



AKTİF ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI ANALİZİ (A-ÇKYDA)YÖNTEMİNDE VERİ TOPLAMA VE TABAKA PARAMETRELERİNİN TEMEL MOD DİSPERSİYON EĞRİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Hakan KARSLI*, Mustafa ŞENKAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Veri Toplama,
Tabaka Parametreleri,
Dispersiyon Eğrisi,
A-ÇKYDA,
Modelleme.

Öz

Aktif ÇKYDA yönteminde, sıg yeraltının güvenilir bir S-dalgası hız-derinlik profilini elde etmek için en önemli aşamalarından biri, geniş frekans aralığında sürekli ve yüksek ayrımlı bir dispersiyon eğrisinin elde edilmesidir. Bu makalede, tabaka (S- ve P-dalga hızları, yoğunluk ve kalınlık) ve veri toplama (kaynak ofseti- X_0 , alıcı aralığı- dx ve sayısı- N , serim boyu- $L=(N-1)*dx$) parametrelerinin, yüzey dalga alanının temel mod dispersiyon eğrisi üzerindeki etkileri, yapay atış verilerinin analizi ile incelenmiştir. Yapay veriler, tabaka yansıma/iletim katsayısı tekniği ile hesaplanan dispersiyon eğrisi kullanılarak, her bir alıcıda harmonik mod toplama tekniği ile oluşturulmuştur. Buna göre, düşük S-dalga hızlı ara tabakalar dispersiyon eğrisinin düşük frekans bölgesinde düşük hızlara kaymasına, yüksek hızlı ara tabakalar ise, dispersiyon eğrisinin yüksek frekanslarda sürekliliğinin bozulmasına (zig-zag etkisi) ve yüksek mod etkisi yanılıgına neden olabileceği gözlenmiştir. Kaynak ofseti yüzey dalgalarının tam dalga formlarının oluşmasında etkin iken, ilk ve son alıcı arası uzaklık olan serim uzunluğunun ise, dispersiyon eğrisinin frekans bandını ve çözünürlüğünü etkilediği görülmüştür. Ayrıca, geniş alıcı aralıklarının, dispersiyon eğrisinin düşük frekans bölgesindeki güvenilirliğinin arttırmasının yanında, yüksek frekans bölgesinde dalga sayısı katlanması nedeniyle dispersiyon eğrisinin sürekliliğini bozduğu görülmüştür. Sonuç olarak, farklı dalga hızlarına sahip yer modelleri için üretilen yapay veriler üzerinde yapılan analizler $N < 24$ $4.0m \leq dx \leq 2m$, $N \geq 24$ $0.5m \leq dx \leq 2m$ ve $X_0 \geq 4*dx$ veya $X_0 \geq L/5$ kombinasyonlarının, farklı yer altı koşullarının kestirimi amacıyla toplanacak aktif ÇKYD verileri için güvenilir olacağını göstermiştir.

INFLUENCES OF DATA ACQUISITION AND LAYER PARAMETERS ON FUNDAMENTAL DISPERSION CURVE IN ACTIVE MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVE (A-MASW) METHOD

Keywords

Data Acquisition,
Layer Parameters,
Dispersion Curve,
MASW,
Modelling.

Abstract

Obtaining a continuous and high resolution dispersion curve in a wide frequency range is one of the most important steps to determine a reliable shear (S) wave velocity-depth profile of the shallow subsurface in active MASW method. In this article, the effects of layer (or physical) (S- and P-wave velocities, density and thickness) and data acquisition (source offset- X_0 , receiver spacing- dx and number- N , spread length- $L=(N-1)*dx$) parameters on the fundamental mode dispersion curve of the surface wave field were investigated by analyzing the synthetic shot gathers. The synthetic data were generated by harmonic mode summation technique at each receiver with using of the dispersion curve calculated by the layer reflection/transmission coefficient technique. Accordingly, it was observed that low S-wave velocity interlayers may cause shifting the dispersion curve to low velocities in the low frequency band, while high velocity interlayers may cause both discontinuity on the dispersion curve at high frequencies (zig-zag effect) and high-mode effect error. It was seen that while the source offset is effective in the formation of full waveforms of surface waves, the distance between the first and last

* İlgili yazar/Corresponding author: hkarqli@ktu.edu.tr, +90-462-377-2020

receiver affects the frequency band and resolution of the dispersion curve. In addition, it is observed that wide receiver sampling increases the reliability of the dispersion curve in the low frequency region, though it disrupts the continuity of the dispersion curve at high frequencies due to wavenumber aliasing. As a result, the analyses made on the synthetic data generated for various subsurface layer models with different wave velocities demonstrate that the combinations of $N < 24$ $4.0m \leq dx \leq 2m$, $N \geq 24$ $0.5m \leq dx \leq 2m$ and $X0 \geq 4 * dx$ or $X0 \geq L/5$ would provide practical convenience for the selection of acquisition parameters for active MASW data in the field.

Alıntı / Cite

Karslı, H., Şenkaya, M., (2022). Aktif Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (A-Çkyda)Yönteminde Veri Toplama Ve Tabaka Parametrelerinin Temel Mod Dispersiyon Eğrisi Üzerindeki Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 943-962.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Karslı, 0000-0002-7758-1363
M. Şenkaya, 0000-0003-2152-3479

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.02.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.04.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	07.05.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

