# UZAMSAL ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ DOĞRUDAN TERS ÇÖZÜMÜ İLE S-DALGASI HIZ PROFİLLERİNİN ELDE EDİLMESİ

**A. Kocaoğluve K.Fırtana**

*Jeofizik Müh. Bölümü, Maden Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi*
*Email: argun@itu.edu.tr.*

**ÖZET:**

Depremler sırasında, yer hareketi genliklerindeki artışa (sismik amplifikasyon) doğrudan etkisi olan S-dalgası (Vs) hız yapısının kestirimi, deprem tehlikesinin belirlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla, dizilim-mikrotremor (array-microtremor) ölçümleri son yıllarda yaygınca kullanılmaktadır. Uzamsal özilişki (spatial auto-correlation, SPAC) yöntemi, frekans-dalgasayısı (*f-k*) yöntemine göre daha az sayıda alıcı kullanılarak, kolaylıkla uygulanabilmekte ve birkaç yüz metre derinliklere kadar güvenilir Vs profillerinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Gözlemsel veriden (dizilim-mikrotremor ölçümleri) elde edilen büyüklük, ilişki uzaklığı, frekans ve faz hızının bir fonksiyonu olan uzamsal özilişki (SPAC) katsayılarıdır. Genel olarak, Vs profillerinin elde edilmesi iki adımlı bir süreçtir: SPACkatsayılarından faz hızı dispersion verisinin elde edilmesi ve bu veriden ters çözümle S-dalgası hız yapısının bulunması. Bu bildiri, İTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde daha önce yapılmış olan SPAC verilerinin doğrudan ters çözümü ile Vs hız profillerinin elde edilmesi yaklaşımına dönük çalışmaların bir kısmını kapsamaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER :** deprem tehlikesi, dispersiyon, mikrotremor, S-dalgası hızı, SPAC, ters çözüm

## 1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda, sismik kırılma ve/veya yansıma gibi aktif-kaynaklı yöntemlerin kullanılarak Vs profillerinin elde edilmesi genellikle güç veya olanaksız olmaktadır. Yüzey dalgalarının spectral analizi (SASW) veya yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) yöntemleri gibi aktif-kaynaklı yüzey dalgası yöntemleriyle ise, kullanılan yüksek frekanslar nedeniyle sığ (<30 m) Vs profillerinin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.Derin Vs profillerinin elde edilebilmesi için, mikrotremorların bir dizilimle (array) ölçümüne dayanan pasif-kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri kullanılmalıdır. Mikrotremorlar, sismik enerjinin büyük bir kısmının yüzey dalgaları olarak yayındığı arka-plan titreşimler olarak tanımlanabilir. Dizilim-işleme (array processing) ile ve düşey-bileşen sismometrelerle kaydedilen mikrotremorlar kullanılarak, Rayleigh dalgası faz hızları (dispersiyon verisi) hesaplanabilmekte ve dispersiyon verisinin ters çözümü ile Vs profile elde edilebilmektedir. Dizilim büyüklüğüne ve mikrotremorların frekans içeriğine bağlı olarak, araştırma derinliği birkaç 10 m den 100 m ye kadar değişmektedir. Faz hızı dispersiyon verisini elde etmek için kullanlan iki ana yöntem vardır: frekans-dalgasayısı (*f-k*) yöntemi (Capon, 1969) ve uzamsal özilişki (SPAC) yöntemi (Aki, 1957; Okada, 2003). Frekans-dalgasayısı yöntemi ile, dizilimin çözünürlük gücüne bağlı olarak, verilen bir frekansta, dizilim içinden yayınan birden fazla düzlem dalganın faz hızları ve geliş doğrultuları saptanabilmektedir. Bu nedenle, Rayleigh dalgalarının yüksek modları da belirlenebilmektedir. Faz hızı dispersiyon verileri, SPAC yöntemi ile daha az sayıda alıcı (*f-k* yöntemine göre) ve daha küçük dizilimler kullanılarak elde edilebilmektedir (Kudo vd.,2002). Ancak bu durumda yüksek modlar saptanamamaktadır.Yüksek modların saptanmasındaki güçlüklerden dolayı, yöntem mikrotremorların temel-mod Rayleigh dalgalarından oluştuğu varsayımına dayanmaktadır. Bununla birlikte, Asten vd. (2004) ve Asten (2009) tarafından önerilen çok-modlu SPAC (MMSPAC) analizi bazı iyileştirmeler sunmaktadır. SPAC yönteminin en basit uygulaması, dairesel bir dizilim (genellikle, 1 alıcı merkezde ve 3 alıcı daire üzerinde, eşit aralıklı olmak üzere) gerektirmektedir. Dairesel dizilimin çapı genişletilerek düşük frekansların (uzun dalgaboylarının) gözlemlenmesi ve dolayısıyla daha derin yapıların

