

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAÇILMIŞ YÜZEY DALGALARININ ÇAPRAZ İLİŞKİ ZAMANLARINDAN  
SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aybars Yiğit GARAN**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**OCAK 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAÇILMIŞ YÜZEY DALGALARININ ÇAPRAZ İLİŞKİ ZAMANLARINDAN  
SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aybars Yiğit GARAN  
(505121403)**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR ŞİŞMAN**

**OCAK 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505121403 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Aybars Yiğit GARAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SAÇILMIŞ YÜZEY DALGALARININ ÇAPRAZ İLİŞKİ ZAMANLARINDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR ŞİŞMAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR ŞİŞMAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Argun KOCAOĞLU**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Serdar ÖZALAYBEY**      .....  
TÜBİTAK - MAM

**Teslim Tarihi :**      **15 Aralık 2014**  
**Savunma Tarihi :**      **16 Ocak 2015**



## ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince emeği geçen tez danışmanım Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR'a, çalışma boyunca yardımlarından dolayı Utku HARMANKAYA'ya, Jeofizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve öğrencilerine, ve beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Aralık 2014

Aybars Yiğit Garan  
(Jeofizik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ŞEKİL LİSTESİ .....	xiii
ÖZET .....	xvii
SUMMARY .....	xix
1. GİRİŞ .....	1
2. SİSMİK İNTERFEROMETRİ .....	5
3. YÖNTEM .....	11
4. İNTEGRAL YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMİŞ YAPAY SİSMOGRAMLARDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ .....	17
4.1 Üç Boyutlu Model .....	17
4.2 Saçıcı Konumunun Kestirilmesi .....	19
5. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMİŞ YAPAY SİSMOGRAMLARDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ .....	27
5.1 Üç Boyutlu Model .....	27
5.2 Saçıcı Konumunun Kestirilmesi .....	29
6. 2 BOYUTLU GERÇEK VERİ UYGULAMASI .....	37
6.1 Ortam Bilgileri ve Saçılmış Dalga Alanının Eldesi .....	37
6.2 Saçıcı Konumunun Kestirilmesi .....	38
7. SONUÇLAR .....	45
KAYNAKLAR .....	49
ÖZGEÇMİŞ .....	55



## **KISALTMALAR**

<b>IL</b>	: Initial Location
<b>R</b>	: Receiver
<b>S</b>	: Source
<b>SVD</b>	: Singular Value Decomposition
<b>VS</b>	: Virtual Source



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1</b> : Saçılmış dalga alanının hesaplanmasında kullanılan ortam parametreleri.....	17
<b>Çizelge 4.2</b> : Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parameter ortalamaları, model ve veri hata oranları.....	26
<b>Çizelge 5.1</b> : Saçılmış dalga alanının hesaplanmasında kullanılan ortam parametreleri.....	27
<b>Çizelge 5.2</b> : Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parameter ortalamaları, model ve veri hata oranları.....	35
<b>Çizelge 6.1</b> : Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parameter ortalamaları, model ve veri hata oranları.....	43



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 2.1 :** İnterferometri işlemi. Bir kaynaktan (S) yayılan ve bir alıcı çifti tarafından kayıt edilen (A ve B) sismik dalgalara çapraz ilişki işlemi uygulandığında, A konumundaki alıcının konumunda bir kaynak bulunduğu ve B konumundaki alıcıdan kayıt edildiği durumda elde edilecek olan sinyal elde edilir (Schuster 2009). ..... 5
- Şekil 2.2 :** (a)Doğrudan ve saçılmış varışlar için ışın yollarının şematik gösterimi, (b) 1. alıcı konumundaki bir sanal kaynak için elde edilen saçılmış dalgaların ışın yollarının şematik gösterimi (Harmankaya ve diğ.,2013). ..... 8
- Şekil 2.3 :** (a) Saçılmış dalga alanı, (b) R1-R3 ve R14-R16 alıcıları için saçılma varışları, (c) b'deki izlerin R1'deki bir sanal kaynak için çapraz ilişki sonuçları, (d) a'daki izlerin R1'deki bir sanal kaynak için çapraz ilişkisinden elde edilen interferometrik kayıt (Harmankaya ve diğ., 2013). Psc saçılmış P dalgasını ve Rsc saçılmış yüzey dalgasını ifade etmektedir. .... 9
- Şekil 4.1 :** (a) Kaynak-alıcı düzeni ve saçıcının şematik gösterimi. Saçıcı  $x=14.5m, y=4.5m, z=2m$  konumlarında bulunmaktadır. .... 18
- Şekil 4.2 :** Şekil 4.1 de verilen geometri için üretilmiş saçılmış Rayleigh dalga alanı. (a) x ve (b) y yönündeki alıcı hatları ile üretilen sismogram. Psc saçılan P dalgalarını, Rsc ise saçılan yüzey dalgalarını ifade etmektedir. .... 18
- Şekil 4.3 :** (a) X yönündeki alıcı hattı boyunca üretilmiş yapay sismogram. (b), (c) ve (d); 1. [5m] , 10. [14m] ve 21. [25m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış Rayleigh dalga alanları. .... 19
- Şekil 4.4 :** (a)Y yönündeki alıcı hattı boyunca üretilmiş yapay sismogram. (b), (c) ve (d); 1. [1m] , 4. [4m] ve 21. [21m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış dalga alanları. .... 20
- Şekil 4.5 :** x ekseninde 10. (Lx\_VS10) ve y ekseninde 4. (Ly\_VS4) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. .... 21
- Şekil 4.6 :** x ekseninde 21. (Lx\_VS21) ve y ekseninde 1. (Ly\_VS1) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. .... 22

<b>Şekil 4.7 :</b>	x ekseninde 1. (Lx_VS1) ve y ekseninde 21. (Ly_VS21) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. ....	22
<b>Şekil 4.8 :</b>	x ekseninde 21. (Lx_VS21) ve y ekseninde 21. (Ly_VS21) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. ....	23
<b>Şekil 4.9 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	24
<b>Şekil 4.10 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının y konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının y konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	24
<b>Şekil 4.11 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	24
<b>Şekil 5.1 :</b>	Kaynak-alıcı düzeni ve saçıcının şematik gösterimi. a) x-y doğrultularında, b)x doğrultusunda ve c)y doğrultusundaki görünüm. Saıcı x=12.5m, y=11.5m, z=3.5m konumlarında bulunmaktadır ve 3m x 3m x 3m boyutlarındadır. Kaynak x=0m, y=0m konumlarında bulunmaktadır. ....	28
<b>Şekil 5.2 :</b>	Şekil 5.1 de verilen geometri için üretilmiş toplam dalga alanı. (a) x ve (b) y yönündeki alıcı hatlarında gözlenensismik izler. P cisim dalgaları için doğrudan varışları, R yüzey dalgaları için doğrudan varışları, Rsc ise saçılan yüzey dalgalarını ifade etmektedir. İşaretli alan ise veriden izole edilen saçılmış yüzey dalgası alanını ifade etmektedir. ....	28
<b>Şekil 5.3 :</b>	(a) X yönündeki alıcı hattında mute işlemi ile toplam dalga alanından ayrılan saçılmış yüzey dalgası (b), (c) ve (d); 8. [12m] , 10. [14m] ve 13. [17m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış dalga alanları. ....	30
<b>Şekil 5.4 :</b>	(a) Y yönündeki alıcı hattı boyunca mute işlemi ile toplam dalga alanından ayrılan saçılmış yüzey dalgası (b), (c) ve (d); 2. [2m] , 6. [6m] ve 11. [11m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış dalga alanları. ....	30
<b>Şekil 5.5 :</b>	x ekseninde 8. (Lx_VS8) ve y ekseninde 6. (Ly_VS6) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. ....	31
<b>Şekil 5.6 :</b>	x ekseninde 10. (Lx_VS10) ve y ekseninde 11. (Ly_VS11) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme	

	adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. ....	32
<b>Şekil 5.7 :</b>	x ekseninde 13. (Lx_VS13) ve y ekseninde 2. (Ly_VS2) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir. ....	32
<b>Şekil 5.8 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	33
<b>Şekil 5.9 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının y konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının y konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	33
<b>Şekil 5.10 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	33
<b>Şekil 6.1 :</b>	Kaynak-alıcı düzeni ve saçıcının şematik gösterimi. Kaynak (yıldız) 0 konumunda, alıcılar (üçgenler) 5m ile 28m arasında ve saçıcı (dikdörtgen) $x=20.75$ m, $z=4$ m konumlarında bulunmaktadır. Sanal kaynak olarak 12., 16. ve 22. alıcılar seçilmiştir. ....	37
<b>Şekil 6.2 :</b>	Kullanılan atış kayıtları a) Toplam dalga alanı olarak kabul edilen 19. atış. b) Doğrudan dalga alanı olarak kabul edilen 10. atış. c) 2a ve 2b nin farkından elde edilen saçılmış dalga alanı. P cisim dalgaları için doğrudan varışları, R yüzey dalgaları için doğrudan varışları, Rsc ise saçılan yüzey dalgalarını ifade etmektedir. İşaretli alan ise veriden izole edilen saçılmış yüzey dalgası alanını ifade etmektedir. ....	38
<b>Şekil 6.3 :</b>	a) Sismogramdan ayrılarak elde edilen saçılmış dalga alanı ve seçilen b) VS12 [16m] c) VS16 [20m] d) VS22 [26m] sanal kaynakları için çapraz ilişki sonucu elde edilen çapraz ilişki zamanları. ....	39
<b>Şekil 6.4 :</b>	Gözlemlenen (nokta) ve hesaplanan (çizgi) varış zamanları. Hesaplamalar, 12, 16 ve 22. sanal kaynaklar için yapılmıştır. ....	39
<b>Şekil 6.5 :</b>	a)x ve b)z için kestirilen parametre değerleri. 0. iterasyon, başlangıç değerini ifade etmektedir. ....	40
<b>Şekil 6.6 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	41
<b>Şekil 6.7 :</b>	Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir. ....	41



## SAÇILMIŞ YÜZEY DALGALARININ ÇAPRAZ İLİŞKİ ZAMANLARINDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ

### ÖZET

Yüzeye yakın yapıların araştırılması ve tespit edilmesi, jeolojik ve çevresel tehlikelerin etkilerini azaltmak için gereklidir. Oyuklar, mağaralar, obruklar, maden kuyuları, gömülü cisimler, arkeolojik kalıntılar, su hazneleri ve benzeri gibi bu yüzeye yakın yapılar saçıcılar olarak adlandırılırlar ve geniş alanlara yayılan inşaatlar sırasında ve sonrasında risk oluştururlar. Ayrıca, bu saçıcılar su rejimi, depremler ve zemin yükü gibi değişimlerden etkilenebilirler ve daha fazla tehlikeye sebep olabilirler. Bu yüzden, bu türdeki zayıf bölgelerin tespit edilmesi, izlenmesi ve sağlamlaştırılması çevresel ve jeolojik tehlikelerin önlenmesi açısından gereklidir.

Bu çalışmada, sismik interferometri yönteminden esinlenerek geliştirilmiş bir yöntem olan çapraz ilişki zamanlarından saçıcı konumu kestirimi yöntemi kullanılarak yüzeye yakın saçıcıların konumlarının kestirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla saçılmış yüzey dalgaları kullanılmıştır. Yöntemin uygulanabilmesi için saçılmış dalga alanı veriden ayrılmış ve seçilen sanal kaynaklar için çapraz ilişki zamanları elde edilmiştir. Bu şekilde elde edilen çapraz ilişki zamanları fiziksel olarak katedilen bir yola karşılık gelmedikleri için fiziksel olmayan (non-physical), hayalet (ghost) ya da suni (spurious) varışlar olarak adlandırılırlar. Çapraz ilişki zamanları elde edildikten sonra zaman okumaları yapılmış ve bu zamanlar ters çözüm işleminde kullanılmıştır ve saçıcı konumları kestirilmeye çalışılmıştır. Ters çözüm işlemi için sönümlü tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemi kullanılmıştır.

Yöntem, üç ayrı veri üzerinde uygulanmıştır. İlk olarak, integral yöntemi ile yatay tabakalı ortamda üç boyutlu dalga yayılımı modellenerek oluşturulmuş bir saçılmış dalga alanı kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilmiş olan veride saçılmış yüzey dalgası toplam dalga alanından ayrı bir şekilde elde edilebildiği için herhangi bir ayırma işlemine gerek duyulmamaktadır. Kullanılan saçılmış yüzey dalga alanı için çapraz ilişki zamanları elde edilmiş ve ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, sonlu farklar yöntemi ile yarı sonsuz bir ortamda üç boyutlu dalga yayılımı modellenerek oluşturulmuş bir toplam dalga alanı kullanılmıştır. Bu veride doğrudan varışlar saçılmış dalga alanını örttüğü için saçılma hiperbolünün belli bir kısmı kullanılmış ve okunamayan kısımlar için çapraz ilişki zamanları simetrik olarak değerlendirilmiştir ve ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, yöntem iki boyutlu bir gerçek veri için kullanılmıştır. Gerçek veride saçılmış dalga alanı doğrudan varışlarla birlikte kayıt edildiği için, öncelikle saçılmaların toplam dalga alanından ayrılması gerekmektedir. Bunun için, toplam dalga alanını içeren bir sismogramdan, saçılmış dalga alanı bulundurmayan bir sismogram çıkarılarak saçılmış dalga alanı elde edilmiştir. Saçılmış dalga alanı ayrıldıktan sonra seçilen sanal kaynak konumları için çapraz ilişki zamanları elde edilmiş ve ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda saçıcı konumları başarılı bir şekilde kestirilmiştir.



## **ESTIMATING THE 3D LOCATION OF SCATTERERS FROM CROSS-CORRELATION TIMES OF SCATTERED SURFACE WAVES**

### **SUMMARY**

Detecting and investigating near-surface structures is necessary for reducing the effects of geological and environmental hazards. Near-surface structures such as cavities, caves, mine shafts, buried objects, archeological ruins, water reservoirs are named as scatterers and they may cause risk during and after construction of buildings, transportation ways (roads, highways, railways) or power plants (wind, solar, etc) which are spread to wide areas. Additionally, these scatterers can be affected by the changes in the hydraulic regime, earthquakes and change of the loading on the soil and may pose hazards. Therefore, to detect, monitor and reinforce such weak zones is important for preventing environmental and geological hazards.

Near-surface scatterers can be detected by various geophysical methods; such as microtremor, ground penetrating radar (GPR), microgravity, multichannel analysis of surface waves, seismic refraction and electrical resistivity. It is also possible to use scattered waves on seismic records. Near-surface structures scatter the seismic waves that has a wavelength comparable to their sizes. Using this property, information about scatterers can be obtained. In this study, a method inspired by seismic interferometry is used to estimate the location of near-surface scatterers.

Seismic interferometry is a method that generates new seismic responses by cross-correlating wavefields recorded at two receivers. This new seismic responses are called Green's functions and the resulting seismic response at one of the receivers is an impulse source at the position of the other receiver. Seismic interferometry method is used for various purposes such as removal of surface waves, velocity analysis, crustal seismology, seismic monitoring and exploration seismology. The wavefields used in interferometry method can be obtained from active or passive sources, and depending on the subject, different methods can be used. In active source interferometry, the seismic response recorded at receivers are cross-correlated and summed for source positions. However, instead of correlation, convolution or deconvolution can also be used. Passive source interferometry uses a similar method, but uses background noises instead of a controlled source. The method used in this study is based on correlation type active source seismic interferometry method.

In seismic interferometry, to obtain a complete Green's function between the receivers, boundary sources (primary or secondary) must effectively enclose the receivers. When this condition is not met, apart from the physical wavefield, ghost arrivals (also called non-physical or spurious events) will appear in the retrieved. If only a specific part of the Green's function is required just few sources that surround the receivers might be sufficient. However, the used sources must be located in stationary phase area. The method used in this study exploits this property and uses only one source and correlates only the scattered wavefield. The result is the

correlation times of scattered surface-wave between the virtual source and the receivers. These correlation times do not correspond to physical travel time paths, so they are named as non-physical, ghost or spurious arrivals.

In this study, three dimensional location of a scatterer is estimated by using cross-correlation times of scattered surface-waves. For this purpose, a seismic trace is chosen as a virtual source and is cross-correlated with the traces along the receiver line. Different than interferometry method, summation over correlations are not required. After the cross-correlation, correlation times are picked at their maximum amplitudes and are used in the inversion. The cross-correlation gives the maximum peak of the wavelet at the lag-time, where maximum similarity is obtained. The problem is non-linear and the equation set is mixed-determined, thus the problem is solved with damped SVD (Singular Value Decomposition) method. For calculations, three dimensional interferometric travel time equation representing the scattered wavefield is used in inversion process.

The method is applied on three different data sets. In the first part, a 3D scattered wavefield is calculated by using an efficient method. In the method three dimensional wave propagation and scattering of elastic waves are considered in an isotropic, laterally homogeneous embedding in which bounded objects with contrasting density are present. This method generates the incident and scattered wavefields separately. Thus, it isn't required to separate the scattered wavefield from the total wavefield since scattered surface wavefield is already isolated. In this data set, seismic data is obtained in two perpendicular receiver lines (X and Y), as it is required for estimating the three-dimensional location of a scatterer. Then, seismic traces are cross-correlated for the selected virtual sources for each receiver lines. For the horizontal line in the x direction the virtual source (VS) locations, VS1 (5 m), VS10 (14 m) and VS21 (25 m); and for the horizontal line in the y direction, the virtual source locations VS1 (1 m), VS4 (4 m) and VS21 (21 m) are used for the calculation of the correlation times. The source location is considered as the origin of the coordinate system. Then, obtained correlation times for both lines are used as pairs in inversion to estimate the scatterer location. As a result, location of scatterer is estimated successfully. After the inversion, the highest estimation error is observed on z parameter (depth) and the lowest estimation error is observed on x parameter (first horizontal dimension). For the uncertainties of the estimations the covariance matrix is calculated and a coverage factor 2, which provides a confidence level of 95% is considered. It is seen that for all virtual source pairs, x parameter is estimated in 95% confidence interval with low uncertainty while z parameter is estimated with higher uncertainties. The reason for this is that the singular value corresponding to z parameter is smaller than the other singular values, thus its contribution to solution of problem is less than other parameters. Closest results to actual values are obtained at VS21 at x line and VS21 at y line virtual source pair. For VS10 at x line and VS4 at y line virtual source pair, smaller uncertainty rates for estimated z parameter is observed. Since this data set generates scattered wavefield separately from total wavefield the amplitudes on receivers near scatterer is the highest. If the method is used to real data where total wavefield is recorded and scattered wavefield is obtained with filtering, situation might be different from this case.

