SİSMİK DALGA GRADYOMETRİ YÖNTEMİ İLE YÜZEY DALGALARININ DİSPERSİYON ANALİZİ

A. Karaaslan[1], A. Kocaoğlu[2] ve S. Özalaybey[1]

[1] *Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, TÜBİTAK MAM, Kocaeli*
[2] *Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
Email: aylin.karaaslan@tubitak.gov.tr

ÖZET:

Yüzey dalgası dispersiyon verilerinden S-dalgası hız profilinin elde edilmesi zemin sınıflama ve sismik tehlike değerlendirme çalışmalarının en önemli bileşenlerinden biridir. Bu çalışmada, yüzey dalgası dispersiyonunun Sismik Dalga Gradyometri Yöntemi (SDGY) kullanılarak mühendislik ölçeğinde elde edilmesi ile ilgili uygulamalar sunulmaktadır. SDGY, küçük ölçekli ve iyi kalibre edilmiş doğrusal sismik dizilimler ile kaydedilen sismik dalga alanının uzaysal gradyanının kullanımıyla yatay dalga yavaşlığının elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yapay ve gerçek veri setleri kullanılarak SDGY'nin dispersiyon analizine uygulanabilirliğinin Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (YDÇKA) yöntemi ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve uzaysal gradyan parametrelerinin optimum değerlerinin araştırılmasıdır. Yapay veri setlerinden elde edilen sonuçlar, temel-mod yüzey dalgası yayılımının geçerli olduğu durumlarda SDGY'nin alçak frekans bandında YDÇKA yöntemine göre çok daha yüksek bir çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ortamda yüksek modlu yüzey dalgalarının var olması durumunda, temel ve yüksek modlara ilişkin grup hızlarının birbirine yaklaştığı frekanslarda SDGY, modların girişimden olumsuz etkilenmektedir. YDÇKA yöntemi ise çok kanallı dalga alanını kullanmanın getirdiği üstünlük nedeniyle farklı modların dispersiyon bilgisini başarılı bir şekilde vermektedir. Yapay verilerden elde edilen sonuçlara dayanarak, SDGY'nin, serim uzunluğunu büyütmeksizin alçak frekanslarda sağladığı yüksek çözünürlük gücü nedeniyle, dispersiyon analizinde YDÇKA yöntemini tamamlayıcı nitelikte olduğu düşünülmektedir. Gerçek veri setleri üzerinde yapılan analizler ise devam etmektedir ve sonuçlar çalışma kapsamında sunulacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik, Gradyometri, Dispersiyon, S-dalgası, YDÇKA, SDGY.

1. GİRİŞ

Büyük depremler esnasında, sediman alanlardaki yapılarda, merkezüssünden uzakta olmalarına rağmen, ağır hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu duruma verilebilecek örneklerden biri de 17 Ağustos 1999 depreminde (Mw=7.4) merkezüssünden yaklaşık 150 km uzaklıkta bulunan İstanbul'un Avcılar semtindeki yapılarda meydana gelen ağır hasardır. Avcılar'da oluşan bu ağır hasar, yerel zemin etkileri ile açıklanmaktadır (Ergin ve diğ., 2004; Bozdağ ve Kocaoğlu, 2005). Mevcut yapı stoğu göz önünde bulundurularak, deprem zararlarının azaltılmasında, sismik tehlikenin belirlenmesi ve güçlü yer hareketinin simülasyonunda zeminin S-dalgası hız profilinin doğru bir şekilde elde edilmesi kilit parametrelerden biridir. Bu nedenle zemine ait S-dalgası hız profili, özellikle ilk 30 m'nin ortalamasını temsil eden S-dalgası hızı (Vs30), günümüzde mühendislik sismolojisi ve jeoteknik çalışmalarında sıkça araştırılan önemli parametrelerden biri haline gelmiştir.

Günümüzde S-dalgası hız yapısının elde edilmesi amacıyla birçok yüzey dalgası analiz yöntemleri geliştirilmiş olup, bu yöntemler arazideki pratik uygulamaları ve ekonomik olmaları nedeniyle tercih edilir hale gelmiştir (Park ve diğ., 1999; Zor ve diğ., 2010). Yüzey dalgalarının faz hızının frekansa (veya dalga boyuna) bağlı olarak değişim göstermesi dispersiyon özelliği olarak bilinmektedir. Yöntemlerin uygulamasında yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanılmakta ve S-dalgası hızının derinlikle

değişimi elde edilebilmektedir. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinde, sismik alıcılar tarafından kaydedilen Rayleigh dalgaları analiz edilerek, zeminin dispersif özellikleri saptanabilmekte ve Rayleigh dalgasına ait faz hızı dispersiyon eğrileri ters çözüm işlemiyle 1-boyutlu S-dalgası hız profillerine dönüştürülmektedir.

Rayleigh dalgası dispersiyon eğrilerinin elde edimesi amacıyla birçok farklı yüzey dalgası analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazılarında kaynak olarak yerin doğal titreşimleri (pasif kaynak) kullanılırken, mühendislik amaçlı bazı uygulamalarda ise yüzey dalgalarını üretmek için balyoz, vibro ya da patlatma gibi yapay kaynaklar (aktif kaynak) tercih edilmektedir. Pasif kaynaklı yüzey dalgası faz hızı analiz yöntemleri genel anlamda mikrotremör dizilim yöntemleri olan Uzaysal Özilişki (SPAC) (Aki, 1957) ve Frekans-Dalgasayısı (F-K) (Capon, 1957) yöntemlerinin yanısıra Mikrotremör Kırılma (REMI) yöntemi (Louie, 2001) olarak tanımlanabilir. Aktif kaynaklı bir yüzey dalgası faz hızı analiz yöntemi ise Park ve diğ. (1999) tarafından önerilen Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (YDÇKA) yöntemidir. YDÇKA'da doğrusal bir alıcı dizilimi ile kaydedilen yüzey dalgası alanının hızı frekansın fonksiyonu olarak kestirilebilmektedir. YDÇKA ile elde edilen dispersiyon eğrileri, özellikle yüksek frekans bandındaki (5-15 Hz) yüzey dalgası faz hızının değişimini, dolayısıyla sığ derinliklerideki (< 30-40 m) S-dalgası hızının elde edilmesini sağlamaktadır.