araştırılması mümkün olmaktadır. İncelenebilecek en büyük derinlik, en geniş alıcı aralığının 4-5 katı kadar olmaktadır (Henstridge, 1979). Son zamanlarda, yöntem geliştirilerek, dairesel olmayan SPAC dizilimlerin kullanılması mümkün olmuştur (Bettig vd., 2001; Ohori vd., 2002). SPAC yönteminin uzantılarının geliştirildiği diğer bazı çalışmalar, çoklu-modların ayrımı ve/veya Love dalgalarının dispersion özelliklerinin saptanmasına odaklanmıştır (Asten vd., 2004; Asten, 2009; Cho vd., 2004, 2006; Köhler vd., 2007; Tada vd., 2009).

Genellikle, Vs profilleri, SPAC yöntemi ile iki aşamada elde edilmektedir: SPAC verilerinden faz hızı dispersion verilerinin kestirimi ve bu verilerin bilinmeyen S-dalgası hız yapısı için ters çözümü.Verilen bir frekanstaki faz hızı, ilişki uzaklığının fonksiyonu olan gözlemsel SPAC katsayılarına en iyi çakışan kuramsal SPAC katsayılarının hesaplanması ile elde edilebilir (Chavez-Garcia vd, 2005; Kudo vd., 2002; Ohori vd., 2002). Sınırlı sayıda alıcıyla, eş-zamanlı ölçümlerin yapılması durumunda, yeterince nokta ile örneklenmiş bir ilişki uzaklığı aralığı elde edilememektedir. Bu durumda, SPAC katsayıları yalnızca birkaç ilişki uzaklığı için ve frekansın fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir ve dolayısıyla faz hızı dispersiyon eğrisinin elde edilmesi güçleşmektedir. Burada özetlenen çalışma (Fırtana, 2008; Kocaoğlu ve Fırtana, 2011), dispersiyon eğrisinin kestirmine gidilmeden, S-dalgası hız yapısının SPAC verilerinin ağırlıklandırılmış sönümlü en-küçük-kareler ters çözümü ile elde edilmesine dayanmaktadır. Daha önce, S-dalgası hız yapısının SPAC verilerinden doğrudan kestirimine ilişkin bazı çalışmalar yapılmıştır (Roberts ve Asten, 2004; Asten 2006; Claproods ve Asten 2009). Bu çalışmalarda, gözlemsel SPAC verilerine kuramsal uyum sağlanana kadar, 1-B hız modeline ilişkin parametreler değiştirilerek yinelemeli düz çözüm yaklaşımı kullanmıştır. Ayrıca, Wathelet vd. (2005) doğrusal olmayan bir ters çözüm yöntemi olan neighborhood algoritmasını kullanmıştır. Ancak, doğrusal-olmayan optimizasyon/ters çözüm yaklaşımlarında (Monte Carlo, genetik algoritma, simulated annealing, neighborhood algorithm vb.) modele ilişkin parametre sayısını ve parametre uzayının sınırlarını belirleme gerekliliği vardır. Doğrusallaştırılmış ters çözüm yöntemlerine göre, yerel minimumlara yakınsama probleminden kaçınılmakla birlikte, doğrusal olmayan ters çözüm yöntemleri genellikle gerçek modelin de içinde olduğu bir çözüm kümesi sunmaktadır. Ayrıca, bu yöntemler fazla sayıda düz problem çözümü (forward problem solution) içerdiğinden çok daha uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir.

## 2. YÖNTEM

Dört alıcılı ve r yarıçaplı dairesel bir dizilim ile kaydedilen mikrotremor verilerinden, bir $\omega_0$ frekansındaki gözlemsel SPAC katsayısının hesaplanması için izleyen veri-işlem adımları uygulanmıştır: (1) sinyallere dar-bantlı ($\omega_0$ merkez frekanslı Gaussian filtre) süzgeçleme uygulanmıştır; (2) *T* uzunluklu süzülmüş veriler *D* uzunluklu *NB* bloğa bölünmüştür;(3) her blok için, $R_n = X_n X_n^T$ matris çarpımı ile bir ilişki matrisi hesaplanmıştır (burada$X_n$, blok *n* için (*4xD*) boyutlu süzülmüş veri matrisidir); (4) ilişki uzaklığı $d_1 = r$ için, *NB* blok üzerinden ortalama SPAC katsayısı, merkez ile daire çevresinde bulunan alıcılar arasındaki özilişki değerlerinin azimutal ortalaması alınarak hesaplanmıştır:

$$\rho_{obs}(\omega_0, d_1) = \frac{1}{3NB}\sum_{n=1}^{NB}\left(\sum_{k=2}^{4}\frac{R_n[1,k]}{\sqrt{R_n[1,1]R_n[k,k]}}\right) \quad (1)$$