In the second part, 3D total wavefield is obtained by using a 3D Finite Difference Wavefield Modelling Program. This program generates three dimensional total wavefield in half space and includes incident as well as scattered wavefields

together. Since incident surface wavefield is masking the scattered waves, the scattered wavefield must be separated from the total wavefield.

In this data set, same as in the first part, seismic data is obtained in two perpendicular receiver lines (X and Y), as it is required for estimating the three-dimensional location of a scatterer. Since the incident surface wave masking the scattered wavefield has similar frequency and slope, eliminating it would also remove a part of the scattered wavefield. Thus, only a limited part of hyperbola is used instead of full scattered wavefield. In this case, reading the correlation times of only one branch and taking the symmetry for the other branch can be applied as long as apex is observable. Then, the symmetric correlation times can be used for calculations. Therefore, correlation times are obtained for the selected virtual sources for each receiver lines. In this case, for the x direction the best waveforms were between 7th and 17th receivers, correlation times are read for 9th to 17th receivers then their symmetries are taken for 7th to 1st receivers, since the apex was observed on receiver 8. Also, virtual sources were chosen in this interval too. For the horizontal line in the x direction, the virtual source locations, VS8 (12 m), VS10 (14 m) and VS13 (17 m); and for the y direction the virtual source locations VS2 (2m), VS6 (6m) and VS11 (11m) are used for the calculations. The source location used as the origin of the coordinate system. Then, the obtained correlation times are used as pairs in inversion to estimate scatterer location. The inversion process estimated the location of scatterer successfully. After the inversion, the highest estimation error is observed on z parameter (depth) and the lowest estimation error is observed on y parameter (second horizontal dimension), with x parameter (first horizontal dimension) also had low estimation error close to y parameter. For the uncertainties of the estimations the covariance matrix is calculated and a coverage factor 2, which provides a confidence level of 95% is considered. It is seen that for all virtual source pairs, x and y parameters are estimated in 95% confidence interval with low uncertainty while z parameter is estimated with higher uncertainties. The reason for this is that the singular value corresponding to z parameter is smaller than the other singular values, thus its contribution to solution of problem is less than other parameters. Closest results to actual values are obtained at VS13 at x line and VS2 at y line virtual source pair. For VS10 at x line and VS11 at y line virtual source pair, smaller uncertainty rates for estimated z parameter is observed. This suggests that for virtual sources that are far away from each other gives more accurate results while virtual sources near the scatterer give less uncertainty values.

In the third part, the method is applied to a 2D seismic field data which is recorded over a near-surface tunnel with masonry. In real data, scattered wavefield is recorded together with direct arrivals, therefore it is required to isolate scattered wavefield from the total wavefield because incident surface wavefield is masking the scattered surface wavefield. For this purpose, several shot gathers are used. Each shot gather consists of 24 receivers and a source at 5m to the left of the leftmost receiver. Two of them are chosen: one above and the other away to the left (not above) of the tunnel. In this case, the shot gather above the tunnel includes scattered wavefield and is considered as total wavefield, and the shot gather away from the tunnel does not include scattered wavefield, so it is considered as the incident wavefield. Since the medium properties are similar in the lateral direction, the difference between the assumed total and incident wavefields results as the scattered wavefield due to the tunnel. For this purpose, mute process is also used. After the scattered wave field is isolated, correlation times are obtained for virtual sources VS12 (16 m) , VS16(20 m)

and VS22 (26 m). and used in inversion to estimate scatterer location. The inversion process estimated the location of scatterer successfully.

It is observed that x parameter (horizontal distance) is estimated with low estimation error while z parameter (depth) gives higher estimation errors. For the uncertainties of the estimations, the covariance matrix is calculated and a coverage factor 2, which provides a confidence level of 95% is considered. For all virtual source pairs, x parameter is estimated in 95% confidence interval with low uncertainty while z parameter is estimated with higher uncertainties. Consequently, it means z parameter contributes to solution less than x parameter. For VS12, observed uncertainty for z parameter is higher than others. The reason for this can be scattered wave recorded in 12th recorder might be distorted more than others. VS16 is located close to scatterer, thus lower uncertainty rates are observed.

In this thesis, it is observed that the method is successful for estimating the location of scatterers. For three-dimensional location, two receiver lines are required. Advantages of this method is that it is independent of the wave propagation from the source to the scatterer and moves source closer to receiver array, thus eliminating the effect of the travel path between source and scatterer. Additionally, this method does not require information about source location.

## 1. GİRİŞ

Yüzeğe yakın yapıların araştırılması ve tespit edilmesi, jeolojik ve çevresel tehlikelerin etkilerini azaltmak için gereklidir. Oyuklar, mağaralar, obruklar, maden kuyuları, gömülü cisimler, arkeolojik kalıntılar, su hazneleri ve benzeri gibi bu yüzeğe yakın yapılar, sismik dalga yayılımı açısından saçıcılar olarak adlandırılırlar ve geniş alanlara yayılan inşaatlar sırasında ve sonrasında risk oluştururlar. Ayrıca, bu yapılar su rejimi, depremler ve zemin yükü gibi değişimlerden etkilenebilirler ve daha fazla tehlikeye sebep olabilirler. Bu yüzden, bu türdeki zayıf bölgelerin tespit edilmesi, izlenmesi ve sağlamlaştırılması çevresel ve jeolojik tehlikelerin önlenmesi açısından gereklidir (Harmankaya ve diğ., 2013). Yüzeğe yakın saçıcılar, çeşitli jeofizik yöntemlerle tespit edilebilirler. Saçıcıların belirlenmesinde yer radarı (Ground Penetrating Radar, GPR) (Al-fares ve diğ., 2002; Nuzzo ve diğ., 2007), ve yüzeğe dalgalarının çok kanallı analizi (Debeglia ve diğ., 2006; Xu ve Butt, 2006; Samyn ve diğ., 2013), sismik kırılma ve elektrik özdirenç (Cardarelli ve diğ., 2010), sadece sismik kırılma (Engelsfeld ve diğ., 2008, 2011) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Yüzeğe dalgalarının kullanıldığı çalışmalar için ise, kabuk ve üst manto yapısının araştırılması (Chang ve Baag, 2005; Cong ve Mitchell, 1998; Kovach, 1978), sismik olayların kaynak özelliklerinin araştırılması (Canitez ve Toksöz, 1971; Ekström, 2006) gibi çalışmalar örnek gösterilebilir. Yüzeğe yakın yapıların araştırması amacıyla, yüzeğe dalgalarından S dalgası hız kestirimi yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır (Bozdog ve Kocaoglu, 2005; Foti, 2000; Kocaoglu ve Firtana, 2011; Leparoux ve diğ., 2000; Nazarian ve diğ., 1983; O'Neill, 2003; Park ve diğ., 1999; Rix ve diğ., 1998; Socco ve Boiero, 2008; Socco ve diğ., 2009,2010). Saçıcılara ait özelliklerin eldesi sismik kayıtlarda gözlenen saçılmış dalgaların kullanılması ile de mümkündür. Saçıcılar, boyutlarına yakın dalgaboyuna sahip sismik dalgaları saçarlar. Saçılmış dalga alanlarının bu özelliklerinden faydalanarak, saçıcılar hakkında bilgi edinilmesi mümkündür. Saçılmış dalga alanını kullanarak yüzeğe yakın saçıcıların bulunmasında ise (Snieder, 1987; Herman ve diğ., 2000; Leparoux ve diğ., 2000; Campman ve diğ., 2004; Grandjean ve Leparoux,

2004; Gelis ve diğ., 2005; Rodriguez ve diğ., 2006; Campman ve Riyanti, 2007; Kaslilar, 2007; Xia ve diğ., 2007; Mohanty, 2011; Chai ve diğ., 2012; Harmankaya ve diğ., 2013, Kaslilar ve diğ., 2013, 2014) ve arama sismolojisi ile küresel sismolojide (Snieder ve Nolet, 1987; Ritzwoller ve diğ., 2002; Rickers ve diğ., 2012) örnek verilebilir.

Bu çalışmada Harmankaya ve diğ. (2013) tarafından iki boyut için geliştirilen ve sismik interferometriden esinlenen yöntem esas alınarak saçıcıların üç boyutlu konumları kestirilmiştir. Sismik interferometri, iki alıcı arasında kayıt edilen sismik izler arasında çapraz ilişki işlemi uygulayarak yeni sismik tepkiler elde edilmesini amaçlayan bir veri işlem yöntemidir. Sismik interferometri yöntemi, yüzey dalgalarının giderilmesi (Curtis ve diğ., 2006; Dong ve diğ., 2006; Halliday ve diğ., 2007,2010; Xue ve Schuster, 2007; Xue ve diğ., 2008), hız analizi (King ve Curtis, 2011, 2012; King ve diğ., 2011), sismoloji (Campillo ve Paul, 2003; Bakulin ve Calvert, 2004; Shapiro ve Campillo, 2004; Schuster ve diğ., 2004; Roux ve diğ., 2005; Sabra ve diğ., 2005; Shapiro ve diğ., 2005; 2006; Hornby ve Yu, 2007; Dragonov ve diğ., 2007; Bakulin ve diğ., 2007), ve sismik görüntüleme (Schuster ve diğ., 2004; Thorbecke ve Wapenaar, 2007; Ravasi ve Curtis, 2013) gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, yüzeye yakın saçıcıların belirlenmesi amacıyla saçılmış yüzey dalgası alanı kullanılarak çapraz ilişki işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, üç boyutlu bir saçıcı konumunun belirlenmesi için integral yöntemi ile hesaplanan yapay sismogram ve iki boyutlu bir saçıcı için gerçek veri kullanılmıştır. Öncelikle sismik kayıt üzerinde saçılmış dalga alanı toplam dalga alanından ayrılmıştır. Seçilen sanal kaynak konumlarında kayıt edilmiş izler referans iz olarak seçilerek, kendisi de dahil kayıttaki diğer tüm izlerle çapraz ilişkisi alınmıştır. Elde edilen saçılmış dalga alanının çapraz ilişki zamanları ve alıcı konumları kullanılarak üç boyutlu ters çözüm işlemi uygulanmış ve saçıcının konumu kestirilmiştir. Ters çözüm işleminde Singular Value Decomposition (SVD) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda saçıcı konumları başarılı bir şekilde kestirilmiştir. Yöntemin en önemli avantajı, referans olarak seçilen bir alıcıdaki ize göre diğer alıcılarda kayıt edilen izlerin çapraz ilişkilerini hesaplayarak sinyaller arasındaki zaman kaymalarını elde etmesi ve bu sayede kaynaktan saçıcıya olan yolun etkisinin giderilmesini sağlamasıdır. Ayrıca yöntem hesaplamalarda seçilen sanal kaynakların konumunu esas aldığı için, kaynak

konumu bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak soğurulma etkisi veya yzey dalgasının süzgeçlenerek ayrılması sırasında dalga formunun bozulması, alıcılar arasında elde edilen çapraz ilişki zamanlarına bozucu olarak etki ederek zaman okumalarında hatalara neden olabilmektedir. Bölüm 2’de sismik interferometri yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3’te kullanılan yöntem açıklanmıştır. Bölüm 4’te integral yöntemi ile elde edilmiş üç boyutlu bir modelde saçıcı konumu kestirilmiştir. Bölüm 5’te sonlu farklar yöntemi ile elde edilen bir modelde aynı işlem tekrarlanmıştır. Bölüm 6’da 2 boyutlu gerçek veri uygulaması bulunmaktadır. Bölüm 7’de ise elde edilen sonuçlar verilmektedir.



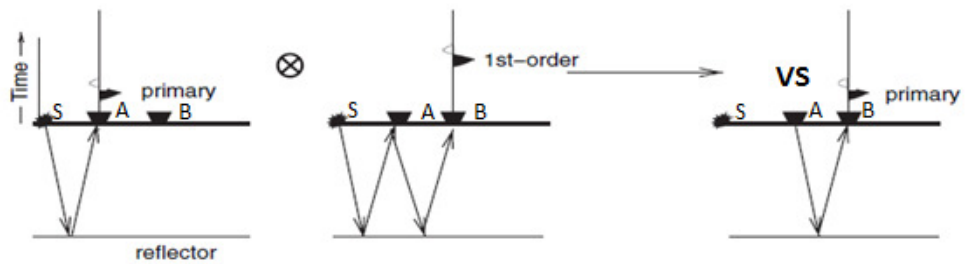
## 2. SİSMİK İNTERFEROMETRİ

Sismik interferometri en genel tanımı ile iki farklı alıcıda kayıt edilmiş sismik izler arasında çapraz ilişki işleminin uygulanması ile yeni sismik tepkilerin elde edilmesi işlemi olarak ifade edilir (Curtis ve diğ., 2006; Halliday ve Curtis, 2008; Schuster, 2009).

Bu işlem sonucunda, alıcı çifti arasındaki Green fonksiyonu elde edilir. Green fonksiyonları, alıcılardan birinin konumunda bir impulse kaynak bulunduğu ve diğer alıcıdan kayıt edildiği durumda elde edilecek olan sinyallere karşılık gelir (Şekil 2.1). Bu işlemin Green fonksiyonu ifadesi eşitlik 2.1 de verildiği şekildedir:

$$G(x_B, x_A, t) = G(x_B, x_S, t) \otimes G(x_A, x_S, t). \quad (2.1)$$

Burada  $\otimes$  sembolü çapraz ilişki işlemini, G green fonksiyonunu, A ve B şekil 2.1 de gösterilen alıcıları, S ise kaynağı ifade etmektedir. Bu bağıntıya göre S konumundaki kaynaktan dolayı, ortamın B alıcısında elde edilen tepkisi ile A alıcısında elde edilen tepkisinin çapraz ilişkisi, A alıcısından B alıcısına olan ortam tepkisine karşılık gelmektedir. Buna bağlı olarak, A alıcı konumundaki bir sanal kaynak için B alıcısında kayıt edilecek sismik tepkinin elde edilmesi sağlanır (Halliday ve Curtis, 2008).



**Şekil 2.1 :** İnterferometri işlemi. Bir kaynaktan (S) yayılan ve bir alıcı çifti tarafından kayıt edilen (A ve B) sismik dalgalara çapraz ilişki işlemi uygulandığında, A konumundaki alıcının konumunda bir kaynak bulunduğu ve B konumundaki alıcıdan kayıt edildiği durumda elde edilecek olan sinyal elde edilir (Schuster 2009).

İnterferometri yönteminde kullanılacak olan dalga alanları, aktif veya pasif kaynaklardan elde edilebilir, ve incelenen konuya göre farklı yöntemler kullanılabilir (Halliday ve Curtis, 2008). Aktif kaynak interferometrisinde bir alıcı çifti arasındaki Green fonksiyonunu kestirmek için, alıcı çiftinin etrafındaki kaynak serilerinden gelen sinyaller kayıt edilir ve çapraz ilişki işlemi uygulanır. Bu durumda, kestirim büyük ölçüde alıcılar arası yüzey dalgalarının etkisinde kalır. Ayrıca, soğurulma yüzünden farklılıklar oluşabilir. Gerçek sismik dalgalar sanal kaynak olarak kullanılan birinci alıcıya ulaşana kadar anelastik soğurulma nedeniyle bir miktar enerji kaybedebilir. Bu yüzden iki alıcı çifti arası için elde edilen ortam tepkisi gerçek bir kaynağın bulunduğu durumu tam olarak karşılamayabilir. (Halliday ve Curtis, 2008). Pasif kaynak interferometrisinde işlemin uygulanışı, aktif kaynak interferometrisine benzemektedir. Belli bir süre kayıt edilmiş sürekli veri zaman pencerelerine ayrılır ve normalize edilir, bu sayede çapraz ilişki işlemi sonrasında yüksek genlikli gürültülerin verideki etkisi azaltılır. Ardından, her alıcı çifti için karşılık gelen zaman pencerelerine çapraz ilişki işlemi uygulanır ve sonuçlar zaman eksenini boyunca toplanır. Aktif kaynak interferometrisiyle arasındaki temel fark, alıcılar arası sinyallerin incelenmesi için artalan gürültülerinin kullanılmasıdır. Ancak, pasif kaynak interferometrisi için interferometri koşullarının sağlanması, artalan gürültüsünün bütün yönlerden geldiği varsayımına dayanmaktadır. Ayrıca, kısa kayıt süreleri ve artalan gürültü kaynaklarının açısal kapsamının zayıf olması gibi durumlar durağan olmayan (nonstationary) bölgeden gelen ve gerçeği temsil etmeyen fazların gözlenmesine sebep olabilir (Halliday ve Curtis, 2008).

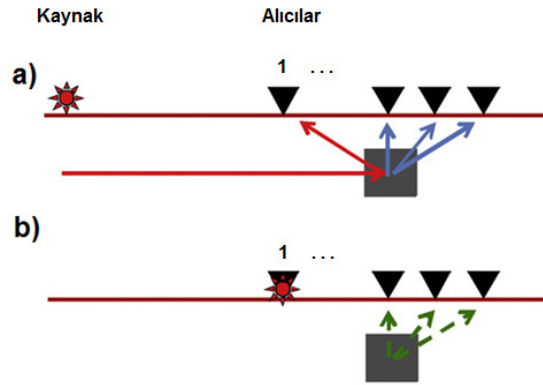
İnterferometri işlemi için kullanılan temel yöntem, çapraz ilişkidir, ancak evrişim ve ters evrişim yöntemleri de kullanılabilir (Curtis ve diğerleri, 2006). Çapraz ilişki tipi interferometri, sınır koşullarını sağlayacak uygun kaynaklar bulunduğu sürece tam Green fonksiyonunun hesaplanmasını sağlar, ancak teorisi gereğince ortamda soğurulmanın olmamasına ve kaynaklarla çevrelenmiş kapalı sınır koşullarına ihtiyaç duyar. Bu koşullar, genellikle arazi koşulları için gerçekçi değildir. Bu yüzden çapraz ilişki tipi interferometri soğurulmanın olduğu durumlarda kestirim konusunda güçlük çeker, ve sınır koşullarına uyulmadığı durumlarda yüzey dalgalarının veride baskın olmasına sebep olur (Halliday ve Curtis, 2009; Snieder ve diğ., 2009). Evrişim tipi interferometri ise, soğurulmanın olduğu durumlarda daha uygundur. Çapraz ilişki ve evrişim tipi interferometri yöntemleri arasındaki temel fark, çapraz ilişki

operatörünün sinyallerden birinin zamanda tersinin veya kompleks eşleniğine gerek duymasıdır. Soğurulma durumlarında dalga alanları zamanda terslenemeyeceği için, çapraz ilişki tipinin doğru sonuç vermesi için ortamın kayıpsız olması gerekmektedir. Bu yüzden, evrişim tipi interferometrinin, soğurulmanın güçlü olduğu yerlerde daha kullanışlı olması beklenir (Halliday & Curtis, 2009). Ters evrişim tipi interferometri yöntemi, soğurulma kestirimi amacıyla kullanılmaktadır. Ters evrişim işlemi sırasında spektral oran etkilenmediği için ters evrişim yaklaşımında kaynak spektrumun bilinmesine gerek yoktur. Bu özelliği sayesinde kaynak sinyalinin kesin bir şekilde bilinmediği durumlarda da etkin bir şekilde kullanılabilir. Ters evrişim yönteminin eksikliği, Green fonksiyonunu her zaman üretmemesidir. Oluşan tepki, sınırlı bir banttaki delta fonksiyonudur. Bu yüzden tepki bu noktada dar bir sınır koşulunu sağlar. Bu durum, sismik araştırmalarda yapay yansımaların oluşmasına sebep olur ancak bu yapay yansımalar çoklu ofset verisinde sadece çok zayıf bir iz bırakır (Snieder ve diğ., 2009).