Mikrotremör dizilim ve YDÇKA yöntemlerine tamamlayıcı olabilecek yeni bir yötem ise ilk kez Langston (2007a) tarafından önerilen Sismik Dalga Gradyometri Yöntemi (SDGY)'dir. Yöntem, dalga denkleminin basit bir çözümünü; yer değiştirme alanına ait uzaysal gradyanı ve zaman gradyanını yer değiştirmenin kendisiyle ilişkilendirme ilkesiyle çalışmaktadır (Langston 2007a, 2007b ve 2007c). Sismik dalga alanının uzaysal değişimini inceleyen bu yöntem, sonuç olarak yatay dalga hızı ve geometrik yayılma bilgisini vermektedir. Bu çalışmada, SDGY kullanılarak yüzey dalgası faz hızı dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Üretilen yapay veriler ve arazide toplanan gerçek atış kayıtları üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı SDGY ve YDÇKA analizleri ile yöntemin avantajları/dezavantajları incelenmiştir.

2. SİSMİK DALGA GRADYOMETRİ YÖNTEMİ (SDGY)

SDGY, temel olarak, bir ya da iki boyutlu alıcı kayıtlarından yatay dalga yavaşlığının ve geometrik yayılmanın uzaysal değişiminin incelenmesi amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir (Langston, 2007a, 2007b ve 2007c). Yöntemde, sismik dalga genliklerinin bir alıcı dizilimi boyunca uzaklığa ve yatay dalga yavaşlığına bağlı değişiminin izlenmesi esastır. Geometrik yayılmaya ve uzaysal olarak değişen bir hıza sahip, ancak fiziksel özellikleri hızlı değişmeyen bir ortamda yayılan basit bir cisim ya da yüzey dalgasının yer değiştirmesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$u(t,x) = G(x)\, f(t - p(x - x_0)) \tag{1}$$

(1) nolu eşitlikte $G(x)$ geometrik yayılmaya, p uzaklık (x) ile değişen yatay dalga yavaşlığına, x_0 ise referans bir uzaklığa karşılık gelmektedir. (1) nolu eşitliğin x'e göre türevinin alınması ile

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A(x)u + B(x)\frac{\partial u}{\partial t} \tag{2}$$

eşitliği bulunur. (2) nolu eşitlikte $A(x)$ ve $B(x)$ gradyometri katsayıları üzerinden üç farklı zaman serisi; yerdeğiştirmenin uzaysal türevi, yerdeğiştirmenin kendisi ve yer değiştirmenin zamansal türevi; arasındaki ilişkiyi tanımlanmaktadır. (2) nolu eşitlik gösterim açısından basitleştirilerek aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$u_{,x} = Au + Bu_{,t} \tag{3}$$

(3) nolu eşitlikteki virgül ile gösterim x ve t değişkenleri üzerinden türevlere karşılık gelmektedir. Burada Hilbert dönüşümü alınır, $-i$ ile çarpılır ve eşitliğin kendisine eklenirse analitik sinyal (4) nolu eşitlikteki gibi elde edilir.

$$U_{,x} = AU + BU_{,t} \tag{4}$$

Analitik sinyal faz bilgisiyle birlikte tanımlandığında şu şekilde yazılabilir:

$$|U_{,x}|e^{i\psi} = A|U|e^{i\phi} + B\frac{\partial}{\partial t}\left\{|U|e^{i\phi}\right\} \tag{5}$$

(5) nolu eşitlikte ϕ ve ψ sırasıyla yerdeğiştirme analitik sinyalinin kendisine ve uzaysal türevine ait anlık fazlardır. Zaman türevi alınarak zincir kuralı uygulandığında (6) nolu eşitlik bulunur.

$$|U_{,x}|e^{i\psi} = A|U|e^{i\phi} + B\frac{\partial|U|}{\partial t}e^{i\phi} + B|U|e^{i\phi}i\frac{\partial\phi}{\partial t} \tag{6}$$

Anlık frekans, anlık faz üzerinden zaman türevi alınarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{7}$$

Bu nedenle (6) nolu eşitlikte son terim yerdeğiştirme alanının anlık frekans bilgisini taşımaktadır. Anlık faz ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left[\frac{-H[u(t)]}{u(t)}\right] \tag{8}$$

Bu durumda yerdeğiştirmenin uzaysal türevine ait anlık faz ise şu şekilde verilmektedir:

$$\psi(t) = \tan^{-1}\left[\frac{-H[u_{,x}(t)]}{u_{,x}(t)}\right] \tag{9}$$

(8) nolu eşitlikte verilen anlık faz üzerinden türev alınarak anlık frekans $u(t)$'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\omega(t) = \frac{1}{|U|^2}\{\dot{u}(t)H[u(t)] - u(t)H[\dot{u}(t)]\} \tag{10}$$

(10) nolu eşitlikte $\omega(t)$ zamana bağlı olarak hesaplanan anlık frekansı**,** $|U|$ yerdeğiştirmenin Hilbert transformu üzerinden alınan zarf fonksiyonunu, $\dot{u}(t)$ ise yerdeğiştirmenin zaman türevini göstermektedir.