Benzer şekilde, özilişki matrisinin daire üzerindeki alıcı çiftlerine karşılık gelen elemanları $(R_n[2,3], R_n[3,4], R_n[4,2])$ kullanılarak, $d_2 = \sqrt{3}d_1$ uzaklığı için $\rho_{obs}(\omega_0, d_2)$ SPAC katsayısı bulunabilir.Yarıçapları $r_1$ ve $r_2$ olan iki dizilim kullanıldığında, $d_1 = r_1, d_2 = \sqrt{3}r_1, d_3 = r_2$ ve $d_3 = \sqrt{3}r_2$ olmak üzere dört ilişki uzaklığı elde edilmektedir.Verilen bir ilişki uzaklığı, $d_k$, için kuramsal SPAC katsayısı,

$$\rho_{theo}(\omega_0, d_k) = J_0\left(\frac{\omega_0 d_k}{c(\omega_0)}\right) \quad (2)$$

olarak verilir. Burada $J_1 0$ ( .), sıfırıncı mertebeden, birinci tür Bessel fonksiyonudur. Rayleigh dalgası faz hızı, $c(\omega_0)$ olarak gösterilmiştir ve Knopoff matrix propagator yöntemi ile hesaplanabilir (Schwab ve Knopoff 1972). Faz hızı, $F(\omega_0, c, h, \alpha, \beta, \rho) = 0$ şeklindeki doğrusal olmayan kapalı bir fonksiyondan kök bulma prosedüru ile elde edilmektedir. Yarı-sonsuz ortam üzerinde (N-1) katmanlı bir model için, $h, \alpha, \beta, \rho$ vektörleri ile verilen model parametreleri sırasıyla kalınlık, P-dalgası hızı, S-dalgası hızı ve yoğunluktur. Bu dört parametreden Rayleigh dalgası faz hızlarını etkileyen en önemli parametre S-dalgası hızıdır. Faz hızlarının en az duyarlı olduğu parametre ise P-dalgası hızıdır (veya Poisson oranı). Yoğunluk ise faz hızı dispersiyonuna P-dalgası hızına göre daha çok etki eden bir parametredir (Xia vd.,1999). S-dalgası hızı ile katman kalınlığı arasındaki ödünleşmeden (trade-off) dolayı, her iki parametrede ters çözüme dahil edildiğinde duraylılık (stability) problemi ortaya çıkabilmektedir. Bu iki parametre arasındaki ödünleşme, katman kalınlığının arttırılması veya S-dalgası hızının düşürülmesinin, faz hızını benzer şekilde etkilemesi anlamındadır. Duraylılığı sağlamak için, katman kalınlıkları sabitlenmiş ve ters çözüm yalnızca S-dalgası parametresiiçin yapılmıştır. Ayrıca, her katman için Poisson oranı (önceden biliniyor veya kestiriliyor olsun) da sabitlenmiştir ve yoğunlukların hız ile birlikte değiştiği varsayılmıştır. Bir başlangıç modeli ($\beta^\circ$) için, doğrusallaştırılmış ters çözüm yaklaşımı, $A\Delta\beta = \Delta g$ şeklinde doğrusal bir denklem takımı verir. Burada, $A$ Jakobian matris, $\Delta g$ gözlemsel ve kuramsal SPAC katsayıları arasındaki fark vektörüdür. Çözüm vektörü $\Delta\beta$, bir sonraki iterasyonda kullanılacak parametre düzeltme vektörüdür ($\beta^1 = \beta^\circ + \Delta\beta$ ).

