SAÇILMIŞ DALGALARIN SİSMİK İNTERFEROMETRİSİ İLE YÜZEYE YAKIN SAÇICILARIN KONUMLARININ BELİRLENMESİ

A. Kaşlılar[1] ve U. Harmankaya[2]

[1] *Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Müh. Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
Email: kaslilar@itu.edu.tr

ÖZET:

Yüzeye yakın saçıcılar (karstik boşluklar, mağara, su rezervuarları, maden galerileri, tünel, sığınak, arkeolojik kalıntı vb.), yer üstündeki yük dağılımının veya hidrolojik rejimin değişmesi, veya depremler nedeniyle stabilitesini yitirip zayıflık zonları haline gelebilir ve güç santrallerinin (güneş, rüzgar, nükleer vb), yolların (kara veya demiryolu), binaların ve benzeri yapıların yapımı sırasında ve sonrasında risk oluşturup çevre hasarlarına neden olabilirler. Bu nedenlerle, potansiyel zayıflık zonlarının belirlenmesi, izlenmesi ve gerektiğinde stabil hale getirilmesi çevre hasarlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Saçıcılar, yer altında ilerleyen sismik dalgaların saçılmasına neden olur. Saçılan bu dalgalar yardımı ile yer altında bulunan saçıcı yapıların konumları kestirilebilir. Bu çalışmada, saçıcıların konumunu kestirmek amacıyla, sismik interferometri prensibine dayanan bir yöntem geliştirilmiş ve uygulanabilirliği yapay sismogramlar ile incelenmiştir. Sismik interferometri, en genel anlamda alıcılarda kayıt edilmiş sismik izlerin çapraz ilişki, evrişim veya ters evrişimlerinin hesaplanıp alıcılar arası Green fonksiyonlarının elde edilmesi işlemidir. Aktif ve pasif kaynaklı uygulamaları mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan yöntemde aktif kaynak ve ilişki türü sismik interferometri yöntemi dikkate alınmıştır. Saçıcı içeren ortamda elastik dalga yayılımı modellenmiş ve hesaplanan yapay sismogramdaki saçılmış dalga alanları kullanılarak interferometrik sismogramlar oluşturulmuştur. Saçılmış dalgaların interferometrik varış zamanlarının ters çözümü ile saçıcı konumları kestirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Saçıcı konumu kestirimi, sismik interferometri, saçılmış dalgalar, elastik dalga yayılımı, modelleme, ters çözüm.

1.GİRİŞ

Yüzeye yakın saçıcıları belirlemek için çeşitli jeofizik yöntemler (elektik özdirenç, yer radarı, gravite, sismik yansıma ve kırılma, yüzey dalgalarının analizi) mevcut olup, her birinin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yöntemlerin başarısı, çözünürlüğe ve incelenebilen derinliğe bağlıdır. Sismik yöntemler yardımı ile yüzeye yakın yapıların belirlenebilmesi için yüksek çözünürlüğe ihtiyaç vardır. Ayrıca aktif kaynakları her zaman hedeflenen noktaya konumlamak mümkün olmayabilir. Alternatif olarak aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgaları da yüzeye yakın yapıların belirlenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır (Boiero ve Socco, 2010; Kocaoğlu ve Fırtana, 2011). Yüzeye yakın saçıcıları belirlemek için kullanılan bir başka yöntem ise yüzeye yakın saçıcıların neden olduğu saçılmış cisim ve yüzey dalgalarıdır (Grandjean ve Leparoux, 2004; Gelis ve diğ., 2005; Mohanty, 2011; Snieder 1987; Herman ve diğ., 2000; Leparoux ve diğ., 2000; Campman ve diğ. 2004; Campman ve Riyanti, 2007; Kaslilar, 2007; Xia ve diğ., 2007; Chai ve diğ., 2012). Saçıcıların konumunu kestirmek için Harmankaya ve diğ., (2013) tarafından sismik interferometri prensibine dayanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntem, saçılmış dalgaların sismik interferometrisi ile elde edilen interferometrik seyahat zamanlarından ters çözüm yolu ile saçıcıların konumunu kestirmektedir.