(10) nolu eşitlik düzenlendiğinde (11) nolu eşitlik elde edilir.

$$|U_{,x}|e^{i(\psi-\phi)} = A|U| + B\frac{\partial|U|}{\partial t} + iB|U|\omega(t) \tag{11}$$

(11) nolu eşitliğin gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı eşitlikler olarak yazıldığında (12) ve (13) nolu eşitlikler bulunmaktadır.

$$|U,_x|\cos(\psi-\phi)=A|U|+B\frac{\partial|U|}{\partial t} \tag{12}$$

$$|U,_x|\sin(\psi-\phi)=B|U|\omega(t) \tag{13}$$

Gerçel ve sanal kısımların yukarıdaki eşitliklerde görüldüğü şekilde ayrılması bilinmeyen iki ayrı uzaysal değişim katsayısı A ve B için iki ayrı eşitlik vermektedir. (14) ve (15) nolu eşitliklerde A ve B katsayılarının nasıl hesaplandığı görülmektedir.

$$B=\frac{1}{\omega(t)}\frac{|U,_x|}{|U|}\sin(\psi-\phi) \tag{14}$$

$$A=\frac{|U,_x|}{|U|}\cos(\psi-\phi)-\frac{1}{\omega(t)}\frac{|U,_x|}{|U|^2}\frac{\partial|U|}{\partial t}\sin(\psi-\phi) \tag{15}$$

B(x) katsayısının $[x_0,x]$ arasında integralinin alınması ile yatay dalga yavaşlığı ya da yavaşlığın tersi olan yatay dalga hızı (16) nolu eşitlikteki gibi elde edilebilmektedir.

$$p=-\frac{1}{(x-x_0)}\int_{x_0}^{x}B(x)dx \tag{16}$$

(16) nolu eşitlikte L'Hospital kuralı uygulanırsa limit $x\to x_0$'a giderken dalga yavaşlığı aşağıdaki şekilde elde edilir:

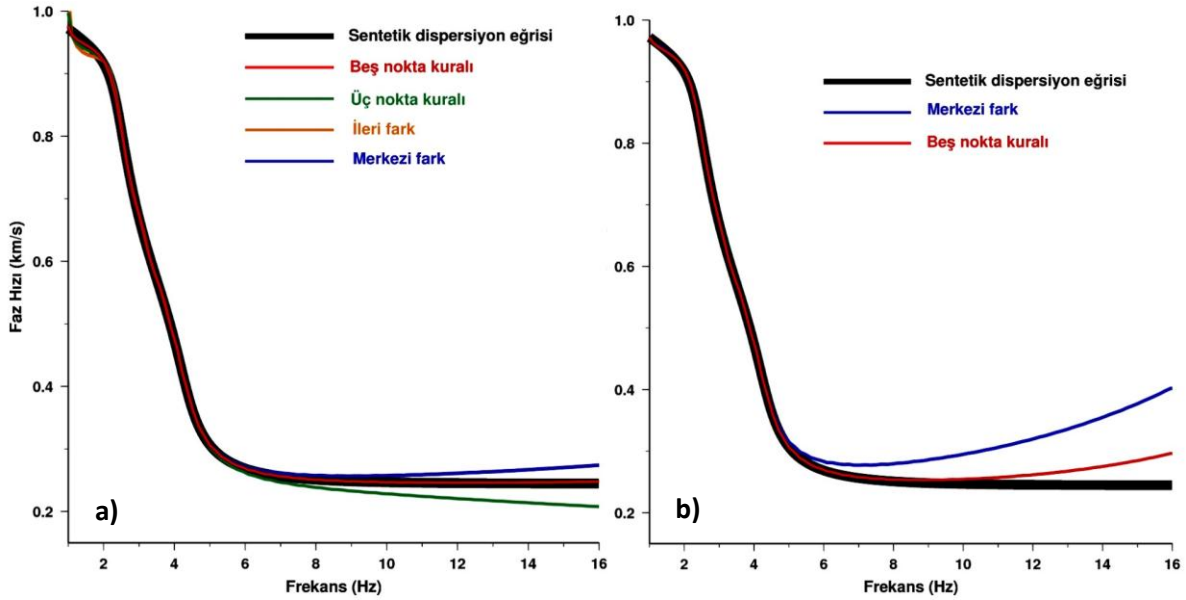
$$p(x_0)=-B(x_0) \tag{17}$$

SDGY ile, bir noktada dalgaya ait yer değiştirmenin kendisi ve türevleri ölçüldüğü takdirde, (2) nolu eşitlikte tanımlanan ilişki kullanılarak o noktaya ait yatay dalga hızı ve geometrik yayılma elde edilebilmektedir. Yöntem ile yatay dalga hızları belirlenebildiğinden, bu çalışmada SDGY kullanılarak yüzey dalgası faz hızı dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Dispersiyon eğrilerinin hesaplanması, frekansa bağlı faz hızı değişimlerinin belirlenmesine bağlı olduğundan, yöntemin uygulamasına bir süzgeçleme aşaması eklenmiştir. Uygulanan prosedürde sinyaller, öncelikle Dziewonski (1969) tarafından önerilen Gauss filtresi ile dar frekans bantlarında süzülmekte ve süzme işleminin ardından her bir frekans bandındaki B katsayısı (14) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımla, süzülen her bir frekans bandı için faz hızı değerleri (17) nolu eşitlik kullanılarak, B katsayısı üzerinden elde edilebilmektedir. Böylece her bir frekans bandı için yüzey dalgası faz hızları belirlenmiş olmakta, işlemin süzülen tüm frekanslar için tekrarlanması ile faz hızı dispersiyon eğrisi oluşturulmaktadır.