## 3. YAPAY VERİ UYGULAMASI

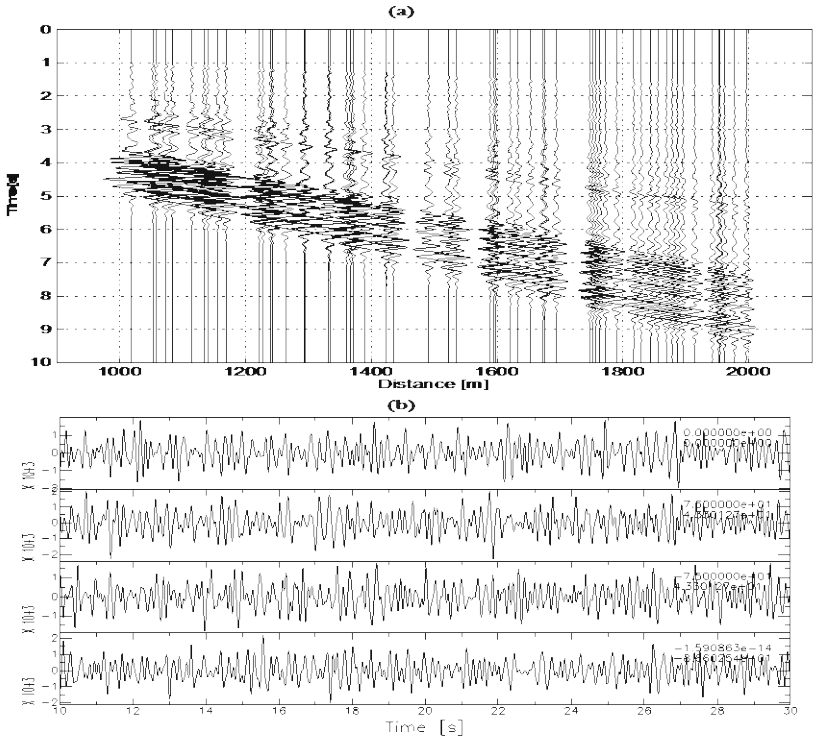
Ters çözüm algoritmasını sınamak için kullanılan yapay veri seti, Tablo 1'de verilen hız modeli kullanılarak ve yarıçapı 14.4 ve 86.8 m olan iki dairesel dizilim için oluşturulmuştur. Yapay mikrotremor dalga alanının simülasyonunda, azimutları 0-360$^o$ ve uzaklıkları 1-2 km arasında değişen, tekdüze, rastgele dağılımlı konuma sahip 60 enerji kaynağı kullanılmıştır. Dalga alanını elde etmek üzere, ayrık dalgasayısı integrasyonu (discrete wavenumber integration) yöntemi (Herrmann ve Ammon 2004) kullanılarak, tüm kaynak-alıcı çiftleri için Green fonksiyonları (impulse response) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda örnekleme aralığı 0.04 s (Nyquist frekansı: 12.5 Hz) ve süre 24.48 s (512 örnek) olarak alınmış ve hesaplamadan sonra 10 Hz den yüksek frekanslar süzülmüştür. Her kaynak noktasındaki kaynak-zaman fonksiyonu 40-dakika uzunluklu beyaz gürültü serisi olarak alınmış ve Green fonksiyonu ile evriştirilmiştir. Verilen bir alıcı konumundaki yapay mikrotremor verisi, tüm kaynaklardan yayınan dalga alanlarının toplamı olarak elde edilmiştir. Dizilimin merkezindeki alıcı için elde edilen Green fonksiyonları ve 86.8 m yarıçaplı dizilimde kaydedilen dalga alanının 20 s lik bir kısmı Şekil 1'de verilmiştir. SPAC katsayıları, 150, 86.6, 25, and 14.4 m ilişki uzaklıkları için hesaplanmıştır.Yapay veri, bant genişliği 0.05 Hz olan dar-bant-geçirimli Gaussian süzgeç ile süzülmüştür. Süzülmüş veriler 40 s uzunluklu (ve % 50 katlamalı) 120 bloğa ayrılmıştır. Verilen bir frekanstaki gözlemsel SPAC katsayısına ilişkin belirsizlik (uncertainty) 120 blok için hesaplanan SPAC katsayılarının standart sapması olarak alınmıştır.

Dört-alıcılı dizilimler için, sapma dalga sayısı ($rk_d$ = 2.58), SPAC katsayılarının elde edilebileceği güvenilir frekans aralığının üst sınırını belirlemektedir (Okada, 2006). Sapma dalga sayısında, kuramsal SPAC fonksiyonu $J_0(rk_d) = -0.0873$ değerini almaktadır. Bu değer kullanılarak, her ilişki uzaklığı için, bir yüksek-kesme (high cut-off) frekansı belirlenmiş ve bu frekanstan yüksek frekanstaki SPAC katsayıları ters çözüm kapsamına alınmamıştır. Benzer şekilde, ters çözümde kullanılacak frekans aralığı için bir de alçak-kesme frekansı belirlenmiştir. SPAC yöntemi ile belirlenebilecek en uzun dalga boyu, en büyük ilişki uzaklığının 10 katı civarındadır ve kuramsal SPAC değerlerinin yaklaşık olarak 0.9 olduğu frekans alçak-kesme frekansı olarak alınmıştır.