Sismik interferometri en genel tanımı ile alıcılardaki kayıtları kullanıp çapraz ilişki (cross correlation), evrişim (convolution) veya ters evrişim (deconvolution) yolu ile yeni sismik yanıtlar (Green fomksiyonları) elde etmektir (Snieder, 2004; van Manen ve diğ., 2006; Wapenaar, 2004; Wapenaar ve Fokkema, 2006). Sismik interferometri, aktif ve pasif kaynaklı olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. İki alıcı arasında doğru bir Green fonksiyonu elde edebilmek için alıcıların kaynaklar ile çevrili olması gerekir. Eğer alıcılar her yönden ve eşit güçte kaynaklar tarafından çevrelenmezse hayalet varışlar olarak isimlendirilen (Snieder ve diğ., 2006) varışlar elde edilir. Ayrıca bazı varışlar beklenen yerlerinde de olmayabilirler. Bu gibi durumlarda Green fonksiyonlarının sadece belli kısımlarının, örneğin yüzey dalgalarının elde edilmesi hedeflenir. Harmankaya ve diğ., (2013) tarafından önerilen yöntemde yüzeyde yer alan tek bir aktif kaynak yardımı ile saçıcıların konumlarının kestirimi mümkün olmaktadır. Tek bir kaynak kullanılması nedeniyle elde edilen interferometrik varışlar, seçilen sanal kaynak konumuna bağlı olarak, hayalet varışlar olabilmektedir. Yöntem, basit bir modelden elde edilen yapay saçılmış dalga alanı üzerinde açıklanmış ve yanal süreksizlik içeren bir ortamda elastik dalga yayılımı modellenerek ortamda bulunan saçıcı ve köşe difraktör için konum kestirimi yapılmıştır. Saçıcının konumu yüzey dalgaları, köşe difraktörün konumu cisim dalgaları kullanılarak başarılı bir şekilde kestirilmiştir.

2. SİSMİK İNTERFEROMETRİ VE SAÇICI KONUMUNUN KESTİRİLMESİ

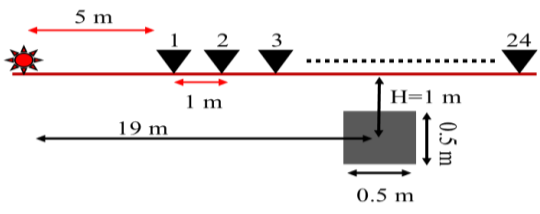
2.1. Yöntem

Saçıcıların konumunu kestirmek amacıyla sismik interferometri prensibine dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. Tek bir aktif kaynak ile elde edilen sismik kayıt üzerinden seçilen bir referans alıcı sanal kaynak (d^{VS}) olmak üzere, sanal kaynak ile diğer izler (d^{i}) arasında çapraz ilişki hesaplanarak interferometrik kayıt elde edilir. Bu işlem için çapraz ilişki bağıntısı kullanılır,

$$C_{d^i d^{VS}}(\tau) = \sum_n d^i(t_n) d^{VS}(t_n + \tau). \qquad (1)$$

Bağıntı (1)' in uygulanması ile kaynaktan saçıcıya olan ortak yollar giderilir ve hedef bölgeye yaklaşılmış olur. Bu şekilde elde edilen varışların bir kısmı hayalet varışlar olur.