3. SİSMİK DALGA GRADYOMETRİ YÖNTEMİNİN ÖNEMLİ PARAMETRELERİNİN ANALİZ EDİLMESİ

SDGY'nin doğru çalışması, doğrusal bir alıcı dizilimi boyunca kaydedilen yer değiştirme alanına ait zamansal ve uzaysal türevlerin en az hatayla hesaplanabilmesine bağlıdır. Zamansal türevin doğru bir şekilde alınabilmesi için zamanda örnekleme aralığının ilgilenilen en yüksek frekans değeri ile orantılı olacak şekilde yeterince küçük tutulması gerekirken, uzaysal türev hesaplanırken kullanılan sayısal türev alma yönteminin hata oranı ve kullanılan alıcı aralığı önem kazanmaktadır. SDGY uygulamasının başarısında önemi olan türev alma yöntemlerinin ve alıcı aralığının karşılaştırılması için öncelikle 1-boyutlu bir yer modeli için üretilen faz hızı dispersiyon eğrisinden düzlem dalgaların süperpozisyonu yöntemi ile basit

sentetik sismogramlar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yer değiştirme sismogramlarının uzaysal türevleri dört farklı sonlu farklar operatörü ile hesaplanmış ve sonuçlar 2 m ve 4 m alıcı aralıkları için teorik dispersiyon eğrisiyle karşılaştırılmıştır. Farklı türev alma yöntemlerinden elde edilen dispersiyon eğrileri ve teorik dispersiyon eğrisi Şekil 1'de görülmektedir.

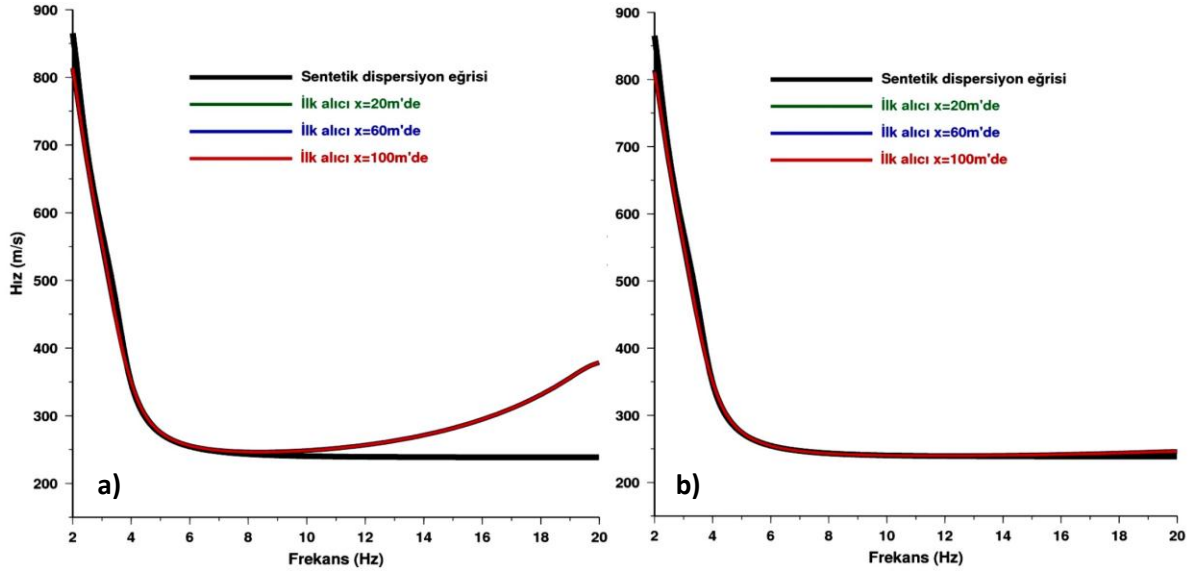


Şekil 1. a) 2m ve b) 4m alıcı aralıkları için farklı türev alma yöntemleri ile elde edilen dispersiyon eğrileri.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, türev alma yöntemleri içerisinde yüksek frekansta en iyi dispersiyon sonucunu veren yöntem Beş Nokta Kuralı'dır (Burden, L. R. & Faires, J. D., 1989). Beş Nokta Kuralı (BNK) kullanılarak hesaplanan dispersiyon eğrisi yüksek frekansta Langston (2007a)'da kullanılan Merkezi Fark Yöntemi'ne göre büyük oranda iyileşme sağlamaktadır. BNK kullanılması durumunda, uzaysal türevin en fazla 10% hata ile hesaplanabilmesi için gereken alıcı aralığı aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