Tablo 1. Yapay mikrotremor verilerinin simülasyonunda kullanılan model parametreleri

| H (m) | Vp (m/s) | Vs(m/s) | ρ (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|
| 30 | 520 | 300 | 1.8 |
| 60 | 866 | 500 | 2.1 |
| 200 | 1212 | 700 | 2.2 |
| 300 | 1559 | 900 | 2.3 |
| - | 2079 | 1200 | 2.4 |

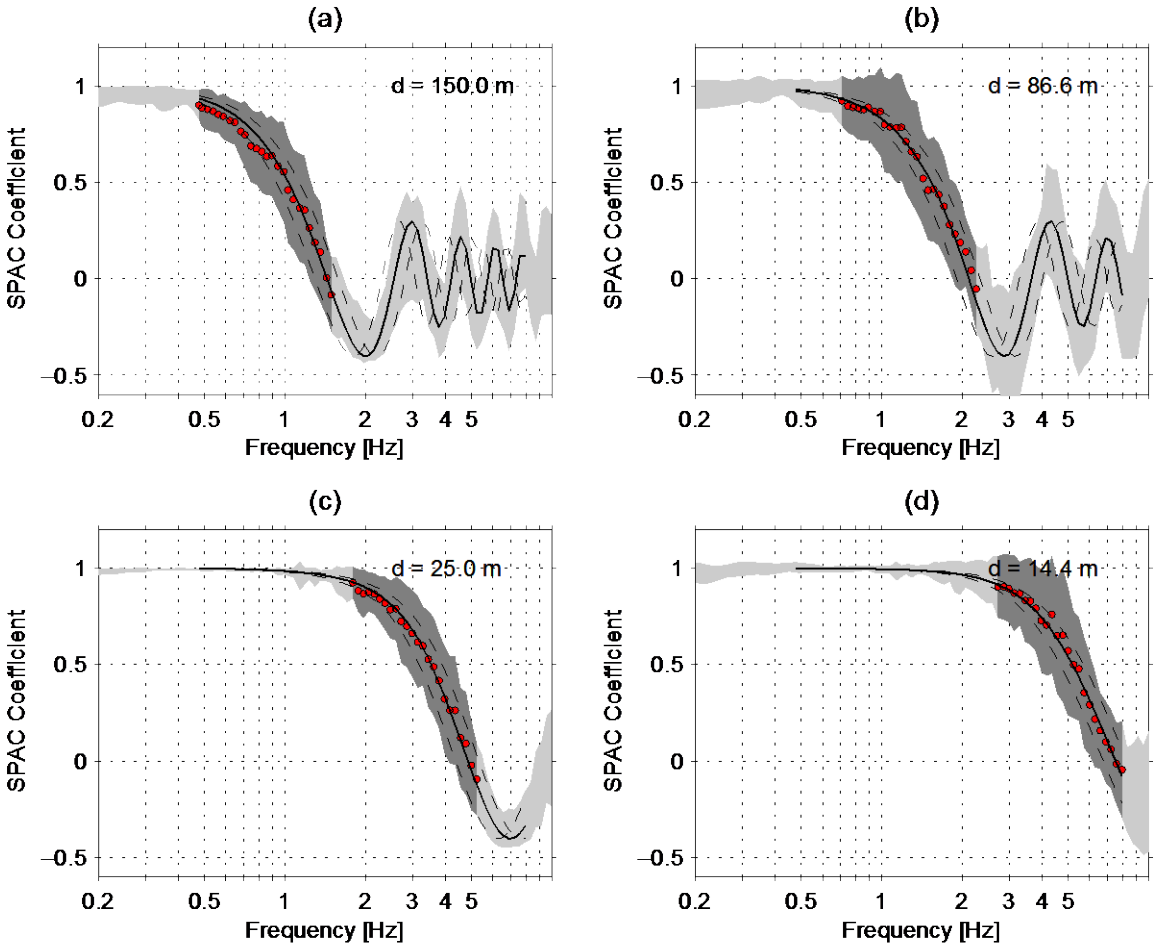
Kalınlık, H; P-dalgası hızı, Vp; S-dalgası hızı, Vs; yoğunluk, ρ.