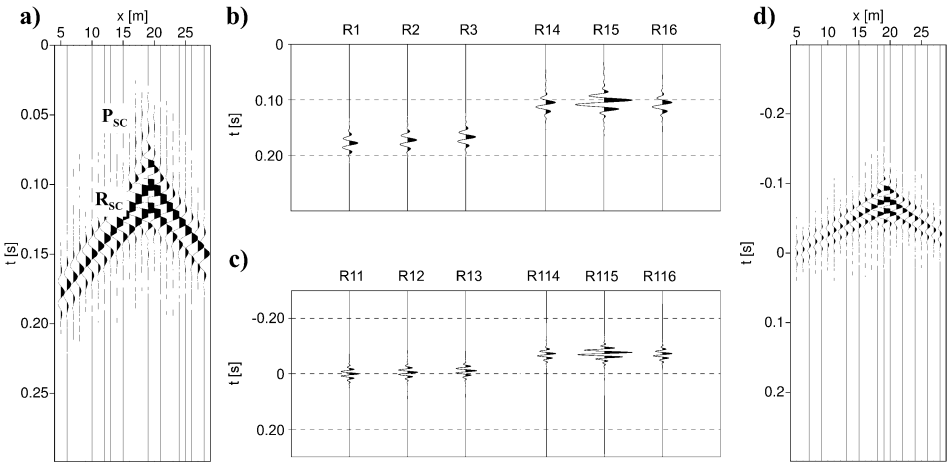
Yöntemi detaylı açıklamak amacıyla Kaslilar (2007)'de verilen dalga yayılımı modelleme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 1'de verilen geometri ve tablodaki parametreler kullanılarak saçılmış dalga alanı üretilmiştir (Şekil 2a). Elde edilen saçılmış dalga alanının R1-3 ve R14-16. alıcılarındaki izleri Şekil 2b'de detaylı olarak verilmiştir. R1 alıcısı sanal kaynak seçilerek ve bağıntı (1) kullanılarak R1 alıcısındaki izin kayıtta yer alan diğer tüm izler ile olan çapraz ilişkisi hesaplanmıştır. Şekil 2c'de R11, sanal kaynak olarak seçilen izin kendisi olan ilişkisidir (öz-ilişki) ve en büyük genliği sıfır kayma zamanında yer almaktadır. R12, R1 ile R2 alıcılarındaki izlerin çapraz ilişkileridir ve sinyal R1 ile R2 alıcıları arasındaki zaman farkı kadarlık bir kayma zamanında yer almaktadır. R1 izi sanal kaynak olmak üzere çapraz ilişkiler diğer tüm izler için hesaplandığında Şekil 2d'deki interferometrik görüntü elde edilir.



	Artalan	Saçıcı
ρ [kg/m³]	1800	1.29
V_p [m/s]	350	350
V_s [m/s]	200	200

Yüzey dalgası hızı [m/s]	180
Baskın frekans [Hz]	50
Baskın dalga boyu [m]	3.6

Şekil 1. Saçılmış dalga alanını üretmek için kullanılan geometri ve model parametreleri



Şekil 2. Modellenen saçılmış dalga alanı, Psc ve Rsc saçılmış P ve yüzey dalgalarını belirtmektedir (a), Saçılmış dalga alanından seçilen izler (b), (b)'de seçilen izlerin R1 sanal kaynağı için elde edilen detay çapraz ilişkileri (c), (a)'da verilen saçılmış dalga alanındaki izlerin R1 sanal kaynağı ile çapraz ilişkisinden elde edilen interferometrik görüntü (d).

Saçıcı konumunu kestirmek için izleyen seyahat zamanı bağıntısı türetilmiştir,

$$t = \frac{1}{V}\left\{\left[\left(x_i^r - x\right)^2 + \left(z_i^r - z\right)^2\right]^{1/2} - \left[\left(x_{vs} - x\right)^2 + \left(z_{vs} - z\right)^2\right]^{1/2}\right\}. \tag{2}$$

Bağıntıda V dalga hızı (cisim veya yüzey dalgası), *i* alıcılar için indeks, *vs* sanal kaynak (virtual source) ve *x* ve *z* ise saçıcının yatay ve düşey konumlarını belirtmektedir.

Saçıcı cismin konumunu kestirmek için sismik kayıtlar üzerinden seçilen bir sanal kaynak için elde edilen interferometrik seyahat zamanları ve bağıntı (2) kullanılarak ters çözüm yapılır ve saçıcı konumu kestirilir. Doğrusal olmayan problem doğrusallaştırılır ve yinelemeli olarak çözülür. Düz problem için doğrusal denklem takımı $\Delta\mathbf{d} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{m}$ şeklinde ifade edilir. Gözlenen t_{obs} ve hesaplanan t_{calc} seyahat zamanları arasındaki fark $\Delta\mathbf{d} = t_{obs} - t_{calc}$ veri vektörü ile, bilinmeyen model parametreleri – saçıcının *x* ve *z* konumu - $\Delta\mathbf{m}$ model vektörü ile ve duyarlılık matrisi (Jacobian) ise $\mathbf{G}$ ile temsil edilmektedir. Ters problem tekil değer ayrışımı yöntemi ile aşağıdaki bağıntı ile temsil edilir,

$$\Delta\mathbf{m} = \mathbf{V}\boldsymbol{\Lambda}\left(\boldsymbol{\Lambda}^2 + \beta^2\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{U}^T\Delta\mathbf{d}\,. \tag{3}$$