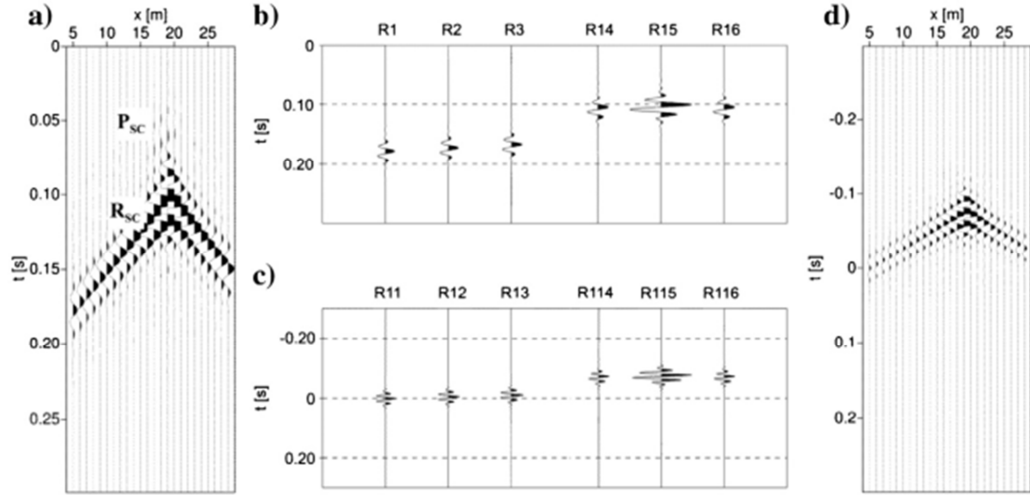
Aktif kaynak interferometri yöntemi, farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Genel olarak interferometri yöntemi alıcı çiftleri arasındaki dalga alanını kestirmek için kullanılsa da, kaynak çiftleri arasındaki dalga alanını ve kaynak-alıcı arası dalga alanını kestirmek amacıyla da kullanılabilir (Meles & Curtis, 2013). Alıcılar arası interferometride alıcı çiftlerinden biri veya ikisi birden kaynaklarla dizili bir sınırla çevrelendirilmelidir. Bu durumda iki alıcı arasındaki Green fonksiyonu, her bir kaynaktan üretilen ve alıcılarda kayıt edilen dalga alanlarının çapraz ilişkisi veya evrişiminin hesaplanması ve sınır boyunca toplanması ile hesaplanır (Meles ve Curtis, 2013). Kaynaklar arası interferometri, alıcılar arası ile aynı şekilde gerçekleştirilir; bu durumda alıcılar arası interferometri teorisine kaynak-alıcı tersinirliği (reciprocity) uygulanır. Sonuç olarak alıcılarla çevrelenmiş iki kaynağın arasındaki Green fonksiyonu hesaplanır (Meles ve Curtis, 2013). Kaynak-Alıcı interferometrisi ise bu iki yöntemin birleştirilmesiyle türetilmiştir. Bu yöntem, bir kaynak ve alıcı arasındaki Green fonksiyonunun oluşturulması için kullanılır ve alıcılar ile kaynakların kapalı sınırlarının bulunmasını gerektirir (Meles ve Curtis, 2013).

Bu çalışmada saçılmış yüzey dalgası alanının sismik interferometrisi dikkate alınmaktadır. Atış-alıcı düzeni için kayıt edilen veride kaynaktan yayılan yüzey dalgası, saçıcıya ulaşarak saçılmakta ve yüzeydeki alıcılar tarafından kayıt

edilmektedir (Şekil 2.2a). Kullanılan yöntemde, saçılmış yüzey dalgası alanının çapraz ilişki zamanları kullanılmaktadır. Seçilen bir alıcı için kayıt edilen izlerin çapraz ilişkisi hesaplandığında, seçilen referans alıcı sanal kaynak olarak adlandırılır ve alıcılarda kayıt edilen varış zamanları, sanal kaynağa göre ötelenir (Şekil 2.2b). Sonuç olarak saçılmış dalga alanının çapraz ilişki zamanları elde edilir. Bu sayede kaynak (sanal kaynak) alıcı hattına yaklaştırılmış olur ve kaynak ve alıcılar arasındaki mesafe etkisi giderilir. Buna bağlı olarak, hesaplamalar için kaynak konumu bilgisine gerek kalmaz ve saçıcı konumu kestirimi için yapılacak hesaplama sadece alıcılar ile saçıcı konumlarına bağlı hale gelir (Eşitlik 3.2). Şekil 2.3'te ise, uygulanan işlemin kayıt edilen izler üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Atış-alıcı düzeni için kayıt edilen veri şekil 2.3a'da bulunmaktadır, şekil 2.3b'de ise örnek olarak seçilen izler detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Şekil 2.3c'de ise, 1. alıcının sanal kaynak olarak seçildiği durumda elde edilecek olan interferometrik tepkiler görülmektedir. Buna göre, 1. alıcıda kayıt edilen sismik iz sanal kaynak seçilerek diğer alıcıda kayıt edilen izler için çapraz ilişkileri hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1). Bu durumda, 1. iz için elde edilen sonuç özilişki fonksiyonuna karşılık gelmektedir ve sıfır zamanına ötelenmiştir. Diğer izler için ise, çapraz ilişki işlemi sonucunda atış-alıcı geometrisi sanal kaynak konumuna (referans ize) göre yeniden düzenlenmiş ve varış zamanları, saçılan dalga alanının sanal kaynak konumundan yayılmaya başladığı zamana ötelenmiştir (Şekil 2.3d).



**Şekil 2.2 :** (a) Doğrudan ve saçılmış varışlar için ışın yollarının şematik gösterimi, (b) 1. alıcı konumundaki bir sanal kaynak için elde edilen saçılmış dalgaların ışın yollarının şematik gösterimi (Harmankaya ve diğ., 2013).



**Şekil 2.3 :** (a) Saçılmış dalga alanı, (b) R1-R3 ve R14-R16 alıcıları için saçılma varışları, (c) b'deki izlerin R1'deki bir sanal kaynak için çapraz ilişki sonuçları, (d) a'daki izlerin R1'deki bir sanal kaynak için çapraz ilişkisinden elde edilen interferometrik kayıt (Harmankaya ve diğ., 2013).  $P_{sc}$  saçılmış P dalgasını ve  $R_{sc}$  saçılmış yüzey dalgasını ifade etmektedir.

Alıcı konumları arasındaki Green fonksiyonunu tam olarak elde edebilmek için, interferometri koşullarının sağlanması gerekmektedir ve buna bağlı olarak alıcılar kaynaklarla çevrenmelidir. Bu koşulun karşılanmadığı durumlarda fiziksel varışların yanısıra fiziksel olmayan varışlar da kayıt edilebilir. Eğer Green fonksiyonunun sadece bir kısmı elde edilmek isteniyorsa, alıcılar etrafındaki birkaç kaynak yeterli olabilir. Bu çalışmada saçıcı her zaman durağan faz konumunda bulunduğundan tek bir kaynak yeterli olmaktadır. Kullanılan yöntem bu özellikten faydalanmakta ve tek bir aktif kaynak kullanılarak sadece saçılmış dalga alanının çapraz ilişkisi hesaplanmaktadır. Bu şekilde elde edilen çapraz ilişki zamanları fiziksel olarak katedilen bir yola karşılık gelmediğinden, fiziksel olmayan (non-physical), hayalet (ghost) ya da suni (spurious) varışlar olarak isimlendirilir. Söz konusu fiziksel olmayan varışlar için örnek olarak Snieder ve diğ. (2008) tarafından gerçekleştirilen iki alıcıda kayıt edilen saçılmış dalgaların çapraz ilişkisi örnek verilebilir. Ancak, kullanılan kaynaklar kararlı faz (stationary phase) bölgesinde yer almalıdır (Snieder, 2004).



### 3. YÖNTEM

Bu çalışmada üç boyutlu bir ortamda modellenmiş olan sismik veride saçıcının konumunun tespit edilmesi için çapraz ilişki zamanları kullanılmıştır. Bunun için, sanal kaynak olarak seçilen bir iz ile alıcı hattı boyunca kayıt edilen izlerin çapraz ilişkisi hesaplanmıştır. Çapraz ilişki bağıntısı, eşitlik 3.1 de tanımlandığı şekildedir:

$$C_{d^i d^{vs}}(\tau) = \sum_i d^i(t_n) d^{vs}(t_n + \tau). \quad (3.1)$$

Burada  $\tau$  zaman kaymasını,  $t$  zamanı,  $i$  alıcı indeksi,  $d^i$  alıcılarda kayıt edilen izleri,  $d^{vs}$  sanal kaynak olarak kullanılan izi tanımlamaktadır.  $C$  ise  $d^i$  ve  $d^{vs}$  arasındaki çapraz ilişkiyi ifade etmektedir. Bu yöntemin kullanılması için tek kaynak yeterli olduğu için, farklı kaynaklar üzerinden elde edilecek çapraz ilişki sonuçlarının toplamına ihtiyaç duyulmamıştır. Üç boyutlu bir ortamda saçıcının konumunu belirlemek için, eşitlik 3.2 de verilen ve bir nokta saçıcı varsayımı için saçılmış dalga alanını temsil eden interferometrik seyahat süresi bağıntısı kullanılmıştır:

$$t = \frac{\sqrt{(x_i^r - x)^2 + (y_i^r - y)^2 + (z_i^r - z)^2}}{V} - \frac{\sqrt{(x^{vs} - x)^2 + (y^{vs} - y)^2 + (z^{vs} - z)^2}}{V}. \quad (3.2)$$

Burada  $V$  sismik dalga hızını,  $i$  alıcı numarasını,  $x^r$ ,  $y^r$  ve  $z^r$  alıcıların konumlarını,  $x^{vs}$ ,  $y^{vs}$  ve  $z^{vs}$  sanal kaynak konumlarını,  $x, y$  ve  $z$  ise saçıcının konumlarını belirtmektedir. Bu çalışmada sismik dalga hızı olarak yüzey dalga hızı kullanılmıştır, ancak yöntem P veya S dalgalarının saçılmaları için de kullanılabilir. Saıcının nokta saçıcı olarak davranması için, dalgaboyu ile saçıcının boyutlarının birbirlerine yakın olması gerekmektedir. Saıcının konumunun hesaplanmasında kullanılan ters çözüm işlemi için, eşitlik 3.2'de verilen ve doğrusal olmayan denklemin model parametrelerine göre kısmi türevlerinden oluşan Jacobian matris oluşturulmuş ve yinelemeli ters çözüm ile model parametreleri kestirilmiştir. Saıcının üç boyutlu konum kestirimini yapabilmek için birbirine paralel veya dik olan en az iki alıcı hattına gerek vardır. Aksi takdirde, alıcı hattına dik doğrultulardaki parametreler için çok çözümlülük gerçekleşir. Üç boyutlu bir saçıcı

konumu, iki boyutlu veri ile kestirilmeye çalışıldığı durumda, yanal yönde mesafe ve düşey derinlik parametrelerinin ayrımlanması mümkün değildir. Buna göre, alıcı hattı doğrultusundaki yönelim kestirilebilecektir, ancak yanal yönde uzaklık ve derinlik parametreleri çözüme birlikte etki ederek derinlik ve mesafe yerine saçıcının alıcı hattından uzaklığı sonucuna ulaşılabilecektir. Buna bağlı olarak, parametre kestirimi için elde edilebilecek olan sonuçlar, alıcı hattının çevresindeki bir çember üzerinde herhangi bir noktada yer alabilir. İki alıcı hattı kullanıldığı için veri vektörleri ve ilgili duyarlılık (Jacobian) matrisi birbirlerine eklenerek kullanılmıştır. Bu yüzden, ters çözüm işlemi için kullanılan denklem takımı,

$$[\Delta \mathbf{d1} \ \Delta \mathbf{d2}] = [\mathbf{G1} \ \mathbf{G2}]^T \Delta \mathbf{m} \quad (3.3)$$

şeklinde verilmektedir. Burada,  $\Delta \mathbf{d}$ , gözlenen ( $t^{obs}$ ) ve hesaplanan ( $t^{calc}$ ) interferometrik seyahat zamanlarının farkını ifade etmektedir. 1 ve 2, alıcı hatlarını belirtmektedir. Model parametreleri, saçıcının yatay ve düşeydeki konumları olan  $x, y$  ve  $z$  dir ve  $\Delta \mathbf{m}$  vektörü ile ifade edilir.  $\mathbf{G}$  ise eşitlik 3.2'nin model parametrelerine göre alınan kısmi türevlerinden oluşan duyarlılık (Jacobian) matrisidir. Bu kısmi türevler sırasıyla;

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{(x - x_i^r)}{r_1} - \frac{(x - x^{vs})}{r_2} \right\}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{(y - y_i^r)}{r_1} - \frac{(y - y^{vs})}{r_2} \right\}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{(z - z_i^r)}{r_1} - \frac{(z - z^{vs})}{r_2} \right\} \quad (3.6)$$

$$r_1 = \sqrt{((x_i^r - x)^2 + (y_i^r - y)^2 + (z_i^r - z)^2)}$$

$$r_2 = \sqrt{((x^{vs} - x)^2 + (y^{vs} - y)^2 + (z^{vs} - z)^2)}$$

şeklinde ifade edilir. Matris denklem takımını ifade eden eşitlik 3.3 ise, eşitlik 3.7'de verildiği şekilde ifade edilir;

$$\begin{bmatrix} t_1^{obs} - t_1^{calc} \\ t_2^{obs} - t_2^{calc} \\ \vdots \\ t_n^{obs} - t_n^{calc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial t^1 / \partial x & \partial t^1 / \partial y & \partial t^1 / \partial z \\ \partial t^2 / \partial x & \partial t^2 / \partial y & \partial t^2 / \partial z \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial t^n / \partial x & \partial t^n / \partial y & \partial t^n / \partial z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ z - z_o \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Bağıntıda  $\Delta \mathbf{m}$  vektöründe model parametreleri olan  $x$ ,  $y$  ve  $z$  saçıcının yatay ve düşeydeki merkez konumlarını,  $x_0$ ,  $y_0$  ve  $z_0$  ise yatay ( $x,y$ ) ve düşey ( $z$ ) saçıcı konumları için başlangıç parametrelerini ifade etmektedir. Jacobian matrisi  $\mathbf{G}$  de ise eşitlik 3.4-3.6'da verilen kısmi türevler yer almaktadır.  $\partial$  kısmi türev operatörünü temsil etmektedir.  $n$  ise, ters çözüm için kullanılan gözlem sayısıdır.

Bu çalışmada kullanılan model doğrusal olmayan bir modeldir ve sistem karışık tanımlıdır (Eşitlik 3.2). Bir matris denklem takımında, gözlem sayısının parametre sayısından az olduğu durumlarda denklem takımı, eksik tanımlı olarak adlandırılır. Eksik tanımlı denklemler tek bir çözüm elde etmek için yeterli bilgi içermemektedir. Buna bağlı olarak, veriye karşılık olarak birden fazla çözüm elde edilebilir ve bu yüzden çok çözümlüdür. Veri sayısının parametre sayısından fazla olması durumunda ise denklem aşırı tanımlı olarak adlandırılır. Aşırı tanımlı denklemlerde tek çözüm elde edilebilir, ancak çözüm veriyi tam olarak temsil etmeyebilir. Karışık tanımlı ise, veri sayısının parametre sayısından fazla olduğu, ancak denklem koşullarından dolayı verinin sisteme eksik tanımlı olarak etki edebildiği durumları ifade eder. Buna göre, işlem sırasında Jacobian matrisinin içeriğinde oluşan tekillikler yüzünden, kullanılan denklem takımı karışık tanımlı bir sistem oluşturmaktadır. Veri matrisini oluşturan gözlemler, doğrusal alıcı hatları üzerinde toplanmıştır. Kullanılan verilerin her biri iki boyutludur ve üzerinde buldukları hattın mesafe bilgisini ( $x$  veya  $y$ ) ve sismik dalgaların varış zamanlarını ( $t$ ) içermektedir. Bu yüzden, alıcı hattının dışında kalan parametreler için verinin çözümlenme etkisi daha zayıftır. Verinin bir parametreyi temsil etmemesi durumunda, Jacobian matrisinin içeriğinde tekillikler oluşur. Bu durum, verinin temsil etmediği parametreler için denklem takımını eksik tanımlı hale getirmektedir ve kestirimi olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, üç boyutlu çözümün gerçekleştirilmesi için yanal doğrultularda yer alan ( $x$  ve  $y$ ) alıcı hatları kullanılmıştır, ancak düşey doğrultuda ( $z$ ) veri toplanmamaktadır. Bu durum,  $z$  parametresinde gözlemlenen belirsizliğin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, denklemin doğrusal olmamasına bağlı olarak çok çözümlülük söz konusudur.