Şekil 1. Dizilimin merkezindeki alıcı için hesaplanan Green fonksiyonları **(a),**yapay mikrotremor verisine ilişkin 20 s uzunluklu dalga alanı **(b).**

Ters çözüm programı MATLAB platformunda geliştirilmiştir. Kuramsal faz hızlarının ve Jakobian matrisinin hesaplanmasında, dispersiyon verilerinin ters çözümünde sıklıkla kullanılan SURF96 (Herrmann ve Ammon 2004) programının amaca uygun bölümlerinden yararlanılmıştır. Ters çözümde tabaka kalınlıkları ve Poisson oranları sabit tutulmuş ve S-dalgası hızı ile yoğunluk arasındaki $\rho = 0.8 \log \beta + 2.3$ (Herrmann ve Ammon 2004) amprik ilişki kullanılarak,yoğunluklar her iterasyonda yeniden hesaplanmıştır. Yüzey dalgalarının en büyük penetrasyon derinliği,en uzun dalga boyunun yarısı veya en büyük ilişki uzaklığının 5 katı ($zmax = \lambda max/2 = 5 \times dmax$) olduğundan, Vs modelinin derinliği 750 m alınmıştır.Yüzey dalgalarında derinlik çözünürlüğü dalgaboyu ile azaldığı için modeldeki katman kalınlıkları derinlikle logaritmik olarak arttırılmıştır. Şekil 2, tüm katmanlarda hızların aynı (Vs=1300 m/s) olduğu bir başlangıç modeli ile yapılan ters çözüm sonucu elde edilen

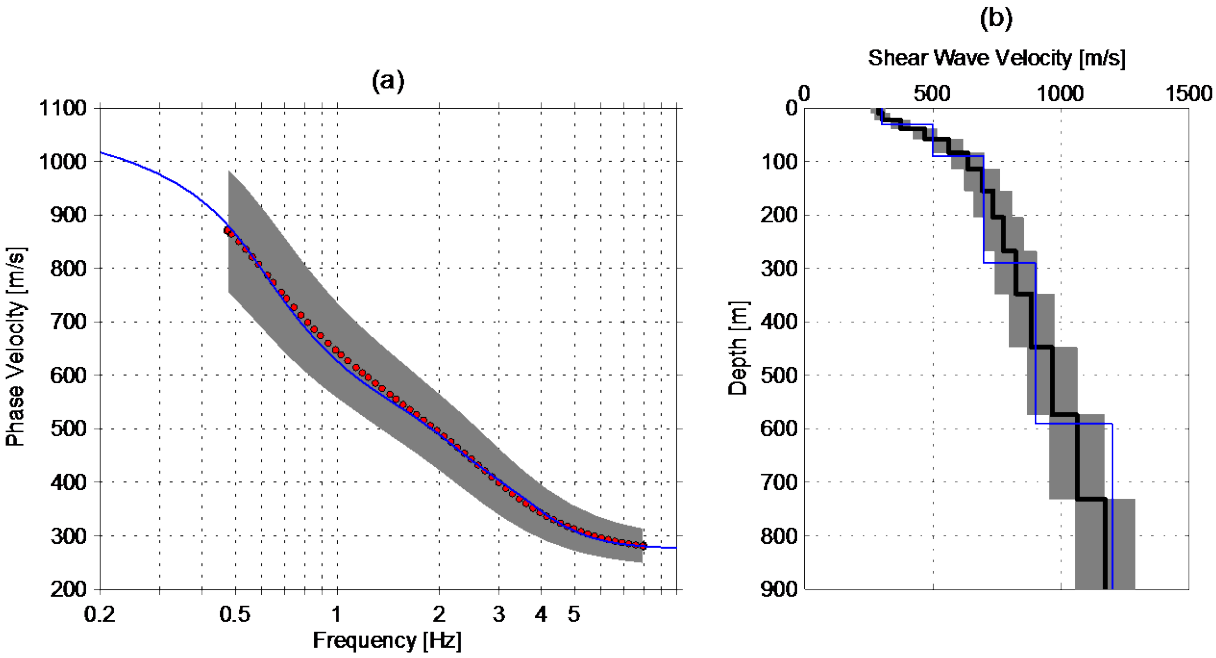
kuramsal SPAC katsayıları ile gözlemsel SPAC katsayıları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Her ilişki uzaklığı için güvenilir frekans aralıkları koyu gölgeli bölgelerle ve ters çözümde kullanılan veriler ise noktalarla gösterilmiştir.