1. Giriş (Introduction)

Aktif çok kanallı yüzey dalgası analizi (A-ÇKYDA) yöntemi, yeraltının bir ya da çok boyutlu katılık profilini karakterize etmek ve ilgili yer ortamının dinamik elastik parametrelerini elde etmek için yüzeye yakın S-dalga hız yapısını belirlemede geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yöntem, kaynak-alıcı düzenleri ve zamansal kayıt parametreleri açısından klasik sismik kırılma yönteminin özel bir uygulaması olup, kaydedilen dalga alanlarından Rayleigh ve Love yüzey dalgalarının dispersiyon analizini içerir. Uygulamada, düşey bileşenli alıcılarda kaydedilen yüzey dalgaları Rayleigh ve yatay bileşenli alıcılarda kaydedilenler ise Love yüzey dalgalarıdır. Her iki yüzey dalgasının dispersiyon analizinden elde edilen hız bilgisi kayma dalgası hızı (S-dalga hızı, V_s)'dir. S-dalga hızı mühendislik uygulamalarına esas olan zemin ve kayaların dayanımlarının ve sıklık-katılık özelliklerinin belirlenmesinde hayati önem taşır. Bu nedenle, A-ÇKYDA yöntemi, mühendislik yapılarının zemin-yapı etkileşimlerinin belirlenmesi için gerekli olan, yer yüzeyinden 30m derinliğe kadar ortalama kayma dalgası hızının (V_{s30}) güvenilir hesaplanmasında ülkelerin planlama ve imarla ilgili kanun ve yönetmeliklerine dahil edilmiştir. Yöntemin Park vd. (1999) tarafından literatüre sunulması sonrası, maliyetli olan kuyu yukarı (uphole), kuyu aşağı (downhole) ve karşılıklı kuyu (crosshole) gibi genellikle zemin ve kaya ortamların doğal dokusunu bozan geleneksel sismik araştırmalar yerine tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece A-ÇKYDA yöntemi, tabakalı ortamın geometrik yapısını ve litolojik değişkenliğini daha kısa zamanda ve tahribatsız şekilde sunabilme imkanı sağlamaktadır.

Yöntem, geleneksel S-dalgası kırılma uygulamasına göre bazı avantajlara sahip olduğundan (örn. daha yüksek sinyal/gürültü oranı veya düşük hızlı tabaka problemlerinden etkilenmemesi), yakın yüzey jeolojik ve jeoteknik problemlerin çözümünde önemli bir yere sahip olmuştur (Miller vd., 1999, Xia vd., 1999, Beaty vd., 2002, Yılmaz ve Eser 2002; Kanlı vd., 2006; Foti vd., 2011; Karslı vd., 2017; Vanlı Senkaya vd. 2020). A-ÇKYDA yönteminin ana aşamaları, veri toplamayı, dispersiyon eğrisinin (frekans-faz hızı, $f-v$) elde edilmesini ve ters çözümü (yeraltının S-dalga hız modelinin elde edilmesi) içerir.

Veri toplama prosedürü, belirli bir düzende yer yüzeyine yerleştirilmiş bir dizi alıcı (jeofon) kullanılarak yüzey dalga alanlarının kaydedilmesini içerir (Park vd., 2001, 2002; Xu vd., 2006; Zhang vd., 2004; Dikmen vd., 2010; Sauvin vd., 2016; Taipodia vd., 2020, 2021). Dispersiyon analizi ise, kaydedilen sismik verilere uygulanan bir frekans-faz hız dönüşümünü (veya yüzey dalgasının yayılma enerjisinin hız ve frekansa göre dağılımı) ve bu dönüşümden elde edilen görüntü üzerinde maksimum genlik ve/veya enerji noktalarını temsil eden dispersiyon eğrisini (frekans karşılık faz hızı değerleri) belirleme veya işaretleme işleminden ibarettir (Park vd., 1998 Ivanov vd., 2005; Park, 2011; Taipodia vd., 2018, 2020). Ters çözüm aşamasında ise, bir optimizasyon algoritması kullanılarak bir önceki aşamada elde edilen dispersiyon eğrisini üretebilecek en güvenilir V_s profiline veya modeline ulaşılmaya çalışılır (Park vd., 1999; Xia vd., 1999; Beaty vd., 2002; Dal Moro ve Ferigo, 2011; Dal Moro vd., 2016; Senkaya ve Karslı, 2016; Senkaya vd., 2020).

A-ÇKYDA yönteminde, bir sonraki aşamanın yüksek kalitede uygulanması bir önceki aşamaya bağlıdır ve bu bağımlılık güvenilir S-dalgası hız-derinlik profili elde edilmesi için önemlidir. Dolayısıyla, araştırmacıların üzerinde hemfikir oldukları temel konu, anlamlı ve güvenilir bir derinlik- V_s profili hesaplanmasındaki tüm sürecin başarısı, büyük ölçüde dispersiyon eğrisinin kalitesine (çözünürlüğü, sürekliliği, frekans bandı genişliği) bağlı olduğu yönündedir. Çünkü, ters çözümde kullanılan tek veri dispersiyon eğrisidir ve Foti vd. (2015), ters çözüm

analizinde, A-ÇKYDA'da beklenen sonucun belirlendiği kritik bir aşama olarak kabul edilse de, doğru bir kayma dalgası hız profilinin hesaplanmasının, kaydedilen veriden yüksek kalitede dispersiyon eğrisinin elde edilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir.

Dispersiyon eğrisinin genel karakteri ve çözünürlüğü tabaka (fiziksel) parametreleri (dalga hızları, yoğunluk, kalınlık) ve veri toplama parametreleri (kaynak ofseti, alıcı aralığı, alıcı sayısı, profil/serim uzunluğu, örnekleme zamanı, kayıt süresi, kaynak tipi, kaynak gücü ve düşey yığma sayısı) ile ilişkilidir. Yer altındaki fiziksel parametrelerin veri toplama sırasında kontrol edilmesi imkânsız olduğundan, kaliteli bir dispersiyon eğrisinin elde edilmesinde veri toplama parametreleri ön plana çıkmaktadır. Veri toplama parametreleri kullanıcı tarafından kontrol edilmekte olup, başta maksimum-minimum hedef derinlik ya da yüzey dalgaların dalga boyları olmak üzere veri toplama kullanılacak cihaz ve ekipmanlarla ilgilidir (Park vd., 2002; Zang vd., 2004; Dikmen vd., 2010). Bu nedenle, veri toplama parametrelerinin seçimi çoğunlukla çalışmanın amacına ve kullanıcının deneyimine bağlı olduğu söylenebilir. Öte yandan, tabakalara ait fiziksel parametreler ters çözüm aşamasında önem kazanmaktadır. Bu parametreler A-ÇKYDA yönteminin ters çözümünde en sık kullanılan deterministik yaklaşımlı yerel minimum arama algoritmalarında başlangıç modelinin oluşturulmasında kullanılmakta ve modelin güvenilirliği doğrudan ters çözüm işleminin başarısını belirlemektedir (Lai ve Rix, 1998, Şenkaya vd. 2020).