Ters çözüm işleminin gerçekleştirilmesi için tekil değer ayrışımı (Singular Value Decomposition, SVD) yöntemi kullanılmıştır. Tekil değer ayrışımı, herhangi bir  $\mathbf{G}$  matrisinin üç matrisin çarpımı şeklinde ifade edilmesini sağlar. Tekil değer ayrışımı yöntemi genel haliyle eşitlik 3.8 ile ifade edilmektedir:

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T . \quad (3.8)$$

Bu bağıntıda,  $\mathbf{U}$  matrisi veri uzayını geren özvektörler matrisi,  $\mathbf{V}$  model parametre uzayını geren özvektör matrisi,  $\mathbf{\Lambda}$  ise köşegeni üzerinde tekil değerler barındıran özdeğer matrisidir (Menke, 1989). Jacobian matrisi  $\mathbf{G}$ 'nin tersi ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{G}^{-1} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^T . \quad (3.9)$$

Tekil değer ayrışımı yöntemi ile yapılan ters çözüm, hem en küçük kareler, hem de minimum uzunluk yöntemlerinin özelliklerini içinde bulundurmaktadır. Bu nedenle ters problemin çözümü sırasında sistemin eksik, aşırı veya karışık tanımlı olması ile ilgili bir tanımlama yapmaya gerek yoktur. Yinelemeli ters çözüm işlemi için bir başlangıç modeli gereklidir. Ayrıca sifıra yakınsayan tekil değerlerin problemi kararsız hale getirmesinin engellenebilmesi için bir sönüm parametresi eklenmiştir. Bu şekilde uygulandığında yöntem sönümlü tekil değer ayrışımı olarak adlandırılır. Ters çözüm işleminin gerçekleştirilmesi için kullanılan ve tekil değer ayrışımı yöntemi ile oluşturulan genelleştirilmiş ters çözüm ifadesi ise, eşitlik 3.10'da verildiği şekildedir:

$$\Delta \mathbf{m} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} (\mathbf{\Lambda}^2 + \beta^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{d} . \quad (3.10)$$

Burada  $\mathbf{I}$  birim matrisi ve  $\beta$  sönüm parametresini temsil etmektedir.

Kestirilen parametrelerdeki belirsizliklerin tespit edilmesi için kovaryans ve varyans değerleri aşağıda verilen ilişkiler ile hesaplanır:

$$\text{cov} [\mathbf{m}] = \sigma^2 \mathbf{V} \left( \frac{\mathbf{\Lambda}^2}{\mathbf{\Lambda}^2 + \beta^2 \mathbf{I}} \right) \mathbf{V}^T , \quad (3.11)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n - n_m} \sum_{i=1}^n (t_i^{obs} - t_i^{calc})^2 . \quad (3.12)$$

Burada  $\sigma^2$  varyans,  $n$  gözlemlenen veri sayısını,  $n_m$  model parametresi sayısını temsil etmektedir. Hata oranı için kullanılan %95 güven aralığını belirlemek için ise,  $1.96\sigma$  kullanılmıştır.

Ters çözüm işlemi sonucu elde edilen model parametreleri ile (3.10) bağıntısı kullanılarak hesaplanan zamanlar ile gözlenen zamanlar arasındaki uyumun ölçüsü izleyen bağıntı ile verilmektedir:

$$E_t = \frac{\sum_{k=1}^N (t_k^{obs} - t_k^{calc})^2}{\sum_{k=1}^N (t_k^{calc})^2} \times 100 . \quad (3.13)$$

Burada  $E_t$  yüzde hata değeri,  $t^{obs}$  gözlemlenen ve  $t^{calc}$  ise hesaplanan zamanları ifade etmektedir.

Model parametrelerindeki kestirim hatası ise, gerçek konumlar ile hesaplanan konumlar kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır:

$$E_m = \left| \frac{m_{act} - m_{est}}{m_{act}} \right| \times 100 . \quad (3.14)$$

Burada  $E_m$  model parametrelerindeki hata yüzdesi,  $m_{act}$  ve  $m_{est}$  ise sırasıyla gerçek ve kestirilen model parametreleridir.



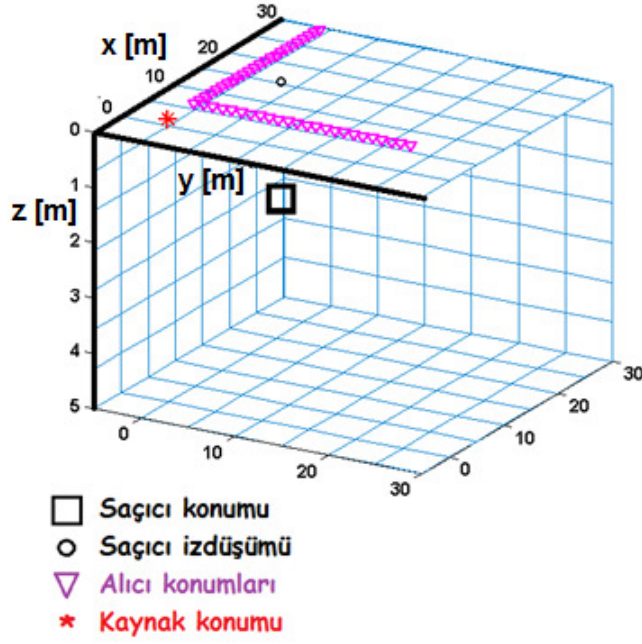
## 4. İNTEGRAL YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMİŞ YAPAY SİSMOGRAMLARDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ

### 4.1. Üç Boyutlu Model

Yöntemin çalışmasını denemek amacıyla Kaslılar (2007) tarafından geliştirilen ve integral yöntemi ile yatay tabakalı ortamda dalga yayılımını modelleyen program kullanılarak modellenmiş olan saçılmış dalga alanı kullanılmıştır. Yöntem, dalgaların farklı ortamlar arasındaki etkileşimini hesaplarken sadece yoğunluk kontrastını kullanmaktadır ve hız farklarını dikkate almamaktadır. Yöntemin uygulanabilmesi için toplam dalga alanından ayrılarak elde edilen saçılmış dalga alanına ihtiyaç vardır. Kullanılan program ile saçılmış dalga alanı, toplam dalga alanından bağımsız bir şekilde elde edildiği için tercih edilmiştir. Veri, birbirine dik X ve Y doğrultularında 24 adet alıcı bulunduran iki hat üzerinde tek atış ile oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Alıcılar arası mesafe 1m, kaynak alıcı arası mesafe 5m'dir. Zaman örnekleme 1ms, toplam kayıt süresi ise 0.3s dir. Saçıcı, x doğrultusunda 14.5m, y doğrultusunda 4.5m, z doğrultusunda 2m konumlarında bulunan bir boşluktur ve eni, genişliği ve boyu sırasıyla 1m,1m ve 1m'dir. Kaynak ise x,y doğrultularında 0,0 konumunda bulunmaktadır. Yüzey dalgası hızı ise S dalga hızının yaklaşık 0.9 katı olarak kabul edilmiş ve 180m/s olarak alınmıştır. Kaynak sinyali frekans ortamında kosinüs çanı biçiminde tanımlanmış olup, baskın frekansı 50Hz civarındadır.

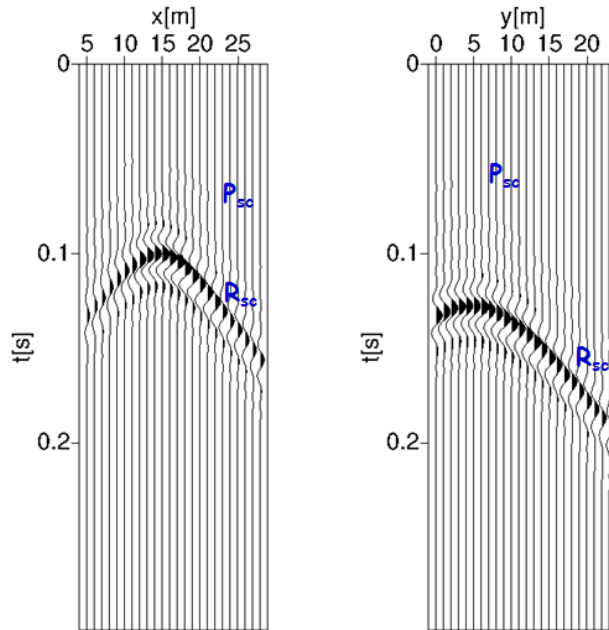
**Çizelge 4.1 :** Saçılmış dalga alanının hesaplanmasında kullanılan ortam parametreleri.

	<b>Artalan</b>	<b>Saçıcı (boşluk)</b>
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1800</b>	<b>1.2</b>
<b><math>V_p</math> (m/s)</b>	<b>350</b>	<b>350</b>
<b><math>V_s</math> (m/s)</b>	<b>200</b>	<b>200</b>



**Şekil 4.1 :** Kaynak-alıcı düzeni ve saçıcının şematik gösterimi. Saçıcı  $x=14.5\text{m}$ ,  $y=4.5\text{m}$ ,  $z=2\text{m}$  konumlarında bulunmaktadır.

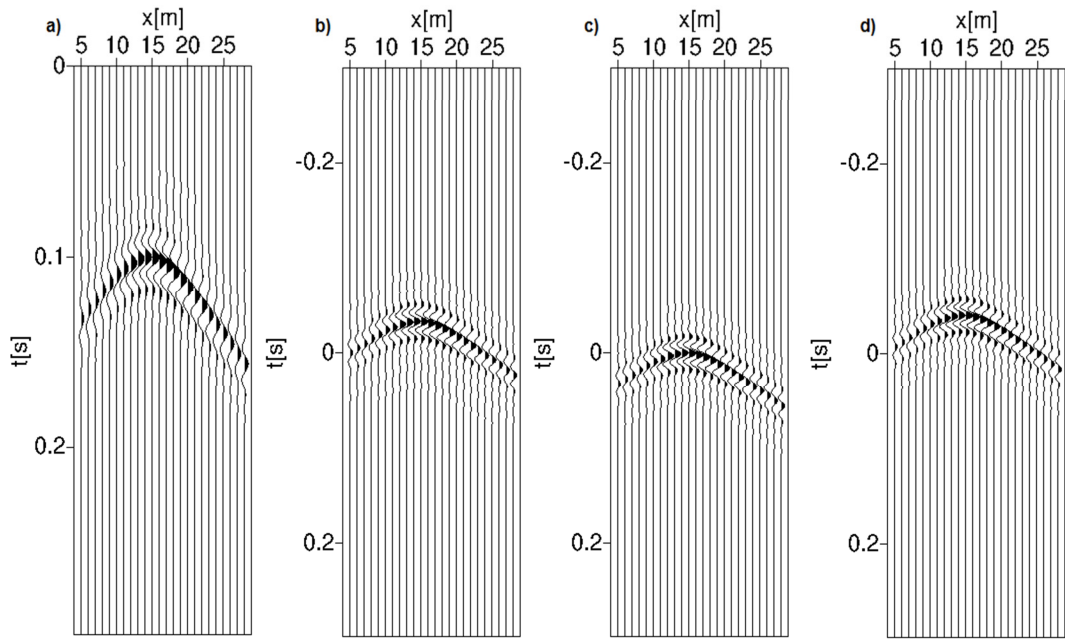
Şekil 4.2’de  $x$  ve  $y$  doğrultularında üretilmiş olan yapay sismogramlar görüntülenmektedir. Saçılmalar ve doğrudan varışlar ayrı olarak elde edildikleri için kullanılan sismogramda sadece saçılmış dalgalar bulunmaktadır.



**Şekil 4.2 :** Şekil 4.1 de verilen geometri için üretilmiş saçılmış Rayleigh dalga alanı. (a)  $x$  ve (b)  $y$  yönündeki alıcı hatları ile üretilen sismogram.  $P_{sc}$  saçılan P dalgalarını,  $R_{sc}$  ise saçılan yüzey dalgalarını ifade etmektedir.

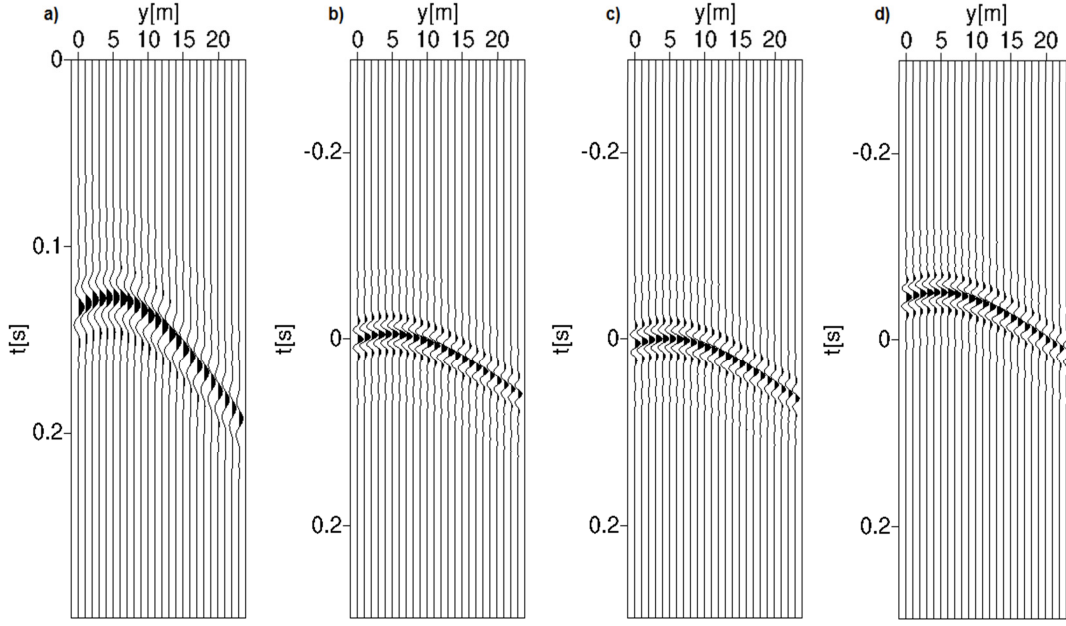
## 4.2. Saçıcı Konumunun Kestirilmesi

Saçıcı konumunun kestirilmesi amacıyla çapraz ilişki zamanlarının elde edilmesi gerekmektedir. Sismogramdaki seyahat zamanlarına, seçilen sanal kaynaklara göre bağıntı 3.1 ile verilen çapraz ilişki işlemi uygulandığında, çapraz ilişki zamanları elde edilir. Elde edilen izlerin maksimum genlik değerlerindeki zamanlar seçilerek hesaplamalarda kullanılmıştır. Seçilen maksimum genlik değerleri, çapraz ilişki işlemi sonucunda en büyük uyum değerlerini ifade etmektedir. Bu değerler ise, sanal kaynak olarak seçilen iz için özilişki fonksiyonuna karşılık geldiğinden 0 zamanında yer alır, diğer izler ise varış zamanındaki farklara göre ötelenir (Şekil 4.3 - 4.4).



**Şekil 4.3 :** (a) X yönündeki alıcı hattı boyunca üretilmiş yapay sismogram. (b), (c) ve (d); 1. [5m] , 10. [14m] ve 21. [25m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış Rayleigh dalga alanları.

Elde edilen fiziksel olmayan saçılmış dalga alanı varış zamanları kayıt üzerinden okunarak gözlenen varış zamanları ( $t^{obs}$ ) elde edilmiştir. Eşitlik 3.10'da verilen genelleştirilmiş ters çözüm ifadesi ile ters çözüm işlemi gerçekleştirilerek saçıcı konumları hesaplanmıştır. Saçıcının x, y, z konum bilgisini içeren model parametre vektörünü hesaplamak için başlangıç parametreleri  $x_0$ ,  $y_0$  ve  $z_0$  sırasıyla 20m, 10m ve 10m seçilmiştir. Sönüm parametresi  $\beta$  ise en küçük tekil özdeğerin mertebesinde seçilmiştir. Ters çözüm işlemi, farklı sanal kaynak çiftleri için tekrarlanmıştır.



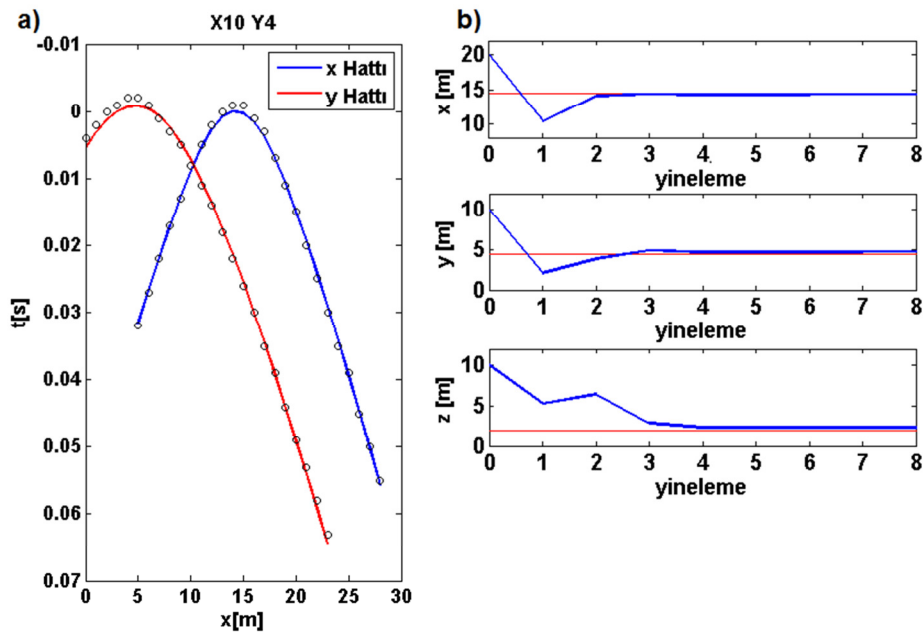
**Şekil 4.4 :** (a) Y yönündeki alıcı hattı boyunca üretilmiş yapay sismogram. (b), (c) ve (d); 1. [1m] , 4. [4m] ve 21. [21m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış Rayleigh dalga alanları.

Seçilen bir sanal kaynak için çapraz ilişki işlemi sonucu elde edilen verinin isimlendirmesi hat yönü ve sanal kaynak indeksi şeklinde yapılmaktadır; örneğin  $Lx\_VS20$  ifadesi, x hattında 20. alıcı sanal kaynak seçilerek elde edilen interferometrik görüntüyü belirtmektedir. İşlem  $Lx\_VS10$  ile  $Ly\_VS4$ ;  $Lx\_VS21$  ile  $Ly\_VS1$ ;  $Lx\_VS1$  ile  $Ly\_VS21$  ve  $Lx\_VS21$  ile  $Ly\_VS21$  çiftleri için hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5 - 4.8). Burada, 0. iterasyona karşılık gelen değerler, ters çözüm işlemi için seçilen başlangıç parametreleridir. Her hesaplama için 8 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler, Tablo 4.3'te verilmektedir.