Bağıntıda $\mathbf{V}, \boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{U}, \mathbf{I}$ ve β sırasıyla model uzayı özvektörleri, özdeğeleri içeren köşegen matris, veri uzayı özvektörleri, birim matris ve sönüm parametresidir. Denklem (3) kullanılarak ters problem saçıcının konumunu kestirmek üzere çözülür. Kestirilen parametrelerin güvenli aralığı (4) bağıntısında verilen model kovaryans matrisi ile hesaplanır,

$$\mathrm{cov}[\mathbf{m}] = \sigma^2\mathbf{V}\boldsymbol{\Lambda}^2\left(\boldsymbol{\Lambda}^2 + \beta^2\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}. \tag{4}$$

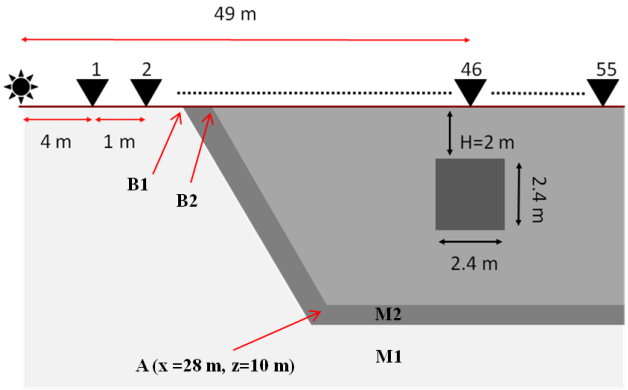
Bağıntıda yer alan σ^2 izleyen şekilde tanımlanır,

$$\sigma^2 = \frac{1}{n - n_m}\sum_{i=1}^{n}\left(t_{obs} - t_{calc}\right)^2. \tag{5}$$

Buarada n gözlenen veri sayısı, n_m ise model parametrelerinin sayısını temsil etmektedir. Bu çalışmada model parametre sayısı x ve z konumları olmak üzere 2'dir. İzleyen örneklerde belirsizlikler %95 güvenli aralık (1.96σ) için hesaplanmış ve kestirilen model parametreleri ile birlikte çizilmiştir.

2.2. Modelleme ve Saçıcıların Konumlarının Kestirilmesi

Yöntemin etkinliğini göstermek amacıyla yanal süreksizlik içeren bir ortam dikkate alınmıştır. Model geometrisi ve parametreleri Şekil 3'te verilmiştir.

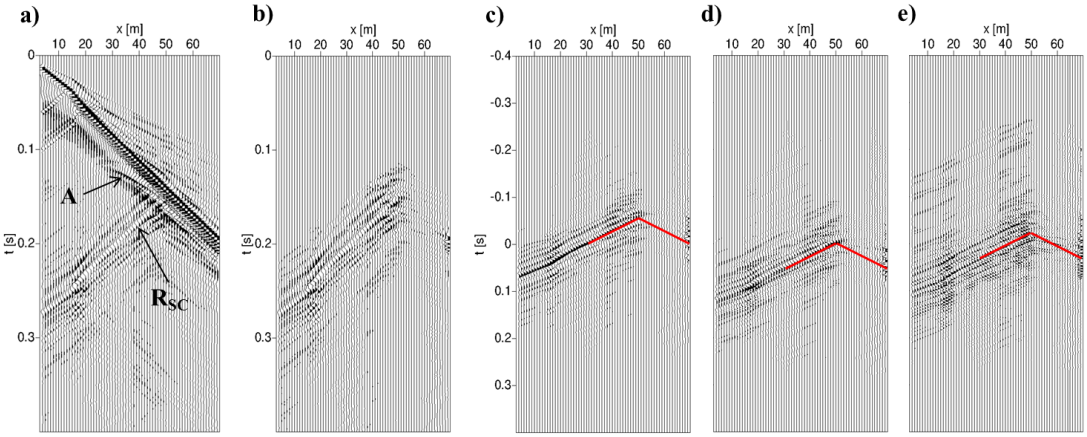


	M1	M2	Artalan	Saçıcı
ρ [kg/m^3]	1500	1500	1800	1000
V_p [m/s]	800	500	700	400
V_s [m/s]	500	300	400	170