Bu makalede, tabaka parametrelerinden sadece S-dalga hızı ve tabaka kalınlığı, veri toplama parametrelerinden kaynak ofseti, alıcı aralığı, alıcı sayısı ve serim uzunluğu değişimlerin A-ÇKYDA yönteminden elde edilecek frekans-faz hızı görüntüsü ve dispersiyon eğrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Değişimi incelenen her bir parametre için Şekil 1' de gösterilen modelleme döngüsü kullanılmıştır. Bu döngüde ilk olarak tabaka ve veri toplama parametreleri belirlenir (Şekil 1a), ikinci olarak bu parametreler kullanılarak genelleştirilmiş yansıma/iletim (Y/\bar{I}) katsayıları yöntemi (Lai ve Rix 1998) ile dispersiyon eğrisi hesaplanır (Şekil 1b). Ardından Aki ve Richards (2002) tarafından önerilen harmonik toplamlar yaklaşımı kullanılarak her bir alıcıda yapay izler (atış verisi) üretilir (Şekil 1c). Son olarak ise, bu yapay verinin frekans-faz hızı görüntüsü faz kayma tekniği (Park vd., 1998) ile elde edilerek ikinci aşamada üretilen dispersiyon eğrisi ile karşılaştırılır (Şekil 1d).

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Dispersiyon Eğrisi, $C_R(f)$ 'nin Hesaplanması (Computation of the Dispersion Curve, $C_R(f)$)

Yüzey dalgalarının dispersiyon eğrileri genelleştirilmiş yansıma/iletim, (the generalized reflection (R)/transmission (T)) yöntemi (R/T) ile hesaplanabilir. Bu yöntemin ilk versiyonu Kennett (1983) tarafından geliştirilmiş olup, yöntem Chen (1993), Hisada (1994, 1995) ve Lai ve Rix (1998) tarafından geliştirilmiştir. Düşük ve yüksek frekanslarda yöntemin kararlılığı ve doğruluğu en önemli avantajıdır (Chen, 1993). Bununla birlikte, viskoelastik ortamlar için R/T yöntemi, dispersiyon eğrisinin hesaplanmasında en kararlı olanlardan biridir (Buchen ve Ben-Hador, 1996; Rix ve Lai, 2000).

Rayleigh dalgaları P ve SV (S-dalgalarının düşey bileşeni) dalgalarının girişimi ile şekillenir. Yatay yönde homojen ve düşey yönde heterojen olan yarı sonsuz tabakalı bir ortamda yer değiştirme-gerilme vektörleri için diferansiyel dalga denkleminin çözümü detaylı olarak Pei (2007), Pei vd. (2008) ve Foti vd. (2015) verilmiş ve açıklanmıştır. Buna göre, çözüm tabaka matrisi E, faz gecikme matrisi, L ve genlik vektörü C'nin çarpımı ile elde edilir:

$$\begin{bmatrix} D^j(z) \\ S^j(z) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} E_{11}^j & E_{12}^j \\ E_{21}^j & E_{22}^j \end{bmatrix}}_{\text{Tabaka matrisi}} \underbrace{\begin{bmatrix} L_d^j(z) & 0 \\ 0 & L_u^j(z) \end{bmatrix}}_{\text{Faz gecikme matrisi}} \underbrace{\begin{bmatrix} C_d^j \\ C_u^j \end{bmatrix}}_{\text{Genlik vektörü}} = E^j L^j C^j. \quad (1)$$

Burada, D ve S sırasıyla P ve SV dalgalarının z-derinliğinde yer değiştirme ve gerilme vektörleri; E, L ve C matrisleri sırasıyla tabaka, faz ve genlik parametre bilgilerini içerir; j ara yüzey sayısı, d ve u z-derinliğinde yansıyan ve iletilen dalgalar için kullanılan indisleridir. Eğer yer değiştirme ve gerilmenin süreklilik koşulları her bir ara yüzeyde uygulanırsa, aşağıdaki denklem (2) ve (3) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} T_d^j & R_{ud}^j \\ R_{du}^j & T_u^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^{j+1} & -E_{12}^j \\ E_{21}^{j+1} & -E_{22}^j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{11}^j & -E_{12}^{j+1} \\ E_{21}^j & -E_{22}^{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d^j(z^j) & 0 \\ 0 & L_u^{j+1}(z^j) \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1, \quad (2)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}_d^N & \mathbf{R}_{ud}^N \\ \mathbf{R}_{du}^N & \mathbf{T}_u^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11}^{N+1} & -\mathbf{E}_{12}^N \\ \mathbf{E}_{21}^{N+1} & -\mathbf{E}_{22}^N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11}^j \mathbf{L}_d^j(z^j) \\ \mathbf{E}_{21}^j \mathbf{L}_d^j(z^j) \end{bmatrix}, \quad j = N. \quad (3)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında genelleştirilmiş R/T katsayıları yinelemeli olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{T}}_d^j &= (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{ud}^j \hat{\mathbf{R}}_{du}^{j+1})^{-1} \mathbf{T}_d^j, \\ \hat{\mathbf{R}}_{du}^j &= \mathbf{R}_{ud}^j + \mathbf{T}_u^j \hat{\mathbf{R}}_{du}^{j+1} \hat{\mathbf{T}}_d^j, \quad (j = 1, 2, \dots, N-1), \end{aligned} \quad (4)$$

burada, \mathbf{I} birim matrisi temsil eder ve

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{T}}_d^j &= \mathbf{T}_d^j, \\ \hat{\mathbf{R}}_{du}^N &= \mathbf{R}_{du}^N, \quad (j = N). \end{aligned} \quad (5)$$

olarak yazılır. Son arayüzeyden başlayarak, $\hat{\mathbf{R}}_{du}^N$ arayüzeyler için genelleştirilmiş R/T katsayıları hesaplanır. Temel ve yüksek mod Rayleigh dispersiyon eğrileri serbest yüzeyde ($z=0$) gerilimsiz koşullar sağlanarak belirlenebilir (Denklem 6).