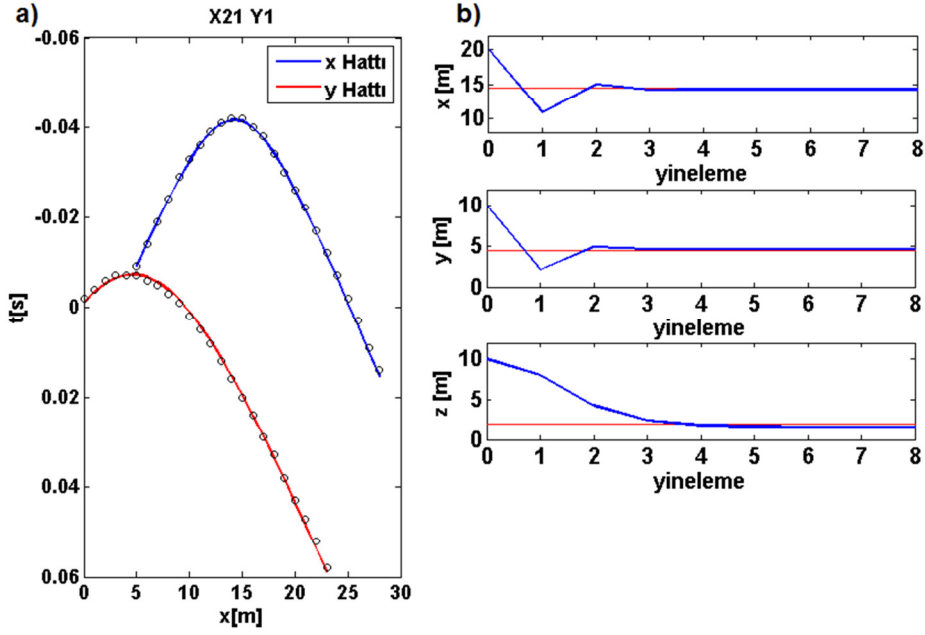
$Lx\_VS10$  ile  $Ly\_VS4$  sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.5). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0758 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x, y, z)=(14.5m, 4.5m, 2m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 14.25m, 4.69m ve 2.33m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %1.68, %4.26 ve %16.68 olarak belirlenmiştir.

Lx\_VS21 ile Ly\_VS1 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.6). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0655 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x, y, z)=(14.5m, 4.5m, 2m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 14.23m, 4.63m ve 1.61m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %1.85, %2.93 ve %19.31 olarak belirlenmiştir.

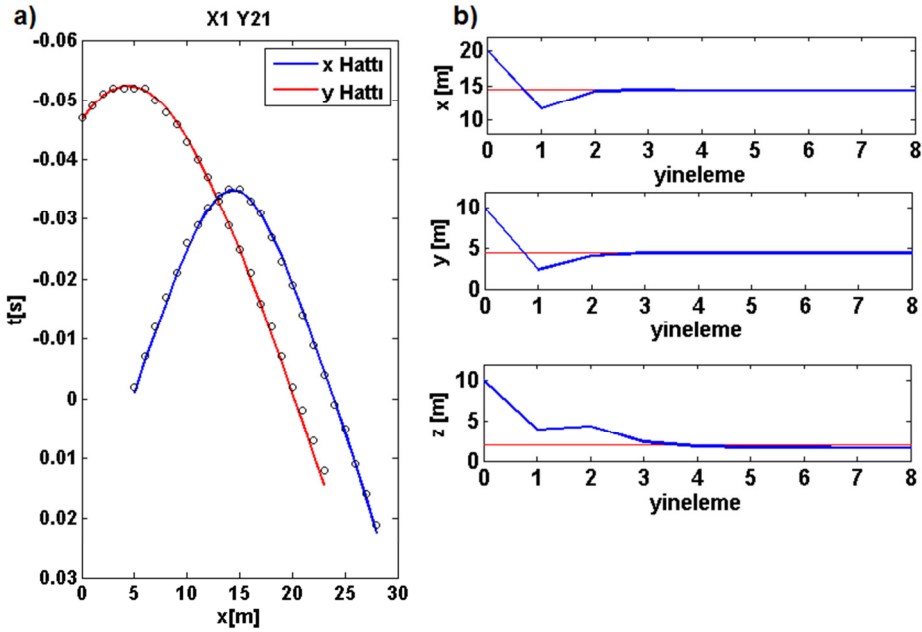
Lx\_VS1 ile Ly\_VS21 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.7). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0727 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x, y, z)=(14.5m, 4.5m, 2m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 14.35m, 4.42m ve 1.63m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %0.98, %1.71 ve %18.49 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.5 :** x ekseninde 10. (Lx\_VS10) ve y ekseninde 4. (Ly\_VS4) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

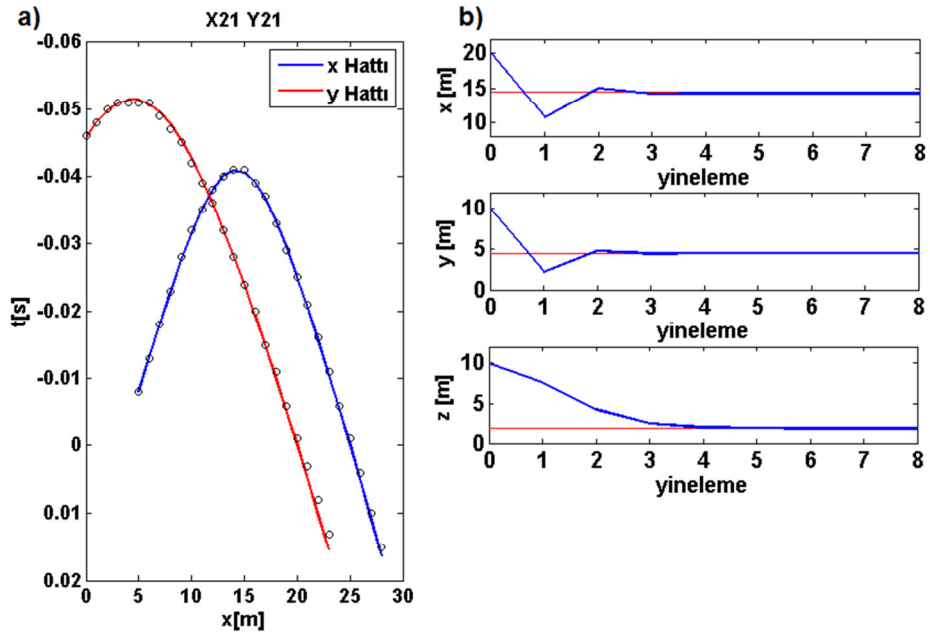


**Şekil 4.6 :** x ekseninde 21. ( $Lx\_VS21$ ) ve y ekseninde 1. ( $Ly\_VS1$ ) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.



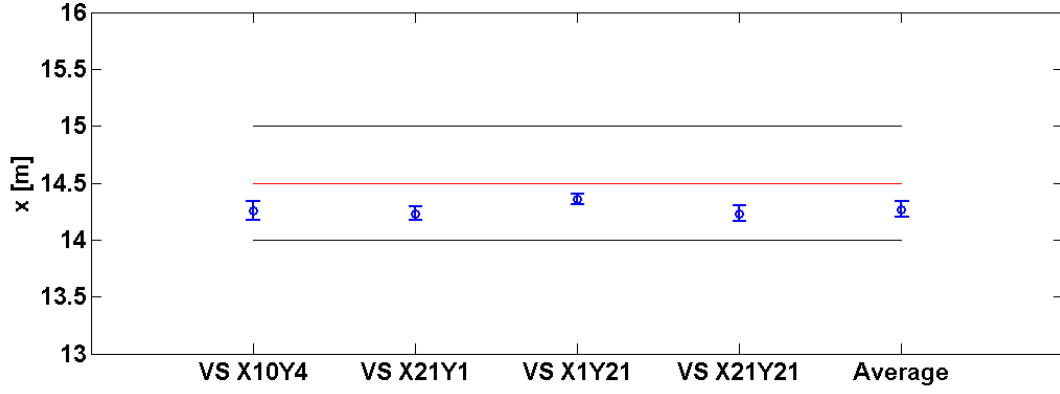
**Şekil 4.7 :** x ekseninde 1. ( $Lx\_VS1$ ) ve y ekseninde 21. ( $Ly\_VS21$ ) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

Lx\_VS21 ile Ly\_VS21 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.8). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0594 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x, y, z)=(14.5\text{m}, 4.5\text{m}, 2\text{m})$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 14.23m, 4.44m ve 1.96m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x,y ve z için sırasıyla %1.84, %1.11 ve %1.52 olarak belirlenmiştir.

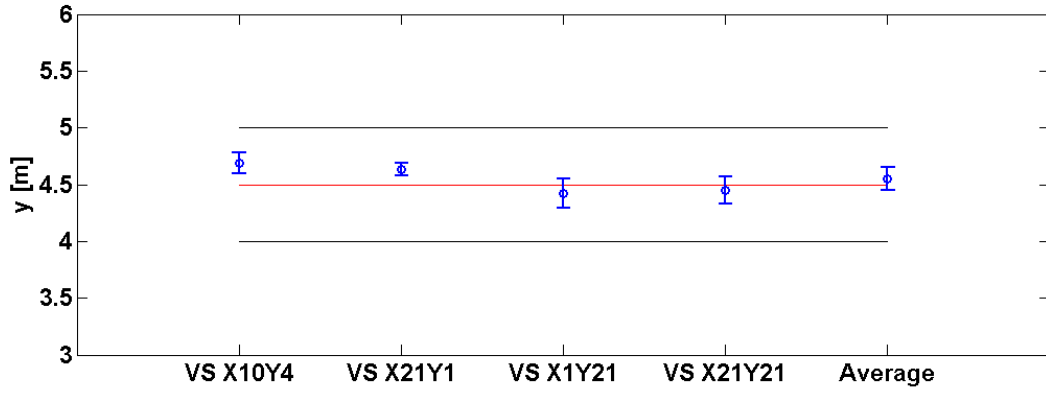


**Şekil 4.8 :** x ekseninde 21. (Lx\_VS21) ve y ekseninde 21. (Ly\_VS21) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

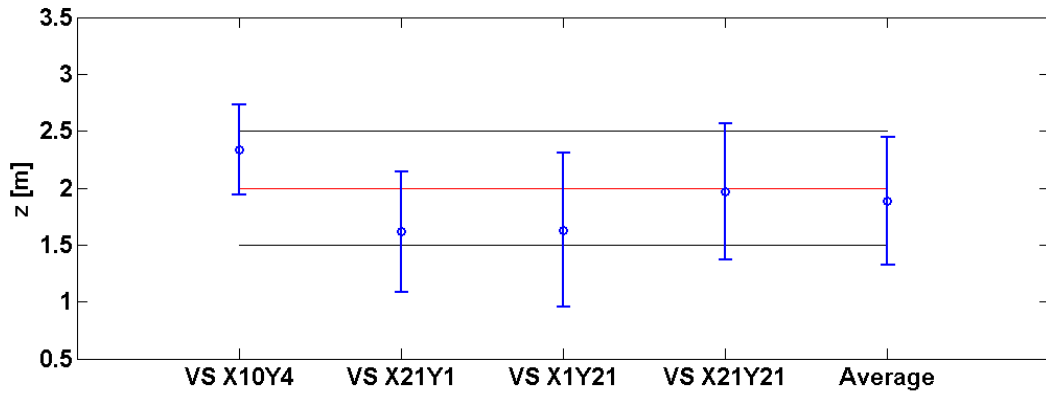
Ters çözüm işlemi sonucunda kestirilen parametrelerin gerçek değerlere yakın olarak elde edildiği gözlenmektedir. Kestirilen model parametrelerindeki belirsizliğin hesaplanması için 3.11 ve 3.12 eşitlikleri kullanılarak kovaryans matrisi kullanılmıştır. Kovaryans matrisinin köşegen değerlerinde elde edilen varyansın kare kökünden standart sapma hesaplanarak her bir model parametresine karşılık gelen belirsizlik elde edilmiştir. Model parametrelerindeki belirsizlik %95 güven aralığı dikkate alınarak  $1.96\sigma$  olarak hesaplanmıştır. Bütün sanal kaynak alıcı çiftleri için hesaplanan belirsizlikler Şekil 4.9 - 4.11'de verilmektedir.



**Şekil 4.9 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.



**Şekil 4.10 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının y konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının y konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.



**Şekil 4.11 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, en yüksek kestirim hatası z parametresinde, en düşük kestirim hatası ise x parametresinde gözlemlenmektedir. x parametresi bütün sanal kaynak çiftleri için kabul edilebilir aralıkta ve düşük belirsizlik oranlarıyla hesaplanırken, z parametresi çok daha fazla değişim göstermekte ve yüksek belirsizlik oranları vermektedir. Bu hatanın sebebi z parametresine karşı gelen tekil değerlerin küçük olmasıdır. Bu durum, z parametresinin çözüme olan etkisinin diğer parametrelere oranla daha az olduğunu ifade etmektedir. Çözümler sonucunda elde edilen koşul sayıları ise farklı sanal kaynakları ve farklı yineleme sayıları için farklılık göstermekle birlikte yaklaşık olarak 8 ile 15 arasında değişmektedir.

Gerçek değerlere en yakın sonuçlar Lx\_VS21 ile Ly\_VS21 sanal kaynak çiftinde elde edilmiştir. Kestirilen z parametresi için ise Lx\_VS10 ile Ly\_VS4 sanal kaynak çiftinde belirsizlik oranının daha az olduğu görülmektedir. Bu örnekte saçılmış dalga alanı toplam dalga alanından bağımsız üretildiğinden ve saçıcıya yakın alıcılarda genlik en yüksek olduğundan, saçıcıya yakın sanal kaynaklarda belirsizlik daha az elde edilmiştir. Yöntemin toplam dalga alanının kayıt edildiği gerçek verilere uygulamasında saçılmış dalga alanı toplam dalga alanından süzgeçleme (frekans-dalga sayısı süzgeci, uyum süzgeci vb) yolu ile elde edileceğinden bu durum farklılık gösterebilir. Elde edilen değerler çizelge 4.2 de sunulmaktadır.

**Çizelge 4. 2 :** Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parametre ortalamaları, model ve veri hata oranları.

	<b>Gerçek Konum</b>	<b>IL</b>	<b>VS X10 Y4</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS X21 Y1</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS X1 Y21</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS X21 Y21</b>	<b>Em(%)</b>	<b>Avg.</b>	<b>Em(%)</b>
<b>x (m)</b>	<b>14.5</b>	<b>15</b>	<b>14.2553</b>	<b>1.6876</b>	<b>14.2307</b>	<b>1.8572</b>	<b>14.3578</b>	<b>0.9807</b>	<b>14.2329</b>	<b>1.8421</b>	<b>14.2692</b>	<b>1.5917</b>
<b>y (m)</b>	<b>4.5</b>	<b>5</b>	<b>4.6919</b>	<b>4.2644</b>	<b>4.6320</b>	<b>2.9333</b>	<b>4.4227</b>	<b>1.7178</b>	<b>4.4498</b>	<b>1.1156</b>	<b>4.5491</b>	<b>1.0911</b>
<b>z (m)</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2.3336</b>	<b>16.6800</b>	<b>1.6138</b>	<b>19.31</b>	<b>1.6302</b>	<b>18.4900</b>	<b>1.9695</b>	<b>1.5250</b>	<b>1.8868</b>	<b>5.6600</b>
<b><math>\pm\sigma_x</math></b>			<b>0.17</b>		<b>0.09</b>		<b>0.06</b>		<b>0.13</b>		<b>0.11</b>	
<b><math>\pm\sigma_y</math></b>			<b>0.22</b>		<b>0.07</b>		<b>0.42</b>		<b>0.38</b>		<b>0.27</b>	
<b><math>\pm\sigma_z</math></b>			<b>4.08</b>		<b>7.40</b>		<b>11.91</b>		<b>9.25</b>		<b>8.16</b>	
<b>Et</b>			<b>0.0758</b>		<b>0.0655</b>		<b>0.0727</b>		<b>0.0594</b>			

## 5. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMİŞ YAPAY SİSMOGRAMLARDAN SAÇICI KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ

### 5.1. Üç Boyutlu Model

Yöntemin toplam dalga alanında uygulanması amacıyla sonlu farklar yöntemi ile elastik dalga yayılımını modelleyen bir program (Bohlen, 2012) kullanılarak yarı sonsuz ortamda modellenmiş olan toplam dalga alanı içeren yapay bir veri kullanılmıştır. Veri, birbirine dik X ve Y doğrultularında 25 adet alıcı bulunduran iki hat üzerinde üç boyutlu olarak oluşturulmuştur (Şekil 5.1). X hattı, Y doğrultusunda 3. metrede, X hattı ise Y doğrultusunda 8. metrede yer almaktadır. Alıcılar arası mesafe 1m, ofset 5m'dir. Zaman örnekleme 0.1ms, toplam kayıt süresi ise 0.2's dir. Saçıcı, x doğrultusunda 12.5m, y doğrultusunda 11.5m, z doğrultusunda 3.5m konumlarında bulunmaktadır ve eni, genişliği ve boyu sırasıyla 3m, 3m ve 3m'dir. Yüzey dalgası hızı ise sismogramda doğrudan gelen Rayleigh dalgalarının eğimlerinin üzerinden 320 m/s olarak belirlenmiştir. Verinin baskın frekansı 60 Hz civarındadır. Kaynak,  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  konumlarında bulunmaktadır.

**Çizelge 5. 1 :** Saçılmış dalga alanının hesaplanmasında kullanılan ortam parametreleri.

	<b>Artalan</b>	<b>Saçıcı</b>
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2800</b>	<b>2300</b>
<b><math>V_p</math> (m/s)</b>	<b>600</b>	<b>450</b>
<b><math>V_s</math> (m/s)</b>	<b>350</b>	<b>270</b>

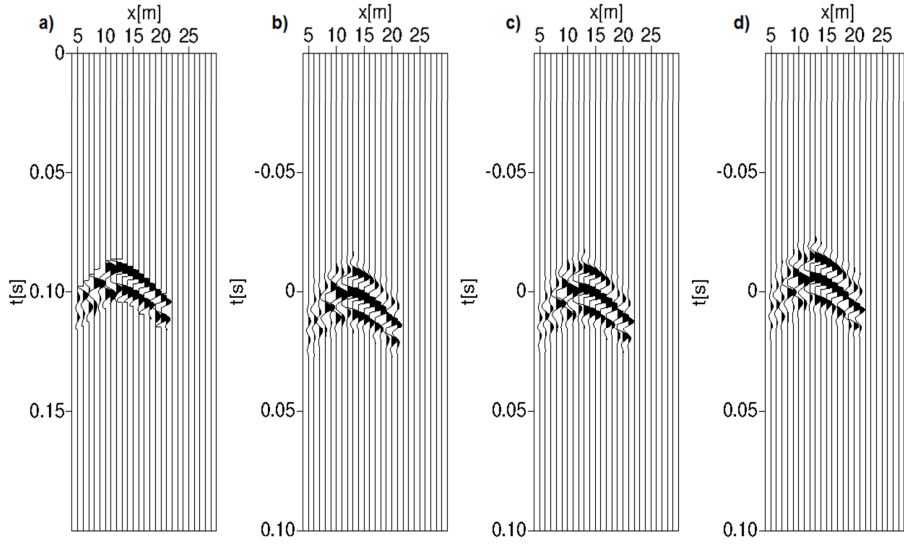
Şekil 5.2'de x ve y doğrultularında hesaplanan yapay sismogramlar görüntülenmektedir. Toplam dalga alanında doğrudan gelen yüzey dalgaları varışları baskındır, bu yüzden saçılmış yüzey dalgaları doğrudan gelen yüzey dalgaları tarafından örtülmektedir.