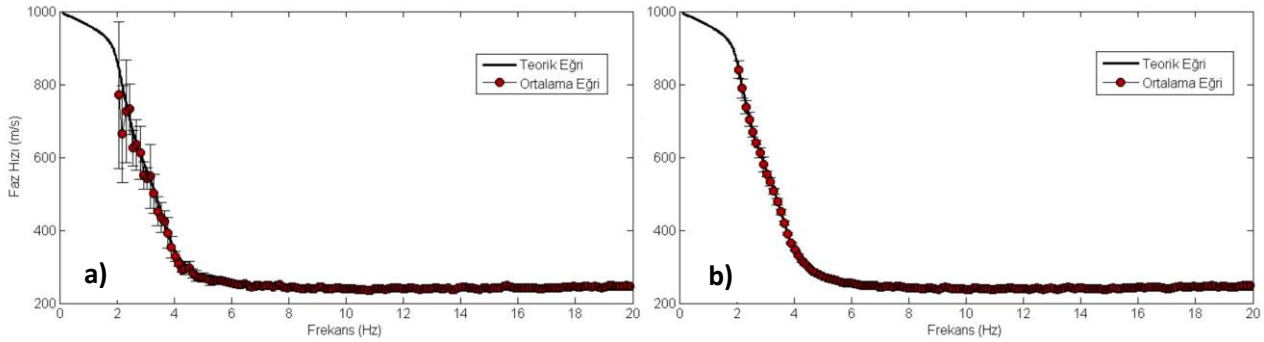
$$\Delta x \leq 0.210\lambda$$

Diğer bir aşamada SDGY uygulamasında en önemli parametrelerden biri olan uygun alıcı aralığı araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda üretilen basit sentetikler için ilgilenilen frekans bandında (2-20 Hz) 2 m alıcı aralığı ile yüksek frekans bandındaki faz hızlarının 4m alıcı aralığına göre teorik eğriyle çok daha uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 2). Şekil 2'den de izlenebileceği gibi, 4m alıcı aralığı yerine 2m alıcı aralığının tercih edilmesi ile, yüksek frekanstaki çözünürlük 10 Hz'den yaklaşık 20 Hz'e kadar çıkmıştır.



Şekil 2. a) 4m ve b) 2m alıcı aralıkları için faz hızı dispersiyon analizleri.

SDGY'de hız analizi yapılırken yer değiştirme ve yer değiştirmenin uzaysal türevine ait zarfların oranları kullanıldığından (Eşitlik 14 ve 15) yöntemi en çok etkileyen faktörlerden biri de kaydedilen sinyalin sinyal/gürültü oranı (SGO) olmaktadır. SGO'nun SDGY ile hız analizine etkisinin incelenmesi amacıyla ard arda dizilmiş bulunan alıcılar üzerine sırasıyla rastgele ve zamanda bir örnek kaydırılmış (benzer) gürültüler eklenmiştir. Gürültü eklenmiş sismogramlar üretilirken SGO göz önünde bulundurulmuş ve genlik olarak 5% (SGO=20), 10% (SGO= 10) ve 15% (SGO=6.67) gürültü içeren sismogramlar oluşturulmuştur. Gürültü analizinin sonucunda, tüm kanallara birbirinden bağımsız (ilişkisiz) gürültüler eklendiğinde yüksek SGO'larda dahi alçak frekanstaki faz hızlarında teorik eğriden sapmalar görülmektedir. Alıcılara benzer gürültünün eklenmesi durumunda ise yöntem tüm frekans bandında teorik eğriyle neredeyse birebir faz hızı sonuçları vermektedir (Şekil 3).

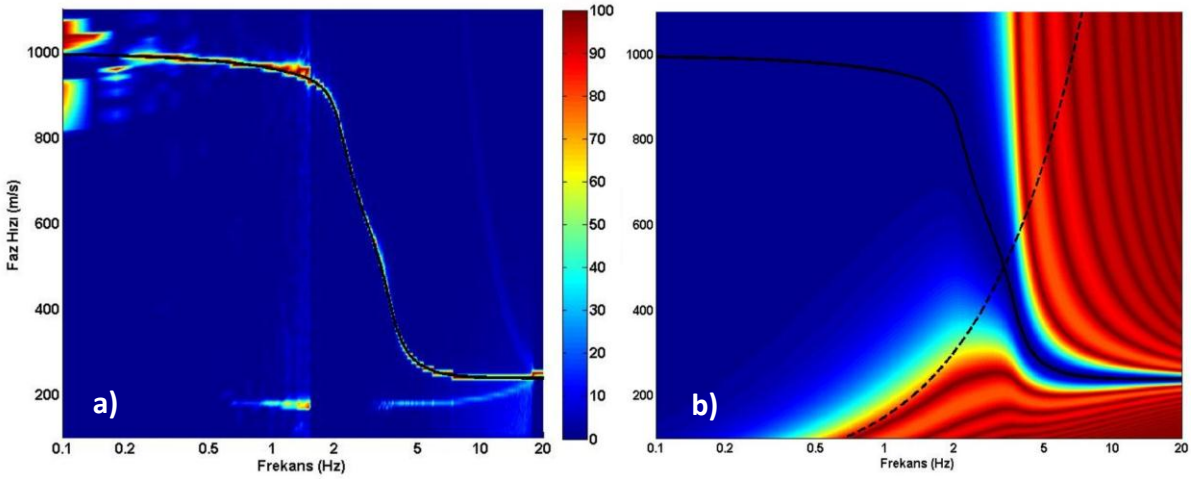


Şekil 3. SDGY ile a) 5% rastgele ve b) 5% benzer gürültü için faz hızı dispersiyon analizi sonuçları.

4. SDGY'NİN MASW İLE KARŞILAŞTIRILMASI

4.1. Tek Modlu Basit Sentetik için Karşılaştırma

SDGY ve YDÇKA yöntemlerinin faz hızı dispersiyon çözümleri öncelikle ortamda tek bir yüzey dalgası modu yayınması durumu için karşılaştırılmıştır. 2m alıcı aralığına ve 250 m serim uzunluğuna sahip tek modlu bir sentetik sismogram için SDGY ve YDÇKA ile elde edilen faz hızı dispersiyon sonuçları Şekil 4'te verilmektedir.