$$\mathbf{S}^1(0) = (\mathbf{E}_{21}^1 + \mathbf{E}_{22}^1 \mathbf{L}_u^0(0) \hat{\mathbf{R}}_{du}^1) \mathbf{C}_d^1, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_d^{j+1} &= \hat{\mathbf{T}}_d^j \mathbf{C}_d^j, \quad \mathbf{C}_u^j = \hat{\mathbf{R}}_{du}^j \mathbf{C}_d^j, \quad (j = 1, 2, \dots, N-1), \\ \mathbf{C}_d^{N+1} &= \hat{\mathbf{T}}_d^N \mathbf{C}_d^N, \quad \hat{\mathbf{R}}_{du}^N = 0, \quad (j = N). \end{aligned} \quad (7)$$

Denklem (6), denklem (8) ile verilen seküler (veya Rayleigh dispersiyon denklemi) denklemi sağlayan özel faz hızları çözümüne sahiptir. Böylece denklemin kökleri, potansiyel olarak oluşan modlar için faz hızlarını verir.

$$\det(\mathbf{E}_{21}^1 + \mathbf{E}_{22}^1 \mathbf{L}_u^0(0) \hat{\mathbf{R}}_{du}^1) = 0. \quad (8)$$

E, L ve C matrisleri ve ilgili parametreler aşağıdaki denklem (9) ve (10)'da verilmiştir.

$$\mathbf{E}^j = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11}^j & \mathbf{E}_{12}^j \\ \mathbf{E}_{21}^j & \mathbf{E}_{22}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & v^j & -1 & v^j \\ -\gamma^j & 1 & \gamma^j & -1 \\ 2\mu^j & -\chi^j \mu^j & -2\mu^j & \chi^j \mu^j \\ \chi^j \mu^j & -2\mu^j v^j & \chi^j \mu^j & -2\mu^j v^j \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_d^j(z) = \begin{bmatrix} e^{-\gamma^j(z-z^{j+1})} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma^j(z-z^{j+1})} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_u^j(z) = \begin{bmatrix} e^{-\gamma^j(z^j-z)} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma^j(z^j-z)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_d^j = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{dp}^j \\ \mathbf{C}_{ds}^j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_u^j = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{up}^j \\ \mathbf{C}_{us}^j \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned}
v^j &= \sqrt{k^2 - (\omega/\beta^j)^2}, \operatorname{Re}\{v^j\} \geq 0, v1^j = v^j/k, \\
\gamma^j &= \sqrt{k^2 - (\omega/\alpha^j)^2}, \operatorname{Re}\{\gamma^j\} \geq 0, \gamma1^j = \gamma^j/k, \\
\chi1^j &= 2k - (\omega/\beta^j)^2/k.
\end{aligned} \tag{10}$$

Burada, k , ω , β ve α sırasıyla, dalga sayısı, açılal frekans, S- ve P-dalga hızları olarak tanımlanırken, $j=1,2,\dots,N$ tabaka numarasını, $\mu=\rho\beta^2$ ise kayma gerilmesidir. Böylece, Denklem (9)'daki E, L ve C bileşenleri, denklem (1)'de yerine yazılırsa, Rayleigh dalgalarının yerdeğiştirme ve gerilme bileşenleri her bir z derinlik seviyesinde kararlı bir şekilde hesaplanabilir.

Tabaka parametrelerinin dispersiyon eğrisi karakteri üzerinde etkisini analiz etmek için, derinlik boyunca V_p ve V_s değişimini içeren yer modeli Şekil 1a'da gösterilmektedir. Tabakalara ait yoğunluk profili, Uyanık ve Çathioğlu (2010) tarafından geliştirilen deneysel formül, $\rho=0.76 (V_p*V_s)^{0.074}$ (hızlar m/s olduğunda sonuç, gr/cm³) ile oluşturulur. Şekil 1a'daki yer modeli hızın derinlikle arttığı bir model olduğundan normal dispersif ortamı karakterize eder. Dolayısıyla, hesaplanacak dispersiyon eğrisi, yani frekansa karşılık faz hızı eğrisinin karakteri frekansla hızın azalması şeklindedir. Dispersiyon eğrisi, denklem (8)' ile verilen Rayleigh dalgasının dispersiyon denkleminin çözümünü içeren Lai ve Rix (1998)'in algoritması dikkate alınarak geliştirilen bir MatLab yazılımı (Rix ve Lai, 2000) ile hesaplanmıştır. Şekil 1b, 5-100 Hz aralığında $\Delta f=1.0$ Hz artımla Rayleigh dalgasının temel mod dispersiyon eğrisini göstermektedir ve görüldüğü üzere faz hızı frekansla azalmaktadır. Yani, kısa dalga boylu (düşük hız/yüksek frekans) olaylar daha düşük hızla yayılırlar. Aynı algoritma kullanılarak yüksek modlar (1.,2. veya daha yüksek) hesaplanabilmektedir.