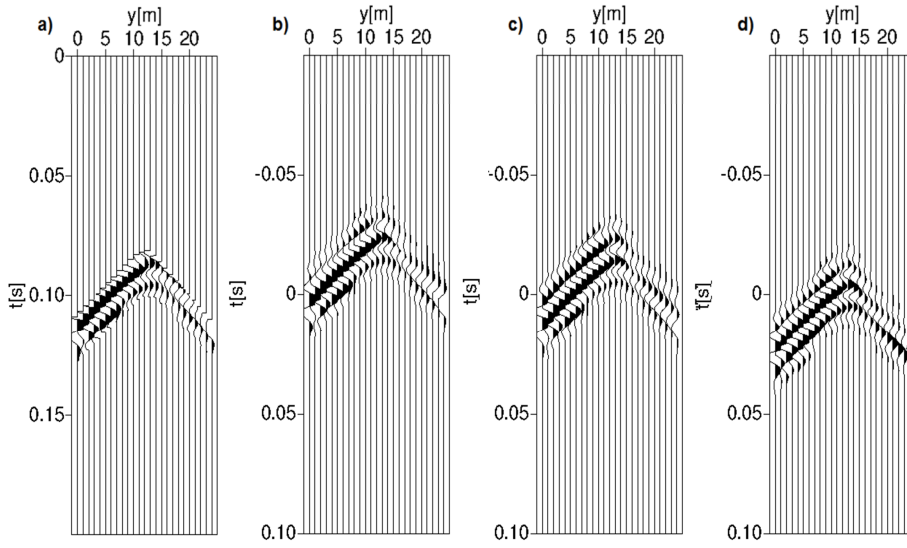
## 5.2. Saçıcı Konumunun Kestirilmesi

Saçıcı konumunun kestirilmesi amacıyla çapraz ilişki zamanlarının elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 5.2’de verilen sismogramlarda atış-alıcı düzeni için varış zamanları bulunmaktadır. Bu sismik kayıttın üzerinde bir iz sanal kaynak olarak seçilip bağıntı 3.1 ile verilen çapraz ilişki işlemi uygulandığında, çapraz ilişki zamanları elde edilir. Ancak bu veride saçılmış yüzey dalgası alanı, doğrudan gelen yüzey dalgası varışları tarafından örtülmüştür (Şekil 5.2). Doğrudan gelen yüzey dalgasının eğimi ve frekans içeriği saçılmış yüzey dalgasına yakındır ve doğrudan varışların veriden ayrılması saçılmış dalga alanının da bir kısmının veya tamamının giderilmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden, saçılmış dalga alanının sadece bir kısmı veriden ayrılabilmiştir. Bunun gibi durumlarda, çapraz ilişki zamanlarının sadece bir kanadının okunup diğer kanat için simetriği kullanılabilir, ancak hiperbolün tepe noktasının bilinmesi gerekmektedir. X yönündeki alıcı hattı için hiperbolün sadece bir bölümü elde edilebilmiştir. Buna bağlı olarak, 7.-17. alıcılar arasındaki çapraz ilişki zamanları okunmuştur. 8. alıcıda hiperbolün tepe noktası görülebildiği için 9.-17. alıcılar arasındaki değerler okunup simetriği alınmıştır (Şekil 5.3 b-d). Y yönündeki alıcı hattı için ise saçılmış dalga alanının ayrılabilen kısmı yeterli olmuş ve 1.-25. alıcılar arasında çapraz ilişki zamanları elde edilmiştir (Şekil 5.4 b-d). Bu amaçla, mute işlemi uygulanmış ve sismogramın istenilen kısmı haricinde kalan kısımlar sıfırlanarak saçılmış yüzey dalgası alanı veriden izole edilmiştir.

Elde edilen fiziksel olmayan saçılmış dalga alanı varış zamanları kayıt üzerinden okunarak gözlenen varış zamanları ( $t^{obs}$ ) elde edilmiştir. Eşitlik 3.10’da verilen genelleştirilmiş ters çözüm ifadesi ile ters çözüm işlemi gerçekleştirilerek saçıcı konumları hesaplanmıştır. Saçıcının x, y, z konum bilgisini içeren model parametre vektörünü hesaplamak için başlangıç parametreleri  $x_0$ ,  $y_0$  ve  $z_0$  sırasıyla 20m, 20m ve 10m seçilmiştir. Sönüm parametresi  $\beta$  ise en küçük tekil özdeğerin mertebesinde seçilmiştir ve bütün çözümler için 0.001 olarak kullanılmıştır. Ters çözüm işlemi, farklı sanal kaynak çiftleri için tekrarlanmıştır. İşlem Lx\_VS8 ile Ly\_VS6; Lx\_VS10 ile Ly\_VS11 ve Lx\_VS13 ile Ly\_VS2 sanal kaynak çiftleri için hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.5 - 5.7). Burada, 0. iterasyona karşılık gelen değerler, ters çözüm işlemi için seçilen başlangıç parametreleridir. Her hesaplama için 8 iterasyon gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.3 :** (a) X yönündeki alıcı hattında mute işlemi ile toplam dalga alanından ayrılan saçılmış yüzey dalgası (b), (c) ve (d); 8. [12m] , 10. [14m] ve 13. [17m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış dalga alanları.



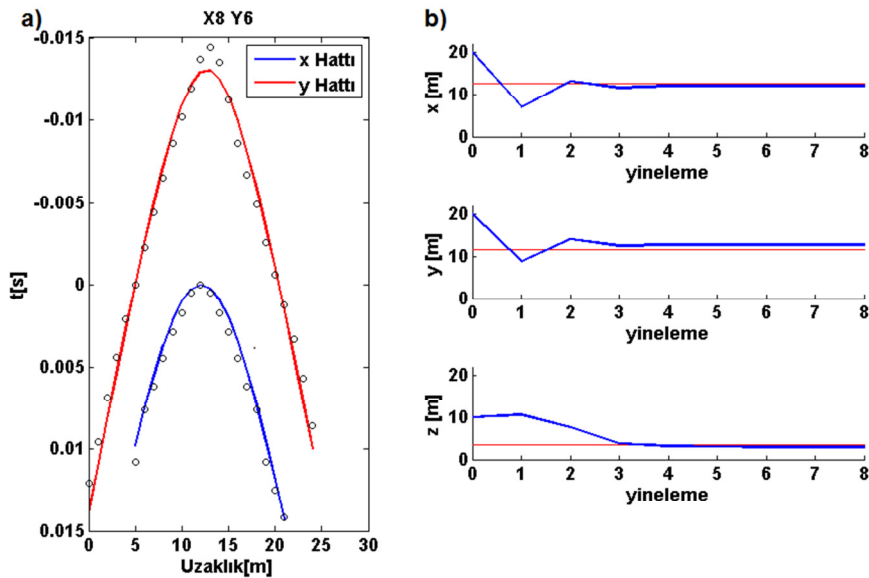
**Şekil 5.4 :** (a) Y yönündeki alıcı hattı boyunca mute işlemi ile toplam dalga alanından ayrılan saçılmış yüzey dalgası (b), (c) ve (d); 2. [2m] , 6. [6m] ve 11. [11m] sanal kaynaklar için çapraz ilişki sonucu elde edilmiş saçılmış dalga alanları.

Lx\_VS8 ile Ly\_VS6 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.5). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 1.2838 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x, y, z)=(12.5m, 11.5m, 3.5m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z

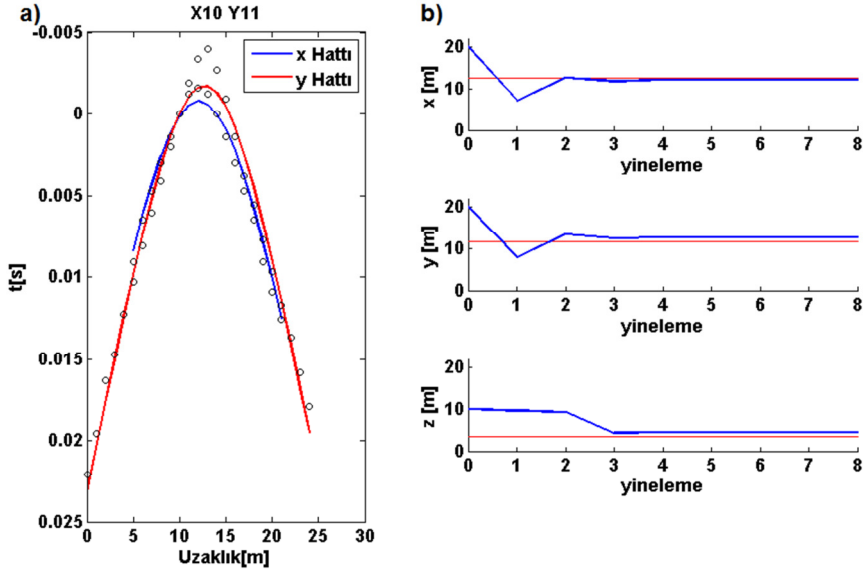
için sırasıyla 12.06m, 12.68m ve 2.94m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %3.49, %10.33 ve %15.79 olarak belirlenmiştir.

Lx\_VS10 ile Ly\_VS11 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.6). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.9158 olarak belirlenmiştir. Ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 12.10m, 12.66m ve 4.42m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %3.13, %10.14 ve %26.56 olarak belirlenmiştir.

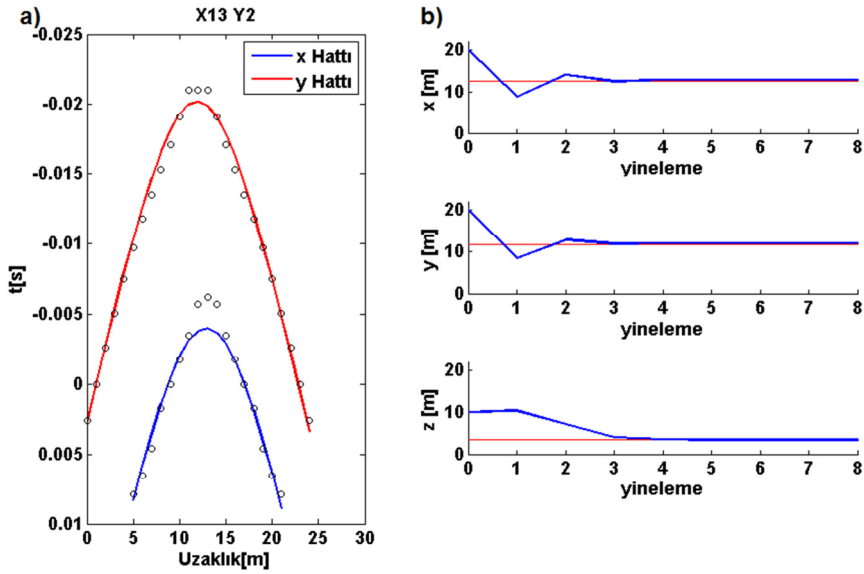
Lx\_VS13 ile Ly\_VS2 sanal kaynak çiftinden elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.7). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.6152 olarak belirlenmiştir. Ters çözüm sonucu saçıcı konumları x, y ve z için sırasıyla 12.88m, 11.88m ve 3.36m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x, y ve z için sırasıyla %3.04 %3.38 ve %3.88 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 5.5 :** x ekseninde 8. (Lx\_VS8) ve y ekseninde 6. (Ly\_VS6) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

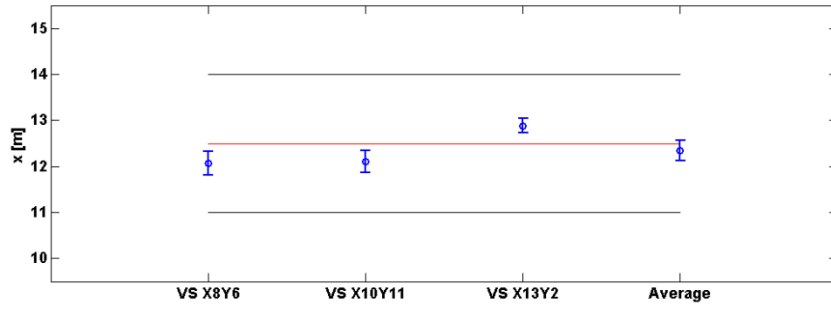


**Şekil 5.6 :** x ekseninde 10. ( $Lx\_VS10$ ) ve y ekseninde 11. ( $Ly\_VS11$ ) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

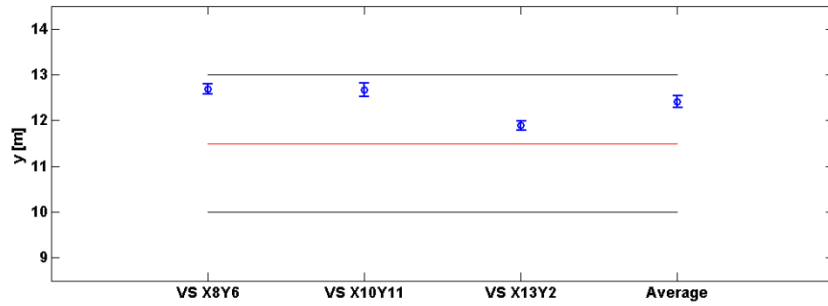


**Şekil 5.7 :** x ekseninde 13. ( $Lx\_VS13$ ) ve y ekseninde 2. ( $Ly\_VS2$ ) sanal kaynaklar için gerçekleştirilen ters çözüm işlemi ile elde edilen sonuçlar. a) x (mavi) ve y (kırmızı) hattı boyunca gözlenen (içi boş nokta) ve hesaplanan (sürekli çizgi) zamanlar, b) her bir yineleme adımında kestirilen model parametreleri (mavi). Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

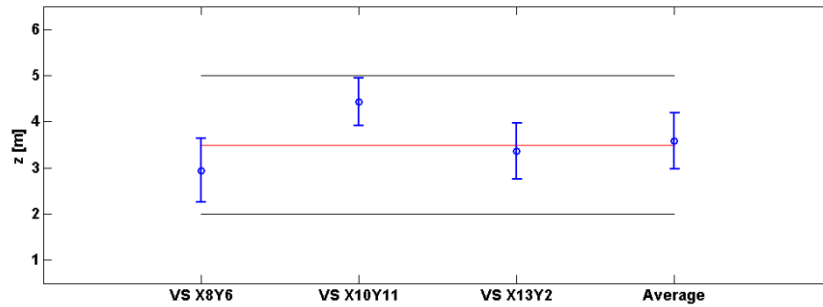
Ters çözüm işlemi sonucunda kestirilen parametrelerin gerçek değerlere yakın olarak elde edildiği gözlenmektedir. Kestirilen model parametrelerindeki belirsizliğin hesaplanması için 3.11 ve 3.12 eşitlikleri kullanılarak kovaryans matrisi kullanılmıştır. Kovaryans matrisinin köşegen değerlerinde elde edilen varyansın kare kökünden standart sapma hesaplanarak her bir model parametresine karşılık gelen belirsizlik elde edilmiştir. Model parametrelerindeki belirsizlik %95 güven aralığı dikkate alınarak  $1.96\sigma$  olarak hesaplanmıştır. Bütün sanal kaynak alıcı çiftleri için hesaplanan belirsizlikler Şekil 5.8-5.10'da verilmektedir.



**Şekil 5.8 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.



**Şekil 5.9 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının y konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının y konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.



**Şekil 5.10 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, en yüksek kestirim hatası z parametresinde, en düşük kestirim hatası ise y parametresinde gözlemlenmektedir ve x parametresi için hesaplanan değerler de y parametresine yakın güvenilirliğe sahiptir. Hesaplanan z parametresi için elde edilen belirsizlik oranları x ve y parametrelerine göre daha yüksektir. Bunun sebebi, z parametresine karşılık gelen tekil değerin daha küçük olmasıdır ve bu durum z parametresinin çözüme olan etkisinin diğerlerine oranla daha az olduğunu ifade etmektedir. Gerçek değerlere en yakın sonuçlar Lx\_VS13 ile Ly\_VS2 sanal kaynak çiftinde elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, birbirinden uzak olan sanal kaynakların daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Bölüm 4'te alıcı hatlarının ucunda bulunan Lx\_VS21 ve Ly\_VS21 sanal kaynak çifti ile elde edilen sonuçlar da bu gözlemi desteklemektedir (Bölüm 4; Şekil 4.8 ve 4.11). Kestirilen z parametresi için en düşük belirsizlik değerleri ise Lx\_VS10 ile Ly\_VS11 sanal kaynak çifti için gözlemlenmektedir. Bu durum ise saçıcıya yakın olarak seçilen sanal kaynaklar için daha düşük belirsizlik değerleri beklenebileceğini göstermektedir. Elde edilen değerler çizelge 5.2'de sunulmaktadır.