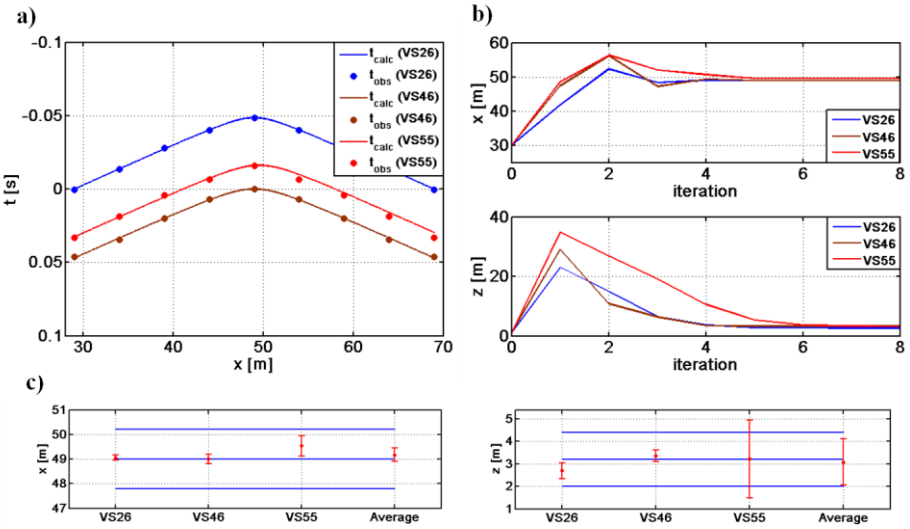
Şekil 3. Model geometrisi ve model parametreleri. A: köşe difraktörü, B1 ve B2, kaynak ile alıcı arasında yer alan süreksizlikleri temsil etmektedir.

Modelleme için Thorbecke (2013) tarafından geliştirilen iki boyutlu elastik dalga yayılımını modelleyen sonlu farklar programı kullanılmıştır. Modelleme sonucu elde edilen düşey bileşen hız sismogramı Şekil 4a'da verilmektedir. Gerçek kaynağın konumu orijin olarak seçilmiştir. Bu modelde saçılmış yüzey dalgaları kullanılarak, saçıcının (Şekil 3 gri kare), saçılmış cisim dalgaları (S-dalgası) kullanılarak, köşe difraktörün (Şekil 3'de A) konumu kestirilmiştir.

Temiz bir saçılmış dalga alanı elde etmek için doğrudan gelen ve kırılan P dalgaları ve doğrudan gelen Rayleigh dalgaları frekans dalga sayısı süzgeci kullanılarak süzülmüş ve gerekli durumlarda istenmeyen varışlar sıfırlanmıştır (mute) (Şekil 4b). Elde edilen saçılmış dalga alanı üzerinde 26, 46 ve 55. (29, 49 ve 58 m) alıcılar sanal kaynak seçilerek ve bağıntı (1) kullanılarak belirtilen sanal kaynaklar için interferometrik görüntüler, hayalet saçılmış dalga alanları, elde edilmiştir (Şekil 4c-e). Hayalet saçılmış dalga varışları sismogramlar üzerinden okunarak (Şekil 4c-e kırmızı çizgiler) ters çözümde kullanılmıştır (bağıntı 3). Hız bilgisi bilinen parametre olarak alınmış ve sismogram üzerindeki doğrudan gelen varışların eğiminden hesaplanmıştır. Gözlenen ve hesaplanan hayalet seyahat zamanları her bir sanal kaynak için Şekil 5a'da verilmiştir. Ters çözüm için kullanılan başlangıç parametreleri (iteration=0) ve her yineleme sonucunda elde edilen model parametreleri Şekil 5b'de verilmiştir. Sekiz iterasyon sonunda kestirilen değerler gerçek değerlere ulaşmıştır. Model parametreleri için %95 güvenli aralıklar (4) ve (5) bağıntıları kullanılarak hesaplanmış ve her sanal kaynak için Şekil 5c'de çizilmiştir. Şekil 5c'de average olarak belirtilen ortalama ve güvenli aralık değerleri sanal kaynakların ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Şekil 5c'de mavi çizgiler saçıcının yatay ve düşey sınırlarını ve orta noktasını belirtmektedir. Kestirilen büyüklükler saçıcının boyutları içerisinde yer almaktadır.