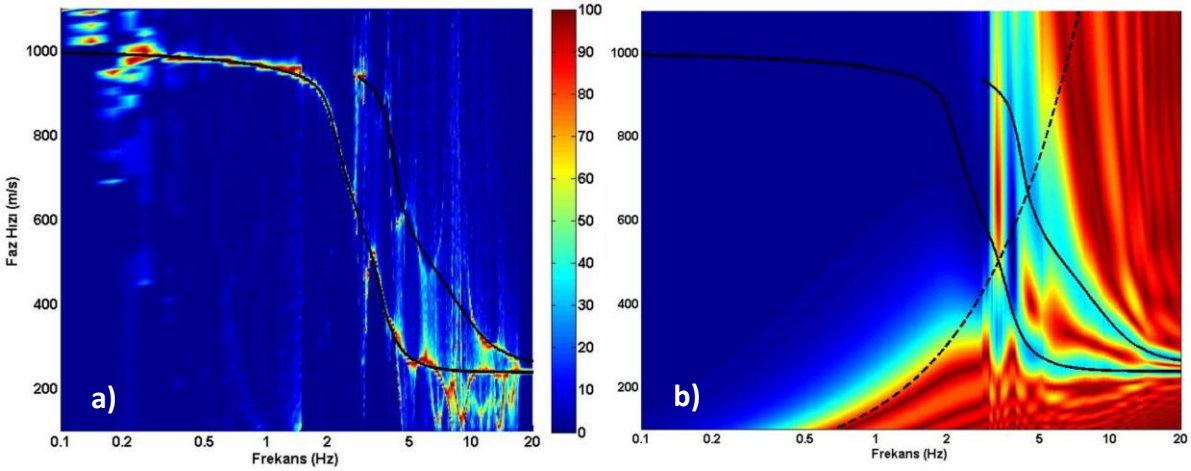


Şekil 4. Tek modlu basit sentetik için a) SDGY ve b) YDÇKA yöntemlerinin dispersiyon sonuçları (düz siyah eğriler teorik dispersiyon eğrisidir).

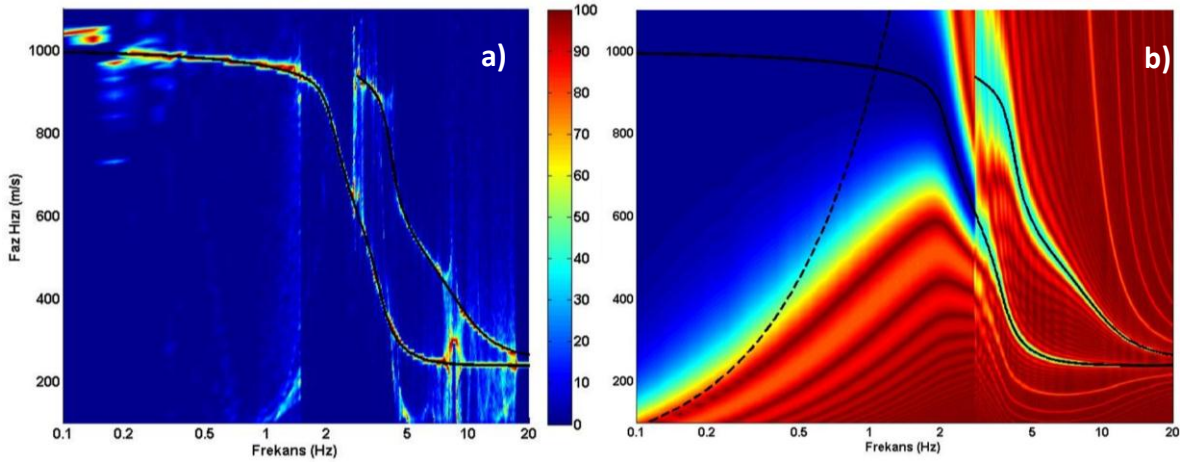
Tek modlu basit sentetik için SDGY ve YDÇKA ile elde edilen dispersiyon analizi sonuçları incelendiğinde, SDGY'nin alçak frekans (0.2-3 Hz) çözünürlüğünün YDÇKA'ya göre çok daha yüksek olduğu, böylece özellikle bu frekans bandında faz hızlarının YDÇKA'ya göre çok daha düşük hata oranları ile çözülmesini sağladığı görülmektedir.

4.2. İki Modlu Basit Sentetik için Karşılaştırma

SDGY ile yüzey dalgası dispersiyon analizinde, yöntemin yüzey dalgası modlarını ayırma ve dalga alanında çoklu modlar olması durumunda bu modlara ait faz hızlarını saptayabilme gücünü test etmek amacıyla iki modlu basit sentetik sismogramlar oluşturularak, SDGY ve YDÇKA yöntemlerinin dispersiyon analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. 2m alıcı aralığına ve 1 km'lik serim uzunluğuna sahip iki modlu basit bir sentetik için her iki yöntemle hesaplanan faz hızı dispersiyonları Şekil 5 ve 6'da sunulmaktadır.



Şekil 5. a) 242-250 m aralığındaki 5 alıcı sismogramının SDGY ile ve b) 100-250 m aralığındaki tüm alıcı hattının YDÇKA ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan faz hızı dispersiyon analizi sonuçları (düz siyah eğriler teorik dispersiyon eğrisidir).