Şekil 2. Yapay veri seti için gözlemsel (noktalar) ve kuramsal (koyu çizgiler) SPAC katsayılarının karşılaştırması: **(a)** d=150 m, **(b)** d=86 m, **(c)** d=25 m ve **(d)** d=14.4 m. Gözlemsel verideki standart sapmalar gölgeli bölgenin genişliği ile belirtilmiştir. Gözlemsel verilerin hata sınırları içinde kalan kuramsal SPAC eğrileri (kesikli çizgiler) Vs profilindeki alt ve üst sınırlara karşılık gelmektedir.

Her ilişki uzaklığı için, kuramsal SPAC katsayılarının, yalnızca güvenilir frekans aralığına düşen gözlemsel SPAC katsayılarına uyum sağlaması beklenmektedir. Ancak, tüm frekanslarda iyi bir benzeşimin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, kaynakların azimutal olarak eş-dağılımlı olmasıdır. Ters çözümden elde edilen Vs profili ile yapay veriyi oluşturmak için kullanılan Vs profili (gerçek model) Şekil 3'de karşılaştırılmıştır. Gerçek modeldeki keskin hız farklılıkları, elde edilen modelde yumuşak hız değişimleri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ters çözümde kullanılan diferansiyel yumuşatma kısıtlamasının doğal bir sonucudur. Şekil 3'de, aynı zamanda, gerçek modele ve hesaplanan (kuramsal) modele ilişkin dispersiyon eğrileri de karşılaştırılmıştır. Hız modelindeki ve dispersiyon eğrisindeki belirsizlikler (standart sapma) gölgeli alanlarla gösterilmiştir. Hız profilindeki belirsizlik, hesaplanan Vs değerlerinin % 10'u kadardır. Bu düzey, duyarlılık testi yapılarak elde edilmiştir.Vs modelinin alt ve üst sınırları kullanılarak hesaplanan kuramsal SPAC katsayıları,

gözlemsel SPAC katsayılarının standart sapmaları içinde kalmaktadır (Şekil 2, kesikli çizgiler).




Şekil 3. Yapay veri için ters çözüm sonuçları: **(a)** gerçek (ince çizgi) ve hesaplanan (noktalar) dispersiyon eğrilerinin karşılaştırması, **(b)** gerçek (ince çizgi) ve hesaplanan (koyu çizgi) Vs profillerinin karşılaştırması. Hata payları gölgeli alanlarla gösterilmiştir.

## 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bildiride, S-dalgası hız profillerinin SPAC katsayılarından sönümlü en-küçük-kareler ters çözümü ile doğrudan elde edilmesi yaklaşımı özetlenmiş ve yapay veri uygulaması tartışılmıştır. Gerçek (arazi) veri uygulamalarına örnekler sunumda verilecektir. Doğrusal olmayan optimizasyon (ters çözüm) yöntemlerinin tercih edilmediği durumlarda veya dizilim-mikrotremor ölçümleri minimum sayıda alıcı kullanarak yapılmak istendiğinde, faz hızı dispersiyon bilgisinin, SPAC katsayılarından ilişki uzaklığına bağlı olarak elde edilmesi güçleşmektedir. Bu durumda, frekansa bağlı SPAC verilerine en-küçük-kareler anlamında bir eğri çakıştırmak gereklidir. Dispersiyon eğrisinin davranışı için bir fonksiyon önermek (varsaymak) yerine, bu bildiride özetlenen doğrudan ters çözüm yöntemi ile, Vs hız profili ve dispersiyon eğrisi birlikte elde edilebilmektedir. Önerilen yöntemde, katman kalınlığı ile S-dalgası hızı arasındaki ödünleşmeden kaynaklanabilecek duraysızlık sorununa çözüm olarak, modele ait katman kalınlıkları sabitlenmiş ve S-dalgası hızları bilinmeyen parametreler olarak ele alınmıştır. Hız modelinde keskin değişimlerin olmayışı, diferansiyel yumuşatma yaklaşımı ile, komşu katmanlar arasındaki hız değişiminin en aza indirgenmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Sismik Genlik büyütmesini kontrol etmesi ve dolayısıyla tepki spektrumlarını etkilemesi bakımından, hız kontrastlarının olmadığı Vs profillerinin, sismik yer tepkisi analizleri açısından kullanışlı olmayacağı düşünülebilir. Ancak, Foti vd. (2009) tarafından da gösterildiği gibi, yüzey dalgası dispersiyon verilerinin ters çözümünde karşılaşılan eşdeğerlik problemi, tepki spektrumları için de geçerlidir. Bir başka deyişle, hız kontrastlarının olduğu Vs profilleri ile hız gradyanlarının olduğu Vs profilleri, dispersiyon eğrisi anlamında eşdeğer olduğu gibi tepki spektrumu anlamında da eşdeğerdir. Bununla birlikte, Foti vd. (2009) göstermiştir ki, aktif yöntemlerle (MASW gibi) elde edilen

yüksek frekanslı dispersiyon verisi, pasif yüzey dalgaları analizi ile elde edilen dispersiyon verisini tamamlamadığı durumlarda, Vs hız profillerindeki eşdeğerlikten kaynaklanan belirsizlik önemli hale gelmektedir.

## KAYNAKLAR

Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*,**35**, 415-456.

Asten, M.W., Dhu, T. ve Lam, N. (2004). Optimized array design for microtremor array studies applied to site classification: comparison of results with SPT logs. In: 13th WCEE, p. Paper No. 2903, Vancouver, B.C., Canada.

Asten, M.W. (2006). On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics*,**71,** 153-162.

Asten, M.W. (2009). Site shear velocity profiles interpretation from microtremor array data by direct fitting of SPAC curves. In: Bard PY, Chaljup E, Cornou C, Cotton F, Gueguen P (eds) 3rd international symposium on the effects of surface geology on seismic motion, vol 2. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, Grenoble, France, pp 1069-1080.

Bettig, B., Bard, P., Scherbaum, F., Riepl, J. ve Cotton, F. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*,**42**,281–304.

Capon, J. (1969). High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis. *Proc IEEE*,**57**,1408-1418.

Chavez-Garcia, F., Rodriguez, M. ve Stephenson, W. (2005). An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise. *Bull. Seismol. Soc. Am.*,**95**, 277-293.

Cho, I., Tada, T. ve Shinozaki,Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *Geophysics*,**69**,1535-1551.

Cho, I., Tada, T. ve Shinozaki, Y. (2006). Centerless circular array method: inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records. *J. Geophys.Res.*,**111**,B09315,1-12.

Claproods, M.ve Asten, M.W. (2009). Initial results from spatially averaged coherency, frequency-wavenumber and horizontal to vertical spectrum ratio microtremor survey methods for site hazard study at Launceston, Tasmania. *Explor. Geophys.*,**40**,132-142.

Fırtana, K. (2008). Uzamsal Özilişki Katsayılarının Ters Çözümü ile S-dalgası Hız Profillerinin Kestirimi,Yüksek Lisanz Tezi, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Foti, S., Comina, C., Bolero, D. ve Socco, L.V.(2009). Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*,**29**,982-993.

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

Herrmann, B.ve Ammon, C.J. (2004). Computer programs in seismology, surface waves, receiver functions, and crustal structure, version 3.30.

Kocaoğlu A. ve Fırtana, K. (2011). Estimation of Shear Wave velocity profiles by the inversion of spatial autocorrelation coefficients, *Journal of Seismology,* DOI:10.1007/s10950-011-9239-6.

Köhler, A., Ohrnberger, M., Scherbaum, F. ve Wathelet, M. (2007). Assessing the reliability of the modified three-component spatial autocorrelation technique. *Geophys. J. Int.*,**168**,779-796.

Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Ozel, O. ve Erdik, M. (2002). Site-specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.*,**92**,448-465.

Ohori, M., Nobata, A. ve Wakamatsu, K. (2002). A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays. *Bull. Seismol. Soc. Am.*,**92**,2323-2332.

Okada, H. (2003). The microseismic survey method. Geophysical Monograph Series No. 12, Society of Exploration Geophysicists of Japan, Society of Exploration Geophysicists, translated by Koya Suto.

Okada, H. (2006). Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. *Explor. Geophys.*,**37**,73-85.

Roberts, J. ve Asten, M. (2004). Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method. *Explor. Geophys.*,**35**,14-18.

Schwab, F.A.ve Knopoff, L. (1972). Methods in computational physics, chap. In: Bolt BA (ed) Fast surface wave and free mode computations. Academic Press, New York, New York, pp 8-180.

Tada, T., Cho, I.ve Shinozaki, Y. (2009). New circular-array microtremor techniques to infer Love-wave phase velocities. *Bull. Seismol. Soc. Am.*,**99**,2912-2926.

Wathelet, M., Jongmans, D. ve Ohrnberger, M. (2005). Direct inversion of spatial autocorrelation curves with the neighborhood algorithm. *Bull. Seismol. Soc. Am.*,**95**,1787-1800.

Xia, J., Miller, R. ve Park, C. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*,**64**,69-700.