2.2. A-ÇKYDA Verisinin Modellenmesi (Modelling of the A-MASW Data)

Yapay bir A-ÇKYDA verisi, Aki ve Richards (2002) tarafından önerilen denklem (11) kullanılarak, her alıcıda farklı hız ve frekansa sahip harmoniklerin üst üste toplanması ile basit bir şekilde hesaplanabilir. Görüldüğü gibi denklem (11), karmaşık dalga denkleminin çözümü yerine, yeraltı tabakalarının hızını temsil eden dispersiyon eğrisi $C_R(f)$ 'nin kullanımını gerektirmektedir.

$$S(t, x) = \sum_{i=1}^n W \left(t + \frac{x}{c_R(f_i)} \right) = \sum_{i=1}^n a_0 e^{-\alpha \left(t + \frac{x}{c_R(f_i)} \right)} \sin \left(2\pi f_i \left(t + \frac{x}{c_R(f_i)} \right) \right). \tag{11}$$

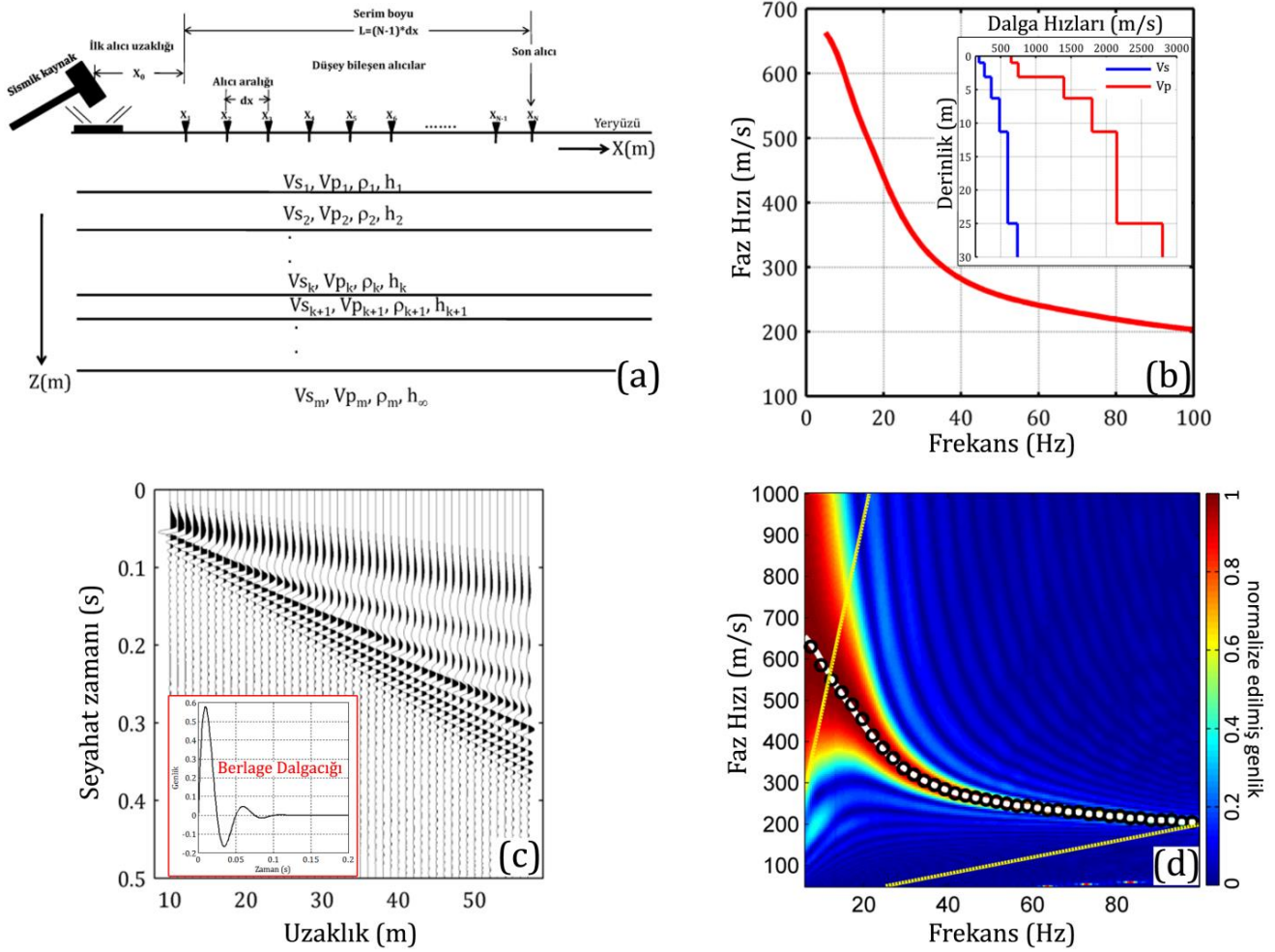
Burada, $S(t,x)$ yalnızca yüzey dalgalarını temsil eden iki boyutlu (2B) dalga alanıdır. W modüle olmuş harmonik sinüs dalgası olan minimum fazlı Berlage dalgacıdır. Parametrelerden, t ve f sırasıyla zaman ve frekans örneklerini gösterirler. Denklemin en önemli parçası, $C_R(f)$, yani dispersiyon eğrisidir. Ayrıca, x ve α sırasıyla alıcı uzaklığını ve sönüm katsayısıdır. Sönüm katsayısı, model problemin koşullarına bağlı olarak sabit veya frekans bağımlı olabilir. Bununla birlikte, küresel açılamdan dolayı geometrik soğurma denklem (12)'deki gibi çözüme dahil edilebilir.

$$S(t, x) = S(t, x)/x. \tag{12}$$

Denklem (11)' e göre, harmonik dalgaların sismik iz (veya sismogram) üzerindeki zaman konumları (veya varış zamanları), Şekil 1a'da gösterilen tabaka parametreleri için hesaplanan faz hızları ve alıcı konumları ile belirlenir. Dispersiyon eğrisi, $C_R(f)$, hesaplandıktan sonra, her bir alıcı pozisyonu için farklı frekanslı ve hızlı Berlage dalgacıları, alıcı uzaklığı-hız değerlerine göre hesaplanan kayıt zamanlarında üst üste toplanarak, belirlenen kayıt süresi için yapay atış verisi $S(t, x)$, hesaplanmış olur.