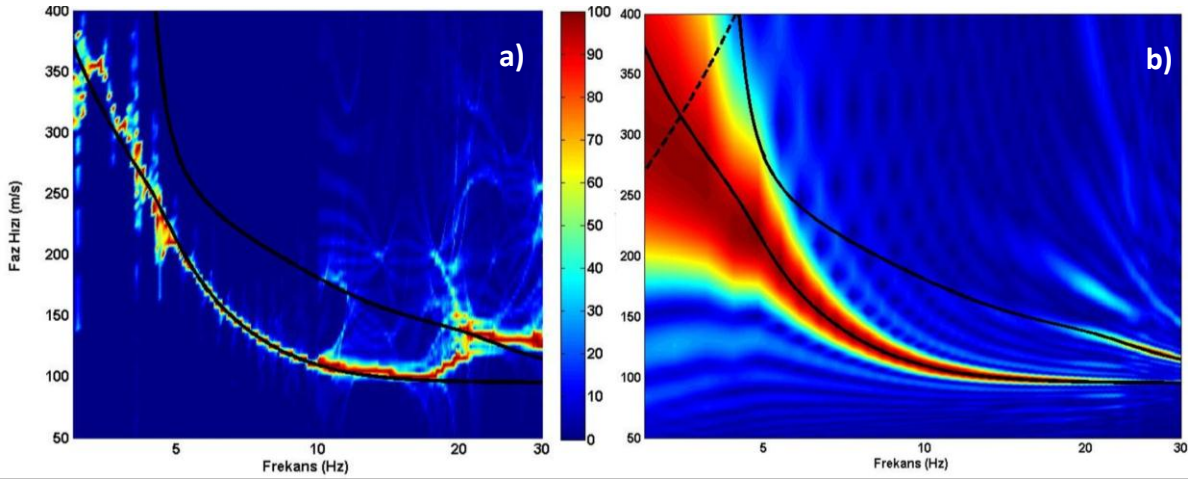
Şekil 6. a) 992-1000 m aralığındaki 5 alıcı sismogramının SDGY ile ve b) 100-1000 m aralığındaki tüm alıcı hattının YDÇKA ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan faz hızı dispersiyon sonuçları (düz siyah eğriler teorik dispersiyon eğrisidir).

242-250 m aralığındaki alıcılardan SDGY ile elde edilen dispersiyon analizinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yalnızca temel mod enerjisinin bulunduğu alçak frekansta, 0.2 Hz'ten yaklaşık 3 Hz'e kadar, oldukça yüksek bir çözünürlüğe ulaşıldığı görülmektedir. YDÇKA ise aynı frekans bandında faz hızlarını çok düşük bir çözünürlük ile vermektedir. Buna karşılık, SDGY ile yapılan dispersiyon analizi sonuçlarında, modların grup hızlarının birbirine yakın olması, dolayısıyla yakın mesafede zamanda mod ayrımlılığının sağlanamaması nedeniyle, özellikle 5 Hz'ten yüksek frekanslarda modlara ait faz hızlarının doğru bir şekilde elde edilemediği görülmektedir. YDÇKA ise yüksek frekans bandında modlara ait faz hızlarını kestirmede başarılıdır (Şekil 5). 992-1000 m mesafesindeki alıcılardan SDGY ile elde edilen dispersiyon görüntüsü incelendiğinde; bu mesafede zamanda mod ayrımlılığının sağlandığı, dolayısıyla genel anlamda tüm frekans bandında her iki moda ait faz hızlarının doğru bir şekilde çözülebildiği görülmektedir. YDÇKA ile 100-1000 m alıcı hattından elde edilen dispersiyon sonucu, yöntemin alçak frekans bandında (< 2 Hz) halen düşük çözünürlük ile çalışmakta olduğunu, buna karşılık yüksek frekansta yüzey dalgası modlarına ait faz hızlarının ayırt edilerek doğru bir şekilde çözüldüğünü göstermektedir (Şekil 6).

4.3. Tam Sentetik Sismogramlar için Karşılaştırma

Sentetik sismogramların üretilmesinde, dispersiyon eğrileri üzerinden düzlem dalgaların süperpozisyonu yöntemine göre daha gerçekçi bir yaklaşım olacağı için, sismik kaynağın mod enerjilerinin oluşumu üzerine etkileri ve ortamın soğurulma özelliklerini de içerecek bir yöntem tercih edilmiştir. Tam sentetik sismogramlar çok katmanlı bir yer modelinden sonlu farklar yöntemi (Vidale, 1988) kullanılarak üretilmiştir.

Üretilen sentetik sismogramlarda alıcı hattı kaynaktan 2 m uzaklıkta başlamakta, 1m alıcı aralığı ile devam etmekte ve 97 m uzaklıkta son bulmaktadır. Sentetik sismogramlar düşey bir nokta kaynak için hesaplanmıştır. Mühendislik amaçlı çalışmalarda faz hızının genel anlamda 0.5-30 Hz frekans aralığında elde edilmesi yeterli olmaktadır (Zor ve diğ., 2010). Bu nedenle analizler, sentetik sismogramların sinyal genliğinin 5 Hz'in altında oldukça zayıfladığı da göz önünde bulundurularak, 3-30 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. a) Hat sonundaki beş alıcıdan SDGY ile ve b) tüm alıcı hattından YDÇKA ile hesaplanan faz hızı dispersiyon görüntüleri (düz siyah eğriler teorik dispersiyon eğrisidir).