**Çizelge 5.2 :** Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parametre oranları, model ve hata oranları.

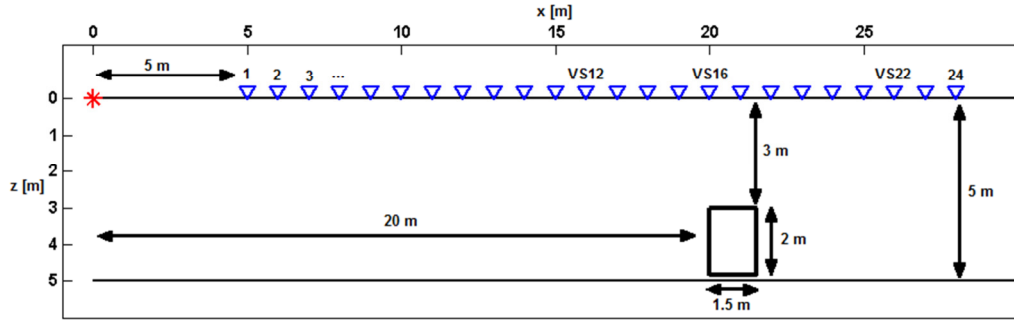
	<b>Gerçek Konum</b>	<b>IL</b>	<b>VS X8Y6</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS X10Y11</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS X13Y2</b>	<b>Em(%)</b>	<b>Avg.</b>	<b>Em(%)</b>
<b>x (m)</b>	<b>12.5</b>	<b>20</b>	<b>12.0626</b>	<b>3.4992</b>	<b>12.1083</b>	<b>3.1336</b>	<b>12.8812</b>	<b>3.0495</b>	<b>12.3506</b>	<b>1.1952</b>
<b>y (m)</b>	<b>11.5</b>	<b>20</b>	<b>12.6888</b>	<b>10.3373</b>	<b>12.6669</b>	<b>10.1469</b>	<b>11.8894</b>	<b>3.3860</b>	<b>12.4150</b>	<b>7.9565</b>
<b>z (m)</b>	<b>3.5</b>	<b>10</b>	<b>2.9472</b>	<b>15.7942</b>	<b>4.4299</b>	<b>26.5685</b>	<b>3.3641</b>	<b>3.8828</b>	<b>3.5804</b>	<b>2.2971</b>
<b><math>\pm\sigma_x</math></b>			<b>0.1293</b>		<b>0.1231</b>		<b>0.0797</b>		<b>0.1128</b>	
<b><math>\pm\sigma_y</math></b>			<b>0.0567</b>		<b>0.0773</b>		<b>0.0548</b>		<b>0.0637</b>	
<b><math>\pm\sigma_z</math></b>			<b>0.3552</b>		<b>0.2645</b>		<b>0.3085</b>		<b>0.3116</b>	
<b>Et</b>			<b>1.2838</b>		<b>0.9158</b>		<b>0.6152</b>			



## 6. 2 BOYUTLU GERÇEK VERİ UYGULAMASI

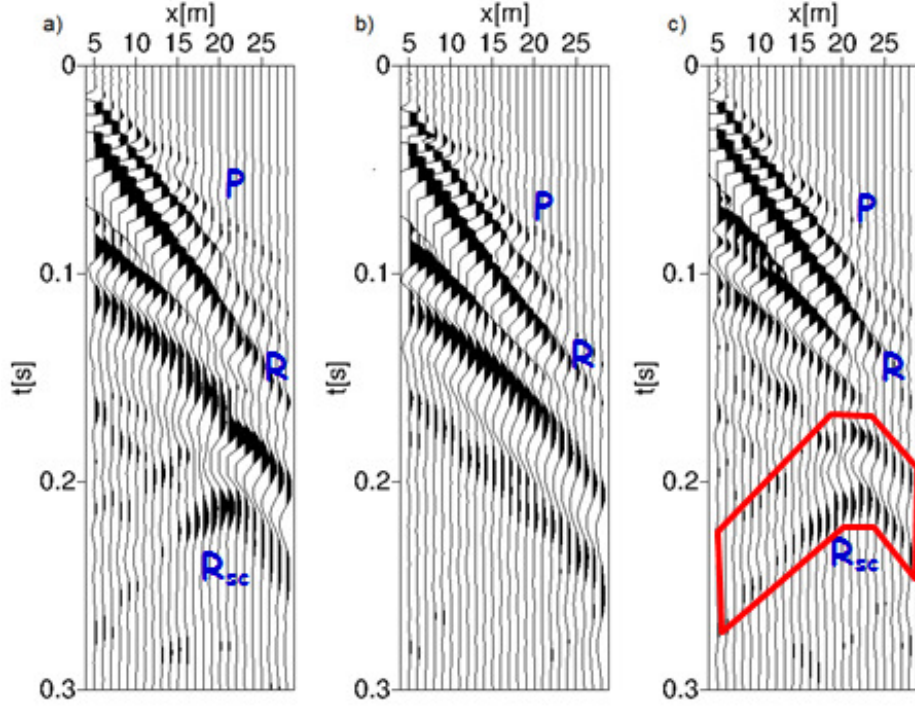
### 6.1. Ortam Bilgileri ve Saçılmış Dalga Alanının Eldesi

İki boyutlu bir saçıcının konumlarının tespit edilmesi amacıyla aynı işlem, gerçek veri üzerinde uygulanmıştır. Veri, önceden bilinen bir boşluk üzerinde, BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) tarafından Jargeau bölgesi, Loiret, Fransa'da toplanmıştır (Leparoux ve diğ., 2000). Veri 63 m uzunluğundaki bir profil boyunca 24 alıcı ile toplanmıştır. Zaman örnekleme, ofset, atış ve alıcı grup aralıkları sırasıyla 1 ms, 5 m, 1m ve 1 m dir. Saçıcı olarak davranan tünel, 3 m derinlikte ve yüksekliği ve genişliği sırasıyla 2 m ve 1.5 m dir. Verinin baskın frekansı 40 Hz dir. Rayleigh dalga hızı ise 180m/s olarak bulunmuştur (Şekil 6.1).



**Şekil 6.1 :** Kaynak - alıcı düzeni ve saçıcının şematik gösterimi. Kaynak (yıldız) 0 konumunda, alıcılar (üçgenler) 5m ile 28m arasında ve saçıcı (dikdörtgen)  $x=20.75$  m,  $z=4$  m konumlarında bulunmaktadır. Sanal kaynak olarak 12., 16. ve 22. alıcılar seçilmiştir.

Yüzey dalgalarının saçılan dalga alanından ayrılması için saçıcının üzerinde bulunan 19. atış kayıdından, saçılma gözlenmeyen 10. atış kaydı çıkarılmıştır. Burada 19. atış toplam dalga alanı, 10. atış ise doğrudan dalga alanı olarak düşünülmüştür (Şekil 6.2a-b). Toplam dalga alanı ile doğrudan dalga alanının farkları alındığında saçılmış dalga alanı elde edilmiştir (Şekil 6.2c). Saçılma haricindeki varışlara ihtiyaç duyulmadığı için, saçılma hiperbolü haricindeki varışlar mute işlemi ile ayrılmıştır ve sadece saçılmış Rayleigh dalga alanının bulunduğu bir sismik kayıt elde edilmiştir (Şekil 6.3a).

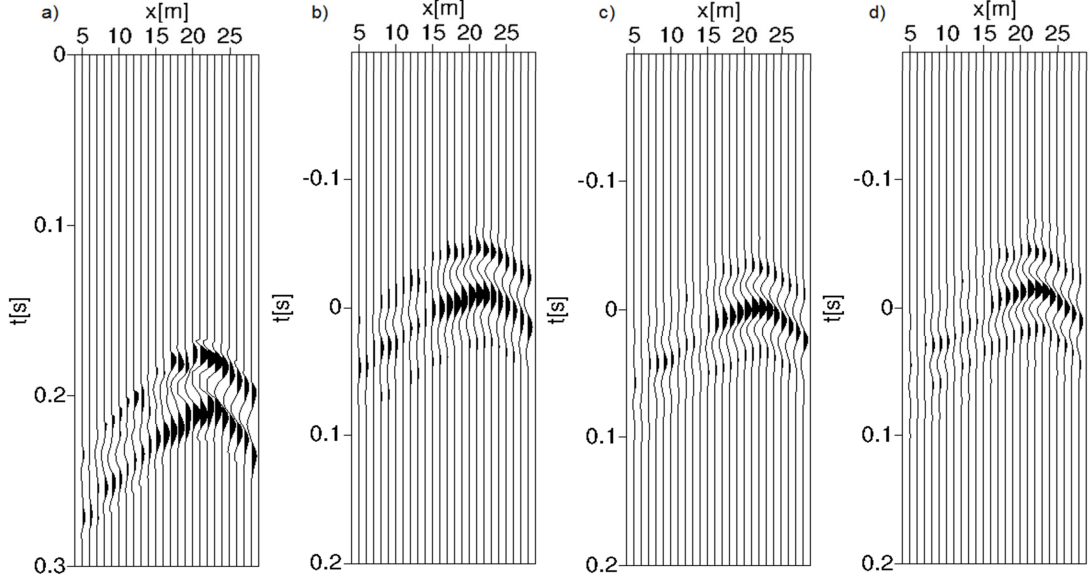


**Şekil 6.2 :** Kullanılan atış kayıtları a) Toplam dalga alanı olarak kabul edilen 19. atış. b) Doğrudan dalga alanı olarak kabul edilen 10. atış. c) 2a ve 2b nin farkından elde edilen saçılmış dalga alanı. P cisim dalgaları için doğrudan varışları, R yüzey dalgaları için doğrudan varışları, Rsc ise saçılan yüzey dalgalarını ifade etmektedir. İşaretili alan ise veriden izole edilen saçılmış yüzey dalgası alanını ifade etmektedir.

## 6.2. Saçıcı Konumunun Kestirilmesi

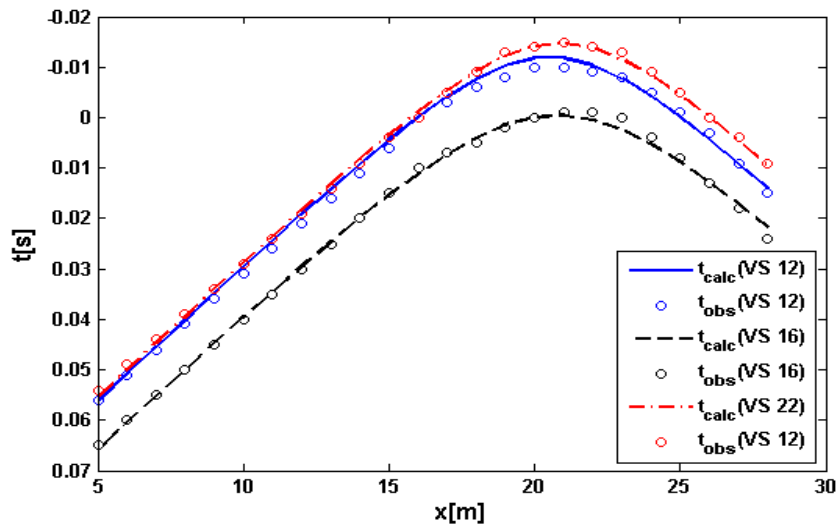
Saçıcı konumunun kestirilmesi amacıyla bölüm 6.1’de toplam dalga alanından ayrılan saçılmış yüzey dalgasının kullanılarak çapraz ilişki zamanları gerekmektedir. Bu sismik kayıt üzerindeki seyahat zamanları, seçilen 12., 16. ve 22. sanal kaynaklara göre bağıntı 3.1 ile verilen çapraz ilişki işlemi uygulanmış ve çapraz ilişki zamanları elde edilmiştir (Şekil 6.3b-d).

Elde edilen fiziksel olmayan saçılmış dalga alanı varış zamanları kayıt üzerinden okunarak gözlenen varış zamanları ( $t^{obs}$ ) elde edilmiştir. Çapraz ilişki zamanlarından varış zamanlarının okunması için, uyumun en yüksek olduğu maksimum genlikleri seçilmiştir. Eşitlik 3.10’da verilen genelleştirilmiş ters çözüm ifadesi ile ters çözüm işlemi gerçekleştirilerek saçıcı konumları hesaplanmıştır.

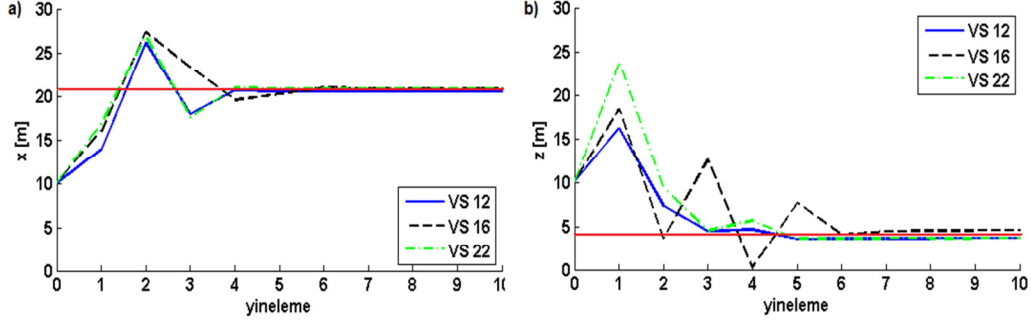


**Şekil 6.3 :** a)Sismogramdan ayrılarak elde edilen saçılmış dalga alanı ve seçilen b) VS12 [16m] c) VS16 [20m] d) VS22 [26m] sanal kaynakları için çapraz ilişki sonucu elde edilen çapraz ilişki zamanları.

Saçıcının x ve z konum bilgisini içeren model parametre vektörünü hesaplamak için başlangıç parametreleri  $x_0$  ve  $z_0$  sırasıyla 10m ve 10m seçilmiştir. Sönüm parametresi  $\beta$  ise en küçük tekil özdeğerin mertebesinde seçilmiştir. Ters çözüm işlemi, 12. [16m], 16. [20m] ve 22. [26m] sanal kaynaklar için tekrarlanmıştır. Burada, 0. iterasyona karşılık gelen değerler, ters çözüm işlemi için seçilen başlangıç parametreleridir. Her hesaplama için 10 iterasyon gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4–6.5).



**Şekil 6.4 :** Gözlemlenen (nokta) ve hesaplanan (çizgi) varış zamanları. Hesaplamalar, 12, 16 ve 22. sanal kaynaklar için yapılmıştır.



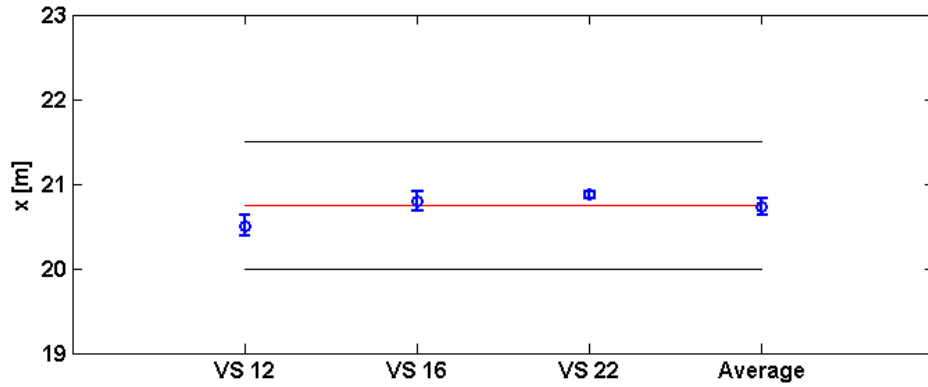
**Şekil 6.5 :** a)x ve b)z için kestirilen parametre değerleri. 0. iterasyon, başlangıç değerini ifade etmektedir. Kırmızı çizgi model parametresinin gerçek değerini göstermektedir.

12. sanal kaynaktan elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 6.4). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.2938 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x,z)=(20.75m, 4m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x ve z için sırasıyla 20.50m, 3.62m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x ve z için sırasıyla %1.16 ve %9.38 olarak belirlenmiştir.

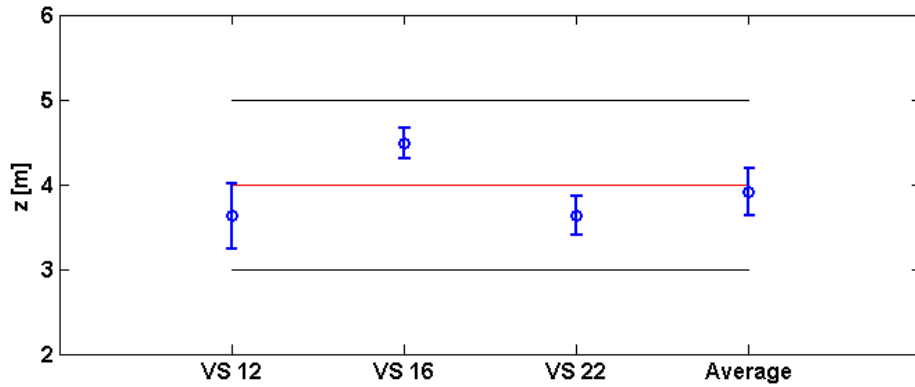
16. sanal kaynaktan elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 6.4). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0960 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x,z)=(20.75m, 4m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x ve z için sırasıyla 20.80m, 4.48m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x ve z için sırasıyla %0.24 ve %12.2 olarak belirlenmiştir.

22. sanal kaynaktan elde edilen seyahat zamanlarının çözümü sonucu gözlenen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 6.4). Uyumlarının sayısal ölçüsü eşitlik 3.13 ile hesaplanmıştır ve toplam hata oranı 0.0941 olarak belirlenmiştir. Saçıcının gerçek konumu orta nokta değer olarak  $(x,z)=(20.75m, 4m)$  olup, ters çözüm sonucu saçıcı konumları x ve z için sırasıyla 20.87m, 3.63m olarak kestirilmiştir. Parametrelerdeki kestirim hatası ise eşitlik 3.14 kullanarak hesaplanmış ve model parametrelerindeki hata x ve z için sırasıyla %0.58 ve %9.13 olarak belirlenmiştir.

Ters çözüm işlemi sonucunda kestirilen parametrelerin gerçek değerlere yakın olarak elde edildiği gözlenmektedir. Kestirilen model parametrelerindeki belirsizliğin hesaplanması için 3.11 ve 3.12 eşitlikleri kullanılarak kovaryans matrisi kullanılmıştır. Kovaryans matrisinin köşegen değerlerinde elde edilen varyansın kare kökünden standart sapma hesaplanarak her bir model parametresine karşılık gelen belirsizlik elde edilmiştir. Model parametrelerindeki belirsizlik %95 güven aralığı dikkate alınarak  $1.96\sigma$  olarak hesaplanmıştır. Bütün sanal kaynak alıcı çiftleri için hesaplanan belirsizlikler Şekil 6.6 ve 6.7’de verilmektedir.



**Şekil 6.6 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının x konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının x konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.



**Şekil 6.7 :** Seçilen sanal kaynak konumları için saçıcının z konum parametresi kestirimleri ve %95 güvenlik aralıkları. Kırmızı çizgi saçıcının z konumundaki gerçek orta nokta değerini göstermektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, x parametresinin kestiriminin z parametresine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. x parametresi bütün sanal kaynak çiftleri için düşük belirsizlik oranlarıyla hesaplanırken, z parametresi çok daha fazla değişim göstermekte ve yüksek belirsizlik oranları vermektedir. Bu hatanın sebebi z

parametresine karşı gelen tekil değerin küçük olmasıdır. Bu durum, z parametresinin çözüme olan etkisinin diğer parametrelere oranla daha az olduğunu ifade etmektedir. 12. sanal kaynak için z parametresindeki belirsizliğin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak 12. alıcıya karşılık gelen saçılmış dalga için dalga formunun diğerlerine kıyasla daha fazla bozulduğu söylenbilir. 16. sanal kaynak ise saçıcıya yakın konumda bulunmaktadır, bu yüzden düşük belirsizlik değerleri vermektedir. Elde edilen değerler izelge 6.1'de sunulmaktadır.

**Çizelge 6. 1 :** Yapılan hesaplamalar sonucunda parametreler için elde edilen değerler, kovaryans değerleri, parametre ortalamaları, model ve veri hata oranları.