Verilen yeraltı modeli için (Şekil 1b'de V_p ve V_s modeli), yalnızca temel mod dispersiyon eğrisine (Şekil 1b'de kırmızı renkli eğri) ait dalga alanlarını içeren yapay atış verisi hesaplanarak Şekil 1c'de gösterilmiştir. Hesaplama $N=48$ alıcı, $dx=1.0$ m alıcı aralığı, $X_0=10$ m kaynak ofseti, $T_{\max}=0.8$ saniye kayıt süresi ve $\Delta t=1.0$ ms zaman örnekleme kullanılmıştır. Bununla birlikte, her bir frekans için Berlage dalgacı, $t_w=0.3$ s süre, sönüm sabiti $\alpha=50$ değeri için üretilmiştir. Şekil 1c'deki yapay veriden de görüldüğü üzere, uzun dalga boylu (yüksek hız/düşük frekans) veya uzun periyotlu harmonikler daha erken zamanlarda kaydedilmiştir. Hız modelindeki S-dalga hızı değişimi derinlik boyunca kademeli olarak geniş bir hız aralığında (minimum hız ile maksimum hız arasında 546 m/s'lik bir fark vardır) arttığından, yüzey dalga alanı yapay veride yelpaze şeklinde bir görünüme

sahip olmuştur. Yapay verinin f-v görüntüsü faz kayması tekniği ile hesaplanarak Şekil 1d'de sunulmuştur. Park vd. (1998) ve Dal Moro vd. (2003), faz kaydırma tekniğinin, f-k (2B Fourier dönüşümü; frekans-dalgasayısı) ve tau-p (doğrusal Radon dönüşümü; eğimli yığıma) tekniklerinden elde edilen sonuçlara göre, daha yüksek çözünürlüklü dispersiyon görüntülerini sağladığını belirtmişlerdir. Bu kapsamda bu çalışmada 2B (x,t) verilerinden f-v görüntüleri faz kaydırma tekniği ile oluşturulmuştur. Hesaplanan ve işaretlenen dispersiyon eğrilerinin karşılaştırılması amacıyla, Şekil 1b'deki teorik dispersiyon eğrisi (beyaz çizgi) ve f-v görüntüsü üzerinde otomatik işaretleme ile elde edilen dispersiyon eğrisi (siyah daireler) üst üste çizdirilmiştir. Otomatik işaretleme, her bir frekansa karşılık gelen maksimum genlik değerinin temsil ettiği hız değerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, yapay verinin f-v görüntüsünün ve işaretlenen dispersiyon eğrisinin Şekil 1b'deki dispersiyon eğrisi ile tam olarak uyumlu olduğu da test edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan modelleme iş akışı. (a) Tabaka ve kaynak-alıcı parametrelerinin yer modeli üzerindeki görünüşleri, (b) V_p ve V_s derinlik değişimleri ve hesaplanan dispersiyon eğrisi (kırmızı renkli eğri), (c) Hesaplanan yapay veri (Berlage dalgacığı kırmızı çerçevede gösterilmiştir; $f_0=20$ Hz, $\Delta t=1.0$ ms, $\alpha=50$, $t_w=0.3$ s), (d) yapay veri için faz hızı-frekans görüntüsü üzerinde otomatik arama ile, frekansa karşılık belirlenen faz hızı değerleri (siyah daireler) ve (b)'de hesaplanan dispersiyon eğrisinin (beyaz çizgi) karşılaştırılması. Not: sarı çizgiler; kaynak-alıcı ve minimum-maksimum hız değerlerine göre dispersiyon eğrisinin temsil ettiği minimum ve maksimum dalga boyu sınırlarını göstermektedir. (Workflow of modeling in the study. (a) Illustrating of the layer and source-receiver parameters on earth model, (b) the V_p and V_s depth model and calculated dispersion curve (red line), (c) calculated synthetic data (Berlage wavelet is shown in frame; $f_0=20$ Hz, $\Delta t=1.0$ ms, $\alpha=50$, $t_w=0.3$ s), (d) comparison between phase velocity values according to frequency, which are determined by automatic search on phase velocity-frequency image (black circle) and calculated dispersion curve (white line). Note: yellow lines show minimum and maximum wavelength limits according to source-receiver and values of the minimum-maximum velocities.)

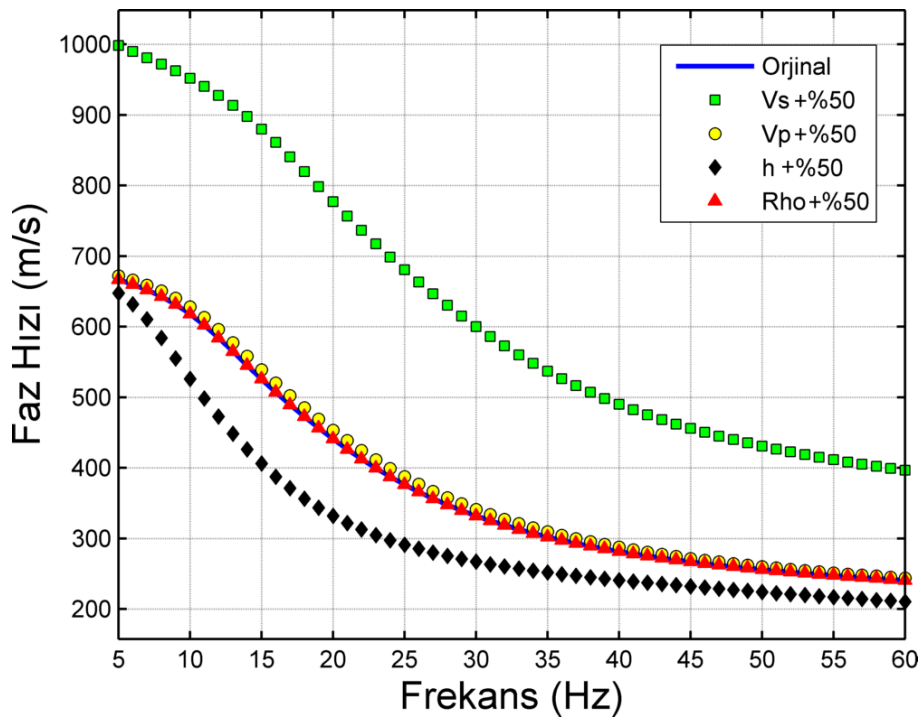
3. Uygulamalar (Applications)

Uygulamalar iki bölümde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde tabaka parametrelerinin, ikinci bölümde ise, veri toplama parametrelerinin dispersiyon eğrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulama aşamaları; (1) verilen yer altı modeli için $C_R(f)$ 'nin hesaplanması, (2) veri toplama parametreleri ve $C_R(f)$ kullanılarak yapay A-ÇKYDA verisinin modellenmesini, (3) faz kayması tekniği ile yapay veriden f-v görüntüsünün elde edilmesini ve

dispersiyon eğrisinin otomatik olarak elde edilmesini, (4) teorik (hesaplanan) ve otomatik işaretlenen dispersiyon eğrilerinin karşılaştırılmasını ve parametre değişimlerinin neden olduğu etkilerin incelenmesini içermektedir.

3.1. Tabaka Parametrelerinin Dispersiyon Eğrisi Üzerindeki Etkileri (The Influence of Layer Parameters on Dispersion Curve)

Dispersiyon eğrisinin hesaplanmasında P- ve S-dalga hızları, yoğunluk ve kalınlık parametreleri kullanılmakla birlikte, dispersiyon eğrisinin karakterini en fazla etkileyen S-dalga hızı ve kalınlıktır (Xia vd. 1999). Dolayısıyla, genel olarak P-dalga hızı ve yoğunluk parametrelerinin dispersiyon eğrisi üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Bu durum Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 1b'deki yer modeli için hesaplanan temel mod dispersiyon eğrisi, her bir tabaka parametresi %50 artırılarak tekrar hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Buna göre açık olarak görülmektedir ki, S-dalga hızındaki ve tabaka kalınlığındaki %50 artış (yeşil ve siyah dörtgen kutucuklar) dispersiyon eğrisinde önemli farklılıklara neden olurken, P-dalga hızı ve yoğunluk (sarı ve kırmızı dikdörtgen kutucuklar) değişimlerinin önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Bununla birlikte, kalınlık %50 artırıldığında hız değerlerinde dramatik bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu durum kalın tabakalı ortamlardan elde edilen dispersiyon eğrilerinin görünür olarak daha düşük hızlara, ince tabakalı ortamda ise daha yüksek hızlara kaymasına, dolayısıyla, ters çözüm işleminde de belirsizlik (uncertainty) sorununa neden olabilir.

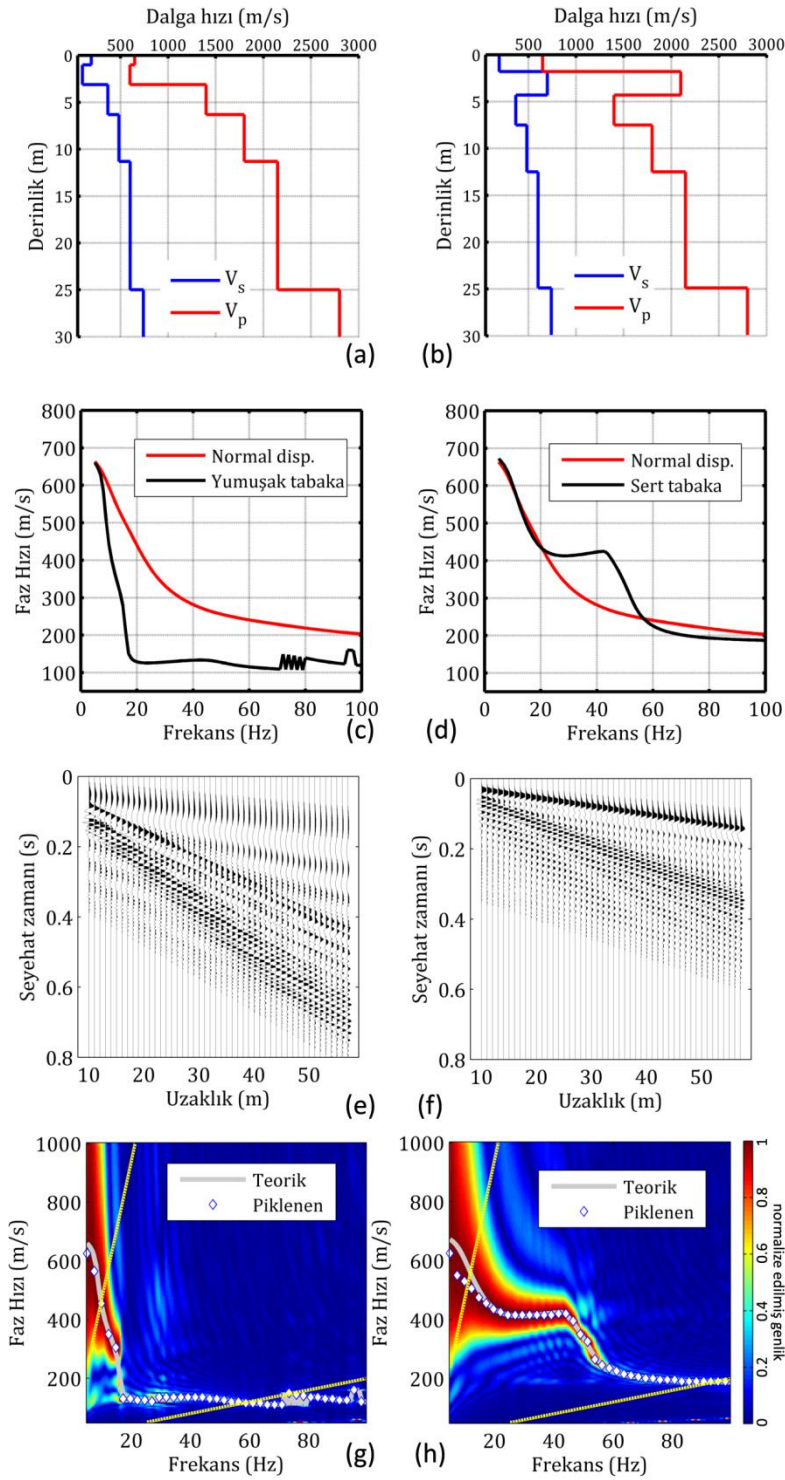


Şekil 2. Tabaka parametrelerindeki %50'lik artışın dispersiyon eğrisi üzerindeki etkileri. (Effects of 50% increase in layer parameters on the dispersion curve.)