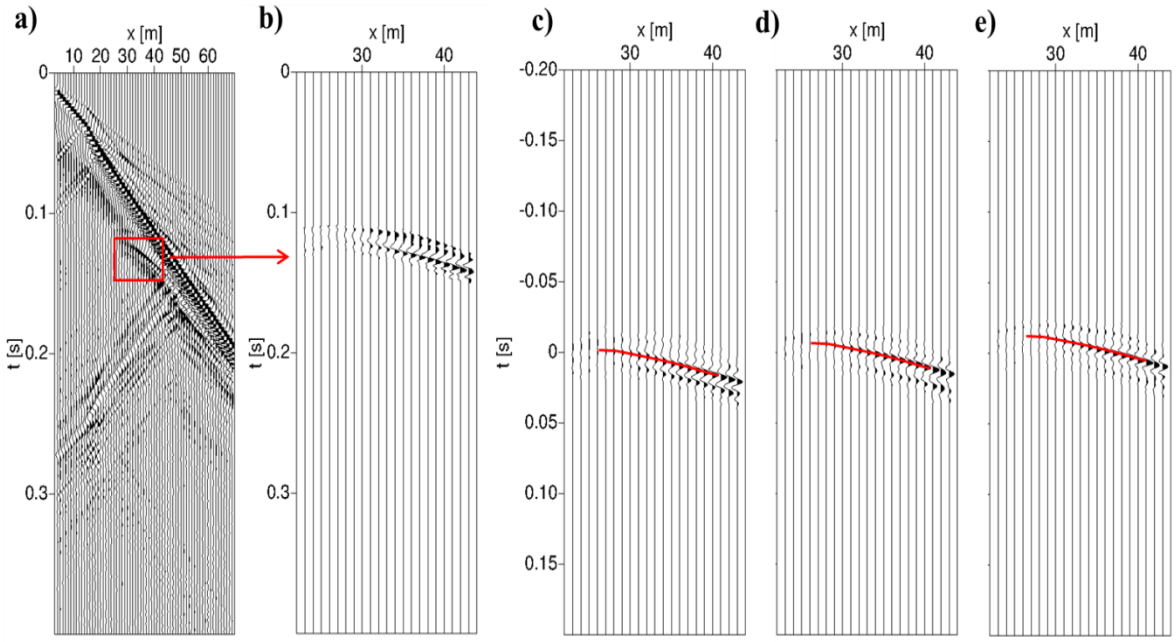


Şekil 4. Modelleme ile elde edilen düşey bileşen hız kaydı (a), Saçılmış dalga alanı (b), 26, 46 ve 55. (29, 49 ve 58 m) sanal kaynak konumları için sismik interferometri ile elde edilen hayalet saçılmış dalga alanı (c), (d) ve (e). A: Şekil 3'de A ile gösterilen köşeden saçılan S-dalgası, Rsc: Şekil 3'te gri ile gösterilen saçıcıdan saçılmış yüzey dalgası.