	<b>Gerçek Konum</b>	<b>IL</b>	<b>VS 12</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS 16</b>	<b>Em(%)</b>	<b>VS 22</b>	<b>Em(%)</b>	<b>Avg.</b>	<b>Em(%)</b>
<b>x (m)</b>	<b>20.75</b>	<b>10</b>	<b>20.5075</b>	<b>1.1686</b>	<b>20.8002</b>	<b>0.2419</b>	<b>20.8718</b>	<b>0.5869</b>	<b>20.7264</b>	<b>0.1132</b>
<b>y (m)</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>3.6247</b>	<b>9.3825</b>	<b>4.4880</b>	<b>12.2000</b>	<b>3.6347</b>	<b>9.1324</b>	<b>3.9158</b>	<b>2.1049</b>
<b><math>\pm\sigma_x</math></b>			<b>0.0600</b>		<b>0.0592</b>		<b>0.0216</b>		<b>0.0503</b>	
<b><math>\pm\sigma_y</math></b>			<b>0.1986</b>		<b>0.0936</b>		<b>0.1155</b>		<b>0.1432</b>	
<b>Et</b>			<b>0.2938</b>		<b>0.0960</b>		<b>0.0940</b>			



## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sismik interferometri yönteminden esinlenerek Harmankaya ve diğ. (2013) tarafından iki boyutlu saçıcı konumu kestirimi için geliştirilen yöntemden faydalanarak saçılmış yüzey dalgaları kullanılarak saçıcıların üç boyutlu konumları kestirilmeye çalışılmıştır. Yöntem, hem modellenen saçılmış dalga alanları ile, hem de gerçek veri ile kullanılmış ve saçıcı konumları kestirilmiştir.

4. bölümde integral yöntemi ile üretilmiş olan saçılmış dalga alanı kullanılmıştır. Bu veride saçılmış dalga alanı ayrı olarak oluşturulduğu için yüzey dalgalarının ayrılması gerekmemektedir. Saçılmış dalga alanları için seçilen sanal kaynaklar için çapraz ilişki işlemi uygulanmış ve çapraz ilişki zamanları elde edilmiştir. Elde edilen çapraz ilişki zamanlarının varış zamanları okunarak ters çözüm işleminde kullanılmış ve saçıcı konumları kestirilmiştir. Elde edilen sonuçların gerçek konum değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

5. bölümde aynı işlem sonlu farklar yöntemi ile yarı sonsuz bir ortamda modellenen bir toplam dalga alanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu veride toplam dalga alanı bulunduğu için, saçılmış yüzey dalgasının bir kısmı doğrudan varışlar tarafından örtülmektedir. Bu doğrudan varışların frekans içeriği ve eğimi saçılmış yüzey dalgasına yakın olduğu için ayrılamamaktadır ve saçılmış yüzey dalgalarının tamamının kullanılması mümkün değildir. Bu yüzden, sadece doğrudan varışlar tarafından örtülmeyen kısmı, mute işlemi ile verinin geri kalanından izole edilerek kullanılabilmiştir. Çapraz ilişki zamanlarının elde edilemediği kısımlar için ise, çapraz ilişki zamanlarının bir kanadı okunmuş ve tepe noktasına göre simetrik olarak değerlendirilmiştir. Seçilen çapraz ilişki zamanlarının varış zamanları okunarak ters çözüm işleminde kullanılmış ve saçıcı konumları başarılı bir şekilde kestirilmiştir.

Son uygulama ise gerçek veri ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek veri kullanılırken yöntem uygulanmadan önce saçılmış dalga alanını elde edebilmek için yüzey dalgaları gibi doğrudan varışların veriden ayrılması gerekmektedir. Yüzey dalgalarının giderilmesi için toplam dalga alanını içeren bir sismogramdan, saçılmış

dalga alanı bulundurmeyen bir sismogram çıkarılarak saçılmış dalga alanı elde edilmiştir. Saçılmış dalga alanı ayrıldıktan sonra ise ilk bölümdeki gibi çapraz ilişki zamanlarının elde edilmesi ve ters çözüm işlemleri gerçekleştirilerek saçıcı konumu başarılı bir şekilde kestirilmiştir.

Hesaplamalar sonucunda kestirilen parametreler için  $z$  parametresinin diğer parametrelere göre ( $x$  ve  $y$ ) belirsizliğinin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun, iki sebebi vardır. Birincisi, alıcı doğrultularının sadece yüzeyde bulunması sonucunda kayıt edilen verilerin düşey yönde daha az bilgi taşıması ve buna bağlı olarak Jacobian matrisinde tekilliklerin oluşmasıdır. Buna bağlı olarak verinin  $z$  parametresi için eksik tanımlı olarak etki etmesi söz konusudur ve bu yüzden çözümleme etkisi daha zayıftır. İkinci olarak ise,  $z$  parametresinin sonuca olan etkisinin daha az olmasıdır. Eşitlik 3.2'de verilen interferometrik seyahat denklemi, saçıcının alıcılara olan uzaklığını ifade etmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda saçıcı genellikle sığ konumlarda bulunmaktadır ve bu durum yan doğrultulardaki parametrelerin ( $x$  ve  $y$ ) sayısal büyüklük olarak çözümde baskın hale gelmesine sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak,  $z$  parametresine karşılık gelen tekil değer daha küçük olmakta ve kestirimini olumsuz olarak etkilemektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda kullanılan yöntemin saçıcı konumu kestirimi için başarılı bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak konumunun bilindiği aktif kaynaklı sismik çalışmalarda saçılmış dalga alanı doğrudan kullanılarak ta saçıcı konumu belirlenebilir. Ancak karmaşık yer altı yapılarının varlığı durumunda ilk saçılmış dalga alanının gözlenememesi ancak buna karşılık tekrarlı saçılmış dalga alanlarından birinin daha iyi gözlenmiş olması gibi durumlarda tekrarlı saçılmış dalga alanının zaman denkleminin tam olarak ifade edilmesi gerekir. Oysa burada önerilen yöntemde bu tür detaylara gerek olmaksızın kullanılacak saçılmış dalga alanından saçıcı konumu kestirilebilir. İki alıcı hattı ile kayıt edilen saçılmış dalga alanı, saçıcı konumunun kestirimi için yeterlidir. Ayrıca, bu yöntem kaynak bilgisine gerek duymamakta ve kaynaktan saçıcıya olan yolun etkisinin giderilmesini sağlamaktadır. Eğer kaynak ile saçıcı arasındaki bölge karmaşık bir yapıdaysa, aradaki mesafe etkisinin azaltılması çözümün kalitesini arttırması açısından bir avantajdır. Ancak, yöntem zaman kaymalarından, gürültüden ve dalga şeklinin değişmesinden etkilenmekte ve sonuçlarda belirsizliklere veya hatalara yol açabilmektedir. Bu durumun önlenmesi için doğrudan gelen yüzey dalgalarının

süzgeçlenerek ayrılması sırasında oluşacak bozulmalara dikkat edilmesi, çapraz ilişki işlemi için bozulmamış ve gürültü içermeyen bir dalga formunun seçilmesi ve varış zamanlarının düzgün bir şekilde okunması gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- Al-fares, W., Bakalowicz, M., Guérin, R. ve Dukhan, M.** (2002). Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 51, 97–106.
- Bakulin, A., ve Calvert, R.** (2004). Virtual source: new method for imaging and 4D below complex overburden. In *2004 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists.
- Bakulin, A., ve Calvert, R.** (2006). The virtual source method: Theory and case study. *Geophysics*, 71(4), SI139-SI150.
- Bakulin, A., Mateeva, A., Mehta, K., Jorgensen, P., Ferrandis, J., Herhold, I. S. ve Lopez, J.** (2007). Virtual source applications to imaging and reservoir monitoring. *The Leading Edge*, 26(6), 732-740.
- Bohlen, T., De Nil, D., Köhn, D., Jetschny, S.** (2012). Seismic modeling with finite differences 3D – acoustic and viscoelastic version. Alındığı tarih: 14.12.2014, adres: [http://www.gpi.kit.edu/downloads/guide\\_sofi3D.pdf](http://www.gpi.kit.edu/downloads/guide_sofi3D.pdf)
- Bozdag, E. ve Kocaoglu A. H.** (2005). Estimation of site amplifications from shear-wave velocity profiles in Yesilyurt and Avcilar, Istanbul, by frequency-wavenumber analysis of microtremors. *Journal of Seismology*, 9 (1), 87-98.
- Canitez, N., & Toksöz, M. N.** (1971). Focal mechanism and source depth of earthquakes from body-and surface-wave data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), 1369-1379.
- Campillo, M. ve Paul, A.** (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299, 547-549, doi:10.1126/science.1078551.
- Campman, X., van Wijk, K., Riyanti, C.D., Scales, J. ve Herman, G.** (2004). Imaging scattered seismic surface waves. *Near Surface Geophysics* 2(4), 223–230.
- Campman, X. ve Riyanti, C. D.** (2007). Non-linear inversion of scattered seismic surface waves, *Geophys. J. Int.*, 171, 1118-1125.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A., & Di Filippo, G.** (2010). Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*, 58(4), 685-695.
- Chai, H.Y., Phoon, K., Goh, S.H. ve Wei, C.F.** (2012). Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities. *Journal Applied Geophysics* 83, 107–119, doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.05.005. ISSN: 0926-9851.
- Chang, S. J., & Baag, C. E.** (2005). Crustal structure in southern Korea from joint analysis of teleseismic receiver functions and surface-wave

dispersion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(4), 1516-1534.

- Cong, L., & Mitchell, B. J.** (1999). Seismic velocity and Q structure of the Middle Eastern crust and upper mantle from surface-wave dispersion and attenuation. In *Q of the Earth: Global, Regional, and Laboratory Studies* (pp. 503-538). Birkhäuser Basel.
- Curtis, A., Erstoff, P., Sato, H., Snieder, R. ve Wapenaar, K.** (2006). Seismic interferometry – turning noise into signal, *The Leading Edge*, 25, no. 9, 1082-1092.
- Debeglia, N., Bitri, A. ve Thierry, P.** (2006). Karst investigations using microgravity and MASW: application to Orleans, France. *Near Surface Geophysics* 4, 215–225.
- Dong, S., He, R. ve Schuster, G. T.** (2006), Interferometric prediction and leastsquares subtraction of surface waves, 76th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2783–2786.
- Draganov, D., Wapenaar, K., Mulder, W., Singer, J. ve Verdel, A.** (2007). Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements: *Geophysical Research Letters*, 34, L04305.
- Ekström, G.** (2006). Global detection and location of seismic sources by using surface waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1201-1212.
- Engelsfeld, T., Šumanovac, F., & Pavin, N.** (2008). Investigation of underground cavities in a two-layer model using the refraction seismic method. *Near Surface Geophysics*, 6(4), 221-231.
- Engelsfeld, T., Šumanovac, F., & Krstić, V.** (2011). Classification of near-surface anomalies in the seismic refraction method according to the shape of the time–distance graph: a theoretical approach. *Journal of applied geophysics*, 74(1), 59-68.
- Foti, S.** (2000). *Multi station methods for geotechnical characterisation using surface waves*, (doktora tezi), Politecnico di Torino.
- Gelis, C., Leparoux, D., Virieux, J., Bitri, A., Operto, S. ve Grandjean, G.** (2005). Numerical modeling of surface waves over shallow cavities, *J: Environ. Eng. Geophys.*, 10, 49-59.
- Grandjean, G. ve Leparoux, D.** (2004). The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: experimentation at a test site. *Journal of Applied Geophysics* 56(2), 93–106, doi: 10.1016/j.jappgeo.2004.04.004.
- Halliday, D. ve Curtis, A.** (2008). Seismic interferometry, surface waves and source distribution. *Geophysical Journal International*, 175(3), 1067-1087.
- Halliday, D. ve Curtis, A.** (2009). Seismic interferometry of scattered surface waves in attenuative media. *Geophysical Journal International*, 178(1), 419-446.

- Halliday, D., Curtis, A. ve Kragh, E.** (2008). Seismic surface waves in a suburban environment: Active and passive interferometric methods. *The Leading Edge*, 27(2), 210-218.
- Halliday, D. F., Curtis A., Robertsson J. O. A. ve van Manen D. J.** (2007). Interferometric surface-wave isolation and removal, *Geophysics*, 72, no. 5, A69–A73.
- Halliday, D. F., Curtis A., Vermeer P., Strobbia C., Glushchenko A., van Manen D. J. ve Robertsson J. O. A.** (2010). Interferometric ground-roll removal: Attenuation of scattered surface waves in single-sensor data, *Geophysics*, 75, no. 2, A15–A25.
- Harmankaya, U.** (2012). “Saçılmış yüzey dalgalarının sismik interferometrisi ile saçıcı konumunun belirlenmesi”, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Harmankaya, U., Kaslilar, A., Thorbecke, J., Wapenaar, K. ve Draganov, D.** (2013). Locating near-surface scatterers using non-physical scattered waves resulting from seismic interferometry. *Journal of Applied Geophysics* 91, 66–81, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.004.
- Herman, G. C., Milligan, P. A., Huggins, R. J. ve Rector, J. W.** (2000). Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves, *Geophysics*, 65, no. 1, 247-252.
- Hornby, B. E. ve Yu, J.** (2007). Interferometric imaging of a salt flank using walkaway VSP data. *The Leading Edge*, 26(6), 760-763.
- Kaslilar, A.** (2007). Inverse scattering of surface waves: imaging of near-surface heterogeneities. *Geophys. J. Int.*, 171, 352-367.
- Kaslilar, A., Harmankaya, U., Wapenaar, K. ve Draganov, D.** (2013). Estimating the location of a tunnel using correlation and inversion of Rayleigh wave scattering. *Geophysical Research Letters*, 40(23), 6084-6088.
- Kaslilar, A., Harmankaya, U., van Wijk, K., Wapenaar, K. ve Draganov, D.** (2014). Estimating location of scatterers using seismic interferometry of scattered rayleigh waves. *Near Surface Geophysics*, 12(6), 721-730.
- King, S. ve Curtis, A.** (2011). Velocity analysis using both reflections and refractions in seismic interferometry. *Geophysics*, 76(5), SA83-SA96.
- King, S. ve Curtis, A.** (2012). Suppressing nonphysical reflections in Green’s function estimates using source-receiver interferometry. *Geophysics*, 77(1), Q15-Q25.
- King, S., Curtis, A. ve Poole, T. L.** (2011). Interferometric velocity analysis using physical and nonphysical energy. *Geophysics*, 76(1), SA35-SA49.
- Kocaoglu, A. H. ve Firtana, K.** (2011). Estimation of shear wave velocity profiles by the inversion of spatial autocorrelation coefficients. *Journal of Seismology*, 15 (4), 613-624.
- Kovach, R. L.** (1978). Seismic surface waves and crustal and upper mantle structure. *Reviews of Geophysics*, 16(1), 1-13.

- Leparoux, D., Grandjean, G. ve Bitri, A.** (2000). Underground cavity detection: a new method based on seismic Rayleigh waves. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, *5*, 33-53.
- Meles, G. A. Ve Curtis, A.** (2013). Physical and non-physical energy in scattered wave source-receiver interferometry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *133*(6), 3790-3801.
- Menke, W.** (1989). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, 119-124.
- Mohanty P.R.** (2011). Numerical Modeling of P-Waves for Shallow Subsurface Cavities Associated with Old Abandoned Coal Workings. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* *16*(4), 165–175.
- Nazarian, S., Stokoe, K. H. ve Hudson, W. R.** (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems, *Tanns. Res. Rec.*, **930**, 38-45.
- Nuzzo, L., Leucci, G. ve Negri, S.** (2007). GPR, VES and refraction seismic surveys in the karstic area “Spedicaturo” near Nociglia (Lecce, Italy). *Near Surface Geophysics* *5* (1), 67–76.
- O’Neill, A.** (2003). Full waveform reflectivity for modeling, inversion and appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigations, Ph. D. Thesis, The University of Western Australia, Australia.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J.** (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, *64*(3), 800-808.
- Ravasi, M. ve Curtis, A.** (2013). Nonlinear scattering based imaging in elastic media: Theory, theorems, and imaging conditions. *Geophysics*, *78*(3), S137-S155.
- Rickers, F., A. Fichtner ve J. Trampert** (2012), Imaging mantle plumes with instantaneous phase measurements of diffracted waves, *Geophys. J. Int.*, *190*, 650–664, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05515.x.
- Ritzwoller, M., N. Shapiro, M. P. Barmin ve A. L. Levshin** (2002), Global surface wave diffraction tomography, *J. Geophys. Res.*, *107*(B12), 2335
- Rix, G. J., Hebel, G. L., & Orozco, M. C.** (2002). Near-surface Vs profiling in the New Madrid seismic zone using surface-wave methods. *Seismological Research Letters*, *73*(3), 380-392.
- Rodríguez-Castellanos, A., Sánchez-Sesma, F. J., Luzón, F., & Martín, R.** (2006). Multiple scattering of elastic waves by subsurface fractures and cavities. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*(4A), 1359-1374.
- Samyn, K., Bitri, A., & Grandjean, G.** (2013). Imaging a near-surface feature using cross-correlation analysis of multi-channel surface wave data. *Near Surface Geophysics*, *11*(1), 1-10.
- Snieder, R.** (1987). Surface wave holography. In *Seismic tomography* (pp. 323-337). Springer Netherlands.

- Snieder, R.** (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(4), 046610.
- Snieder, R., Van Wijk, K., Haney, M., & Calvert, R.** (2008). Cancellation of spurious arrivals in Green's function extraction and the generalized optical theorem. *Physical Review E*, 78(3), 036606.
- Snieder, R., Miyazawa, M., Slob, E., Vasconcelos, I., & Wapenaar, K.** (2009). A comparison of strategies for seismic interferometry. *Surveys in Geophysics*, 30(4-5), 503-523.
- Socco, L. V., Boiero, D., Foti, S., & Wisén, R.** (2009). Laterally constrained inversion of ground roll from seismic reflection records. *Geophysics*, 74(6), G35-G45.
- Socco, L. V., Jongmans, D., Boiero, D., Stocco, S., Maraschini, M., Tokeshi, K., & Hantz, D.** (2010). Geophysical investigation of the Sandalp rock avalanche deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 70(4), 277-291.
- Thorbecke, J., & Wapenaar, K.** (2007). On the relation between seismic interferometry and the migration resolution function. *Geophysics*, 72(6), T61-T66.
- Xu, C., & Butt, S. D.** (2006). Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain. *Journal of Applied Geophysics*, 59(2), 106-116.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad** : Aybars Yiğit Garan

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Bakırköy, 04/02/89

**E-Posta** : yigitgaran@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İTÜ, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği