                                                    | 85              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            | <u>Sayfa No</u>                                                                                                                                         |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 2.1  | Teorik dispersiyon eğrisi..... 9                                                                                                                        |
| Şekil 2.2  | $\theta_n$ doğrultusundan yayınan düzlem dalga alanı..... 10                                                                                            |
| Şekil 2.3  | Yapay mikrotremor verilerinin elde edilme aşamaları..... 11                                                                                             |
| Şekil 2.4  | Alıcı sayısı 7 olan dairesel dizilim için üretilen örnek yapay veri..... 11                                                                             |
| Şekil 2.5  | Birinci tür, 0. derece Bessel fonksiyonu..... 12                                                                                                        |
| Şekil 2.6  | Alıcı sayısı 25 olan dairesel dizilim ve ilişki katsayıları..... 13                                                                                     |
| Şekil 2.7  | Elde edilen faz hızları..... 14                                                                                                                         |
| Şekil 2.8  | İlk kök değerinden a) düşük ve b) yüksek bir frekansta gözlenen teorik ilişki katsayıları..... 15                                                       |
| Şekil 2.9  | Denklem (2.15) ile elde edilen faz hızları..... 16                                                                                                      |
| Şekil 2.10 | Alıcı sayıları farklı dairesel dizilimler..... 17                                                                                                       |
| Şekil 2.11 | Alıcı sayısı 4, 7, 13 ve 25 olan dizilimlerin analizinden elde edilen ilişki katsayıları..... 17                                                        |
| Şekil 2.12 | Alıcı sayısı 4, 7, 13 ve 25 olan dizilimlerin analizinden elde edilen faz hızları..... 18                                                               |
| Şekil 2.13 | Örnek eşkenar üçgen dizilim..... 19                                                                                                                     |
| Şekil 2.14 | Eşkenar üçgen dizilim kullanılırken dalga alanının yayılım doğrultusu farklı iken elde edilen katsayılar..... 20                                        |
| Şekil 2.15 | Dört farklı yarıçap ile oluşturulan eşkenar üçgen dizilimlerin analizi ile elde edilen uzamsal ilişki katsayıları..... 21                               |
| Şekil 2.16 | Teorik ilişki katsayılarının faz hızına göre değişimi..... 19                                                                                           |
| Şekil 2.17 | Dört ayrı yarıçap kullanarak elde edilen dispersiyon eğrileri.... 22                                                                                    |
| Şekil 2.18 | Dört farklı yarıçap için, $f_o = 2$ Hz değerinde gözlenen, dört ayrı ilişki katsayısına karşılaştırılabilir hız değerleri..... 23                       |
| Şekil 2.19 | Dört ayrı yarıçap kullanarak en küçük kareler anlamında elde edilen dispersiyon eğrileri..... 23                                                        |
| Şekil 2.20 | Teorik dispersiyon eğrisi..... 24                                                                                                                       |
| Şekil 2.21 | Alıcı sayısı 25 olan dairesel dizilim verilerinden elde edilen ilişki katsayıları ve faz hızları..... 25                                                |
| Şekil 2.22 | Dört farklı yarıçap için elde edilen ilişki katsayıları..... 26                                                                                         |
| Şekil 2.23 | Üçgen dizilim kullanılarak elde edilen faz hızları..... 26                                                                                              |
| Şekil 2.24 | Farklı oranlarda eklenen rastgele gürültü ile özilişki yönteminin analizi..... 27                                                                       |
| Şekil 2.25 | Yayılım doğrultuları $20^\circ$ - $90^\circ$ arasında değişen eşit genlikli, eşit fazlı 50 dalga alanı durumunda elde edilen ilişki katsayıları..... 29 |
| Şekil 2.26 | İlişki katsayılarının tümünü ve ilk ekstremumuna kadar kullanarak elde edilen faz hızları..... 30                                                       |

|                   |                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.27</b> | Eşkenar üçgen dizilimlerin köşelerindeki alıcılar arasındaki ilişki de dikkate alınarak elde edilen faz hızları.....                                                              | 31 |
| <b>Şekil 2.28</b> | Dairesel dizilim, doğrusal dizilim ve bu geometri kullanılarak oluşturulan eşkenar üçgen dizilim.....                                                                             | 33 |
| <b>Şekil 2.29</b> | Oluşturulan eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen ilişki katsayıları.....                                                                                                | 33 |
| <b>Şekil 2.30</b> | Beş dakikalık, 12 ayrı veri grubundan elde edilen faz hızları....                                                                                                                 | 34 |
| <b>Şekil 2.31</b> | Eşkenar üçgen dizilim verilerine uygulanan uzamsal özilişki yöntemi ile elde edilen dispersiyon eğrisi.....                                                                       | 35 |
| <b>Şekil 2.32</b> | Özilişki yönteminde kullanılan alıcı dizilimi.....                                                                                                                                | 36 |
| <b>Şekil 2.33</b> | İlk beş dakikalık veriden alıcılar arasındaki mesafe 15, 30, 56,                                                                                                                  | 31 |
| <b>Şekil 2.34</b> | Beş dakikalık, 12 ayrı veri grubundan elde edilen faz hızları.....                                                                                                                | 37 |
| <b>Şekil 2.35</b> | Dört farklı alıcı mesafesi kullanılarak elde edilen dispersiyon eğrisi ve standart sapmaları.....                                                                                 | 39 |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Doğrusal ve dairesele dizilim yuvarlatma fonksiyonları.....                                                                                                                       | 42 |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Farklı dairesele dizilim yuvarlatma fonksiyonları.....                                                                                                                            | 45 |
| <b>Şekil 3.3</b>  | Eşkenar üçgen dizilimlerin analizinden elde edilen hızlar.....                                                                                                                    | 46 |
| <b>Şekil 3.4</b>  | Doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB yöntemi, dairesele dizilime uygulanan özilişki yöntemi ve klasik FOIB yönteminden elde edilen faz hızları.....                            | 47 |
| <b>Şekil 3.5</b>  | Yayınım doğrultuları farklı, eşit genlikli iki dalga alanı için yapılan analizlerden elde edilen faz hızları.....                                                                 | 48 |
| <b>Şekil 3.6</b>  | Yarıçapı 500 m olan dizilime uygulanan klasik FOIB yöntemi sonuçları.....                                                                                                         | 48 |
| <b>Şekil 3.7</b>  | Dairesel dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB, özilişki ve MUSIC yöntemi ile doğrusal dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB yöntemi sonucunda elde edilen faz hızları..... | 50 |
| <b>Şekil 3.8</b>  | Yarıçapı 80 m olan dizilim içi üretilen yapay veriye uygulanan MUSIC yöntemi sonuçları.....                                                                                       | 51 |
| <b>Şekil 3.9</b>  | Gerçek temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri ile örnek yapay veri.....                                                                                                  | 52 |
| <b>Şekil 3.10</b> | Yarıçapı 80 m ve 300 m olan dairesele dizilim verilerinin analizinden bulunan faz hızları.....                                                                                    | 52 |
| <b>Şekil 3.11</b> | 2.3 Hz frekansındaki güç spektrumları.....                                                                                                                                        | 53 |
| <b>Şekil 3.12</b> | Klasik FOIB ve özilişki yöntemi ile elde edilen faz hızları.....                                                                                                                  | 54 |
| <b>Şekil 4.1</b>  | Zaman-uzaklık eğrileri ve ışın parametresi-kesme zamanı dönüşümleri.....                                                                                                          | 56 |
| <b>Şekil 4.2</b>  | $x-t$ ortamındaki veri ve $p-\tau$ dönüşümü.....                                                                                                                                  | 59 |
| <b>Şekil 4.3</b>  | Uzunluğu 360 m olan dizilimin analizinden elde edilen spektral güç oranları.....                                                                                                  | 62 |
| <b>Şekil 4.4</b>  | Farklı uzunluklardaki dizilimler için spektral güç oranlarının değişimi.....                                                                                                      | 63 |
| <b>Şekil 4.5</b>  | Yapay mikrotremor verilerine farklı oranlarda rastgele gürültü eklendiğinde elde edilen gürültü.....                                                                              | 63 |
| <b>Şekil 4.6</b>  | Farklı doğrultulardan yayınan 12 düzlem dalga alanı için FOIB yöntemi ve $p-\tau$ dönüşümü ile elde edilen görüntü.....                                                           | 65 |
| <b>Şekil 4.7</b>  | Yüksek modların $p-\tau$ dönüşümü ve klasik FOIB ile birlikte incelenmesi.....                                                                                                    | 66 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | Doğrusal dizilim verilerine uygulanan $p-\tau$ dönüşümü                                                                                                                           |    |

|                  |                                                                                                   |    |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                  | sonucu.....                                                                                       | 67 |
| <b>Şekil 4.9</b> | $p$ - $\tau$ dönüşümü ve klasik FOIB yönteminden elde edilen dispersiyon eğrileri.....            | 68 |
| <b>Şekil 5.1</b> | Teorik dispersiyon eğrisi ve üretilen yapay veri.....                                             | 74 |
| <b>Şekil 5.2</b> | Doğrusal bir dizilime uygulanan YDÇA, klasik FOIB yöntemi ve $p$ - $\tau$ dönüşümü sonuçları..... | 75 |
| <b>Şekil 5.3</b> | YDÇA ile farklı oranlardaki rastgele gürültü analizi.....                                         | 75 |
| <b>Şekil 5.4</b> | Teorik temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri ve örnek yapay veri.....                   | 76 |
| <b>Şekil 5.5</b> | YDÇA ve $p$ - $\tau$ dönüşümü ile yüksek modların incelenmesi.....                                | 77 |
| <b>Şekil 5.6</b> | İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsü' nde toplanan veriler ve elde edilen dispersiyon eğrisi..... | 78 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                       |                                         |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| $A$                   | : Düzlem dalga alanının genliği         |
| $c$                   | : Faz hızı                              |
| $C$                   | : Uzamsal özilişki fonksiyonu           |
| $d$                   | : Alıcı mesafesi                        |
| $\delta$              | : Dirak delta                           |
| $D(\omega p, \omega)$ | : Dispersiyon ilişkisi                  |
| $e$                   | : Yönlendirme vektörü                   |
| $f$                   | : Frekans                               |
| $\varphi$             | : Azimut                                |
| $\phi$                | : Faz kayması                           |
| $P(x, \omega)$        | : Faz spektrumu                         |
| $A(x, \omega)$        | : Genlik spektrumu                      |
| $h$                   | : Yan lob yüksekliği                    |
| $J_0$                 | : 0. dereceden 1. tür Bessel fonksiyonu |
| $\mathbf{k}$          | : Dalgasayısı vektörü                   |
| $k_{0,x}, k_{0,y}$    | : Dalgasayısı bileşenleri               |
| $\xi$                 | : Uzaklık                               |
| $N(\omega p, \omega)$ | : Kaynak etkisi                         |
| $L$                   | : Ana lob genişliği                     |
| $\lambda$             | : Dalga boyu                            |
| $\lambda_i$           | : $i$ . özdeğer                         |
| $n(t)$                | : Rastgele gürültü                      |
| $p$                   | : Işın parametresi                      |
| $P$                   | : Güç spektrumu                         |
| $\mathbf{R}$          | : Uzaysal ilişki matrisi                |
| $r$                   | : Yarıçap                               |
| $r(t)$                | : Kaynak fonksiyonu                     |
| $\rho$                | : Uzamsal özilişki katsayısı            |
| $s(t)$                | : Düzlem dalga alanı                    |
| $s$                   | : Alıcı sayısı                          |
| $t$                   | : Zaman                                 |
| $\tau$                | : Kesme zamanı                          |
| $\theta$              | : Yayınım doğrultusu                    |
| $u(x, t)$             | : Zaman ortamındaki dalga alanı         |
| $U(x, \omega)$        | : Dalga alanının Fourier dönüşümü       |
| $S(p, \tau)$          | : Dalga alanının $p$ - $\tau$ dönüşümü  |
| $\mathbf{v}$          | : Özvektör                              |
| $\omega$              | : Açısal frekans                        |
| $W(k)$                | : Dizilim yuvarlatma fonksiyonu         |
| $w$                   | : Alıcı ağırlıkları                     |
| $x$                   | : Konum                                 |

$x_m$  : En küçük kaynak alıcı aralığı  
 $z_{max}$  : En büyük derinlik

## MÜHENDİSLİK SİSMOLOJİSİNDE YÜZEY DALGASI YÖNTEMLERİ

### ÖZET

S-dalgası hız bilgisi, deprem yer tepkisinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu amaçla, sismik kırılma ve yansıma yöntemleri kullanılabilir. Ancak, yerleşim alanlarında bu yöntemlerin kullanımı sınırlı olabilir. Yerleşim alanlarında, sinyal/gürültü oranı genellikle düşüktür ve alıcıların uzun serimlerle yerleştirilmesi oldukça zordur. Ayrıca, yerleşim alanlarında, yeterince büyük enerji kaynağı kullanılamayabilir. Buna bağlı olarak, inceleme derinliği de sınırlı olacaktır. Bu nedenlerden dolayı, düşük frekanslarda uzun dalgaboyları ile seyahat eden yüzey dalgalarından faydalanma yoluna gidilmiştir.

Yüzey dalgası yöntemlerinde, S-dalgası hızı, belirli bir geometride yerleştirilen alıcı dizilimleriyle kaydedilen verilerden dispersiyon bilgisinin ters çözümünden elde edilmektedir. Aktif ya da pasif kaynaklarla kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler, maliyeti yüksek sondaj tekniklerine ve klasik sismik yöntemlere alternatif oluşturmaları amacıyla geliştirilmiştir. Bu çalışmada, hem yapay hem de arazi verisi kullanarak, dört yüzey dalgası yöntemi, alıcı sayısı, sinyal/gürültü oranının etkisi, farklı doğrultulardan yayılan dalga alanları ve yüksek modlar ile ilgili yapılan sinamalarla incelenmiştir.

İlk olarak, durağan bir stokastik süreç olarak kabul edilen mikrotremorlerin analizi amacıyla geliştirilen uzamsal özilişki yöntemi ele alınmıştır. Daha sonra, dizilim-işleme tekniklerinden klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme ve temel bir dalga alanı dönüşümü olan ışın parametresi-kesme zamanı ( $p - \tau$ ) dönüşümü incelenmiştir. Son olarak, aktif kaynaklı bir yöntem olan yüzey dalgalarının çok kanallı analizi incelenmiştir. Yapay verilerle sınanan bu yöntemler, daha sonra gerçek veriler kullanılarak analiz edilmiştir.

Uzamsal özilişki yönteminde, dört alıcı kullanarak dispersiyon bilgisi belirlenebilir. Literatürde, en az on alıcı ile analiz yapılması gerektiği belirtilen klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemi ile de, dalga alanı tek bir doğrultudan yayınıyor ise, dört alıcı ile faz hızı elde edilebileceği görülmüştür. Özilişki yöntemiyle yapılan analizlerde, farklı doğrultulardan yayılan dalga alanları sorun oluşturmamıştır. Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemi ile güvenilir sonuçlar, dizilimin boyutlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Bu durumda, çözünürlüğü daha yüksek olan ışın biçimlendirme tekniklerinden multiple signal classification (MUSIC) yöntemi ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Doğrusal dizilime uygulanan frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemi ile  $p - \tau$  dönüşümü teorik olarak eşdeğerdir ve elde edilen sonuçlar aynıdır. Her iki yöntemle de yüzey dalgalarının yüksek modları görüntülenebilmektedir. Ancak, özilişki yönteminde yüksek modlar ayırtedilemez. Yüksek modların aktif kaynaklı yöntemlerle daha iyi belirlenebildiği görülmüştür. Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi, aktif kaynaklı da kullanılabilen klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme ve  $p - \tau$  dönüşümü birlikte incelenmiş, benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Daha sonra, arazi verileri ile yapılan analizlerle elde edilen sonuçlar desteklenmiştir.

## **SURFACE WAVE METHODS IN ENGINEERING SEISMOLOGY**

### **SUMMARY**

The S-wave velocity information is used to estimate earthquake site response. For this purpose, seismic reflection and refraction methods can be used. However, in urban conditions, their usage may be limited. In urban conditions, the signal/noise ratio is usually low and deployment of long receiver spreads would be difficult. Also, using large energy sources is usually not possible resulting in shallow investigation depths. Therefore, surface waves propagating with long periods at low frequencies are used to determine S-wave velocities.

In surface wave methods, S-wave velocities are inverted from dispersion information obtained by data recorded with an array of sensors placed in a particular geometry. There are several methods that can be used with active or passive sources. These methods are developed as alternative to high-cost drilling techniques and conventional seismic methods. In this study, using both synthetic and field data, four of the surface wave methods are investigated in terms of the effect of the number of receivers, the existence of multiple signals, higher modes and signal/noise ratio.

First, the spatial autocorrelation method, developed to analyze microtremors assumed to be stationary stochastic wavefields, is taken into consideration. Then, an array-processing technique, known as conventional frequency domain beamforming, and ray parameter-intercept time ( $p-\tau$ ) transform, which is a basic wavefield transformation, are examined. Finally, an active surface wave method, multichannel analysis of surface waves, is considered. After examining these methods by synthetic data, they are also applied to real field data.

In spatial autocorrelation method, it is possible to obtain the dispersion information using only four receivers. In the case of a wavefield propagating only in one direction, four receivers can also be used in conventional frequency domain beamforming, which is, in literature, recommended to be used with at least ten receivers. When multiple signals exist, correlation method can be used most successively. Meanwhile, in conventional frequency domain beamforming, reliable results can be obtained depending on the array size. A high resolution beamforming method, multiple signal classification (MUSIC), provided more accurate results in such a case. Frequency-wavenumber transform and  $p-\tau$  transform are equivalent in theory. As a result, the use of conventional frequency domain beamforming with linear arrays and  $p-\tau$  transform results are similar. Higher modes of surface waves can be determined with these methods if the size of the array is large enough. On the other hand, higher modes can not be separated by autocorrelation method. Higher modes can be determined by active source methods more accurately. In the case of active sources, conventional frequency domain beamforming,  $p-\tau$  transform and multichannel analysis of surface waves provide similar results. Also, these results are supported by analyzing real field data.

## 1. GİRİŞ

Zeminlerin dinamik davranışı, deprem hasarını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Dinamik özelliklerin belirlenmesi (katılık, kesme modülü, kritik sönümlenme oranı vb.), pek çok mühendislik probleminin çözümüne (zemin büyümesi, sıvılaşma, heyelan vb.) katkıda bulunmaktadır. Mühendislik sismolojisinde, zeminin dinamik özellikleri belirlenerek sismik yer tepkisinin elde edilmesinde, S-dalgası hız bilgisi kullanılır. Temel kaya üzerinde yer alan sediman katmanlarının kalınlıklarının ve S-dalgası hızının elde edilmesi, sismik yer tepkisinin belirlenmesi için gereken önemli parametrelerdir. Ayrıca, hız bilgisi sismik risk bölgeleme çalışmalarında da kullanılmaktadır.

Hız bilgisi, laboratuvar ortamında ya da arazi çalışmalarıyla elde edilebilir. Sondajlardan elde edilen zemin örnekleri, örnekleme sırasında kimyasal, termal ve yapısal özellikleri açısından zarar görebilir. Ayrıca, laboratuvar testlerinde statik değerler elde edilir ve bu, yanlış yorumlara neden olabilir. Arazi çalışmalarında ise, hız bilgisi, sismik yansıma/kırılma yöntemi ve kuyuda hız ölçüm teknikleri (down-hole, up-hole, crosshole) ile elde edilebilir. Sondaj gerektirmesinden dolayı, bu tekniklerin maliyeti yüksektir. Sismik yöntemler, başta petrol aramaları olmak üzere, yeraltı suyu aramalarında, köprü, baraj, tünel gibi büyük mühendislik yapılarının yer seçiminde ve temel kaya derinliğinin saptanmasında kullanılmaktadır. Sismik kırılma yöntemi ile düşük hız zonları belirlenememektedir. Sismik yansıma yöntemi ise büyük ölçekli çalışmalar için daha uygundur, bu nedenle, sıkı tabakaların belirlenmesinde sıklıkla olarak kullanılmaktadır.

Yerleşim alanlarında, sismik yöntemler kullanılırken çeşitli zorluklarla karşılaşılabilir. Yerleşim alanlarında, sinyal/gürültü oranı genellikle düşüktür. Ayrıca, uzun alıcı serimleri ile büyük enerji kaynaklarının kullanımı oldukça güçtür. Bu durumda, enerjinin iletimi ve buna bağlı olarak da, inceleme derinliği sınırlı olacaktır. Ayrıca, sismik yöntemler, P-dalgası hız bilgisi elde etmek için daha uygundur. Çünkü, S-dalgası üreten yapay kaynakların, özellikle derin sediman katmanları incelenirken, üretebileceği enerji, kullanımlarının kolaylığı ve

güvenilirliği tartışmalıdır (Satoh ve diğ., 2001). Tüm bu sorunlar karşısında, sismik yöntemler için gürültü olarak kabul edilen yüzey dalgalarının kullanımı önerilmiştir (McMechan ve Yedlin, 1981, Malagnini ve diğ., 1993, Bergstrom, 1999, Miller ve diğ., 1999, 1999, Liu ve diğ., 2000, Satoh ve diğ., 2001, Xia ve diğ., 2002, Kudo ve diğ., 2002). Büyük enerji kaynakları kullanmadan, düşük frekanslarda, uzun dalgaboyları ile seyahat eden yüzey dalgalarından elde edilen dispersiyon bilgisine uygulanan ters çözüm ile S-dalgası hız yapısı belirlenebilir.

Yüzey dalgası yöntemleri, kullanılan enerji kaynaklarına göre aktif kaynaklı ve pasif kaynaklı olarak nitelendirilebilir. Aktif kaynaklarla enerji, titreştirme yoluyla ya da ağırlık düşürme veya balyoz kullanarak üretilir. Aktif kaynaklı çalışmalarda, kaynakla aynı doğrultu üzerinde yerleştirilmiş alıcılardan oluşan doğrusal dizilimler tercih edilmektedir. Pasif kaynaklı (mikrotremor) çalışmalarda, dalga alanının yayılım doğrultusunun belirsizliği nedeniyle, daire, yarı daire, kare ya da herhangi başka bir şekilde oluşturulan iki boyutlu dizilimler kullanılmalıdır.

Sismik yansıma/kırılma yöntemlerine ya da sondaja alternatif oluşturan yüzey dalgası analizlerini etkileyen çeşitli faktörlerle karşılaşılabilir. Bunlara örnek olarak, özellikle mikrotremor çalışmalarında dalga alanının birden fazla doğrultudan yayınıyor olma olasılığı ve yüzey dalgalarının yüksek modları verilebilir. Bu faktörler, elde edilen dispersiyon bilgilerinde çeşitli yanılgılara yol açabilir. Çalışma alanındaki düşük sinyal/gürültü oranları da analizleri olumsuz etkiler. Özetle, her yöntemin üstün veya zayıf olduğu noktalar vardır ve bu faktörlerden farklı şekilde etkilenirler.

Bu çalışmada, literatürde sıklıkla karşılaşılan dört yüzey dalgası yöntemi incelenmiştir. Bunlar, uzamsal özilişki yöntemi, frekans ortamı ışın biçimlendirme,  $p - \tau$  (ışın parametresi-kesme zamanı) dönüşümü ve yüzey dalgalarının çok kanallı analizidir. Teorik esaslar kısaca açıklandıktan sonra, bu yöntemler karşılaştırılarak incelenmiştir. Analizlerin en az kaç alıcı ile yapılabileceği, sinyal/gürültü oranlarının ne olması gerektiği incelenmiştir. Yüksek modların hangi yöntemlerle görüntülenebildiği ve temel mod dispersiyon bilgisinin elde edilmesine engel olup olmadığı araştırılmıştır. Mikrotremorlarla çalışırken, dalga alanının yayılım doğrultusunun belirsizliği çeşitli yanılgılara yol açabilir. Bu durumda, hangi yöntemle sonuca sorunsuz ulaşılacağı incelenmiştir. Üretilen yapay verilerle sınanan yöntemler, arazi verileri ile de incelenmiştir.

İlk olarak incelenen uzamsal özilişki yöntemi, pasif kaynaklı bir yöntemdir. Aki (1957) tarafından mikrotremorlerin zaman-uzayda durağan bir stokastik süreç olduğu varsayımına dayanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemle, dalga alanı yayınının kaydedildiği alıcılar arasında kalan ortamın hız yapısının yanı sıra, dalga alanının karakteristik özellikleri (yayınım doğrultusu, dalga alanın oluşturan dalga türleri) de belirlenebilir. Bu nedenle, volkanik tremorlerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Ferrazzini ve Aki (1991) tarafından, Hawaii’ de, Métaxian ve Lesage (1997) tarafından Masaya Volkanı’ nda, Chouet ve diğ. (1998) tarafından Stromboli Volkanı’ nda, Saccorotti ve diğ. (2001a) tarafından Deception Adası’ nda gözlenen volkanik tremorlerin araştırılmasında kullanılmıştır. İç içe, yarı daireler şeklinde, farklı yarıçaplardan oluşan birden fazla dizilim kullanmışlardır. Bu şekilde, dispersiyon bilgisinin yanı sıra, dalga alanının yayınım doğrultusunu da elde etmişlerdir.

Özilişki yöntemi, mühendislik sismolojisi çalışmalarında, özellikle deprem yer tepkisinin belirlenmesi amacıyla da uygulanmıştır. Hough ve diğ. (1992) tarafından Tiber Vadisi’ ndeki, Malagnini ve diğ. (1993) tarafından Garigliano Vadisi’ ndeki sedimanların, büyütme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Son olarak, 1999 Kocaeli Depremi’ nden sonra zeminin, hasar üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, Avcılar’ da, Kudo ve diğ. (2002) tarafından uygulanmıştır. Bu çalışmalarda, dairesel bir geometride yerleştirilen dört alıcı kullanılmıştır. Bu yöntemin, literatürde en az on alıcılı dairesel dizilimlerle kullanılan frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemine karşın en önemli üstünlüğünün, dört alıcılı dizilim ile çalışılabilmesi olduğu belirtilmektedir.

Dizilim işleme (array processing) yöntemlerinden, klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme (FOIB) ile de, dalga alanı yayınının kaydedildiği alıcılar arasında kalan ortam hakkında bilgi edinilebilir. Bu yöntem, Zywicki ve Rix (1999), Liu ve diğ. (2000) tarafından, S-dalga hız yapısı elde etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemin amacı, dalgasayısı vektörünü belirlemektir. Dalgasayısı vektörü, uzay-zaman ortamında kaydedilen sinyalin yayınım doğrultusunu ve hızını gösteren bir büyüklüktür. Klasik FOIB yöntemi ile yapılan analizlerde, hem doğrusal hem de dairesel dizilimler kullanılabilir. Doğrusal bir dizilim kullanıldığında, sinyalin geliş açısı veya hızı bulunabilirken, iki boyutlu dizilimler kullanıldığı takdirde, her iki bilgiyi de elde etmek mümkündür. İki boyutlu dizilimlerle kullanılan klasik FOIB,

Üretilen yapay verilerle, ziliŖki yöntemi ile karŖılaŖtırılarak incelenmiŖtir. Bölüm 2’ de ziliŖki yöntemi ile analiz edeilen arazi verileri, daha önce klasik FOIB ile de analiz edilmiŖtir (Bozdağ, 2002). Elde edilen sonuçlar, bu bölümde birlikte incelenmiŖtir.

nc olarak ele alınan yöntem, bir dalga alanı dnŖmdr. Sismik prospeksiyon alıŖmalarında, uzaklık-zaman ortamında elde edilen kayıtlara uygulanan  $p-\tau$  dnŖm ile kırılmaları, yansımaları, kırınımaları ve yüzey dalgalarını ayrı ayrı gözlemlemek mümkündür. McMechan ve Yedlin (1981) tarafından, deniz sismiği kayıtlarından dispersiyon bilgisini açığa çıkarmak amacıyla kullanılmıŖtır. Louie (2001) tarafından, sismik kırılma aletsel donanımı kullanarak kaydedilen mikrotremorlere uygulanmıŖtır. Bu dnŖm ile frekans-dalgasayısı dnŖm teorik olarak eŖdeĖerdir. Bu anlamda, doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB yöntemiyle birlikte, hem yapay veriler hem de gerçek veriler kullanarak, incelenmiŖtir.

Son olarak incelenen, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (YDA) yöntemidir. Sismik metodlara alternatif olarak geliŖtirilen ilk yüzey dalgası yöntemlerinden biri olan, yüzey dalgalarının spektral analizinde (YDSA) karŖılaŖılan sorunlar sonucu geliŖtirilmiŖtir. YDSA yönteminde iki alıcı ile analiz yapılmaktadır. Bir ift alıcı ile, ilgilenilen frekans aralığında faz hızı elde edebilmek, cisim dalgalarının ve gürültünün kayıtlardaki etkisini en aza indirmek için farklı alıcı mesafeleri kullanılmalıdır. Bu durumda, veri toplama aŖaması çok zaman almaktadır. Ayrıca, yüzey dalgalarının yüksek modları da gözlenememektedir. Bir grup alıcı ile bir kerede veri toplamanın mümkün olması, YDA yönteminin tercih edilmesine neden olmuŖtur (Park ve diğ., 1999). Bu alıŖmada YDA, yapay veriler kullanarak, aktif kaynaklı da kullanılabilen klasik FOIB ve  $p-\tau$  dnŖm ile karŖılaŖtırılarak incelenmiŖtir.

## 2. UZAMSAL ÖZİLİŞKİ YÖNTEMİ

Uzamsal özilişki (Spatial Autocorrelation) yöntemi, Aki (1957) tarafından, mikrotremorlerin zaman-uzayda durağan bir stokastik süreç olduğu varsayımına dayanılarak geliştirilmiştir. Daire ya da yarı daire üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş alıcılardan oluşan bir dizilimle kaydedilen sinyallerle, dizilimin merkezinde bulunan alıcıda kaydedilen sinyal arasındaki ilişkiden yola çıkılmıştır.

Bu yöntemin amaçlarından biri, karmaşık dalga alanlarının karakteristik özelliklerinin (yayınım doğrultusu, polarizasyon modu, vb) belirlenmesidir. Bu nedenle, volkanik tremor gibi sismologlar için çalışılması oldukça zor olan bir konuda sıklıkla kullanılmaktadır (Ferrazzini ve diğ.,1991, Métaixian ve diğ., 1997). Genellikle, yarı dairelerden oluşan dizilimler ile analiz yapılmaktadır. Uzamsal özilişki yöntemi ile, karmaşık dalga alanını oluşturan dalga türleri, bunların dalga alanına katkısı, yayınım doğrultuları, polarizasyonları hakkında bilgi edinilebilir.

Uzamsal özilişki yöntemi, bir adım ileriye götürülerek, mühendislik amaçlı çalışmalarda da uygulanmaya başlamıştır. Dairesel dizilimle kaydedilen mikrotremorlerden, dalga alanı yayınımın kaydedildiği alıcılar arasında kalan ortamın hız yapısı hakkında da bilgi edinilebilmektedir. Böylece, yöntem, deprem yer tepkisinin belirlenmesinde de kullanılmaya başlamıştır (Malagnini ve diğ., 1993, Kudo ve diğ., 2002). Aynı amaçla kullanılan ve bazıları bu çalışmada incelenen, başka yöntemler de mevcuttur. Özilişki yönteminin, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında üstün veya zayıf olduğu noktalar vardır.

Bu bölümde, öncelikli olarak, uzamsal özilişki yönteminin, yüzey dalgası analizlerindeki performansı incelenmiştir. Yöntem kısaca açıklandıktan sonra; yapay veriler üretilerek, alıcı sayısının, sinyal/gürültü oranının, farklı doğrultulardan yayılan birden fazla dalga alanının sonuçları nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bölüm 2.4' de, arazi verileri kullanılarak yöntemin işleyişine örnekler verilmiştir.

## 2.1 Uzamsal Özilişki Yönteminin Teorik Esasları

Mikrotremorlerin ve mikroseismlerin, yeryüzünde, farklı doğrultulardan yayınan, her bir frekansta aynı faz hızına sahip, farklı oranlardaki dalga türlerinin toplamından oluştuğu kabul edilir (Aki, 1957). Bu durumda, faz hızı, bu sinyallerin uzamsal ilişkilerinin azimutal ortalaması ile ilişkilendirilebilir (Aki, 1957).

Uzun periyodlu sismik gürültüler, mikroseism olarak adlandırılmaktadırlar. Mikroseismlerin kaynağı, atmosferik olaylar ve okyanuslardaki akımlardır. Periyodu daha kısa olan mikrotremorlerin kaynağı, trafik ve endüstriyel gürültülerdir. Analizlerde genellikle çalışma alanı yakınlarındaki trafik gürültüsü kullanılmaktadır (Lermo ve Chàvez-Garcia, 1994).

Uzamsal özilişki yönteminin teorik esasları, Aki (1957) tarafından verilmiştir ve mikrotremorlerin yüzey dalgalarından (özellikle Rayleigh dalgalarından) oluştuğu varsayılmıştır. Dalga alanı, zaman-uzayda, durağan bir stokastik süreç ise, zamansal spektrum ile uzamsal spektrumun arasında bir ilişki kurulabilir. Bu ilişkiyi açıklamak için, ilk olarak, Bölüm 2.1.1' de en basit haliyle bir boyutlu (1-B) dispersif dalgalar ve Bölüm 2.1.2' de de iki boyutlu (2-B) dispersif dalgalar ele alınmıştır.

### 2.1.1 Bir boyutlu dispersif dalgalar

Herhangi bir  $x$  noktasında gözlemlenen, mikrotremor dalga alanını,  $u(x, t)$ , farklı  $\omega$  açısal frekanslarında, farklı  $c(\omega)$  faz hızlarına sahip düzlem dalgaların toplamı olarak kabul edebiliriz.  $u(x, t)$ , referans noktasındaki sinyal ise,  $\xi$  uzaklığındaki  $u(x + \xi, t)$  sinyali ile arasındaki uzamsal ilişki fonksiyonu,

$$C(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) u(x + \xi, t) dt \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda,  $\xi$  uzaklığı için elde edilen ilişki fonksiyonunun zamansal güç spektrumu ile olan ilişkisi,

$$C(\xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \Phi(\omega) \cos \left[ \frac{\omega}{c(\omega)} \xi \right] d\omega \quad (2.2)$$

şeklinde belirtilebilir. Eğer güç spektrumu,  $\Phi(\omega)$ ,  $\omega_0$  merkez frekansı civarında dar-bandlı bir filtre ile süzülen sinyallerden elde edilirse, izleyen şekilde verilebilir:

$$\Phi(\omega) = P(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0), \quad \omega > 0 \quad (2.3)$$

Burada,  $\delta$  dirak delta fonksiyonu,  $P(\omega_0)$  ise  $\omega_0$  frekansındaki spektral güç yoğunluğudur. Bu eşitliği denklem (2.2)' de yerine koyarsak,  $\xi$  uzaklığı için  $\omega_0$  frekansındaki uzamsal özilişki fonksiyonu,

$$C(\xi, \omega_0) = P(\omega_0) \cos\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} \xi\right) \quad (2.4)$$

halini alır. Bu noktadan hareketle,  $\omega_0$  frekansındaki özilişki katsayısı,  $\xi$  uzaklığındaki sinyal ile, referans olarak kabul edilen sinyalin özilişki fonksiyonlarının oranlanması ile,

$$\rho(\xi, \omega_0) = \frac{C(\xi, \omega_0)}{C(0, \omega_0)} = \cos\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} \xi\right) \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Sabit bir  $\xi$  uzaklığında, belirli bir frekans aralığı için özilişki katsayılarının elde edilmesi, bu yöntemin temelini oluşturmaktadır.

### 2.1.2 İki boyutlu dispersif dalgalar

İki boyutlu dalgalar ele alındığında,  $(x, y)$  referans noktasında kaydedilen sinyal ile  $(x + \xi, y + \eta)$  noktasında kaydedilen sinyal arasındaki uzamsal özilişki fonksiyonu,

$$C(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, t) u(x + \xi, y + \eta, t) dt \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kutupsal koordinatları  $(r, \varphi)$  kullanarak  $\xi = r \cos \varphi$ ,  $\eta = r \sin \varphi$  bağıntılarını yerlerine koyarsak, özilişki fonksiyonu

$$C(r, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, t) u(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, t) dt \quad (2.7)$$

halini alır. Burada,  $u(x, y, t)$  referans olarak kabul edebileceğimiz merkez alıcıda kaydedilen sinyali,  $u(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, t)$  ise  $r$  uzaklığında,  $\varphi$  azimutundaki alıcıda kaydedilen sinyali göstermektedir. Düzlem dalgaının her  $\omega$  frekansında tek bir  $c(\omega)$  faz hızına sahip olduğu düşünülürse, denklem (2.7)' den  $r$  uzaklığı için elde edilen ilişki fonksiyonlarının azimutal ortalaması,  $\bar{C}(r)$ ,

$$\bar{C}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(r, \varphi) d\varphi \quad (2.8)$$

bağıntısına eşittir. Uzamsal özilişki fonksiyonu, zamansal güç spektrumu ile ilişkili olarak,

$$\bar{C}(r) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r\right) d\omega \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır.  $r$  uzaklığında,  $\omega_o$  frekansındaki güç yoğunluğu spektrumu ile özilişki fonksiyonu,

$$\bar{C}(r, \omega_o) = \frac{1}{\pi} P(\omega_o) J_0\left(\frac{\omega_o}{c(\omega_o)} r\right) \quad (2.10)$$

olarak verilir. Bu noktadan hareketle, özilişki katsayısı, dizilimin çevresindeki alıcılarda kaydedilen sinyallerin ilişki fonksiyonlarının, referans olarak kabul edilen merkezdeki alıcıdan elde edilen sinyalin ilişki fonksiyonuna oranlanması ile,

$$\rho(r, \omega_o) = \frac{\bar{C}(r, \omega_o)}{\bar{C}(0, \omega_o)} = J_0\left(\frac{\omega_o}{c(\omega_o)} r\right) = J_0(k_o r) \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Azimutal ortalamaları alınan özilişki katsayıları, 0. dereceden 1. tür Bessel fonksiyonu oluşturmaktadır. Burada,  $k_o$ , dalgasayısını göstermektedir. Bu bağıntı ile, sabit bir  $r$  yarıçapı için, belirli bir frekans aralığında ilişki katsayıları biliniyorsa, faz hızını bulmak mümkündür.

Uzamsal özilişki katsayıları, frekans ortamında da elde edilebilir (Malagnini ve diğ., 1993). Bu durumda ilişki katsayıları,

$$\rho(r, \omega_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\int_{\omega_o - \Delta\omega}^{\omega_o + \Delta\omega} \text{Re}[U(x, y, \omega) U^*(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, \omega) d\omega]}{\sqrt{\int_{\omega_o - \Delta\omega}^{\omega_o + \Delta\omega} U^2(x, y, \omega) d\omega} \sqrt{\int_{\omega_o - \Delta\omega}^{\omega_o + \Delta\omega} U^2(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, \omega) d\omega}} d\varphi \quad (2.12)$$

bağıntısı ile bulunabilir.  $U(x, y, \omega)$ ,  $(x, y)$  noktasındaki (merkezdeki)  $u(x, y, t)$  sinyalinin zaman üzerinden Fourier dönüşümüdür.  $U^*(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, \omega)$  ise, merkezden  $r$  uzaklığında,  $\varphi$  azimutundaki alıcıda kaydedilen

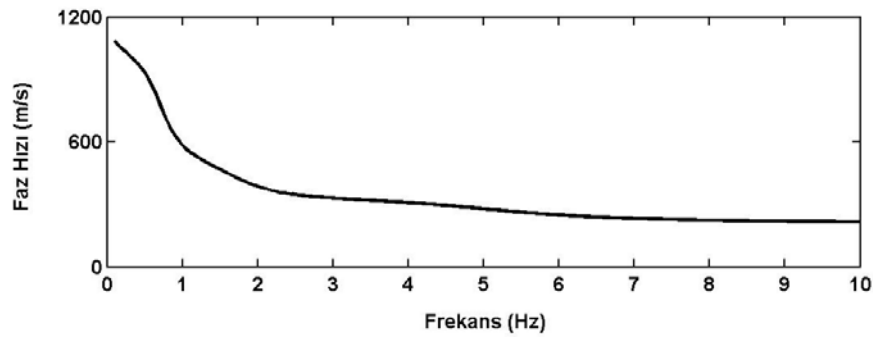
$u(x + r \cos \varphi, y + r \sin \varphi, t)$  sinyalinin, Fourier dönüşümünün kompleks eşleniğidir. Katsayılar hesaplanırken, integrasyon işlemi  $\omega_o$  merkez frekans olmak üzere,  $[\omega_o + \Delta\omega, \omega_o - \Delta\omega]$  aralığında yapılmaktadır. Zaman ortamında ise, katsayılar,  $\omega_o$  civarında dar-bandlı bir filtre ile süzülerek elde edilir. Frekans ortamı formülü ve denklem (2.11) ile zaman ortamında elde edilen katsayılar aynıdır. Uygulamada, zaman ortamı formülü süzme işlemi gerektirdiğinden, frekans ortamı yaklaşımı daha hızlıdır.

## 2.2 Uzamsal Özilişki Yönteminin Yapay Verilerle İncelenmesi

İlk olarak, uzamsal özilişki yöntemi, üretilen yapay verilerle incelenmiştir. Yapay verilerin nasıl üretildiği kısaca açıklandıktan sonra, faz hızının elde edilmesi ile alıcı sayısının, gürültü oranının ve farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının analizlere olan etkisi araştırılmıştır.

### 2.2.1 Yapay verilerin üretilmesi

Yapay mikrotremor verileri üretilirken, Şekil 2.1’ de görülen teorik dispersiyon eğrisi kullanılmıştır. Bu eğri oluşturulurken, rastgele bir hız yapısı yerine, Kudo ve diğ. (2002)’ nin, Avcılar’ da, uzamsal özilişki yöntemi ile elde etmiş oldukları S-dalga hız yapısı kullanılmıştır. Bunun nedeni, kullanılan yöntemlerin benzer olması ve aynı çalışma alanından elde edilmiş olan verilerle benzer analizler yapılacak olmasıdır.



Şekil 2.1 Yapay mikrotremor verileri üretilirken kullanılan teorik faz hızı dispersiyon eğrisi.

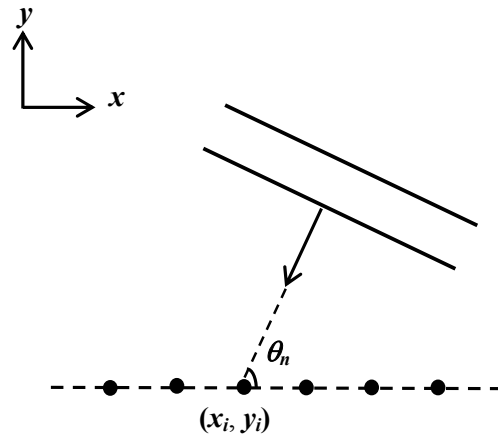
$t$  zamanında,  $(x_i, y_i)$  noktasında yer alan alıcıdaki yapay mikrotremor verisi,

$$u(x_i, y_i, t) = \sum_{n=1}^N s_n(x_i, y_i, t) * r_n(x_i, y_i, t) + n(t) \quad (2.13)$$

bağıntısı ile verilebilir. Burada,  $s_n(x_i, y_i, t)$ , birim dürtü tepkisini (impulse response) göstermektedir.  $r_n(x_i, y_i, t)$ , beyaz gürültü olarak modellenen kaynak fonksiyonu,  $n(t)$  ise mikrotremorlerle ilişkisi olmayan rastgele gürültüdür. Evrişim işlemi, (\*) sembolü ile gösterilmiştir. Düzlem dalga alanı,  $N$  farklı doğrultudan yayınıyor olabilir. Herhangi bir  $\theta_n$  doğrultusundaki impulsif kaynak tarafından oluşturulan düzlem dalga alanının (Şekil 2.2),  $(x_i, y_i)$  noktasında bulunan alıcıdaki kaydı,

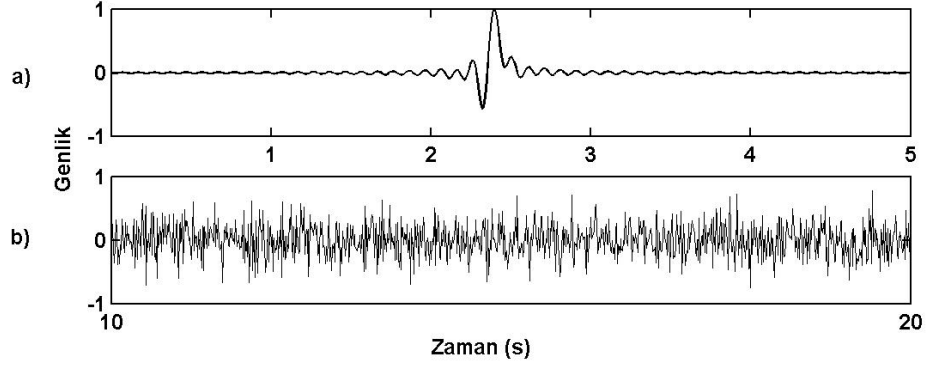
$$s_n(x_i, y_i, t) = \frac{A_n}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ i \left( \frac{\omega(x_i \cos \theta_n + y_i \sin \theta_n)}{c(\omega)} - \omega t \right) \right] d\omega \quad (2.14)$$

olarak verilebilir.  $A_n$ , düzlem dalga alanının genliğini göstermektedir. Liu ve diğ. (2002), yapay mikrotremor verileri üretirken benzer bir yaklaşım kullanılmışlardır.

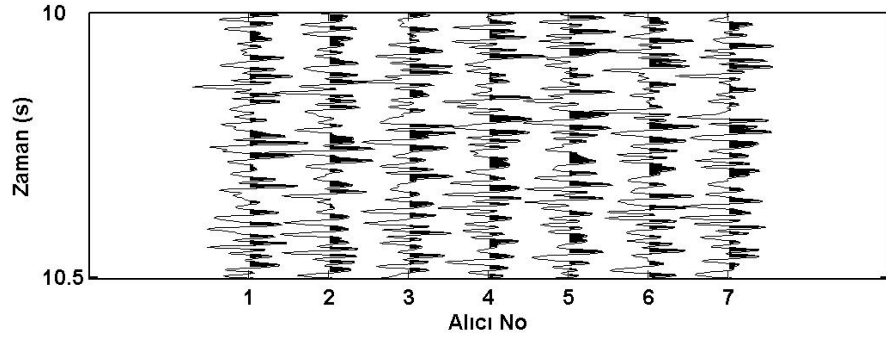


Şekil 2.2  $\theta_n$  doğrultusundan yayınan düzlem dalga alanı.

Yapay mikrotremor verisi (Şekil 2.4), birim dürtü tepkisinin (Şekil 2.3a) kaynak fonksiyonuyla (Şekil 2.3b) evriştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Analizlerde kullanmak üzere, 10 dakika uzunluğunda, örnekleme aralığı 0.01 s olan yapay veriler, rastgele gürültü eklenmeden üretilmiştir. Dalga alanının yayınım doğrultusu  $45^\circ$  olarak alınmıştır. Örnek olarak, 7 alıcılı dairesel dizilim için üretilen yapay veriler, Şekil 2.4’ de görülebilir.



Şekil 2.3 Yapay mikrotremor verilerinin elde edilirken kullanılan a) birim dürtü tepkisi ve b) kaynak fonksiyonu.

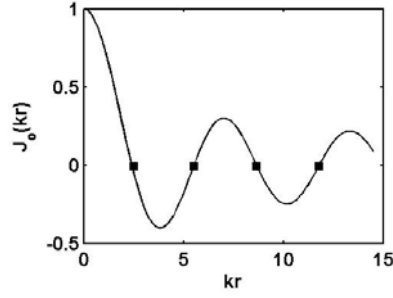


Şekil 2.4 Alıcı sayısı 7 olan dairesel dizilim için üretilen örnek yapay mikrotremor verisi.

### 2.2.2 Özilişki yöntemi ile faz hızının elde edilmesi

Herhangi bir dizilim ile veri toplamadan önce, kullanılacak dizilimin yarıçapının belirlenmesi gerekir. Denklem (2.11)' den anlaşılacağı üzere, faz hızı, gözlenen özilişki katsayılarına 0. dereceden 1. tür Bessel fonksiyonunun çakıştırılması ile elde edilir. Bu nedenle, öncelikle, 0. dereceden 1. tür Bessel fonksiyonunun özelliklerini anlamak için, Şekil 2.5' i inceleyelim. Şekilde değişen  $kr$  değerlerine karşılık elde edilen  $J_0(kr)$  değerleri çizdirilmiştir.

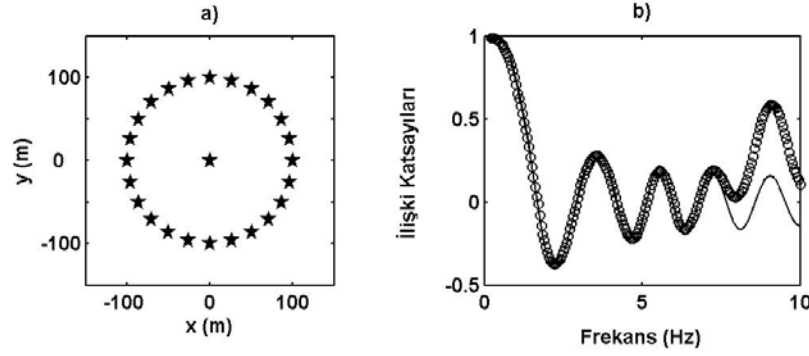
Görüldüğü gibi,  $kr = 0$  için,  $J_0(0)=1$  değerini almaktadır. Bessel fonksiyonunun salınan bir karakteri vardır. Şekil 2.5' den de görülebileceği gibi,  $kr$  arttıkça, Bessel fonksiyonunun genliği  $\sqrt{kr}$  olarak azalmaktadır. İlk kök değeri,  $kr = 2.4052$  noktasında bulunmaktadır. Yarıçap belirlenirken, ilgilendiğimiz frekans aralığında, en azından ilk kökün veya ilk ekstremumun gözlenmesine dikkat edilmelidir. Böylece, elde edilen katsayıların bir Bessel fonksiyonuna çakıştırılabileceği anlaşılır.



Şekil 2.5 Sıfırıncı derece, 1. tür Bessel fonksiyonu,  $J_0(kr)$ . Kare semboller, Bessel fonksiyonunun köklerini göstermektedir.

Yapay verilerle çalışıldığından, ilk kökün gözlemlendiği en küçük dalgaboyu ( $\lambda_{\min}=146\text{m}$ ), teorik dispersiyon eğrisinden bilinmektedir. Bu noktadan hareketle,  $kr = 2\pi r/\lambda_{\min} = 2.4052$  bağıntısını kullanarak, yarıçapın  $r = 0.4\lambda_{\min}$  değerini alacağı bulunabilir. Böylece, yarıçapı 60 m' den fazla olan dizilim kullanılırsa ilk kök gözlenecektir. Eğer, ilk ekstremum değerini de gözlemek istiyorsak, bu durumda,  $J_0(kr) = J_0(\pi)$  değerini alacaktır.  $kr = \pi$  eşitliğini kullanarak, yarıçapın minimum dalgaboyunun ( $\lambda_{\min} = 80 \text{ m}$ ) yarısından ( $r = \lambda_{\min}/2 = 40 \text{ m}$ ) fazla olması gerektiğini bulabiliriz. Gözlemek istediğimiz en uzun dalgaboyu ise,  $kr = 0.5$  için,  $kr = 2\pi r/\lambda_{\max} = 0.5$  bağıntısından,  $12r$  olarak bulunur. Benzer şekilde,  $kr = 1$  için, gözlenebilen en uzun dalgaboyu, yarıçapın yaklaşık altı katıdır. Pratikte bu değeri belirlerken, incelemek istediğimiz derinliğe bağlı olarak karar verebiliriz. İnceleme derinliği, en uzun dalgaboyunun yarısı kadardır. En uzun dalgaboyu, yarıçapın yaklaşık 7-8 katı kadar olabilir. Bu bilgilere dayanarak, yarıçap 100 m olarak seçilmiştir. Bu durumda, birden fazla kök ve ekstremum değeri gözlenecektir.

Bir alıcısı dairenin merkezinde yer alan 25 alıcılı dizilim (Şekil 2.6a) için, yapay mikrotremor verileri üretilmiştir. Yöntemin işleyişini daha iyi anlayabilmek için, bu aşamada verilere gürültü eklenmemiştir. Dalga alanının yayılımı doğrultusu  $45^\circ$  dir. Şekil 2.6b' de bu dizilim ile elde edilen verilerden 40 s' lik bloklar halinde, frekans ortamında hesaplanan ilişki katsayıları görülmektedir.



Şekil 2.6 a) Alıcı sayısı 25 olan dairesel dizilim ve b) elde edilen ilişki katsayıları (yuvarlak semboller). Siyah eğri, teorik (gerçek) ilişki katsayılarını göstermektedir.

Görüldüğü gibi, ilişki katsayıları, bir Bessel fonksiyonuna çakıştırılabilir. İlişki değerleri, yaklaşık 6.5 Hz' e kadar teorik (gerçek) katsayı eğrisi ile uyum içerisindedir. Teorik katsayılar, faz hızı eğrisi ve yarıçap bilindiğine göre,

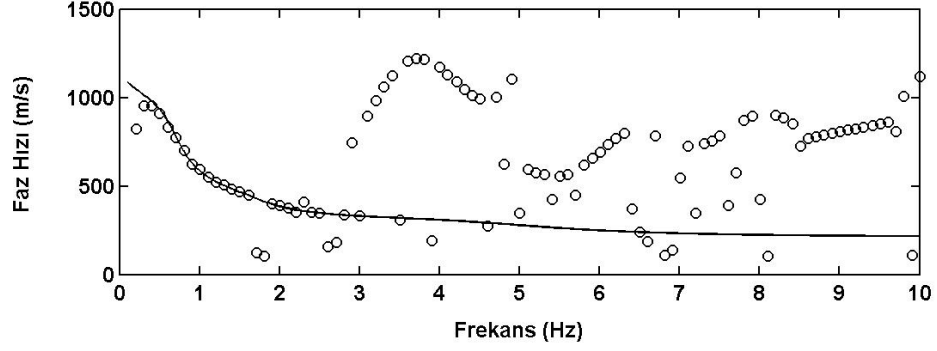
$J_0\left(\frac{2\pi f}{c(f)}r\right)$  bağıntısı ile hesaplanabilir. Pratikte, teorik katsayıları bilmek mümkün

değildir. Bu durumda, yaklaşık 6.5 Hz' den sonra katsayı eğrisinde kök bulunmamasına bağlı olarak, eğrinin bozulmadan devam ettiği frekans aralığını belirleyebiliriz.

Her bir frekansa karşılık elde edilen özilişki katsayıları ve yarıçap bilinmektedir. Tek bilinmeyen ise faz hızıdır. Faz hızının bulunması, basit bir kök bulma problemi gibi düşünülebilir.  $\omega_o$  frekansında, makul bir  $[c_{\min}, c_{\max}]$  aralığında değişen hızlar kullanılarak hesaplanan katsayı ile gözlenen katsayı (Şekil 2.6b) arasındaki farka bakılmıştır. Bu farkın en küçük olduğu  $c_o$  değeri, faz hızı olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde, faz hızı,

$$c = \min_{c_{\min} < c_o < c_{\max}} \left\{ \left| \rho(r, \omega_o) - J_0\left(\frac{\omega_o}{c_o}r\right) \right| \right\} \quad (2.15)$$

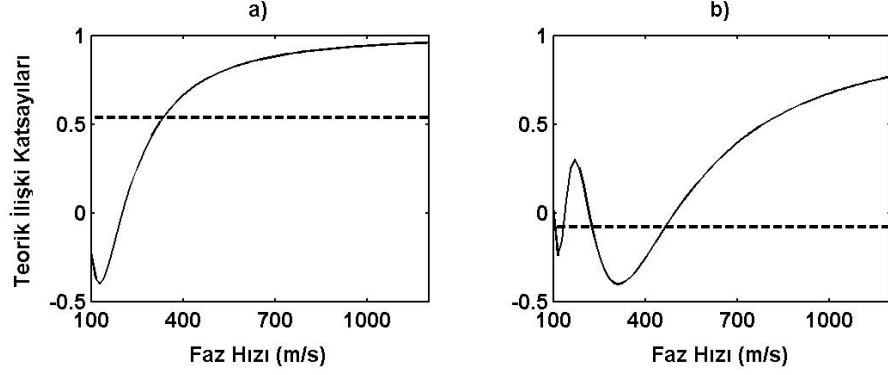
bağıntısı ile bulunabilir.  $\rho(r, \omega_o)$ ,  $\omega_o$  frekansında gözlenen ilişki katsayısıdır. Bu şekilde dispersiyon eğrisi bulunurken, hız aralığı 100-1300 m/s olarak seçilmiştir. Elde edilen faz hızları, Şekil 2.7' de görülmektedir.



Şekil 2.7 Elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller). Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

Şekilde, 10 Hz' e kadar elde edilen faz hızları görülebilir. Hızlarda, yaklaşık 2 Hz civarında, gerçek dispersiyon eğrisine dik doğrultuda saçılmalar görülmektedir ve bu durum, yüksek frekanslarda da devam etmektedir. Saçılmaların nedeni, dalgasayısı katlanması değildir. En küçük alıcı aralığı ( $d_{\min}$ ), 26 m' dir ve Nyquist dalgasayısından ( $k_{\max} = \pi/d_{\min}$ ), katlanma oluşmadan gözlenebilecek en büyük dalgasayısının 0.12 olacağı bulunabilir. Teorik dispersiyon eğrisi bilindiğinden, katlanma oluşmadan gözlenebilecek en yüksek frekansın 2 Hz' den yüksek bir değer olduğu (yaklaşık 5.6 Hz) görülür. Bu durumda, bu saçılmaların dalgasayısı katlanmasından oluşmadığı anlaşılar.

Şekil 2.6b' de görülebileceği gibi, 2 Hz civarında ilişki katsayısı eğrisinin ilk ekstremumu gözlenmektedir. Bu saçılmalardan tamamen kurtulmak için, bu bağıntı ile, ilk kök değerine kadar faz hızının hesaplanmasına karar verilmiştir. Çünkü, bu değerden sonra yanlış faz hızları elde edilmektedir. Bu durumu daha iyi anlamak için, Şekil 2.8 incelenebilir. İlk kök değerinin bulunduğu 1.65 Hz' den daha düşük bir frekans olan 1.1 Hz için, gözlenen ilişki katsayısını ( $\rho(r, \omega_o) = 0.6290$ ) kullanarak, elde edilen hız değeri, 540 m/s' dir. Şekil 2.8a' da görülebileceği gibi bu ilişki katsayısına (kesikli doğru) çakışan tek bir hız değeri vardır. Ancak, ilk kökün gözlendiği 1.65 Hz' den daha yüksek bir frekans olan 3.0 Hz için, gözlenen ilişki katsayısına (kesikli doğru) çakışan hız değeri, Şekil 2.8b' den de anlaşılabileceği üzere birden fazladır. İlk kök değerine kadar gözlenen katsayıdan elde edilebilen tek bir hız değeri mevcutken, ilk kök değerinden sonra gözlenen ilişki katsayısını veren birçok hız değeri olabilir. Herhangi biri gerçek hız olabilir, pratikte bunu bilmemiz mümkün değildir.



Şekil 2.8 İlk kök değeri olan 1.65 Hz’ den a) düşük bir frekans ( $f_o = 1.1$  Hz) için hız değeri tekil olarak elde edilebilirken, b) yüksek bir frekans ( $f_o = 3$  Hz) için aynı ilişki katsayısını veren birden fazla faz hızı vardır. Gözlenen ilişki katsayısı, kesikli doğru ile gösterilmiştir. Bu doğru ile teorik katsayı eğrisinin kesiştiği değerler, gözlenen katsayıya karşılaştırılabilir faz hızlarını göstermektedir.

Bu durumda, gerçek hızdan farklı bir hız değeri elde edilebilir. Sonuç olarak, yanlış faz hızları elde etmemek için başka bir yol izlenmiştir. Çok sayıda alıcının kullanıldığı analizlerde, kök ve ekstremum değerlerinden hız bulunabilir (Aki, 1957, Chouet ve diğ., 1998, Saccorotti ve diğ., 2001a, Saccorotti ve diğ., 2001b, Saccorotti ve diğ., 2003). Böylece, gerçek hız elde edilebilir. Çünkü, aynı katsayıya çakışan birden fazla hız değeri bulunsa bile hangisinin gerçek hız olduğunu bilmek mümkündür. Şekil 2.6b hatırlanacak olursa, beş kök ve beş ekstremum gözlenmiştir. Bu şekilde hız bulurken, Tablo 1’ den faydalanılabilir. Örneğin, ilişki değerleri eğrisinin ilk kökünün bulunduğu  $f=1.65$  Hz için, tablodaki ilk kök değerini kullanarak,

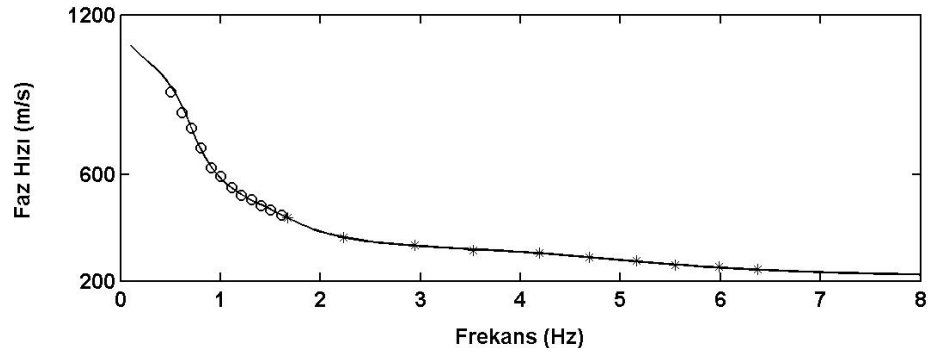
$$2.40 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1.65(\text{Hz})}{c_{1.65}} \cdot 100(m)$$

eşitliği yazılabilir. Böylece, bu frekanstaki faz hızı,  $c_{1.65} = 433.45$  m/s olarak hesaplanabilir. Bu değerlerden hesaplanan hızların eklenmesi ile 7 Hz’ e kadar yaklaşık dispersiyon eğrisi elde edilebilir.

Şekil 2.9’ da, kök ve ekstremum noktalarından hesaplanan faz hızları, yıldız semboller ile gösterilmiştir. Şekilde yuvarlak sembollerle gösterilen hızlar ise, ilk kökün bulunduğu 1.65 Hz’ e kadar, denklem (2.15) kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 1. Sıfırıncı derece, 1. tür Bessel fonksiyonunun kök ve ekstremum değerleri.

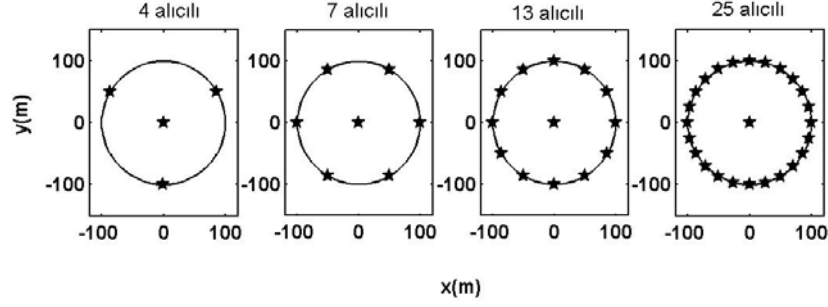
|             | $x$   | $J_0(x)$ |
|-------------|-------|----------|
| 1. kök      | 2.40  | 0        |
| 1. minimum  | 3.83  | -0.403   |
| 2. kök      | 5.52  | 0        |
| 1. maksimum | 7.01  | 0.300    |
| 3. kök      | 8.65  | 0        |
| 2. minimum  | 10.16 | -0.25    |
| 4. kök      | 11.79 | 0        |
| 2. maksimum | 13.33 | 0.218    |
| 5. kök      | 14.93 | 0        |



Şekil 2.9 Denklem (2.15) ile elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller), kök ve ekstremumlar kullanılarak hesaplanan (yıldız semboller) faz hızları. Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

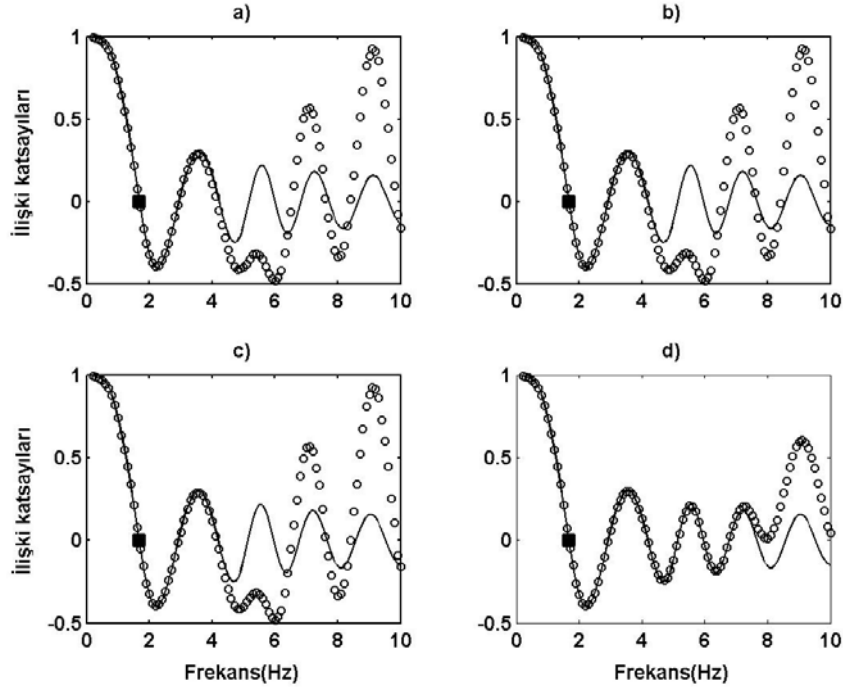
### 2.2.3 Alıcı sayısının belirlenmesi

Uzamsal özilişki yönteminde, dizilim geometrisi daireseldir. Bu dizilim, referans alıcı merkezde olmak üzere, daire ya da yarı dairenin çevresine eşit aralıklarla yerleştirilen alıcılar ile oluşturulabilir. Bu bölümde, özilişki yöntemi ile analiz yaparken gereken en az alıcı sayısı araştırılmıştır. Şekil 2.10’ da, 4, 7, 13 ve 25 alıcılı dizilim geometrileri görülmektedir. Bu bölümde de, yarıçap 100 m olarak alınmıştır. Dalga alanı tek bir doğrultudan ( $\theta=45^\circ$ ) yayılmaktadır. Bu dizilimler kullanılarak elde edilen ilişki katsayıları ve gerçek (teorik) katsayılar, Şekil 2.11’ de görülmektedir.



Şekil 2.10 Alıcı sayıları farklı dairesel dizilimler.

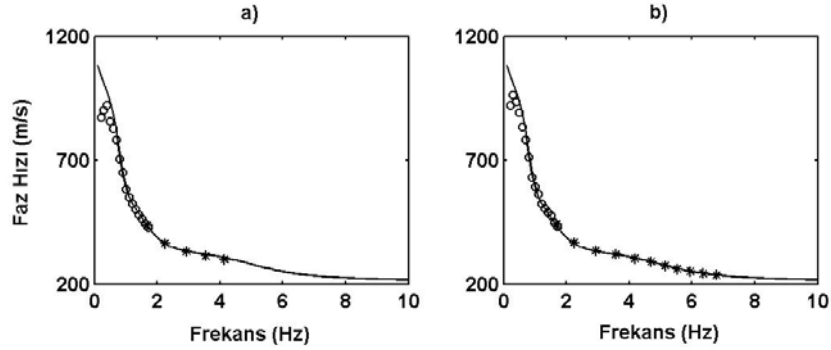
Yarıçap tüm dizilimler için sabit olduğundan, ilk kök aynı değerde (1.65 Hz) gözlenir. Dört, yedi ve onüç alıcılı dizilimler kullanılarak elde edilen katsayılar arasında belirgin bir fark göze çarpmamaktadır. Yaklaşık 4 Hz' e kadar, gerçek katsayılar ile uyumlu ilişki değerleri gözlenmektedir. 25 alıcılı dizilimden elde edilen katsayılar, yüksek frekanslarda da teorik eğri ile uyumludur. Uzayda yeterince sık örnekleme yapıldığı takdirde azimutal ortalaması alınan katsayılar, yüksek frekanslara kadar uyumlu eğriler oluşturmaktadır.



Şekil 2.11 Alıcı sayısı a) 4, b) 7, c) 13 ve d) 25 olan dizilimlerin analizinden elde edilen katsayılar (yuvarlak semboller). Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisi kullanılarak elde edilen katsayılarıdır. İlişki değerlerinin oluşturduğu Bessel fonksiyonunun ilk kökü (1.65 Hz), kare sembole belirtilmiştir.

Kök ve ekstremum noktalarını kullanarak hız hesaplarken 4, 7 ve 13 alıcılı dizilimlerden yaklaşık aynı sonuç elde edilecektir. En düşük 1.65 Hz' den, en yüksek

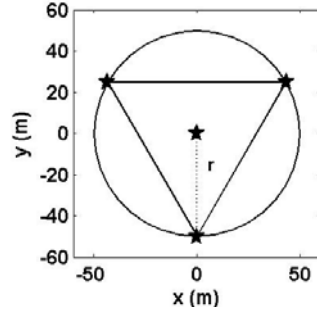
4 Hz' e kadar faz hızı bulunabilir. Ancak, 25 alıcı kullanıldığında daha çok kök ve ekstremum kullanılabileceğinden, 6.5 Hz' e kadar faz hızı elde edilebilir. Düşük frekanslarda hesaplanan hızların eklenmesiyle elde edilen faz hızı eğrileri, Şekil 2.12' de görülebilir. Alıcı sayısı, 4, 7 ve 13 olan dizilimlerin analizinden elde edilen ilişki katsayısı eğrilerinin arasında önemli bir fark olmadığı gibi, faz hızlarında da fark yoktur. Bu nedenle, Şekil 2.12a' da, örnek olarak, dört alıcılı dizilimden elde edilen sonuç görülmektedir.



Şekil 2.12 Alıcı sayısı a) 4, 7, 13 ve b) 25 olan dizilimlerin analizinden elde edilen katsayılarından bulunan faz hızları. Yıldız semboller ise, kök ve ekstremum noktalarından bulunan faz hızlarıdır.

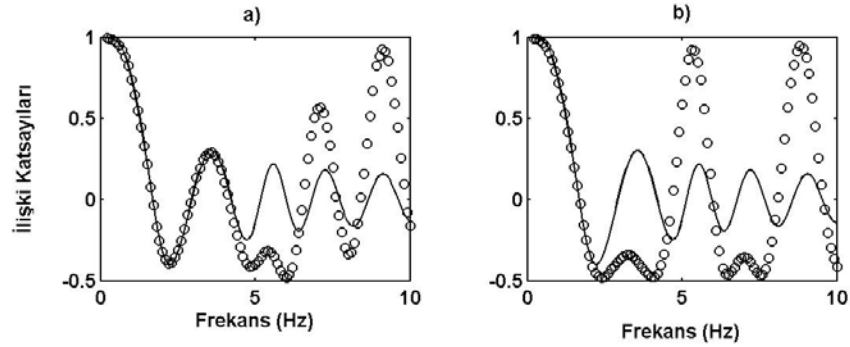
Kök ve ekstremumlar kullanılmadan elde edilen hızlar (yuvarlak semboller), dört dizilim içinde benzerdir. Bunun nedeni, ilişkileri incelenen sinyallerin kaydedildiği alıcılar arasındaki uzaklığın, yani yarıçapın, sabit olmasıdır. Alıcı sayısı 25 olan dizilimden elde edilen hızlardaki farkı, 6.5 Hz' e kadar düzgün devam eden ilişki katsayılarının kök ve ekstremumları oluşturmaktadır. Alıcı sayısının 4, 7 veya 13 olması, ilişki fonksiyonlarının azimutal ortalamaları alınarak elde edilen ilişki katsayısı eğrisini değiştirmemektedir. Belirgin bir gelişmenin sağlanması için, oldukça sık örnekleme yapmak gerekmektedir.

Görüldüğü gibi, çok sayıda (örneğin, 25) alıcı kullanılmadığı takdirde, ki bu hem maliyet hem de veri toplarken karşılaşılabilecek zorluklardan dolayı her zaman tercih edilmeyebilir, dört alıcı ile de aynı sonucu bulmak mümkün olabilir. Bir tanesi dairenin merkezine yerleştirilen dört alıcı ile oluşturulan eşkenar üçgen şeklindeki dizilimi (Şekil 2.13), faz hızı bulmak için kullanabiliriz.



Şekil 2.13 Örnek eşkenar üçgen dizilim. Yıldız sembollerle, üçgenin köşelerine ve merkezine yerleştirilen alıcılar gösterilmiştir.

Özilişki yönteminde, az sayıda alıcı ile çalışırken dikkatli olunmalıdır. Şekil 2.14' de, düzlem dalga alanının yayınım doğrultusu  $45^\circ$  ve  $30^\circ$  iken, 100 m yarıçapındaki eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen ilişki katsayıları görülmektedir. Görüldüğü gibi, yayınım doğrultusunun değişmesi, katsayı eğrisinin görüntüsünü de değiştirmiştir. Ancak, çok sayıda alıcı kullanıldığında (örneğin, 25) yayınım doğrultusunun değişmesi katsayı eğrisini etkilememektedir.



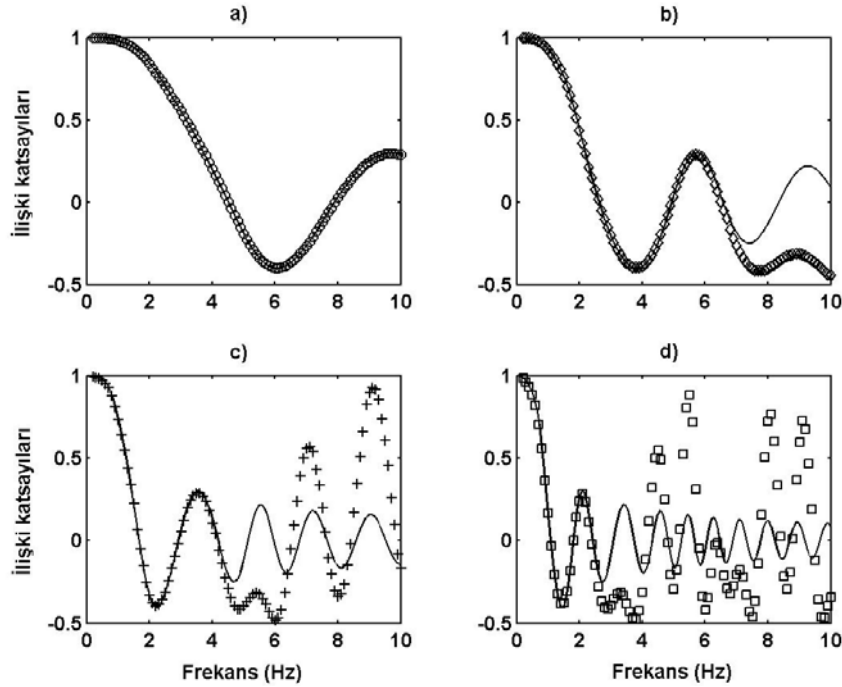
Şekil 2.14 Eşkenar üçgen dizilim kullanılırken dalga alanının yayınım doğrultusu a)  $45^\circ$  ve b)  $30^\circ$  iken elde edilen ilişki katsayıları.

Şekil 2.14a' da ikinci minimuma kadar, Şekil 2.14b' de ise ilk minimuma kadar uyumlu katsayı eğrileri gözlenmektedir. Şekil 2.14a' da görülen kök ve ekstremumları kullanarak hız bulmak mümkündür. Ancak, Şekil 2.14b' deki katsayılarla ilk ekstremumdan sonra hız bulmak mümkün değildir. Pratikte, dalga alanının yayınım doğrultusunu bilmediğimiz için, az sayıda alıcı ile hız bulurken, dikkatli olunmalıdır. Çünkü, ilk ekstremum gözlendikten sonra, katsayılar bilgi taşımayabilir. Bu durumda, sınırlı bir frekans aralığında sonuç elde edilecektir. Faz hızı, geniş bir frekans aralığında elde edilmek isteniyorsa, yapılması gereken birden fazla yarıçap kullanmaktır. Literatürde, sabit bir yarıçapta, gözlenebilecek en küçük dalgaboyu, Nyquist dalgasayısı ile kontrol edildiği ve en küçük alıcı aralığının 2 katı

kadar olduğu belirtilmektedir. Üçgen dizilim kullanıldığında, en küçük alıcı aralığı yarıçapa eşit olduğundan, en küçük dalgaboyu, yarıçapın iki katı kadar olacaktır. Yapay veriyle çalışıldığından, teorik dispersiyon eğrisi kullanılarak, katlanma oluşmadan gözlenebilecek en büyük dalgasayısına (en küçük dalgaboyu) karşılık gelen frekans bulunabilir. Bu değer de, katsayı eğrilerinin ilk ekstremumuna karşılık gelmektedir. Bu durumda, her ne kadar teorik eğri ile uyumlu olsalar da, ilk ekstremum değerinden sonraki katsayıları ya da kök ve ekstremumlarını kullanmamak gerekir. En büyük dalgaboyu ise en büyük alıcı aralığının birkaç katı (Satoh ve diğ., 2001, Ohori ve diğ., 2002) ya da yarıçapın 10 katı olarak (Kudo ve diğ., 2002) kabul edilmektedir. Kısaca, Şekil 2.13’ de görülen, bir tanesi dairenin merkezinde olan dört alıcı ile oluşturulan eşkenar üçgen şeklindeki dizilimi, 3 ya da 4 farklı yarıçap kullanarak, faz hızı bulmak için kullanabiliriz.

#### 2.2.4 Eşkenar üçgen dizilim ile yapılan analizler

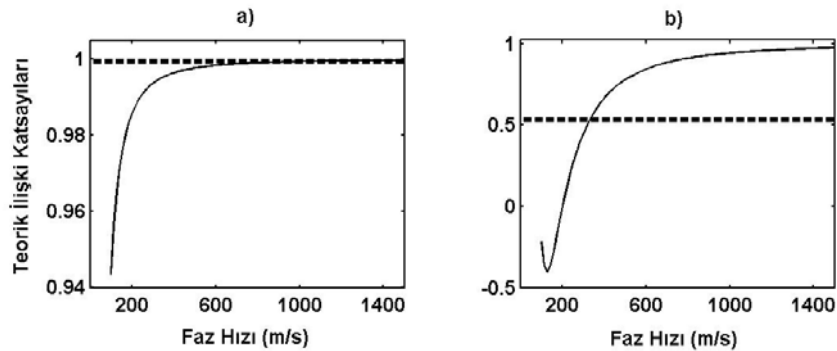
Dalga alanının yayını doğrualtusu  $45^\circ$  iken, eşkenar üçgen dizilim ile 25, 50, 100 ve 200 m gibi dört farklı yarıçap için elde edilen uzamsal ilişki katsayıları, Şekil 2.15’ de görülebilir.



Şekil 2.15 Yarıçapı a) 25 m (yuvarlak semboller), b) 50 m (dörtgen semboller), c) 100 m (artı semboller), d) 200 m (kare semboller) olan eşkenar üçgen dizilim verilerinin analizi ile elde edilen uzamsal özilişki katsayıları. Siyah eğri, gerçek ilişki değerleridir.

Yarıçap arttıkça katsayı eğrisi sıklaşır ve ilk kök, daha düşük frekanslarda gözlenir. Ayrıca, yarıçapın artması ile katsayı eğrisi, yüksek frekanslarda, hem gerçek eğriden hem de Bessel fonksiyonunun özelliklerinden uzaklaşır. Küçük yarıçaplarla küçük dalgalı boyları daha iyi incelenebileceğinden, düşük frekansların çözünürlüğü de azalır. Yarıçapın artması büyük dalgalı boylarının incelenmesine olanak sağlayacağından düşük frekanslar daha iyi çözölmektedir. Kısaca, her farklı yarıçap ile incelenebilecek frekans aralığı farklıdır. Şekil 2.15' den, gerçek eğri ile katsayı eğrisinin uyumlu olduğı frekans aralığında, kök ve ekstremumların kullanılabileceğı düşünölebilir. Ancak, üçgen dizilim kullanılırken, ilk ekstremumdan sonra elde edilen katsayıların kullanılmaması gerektiğı göröldükten sonra, kök ve ekstremum kullanarak da hız elde edilemeyeceğı anlaşılr. Yapay verilerle çalışırken, bu değlerlerden doğru faz hızları elde edilse bile, bu yaklaşım pratikte geçerli olmayabilir.

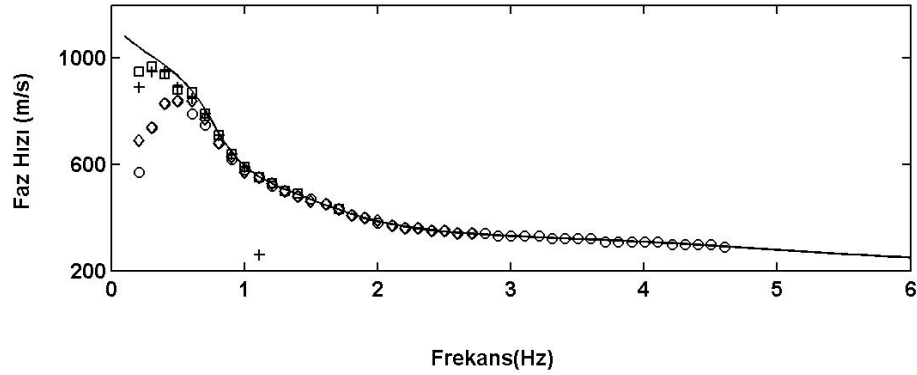
Şekil 2.15a' da, 25 m yarıçapındaki dizilim için elde edilen ilişki değlerlerinin, 10 Hz' e kadar gerçek eğri ile tam bir uyum içerisinde olduğı görölmektedir. Böylece, tüm frekans aralığında faz hızı hesaplanabileceğı düşünölse de, düşük frekanslarda oldukça yavaş değışen bu katsayılar aynı anda çakışan ve aralarında çok büyük farklar olan birden fazla hız değeri bulunabilir. Şekil 2.16 incelenecek olursa, bu durum daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 2.16 Teorik ilişki katsayılarının faz hızına göre değışimi. a)  $f_0=0.3$  Hz için teorik katsayı eğrisi (siyah eğri) ile gözlenen katsayı (kesikli çizgiler) doğrusu asimptotik olarak değışmektedir. b)  $f_0=3$  Hz için, teorik katsayı eğrisi ile gözlenen katsayı doğrusu tek bir hız değerinde kesişmektedir.

Düşük bir frekans olan 0.3 Hz için, Şekil 2.16a' da göröldüğü gibi, gözlenen ilişki katsayısına, yaklaşık 500-1500 m/s arasında değışen, birçok hız değeri çakıştırılabilir. Daha yüksek bir frekans olan 3 Hz için ise, Şekil 2.16b' de göröldüğü gibi, gözlenen ilişki katsayısına çakışan tek bir hız vardır.

Şekil 2.17' de, bu dört yarıçapın kullanıldığı dizilimlerden elde edilen faz hızları üst üste çizdirilmiştir. Her yarıçapla düşük frekanslarda elde edilen çözünürlük farklı olduğundan, 0-1 Hz aralığında düşüşler göze çarpmaktadır. Düşük frekanslardaki bu fark, yarıçap arttıkça azalmaktadır. Düşük yarıçaplı dizilimden elde edilen eğrinin ilk kökü, faz hızı dispersiyon eğrisinin elde edilebildiği en yüksek frekansa karşılık gelmektedir.



Şekil 2.17 Yarıçapı 25 m (yuvarlak semboller), 50 m (dörtgen semboller), 100 m (artı semboller) ve 200 m (kare semboller) olan eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen faz hızları. Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

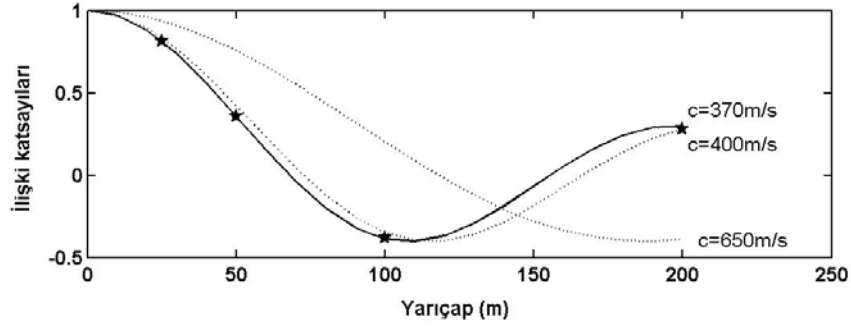
### 2.2.5 Faz hızı elde edilirken kullanılan diğer bir yol

Bu bölümde, Şekil 2.17' de görülen, 0-1 Hz aralığındaki düşüşleri önlemek için, faz hızı bulurken izlenebilecek farklı bir yol açıklanmıştır. Her bir frekans için, farklı yarıçaplar kullanılarak elde edilen dört ayrı ilişki katsayısı bilinmektedir (Şekil 2.16). Bu dört değere birden çakışan Bessel fonksiyonunu veren faz hızı, en küçük kareler anlamında elde edilmeye çalışılmıştır.  $r_k$  yarıçapı için gözlenen ilişki katsayısı  $\rho(r_k, \omega)$  ise,

$$c = \min_{c_{\min} < c_o < c_{\max}} \left\{ \sum_{k=1}^{nr} \left[ \rho(r_k, \omega) - J_0\left(\frac{\omega}{c_o(\omega)} r_k\right) \right]^2 \right\} \quad (2.16)$$

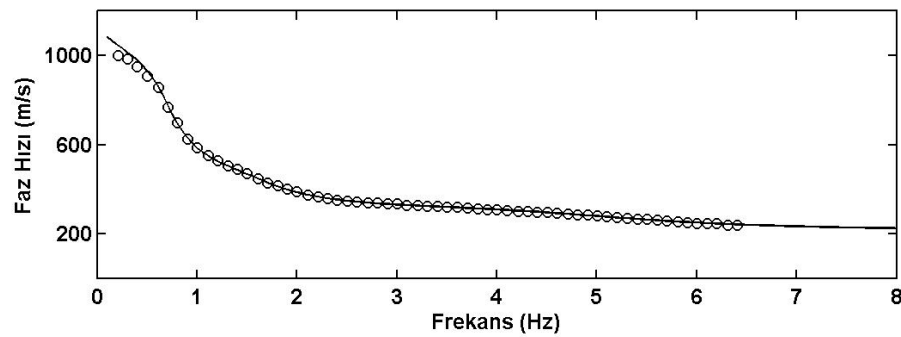
eşitliği ile verilen hatayı en küçük yapan değer, faz hızı olarak kabul edilir. Burada,  $nr$ , yarıçap sayısını göstermektedir. Şekil 2.18' de,  $f_o = 2$  Hz için dört ayrı yarıçapa karşılık elde edilen ilişki katsayıları görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, yarıçapa göre çizdirilen katsayılar da Bessel fonksiyonuna çakıştırılabilir. Katsayı eğrisinin şeklini, dalga alanının yayınım doğrultusu veya dispersiyon eğrisi etkileyebilir. Sabit bir yarıçapta, frekansa göre çizdirilen katsayı eğrileri (Şekil 2.15)

tam olarak Bessel fonksiyonuna benzememektedir. Çünkü, denklem 2.11 ile verilen katsayılar,  $f/c(f)$  bağıntısı hatırlanırsa, frekansa göre (dispersiyondan dolayı) lineer değildir. Yarıçapa göre çizdirilen katsayılar, her zaman düzgün bir Bessel fonksiyonu oluşturacaktır.



Şekil 2.18  $f_o = 2$  Hz değerinde gözlenen, dört farklı yarıçap için ilişki katsayıları (yıldız semboller). Siyah eğri, ilişki değerlerine en az hata ile çakışan faz hızı,  $c=370$  m/s, ile elde edilmiştir. Kesikli çizgiler,  $c=400$  m/s ve  $c= 650$  m/s faz hızları ile elde edilen ilişki eğrileridir.

Örnek olarak, üç farklı hız değeri kullanılarak, dört ayrı ilişki katsayısına birden çakışan eğriler gösterilmiştir. Bulunan hız değeri 370 m/s' dir ve en az farkla dört ilişki katsayısına birden çakışan değerdir. Diğer hız değerleri ile elde edilen eğrilerin (kesikli çizgiler), bu katsayılarla çakıştırılması durumunda, hata değerinin daha yüksek olacağı görülmektedir. Yarıçapı 25, 50, 100, ve 200 m olan dizilim verilerinden elde edilen ilişki değerlerinden hesaplanan faz hızları, Şekil 2.19' da görülmektedir.



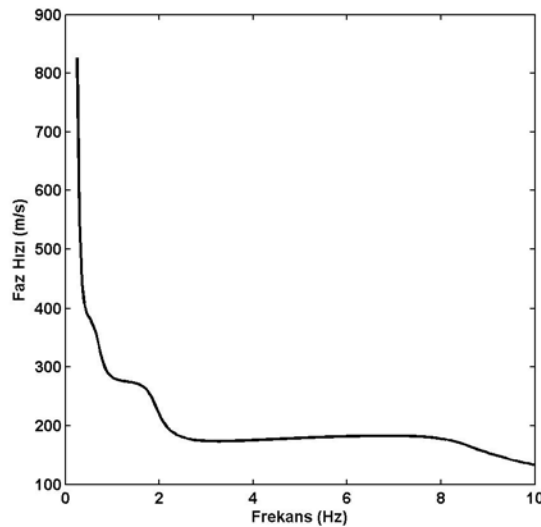
Şekil 2.19 Dört farklı yarıçap (25, 50, 100, 200 m) kullanarak, en küçük kareler anlamında hesaplanan faz hızları (yuvarlak semboller). Siyah eğri ise, gerçek dispersiyon eğrisidir.

Şekil 2.19' da da görülebileceği gibi düşük frekanslarda, küçük yarıçaplardan kaynaklanan hızlardaki düşüşler azalmıştır ve 6 Hz' e kadar yaklaşık olarak gerçek

dispersiyon eğrisi elde edilebilmiştir. Şekil 2.15’ de görülen ilişki katsayısı eğrilerinin, gerçek eğri ile uyumlu olduğu frekans aralığı belirlenmiş, faz hızı hesaplanmıştır. 2.5 Hz’ e kadar dört ilişki katsayısı birden kullanılabilirken, 2.5-4 Hz aralığında üç ilişki katsayısı, 4-6 Hz aralığında iki ilişki katsayısı kullanılarak, hız bulunmuştur. Buna göre, düşük frekanslar için dört katsayı kullanılabilirken, frekans arttıkça, Bessel fonksiyonu özelliklerinden uzaklaştıkları için kullanılabilen katsayılar azalmıştır. Bu şekilde, ancak, 6 Hz’ e kadar faz hızı elde edilebilmiştir. Burada, frekansa karşılık çizdirilen katsayı eğrilerinin gerçek eğri ile uyumlu olduğu düşünülen frekans aralığındaki katsayılar kullanılmıştır. Pratikte, üçgen dizilimler ile çalışırken, yarıçapa karşılık çizdirilen katsayılar eğer ilk minimum değerinden sonra yer alıyorsa kullanılmamalıdır (Kudo ve diğ., 2002). Bu durumda, Şekil 2.18’ de görülen katsayılardan 200 m’ ye karşılık gelen değer analizlerde kullanılmayabilir. Ancak, ideal bir durum için oluşturulmuş yapay veri ile çalışıldığından, ilk minimumdan sonraki değerlerin kullanılması sonuçları olumsuz etkilememiştir.

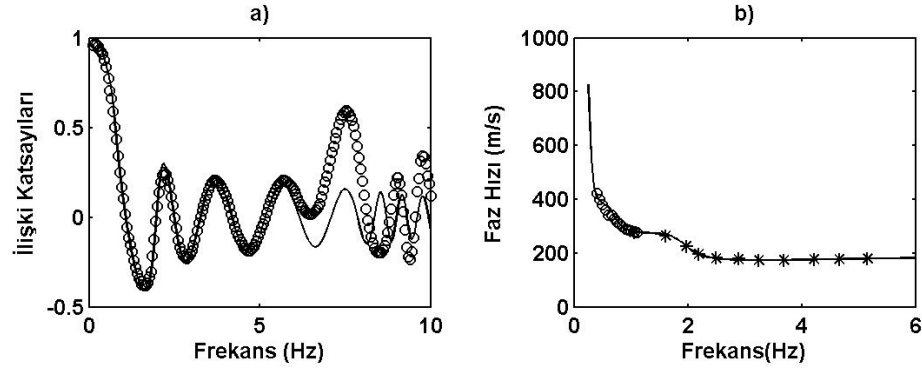
#### 2.2.6 Farklı bir hız yapısına ait dispersiyon eğrisinin incelenmesi

Yapılan sınamalar sonucunda, faz hızının, üçgen dizilimin farklı yarıçaplarla kullanılması sonucu elde edilen katsayıların birlikte çözümünden elde edilebileceği görülmüştür. Bu bölüme kadar, ideal bir yer yapısı kullanılarak, ideal bir durum incelenmiştir. Bu bölümde, düşük hız zonlarının bulunduğu bir yer yapısı ele alınmıştır ve bu yöntemle elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Rastgele bir yer yapısından üretilen teorik dispersiyon eğrisi, Şekil 2.20’ de görülmektedir.



Şekil 2.20 Teorik dispersiyon eğrisi.

Dalga alanı tek bir doğrultudan yayınmaktadır ve 100 m yarıçapında, 25 alıcılı dairesel dizilim için yapay veriler üretilmiştir. Katsayı eğrisinin (Şekil 2.21a) şekli dispersiyon eğrisine bağlı olarak değişmektedir. Tek yarıçapta çok sayıda alıcı kullanıldığı için, kök ve ekstremumlar kullanılarak hız elde edilebilir. İlk köke kadar denklem 2.15 ile hız bulunduğundan sonra, yüksek frekanslarda kök ve ekstremumlar kullanılmıştır. Şekil 2.21b' de, elde edilen faz hızları görülmektedir.

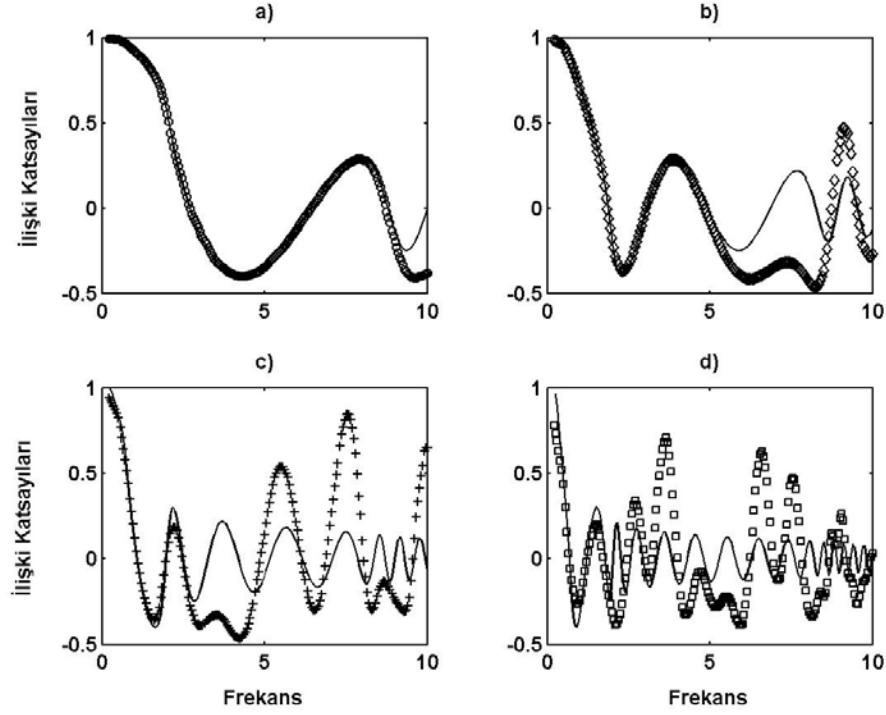


Şekil 2.21 Alıcı sayısı 25 olan dairesel dizilim verilerinin analizinden elde edilen ilişki katsayıları a) ve bu katsayılar kullanılarak elde edilen faz hızları b). Yıldız semboller, kök ve ekstremumlar kullanılarak elde edilmiştir. Siyah eğri, a) teorik katsayı eğrisini, b) teorik dispersiyon eğrisini göstermektedir.

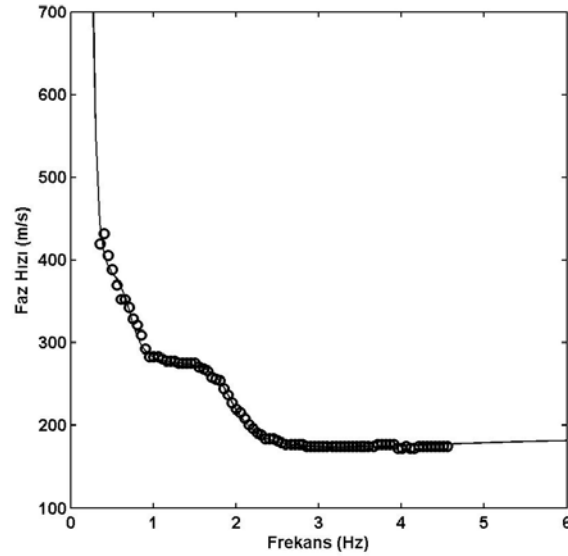
Bu sınavın sonucunda, dispersiyon eğrisinin şekline bağlı olmadan, kök ve ekstremumlardan doğru hız değerleri elde edilebildiği görülmüştür. Ancak, bu, çok sayıda alıcı kullanıldığı için mümkün olmuştur. Bir sonraki aşama olarak, dört farklı üçgen dizilim (25, 50, 100, 200 m yarıçapındaki) için yapay veri üretilmiştir. Elde edilen ilişki katsayıları Şekil 2.22' de görülebilir. Bu durumda, ilk minimumdan sonra kök ve ekstremumları kullanmak mümkün değildir. Her bir üçgen dizilimin analizinden elde edilen katsayıların ilk ekstremumlarına kadar kullanılması sonucu elde edilen faz hızları, Şekil 2.23' de görülmektedir. Çok alıcı (25 alıcı) kullanarak elde edilen sonuç, dört farklı yarıçapla oluşturulan üçgen dizilim ile de yaklaşık olarak bulunmuştur.

### 2.2.7 Sinyal/gürültü oranı etkisinin incelenmesi

Bu bölüme kadar, özilişki yönteminin işleyişini daha iyi anlayabilmek için, ortamdaki bozucu etkiler göz ardı edilmiş, yapay verilere rastgele gürültü eklenmemiştir. Şekil 2.20' de, üretilen yapay veriler, mikrotremor ile ilişkili olmayan, sırasıyla % 5, % 10, % 20, ve % 30 oranında rastgele gürültü eklenerek incelenmiştir.



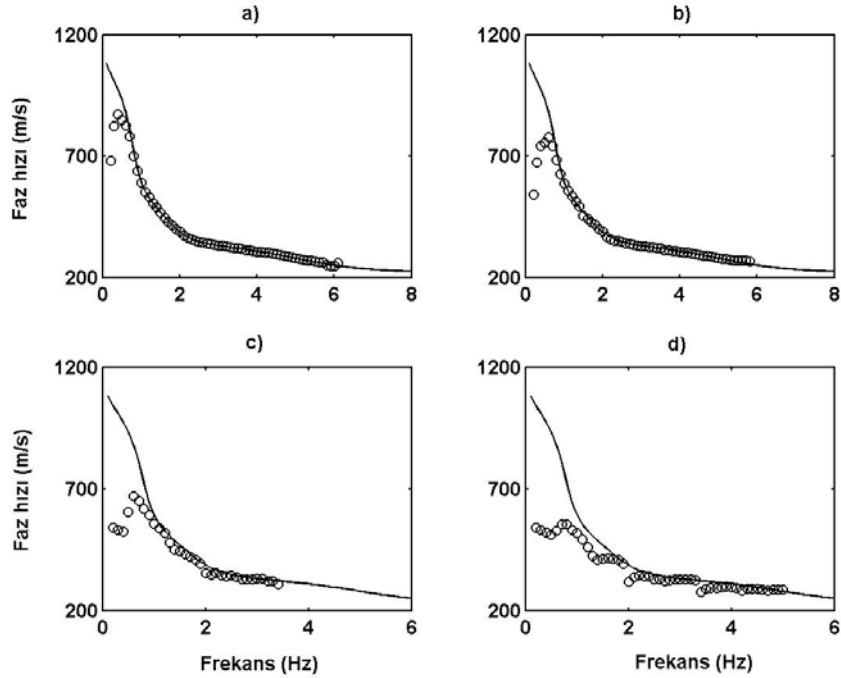
Şekil 2.22 Yarıçapı a) 25 m (yuvarlak semboller), b) 50 m (dörtgen semboller), c) 100 m (artı semboller), d) 200 m (kare semboller) olan eşkenar üçgen dizilim verilerinin analizi ile elde edilen uzamsal özilişki katsayıları. Siyah eğri, gerçek ilişki değerleridir.



Şekil 2.23 Üçgen dizilim kullanarak elde edilen faz hızları yuvarlak sembollerle gösterilmiştir. Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

% 5 ve % 10 oranında gürültü eklendiğinde, düşük frekanslarda, hızlarda düşüşler gözlenmektedir ancak gerçek eğri yaklaşık olarak elde edilebilmiştir. % 20 ve % 30

gürültü oranları ile elde edilen eğride, gerçek dispersiyon eğrisinden sapmalar görülmektedir. Sonuç olarak anlaşılmıştır ki, gerçek veri toplanırken gürültü oranı % 10' dan fazla ise, bu yöntemle hatalı sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 2.24 Üretilen yapay verilere a) % 5, b) % 10, c) % 20 ve d) % 30 oranında rastgele gürültü eklenmiştir. Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

### 2.2.8 Özilişki yönteminde farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının etkisi

Farklı doğrultulardan yayınan birden fazla dalga alanının varlığının, bu yöntemle yapılan analizlerde sorun oluşturmadığı, Henstridge (1979) tarafından gösterilmiştir. Şimdi, uzamsal özilişki yöntemini tekrar, değişik bir açıdan inceleyip farklı doğrultulardaki mikrotremor kaynaklarının analizlerde neden sorun oluşturmadığını görelim.

Durağan bir stokastik süreç olarak kabul ettiğimiz mikrotremorleri, zaman-uzayda farklı frekans ve dalgaboyuna sahip, bağımsız dalgaların toplamı olarak ifade edebiliriz.  $\omega$  frekansında, merkezdeki  $(0, \varphi)$  ile  $(r, \varphi)$  sinyali arasındaki ilişkiyi, uzamsal ilişki fonksiyonu ile,

$$C(\omega, r, \varphi) = \int_0^{2\pi} \exp[i rk(\omega) \cos(\varphi - \theta)] P(\omega, \theta) d\theta \quad (2.17)$$

şeklinde tanımlayabiliriz.  $P(\omega, \theta)$ , yayının doğrultusu  $\theta$ , frekansı  $\omega$  olan sinyalin ortalama enerjisini, spektral güç yoğunluğunu göstermektedir. Ortalama ilişki fonksiyonu,

$$\bar{C}(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(\omega, r, \varphi) d\varphi \quad (2.18)$$

ise, denklem (2.17), denklem (2.18)' de yerine konur ve

$$J_0(kr) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[i rk(\omega) \cos(\varphi - \theta)] d\varphi \quad (2.19)$$

eşitliği hatırlanırsa (Watson, 1966), ortalama ilişki fonksiyonu,

$$\bar{C}(\omega, r) = J_0[rk(\omega)] \int_0^{2\pi} P(\omega, \theta) d\theta = J_0[rk(\omega)] P_0(\omega) \quad (2.20)$$

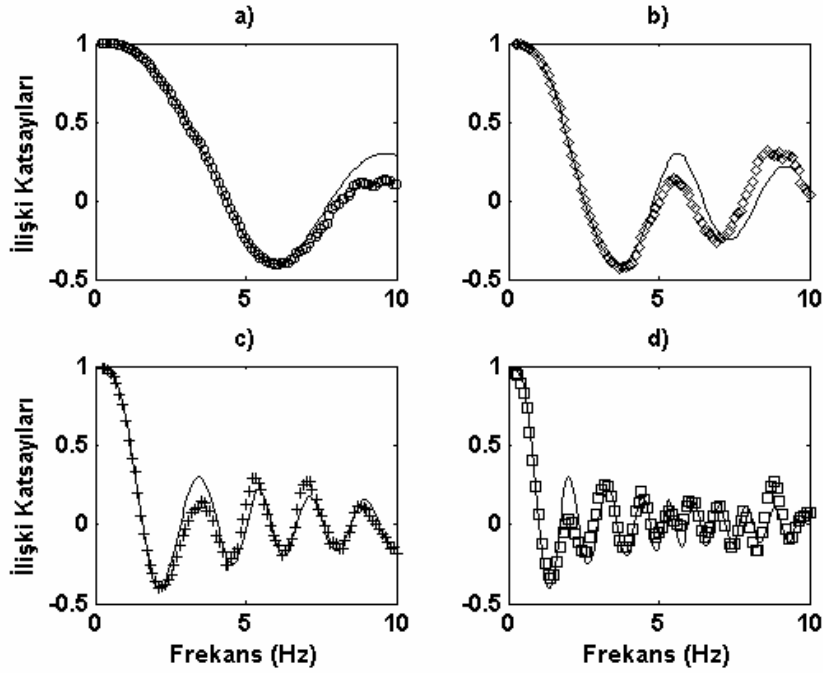
olarak elde edilir. Burada  $P_0(\omega)$ , herhangi bir istasyondaki, genellikle merkez istasyondaki, sinyalin güç spektrumudur ve

$$P_0(\omega) = \int_0^{2\pi} P(\omega, \theta) d\theta \quad (2.21)$$

olarak hesaplanır. Bu bağıntı ile anlaşılmaktadır ki, ortalama ilişki fonksiyonu, incelenen sürecin yayının doğrultusuna bağlı değildir (Henstridge, 1979). İki ya da daha fazla doğrultudan yayılan sinyaller analizlerde sorun oluşturmaz. Uzayda herhangi bir noktada sinyalin güç spektrumu  $P_0(\omega)$  ise, ortalama ilişki fonksiyonunun normalize edilmesi ile, uzamsal özilişki katsayısına,  $\rho(\omega, r) = J_0[rk(\omega)]$ , ulaşılır.

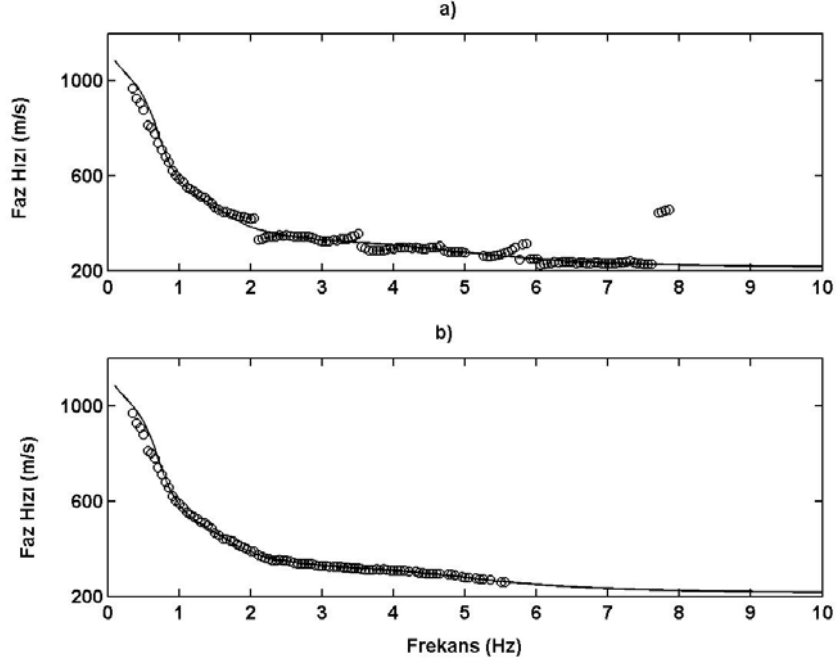
Teorik olarak farklı doğrultulardan yayılan sinyallerin analizlerde sorun oluşturmayacağı anlaşılmışsa da, bu bölümde eşkenar üçgen dizilimle nasıl sonuçlar elde edileceğini incelenmiştir. Mikrotremorlerle çalışıldığında dalga alanı her doğrultudan yayınıyor olabilir. Bu durum, yayının doğrultusu  $20^\circ$ - $90^\circ$  arasında değişen, eşit genlikli, eşit fazlı, 50 düzlem dalga alanı için üretilen yapay verilerle

incelenmiştir. Yarıçapı 25, 50, 100 ve 200 m olan eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen ilişki katsayıları, Şekil 2.25’ de görülmektedir.



Şekil 2.25 Yayınım doğrultuları  $20^{\circ}$ - $90^{\circ}$  arasında değişen eşit genlikli, eşit fazlı, 50 düzlem dalga alanı için, yarıçapı a) 25 m (yuvarlak semboller), b) 50 m (dörtgen semboller), c) 100 m (artı semboller), d) 200 m (kare semboller) olan eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen uzamsal özilişki katsayıları. Siyah eğri, gerçek katsayı eğrisidir.

Arazi verisi olarak mikrotremorle çalışıldığından, hem üretilen yapay veriler hem de ilişki katsayıları pratikte elde edilen sonuçlara benzer olmuştur. Dalga alanının tek doğrultudan yayındığı varsayımına dayanarak üretilen yapay verilerden elde edilen katsayıların oluşturduğu Bessel eğrilerindeki bozulmalar görülmemektedir. Artan yarıçapla ilk ekstremum değeri düşük frekanslarda gözlenmektedir. Belirtildiği gibi üçgen dizilimler ile çalışırken ilk ekstremumdan sonraki katsayılar analizlerde kullanılmamalıdır. Bu bölümde faz hızını elde ederken, ilişki katsayılarının hem ilk ekstremumlarına hem de sonuna kadar tüm değerlerinin kullanıldığı iki ayrı durum incelenmiştir. Sonuçlar, Şekil 2.26’ da görülmektedir. Dalga alanı tek bir doğrultudan yayınmadığı için, ilk ekstremumdan sonraki katsayıların da bilgi taşıdığı düşünülmektedir.



Şekil 2.26 İlişki katsayılarının tümünü kullanarak elde edilen faz hızları a) ve ilk ekstremumlarına kadar kullanılmasından elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller) b). Siyah eğri, teorik dispersiyon eğrisidir.

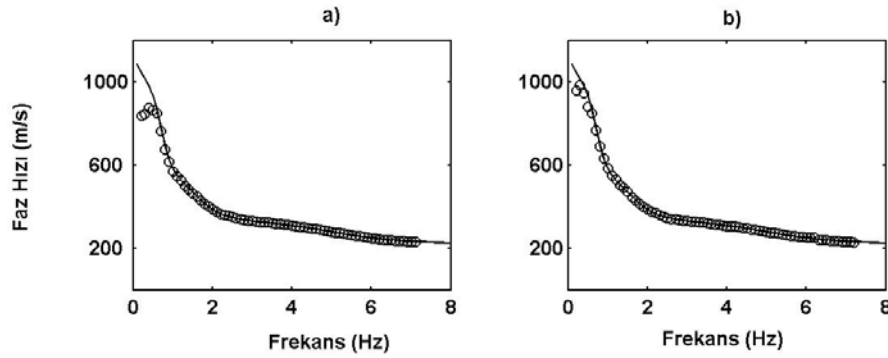
Şekil 2.26a’ da, 0-8 Hz aralığında tüm ilişki katsayıları birlikte kullanılarak bulunan faz hızları görülmektedir. Bu durumda, elde edilen hızlarda teorik dispersiyon eğrisinden sapmalar olmuştur. İlk ekstremuma kadar olan katsayıların kullanımı ile elde edilen hızlar ise, Şekil 2.26b’ de görülmektedir. Bu durumda 0-6 Hz aralığında gerçek dispersiyon eğrisini elde etmek mümkün olmuştur. Literatürde, üçgen dizilimle çalışıldığı takdirde, kullanılabilecek olan katsayıların ilk ekstremum değeri ile sınırlı olduğu belirtilmektedir. Ancak, bu yaklaşım, tüm katsayılar kullanıldığında ilk ekstremumdan sonra bilgi elde edilemeyeceği anlamına gelmemektedir. Şekil 2.26a’ dan da anlaşılacağı üzere elde edilen hızlar, çeşitli sapmalar olsa bile dispersiyon hakkında bilgi vermektedir.

### 2.2.9 Eşkenar üçgen dizilimi genelleştirerek yapılan analizler

Özilişki yönteminde, alıcı dizilimi, merkezde bir alıcı bulunmak üzere, daire şeklindedir. Mühendislik amaçlı çalışmalarda, genellikle eşkenar üçgen dizilimler tercih edilmektedir (Hough ve diğ., 1992, Malagnini ve diğ., 1993, Kudo ve diğ., 2002). Yöntemin esasında, ilişki katsayıları bulunurken, merkezdeki alıcıdan elde edilen sinyal ile, dizilimin çevresine yerleştirilmiş olan alıcılardan elde edilen

sinyallerin arasındaki ilişkinin, azimutal olarak hesaplanmasından yola çıkılmıştır. Üçgen dizilim kullanıldığında, bu üçgenin köşelerine yerleştirilmiş olan alıcılar (Şekil 2.13) arasında da benzer analizler yapılabilir. Böylece, yarıçapı  $r$  olan eşkenar üçgenin köşelerindeki alıcılar kullanılarak,  $\sqrt{3}r$  uzaklığı için de benzer şekilde ilişki katsayıları hesaplanmış olur. Sadece iki farklı yarıçapın kullanıldığı dört alıcı ile ya da biri merkezde bulunan 7 alıcıyla iç içe üçgen dizilimler oluşturularak, her bir frekans için dört farklı uzaklık değerinden, dört farklı ilişki değeri elde edilebilir.

İlk önce 25 ve 50 m yarıçapında iki eşkenar üçgen dizilim kullanılarak faz hızı elde edilmiştir (Şekil 2.27a). Burada 25 ve 50 m' nin yanı sıra, yaklaşık olarak 43 ve 86 m' lik iki alıcı arasındaki mesafe daha incelenebilmiştir. Şekil 2.27b' de ise yarıçapları 25 ve 100 m olan iki eşkenar üçgen dizilim kullanılarak bulunan hızlar görülmektedir. Bu durumda da, ek olarak yaklaşık 43 ve 173 m' lik alıcı mesafeleri incelenmiştir. Yarıçaplarından biri 100 m olan dizilimle, düşük frekanslarda da faz hızı elde edilmiştir. Üçgen şeklindeki bir dizilimin köşelerine yerleştirilmiş olan alıcılar arasındaki ilişki de incelenerek (köşegen uzunluklarının da kullanılması ile) tek bir frekans için dört tane ilişki katsayısı elde etmek mümkün olmuştur.



Şekil 2.27 Yarıçapı a) 25-50 m, b) 25-100 m olan eşkenar üçgen dizilimlerin köşelerindeki alıcılardan elde edilen sinyaller arasındaki ilişkinin de incelenmesiyle elde edilen faz hızları. Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

### 2.3 Uzamsal Özilişki Yöntemi ile Yapılan Gerçek Veri Analizleri

Bu bölümde, arazi verileri ile yapılan analizlere örnekler verilecektir. Bölüm 2.3.1' de, İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü' nde, toplanan veriler, uzamsal özilişki yöntemi ile analiz edilmiştir. Bölüm 2.3.2' de ise, Yeşilyurt Hava Harp Okulu Kampüsü' de toplanan veriler kullanılarak analizler yapılmıştır.

### **2.3.1 Avcılar verilerinin analizi**

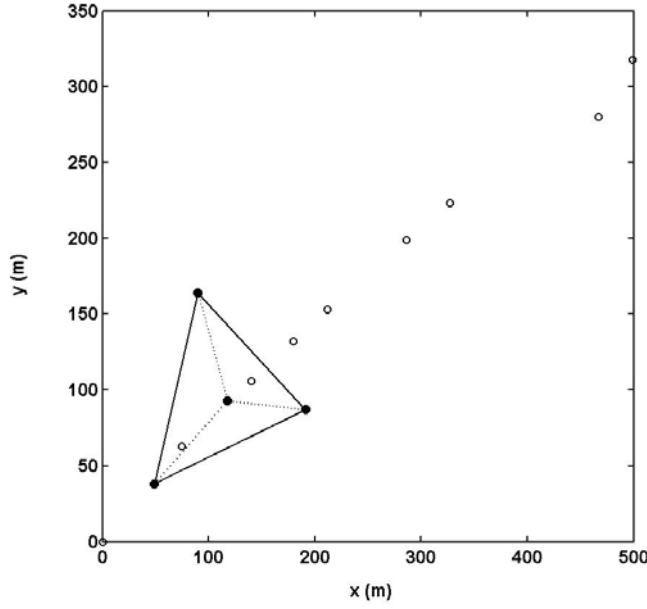
Avcılar’ da yapılan çalışmada mikrotremor verileri, biri doğrusal, biri dairesel olmak üzere iki dizilim ile kaydedilmiştir. Bu bölümde, bu dizilimlerle oluşturulan üçgen dizilim verilerinin, özilişki yöntemi ile analizinden elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

#### **2.3.1.1 Verilerin toplanması ve özellikleri**

Veriler, 20 Ağustos 2001 tarihinde, yerel saate göre 11:00’ de kaydedilemeye başlanmıştır. Her iki dizilimde de, Reftek Texan kayıtçılar kullanılmıştır. Örneklem aralığı, 0.01 s’ dir. Alıcı olarak, 1 Hz’ lik jeofonlar kullanılmıştır. Toplam kayıt uzunluğu 1 saattir. Genlik spektrumları incelendiğinde, enerji yoğunluğunun 0-15 Hz frekans aralığında olduğu görülmüştür (Bozdağ, 2002). Kullanılan veri uzunluğu, bir saattir ve 5’er dakikalık 12 gruptan oluşmuştur.

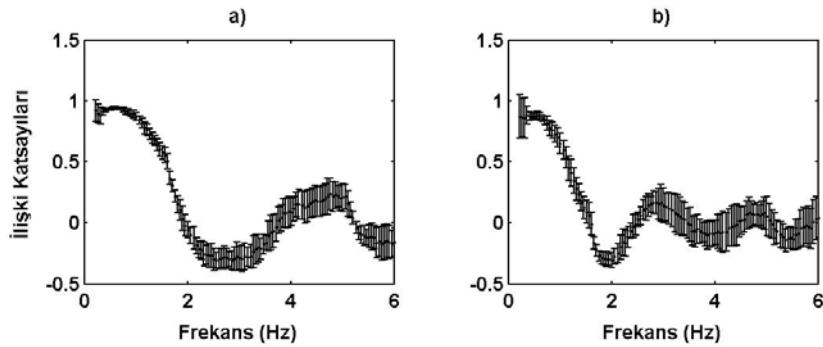
#### **2.3.1.2 Analiz sonuçları**

Şekil 2.28’ de, çalışma alanında yer alan dizilim geometrileri görülmektedir. Dairesel dizilim, yaklaşık 80 m yarıçapında olup 7 alıcıdan oluşmaktadır. Doğrusal dizilim ise, yaklaşık 590 m uzunluğundadır ve 11 alıcıdan oluşmaktadır. Doğrusal dizilimin bir alıcısı, referans alıcı olarak kabul edilmiştir. Dairesel dizilimin içinden de üç alıcı seçilerek, 4 alıcılı yaklaşık eşkenar üçgen dizilim elde edilmiştir (Şekil 2.28). Çalışma alanında yer alan iki dizilimde, uzamsal özilişki yöntemi ile analiz yapmak için düzenlenmemiştir. Özilişki yöntemi ile çalışabilmek için, bu dizilimlerden ancak tek yarıçaplı üçgen dizilim oluşturulabilmiştir. Böylece, hem yarıçap olan 80 m, hem de bunun  $\sqrt{3}$  katı kadar olan, iki ayrı mesafe için özilişki katsayıları elde edilebilecektir. Yaklaşık 80 ve 138 m’ lik alıcı aralıkları için hesaplanan katsayılar, Şekil 2.29’ da görülmektedir. Üçgen dizilim ile çalıştığımız için, ilişki katsayılarının ilk ekstremumlarına kadar kullanmamız gerekmektedir. Bu durumda, en yüksek 3 Hz’ e kadar hız elde edilir. Dizilimden elde edilebilecek sadece iki farklı uzaklık (her bir frekansta iki ilişki katsayısı) olduğundan, analizde tüm katsayılar kullanılmıştır. Bölüm 2.2.7’ de açıklandığı gibi, dalga alanı birden fazla doğrultudan yayınıyor ise, tüm katsayılar kullanılarak da faz hızı dispersiyon eğrisi elde edilebilir. Dispersiyon eğrisinden sapmalar gözlense bile ilk ekstremumdan sonra da sonuç elde edilebilmelidir.



Şekil 2.28 Yarıçapı 80 m olan dairesel dizilim, 590 m uzunluğundaki doğrusal dizilim ve bu geometri kullanılarak oluşturulan eşkenar üçgen dizilim (içi dolu semboller). İçi boş olan semboller, kullanılmayan alıcıları göstermektedir.

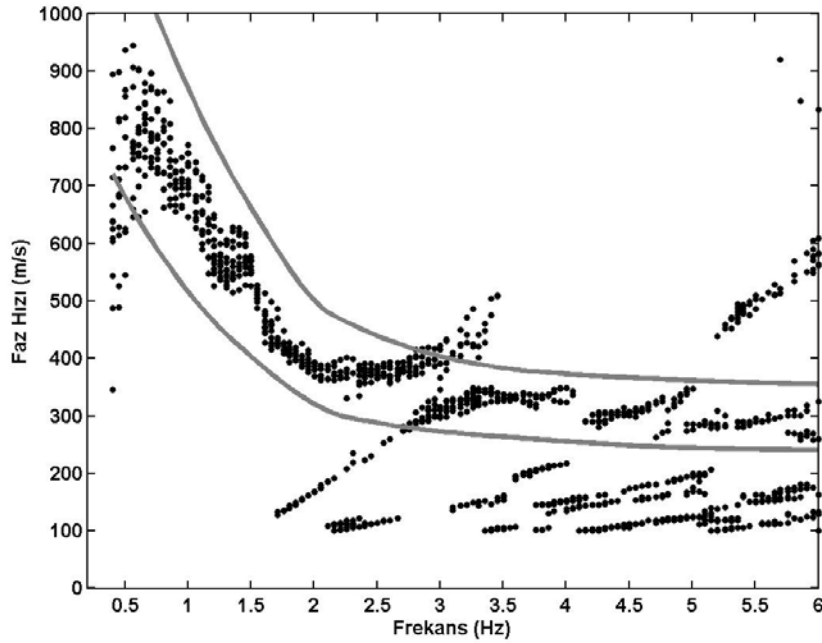
Katsayılar, 0.2-6 Hz aralığında hesaplanırken, frekans ortamı formülü kullanılmıştır ve  $d\omega = 0.2$  Hz olarak alınmıştır. Her 5 dakikalık veri, 40 s uzunluğundaki bloklar halinde incelenmiştir. Görüldüğü gibi, iki ayrı uzaklık için de elde edilen ilişki değerleri, yaklaşık bir Bessel fonksiyonuna çakıştırılabilir.



Şekil 2.29 Oluşturulan eşkenar üçgen dizilim verilerinden elde edilen ilişki katsayıları. İlk beş dakikalık veri grubundan, a) 80 m ve b) 138 m' lik iki ayrı uzaklık için elde edilen ilişki katsayıları ve standart sapmaları.

Elimizde, her bir frekans için hesapladığımız iki ayrı ilişki katsayısı vardır. En küçük kareler anlamında, her iki katsayıya çakışan faz hızı hesaplanmıştır. Bu katsayılar kullanılarak, 0.8-6 Hz arasında faz hızı elde edilmiştir. Katsayılar, 6 Hz' e kadar

kullanıldığından, elde edilen hızlarda sapmalar gözlenecektir. Şekil 2.30’ da, 12 ayrı veri grubundan elde edilen hızlar görülmektedir. Şekildeki gri bantlar, bu saçılmaları göz ardı edebilmek için, dispersiyon trendine uygun olarak çizilmiştir. Bantın arasında kalan değerlerin ortalaması alınarak elde edilen faz hızları, Şekil 2.31’ de görülmektedir. En yüksek 755 m/s, en düşük 298 m/s hız değeri bulunmuştur.



Şekil 2.30 Beş dakikalık, 12 ayrı veri grubundan elde edilen faz hızları. Gri çizgiler, saçılmaları göz ardı ederek ortalaması alınan hızları göstermektedir.

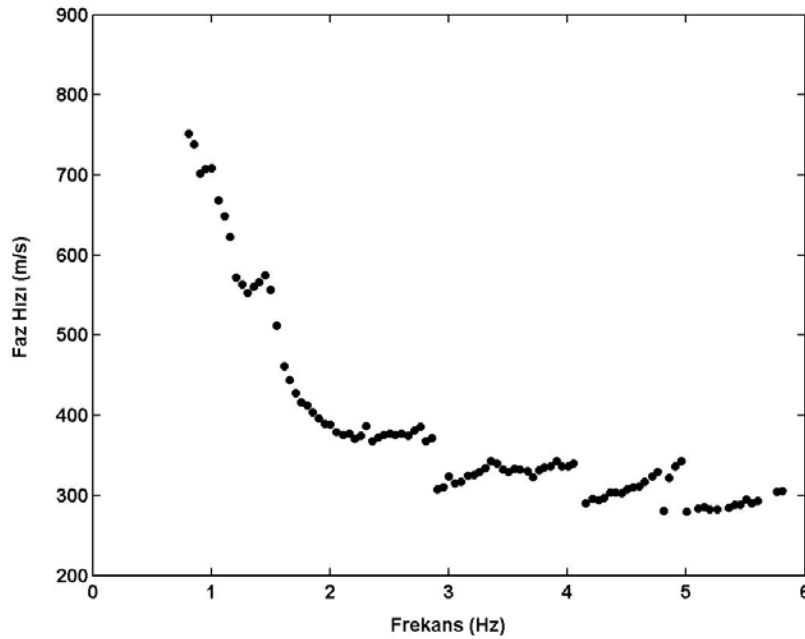
Şekil 2.31’ de, yaklaşık 3 Hz civarında gözlenen saçılmaların neden olduğu sapmalar görülmektedir. Bu dizilim ile, ilk ekstremum dikkate alınır, 3 Hz’ e kadar faz hızı elde edilebilir. Ancak, dalga alanının her doğrultudan yayımlanabileceği düşünüldüğünden, tüm katsayılar kullanılmış, yüksek frekanslarda da bilgi edinilmiştir.

### 2.3.2 Yeşilyurt verilerinin analizi

Kullanılan bir dizilimin köşelerinde yer alan alıcıların da, özilişki katsayıları hesaplanırken kullanılabileceğinden hareketle ve bir örnek vermek için, 17 Ağustos 2001 tarihinde Yeşilyurt Hava Harp Okulu Kampüsü’ de toplanan mikrotremor verileri kullanılarak analizler yapılmıştır.

### 2.3.2.1 Verilerin toplanması ve özellikleri

Veriler, 17 Ağustos 2001 tarihinde, Reftek Texan kayıtçılarla, yerel saate göre 20:00' de kaydedilmeye başlamıştır. Kayıtların örnekleme aralığı, 0.01 saniyedir. Alıcı olarak, 4.5 Hz' lik jeofonlar kullanılmıştır ve toplam kayıt uzunluğu 40 saattir. Çalışma alanındaki ana mikrotremor kaynağı, ölçü noktalarının yaklaşık olarak batısından geçen karayoldur. 5 dakikalık bir veri grubunun genlik spektrumu incelendiğinde, yaklaşık 5-10 Hz frekanslarında enerji yoğunluğu gözlenmiştir (Bozdağ, 2002).



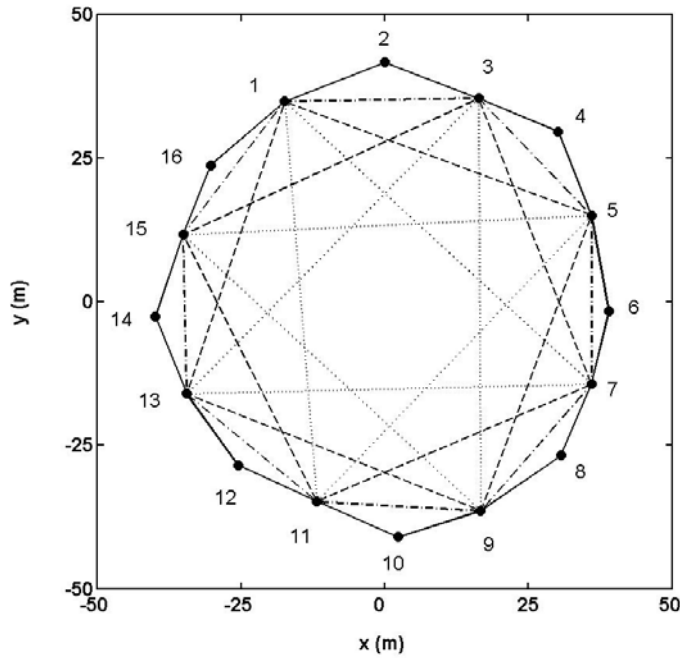
Şekil 2.31 Üçgen dizilim verilerine uygulanan özilişki yöntemi ile elde edilen faz hızları.

### 2.3.2.2 Analiz sonuçları

Şekil 2.32' de görüldüğü gibi, bu dizilim de, uzamsal özilişki yöntemi ile analiz yapmak amacıyla düzenlenmemiştir. Dizilim, 40 m yarıçapındadır ve 16 alıcıdan oluşmaktadır. İlişki değerleri hesaplanırken kullanılan alıcılar ve aralarındaki mesafeler, Şekil 2.32' de gösterilmiştir. Genelde, özilişki katsayıları hesaplanırken dizilimin merkezindeki alıcı ile dizilimin çevresine eşit aralıklarla yerleştirilmiş alıcılar arasındaki ilişki, azimutal olarak incelenmektedir. Ancak, bu dizilimin merkezinde referans alıcı yer almamaktadır. Bu durumda, alıcıların birbiri ile

arasındaki ilişki incelenmiştir. (1-2, 2-3, 3-4, 4-5, .....15-16, 16-1) numaralı, (1-3, 3-5, 5-7, 7-9, 9-11, 11-13, 13-15, 15-1) numaralı, (1-5, 3-7, 5-9, 7-11, 9-13, 11-15, 13-1, 15-3) numaralı ve (1-7, 1-11, 3-9, 3-13, 5-11, 5-15, 7-1, 7-13, 9-3, 9-15) numaralı alıcılar arasındaki ilişkinin azimutal ortalaması alınarak, dizilimin merkezindeki alıcı referans alınmadan da ilişki katsayısı elde edilebilecektir.

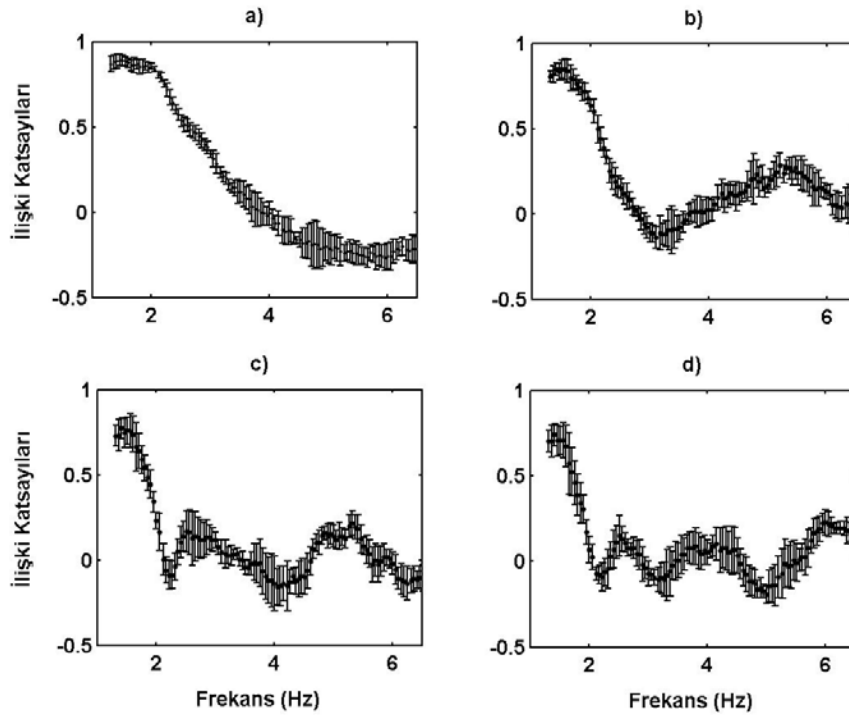
Bu şekilde, yaklaşık olarak 40 m yarıçapındaki dairesel dizilimden, her bir frekans için 15 m, 30 m, 56 m ve 73 m' lik alıcı mesafeleri için yapılan analizler sonucu, dört farklı ilişki katsayısı elde edilmiştir. Toplanan verinin, 1 saatlik bölümü incelenmiştir. Şekil 2.33' de, 1 saat uzunluğundaki 12 blok halindeki verinin, ilk bloğu kullanılarak elde edilen ilişki katsayıları ve standart sapmaları görülmektedir.



Şekil 2.32 Özilişki yönteminde kullanılan alıcı dizilimi (içi dolu semboller). Arasında 15 m' lik (kalın çizgiler), 30' lik (kesik noktalı çizgiler), 56 m' lik (kesikli çizgiler), 73 m' lik (noktalı çizgiler) mesafe olan alıcılarda kaydedilen sinyallerin ilişkilerinin incelendiği doğrultular gösterilmiştir.

Beş dakika uzunluğundaki her grup veri, 40 s' lik bloklar halinde analiz edilmiştir. Katsayılar, 1.3-6.5 Hz aralığında hesaplanırken frekans ortamı formülü kullanılmıştır ve  $d\omega = 0.05$  olarak alınmıştır. Elde edilen katsayıların, alıcılar arasındaki uzaklık arttıkça, Bessel fonksiyonu özelliklerinden uzaklaştıkları görülmektedir. 1.7-6 Hz aralığında faz hızı eğrisi hesaplanırken, düşük frekanslarda da yüksek frekanslarda da

dört katsayı birden kullanılmıştır. Şekil 2.34’ de, 12 bloktan ayrı ayrı hesaplanan katsayılardan elde edilen hızlar üst üste çizdirilmiştir.

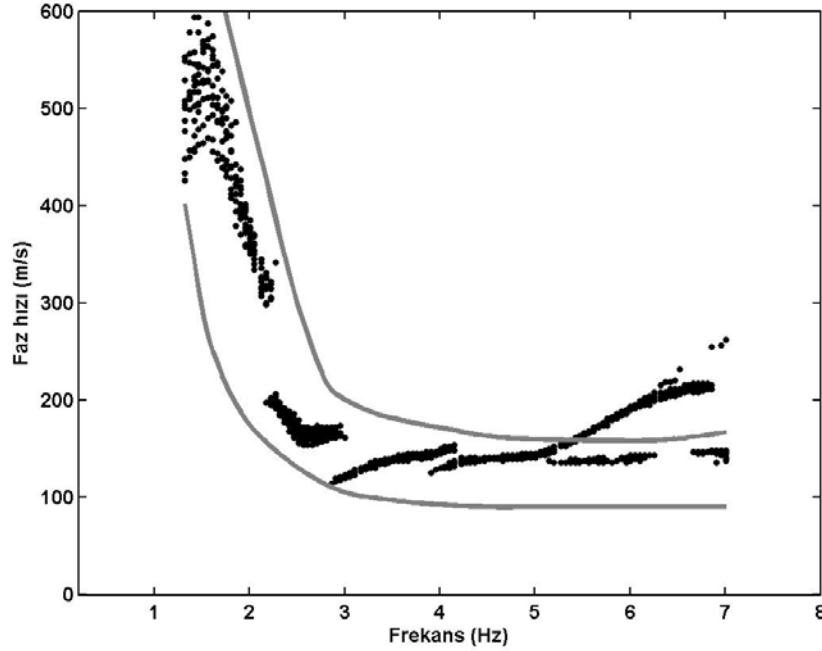


Şekil 2.33 İlk beş dakikalık veriden, alıcılar arasındaki mesafe a) 15 m, b) 30 m, c) 56 m ve d) 73 m iken elde edilen özilişki katsayıları ve standart sapmaları.

Şekildeki gri bantlar, saçılmalar göz ardı edilerek, ortalaması alınacak veri grubunu sınırlamaktadır. Elde edilen hız değeri dört ayrı ilişki katsayısına birden çakıştırıldığı için, faz hızlarındaki saçılmalar, üçgen dizilim verilerine göre daha azdır. Sadece 5 Hz civarında dispersiyonun trendine uymayan değerler elde edilmiştir. Bu değerlerin ayıklanmasını sağlayacak şekilde seçilen gri bantların arasında kalan hızların ortalamasından elde edilen faz hızları, Şekil 2.35’ de görülmektedir. En yüksek faz hızı 488 m/s, en düşük faz hızı da 147 m/s olarak bulunmuştur. Çok sayıda alıcı ile dört farklı uzaklık için katsayılar elde edildiğinden, sonuçlarda saçılmalar azdır. Ancak, 2-3 Hz aralığında görülen süreksizlik sorun oluşturabilir. Belirtildiği gibi, bu dizilim uzamsal özilişki yöntemi ile analiz yapmak amacıyla düzenlenmemiştir ve bu sorunun, bir başka uzaklık (15 ila 30 m arasında) için daha elde edilen katsayıların analiz edilmesi ile giderilebileceği düşünülmektedir.

## 2.4 Sonuçlar

Yapay verilerle yapılan sınamalar sonucunda, dört alıcılı dizilim ile faz hızının elde edilebileceği görülmüştür. Sabit bir yarıçapta alıcı sayısını arttırmak elde edilen sonuçları değiştirmemiştir. Ancak, çok sayıda alıcı (örneğin, 25) kullanıldığı takdirde, yüksek frekanslarda da faz hızı elde edilebilmiştir. Bu sayıda alıcı kullanmak, yüksek maliyeti ve veri toplama aşamasında karşılaşılabilecek zorluklardan dolayı tercih edilmeyebilir. Böylece, dört alıcı ile oluşturulan eşkenar üçgen dizilimin kullanılabileceğine karar verilmiştir.

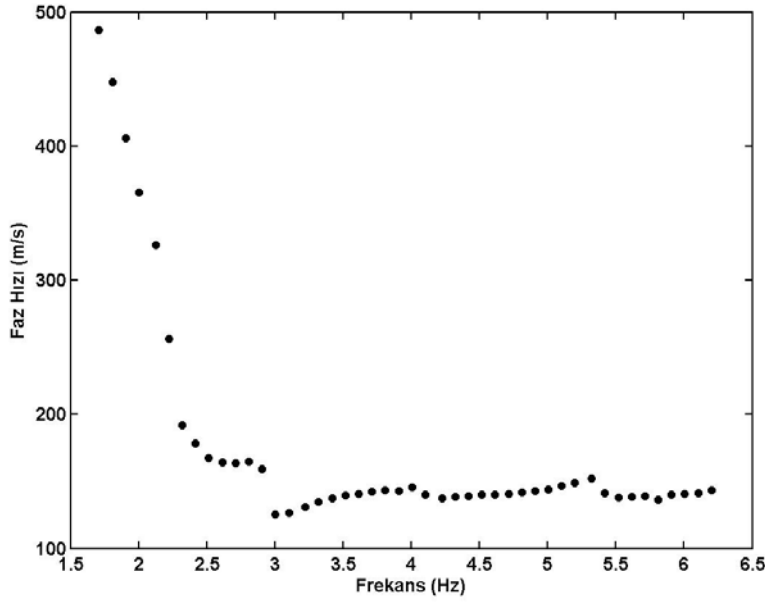


Şekil 2.34 Beş dakikalık 12 ayrı veri grubunun analizinden elde edilen faz hızları. Gri çizgiler, saçılmaları göz ardı ederek ortalaması alınan hızları göstermektedir.

Çok sayıda alıcı kullanıldığında, kök ve ekstremum değerlerinden yüksek frekanslarda da faz hızı elde edilebilir. Ancak, üçgen dizilim kullanılırken, dalga alanının yayılım doğrultusu, dispersiyon eğrisinin şekli gibi faktörler, elde edilen katsayı eğrilerini etkilemektedir. Çünkü, alıcılar arasındaki mesafe oldukça fazladır. Bu durumda, daha geniş bir frekans aralığını incelemek ve dalgasayısı katlanması oluşmadan faz hızı elde edebilmek için, en az dört farklı yarıçap kullanılmalıdır.

Açıklandığı gibi, yarıçap belirlenirken önemli olan, en azından ilk kök ve ekstremumun gözlenmesini sağlayacak bir değer seçmektir. Gözlenebilecek en küçük dalgaboyu, ilişki katsayılarının ilk ekstremumu göz önüne alınarak, üçgen dizilim

için,  $2r$  olarak belirlenmiştir.  $r$ , burada en küçük alıcı aralığını ifade etmektedir. En büyük dalgaboyunun ise, arazi verileri ile yapılan analizler sonucunda, en büyük alıcı aralığının en çok 7 katı olabileceği görülmüştür.



Şekil 2.35 Dört farklı alıcı mesafesi kullanarak bulunan ilişki katsayılarından elde edilen faz hızları.

Üçgenin köşelerine yerleştirilmiş alıcılar arasındaki ilişkinin de incelenmesi ile tek yarıçap kullanarak, iki farklı alıcı mesafesi için ilişki değerlerinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu durumda, sadece iki yarıçap kullanarak dört farklı uzaklık için analiz yapılmış olur. Ayrıca, gerçek veri uygulamaları sonucunda, her zaman dizilimin merkezinde bir alıcı bulunmasının gerekmediği gösterilmiştir.

Mikrotremor, genel olarak, arka plan sismik gürültü olarak kabul edilmektedir. Ancak, pasif kaynaklı çalışmalarda, mikrotremorler sinyal olarak ele alınmaktadır. Bu durumda, mikrotremorle ilişkili olmayan gürültünün analizlere olan etkisi araştırılmıştır. Sonuçta, gerçek veri toplanırken, sinyal/gürültü oranının % 10-15' den fazla olmasının yanlış sonuçlar elde edilmesine neden olabileceği görülmüştür.

Yapılan diğer bir sına ile, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları mevcutken bu yöntemle sonuca ulaşılabilirdiği gösterilmiştir. Teorik olarak da, bu durumun analizlerde sorun olmadığı açıklanmıştır. Eşkenar üçgen dizilimleri ile de, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları mevcutken güvenilir sonuçlar elde edilebildiği görülmüştür.

Uzamsal özilişki yöntemi ile yüzey dalgalarını yüksek modlarını ayırdetmek mümkün değildir. Bu yöntemin gereği olarak yapılan ilk kabul, mikrotremorlerin yüzey dalgalarının temel modundan oluştuğudur (Aki, 1957). Ancak, günümüzde veriye yüksek modların da karışabildiği bilinmektedir. Yüksek modların karışımı elde edilen katsayı eğrilerinin şeklini etkileyebilir. Ancak, yönteminde temelinde yer alan azimutal ortalama işlemi hatırlanırsa, yüksek modların belirlenemeyeceği de anlaşılır. Bu nedenle, yüksek modlarla ilgili bir sınama yapılmamıştır.

### 3. DİZİLİM-İŞLEME (FREKANS ORTAMI IŞIN BİÇİMLENDİRME) YÖNTEMLERİ

Dispersif Rayleigh dalgalarından oluşan mikrotremorlerden faz hızı dispersiyon bilgisinin elde edilmesinde kullanılan diğer bir yaklaşım, dizilim-işleme (array-processing) yöntemleridir. Bu yöntemlerin, radar uygulamalarındaki amacı, elektromanyetik sinyallerin yayılım doğrultularının belirlenmesidir. Dizilim-işleme yöntemlerinin mikrotremor ölçümlerindeki kullanımı ise, dalga alanı yayılımının kaydedildiği alıcılar arasında kalan ortamın hız yapısının yanı sıra, geliş açısı hakkında da bilgi edinmeye dayanır.

Dalgasayısı vektörü, uzay-zaman ortamında kaydedilen sinyalin yayılım doğrultusunu ve hızını gösteren bir büyüklüktür. Herhangi bir frekansta güç spektrumunun en büyük değeri aldığı dalgasayısı bulunabilirse, o frekansa karşılık gelen faz hızı belirlenebilir. İki boyutlu dizilimler kullanıldığı takdirde, frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemleri ile dalga alanının yayılım doğrultusunu saptamak mümkündür. Mikrotremorlerin kullanıldığı analizlerde, frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemleri, hem doğrusal hem de dairesel dizilimler ile kullanılmaktadır. Doğrusal bir dizilim kullanıldığında, sinyalin geliş açısı veya hızı bulunabilirken iki boyutlu dizilimlerden, her iki bilgiyi de elde etmek mümkündür.

Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemi (FOIB), bir boyutlu (doğrusal) dizilimler ile kullanıldığında, sismik prospeksiyonda kullanılan frekans-dalgasayısı dönüşümüne karşılık gelir. Uygulanan iki boyutlu Fourier dönüşümü ile, zaman-uzay ortamındaki dalga alanı, frekans-dalgasayısı ortamına aktarılır. Böylece, sismik yansıma yönteminde gürültü olarak kabul edilen yüzey dalgaları ve diğer gürültüler veriden süzülebilir.

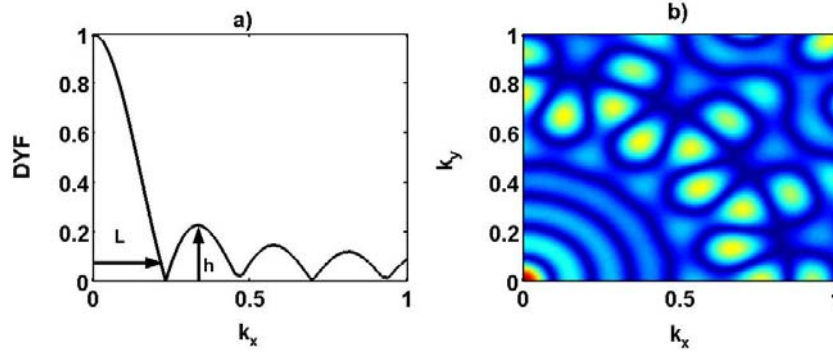
Bu bölümde, FOIB yaklaşımının temel esaslarına kısaca değinildikten sonra, yapay verilerle, farklı doğrultulardan yayılan dalga alanlarının ve yüksek modların etkileri araştırılmıştır. Bölüm 2' de özilişki yöntemi ile analiz edilen arazi verileri, daha önce klasik FOIB yöntemi ile de analiz edilmiştir (Bozdağ, 2002). Bu bölümde, her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir.

### 3.1 Frekans Ortamı Işın Biçimlendirmenin Temel Esasları

Frekans ortamı ışın biçimlendirmede amaç, güç spektrumunun en büyük değeri aldığı frekans-dalgasayısı çiftinin saptanmasıdır. Uzaysal ortamda yayılan düzlem dalganın sınırlı boyutlarda ve sınırlı sayıda alıcı ile kaydedilmesi, gerçek güç spektrumunun yuvarlatılmış olarak elde edilmesine neden olur. Yuvarlatma fonksiyonu, ağırlıklandırılmış alıcı diziliminin Fourier dönüşümüne eşittir ve

$$W(\mathbf{k}) = \sum_{i=1}^s w_i \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_i) \quad (3.1)$$

bağıntısı ile hesaplanır.  $\mathbf{x}_i$  alıcıların konum vektörünü,  $\mathbf{k}$  dalgasayısı vektörünü,  $w_i$  alıcı ağırlığını,  $s$  ise alıcı sayısını göstermektedir. Şekil 3.1’ de, doğrusal ve dairesel dizilim yuvarlatma fonksiyonlarına örnek görülmektedir.



Şekil 3.1 a) Uzunluğu 27 m olan doğrusal, b) yarıçapı 25 m olan dairesel dizilim yuvarlatma fonksiyonları. L, ana lobun genişliğini, h ise yan lob yüksekliğini göstermektedir.

Dizilim yuvarlatma fonksiyonu, bir grup çok boyutlu band-geçişli süzgeç olarak da kabul edilebilir. Her bir süzgeç, bir frekans-dalgasayısı çiftine karşılık gelmektedir. Dizilim yuvarlatma fonksiyonunda ana lobun genişliği (L), birbirine yakın dalgasayılarının çözünürlüğünü kontrol eder. Ana lobun genişliği ne kadar azsa, dalgasayısı o kadar hassas saptanacaktır. Yan lobların yüksekliği (h) ise ilgilenilen frekans dışındaki enerji sızmasını engellemede etkindir.

#### 3.1.1 Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirmenin teorik esasları

Alıcıların ağırlıkları  $w_i = 1$  olarak alınırsa, klasik FOIB yöntemiyle güç spektrumu kestirimi,

$$P(\mathbf{k}, \omega) = \mathbf{e}^H(\mathbf{k}) \mathbf{R}(\omega) \mathbf{e}(\mathbf{k}) \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\mathbf{e}(\mathbf{k})$  yönlendirme vektörü,  $\mathbf{e}^H(\mathbf{k})$  yönlendirme vektörünün Hermitian transpozunu göstermektedir. Yönlendirme vektörü,

$$\mathbf{e}(\mathbf{k}) = [\exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_1) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_2) \dots \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_s)]^T \quad (3.3)$$

bağıntısı ile gösterilir. Bu vektör, alıcıların konumları ve dalgasayısı vektörü kullanılarak oluşturulur ve alıcılardaki faz kayması bilgisini içerir.  $\mathbf{R}(\omega)$  ise uzaysal ilişki matrisidir. Bu matrisin,  $\omega$  açısal frekansında, tek bir elemanı,

$$R_{i,j}(\omega) = \frac{1}{B} \sum_{n=1}^B S_{i,n}(\omega) S_{j,n}^*(\omega) \quad (3.4)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada,  $R_{i,j}(\omega)$ ,  $i$ . ve  $j$ . alıcılar arasındaki çapraz güç spektrumudur. İlişki matrisi,

$$\mathbf{R}(\omega) = \begin{bmatrix} R_{1,1}(\omega) & R_{1,2}(\omega) & \dots & R_{1,s}(\omega) \\ R_{2,1}(\omega) & R_{2,2}(\omega) & \dots & R_{2,s}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{s,1}(\omega) & R_{s,2}(\omega) & \dots & R_{s,s}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. Toplam  $N$  uzunluğundaki veri,  $L$  uzunluğunda  $B$  bloğa bölünmüştür. Matrisin elemanları,  $n$ . bloktaki verinin Fourier dönüşümü alındıktan sonra  $(S_{i,n}(\omega))$ , kompleks eşleniği ile çarpılması sonucu elde edilir. Bu, Hermitian simetrik bir matristir ve diagonalı öz güç spektrumunu vermektedir. Herhangi bir frekans ( $\omega = \omega_0$ ) için, olası tüm dalgasayısı vektörleri kullanılarak, denklem (3.2) ile oluşturulan güç spektrumunun aldığı en büyük değere karşılık gelen dalgasayısı vektöründen yayının doğrultusu ile faz hızı, sırasıyla  $\theta = \tan^{-1}(k_{0,y}/k_{0,x})$  ve  $c(\omega_0) = \omega_0/k_0$  bağıntılarından bulunabilir. Dalgasayısı vektörü,  $\mathbf{i}$  ve  $\mathbf{j}$  birim vektörler ise,  $\mathbf{k}_0 = k_{0,x} \cdot \mathbf{i} + k_{0,y} \cdot \mathbf{j}$  şeklinde verilebilir.

### 3.2 Klasik Frekans Ortamı Işın Biçimlendirmenin Yapay Verilerle İncelenmesi

Örnekleme aralığı 0.01 s, uzunluğu 5 dakika ve sinyal/gürültü oranı 10 alınarak üretilen yapay mikrotremor verileri, Bölüm 2.2.1' de açıklandığı gibi, denklem (2.13) ile üretilmiştir. Bu bölümde, alıcı sayısının, farklı doğrultulardan yayılan dalga alanlarının ve son olarak da yüksek modların analizlere olan etkisi incelenmiştir.

#### 3.2.1 Alıcı sayısının incelenmesi

Bölüm 2' de incelenen özilişki yöntemi ile yapılan sınamalarda görülmüştür ki, değişik yarıçaplı eşkenar üçgen dizilimlerle, faz hızı elde edilebilir. Bu bölümde, ilk

olarak 10 ve 4 alıcılı dairesel dizilim yuvarlatma fonksiyonları karşılaştırılmıştır. Burada, dört alıcı ile oluşturulan dairesel dizilimden kastedilen, bir alıcının dairenin merkezine yerleştirilmesi ile oluşturulan eşkenar üçgen dizilimdir (Şekil 2.12).

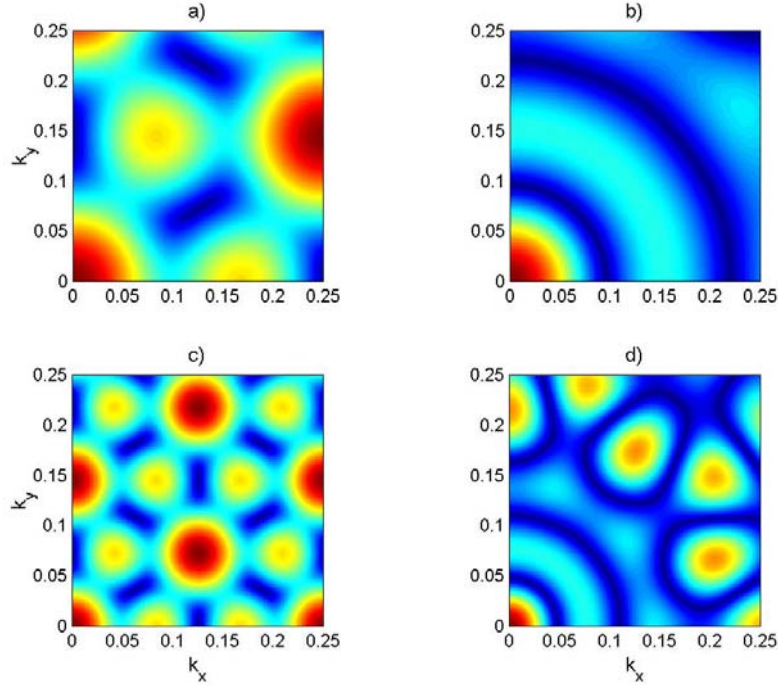
Dairesel bir dizilimde, yarıçapın uzunluğu, ana lobun genişliğini kontrol etmektedir. Bu da, doğrudan dalgasayısı çözünürlüğünü etkilemektedir. Çözünürlük, Rayleigh kriteri ile (simetrik fonksiyonlar için ana lobun genişliğinin yarısı-L) kontrol edilir (Johnson ve Dudgeon, 1993). Çözünürlüğü arttırmak için, dairesel dizilimin yarıçapını büyütürken alıcı sayısını arttırmadığımız takdirde, dalgasayısı katlanması gözlenecektir. Katlanma oluşmadan gözlenebilecek en büyük dalgasayısı (Nyquist dalgasayısı),

$$k_{\max} = \frac{\pi}{d_{\min}} \quad (3.7)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,  $d_{\min}$ , alıcılar arasındaki en kısa uzaklıktır.

Şekil 3.2' de, iki farklı yarıçap için oluşturulan 10 ve 4 alıcılı dairesel dizilim yuvarlatma fonksiyonları görülmektedir. Yarıçapın artmasının, ana lobun genişliğini azalttığı görülmektedir. Alıcı sayısı 10 olan dizilimde dalgasayısı katlanması gözlenmezken, 4 alıcılı dizilimin yuvarlatma fonksiyonlarında katlanma açıkça görülmektedir. Eşkenar üçgen dizilim kullanıldığında, dalgasayısı katlanması oluşmadan gözlenebilecek en büyük frekans daha düşük olacaktır.

Özilişki yönteminde, dairesel bir geometride yerleştirilen 4 alıcıdan oluşan eşkenar üçgen dizilimle sınırlı bir frekans aralığında, faz hızı elde etmek mümkündür. Şimdi, benzer dizilim ile klasik FOIB yönteminden nasıl sonuçlar elde edebileceğimizi inceleyelim. Alıcı aralıkları, yarıçap arttıkça artacağından, dalgasayısı katlanması o kadar düşük frekanslarda gözlenecektir. Bu durumda da , kullanılan her farklı yarıçap ile faz hızı elde edilen frekans aralığı değişecektir. Şekil 3.3b' de, yarıçapı 25, 50, 100 ve 200 m olan, dört eşkenar üçgen dizilim ile yapılan analizlerin sonucu görülmektedir. Her dizilimden elde edilen ver ayrı ayrı analiz edildikten sonra, farklı frekanslarda saçılmalar gözlenmiştir. Daha sonra, bu saçılmaların dalgasayısı katlanmasından oluşabileceği düşünülmüştür.

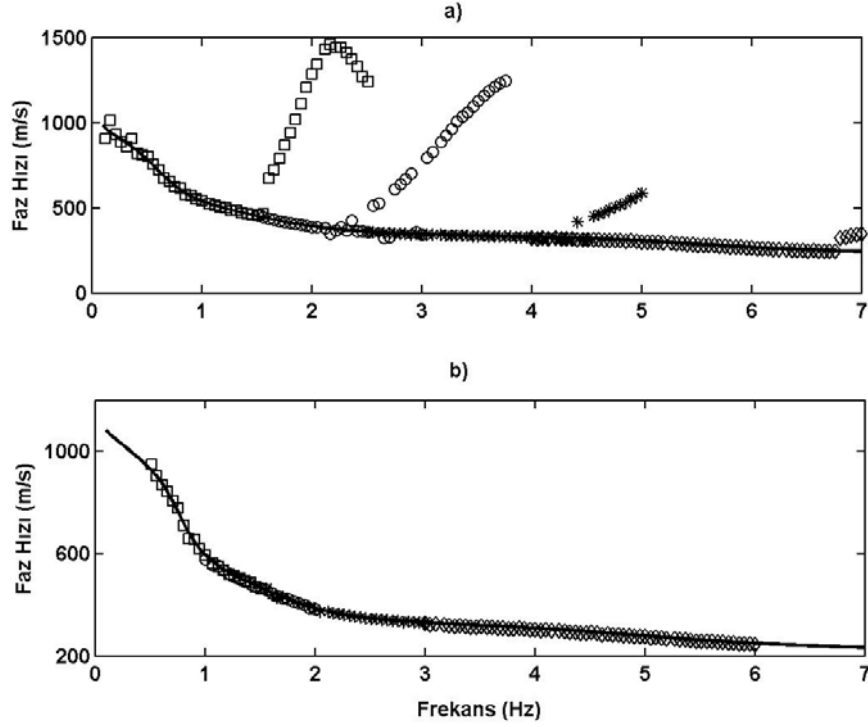


Şekil 3.2 Yarıçapı 25 m olan a) 4 ve b) 10 alıcılı, yarıçapı 50 m olan c) 4 ve d) 10 alıcılı dizilim yuvarlatma fonksiyonları.

Yarıçapı 25 m olan dizilim ile en yüksek 6 Hz' e kadar, yarıçapı 50 m olan dizilim ile 4 Hz' e kadar, yarıçapı 100 m olan dizilim ile en yüksek 2 Hz' e kadar ve yarıçapı 200 m olan dizilim ile en yüksek 1.5 Hz' e kadar, dalgasayısı katlanması oluşmadan, faz hızı elde edilebilmiştir. Şekil 3.3a' da görülen saçılmalar göz ardı edilerek, hızlar birbirini takip edecek şekilde çizdirilmiştir (Şekil 3.3b). Bu şekilde, 0.5-6 Hz aralığında faz hızı elde edilebilmiştir. Bu, benzer dizilim ile özilişki yöntemi sonuçlarıyla yaklaşık olarak aynıdır. Eğer 6 Hz' den yüksek frekanslarda da hız bulmak isteniyorsa, düşük yarıçaplı bir dizilim daha kullanılmalıdır. Böylece, özilişki yönteminde olduğu gibi, üçgen dizilim ile farklı yarıçaplar kullanarak, faz hızı dispersiyon eğrisinin elde edilebileceği görülmüştür.

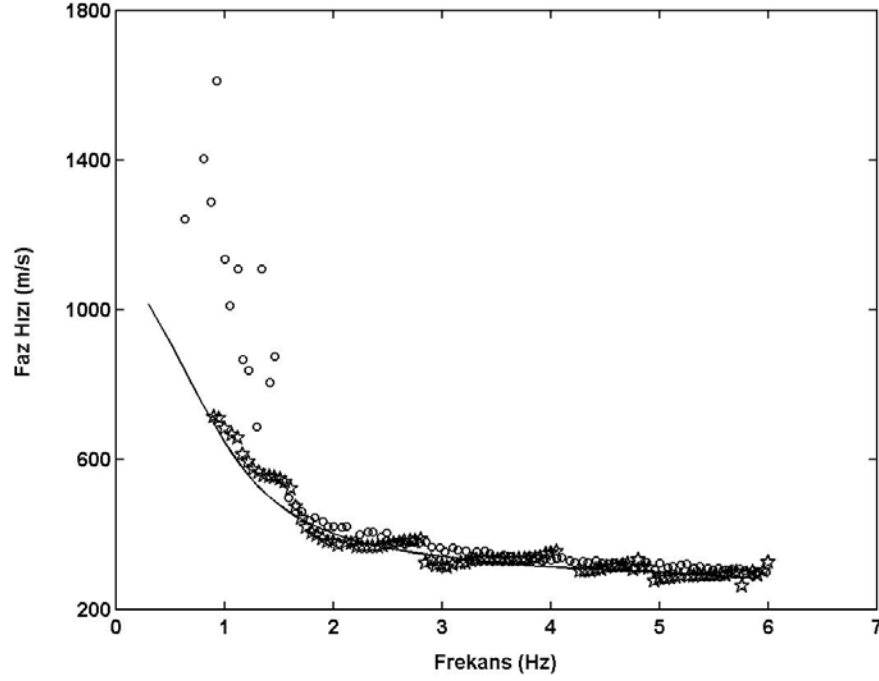
### 3.2.2 Klasik frekans ortamı ışıın biçimlendirmede farklı doğrultulardan yayılan dalga alanlarının etkisi

Farklı doğrultulardan yayılan dalga alanları, uzamsal özilişki yöntemi ile yapılan analizleri etkilememesine karşın, klasik FOIB ile elde edilen sonuçlarda bazı yanılgılara yol açabilmektedir (Liu ve diğ., 2000, Bozdağ, 2002). Bu bölümde, bu etki, uzamsal özilişki yöntemi ile karşılaştırılarak incelenecektir.



Şekil 3.3 a) Eşkenar üçgen dizilimlerin analizinden elde edilen hızlar. b) Gözlenen saçılmalar göz ardı edilerek elde edilen faz hızı dispersiyon eğrisi. Dörtgen semboller 25 m, yıldız semboller 50 m, yuvarlak semboller 100 m, kare semboller 200m yarıçapındaki dizilim verilerinin analizinden elde edilmiştir.

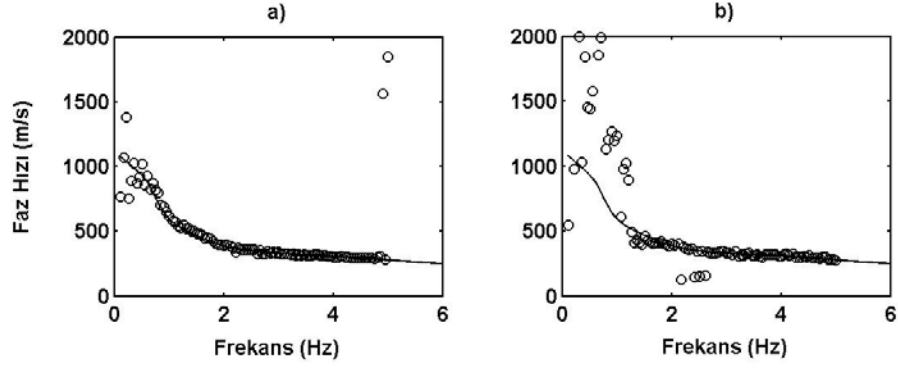
İlk olarak, İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü'nde, her iki dizilim geometrisi (Şekil 2.21) ile kaydedilen verilere uygulanan klasik FOIB yöntemi sonuçları ele alınmıştır (Bozdağ, 2002). Hatırlanacak olursa, Bölüm 2.3.1' de, aynı veri grubu, özilişki yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil 3.4' de, klasik FOIB ve özilişki yöntemi ile elde edilen sonuçlar birarada görülmektedir. Doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB ile dairesel dizilime uygulanan özilişki yönteminden uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar özilişki yöntemi sonuçlarında 3 Hz' den sonra süreksizlikler gözlenirse de, elde edilen bilgi, klasik FOIB sonuçlarına uyum göstermektedir. Ayrıca, biraz sonra açıklanacağı üzere, bu aşamada önemli olan düşük frekanslardaki bilgi içeriğidir. Klasik FOIB yöntemi ile dairesel dizilimden elde edilen sonuçlarda ise, diğer dispersiyon eğrilerinden farklı olarak, düşük frekanslarda yüksek hız değerleri gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları gösterilmiştir (Bozdağ, 2002). Daha büyük bir dizilim olan, doğrusal dizilimin sonuçlarında benzer artışların görülmemesi, dizilim yarıçapının arttırılması ile, farklı doğrultulardan yayınan sinyallerin etkisinin azalacağını göstermektedir.



Şekil 3.4 Doğrusal dizilim verisine uygulanan klasik FOIB yöntemi ile (siyah eğri),daireseel dizilim verisine uygulanan özilişki (yıldız semboller) ve klasik FOIB yöntemi (nokta semboller) ile elde edilen faz hızları .

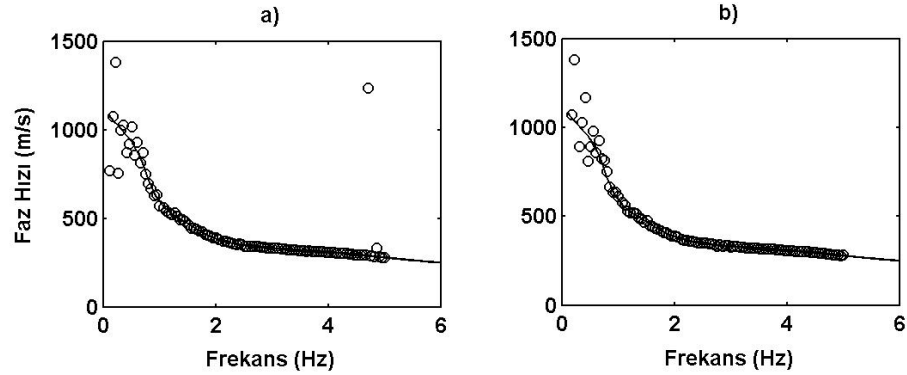
Bu etkiyi daha iyi inceleyebilmek için, yarıçapı 80 m olan, 10 alıcılı dizilim için, yapay veriler üretilmiştir. Eşit genlikli ( $A_1 = A_2$ ),  $\theta_1=0^\circ-\theta_2=30^\circ$  ve  $\theta_1=0^\circ-\theta_2=120^\circ$  yayınım doğrultularında, iki dalga alanı durumunda elde edilen faz hızları, Şekil 3.5’ de görülmektedir. Her iki durumda da, elde edilen sonuçlarda, düşük frekanslarda gerçek hızlardan daha yüksek değerler bulunduğu görülmektedir.

Dalga alanlarının yayınım doğrultuları arasındaki farka bağlı olarak, gözlenen hızlarda saçılmalar artmaktadır. Yayınım doğrultuları farklı iki dalga alanı mevcutken, güç spektrumunun en büyük değeri aldığı iki frekans-dalgasayısı çifti bulunur. İkisinden de, aynı hız değeri bulunacaktır. Ancak, düşük frekanslarda, güç spektrumunun en büyük olduğu neredeyse tek bir dalgasayısı gözlenebilmektedir. Yayınım doğrultuları arasındaki fark düşük olduğunda, gerçek faz hızından sapma daha az olmaktadır. Ancak, bu fark arttığında, düşük frekanslarda, güç spektrumunun en büyük değerini aldığı dalgasayısından elde edilen faz hızı gerçek hızdan çok farklı olmaktadır. Dalga alanlarının genliklerinin eşit olması da bu durumda olumsuz bir etkidir.



Şekil 3.5 Yayınım doğrultuları, a)  $0^{\circ}$ - $30^{\circ}$  ve b)  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  olan, eşit genlikli iki dalga alanı için yapılan analizlerden elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller). Siyah eğri, gerçek (teorik) dispersiyon eğrisidir.

Mikrotremorlerin, her doğrultudan yayınıyor olabileceği düşünülürse, olası dalga alanlarının genliklerinin eşit olması ihtimali düşüktür. Zaten, bu karşılaşılabilecek en kötü durumdur (Liu, 2000). Genlikleri farklı olan dalga alanları söz konusu olduğunda da benzer saçılmalar olmasına karşın, gözlenen faz hızları, gerçek dispersiyon eğrisi ile daha uyumludur (Bozdog, 2002). Ancak, dizilimin yarıçapı ve alıcı sayısı artırıldığı zaman elde edilen sonuçlar, gerçek dispersiyon eğrisinin yaklaşık olarak bulunabildiğini göstermektedir. Şekil 3.6' da, 500 m yarıçapındaki 30 alıcılı dizilim kullanılarak elde edilen sonuçlar görülmektedir. Aynı doğrultulardan yayınan, eşit genlikli iki dalga alanı söz konusu olduğunda yaklaşık olarak, gerçek dispersiyon eğrisini elde etmek mümkün olmuştur.



Şekil 3.6 Yarıçapı 500 m olan dizilimden elde edilen veriye uygulanan klasik FOIB yöntemi sonuçları. a)  $0^{\circ}$ - $30^{\circ}$ , b)  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  doğrultularından yayınan iki dalga alanı durumunda elde edilen faz hızları (yuvarlak noktalar). Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

Yapay ve gerçek veri ile yapılan analizlerden anlaşılmaktadır ki, klasik FOIB yönteminde aynı zamanda, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının sorun oluşturmaması için, kullanılan dizilimin boyutlarına dikkat etmek gerekir. Tek bir

dalga alanı kaynağı mevcutken sorunsuz olarak çözüme ulaşılabilen bir dizilim ile, iki ya da daha fazla dalga alanı söz konusu iken, özellikle düşük frekanslarda, güvenilir sonuçlar elde etmek mümkün olmamıştır.

Literatürde, ilişki matrisinin (**R**) farklı kullanımları ile geliştirilmiş çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Amaç, çözünürlüğü arttırmaktır. Spektral kestirim yöntemlerinden biri olan MUSIC (Multiple Signal Classification) yönteminin çözünürlüğünün, özellikle birden fazla sinyal durumunda, yüksek olduğu belirtilmektedir (Goldstein ve Archuleta, 1991). Bir sonraki aşama olarak, klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme ile güvenilir sonuçların elde edilemediği dairesel dizilim verilerine, MUSIC yöntemi uygulanmıştır.

### 3.2.2.1 MUSIC yöntemi ile dairesel dizilim verilerinin incelenmesi

Öncelikle, bu yöntemin teorik esasları kısaca açıklanacaktır. MUSIC yönteminde, özdeğer-özvektör analizi (eigenanalysis) yapılmaktadır (Zywicki, 1999). Dizilim-işleme tekniklerinde, MUSIC yöntemi kullanılırken, güç spektrumu kestirimi,

$$P_{MUSIC}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1}{\mathbf{e}^H(\mathbf{k}) \mathbf{R}_{MUSIC}^{-1} \mathbf{e}(\mathbf{k})} \quad (3.8)$$

şeklinde, ilişki matrisinin tersi alınarak, yapılır. Genel olarak, bu matrisi,

$$\mathbf{R}(\omega) = \sum_{i=1}^s \lambda_i(\omega) \mathbf{v}_i(\omega) \mathbf{v}_i(\omega)^H \quad (3.9)$$

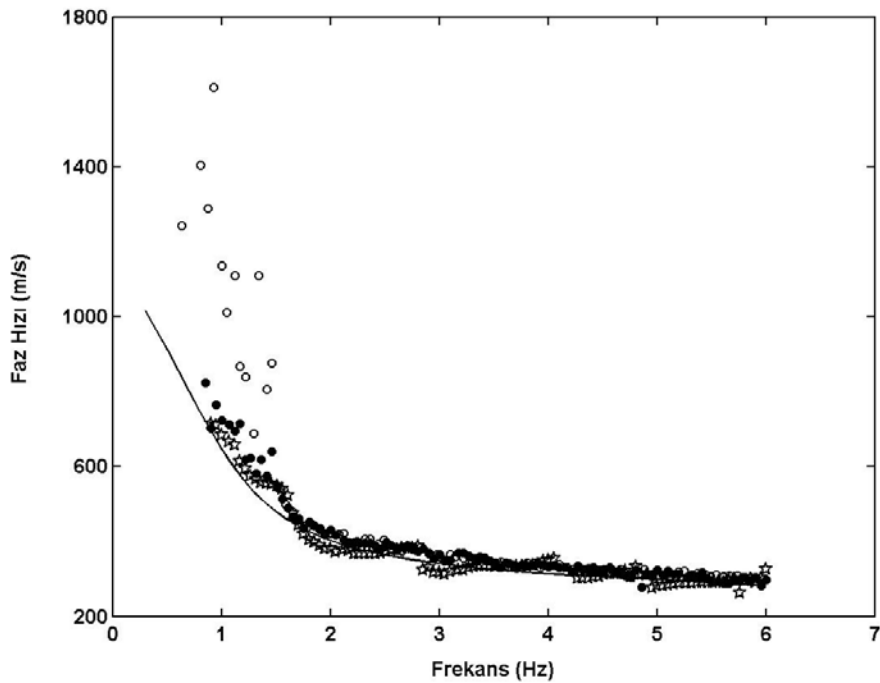
bağıntısı ile ifade edebiliriz. Burada,  $\mathbf{v}_i(\omega)$ , herhangi bir  $\omega$  frekansı için,  $i$ . özdeğere ( $\lambda_i$ ) karşılık gelen  $i$ . özvektördür. Bu yöntemde, ilişki matrisinin yapısı (eigenstructure), sinyal ve gürültü alt-uzaylarından (subspace) oluşmaktadır (Goldstein ve Archuleta, 1991). Özdeğer-özvektör analizleri bu alt-uzaylara göre yapılmaktadır. Yüksek özdeğerler, sinyal-artı-gürültü alt-uzayına karşılık gelmektedir (Johnson ve Dudgeon, 1993). Burada, gürültüden kastedilen sinyalden ayırdedilemeyen gürültüdür. Diğer, düşük, özdeğerler ise, gürültü alt-uzayına karşılık gelmektedir (Johnson ve Dudgeon, 1993). Bu iki alt-uzay ortogonaldır ve özdeğer-özvektör analizleri, genellikle gürültü alt-uzayında yapılmaktadır. Böylece, gürültüye dik olan sinyaller araştırılmaktadır (Zywicki, 1999). Sinyal belirlenmek isteniyorsa gürültü alt-uzayı, gürültü belirlenmek isteniyorsa sinyal alt-uzayı incelenmelidir. Genel olarak, mikrotremorler arka plan sismik gürültü olarak kabul edilmektedir. Aslında, beyaz gürültü olarak modellenen kaynak fonksiyonu ile birim dürtü

tepkisinin evriştirilmesi ve mikrotremorle ilişkili olmayan rastgele gürültünün eklenmesi ile oluşan sinyaller olarak da dūřünülebilir. Sinyal hakkında bilgi edinmek istediğimize göre, en düşük özdeğerler kullanılarak ilişki matrisinin tersi elde edilir.  $N_s$ , sinyal sayısı ise, ilişki matrisinin tersi, düşük özdeğerler kullanılarak,

$$\mathbf{R}_{MUSIC}^{-1}(\omega) = \sum_{i=N_s+1}^s \mathbf{v}_i(\omega) \mathbf{v}_i(\omega)^H \quad (3.10)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

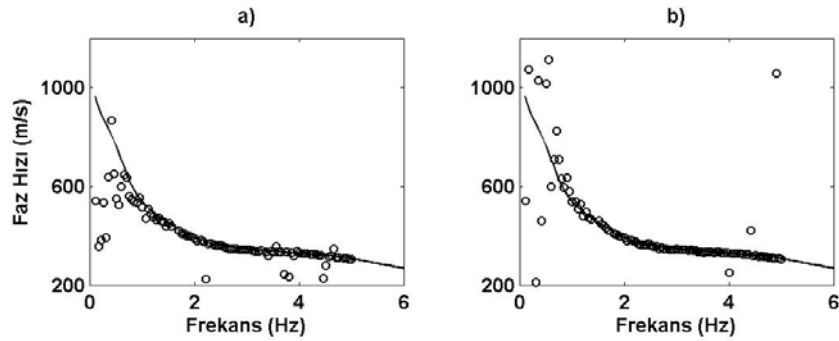
şekil 3.7’ de, dairesel dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB ile MUSIC yöntemi sonuçları birarada görülmektedir. Düşük frekanslardaki saçılmalar azalmıştır. Dairesel dizilim verilerine uygulanan özilişki ve doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB yönteminden elde edilen sonuçlarla uyumlu faz hızları elde edilmiştir.



şekil 3.7 Dairesel dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB (içi boş semboller), özilişki (yıldız semboller) ve MUSIC (içi dolu semboller) yöntemi ile doğrusal dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB (siyah eğri) yöntemi sonuçları.

Böylece, birden fazla sinyal durumunda, MUSIC yöntemi ile daha güvenilir sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Bu durumu daha iyi inceleyebilmek için, Bölüm 3.2.1’ de üretilen yapay veriler kullanılarak analizler yapılmıştır. Yarıçapı 80 m olan dizilim için üretilen, eşit genlikli, yayınım doğrultuları  $\theta_1=0^\circ$ - $\theta_2=30^\circ$  ve  $\theta_1=0^\circ$ -

$\theta_2=120^\circ$  olan dalga alanları durumunda elde edilen sonuçlar, Şekil 3.8’ de görülmektedir.



Şekil 3.8 Yarıçapı 80 m olan dizilim için üretilen yapay verilere uygulanan MUSIC yöntemi sonuçları. a)  $0^\circ$ - $30^\circ$  ve b)  $0^\circ$ - $120^\circ$  doğrultularından yayınan iki dalga alanı durumunda elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller). Siyah eğri, gerçek dispersiyon eğrisidir.

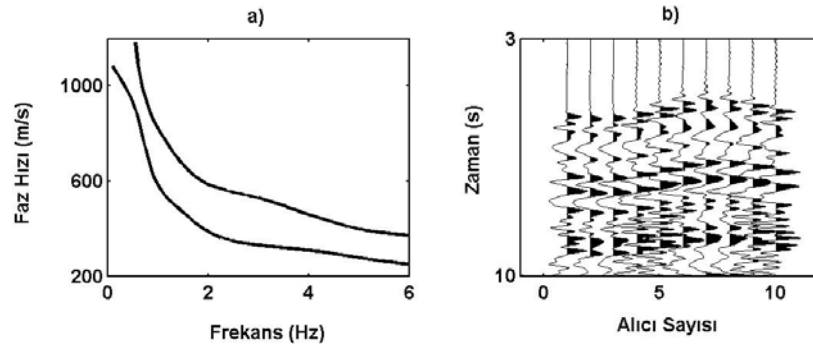
Çözünürlüğünün daha yüksek olduğu belirtilen MUSIC yöntemi ile düşük frekanslarda da güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının klasik FOIB analizlerini olumsuz etkilememesi için dizilimin boyutlarının artırılması gerektiği ya da MUSIC yönteminin kullanılmasının gerektiği söylenebilir.

Özilişki yöntemi ile, birden fazla sinyal durumunda, eşkenar üçgen dizilim kullanarak sonuca sorunsuz ulaşılabilir. FOIB yöntemi, benzer dizilim kullanıldığı zaman dar bir frekans aralığında elde edilen hızlarda gözlenen saçılmalar nedeniyle, tercih edilmeyebilir. Ancak, klasik FOIB yöntemindeki saçılmaların gözlenmediği MUSIC yönteminde, üçgen dizilimler kullanılarak analiz yapılabilir. Bu durumda, ilgilenilen frekans aralığında farklı yarıçaplar kullanılarak, faz hızı dispersiyon eğrisi elde edilebilir.

### 3.2.3 Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme ile yüksek modların incelenmesi

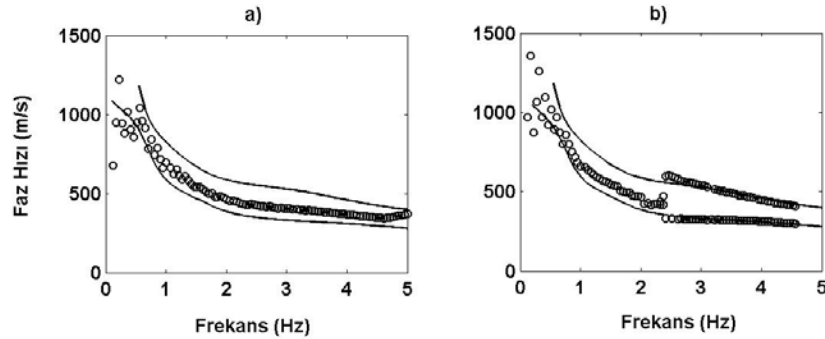
Yüzey dalgalarının yüksek modlarının oluşması, kullanılan kaynağın özelliklerine ve derinliğine bağlıdır. Örneğin, sık bir kaynak ile oluşturulan uzun periyodlu dalgalar, baskın olarak temel moddan oluşmaktadır (Aki ve Richards, 2002). Kaynak olarak mikrotremor kullanılırken yüksek modlarla sıklıkla karşılaşmamaktadır. Çünkü mikrotremorlerin, büyük bir oranda yüzey dalgalarından, özellikle Rayleigh dalgasının temel modundan oluştuğu düşünülmektedir. Ancak, yüksek modların oluşması durumunda bu yöntemin davranışı, üretilen yapay verilerle incelenmiştir. Şekil 3.9’ da, temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri ile 80 m yarıçapında,

10 alıcılı dizilim için üretilen yapay veriler görülmektedir. Yüksek modların etkisini doğrudan inceleyebilmek için, yapay verilere rastgele gürültü eklenmemiştir.



Şekil 3.9 a) Teorik (gerçek) temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri, b) örnek yapay veri.

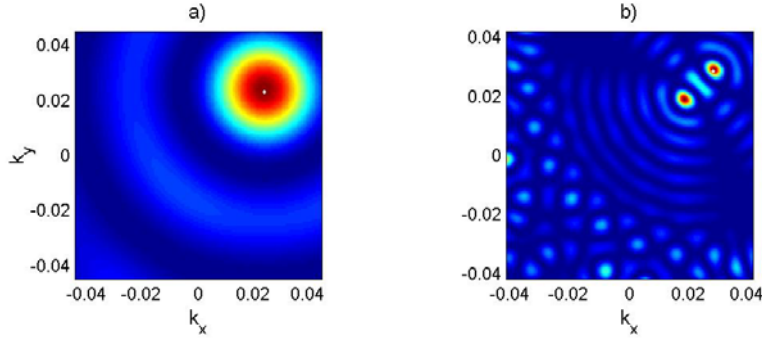
Şekil 3.10a' da 80 m yarıçapındaki dizilim ile yapılan analizden elde edilen sonuç görülmektedir. Bu boyutlardaki bir dizilim ile, yüksek modu ayırdetmek mümkün olmamıştır. Temel moddan daha yüksek, 1. yüksek moddan daha düşük hızlara sahip bir dispersiyon eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3.10b' de, 300 m yarıçapındaki 20 alıcılı dizilimden elde edilen sonuç görülmektedir. Bu durumda, düşük frekanslarda temel moddan daha yüksek hızlar bulunuyorsa da, yüksek frekanslarda modların ayırdedilebilmesi mümkün olmuştur.



Şekil 3.10 Yarıçapları a) 80 m, b) 300 m olan dairesel dizilim verilerinin analizi sonucu bulunan faz hızları. Siyah eğriler, gerçek temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileridir.

Şekil 3.11' de, iki dizilim geometrisi içinde, 2.3 Hz frekansında elde edilen güç spektrumları görülmektedir. Şekil 3.11a' da görülen küçük dizilimin güç spektrumu, tek bir dalgasayısında en yüksek değeri almaktadır. Şekil 3.11b' de görülen daha büyük dizilimin güç spektrumu, iki farklı dalgasayısında en yüksek değerini almaktadır. Böylece, aynı frekansta, farklı dalgasayılarında en yüksek değeri alan güç spektrumlarından, iki farklı faz hızı elde edilir. Bu da, o frekanstaki temel mod

ile 1. yüksek mod faz hızına denk gelmektedir. Bu şekilden de anlaşılabileceği gibi, modların ayırılabilmesi için dizilimin yarıçapının ve alıcı sayısının artırılması gerekmektedir.



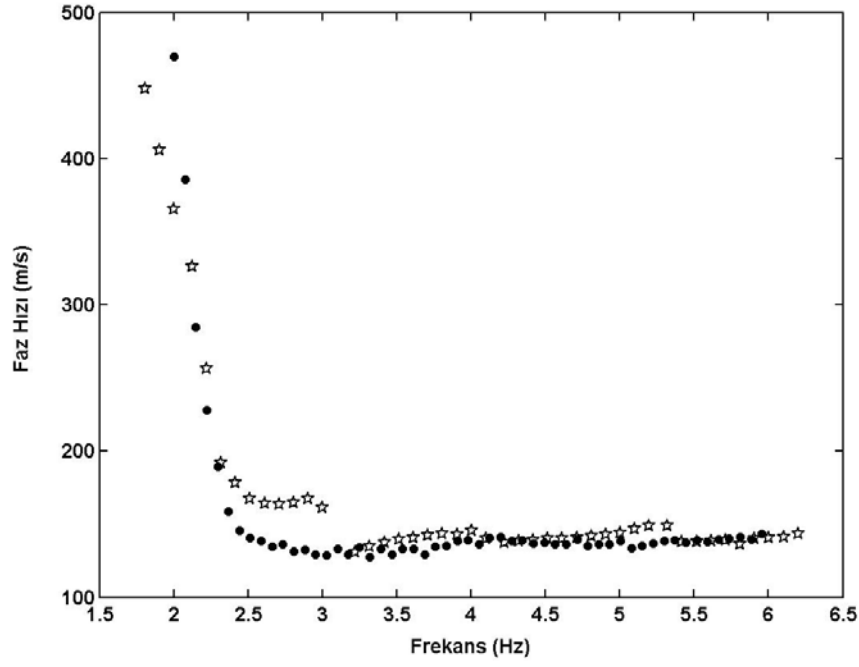
Şekil 3.11 Frekans 2.3 Hz iken, a) 80 m yarıçapındaki dizilimin analizinden, b) 300 m yarıçapındaki dizilimin analizinden elde edilen güç spektrumu.

Dalga alanının yayındığı ortamın heterojenliğinden kaynaklanan saçılmaların neden olduğu yüksek mod dalga alanlarının, temel mod dalga alanı ile aynı doğrultudan dizilime ulaşması karşılaşılabilecek en kötü durumdur. Eğer farklı doğrultulu yüksek mod dalga alanları söz konusu ise, güç spektrumlarının en büyük değerleri farklı doğrultulardaki farklı dalgasayılarında gözlenecektir. Bu durumda, benzer bir dizilim ile (300 m yarıçapında 20 alıcılı dizilim), daha düşük frekanslarda da modların ayrımını gözlemek mümkün olur.

Yüksek mod dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi, S-dalga hız yapısı bulunurken yapılan ters çözüm işlemlerine olan katkısından dolayı önemlidir (Xia ve diğ., 2002). İki boyutlu dizilimlere uygulanan klasik FOIB yöntemi ile, yüksek modların bulunması dizilim boyutlarına bağlıdır. Yarıçapı 80 m olan dizilim ile yüksek modun gözlenmesi mümkün olmamıştır, ayrıca gerçek hızdan yüksek faz hızlarının elde edilmesine neden olmuştur. Bu nedenle, klasik FOIB yöntemi ile çalışırken yüksek modların varlığından kaynaklanan yanlış yorumlar yapılabilir.

### 3.3 Klasik Frekans Ortamı Işın Biçimlendirme ile Özilişki Yönteminin Gerçek Veriler Kullanılarak Karşılaştırılması

Yeşilyurt Hava Harp Okulu Kampüsü'nde toplanan verilere, Bozdağ (2002) tarafından, klasik FOIB uygulanmıştır. Sonuçlar, Bölüm 2.3.2' de özilişki yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Klasik FOIB ile yapılan analizde, Şekil 2.26' da görülen, 40 m yarıçapındaki dairesel dizilimin tüm alıcıları kullanılmıştır. Her iki yöntemden de elde edilen sonuçlar uyumludur (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Klasik FOIB yöntemi ile elde edilen faz hızları (yuvarlak semboller) ve özilişki yöntemi ile elde edilen faz hızları (yıldız semboller).

Klasik FOIB yöntemi ile, en düşük 2 Hz' e kadar faz hızları bulunabilirken, özilişki yöntemi ile, en düşük 1.7 Hz' e kadar faz hızı bulmak mümkün olmuştur. Bölüm 2.3.2.2' de belirtildiği gibi, 2.5-3 Hz' den sonra gözlenen süreksizliklerin giderilmesi için bir alıcı aralığına daha ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Buna rağmen, yüksek frekanslarda iki yöntem uyumlu sonuçlar vermektedir.

### 3.4 Sonuçlar

Frekans ortamı ışın biçimlendirme yöntemlerinde amaç, güç spektrumunun en büyük değeri aldığı dalgasayısını hesaplamaktır. Özellikle pasif kaynaklı çalışmalarda, dalgasayısının çözünürlüğü önemlidir. Çünkü, birden fazla dalga alanı ya da yüksek modlar söz konusu ise, dalgasayılarının doğru saptanamamasından dolayı yanlış faz hızları hesaplanabilir. Çözünürlüğün artırılması için, klasik frekans ortamı ışın biçimlendirmenin alternatifi olarak, farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak, Capon yöntemi, en büyük entropi spektral kestirimi yöntemi, MUSIC (Multiple Signal Classification) yöntemi verilebilir. Capon yönteminde, klasik FOIB yöntemine nazaran daha dar bir güç spektrumu elde edilir ki, bu dalgasayısının daha hassas olarak saptanmasına olanak sağlar. MUSIC yönteminin ise, farklı

doğrultulardan yayınan dalga alanları söz konusu olduğu durumlarda, çözünürlüğü daha yüksektir (Goldstein ve Archuleta, 1991).

Bu bölümde, üretilen yapay verilerle, klasik FOIB yöntemi incelenmiş ve gerçek veriler ile yapılan analizlerle elde edilen sonuçlar desteklenmiştir. Öncelikle, iki boyutlu dizilimlerin kullanımında, bu yöntemin özellikleri, literatürde benzer analizlerin yapıldığı bir diğer yöntem olan uzamsal özilişki yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Gerçek veri analizlerinden elde edilen sonuçlardan, gözlenebilecek en uzun dalgaboyunun, yarıçapın 3-5 katı aralığında olabileceği görülmüştür. Dalgasayısı katlanması oluşmadan gözlenebilecek en yüksek frekansa, Nyquist dalgasayısı ile karar verilir. Bu değer, yaklaşık olarak özilişki yöntemi ile aynıdır.

Bu yöntemle analiz yaparken, yüksek çözünürlükte güç spektrumu kestirimi yapabilmek için, en az 10 alıcı kullanılması tavsiye edilmektedir (Kudo ve diğ., 2002). Yapılan sınamalar ile görülmüştür ki, dalga alanı tek bir doğrultudan yayınıyor ise, farklı yarıçaplar kullanarak eşkenar üçgen dizilim ile, belirli bir frekans aralığında faz hızı bulunabilir. Bu durumda, özilişki yöntemi ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları mevcutken, düşük frekanslarda güvenilir sonuçlar elde etmek mümkün olmayabilir. Bu, kullanılan dizilimin yarıçapına ve alıcı sayısına bağlıdır. Yarıçap ve alıcı sayısı arttırıldığında, elde edilen sonuçlar düzeltilmektedir. Eşkenar üçgen dizilim ile, bu durumda, güvenilir sonuçlar elde edilemeyebilir. MUSIC yöntemi kullanıldığında, alıcı sayısı veya yarıçap arttırılmadan da güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Klasik FOIB ile yapılan analizlerde, yüzey dalgalarının yüksek modları gözlenebilir. Ancak, bu durumda da, dizilimin yarıçapı ve alıcı sayısı önem kazanmaktadır. Buna karşılık, özilişki yöntemi ile yüksek modların ayırdedilebilmesi mümkün değildir.

#### 4. IŞIN PARAMETRESİ-KESME ZAMANI DÖNÜŞÜMÜ (SLANT- STACK)

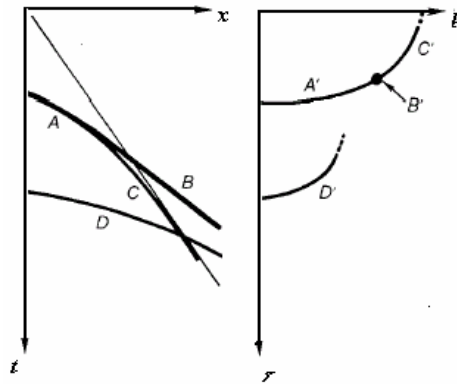
Işın parametresi-kesme zamanı dönüşümü, sismik yansıma çalışmalarında, sıklıkla kullanılan bir dalga alanı dönüşümüdür. Kullanım amacı, uzay-zaman ortamındaki veriden yansımaları, kırılmaları, kırınımları ve yüzey dalgalarını ayırabilmektir.

$\tau$ , kesme zamanı,  $p$  ise, ışın parametresi ya da yatay yavaşlık olarak tanımlanabilir. Zaman-uzaklık ( $x-t$ ) ve ışın parametresi-kesme zamanı ( $p-\tau$ ) arasındaki ilişki,

$$t = \tau + px \quad (4.1)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Denklem (4.1), seyahat zamanı eğrisindeki herhangi bir noktaya çizilen, eğimi  $p$  ve zaman eksenini kestiği nokta  $\tau$  olan, bir doğruya karşılık gelmektedir. Işın parametresi ise, zaman-uzaklık eğrisinin türevini alarak elde edilebilir.

Sismik kesitlere,  $p-\tau$  dönüşümü uygulandığında, yüzey dalgaları, farklı  $p$  değerleri için,  $\tau = 0$  ' a yakın bir alanda toplanacaktır. Kırılmalar, sabit bir eğime sahip olduklarından  $p-\tau$  ortamında, noktalara karşılık gelir (Şekil 4.1). Yansıma ve kırınım hiperbollerini ise, bu yeni ortamda elips şeklinde gözlenir. Bu hiperboller, zaman-uzaklık ortamında birbirlerini bir noktada kesiyorlarsa bile, ışın parametresi-kesme zamanı ortamında dönüştükleri elipsler için bu geçerli değildir.



Şekil 4.1 Zaman-uzaklık eğrileri ve  $p-\tau$  dönüşümleri (Yılmaz, 1987).

Görüldüğü gibi,  $x-t$  grafiğindeki düşük açılı yansımalar A ve D,  $p-\tau$  grafiğinde düşük  $p$  değerleri ile, C gibi geniş açılı yansımalarda daha yüksek  $p$  değerleri ile ilişkilendirilebilir. Doğrusal bir eğri olan, B gibi kırılmalar da dönüştükleri ortamda tek bir noktaya karşılık gelmektedir.

McMechan ve Yedlin (1981), bu dönüşümü kullanarak geliştirdikleri yöntemle, ortak atış birliğinden, dispersiyon eğrisi elde etmişlerdir. Daha sonra, Louie (2001) tarafından değiştirilerek kullanılan bu dönüşüm, pasif kaynaklı çalışmalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Hatırlanacak olursa, doğrusal dizilimler ile kullanılan klasik FOIB (frekans ortamı ışın biçimlendirme), sismik prospeksiyondaki frekans-dalgasayısı dönüşümüne denktir. Bir dalga alanı dönüşümü olan  $p-\tau$  dönüşümü ile bu yöntem, teorik olarak eşdeğer iki yöntemdir. Bu nedenle,  $p-\tau$  dönüşümü uygulamaları ile klasik FOIB yöntemi karşılaştırılarak incelenmiştir.

Bu bölümde, üretilen yapay verilerle, farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları, yüksek modlar ve sinyal/gürültü oranının etkisi incelenmiştir. Bölüm 4.3' de, arazi verisiyle yapılan bir çalışma yer almaktadır. Bölüm 2.3.1' de açıklanan, Avcılar bölgesinde yer alan doğrusal dizilim kullanılarak, klasik FOIB ve  $p-\tau$  dönüşümden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 4.1 $p-\tau$ Dönüşümünün Teorik Esasları

$p-\tau$  dönüşümü, frekans-dalgasayısı dönüşümü gibi sismik prospeksiyonda birçok amaçla kullanılmaktadır. Sismik prospeksiyon çalışmalarında, her iki yöntemde, sismik kesitlerdeki gürültünün, tekrarlı yansımaların bastırılması, sismik izler arasında interpolasyon ve sismik göç analizlerinde kullanılmaktadırlar. Bunun yanında, iki dönüşüm arasında matematiksel olarak da benzerlik kurulabilir. Dalgasayısı  $k$ , doğrudan ışın parametresi  $p$  ile ilişkilendirilebilir.  $u(x,t)$  dalga alanının  $p-\tau$  dönüşümü,

$$\overline{U}(p, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t = \tau + px) dx \quad (4.2)$$

ifadesi ile açıklanabilir. Bu bağıntıyı, iki boyutlu Fourier dönüşümünü kullanarak da elde etmek mümkündür. Başlangıç olarak,  $u(x,t)$  dalga alanının iki boyutlu Fourier dönüşümünü ele alırsak,

$$U(k, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \exp[-i(\omega t - kx)] dx dt \quad (4.3)$$

ve bu bağıntıda  $k = \omega p$  eşitliğini yerine koyarsak

$$U(\omega p, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \exp[-i\omega(t - px)] dx dt \quad (4.4)$$

elde edilir. Daha sonra, denklem (4.1)' den faydalanarak,  $t - px$  yerine  $\tau$  koyarsak,

$$U(\omega p, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, \tau + px) \exp(-i\omega\tau) dx d\tau \quad (4.5)$$

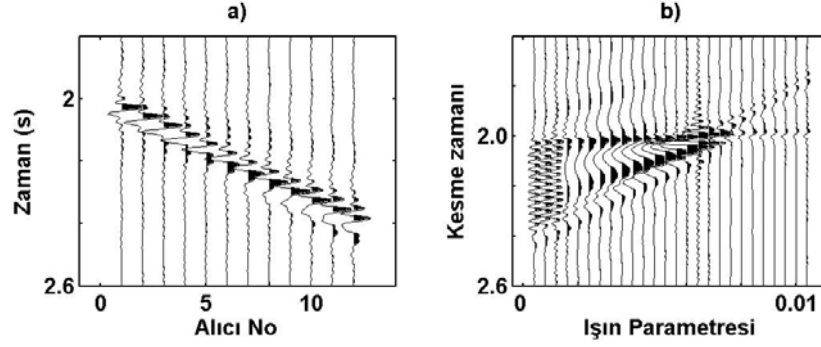
elde edilir ve  $x$  üzerinden yapılan integral işlemi ile,

$$U(\omega p, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{U}(p, \tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (4.6)$$

bağıntısına ulaşılır (Stein ve Wysession, 2002). Böylece,  $p - \tau$  dönüşümünün, frekans-dalgasayısı dönüşümü kullanılarak elde edilebileceği görülmüştür. Ancak,  $p - \tau$  dönüşümü pratikte bu şekilde elde edilmemektedir. Çünkü dönüşüm hesaplanırken,  $U(k, \omega)$  bilgisine  $k$  eksenı boyunca interpolasyon uygulanması gerekecektir ve  $U(k, \omega)$ ' nin kompleks sayılardan oluşması, bu işlemi zorlaştırmaktadır (Buttkus, 2000).

#### 4.1.1 $p - \tau$ dönüşümü ile faz hızı dispersiyon eğrisinin elde edilmesi

$p - \tau$  dönüşümü, sismikte, dinamik düzeltme uygulandıktan sonra uzaklık eksenı üzerinden genlikler toplanarak yapılır. Şekil 4.2b' de,  $x - t$  ortamındaki veriye (Şekil 4.2a),  $p - \tau$  dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen grafik görülmektedir. Uzaklık-zaman ortamında  $t = 2$  s civarında görülen dispersif düzlem dalga, kesme zamanı-ışın parametresi ortamında, aynı şekilde  $\tau = 2$  s civarında, farklı  $p$  değerlerinde görüntülenir.



Şekil 4.2 a)  $x-t$  ortamındaki veri ve b)  $p-\tau$  dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen görüntü.

$p-\tau$  dönüşümünü, denklem (4.6)' dan yola çıkarak ve ters Fourier dönüşümünden yararlanarak,

$$\bar{U}(p, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega p, \omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad (4.7)$$

ifadesi ile de belirtebiliriz. Denklem (4.7), kaynağı karakterize eden bir fonksiyon olan  $N(\omega p, \omega)$  ve dispersiyon ilişkisini tanımlayan  $D(\omega p, \omega)$  fonksiyonu ile,

$$\bar{U}(p, \tau) = \int \frac{N(\omega p, \omega)}{D(\omega p, \omega)} e^{i\omega\tau} d\omega \quad (4.8)$$

şeklinde de ifade edilebilir (McMechan ve Yedlin, 1981).  $\tau$  üzerinden alınan Fourier dönüşümü ile,

$$S(p, \omega) = \frac{N(\omega p, \omega)}{D(\omega p, \omega)} \quad (4.9)$$

bağıntısına ulaşılır. Yüzey dalgaları için düşündüğümüzde,  $p-\tau$  dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen dalga alanı üzerinde, dispersiyon ilişkisini,  $D(\omega p, \omega)$ , sıfır yapan pek çok nokta mevcuttur. Buna bağlı olarak da,  $S(p, \omega)$  ifadesi sonsuza gider. Böylece, ışın parametresine (yavaşlık) bağlı olarak faz hızı,  $S(p, \omega)$  ifadesinin en yüksek değerleri ile ilişkilendirilebilir (McMechan ve Yedlin, 1981).

Mikrotremorlerle yapılan analizlerde de temel olarak, bu yol izlenmektedir. Bu yöntem, temelde, iki tane dönüşüm alınmasını gerektirmektedir. İlki, farklı  $(\tau, p)$  değerleri deneyerek,  $t = \tau + px$  dönüşümü ile belirlenen  $x-t$  ortamındaki

genliklerin toplanmasıdır.  $p$ , yavaşlık değeri,  $[-p_{max}, p_{max}]$  aralığında  $n_p$  adımla incelenir. Yavaşlık değerlerinin bu aralıkta seçilmesinin sebebi, dalga alanının (mikrotremor) yayılım doğrultusunun belirsizliğidir.  $p_{max}$ , en küçük hızın tersidir ve  $n_p$  seçilirken, uzaklığın  $n_x$  adımla örneklendiği düşünülürse,  $n_x$  ile eşit ya da iki katı olacak şekilde ayarlanmalıdır (Louie, 2001). Bunu,  $\tau$  (kesme zamanı) üzerinden alınan Fourier dönüşümü takip eder. Bu, bir boyutlu bir dönüşümdür ve  $p$  yavaşlık eksenini etkilememektedir. Böylece, zaman-uzaklık ortamındaki dalga alanı, dispersiyon bilgisinin açıkça görüntülediği frekans-yavaşlık ortamına aktarılmış olur. Daha sonra, denklem (4.9) ile elde edilmiş olan  $S(p, \omega)$ , kompleks eşleniği ile çarpılarak, güç spektrumu,  $P(p, \omega)$ , elde edilir. Tüm yavaşlık değerleri için ortalama enerjinin büyüklüğü, frekanstan frekansa değişebilir. Bu sorun, basit bir düzeltme işlemi yapılarak giderilir. Bunun için, McMechan ve Yedlin (1981)' in uyguladığı yönteme ek olarak, spektral güç oranı,

$$R(|p|, \omega) = \frac{P(|p|, \omega) n_p}{\sum_p P(|p|, \omega)} \quad (4.10)$$

hesaplanır (Louie, 2001).  $|p|$ , pozitif yavaşlık eksenini göstermektedir. Bu işlem, her bir frekans için, değişen  $p$  değerlerine karşılık elde edilen güç spektrumunun ortalaması alınarak yapılır. Spektal oranın,  $R(\omega, |p|)$ , frekans-yavaşlık ortamındaki görüntüsünden, her bir frekans için enerjinin yoğunlaştığı değerler, faz hızı olarak kabul edilir.

Farklı  $p$  ve  $\tau$  değerleri kullanarak, denklem (4.1) ile belirlenmek istenen genlikler, örnekleğimiz zaman eksenindeki iki nokta arasında düşüyorsa, interpolasyon yaparak bu sorun giderilebilir. Ancak, bu çalışmada, interpolasyon uygulanmamıştır.  $p - \tau$  dönüşümü, iki farklı şekilde uygulanabilir.  $p$  sabit tutulup,  $\tau$  üzerinden yığma işlemi uygulanabilir ya da kesme zamanı,  $\tau$  sabit tutulup,  $p$  üzerinden yığma işlemi uygulanabilir. İki durumda da, elde edilen sonuçlar değişmemektedir.

## 4.2 $p - \tau$ Dönüşümünün Yapay Veriler ile İncelenmesi

$p - \tau$  dönüşümünü kullanarak faz hızının elde edilmesi, üretilen yapay verilerle incelenmiştir. Bu dönüşüm ile, doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB

yönteminden elde edilen sonuçların benzer olması beklenmektedir. Bölüm 3’ de, klasik FOIB yönteminin, sadece iki boyutlu dizilimlerle olan uygulamaları incelenmişti. Bu bölümde, doğrusal dizilimler için uygulanabilen bu iki yöntem birlikte incelenmiştir.

Yapay mikrotremor verileri üretilirken, Şekil 2.1’ de görülen teorik (gerçek) dispersiyon eğrisi kullanılmıştır. Denklem (2.13) ile, örnekleme aralığı 0.01 s olan, 5 dakika uzunluğunda yapay veri üretilmiştir. Verilere rastgele gürültü eklenmemiştir.

$p - \tau$  dönüşümü ile yapılan analizler, bilinen sismik kırılma çalışmalarında olduğu gibi, bir boyutlu dizilim gerektirir. Sismik kırılma uygulamalarında kullanılan aletsel donanım ile çalışılabilir. Louie (2001), bu yaklaşımı, mikrotremor verisine uygulamıştır ve 200 m uzunluğundaki dizilim ile kaydedilen veriden yaklaşık 100 m’ ye kadar güvenilir sonuçlar elde etmiştir.

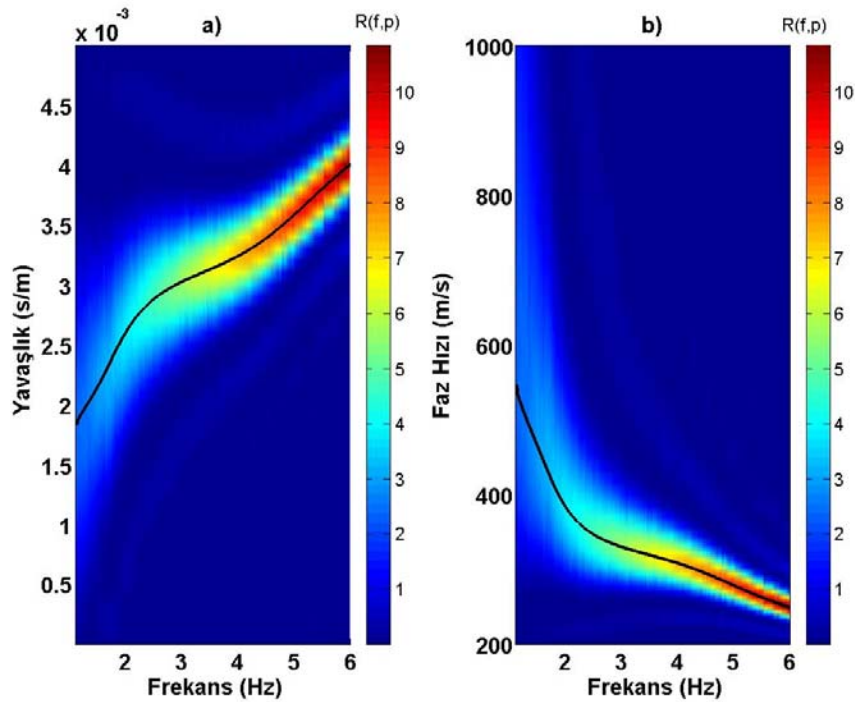
#### 4.2.1 Alıcı sayısının incelenmesi

$p - \tau$  dönüşümü ile yapılan analizlerde, yöntemin gereği olarak, dizilim geometrisi doğrusaldır. Pasif kaynakla çalışırken, dalga alanının yayılım doğrultusunun belirsizliğinden kaynaklanan sorunlardan kaçınmak için, mikrotremor kaynağının konumu dikkate alınmalıdır. İlk olarak, yapay verilerle yapılan analizlerde, dalga alanının yayılım doğrultusunun dizilime paralel olduğu varsayılmıştır.

Alıcı sayısı 24 olan doğrusal bir dizilim için üretilen verilerin, güç spektrumları, 40 s uzunluğunda, yedi blok halinde hesaplanmıştır. En düşük hız, 100 m/s olarak alınmıştır. En düşük hız değerine karar verirken, çalışma alanının özellikleri dikkate alınmalıdır (Louie, 2001). Yavaşlık,  $p$ ,  $dp=0.0001$  adımla incelenmiştir.  $dp$  adımları, daha önce de belirtildiği gibi, yavaşlık ekseninin, uzaklık eksenine eşit ya da daha sık örneklenmesini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Alıcı aralıkları seçilirken dikkat edilmesi gereken, dalga sayısı katlanmasından kaçınmaktır. Bu da, alıcılar arasındaki mesafenin en küçük dalgaboyunun yarısından az olmasına bağlıdır (McMechan ve Ottolini, 1980).

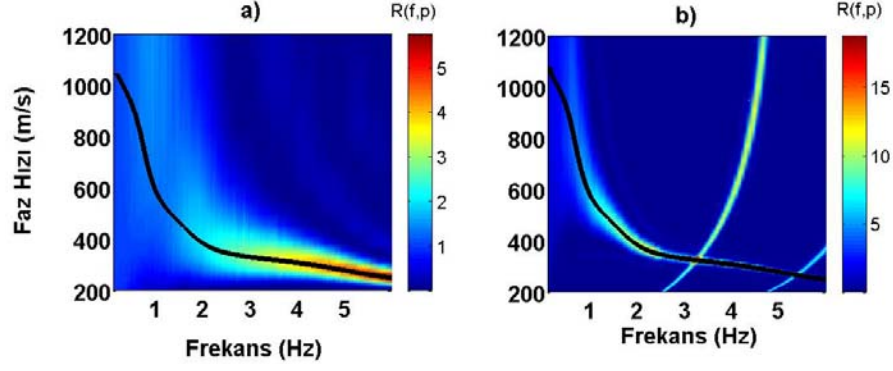
Şekil 4.3’ de, 15 m alıcı mesafesi ile oluşturulmuş dizilimden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Yavaşlık ve  $c = 1/p$  bağıntısını göz önüne alarak hesaplanan faz hızı, spektral güç oranlarından, 1 Hz’ den 6 Hz’ e kadar gözlenebilmektedir. Kaynağın dizilimle aynı doğrultuda yer aldığı varsayıldığı için,  $f - p$  ya da  $f - c$

görüntülerinde, spektral oranların en yüksek değerleri aldığı zarfların merkezi, faz hızını verecektir.



Şekil 4.3 Uzunluğu 360 m olan dizilimin analizinden elde edilen spektral güç oranlarının a) yavaşlık eksenine göre, b) faz hızı eksenine göre gösterimi. Gerçek dispersiyon eğrisi, kalın siyah eğri ile gösterilmiştir.

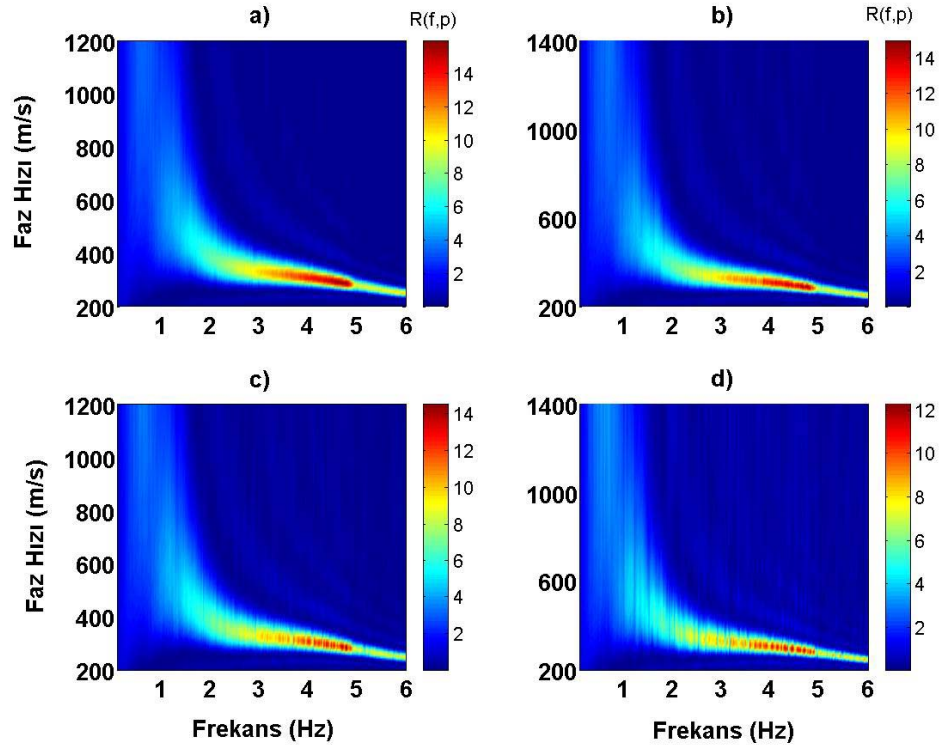
Düşük frekanslardaki çözünürlüğü arttırmak için, dizilimin uzunluğunu arttırmak gerekmektedir. Fakat, dalgasayısı katlanmasının oluşmaması için, dizilim uzunluğu arttırılırken, alıcı sayısı da arttırılmalıdır. Alıcılar arasındaki mesafeyi sabit tutup, sayılarını arttırmak güç spektrumu zarfını daraltıp, dispersiyonun daha da belirgin hale gelmesini sağlar. Şekil 4.4' te, 15 m aralıklarla yerleştirilmiş 12 alıcılı dizilim ile 50 m aralıklarla yerleştirilmiş 24 alıcılı dizilim görülmektedir. 180 m uzunluğundaki dizilim kullanıldığında elde edilen görüntüde (Şekil 4.4a), en düşük 1.5 Hz' e kadar faz hızı bulunmuştur. Dizilimin uzunluğu arttırıldığında, 1 Hz' den daha düşük frekanslarda da faz hızı elde edilmiştir (Şekil 4.4b). Ancak, bu durumda da 4 Hz civarında dalgasayısı katlanması görülmektedir.