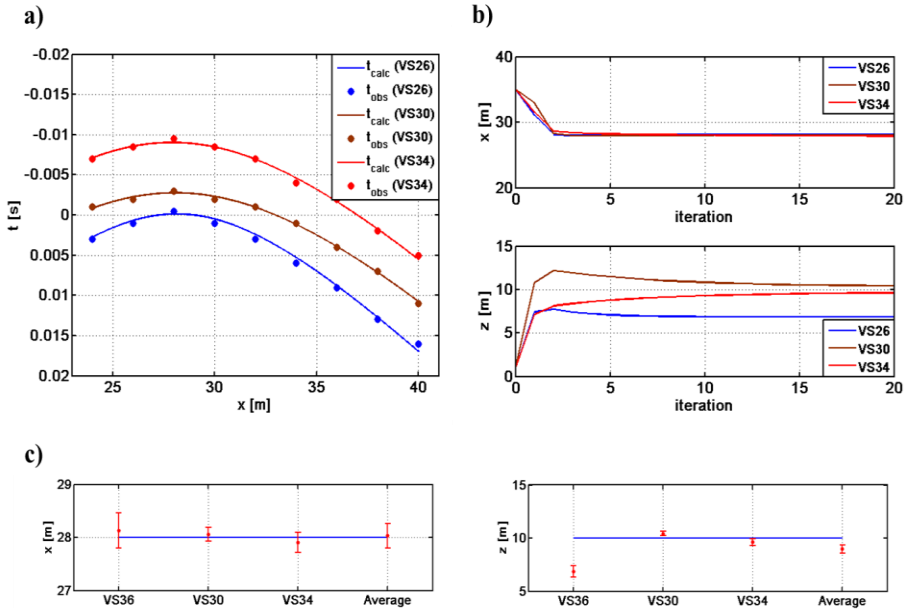


Şekil 5. Gözlenen ve hesaplanan seyahat zamanları (a), 26 (mavi, 29 m), 46 (kahverengi, 49 m) ve 55. (kırmızı, 58 m) sanal kaynaklar için elde edilen yatay ve düşey saçıcı konumları (b) kestirilen model parametreleri ve %95 güvenli aralıkları, mavi çizgiler saçıcının yatay ve düşey konumda sınırlarını ve orta noktasını göstermeketdir (c).

Saçıcının konumunu belirlemek için yapılan işlemler Şekil 4a'da A, Şekil 6a'da kırmızı kutu ile belirtilen köşe difraksiyonu için uygulanmıştır. Önce ilgilenilen alan dışında kalan varışlar temizlenmiştir (Şekil 6b). Sanal kaynak olarak 26, 30. ve 34. alıcılar (29, 33 ve 37 m) seçilmiş ve hayalet saçılmış dalga alanı elde edilmiştir (Şekil 6c-e).



Şekil 6. Modellemede elde edilen düşey bileşen hız kaydı (a), Atış verisinden elde edilen saçılmış S dalgası (b), 26, 30 ve 34. alıcılardaki (29, 33 ve 37 metre uzaklıkta) sanal kaynaklar için saçılmış dalga alanına sismik interferometri uygulanarak elde edilen hayalet saçılmış cisim dalgaları (c), (d) ve (e).



Şekil 7. Köşe difraktör için gözlenen ve hesaplanan seyahat süreleri (a), saçıcının, 26. (mavi, 29 m), 30. (kahverengi, 33 m) ve 34. (kırmızı, 37 m) sanal kaynaklar için hesaplanan yatay ve düşey konumları (b), kestirilen model parametreleri ve %95 güvenli aralıkları. Mavi çizgiler köşe difraktörün orta noktasını belirtmektedir (c).

Hayalet saçılmış dalga varışları sismogramlar üzerinden okunarak (Şekil 4c-e kırmızı çizgiler) ters çözümde kullanılmıştır (bağıntı 3). Gözlenen ve hesaplanan hayalet seyahat zamanları her bir sanal kaynak için Şekil 7a'da verilmiştir. Ters çözüm için kullanılan başlangıç parametreleri (iteration=0) ve her yineleme sonucunda elde edilen model parametreleri Şekil 7b'de verilmiştir. Model parametreleri için %95 güvenli aralıkları her sanal kaynak için Şekil 7c'de çizilmiştir. Şekil 7c'de average olarak belirtilen ortalama ve güvenli aralık değerleri sanal kaynakların ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Farklı sanal kaynaklar için elde edilen sonuçların ortalama değerleri incelendiğinde köşe difraktörün konum kestirimlerinin başarılı olduğu izlenmektedir.