Şekil 7'deki sonuçlar incelendiğinde, SDGY ile temel moda ait faz hızlarının yaklaşık 19 Hz'e kadar yüksek çözünürlükle elde edildiği, 19 Hz'ten sonra ise 1. yüksek modun faz hızlarına geçiş olduğu gözlenmektedir. YDÇKA ile yapılan dispersiyon kestiriminde ise, temel moda ait faz hızı değerlerinin 5-30 Hz frekans bandında doğru bir şekilde elde edildiği ve yaklaşık 18 Hz'te giriş yapan 1. yüksek moda ait faz hızlarının da bu frekanstan itibaren elde edildiği görülmektedir. Bununla beraber YDÇKA ile 5 Hz frekansında elde edilen faz hızlarının hata oranı %30 civarındadır ve bu oran 3 Hz civarında %50'yi aşmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, faz hızı dispersiyon analizinde kullanılabilecek yeni bir yöntem olan SDGY'nin önemli parametreleri incelenmiş, aynı sentetik veriler üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı SDGY ve YDÇKA analizleri ile yönteminYDÇKA karşısındaki avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, SDGY için en önemli adımlardan biri olan yer değiştirmenin uzaysal türevinin hesaplanmasında en doğru sonuçları veren türev alma yöntemi BNK'dır. BNK için uzaysal örnekleme aralığı ve en küçük dalga boyu arasında bir ilişki tanımlanmıştır. Bu ilişkiye göre, uzaysal türevin en fazla 10% hata ile hesaplanabilmesi için kullanılması gereken alıcı aralığı ilgilenilen en küçük dalga boyunun 5'te biri civarında olmalıdır ve alıcı aralığının mümkün olduğunca küçük tutulması SDGY'nin yüksek frekans çözünürlüğünü artırmaktadır. SDGY, sismik sinyaller üzerindeki gürültünün türüne ve seviyesine oldukça duyarlıdır. SDGY'de kullanılan alıcı gruplarına ait sinyallerin üzerine birbiriyle ilişkisiz gürültü bileşenleri eklendiğinde yüksek SGO'larda (SGO= 20) dahi faz hızı dispersiyonu alçak frekans bölümünde olumsuz etkilenmekte ve yöntem ile hesaplanan dispersiyon eğrileri, teorik dispersiyon eğirisi etrafında salınımlar göstermektedir. Buna karşın, ard arda gelen alıcı sismogramları üzerine birbirine benzer (ilişkili) gürültüler bindirildiğinde, yöntemin omurgasını oluşturan uzaysal türev alma işlemi doğru çalışmakta ve yöntem çok düşük SGO'larda dahi tüm frekans bandında doğru faz hızı dispersiyon sonuçları vermektedir.

SDGY'nin alçak frekans bandında YDÇKA'ya oranla daha yüksek çözünürlüklü faz hızı dispersiyon sonuçları verdiği gözlenmiş, irdelenen sentetikler için YDÇKA'nın alçak frekans faz hızı dispersiyon çözümünün çok daha yüksek hata oranları içerdiği belirlenmiştir. SDGY'nin mod girişiminin gerçekleştiği frekanslarda yüzey dalgası modlarının faz hızlarını ayırma konusunda başarılı olmadığı, bununla beraber, farklı modların faz hızlarının saptanabilmesi için gerekli olan zamanda mod ayrımlılığının hatta bulunan uzak mesafe alıcılar kullanılarak sağlanabildiği görülmüştür. Sentetik verilerden elde edilen sonuçlara dayanarak SDGY'nin, zemine ait hız yapısının mühendislik amaçlı olarak araştırılması çalışmalarında YDÇKA'yı tamamlayıcı, pratik bir yöntem olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. Toplanan gerçek atış kayıtları üzerinde gerçekleştirilen analizler ise halen devam etmektedir ve sonuçlar çalışma kapsamında sunulacaktır.

KAYNAKLAR

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

Bozdağ, E., Kocaoğlu, A.H.. (2005). Estimation of site amplifications from shear-wave velocity profiles in Yeşilyurt and Avcılar, İstanbul, by frequency-wavenumber analysis of microtremors, *J. Seismol*., **9**, 87–98.

Burden, L. R., Faires, J. D. (1989). Numerical Analysis, 4th ed., PWS-KENT, Boston, 0-53491-585-X.

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

Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M. (1969). A technique for analysis of transient seismic signals, *Bull. Seism. Soc. Am*., **59**, 427444.

Ergin,M., Özalaybey, S., Aktar, M., Yalçın, M. N. (2004). Site amplification at Avcılar, İstanbul. *Tectonophysics*, **391**, 335–346.

Karaaslan, A. (2011). Dalga Gradiyometri Yöntemi İle Yüzey Dalgalarının Dispersiyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Langston, C. A. (2007a) . Spatial gradient analysis for linear seismic arrays, *Bull. Seism. Soc. Am*., **97**, 265–280.

Langston, C. A. (2007b). Wave gradiometry in two dimensions, *Bull.Seism. Soc. Am*., **97**, 401–416.

Langston, C. A. (2007c). Wave gradiometry in the time domain, *Bull.Seism. Soc. Am*., **97**, 926–933.

Louie, J. N. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays, *Bull.Seism. Soc. Am*., **91**, 347-364.

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW), *Geophysics*, **64**, 800-808.

Vidale, J. (1988). Finite-difference calculation of traveltimes, *Bull. Seism. Soc. Am*., **78**, 2062-2076.

Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Tapırdamaz, M.C., Özalaybey, S., Tarancıoğlu, A. Erkan, B. (2010). Shear-wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active-passive array surface wave and single-station microtremor methods, *Geophys. J. Int*., **182**, 1603–1618.