Şekil 4.4 Uzunluğu a) 180 m ve b) 1200 m olan dizilimlerin analizi ile elde edilen spektral güç oranları. Gerçek dispersiyon eğrisi, kalın siyah eğri ile gösterilmiştir.

#### 4.2.2 Sinyal/gürültü oranının etkisinin incelenmesi

Üretilen yapay mikrotremor verilerine, farklı oranlarda rastgele gürültü eklenip, elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Uzunluğu 360 m olan doğrusal dizilim için üretilen yapay verilere, sırasıyla % 10, % 20, % 30, % 40 oranlarında rastgele gürültü eklenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Yapay mikrotremor verilerine a) % 10, b) % 20, c) % 30, d) % 40 oranında rastgele gürültü eklendiğinde elde edilen  $f-c$  görüntüleri.

Şekil 4.5’ de görülebileceği gibi spektral güç oranlarının en yüksek değerleri aldığı zarf, dört durumda da takip edilebilmektedir. Ancak, % 10-20’ den daha fazla oranlarda gürültü eklendiği takdirde, saçılmaların arttığı gözlenmiştir.

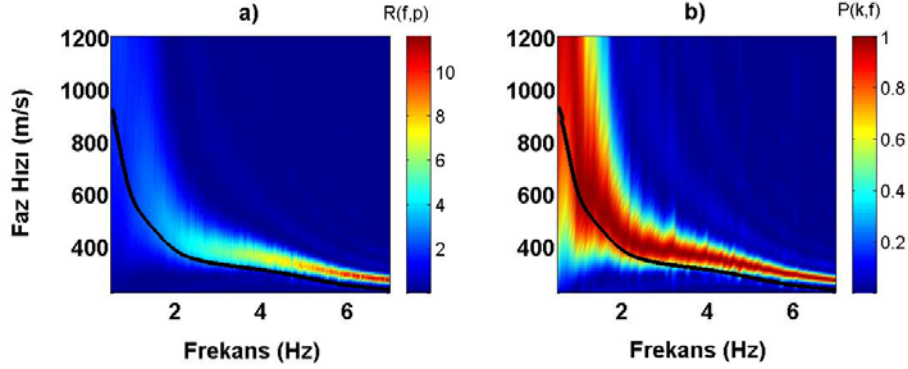
#### 4.2.3 $p - \tau$ dönüşümünde farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının etkisi

$p - \tau$  dönüşümü ile yapılan uygulamalarda, sismik kırılmadaki gibi aktif kaynak kullanılmadığı için, doğrusal dizilim, kaynağın yönü dikkate alınarak yerleştirilmelidir. Bu bölüme kadar yapılan analizlerde, yöntemi inceleyebilmek için, yapay mikrotremorlerin,  $\theta=0^\circ$  doğrultusundan yayındığı varsayılmıştır ki pratikte bu pek geçerli değildir. Mikrotremor dalga alanının farklı doğrultulardan yayındığı düşünülürse, hız-frekans görüntülerinde enerjinin bir bölümü, gerçek hızlardan daha yüksek olan, görünür hızlarda ( $V_g$ ) yoğunlaşacaktır. Bu da, Şekil 4.4’ deki gibi spektral hız oranlarının en yüksek değerlerinin merkezinden yapılan seçimlerin, görünür hız değerleri olacağını gösterir.  $\theta$ , dalga alanının yayının doğrultusu ise, görünür hız,  $V_g = v / \cos(\theta)$  ifadesi ile açıklanabilir. Dalga alanının  $\theta=90^\circ$  doğrultusundan yayınıyor olması durumunda, görünür hız sonsuz olurken,  $\theta=0^\circ$  doğrultusundan yayınıyor olması durumunda, görünür hız ile gerçek hız eşit olur. Dalga alanın, tüm doğrultulardan eşit olarak yayındığı farz edilirse,  $f - p$  görüntülerinde, enerjinin % 40.9’ u, gerçek hızın % 80 ila % 100’ ünü içeren yavaşlık değerlerinde yoğunlaşır. Enerjinin kalan bölümü de, daha düşük yavaşlık değerlerine doğru yayılır (Louie, 2001).

Gerçekte, mikrotremor sinyalinin tek bir doğrultudan yayınması mümkün olmadığından, spektral güç oranlarının merkezi yerine, faz hızı makul bir alt sınırdan seçilir (Louie, 2001). Çünkü,  $\theta=0^\circ$  dan farklı geliş açılara sahip olan dalga alanları için spektral güç oranları, gerçek faz hızından daha yüksek olan, görünür hızlarda en yüksek değerlerini alır. Alt sınırdan seçim yapılarak, farklı doğrultulardan yayınan sinyallerin etkisi mümkün olduğu kadar giderilmiş olur.

Bölüm 2’ de kullanılan, farklı doğrultulardan yayınan 12 düzlem dalga için üretilen yapay verilere, % 10 oranında rastgele gürültü eklenmiştir. Bu durumda,  $p - \tau$  dönüşümü ve klasik FOIB sonucu elde edilen görüntü, Şekil 4.6’ da görülebilir. En yüksek değerlerin yoğunlaştığı spektral oran zarfının alt sınırı seçilirse, gerçek

dispersiyon eğrisi yaklaşık olarak bulunabilir. Matematiksel olarak da birbirine denk olan bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar oldukça benzerdir.  $p - \tau$  dönüşümü ile elde edilen güç spektrumuna normalizasyon işlemi uygulanırsa, iki yöntem sonucunda da elde edilen görüntüler tamamen aynı olacaktır.

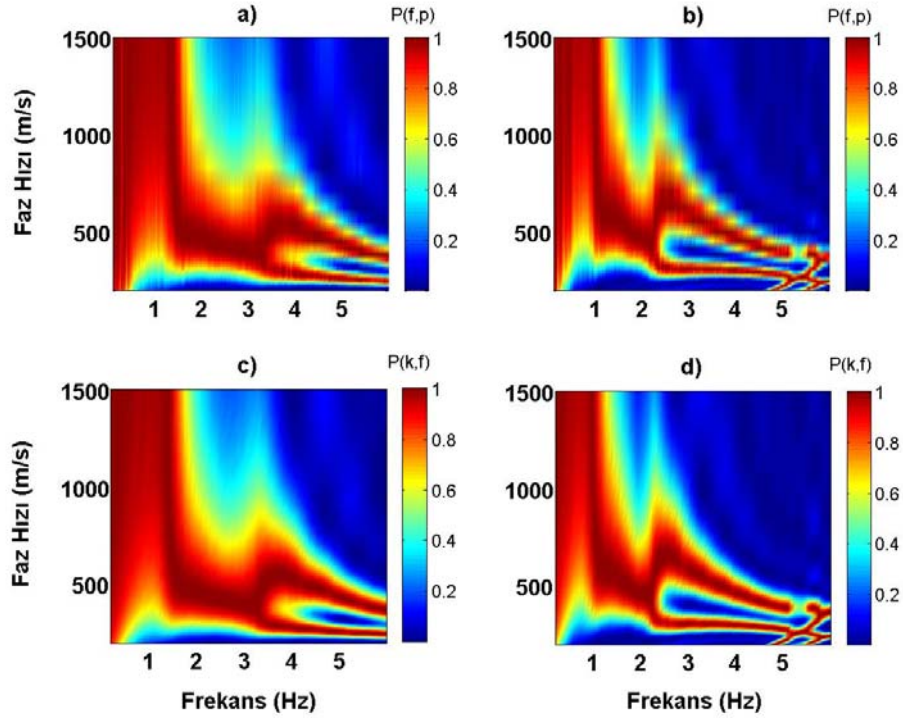


Şekil 4.6 Farklı doğrultulardan yayılan 12 düzlem dalga durumunda a)  $p - \tau$  dönüşümü ile, b) klasik FOIB ile elde edilen görüntü. Gerçek dispersiyon eğrisi, kalın siyah eğri ile gösterilmiştir.

#### 4.2.4. $p - \tau$ dönüşümü ile yüksek modların incelenmesi

Yüksek spektral oranların gözleendiği zarfın alt sınırını seçerek dispersiyon eğrisini oluşturmak, farklı doğrultulardan ( $\theta \neq 0^\circ$ ) yayılan sinyallerin neden olacağı bozucu etkileri en aza indirmektedir. Bunun yanında, sadece temel modu gözlemek istediğimiz zamanda benzer bir yaklaşım uygulayabiliriz (Louie, 2001). Rayleigh dalgalarının yüksek modları, temel modun faz hızından daha yüksek hızlara sahiptir. Bu da, yeterli enerjiye sahiplerse, yüksek modların  $f - p$  ya da  $f - c$  görüntülerinde, ayrı birer dispersiyon eğrisi olarak gözlenebilecekleri anlamına gelir.

Bu bölümde de, Bölüm 3.2.3' de kullanılan, teorik temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri kullanılmıştır. Üretilen yapay verilere, % 10 oranında rastgele gürültü eklenmiştir. Şekil 4.7' de farklı dizilimler kullanarak,  $p - \tau$  dönüşümü ile yüzey dalgalarının yüksek modlarının nasıl görüntülediği incelenmiştir. Alıcı mesafesi 15 m ve 25 m olan, 12 alıcılı dizilimlerin analizinden elde edilen görüntüler, Şekil 4.7a ve 4.7b' de görülmektedir. Şekil 4.7a' da, 180 m' lik dizilimle yapılan analiz sonucunda, 4 Hz' den düşük frekanslarda yüksek modun ayırdedilemediği görülmüştür. Dizilimin boyutlarını arttırmak ve uzaklık ekseninde daha sık örnekleme yapmak, yüksek modun düşük frekanslarda da görüntülenmesini sağlamıştır (Şekil 4.7b). Aynı dizilim geometrileri için klasik FOIB yöntemi ile elde edilen sonuçlar ise, Şekil 4.7c ve 4.7d' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7  $p - \tau$  dönüşümü ile a) 180 m ve b) 300 m uzunluğundaki dizilimler, klasik FOIB yöntemi ile c) 180 m ve d) 300 m uzunluğundaki dizilimler kullanılarak yüksek modların incelenmesi.

Yukarıda görülen şekilde,  $p - \tau$  dönüşümü ile elde edilen güç spektrumları normalize edilmiştir. Bu durumda, elde edilen sonuçların iki yöntem içinde aynı olduğu görülmektedir. Dispersiyon eğrilerinin birbirlerinden ayırddilebilmesi için, dizilimin uzunluğunu arttırmak gerekmektedir ve bu durumda, her iki görüntüde de aynı frekanslarda dalgasayısı katlanması gözlenmektedir.

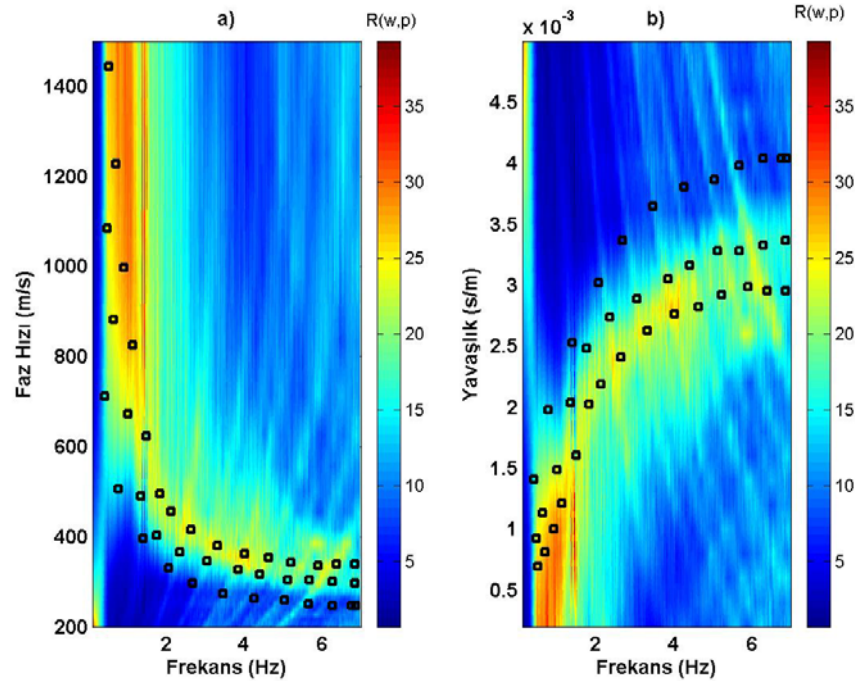
$p - \tau$  dönüşümü ile yapılan analizlerde yüksek modlar, temel modun gözlenmesini engellemeden görüntülenir. Buna bağlı olarak, dairesel dizilime uygulanan klasik FOIB yönteminin aksine, analizlere bozucu etkisi olmadığı söylenebilir. Ancak, düşük frekanslarda, 180 m uzunluğundaki dizilimin analizinden, 1. yüksek modun temel moddan ayırddilemediği görülmektedir. Bu durumda, spektral güç oranının en yüksek değeri aldığı zarfın alt sınırı seçildiğinde, yüksek modun neden olduğu yüksek hızlar göz ardı edilebilir ve temel mod dispersiyon eğrisi elde edilebilir.

### 4.3 $p - \tau$ Dönüşümü ile Yapılan Gerçek Veri Analizleri

Yüksek modlarla yapılan analizler, FOIB yöntemi ile  $p - \tau$  dönüşümünden elde edilen sonuçların arasında fark olmadığını göstermiştir ve bu yöntemlerin matematiksel olarak eşdeğer oldukları da bilinmektedir. Bu noktadan hareketle, Bozdağ (2002) tarafından klasik FOIB ile analiz edilen doğrusal dizilim verilerine, bu dönüşüm uygulanarak, elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü'nde, Ağustos 2001 tarihinde yapılan çalışmada kullanılan doğrusal dizilim (Şekil 2.21) kaydedilen verileri analiz edilmiştir. Kullanılan dizilim ve özellikleri, Bölüm 2.3.1'de açıklanmıştır.

Farklı doğrultulardan yayınan dalga alanlarının varlığı bilinmektedir ve daha büyük olan doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB ile güvenilir bir sonuç elde etmek mümkün olmuştur. Aynı dizilime,  $p - \tau$  dönüşümü uygulandığında elde edilen görüntü, Şekil 4.8'de görülmektedir.

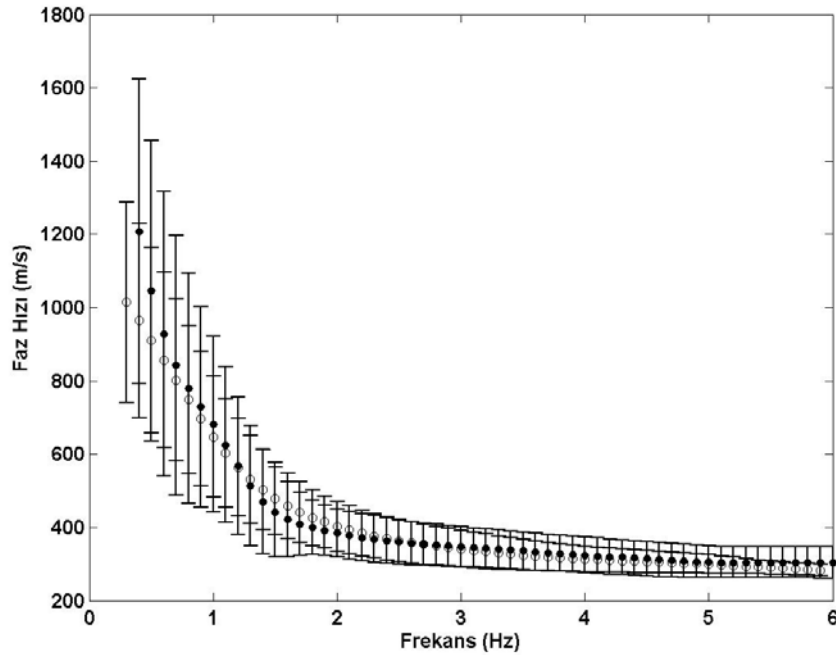


Şekil 4.8 Doğrusal dizilim verilerine uygulanan  $p - \tau$  dönüşümü sonucu a) faz hızına göre ve b) yavaşlığa göre elde edilen görüntüler. Kare semboller, spektral oran zarfının en yüksek, en düşük olduğu sınırlardan ve bu sınırların arasından seçilmiştir.

Toplam bir saat uzunluğundaki, 5 dakikalık 12 veri grubu, 40 s uzunluğundaki bloklar halinde incelenmiştir. En düşük hız, 200 m/s olarak alınmıştır ve yavaşlık ekseninin, uzaklık ekseninin iki katı kadar adımla örneklenmesine dikkat edilmiştir.

Şekil 4.8’ de görülen  $f - c$  ve  $f - p$  görüntüleri, 12 veri grubundan ayrı ayrı hesaplanan güç spektrumlarının üst üste toplanmasından sonra, yapılan düzeltme işlemi ile elde edilen görüntülerdir.

Pasif kaynaklarla çalışıldığından, sinyalin yayılım doğrultusunun belirsizliği nedeniyle oluşabilecek olumsuz etkilerden kaçınmak için, spektral güç oranının en yüksek değerini aldığı zarfın alt sınırı seçilmiştir. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek ve faz hızlarının standart sapmaları belirleyebilmek için, her bir frekansta, en yüksek değerlerin gözlendiği zarfın en alt sınırından, merkezinden ve seçilen bu iki değer arasında olmak üzere, üç faz hızı değeri seçilebilir (Louie, 2001). Bu şekilde elde edilen faz hızları ve standart sapmalar, Şekil 4.9’ da görülmektedir.



Şekil 4.9  $p - \tau$  dönüşümü (içi dolu semboller) ile klasik FOIB yöntemi (içi boş semboller) ile elde edilen faz hızları ve standart sapmalar (Bozdag, 2002).

Şekil 4.9’ da, her iki yöntemden elde edilen sonuçlar üst üste çizdirilmiştir. Klasik FOIB yöntemi ile elde edilen faz hızları ve standart sapmalarla karşılaştırıldığına, benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Yapay verilerle yapılan incelemelerden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak az da olsa, sonuçlarda bir fark gözlenebilir.  $p - \tau$  dönüşümü, eğimi sabit bir doğru boyunca, uzaklık-zaman ortamındaki verinin genlikleri toplanarak yapılır. Daha sonra, bir boyutlu Fourier dönüşümü uygulanır. FOIB yönteminde ise, veriye önce bir boyutlu Fourier dönüşümü uygulanır. Güç spektrumları, alıcı konumlarını ve dalgasayısı bilgilerini içeren yönlendirme

vektörleri ile elde edilir. Uygulamadaki bu farklılık, matematiksel olarak eşdeğer olan iki yöntem arasındaki farkı açıklamaktadır.

#### 4.4. Sonuçlar

Bu bölümde, sismik çalışmalarda oldukça sık kullanılan bir dönüşüm olan,  $p - \tau$  dönüşümü, yapay veriler üretilerek incelenmiştir. Hem yapay verilerle hem de arazi verisi ile yapılan sınamalar sonunda, doğrusal dizilimlere uygulanan klasik FOIB ile  $p - \tau$  dönüşümünden aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Sinyal/gürültü oranı ile ilgili yapılan sınama sonucunda, bu oranın % 20' den fazla olması durumunda saçılmaların arttığı gözlenmiştir.

Mikrotremorlerle çalışırken, dalga alanının, doğrusal bir dizilime farklı doğrultulardan, görünür hızlarda ulaştığı kabul edilir. Spektral oranın en yüksek değerini aldığı zarfın alt sınırı, en düşük görünür hız değerini verecek şekilde seçilir. Böylece, yüksek görünür hızların gerçek faz hızı olarak seçilmesi önlenmiş olur.

Bu dönüşümle, yüzey dalgalarının yüksek modlarını görüntülemek mümkündür. Temel modun gözlenmesini engellemediği için, bu durumda, yüksek modların bozucu etkisi olmadığı söylenebilir. Ancak, dizilimin uzunluğu azaltılırsa, düşük frekanslarda modlar ayırtedilemeyecektir. Bu durumda, eğer yüksek mod bilgisi elde edilmek istenmiyorsa, spektral oranın en yüksek değerini aldığı zarfın alt sınırı seçilir ve temel mod dispersiyon eğrisi elde edilebilir.

Louie (2001)' e göre, pasif kaynaklı yöntemler arasında, veri toplama aşaması anlamında en kolay ve en ekonomik yöntemdir. Çünkü, her zaman bulunması mümkün olan, sismik kırılma aletsel donanımı ile çalışılmaktadır.

## 5. YÜZEY DALGALARININ ÇOK KANALLI ANALİZİ

Bu bölüme kadar incelenen yöntemler, literatürde genellikle mikrotremor gibi pasif kaynaklarla yapılan analizler ile ilgiliydi. Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves), balyoz ya da ağırlık düşürme gibi aktif kaynaklarla yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu yöntem, sığ mühendislik çalışmalarında kullanılan yöntemlerden biri olan yüzey dalgalarının spektral analizine (Spectral Analysis of Surface Waves) alternatif oluşturması için geliştirilmiştir.

Yüzey dalgalarının spektral analizi (YDSA), kaynakla aynı doğrultu üzerinde, biri kaynağa daha yakın, biri diğerinin iki katı kadar uzaklığa yerleştirilen iki alıcı ile yapılmaktadır. Kaynak alıcı mesafesi ve alıcı aralıkları eşit alınmaktadır. Üst tabakanın sinyalin düşük frekanslı kısmı üzerindeki etkisini ve yüksek frekanslardaki soğurulmanın etkisini en aza indirmek için, bu mesafe ( $d$ ),  $\lambda/2 < d < 2\lambda$  aralığında seçilmektedir (Bergstrom, 1999). Burada,  $\lambda$  dalgaboyudur. Her bir frekans için, iki alıcı arasındaki faz farkı hesaplanır. Alıcılar arasındaki uzaklık bilinirken, elde edilen faz farkları kullanılarak dalgaboyu hesaplanabilir ve böylece faz hızı bulunur. Bu yöntem, 1980'li yıllardan beri, mühendislik parametrelerinin hesaplanmasında başarı ile kullanılmaktadır.

Bir çift alıcı ile, ilgilenilen frekans aralığında faz hızını belirlemek, cisim dalgalarının ve gürültünün kayıtlardaki etkisini en aza indirmek için farklı alıcı mesafeleri kullanılmalıdır (Xia ve diğ., 2002). Birden fazla alıcı aralığı kullanmak ve her dizilim için tekrar tekrar atış yapmak, veri toplarken oldukça zaman almaktadır. Bunun yanı sıra, bu yöntemle, yüzey dalgalarının yüksek modlarını temel moddan ayırdetmek mümkün olmamaktadır (Xia ve diğ., 2002). YDSA yönteminde karşılaşılan bu tür sorunları gidermek için, bir defada birden fazla alıcı ile kayıt alma olanağını sağlayan, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (YDÇA) geliştirilmiştir. Böylece, YDSA ile yaklaşık bir saat süren veri toplama aşaması birkaç dakikaya indirilmiştir (Xia ve diğ., 2002).

Bu bölümde, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yöntemi, klasik FOIB ve  $p - \tau$  dönüşümü ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu yöntemler de, aktif kaynaklarla kullanılabilir. İlk olarak, YDÇA yönteminin teorik esasları açıklanmıştır. Bölüm 5.2' de, arazi parametrelerinin nasıl seçilmesi gerektiğine dair bilgiler verilmiştir. Bölüm 5.3' de, üretilen yapay verilerle yüksek modların, sinyal/gürültü oranının etkisi ile ilgili incelemeler yapılmıştır. Bölüm 5.4' de, İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsü' nde toplanan arazi verileri ile yöntemle örnek verilmiştir.

### 5.1 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinin Teorik Esasları

Uzaklık-zaman ortamında kaydedilen sinyallere uygulanan basit bir dalga alanı dönüşümü ile dispersiyon bilgisini elde etmek mümkündür.  $u(x,t)$ , uzaklık-zaman ortamında kaydedilen sinyal ise, zaman üzerinden uygulanan Fourier dönüşümü ile elde edilen  $U(x,\omega)$ ,

$$U(x,\omega) = \int u(x,t)e^{i\omega t} dt \quad (5.1)$$

olarak gösterilebilir. Frekans ortamına aktarılan sinyaller,  $P(x,\omega)$  faz spektrumu ve  $A(x,\omega)$  genlik spektrumu olmak üzere,

$$U(x,\omega) = P(x,\omega)A(x,\omega) \quad (5.2.)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.  $\omega$ , radyan cinsinden frekansı göstermektedir. Dalga alanı, alıcılara belirli bir zaman farkı ile ulaşacaktır ve faz spektrumu, bu varış zamanları ile ilgilidir. Faz spektrumu, dispersiyon özellikleri ile ilgili bilgileri içerirken; genlik spektrumu, soğurulma ve geometrik yayılma ile ilgili bilgileri içerir. Bu bilgiye dayanarak, frekans ortamına aktarılan verinin,

$$U(x,\omega) = e^{-i\phi x} A(x,\omega) \quad (5.3)$$

bağıntısı ile ifade edilebileceği anlaşılır. Burada,  $\phi$ , faz kaymasıdır. Dalgasayısı,  $k = \omega / c(\omega)$  olarak tanımlanırsa, uzaklık üzerinden uygulanan integral işlemi ile,

$$V(\omega,k) = \int e^{ikx} [U(x,\omega) / |U(x,\omega)|] dx = \int e^{-i(\phi-k)x} [A(x,\omega) / |A(x,\omega)|] dx \quad (5.4)$$

elde edilir (Park ve diğ., 2002). Her bir alıcıdaki dalga alanından soğurulmanın ve geometrik yayılmanın etkilerini gidermek amacıyla,  $U(x,\omega) / |U(x,\omega)|$  şeklinde, bir

düzeltilme işlemi uygulanmaktadır. Böylece, her bir alıcıdan elde edilen sinyaller, analizlerde eşit olarak ağırlıklandırılmış olur. Bu işlemle, genliğin etkisinin giderilerek faz bilgisinin baskın olarak elde edilmesi sağlanır.

Her frekansa karşılık, belirli bir aralıkta değişen hızlar kullanılarak elde edilen dalgasayısı, faz kaymasına eşit olduğunda,  $V(\omega, k)$  en büyük değerini alacaktır. En büyük değer gözlemlendiği dalgasayısından da faz hızı bulunabilir.

Denklem (5.4), herhangi bir  $\omega$  frekansına karşılık elde edilen dalgasayısı ile uzaklık üzerinden yapılan bir toplama işlemi olarak düşünülebilir.  $u(x, t)$  dalga alanını, frekans-dalgasayısı ortamında tanımlayan denklem (4.3)' ü hatırlayacak olursak, bu işlem dalga alanına uygulanan iki boyutlu Fourier dönüşümünü çağrıştırmaktadır.

İlk önce,  $u(x, t)$  dalga alanına uygulanan Fourier dönüşümü ile veri frekans ortamına aktarılır. Daha sonra,  $x$  üzerinden alınan integral ile veri, frekans-dalgasayısı ortamına aktarılmış olur. Buradan, bu yöntem ile, klasik FOIB yöntemini aktif kaynakla kullandığımız takdirde elde etmemiz gereken sonucu bulacağımızı düşünebiliriz. Aralarındaki en önemli fark, YDÇA yöntemindeki genlik bilgisinin giderilmesi işlemidir.

## **5.2 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinde Arazi Parametrelerinin Seçilmesi**

Bu bölümde, yüzey dalgalarının çok kanallı analizinde, arazi parametrelerinin (kaynak alıcı uzaklığı, alıcılar arasındaki mesafe, kaynak) nasıl seçilmesi gerektiği hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra ise, esasında aktif kaynaklarla çalışılan bir yöntem olup, son yıllarda pasif kaynaklı (mikrotremor) uygulamalarına rastlanan  $p - \tau$  dönüşümü ile aralarındaki benzerlik ya da fark incelenecektir.

Yüzey dalgaları kullanılırken, cisim dalgaları ile yapılan çalışmalara nazaran, uygun arazi parametrelerini seçmek daha kolaydır. Bunun en önemli nedeni, diğer sismik dalgalar arasında en çok enerjiye yüzey dalgalarının sahip olmasıdır. Bilindiği gibi, yüzey dalgaları kaynaktan belirli bir uzaklığa kadar seyahat ettikten sonra düzlem dalga olarak kabul edilebilirler. Bu uzaklık, dalgaboyuna bağlıdır. Kaynak-alıcı aralığı seçilirken (minimum offset-  $x_m$ ), gözlemlenmek istenen en uzun dalgaboyunun yarısından az olmamasına, dikkat etmek gerekir. İnceleme derinliği ise, dalgaboyuna bağlıdır. Güvenilir sonuçların alınabileceği en büyük derinlik,  $z_{max}$ ,

ise en uzun dalgaboyunun yarısına eşittir. Bu durumda, en küçük kaynak alıcı mesafesi ile olan ilişkisi,

$$x_m \geq z_{\max} \quad (5.6)$$

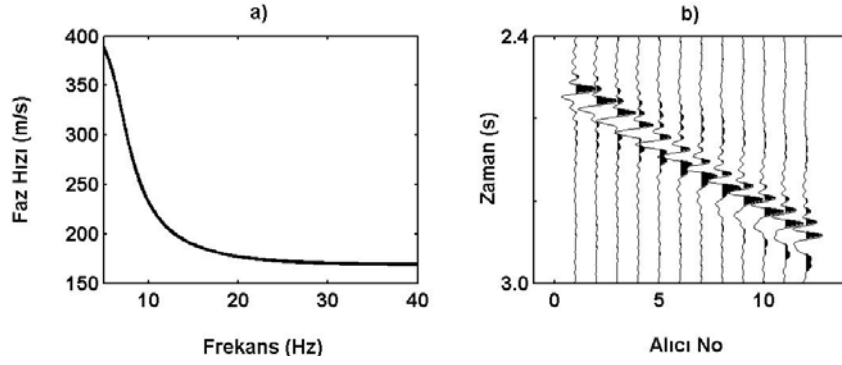
bağıntısı ile gösterilebilir (Park ve diğ., 1999).

Kaynakla en son alıcı arasındaki uzaklığa (maximum offset), dizilimin boyuna, karar vermek daha zordur. Kaynaktan uzaklaştıkça, yüzey dalgalarının yüksek frekanslı bileşenleri daha çabuk soğurulur. Aynı zamanda, cisim dalgalarının soğurulması ise daha yavaş olmaktadır. Böylece, yüzey dalgalarının yüksek modları ve cisim dalgaları, uzaklık arttıkça, yüksek frekanslarda yüzey dalgalarının temel modunun gözlenmesini engeller. Yüksek modların enerjisi, kaynak alıcı mesafesi de dahil olmak üzere, daha pek çok parametreyle ilişkili olan karmaşık bir fonksiyonla açıklanabilir. Yüksek modlar, uzaklık arttıkça temel moda nazaran daha baskın davranır. Aynı zamanda cisim dalgalarının da dahil olduğu bu karmaşık durumda, en büyük kaynak alıcı aralığını, sadece dalgaboyu gibi tek bir parametre ile açıklamak mümkün değildir (Park ve diğ., 1999). Düşük frekansların çözünürlüğü, dizilimin uzunluğuna bağlıdır. Ancak, dizilimin uzunluğu arttırılırken, dalgasayısı katlanmasını önlemek için, seçilen alıcı aralıkları, gözlenmek istenen en küçük dalgaboyunun yarısından az olmamalıdır (Park ve diğ., 1999).

Düşük frekanslarda yüksek modların temel moddan ayırılabilmesi, dizilimin uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu durumda, aktif kaynaklarla çalışırken, kullanılan kaynağın enerjiside önem kazanmaktadır. Düşük frekansların çözünürlüğünü arttırmak, kaynağın enerjisini arttırmayı da gerektirebilir. Kaynağın enerjisini arttırmak, çalışmanın maliyetini de arttıracaktır.

### 5.3 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizinin Yapay Verilerle İncelenmesi

Yapay veriler üretilirken, denklem (2.14) kullanılmıştır. Teorik bir hız yapısından elde edilen dispersiyon eğrisi ve örnek yapay veri, Şekil 5.1’ de görülmektedir. Yapay veriler, 0.001 s örnekleme aralığı ile 5 s uzunluğunda üretilmiştir. İlk olarak, kaynak alıcı mesafesi 5 m olan ve 12 alıcıdan oluşan, 60 m uzunluğunda doğrusal bir dizilim ele alınmıştır. Alıcı aralıkları da, 5 m olarak seçilmiştir.



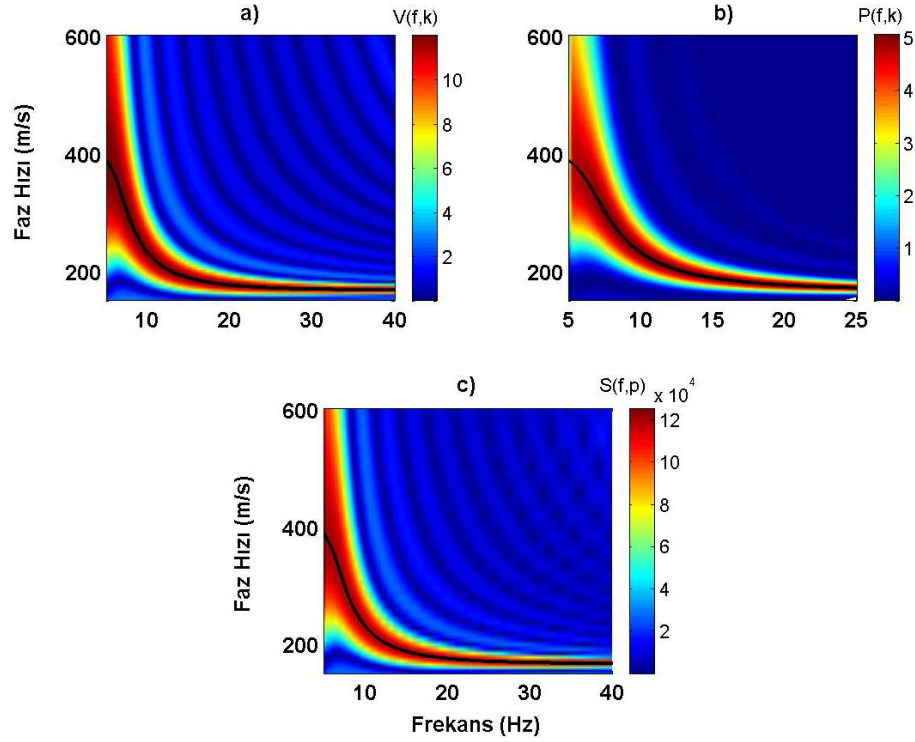
Şekil 5.1 a) Teorik (gerçek) dispersiyon eğrisi ve b) örnek yapay veri.

### 5.3.1 YDÇA, klasik FOIB yöntemi ile $p - \tau$ dönüşümünün birlikte incelenmesi

Bu bölüme kadar incelenmiş olan  $p - \tau$  dönüşümü ve klasik FOIB yöntemi, aktif kaynaklarla da kullanılabilir. Bu üç yöntemde esas olarak, frekans-dalgasayısı dönüşümüne dayanmaktadır.  $p - \tau$  dönüşümünün (slant-stack), iki boyutlu Fourier dönüşümünden elde edilebileceği, Bölüm 4’ de gösterilmişti. YDÇA yönteminin ise, bir anlamda, frekans-dalgasayısı dönüşümü olduğu açıklanmıştır.

Öncelikle, üretilen yapay verilere, rastgele gürültü eklenmemiştir. Aynı veri grubu için, bu üç yöntemden elde edilen sonuçlar, Şekil 5.2’ de görülmektedir. Sonuç olarak beklenen, bu üç ayrı yöntemin analizinden de benzer sonuçların elde edilmesidir. Şekil 5.2’ den de görülebileceği gibi, benzer dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. En önemli fark, klasik FOIB yöntemi ile elde edilen faz hızlarında (Şekil 5.2b) gözlenmektedir. Diğer iki yöntem ile, 5-40 Hz aralığında, dispersiyon eğrisini aynen bulmak mümkün olmuştur. Ancak, klasik FOIB yöntemi ile en düşük 25 Hz’ e kadar faz hızı bulunmuştur. Genellikle dalgasayısı katlanması gözlemlendikten sonra, yüksek frekanslardaki bilgi kaybına, uzaklık üzerinden alınan ikinci Fourier dönüşümü neden olabilir (Louie, 2001).

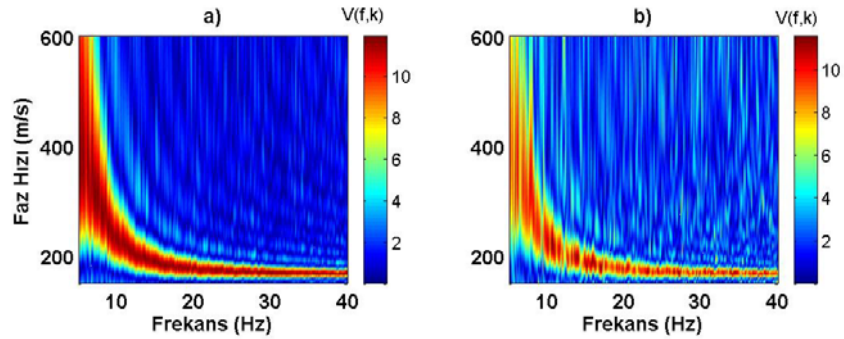
Dizilimin boyutlarını, alıcı mesafesini sabit tutarken daha fazla alıcı kullanarak arttırmak, elde edilen faz hızı dispersiyon eğrisinin daha belirgin hale gelmesini sağlayacaktır. Bu durum, yüksek modlar için yapılan bir analizle daha iyi anlaşılabilir. Ama, öncelikle, sinyal/gürültü oranının etkisi inceleyelim.



Şekil 5.2 Uzunluğu 60 m olan doğrusal dizilime uygulanan a) YDÇA ile, b) klasik FOIB ile ve c)  $p - \tau$  dönüşümü ile elde edilen faz hızları.

### 5.3.2 Sinyal/gürültü oranının etkisinin incelenmesi

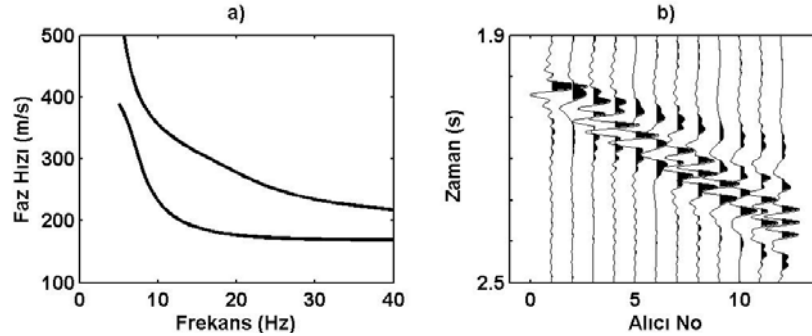
Sinyal/gürültü oranının sonuçlara olan etkisini araştırmak için, yapay verilere % 10 ve % 20 oranlarında rastgele gürültü eklenmiştir. Elde edilen görüntüler, Şekil 5.3’ de gösterilmiştir. Her iki durumda da, dispersiyon takip edilebilmektedir. Yapılan analizlerde, çalışma alanındaki gürültü oranı % 10’ dan fazla olursa elde edilen dispersiyon eğrilerindeki saçılmaların artacağı anlaşılmıştır.



Şekil 5.3 Farklı oranlarda, a) % 10 ve b) % 20, rastgele gürültü eklendiği zaman elde edilen dispersiyon eğrileri.

### 5.3.3 Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi ile yüksek modların incelenmesi

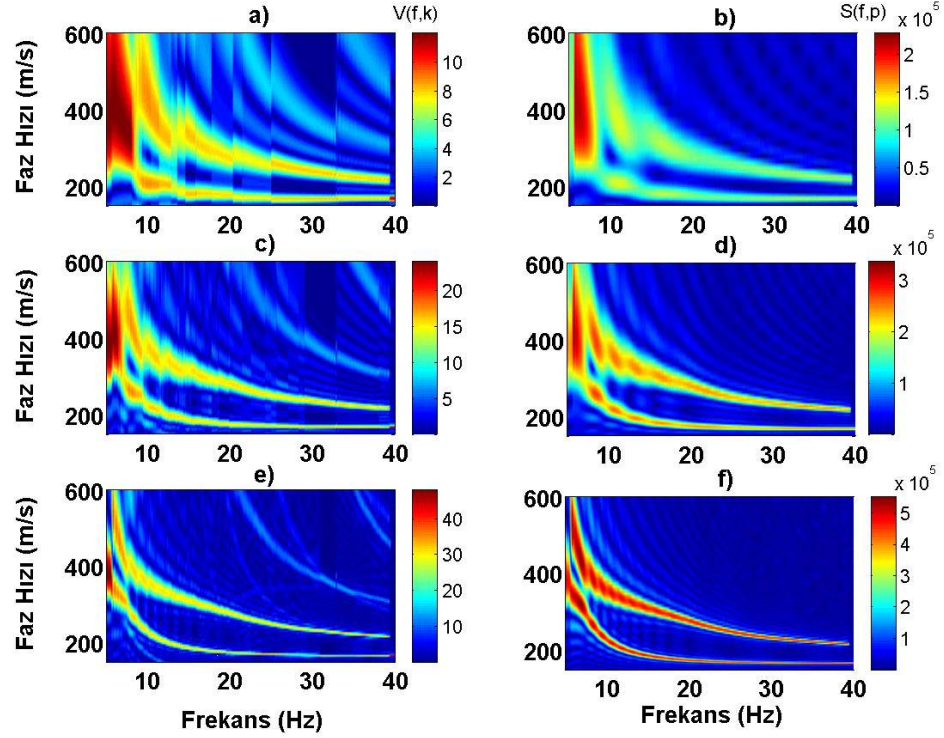
Şekil 5.4’ de aynı hız yapısı kullanılarak elde edilen, temel mod ve 1.yüksek mod dispersiyon eğrileri ve benzer dizilim için üretilen yapay veriler görülmektedir.



Şekil 5.4 a) Gerçek temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri ve b) örnek yapay veri.

Şekil 5.5’ de farklı dizilimler ile elde edilen analiz sonuçları görülmektedir. Kaynak alıcı mesafesi de dahil olmak üzere 60 m, 120 m ve 240 m uzunluğunda doğrusal dizilimler kullanılmıştır. YDÇA ile elde edilen sonuçlar,  $p - \tau$  dönüşümünün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak, elde edilen sonuçlardan anlaşıldığı üzere, dizilimin boyunun arttırılması, temel mod ile 1. yüksek modun ayrımının daha iyi yapılmasını sağlar. Daha önce, YDÇA yönteminde, kaynak ile en uzak alıcının arasındaki uzaklığın (maximum offset), dizilimin boyunun, belirli bir parametre ile tanımlanamadığı belirtilmişti. Bu uygulama sonunda, yaklaşık 100 m uzunluğundaki dizilimlerin YDÇA yöntemi ile çalışırken tercih edilebileceği anlaşılmaktadır.  $p - \tau$  dönüşümü ile de benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Dizilimin boyutları arttırıldığı takdirde, iki yöntemle de, düşük frekanslarda daha iyi sonuçlar alınabilir.

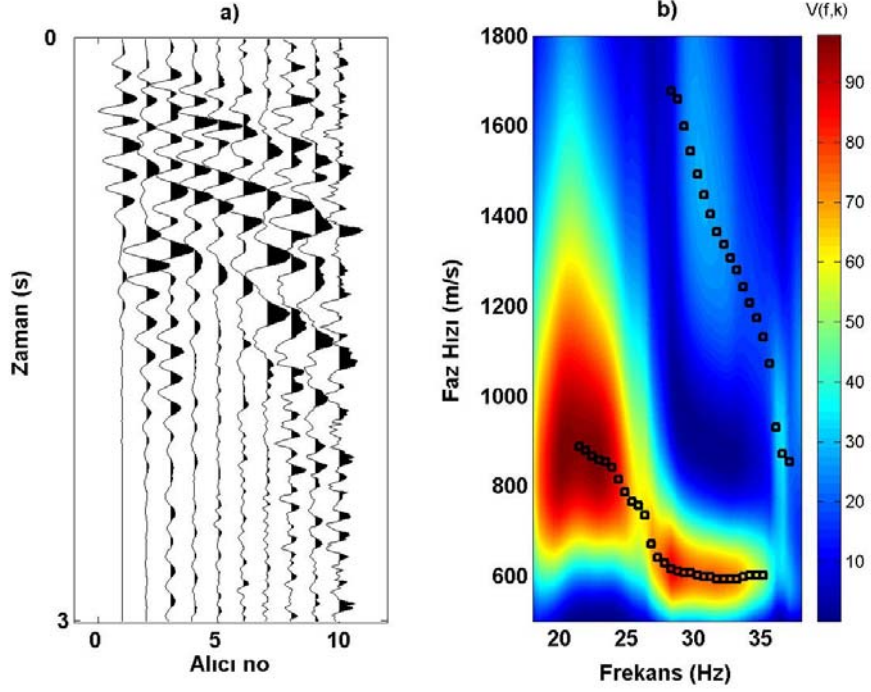
Pasif kaynaklı yöntemler yerine, yüksek modların belirlenmesi için, yapay kaynaklı yöntemler tercih edilmelidir. Yüksek modlar, YDÇA ile yapılan çalışmalarda başarılı bir şekilde görüntülenmektedir. Yapılan sınamalarda, 1. yüksek modun, temel mod dispersiyon eğrisinin gözlenmesini engellemediği görülmüştür. Yaklaşık 100 m uzunluğundaki dizilim ile yüksek modlar belirlenebilmiştir. Oysa, pasif kaynaklar kullanarak yüksek modlar belirlenmek istendiğinde, daha büyük dizilimler kullanmak gerekmektedir.



Şekil 5.5 Farklı uzunluklardaki dizilimlere uygulanan YDÇA (a, c, e) ve  $p - \tau$  dönüşümü (b, d, f) sonuçları. a) ve b) 60 m, c) ve d) 120 m, e) ve f) 240 m uzunluğundaki doğrusal dizilimlerin analizinden elde edilen temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrileri.

#### 5.4 Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi Yöntemi ile Gerçek Veri Analizi

YDÇA yöntemi yapay verilerle inceledikten sonra gerçek arazi verileri ile de sınanmıştır. Veriler, İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsü' nde sismik kırılma ekipmanı kullanılarak toplanmıştır. Beş metre aralıklarla yerleştirilen 10 alıcı ile oluşturulan 50 m uzunluğunda doğrusal dizilim kullanılmıştır. Kaynak olarak balyoz kullanılmıştır ve ilk alıcıya 5 m mesafede yer almaktadır. Örnek olarak, örnekleme aralığı 1 ms olan, 0.3 s uzunluğundaki veri incelenmiştir. YDÇA kullanılarak analiz edilen veri ve elde edilen sonuçlar, Şekil 5.6' da görülebilir. Şekil 5.6b' de görülen siyah kare semboller, 21-35 Hz aralığında elde edilen temel mod ve 1. yüksek mod faz hızlarıdır. Temel mod dispersiyon eğrisinden, en yüksek hız değeri 885 m/s, en düşük hız değeri 604 m/s olarak bulunmuştur.



Şekil 5.6 a) İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsü’ nde yapılan çalışmada toplanan veri ve b) elde edilen dispersiyon eğrisi.

### 5.5 Sonuçlar

Bu çalışmada incelenen tek aktif kaynaklı yöntem, yüzey dalgalarının çok kanallı analizidir. Aktif kaynakların tercih edilmesindeki nedenlerden biri olarak, kaynağın yerinin bilinmesi ile, birden fazla sinyalin oluşturabileceği sorunların ortadan kalkması gösterilebilir. Sinyal/gürültü oranının yüksek olduğu, yerleşim alanlarından uzak bölgelerde, aktif kaynaklı çalışmalar yapılabilir. Bu durumda, YDÇA, tercih edilebilecek, çevreye zarar vermeyen, maliyeti düşük bir yöntemdir (Xia ve diğ., 2002). Bunun yanında, veri toplama ve işleme aşaması daha hızlı ve kolaydır.

YDÇA, verinin frekans-dalgasayısı ortamına aktarılmasını sağlayan bir dalga alanı dönüşümüdür. Bu anlamda, doğrusal dizilimlerle kullanılan klasik FOIB yönteminin aktif kaynaklı uygulaması olarak kabul edilebilir. Aralarındaki en önemli fark, YDÇA yönteminde genlik bilgisinden kurtulmak için uygulanan düzeltme işlemidir. Diğer aktif kaynak kullanılan yöntemlerle karşılaştırıldığında, yöntemlerin uygulanmasındaki farklılıklar dışında, benzer sonuçları elde edilmiştir.

Sinyal/gürültü oranının etkisinin araştırılması için yapılan sına ile, bu oranın % 10' dan fazla olması durumunda, elde edilen dispersiyon eğrilerinde saçılmaların arttığı görülmüştür.

YDÇA yöntemi ile yüzey dalgalarının yüksek modları başarı ile görüntülenmektedir. Bu durum aktif kaynaklı  $p-\tau$  dönüşümü ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Literatürde, YDÇA yönteminin çözünürlüğünün  $p-\tau$  dönüşümüne göre daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Ancak, bu çalışmada, yapay verilerle yapılan sınamalar sonucunda benzer görüntüler elde edilmiştir.

Yüksek modların belirlenmesi için aktif kaynaklı yöntemler kullanılabilir. YDÇA yöntemi ile yapılan sınamalarda, yaklaşık 100 m uzunluğunda bir dizilim, yüksek modun ayırdedilebilmesi için yeterli olmuştur. Benzer bir durumda, pasif kaynaklı yöntemlerde daha büyük dizilimler kullanmak gerekmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, yüzey dalgası analizlerinde kullanılan dört yöntem incelenmiştir: uzamsal özilişki yöntemi, klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi ve  $p - \tau$  dönüşümü. Bu yöntemler, üretilen yapay verilere ve gerçek arazi verilerine uygulanarak sınanmıştır. Alıcı sayısı, farklı doğrultulardan yayılan dalga alanları, sinyal/gürültü oranının etkisi ve yüksek modlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak irdelenip kısaca özetlenmiştir.

Bu çalışmada incelenen pasif kaynaklı yöntemler, iki boyutlu dizilimlerin kullanıldığı klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme (FOIB) ve uzamsal özilişki yöntemleridir. Dizilim geometrisi, dairesel, kare ya da herhangi bir şekilde olabilir. Literatürde, bu iki yöntem, özellikle alıcı sayısı ile ilgili olarak sıklıkla karşılaştırılmaktadır.

Özilişki yönteminde, dizilim, dört alıcı ile (bir alıcısı dairenin merkezinde bulunan eşkenar üçgen dizilim, Şekil 2.13) oluşturulur. Böylece, birden fazla yarıçap kullanarak, ilgilenilen frekans aralığında, faz hızı bulunabilir. Çünkü, alıcı mesafeleri büyük olduğundan, bilgi edinilen frekans aralığı dar olacaktır. Klasik FOIB yönteminde ise, belirlenmek istenen dalgasayısının çözünürlüğü dizilimin yarıçapına ve kullanılan alıcı sayısına bağlıdır. Literatürde, en az on alıcılı dizilim ile güvenilir analizler yapılabileceği belirtilmektedir. Ancak, bu yöntem ile de, tek dalga kaynağı mevcutken, dört alıcı kullanılabilir. Farklı yarıçaplar kullanarak, ilgilenilen frekans aralığında faz hızı elde etmek mümkün olur.

FOIB yönteminde, katlanma oluşmadan gözlenebilecek en büyük dalgasayısı (en küçük dalgaboyu), Nyquist dalgasayısı ile kontrol edilir. En uzun dalgaboyu ise yarıçapın en az iki, en fazla beş katı kadar olarak kabul edilmektedir. Uzamsal özilişki yönteminde de Nyquist dalgasayısı ile en küçük dalgaboyunun belirlenebileceği belirtilmektedir. Özilişki yönteminde, 2-boyutlu Fourier dönüşümü kullanılmadığı dikkate alınır, bu değerin değişebileceği düşünülmektedir. Ancak üçgen dizilim ile çalışırken, alıcı mesafeleri artacağından bu değer dikkate alınmalıdır. Yapay veri ile çalışırken, katlanma oluşmadan gözlenebilecek en büyük

dalgasayısına karşılık gelen en yüksek frekans, teorik dispersiyon eğrisinden belirlenebilir. Bu da, katsayı eğrilerinin ilk ekstremumuna karşılık gelen frekans değeridir. Özetle, katsayı eğrilerinin ilk ekstremumundan sonraki değerler analizlerde kullanılmamalıdır. En uzun dalgaboyu ise yarıçapın en çok 10 katı olarak kabul edilmektedir. Bu durumda, benzer dizilim için, uzamsal özilişki yöntemi ile daha geniş bir frekans aralığının inceleneceği söylenebilir.

Literatürde, bu yöntemlerin karşılaştırıldığı ikinci konu, birden fazla sinyal durumudur. Farklı doğrultulardan yayınan dalga alanları, özilişki yöntemi ile yapılan analizleri olumsuz yönde etkilememektedir. Dört alıcılı dairesel bir dizilim ile analiz yapılabilir. Klasik FOIB ile yapılan analizlerde, özellikle düşük frekanslarda, dizilimin yarıçapı ve alıcı sayısı arttırıldığı takdirde güvenilir sonuçlar elde edilebilir. Örneğin, Şekil 2.25' de görülen 80 m yarıçapındaki dairesel dizilim verilerine uygulanan klasik FOIB ile düşük frekanslarda yanıltıcı faz hızları elde edilmiştir. Aynı dizilime uygulanan özilişki yönteminin sonuçları ile 590 m uzunluğundaki doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB sonuçları ise uyumludur. Kısaca, birden fazla sinyal durumunda, klasik FOIB ile güvenilir sonuçlar elde edilmesi, dizilimin boyutlarına (yarıçap, alıcı sayısı) bağlıdır. Işın biçimlendirmede kullanılan tekniklerinden biri olan MUSIC yönteminde, ilişki matrisinin farklı kullanımıyla klasik FOIB yönteminde karşılaşılan sorunlar giderilmektedir. Bu yöntemin dairesel dizilim verilerine uygulanması ile elde edilen sonuçlar, hem özilişki hem de doğrusal dizilime uygulanan klasik FOIB yönteminden elde edilen sonuçlarla uyumludur. Ayrıca, MUSIC yöntemi ile birden fazla sinyal durumunda güvenilir sonuçlar elde edildiği yapay verilerle de gösterilmiştir.

Klasik FOIB yöntemi ile eşkenar üçgen dizilim kullanılırken, birden fazla sinyal durumunda, düşük frekanslarda gözlenen saçılmalar nedeniyle, oldukça dar bir frekans aralığında faz hızı elde edilebilir. Ancak, MUSIC yöntemi ile, bu saçılmalar giderilebildiğinden, eşkenar üçgen dizilim farklı yarıçaplarla kullanılabilir.

Yüzey dalgalarının yüksek modları, özilişki yöntemi ile gözlenemezken, klasik FOIB yöntemi ile, kullanılan dizilimin boyutlarına bağlı olarak ayırdedilebilirler. Örneğin, 80 m yarıçapındaki dairesel dizilim verilerinin analizinden elde edilen faz hızları, temel mod ve 1. yüksek mod dispersiyon eğrisinin arasındadır. Ancak, dizilimin yarıçapı ve alıcı sayısı arttırıldığında, yüksek mod dispersiyon eğrisinin gözlenmesi mümkün olmuştur (Şekil 3.10). Bu durumda, klasik FOIB yöntemi ile elde edilen sonuçlar yüksek modların varlığı durumunda yanıltıcı olabilir. Benzer şekilde,

yüksek modların, özilişki yönteminde de, elde edilen sonuçlara olumsuz etkileri olabilir .

Doğrusal dizilimlerin kullanıldığı yöntemlerde alıcı sayısına, dizilimin uzunluğuna bağlı olarak karar verilebilir. Dizilim uzunluğu, inceleme derinliği ile ilişkilidir. Alıcı sayısı da, dalgasayısı katlanmasından kaçınmak için seçilen alıcı aralıklarına göre değişir. Bu durumda, en az 10-12 alıcılı doğrusal dizilimlerin kullanılması gerektiği düşünülebilir.

Bir boyutlu dizilimlerin kullanıldığı pasif kaynaklı yöntemlerden  $p - \tau$  dönüşümü, doğrusal dizilimle de kullanılan klasik FOIB yöntemi ile birlikte incelenmiştir. Mikrotremorlerle çalışırken, doğrusal dizilimler muhtemel dalga alanı kaynağı dikkate alınarak yerleştirilmelidir. Aksi takdirde, elde edilen faz hızları, gerçek hızdan daha yüksek olan görünür hızlarda elde edilir. Yanılgılara yol açmamak için, dizilim mikrotremor kaynağına (örneğin, karayolu) paralel doğrultuda yerleştirilmelidir.

Doğrusal dizilimlere uygulanan klasik FOIB yöntemi, sismik prospeksiyonda sıklıkla kullanılan, frekans-dalgasayısı dönüşümüne denktir.  $p - \tau$  dönüşümü de, iki boyutlu Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilebilir. Ancak, uygulamada iki yöntem arasında farklılıklar vardır.  $p - \tau$  dönüşümünde, uzaklık-zaman eğrilerine uygulanan lineer bir dönüşümden sonra, bir boyutlu Fourier dönüşümü uygulanmaktadır.

Klasik FOIB yöntemi ve  $p - \tau$  dönüşümü, yüzey dalgalarının yüksek modlarının görüntülenemediği yöntemlerdir. Ancak, modların ayrımının daha iyi yapılabilmesi için, dizilimlerin uzunluğunu arttırmak gerekir. Bu da, alıcı aralıkları çok fazla ise dalgasayısı katlanmasına yol açar. İki yöntem içinde dalgasayısı katlanması oluşmadan gözlenebilecek en büyük dalgasayısı, Nyquist dalgasayısı ( $k_{\max} = \pi / d_{\min}$ ) ile kontrol edilmektedir. Her iki yöntemle de, yüksek mod, temel modun gözlenmesini engellemeyecek şekilde görüntülenebilir. Ancak, düşük frekanslarda, dizilimin uzunluğuna bağlı olarak yüksek mod ayırdedilemeyebilir. Eğer yüksek modları belirlemek istemiyorsak,  $f - c$  görüntülerinin alt sınırını seçmek, yaklaşık olarak temel mod dispersiyon eğrisinin bulunmasını sağlayacaktır. Farklı doğrultulardan yayılan dalga alanları mevcutken de benzer yaklaşım uygulanabilir. Böylece, gerçek faz hızı yerine görünür hızların elde edilmesi önlenmiş olur.

Bu çalışmada incelenen tek aktif kaynaklı yöntem, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yöntemidir. Ancak, frekans-dalgasayısı ve  $p - \tau$  dönüşümü de aktif kaynakla kullanılabilir. Aktif kaynaklar ile, bir boyutlu, doğrusal dizilimler kullanılmaktadır.

YDÇA yöntemi, mühendislik amaçlı çalışmalarda kullanılan YDSA (yüzey dalgalarının spektral analizi) yönteminde karşılaşılan sorunların giderilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Literatürde, özellikle yüksek modların belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

Yüzey dalgalarının çok kanallı analizinde (YDÇA),  $p - \tau$  ve frekans-dalgasayısı dönüşümü gibi bir dalga alanı dönüşümü uygulanmaktadır. En önemli farkları, bir boyutlu Fourier dönüşümü alınması ve genlik etkisini gidermek için uygulanan düzeltme işlemidir. Aktif kaynakla kullanılan bu üç yöntemden benzer sonuçların elde edilmesi beklenmektedir. YDÇA yönteminin, yüksek modları görüntülemeadaki başarısı, aktif kaynaklı  $p - \tau$  dönüşümü ile birlikte incelenmiştir. Literatürde, YDÇA yönteminin çözünürlüğünün,  $p - \tau$  dönüşümüne göre, daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Ancak, yapay veri ile yapılan sınamalarda bu durum gözlenmemiştir.

## 6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Tablo 2' de kısaca özetlenmiştir. Yapay ve gerçek verilerle yapılan sınamalar sonucunda, özilişki ve FOIB yönteminin birlikte kullanılabileceği düşünülmüştür. Dalga alanı tek bir doğrultudan yayınıyor ise, özilişki yönteminde başarı ile kullanılan, eşkenar üçgen dizilim, klasik FOIB yöntemi ile de kullanılabilir.

Klasik FOIB yönteminde, birden fazla dalga alanı durumunda, yeterince büyük dizilimler kullanılmadığı takdirde düşük frekanslarda gözlenen saçılmalar nedeniyle, güvenilir sonuçların elde edilebileceği frekans aralığı oldukça dardır. Bu durumda, çözünürlüğü daha yüksek olan MUSIC yöntemini uygulamak çözüm olabilir. Kısaca, iki yöntem birarada kullanılabilir. Ancak, üçgen dizilimler ile analiz yaparken dikkatli olunmalıdır. Birden fazla sinyal, klasik FOIB yöntemi kullanıldığında sonuçları olumsuz etkilese bile, MUSIC veya özilişki yönteminde sorun oluşturmaz.

Gerçek veri ile yapılan uygulamalar sonucunda, özilişki yöntemi ile gözlenebilen en uzun dalgaboyunun en büyük alıcı aralığının en fazla 7 katı olduğu, klasik FOIB

yöntemi ile gözlenebilen en uzun dalgaboyunun ise, yarıçapın 3 ila 5 katı arasında olabileceği görülmüştür.

Yapay veri ile yapılan sınamalarla, sinyal/gürültü oranının sonuçlara olan etkisi incelenmiştir. Aktif ya da pasif kaynaklı tüm yöntemler için, bu oran %10-15' den fazla olduğunda gerçek eğriden sapmaların arttığı gözlenmiştir. Ancak,  $p - \tau$  dönüşümünde, bu oranın % 20' ye kadar artabileceği görülmüştür.

YDÇA ile birlikte,  $p - \tau$  ve frekans-dalgasayısı dönüşümlerinin aktif kaynaklı uygulamaları incelenmiş, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Her üç yöntemle de yüksek mod ayrımı gözlenebilmektedir. Pasif kaynaklı, iki ya da bir boyutlu dizilimlerin kullanılabildiği FOIB yöntemi ve  $p - \tau$  dönüşümü ile de yüksek mod belirlenebilir. Ancak, her iki yöntemle de modların ayıredilebilmesi, yeterince büyük dizilimlerin kullanılmasına bağlıdır. Uzamsal özilişki yönteminde ise yüksek modları belirlemek mümkün değildir.

Yüksek modların belirlenmesi, hız yapısı elde ederken yapılan ters çözüm işlemlerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Xia ve diğ., 2002). Eğer yüksek modlar belirlenmek isteniyorsa, aktif kaynaklı bir yöntem tercih edilmelidir. Sığ mühendislik çalışmalarında sıklıkla kullanılan YDÇA, bu durumda tercih edilebilecek, düşük maliyetli bir yöntemdir.

Pasif kaynaklı yöntemlerin hem veri toplama hem de veri-işlem aşaması, aktif kaynaklı yöntemlere nazaran daha zahmetli ve uzun sürelidir. Ayrıca, her farklı veri grubu için uygulamada değişiklik yapılan yöntemler vardır. Örnek olarak, özilişki yöntemi verilebilir. Ancak, aktif kaynaklı yöntemlerde, sonuç daha kısa sürede kolayca elde edilebilir.

Tablo 2. Sonuçlar

|                                                      | Kaynak        | Dizilim geometrisi | Alıcı sayısı                                      |              | Birden fazla sinyal durumu                                        |                                     |                       | Yüksek mod                            |                                                                       | S/N oranının alabileceği en büyük değer | Veri-işlem aşaması                                        |
|------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <i>Uzamsal özilişki yöntemi:</i>                     | pasif         | iki boyutlu        | en az 4                                           |              | sorun oluşturmaz                                                  |                                     |                       | belirlenemez                          |                                                                       | % 10-15                                 | her veri grubuna farklı uygulama (kullanıcı kontrolü çok) |
| <i>Frekans ortamı ıñın biçimlendirme yöntemleri:</i> | pasif / aktif | bir / iki boyutlu  | <i>FOIB</i>                                       | <i>MUSIC</i> | <i>FOIB</i>                                                       |                                     | <i>MUSIC</i>          | 1-B                                   | 2-B                                                                   | % 10-15                                 | kullanıcı kontrolü çok                                    |
|                                                      |               |                    | birden fazla sinyal: en az 10 tek sinyal: en az 4 | en az 4      | 2-B:                                                              | dizilimin boyutlarına bağılı olarak | en az 4 alıcı yeterli | temel modun gözlenmesini engellemeden | yeterince büyük dizilim ile (temel modun gözlenmesini engelleyebilir) |                                         |                                                           |
|                                                      |               |                    | 1-B:                                              |              | alt sınır seçerek                                                 |                                     |                       |                                       |                                                                       |                                         |                                                           |
| <i>p-τ dönüşümü:</i>                                 | pasif / aktif | bir boyutlu        | en az 10-12                                       |              | her doğrultudan eşit yayınıyor olması durumunda alt sınır seçerek |                                     |                       | temel modun gözlenmesini engellemeden |                                                                       | % 20                                    | daha az kontrollü                                         |
| <i>YDÇA yöntemi:</i>                                 | aktif         | bir boyutlu        | en az 10-12                                       |              | ————                                                              |                                     |                       | belirlenebilir                        |                                                                       | % 10-15                                 | pasif kaynaklı yöntemlere göre çok daha kolay             |

## KAYNAKLAR

**Aki, K.**, 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, **35**, 415-457.

**Aki, K.**, 1965. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, **30**, 665-666.

**Aki, K. and Richards, P.G.**, 2002. Quantitative Seismology, *University Science Books*, Sansalito, CA.

**Bergstrom, J.**, 1999. Non-destructive testing of ground strength using the SASW-method, *The Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Enviromental Problems (SAGEEP), Conference Proceedings*, March 14-18, Oakland, CA, 57-65.

**Bozdağ, E.**, 2002. Yeşilyurt ve Avcılar' da deprem yer tepkisinin çok kanallı mikrotremor kayıtlarının analizi ile belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Buttkus, B.**, 2000. Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics, *Springer-Verlag*, Heidelberg.

**Chouet, B., De Luca, G., Milana, G., Dawson, P., Martini, M. and Scarpa, R.**, 1998. Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 653-666.

**Ferrazzini, V. and Aki, K.**, 1991. Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas piston events observed by a near source array, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6199-6209.

**Goldstein, P. and Archuleta, R.J.**, 1991. Deterministic frequency-wavenumber methods and direct measurements of rupture propogation during earthquakes using a dense array: Theory and methods, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6173-6185.

**Henstridge, J.D.**, 1979. A signal processing method for circular arrays, *Geophysics*, **44**, 179-184.

**Hough, S.E., Seeber, L., Rovelli, A., Malagnini, L., De Cesare, A., Selveggi, G. and Lerner-Lam, A.**, 1992. Ambient noise and weak motion excitation of sediment resonances: results from the Tiber Valley, Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1186-1205.

**Johnson, D.H. and Dudgeon, D.E.,** 1993. Array Signal Processing, *PTR Prentice Hall Inc.*, New Jersey.

**Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Özel, O., Erdik, M., Sasatini, T., Higashi, S., Takahashi, M. and Yoshida, K.,** 2002. Site-specific issues for ground motions during the Kocaeli, Turkey Earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 448-465.

**Lermo, J. and Chàvez-García, F.J.,** 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1350-1364.

**Liu, H.P., Moore, D.M., Joyner, W.B., Oppenheimer, D.H., Warrick, R.E., Zhang, W., Hamilton, J.C. and Brown, L.T.,** 2000. Comparison of phase velocities from array measurements of Rayleigh waves associated with microtremors and results calculated from borehole shear-wave velocity profiles, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 666-678.

**Louie, J.N.,** 2001. Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 347-364.

**Miller R.D., Xia J., Park C.B., Ivanov J.M.,** 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock, *The Leading Edge*, Dec 1999, 1392-1396.

**Malagnini, L., Rovelli, A., Hough, S.E. and Seeber, L.,** 1993. Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1744-1755.

**McMechan, G.A. and Ottolini, R.,** 1980. Direct observation of a  $p$ - $\tau$  curve in a slant stacked wave field, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 775-789.

**McMechan, G.A. and Yedlin, M.J.,** 1981. Analysis of dispersive waves by wavefield transformation, *Geophysics*, **46**, 869-874.

**Métaxian, J. and Lesage, P.,** 1997. Permanent tremor of Masaya Volcano, Nicaragua: Wavefield analysis and source location, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 22529-22545.

**Ohori, M., Nobata, A. and Wakamatsu, K.,** 2002. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **6**, 2323-2332.

**Satoh, T., Kawase, H. and Matsushima, S.,** 2001. Estimation of S-wave velocity structures in and around the Sendai Basin, Japan, using array records of microtremors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 206-218.

**Saccorotti, G., Almendros, J., Carmona, E., Ibanez, J. M. and Del Pezzo, E.,** 2001a. Slowness anomalies from two dense seismic arrays at Deception Island Volcano, Antarctica, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 561-571.

**Saccorotti, G., Maresca, R. And Del Pezzo, E.,** 2001b. Array analyses of seismic noise at Mt. Vesuvius Volcano, Italy, *J. of Volcanology and Geothermal Research*, **110**, 79-100.

**Saccorotti, G., Chouet, B. and Dawson, P.,** 2003. Shallow velocity models at the Kilauea Volcano, Hawaii, determined from array analyses of tremor wavefields, *Geophys. J. Int.*, **152**, 633-648.

**Stein, S. and Wysession, M.,** 2002. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure, *Blackwell Science*, Madlen, CA.

**Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., Harris, J.B. and Ivanov, J.B.,** 2002. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, **22**, 181-190.

**Watson, G.N.,** 1966. A Treatise on the Theory of Bessel Functions, *Cambridge Univ. Press*, New York.

**Yilmaz, Ö.,** 1987. Seismic Data Processing, *Society of Exploration Geophysicist*, Tulsa.

**Zywicki, D.J.,** 1999. Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

**Zywicki, D.J. and Rix, G.J.,** 1999. Frequency-wavenumber analysis of passive surface waves, *The Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Enviromental Problems, Conference Proceedings*, March 14-18, Oakland, CA, 75-84.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Diğdem Acarel, 1977 yılında İstanbul’ da doğdu. İlk öğrenimini, 1983-1988 yılları arasında, 50. Yıl Cumhuriyet İlkokulu’ nda tamamlamıştır. Orta ve lise öğrenimini, 1988-1995 yılları arasında, İSTEK Vakfı Özel Belde Lisesi’ nde tamamladıktan sonra, 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Jeofizik Mühendisliği Bölümü’ nde lisans öğrenimine başladı. 2000 yılında mezun olup başladığı yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.