3. SONUÇLAR

Hayalet saçılmış dalga alanını kullanarak saçıcı konumu kestirimini öneren yöntemin başarısını incelemek amacı ile yatay süreksizlik ve saçıcı içeren bir ortam dikkate alınmış ve ortamda yer alan saçıcının ve köşe difraktörün konumları kestirilmiştir. Yüzeyde yer alan tek bir kaynak kullanılarak elde edilen atış kaydı üzerinde farklı sanal kaynaklar seçilerek hayalet saçılmış dalga alanları elde edilmiş ve bu dalga alanlarının seyahat zamanları kullanılarak saçıcıların konumları başarılı bir şekilde kestirilmiştir. Yöntemin başarısı, temiz bir saçılmış dalga alanının eldesi ve seyahat zamanlarının doğru okunması ile ilişkilidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma ***TÜBİTAK 110Y250 Yüzeye Yakın Saçıcıların Saçılmış Yüzey Dalgaları Kullanılarak Ters Saçılma ve Sismik İnterferometri Yöntemleri ile Belirlenmesi*** isimli proje tarafından desteklenmiştir. TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederiz. Delft Teknoloji Üniversitesi Uygulamalı Jeofizik ve Petrofizik bölümünden ***Deyan Draganov***, ***Kees Wapenaar*** ve ***Jan Thorbecke***'ye projeye katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Bu çalışmanın bazı bölümlerinde Seismic Un*x (Cohen and Stockwell, 2012) açık kaynak programı kullanılmıştır. Programı açık kaynak olarak kullanıma sunan Colorado School of Mines'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Boiero, B., Socco, L.V., 2010. Retrieving lateral variations from surface wave dispersion curves. Geophysical Prospecting, 1-20.

Campman, X., van Wijk, K., Riyanti, C.D., Scales, J., Herman, G., 2004. Imaging scattered seismic surface waves. Near Surface Geophysics 2 (4), 223-230.

Campman, X., Riyanti, C.D., 2007. Non-linear inversion of scattered seismic surface waves. Geophys. J. Int. 171, 1118-1125.

Chai, H.Y., Phoon, K.K., Goh, S.H., Wei, C.F., 2012. Some theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities. Journal of Applied Geophysics 83, 107–119.

Cohen, J.K., Stockwell, Jr.J.W., 2012. CWP/SU: Seismic Un*x Release No. 43: an open source software package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Gelis, C., Leparoux, D., Virieux, J., Bitri, A., Operto, S., Grandjean, G., 2005. Numerical modelling of surface waves over shallow cavities. Journal of Environmental and Engineering Geophysics 10 (2), 111-121.

Grandjean, G., 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.

Herman, G.C., Milligan, P.A., Huggins, R.J., Rector, J.W., 2000. Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves. Geophysics 65 (1), 247-252.

Harmankaya, U., Kaslilar, A., Thorbecke, J., Wapenaar, K., Draganov, D., 2013. Locating near-surface scatterers using non-physical scattered waves resulting from seismic interferometry. Journal of Applied Geophysics 91, 66-81.

Kaslilar, A., 2007. Inverse scattering of surface waves: imaging of near-surface heterogeneities. Geophysical Journal International 171, 352-367.

Kocaoglu, A.H., Fırtana, K., 2011. Estimation of shear wave velocity profiles by the inversion of spatial autocorrelation coefficients. Journal of Seismology 15 (4), 613-624.

Leparoux, D., Bitri, A., Grandjean, G., 2000. Underground cavity detection: a new method based on seismic Rayleigh Waves. EJEEG 5, 33-53.

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.

Snieder, R., 1987. Surface wave holography, in: Nolet, G., (Ed.), Seismic tomography. D. Reidel Publishing, Dordrecht, pp. 323-337.

Snieder, R., 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. Physical Review E 69, 046610.

Snieder, R., Wapenaar, K., Larner, K., 2006. Spurious multiples in seismic interferometry of primaries. Geophysics 71, SI111–SI124,

Thorbecke, J., 2013. 2D Finite-Difference Wavefield Modelling. http://janth.home.xs4all.nl/Software/fdelmodcManual.pdf

van Manen, D., Curtis, A., Robertsson, J.O.A., 2006. Interferometric modelling of wave propagation in inhomogeneous elastic media using time reversal and reciprocity. Geophysics 71 (4), SI47–SI60.

Wapenaar, K., 2004. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation. Phys. Rev. Lett. 93 (25), 254301.

Wapenaar, K., Fokkema, J., 2006. Green's function representations for seismic interferometry. Geophysics 71 (4), SI33-SI46.

Xia, J., Nyquist, J.E., Xu, Y.X., Roth, M.J.S., Miller, R.D., 2007. Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction. Journal of Applied Geophysics 62 (3), 244-253.