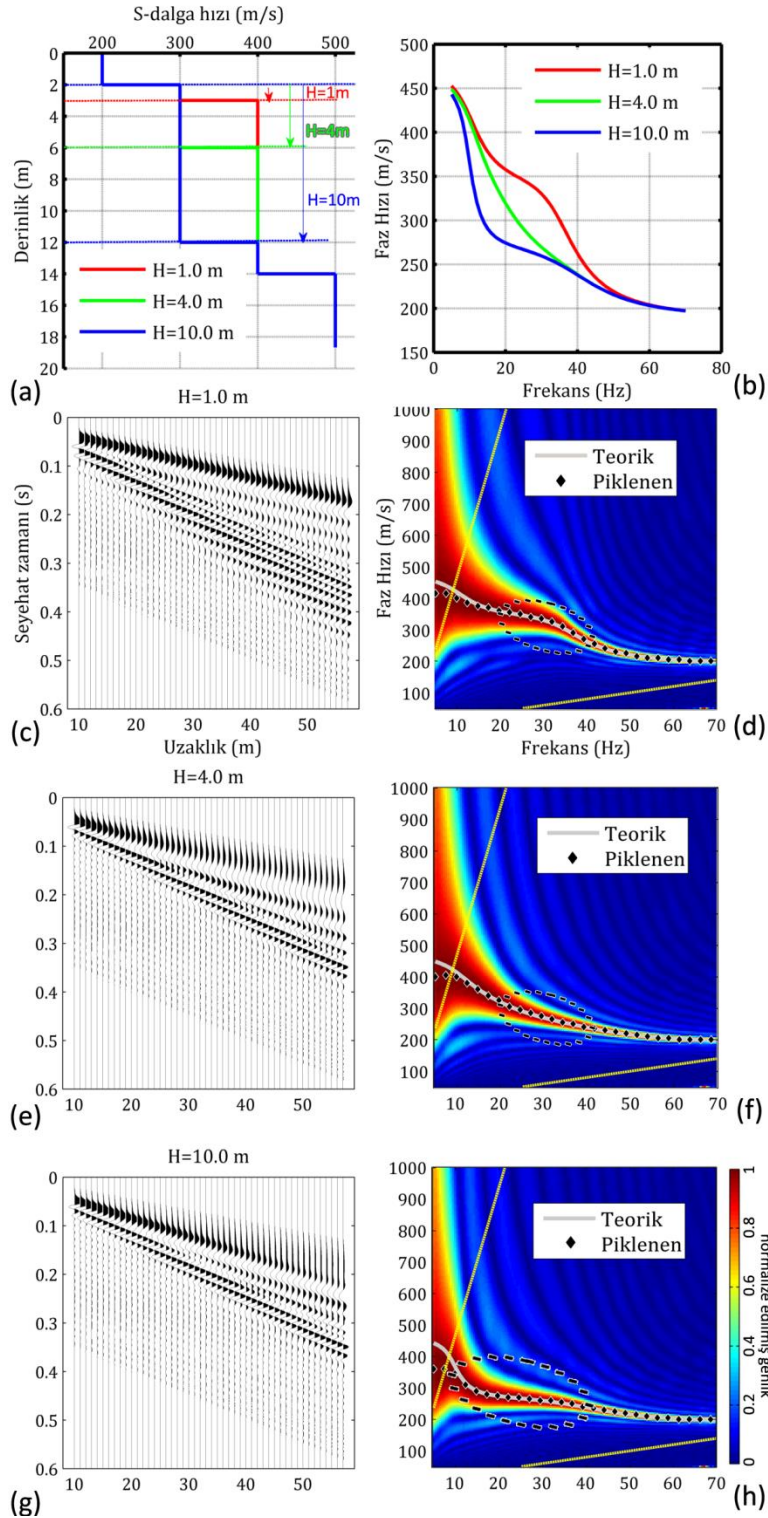
Literatürde, düşük hızlı yumuşak (softness) ve yüksek hızlı sert (stiffness) ara tabaka problemleri, üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı konulardır (Xia vd., 2003; Zhang ve Chan, 2003; Lai vd., 2005; Song ve Gu, 2007; Gao vd., 2016; Şenkaya ve Karşı, 2016; Olafsdottir vd., 2018). Bu tür ortamlar, çoğunlukla düşük hızlı tortulların üzerine daha yüksek hızlı volkanik lavların gelmesi ve sonra bu lavların tortullarla tekrar örtülmesi (sert ara tabaka), kireçtaşları veya kumtaşlarının killi-siltli birimlerle veya geçirimli-gözenekli, kırıklı-çatlaklı litolojik birimlerin ardalanması (yumuşak ara tabaka) şekillerinde görülebilmektedir. Bu şekildeki jeolojik oluşumlar, yer modeli açısından iki yüksek hızlı tabaka arasında düşük hızlı (yumuşak ara tabaka) veya iki düşük hızlı tabaka arasında yüksek hızlı (sert ara tabaka) tabaka olarak değerlendirilir. Şekil 3, bu iki yer modeli için hesaplanan dispersiyon eğrilerini ve hesaplanan yapay A-ÇKYDA verilerini göstermektedir. Şekil 3a, 3c, 3e, 3g sırasıyla yumuşak ara tabaka modelini, bu model için hesaplanan dispersiyon eğrisini, yapay A-ÇKYDA verisini ve f-v görüntüsünü göstermektedir. Karşılaştırma için Şekil 1b'deki normal dispersiyon eğrisi Şekil 3c'de sunulmuştur (kırmızı çizgi). Şekil 1a'daki normal dispersif yer modelinde kalınlığı 2.0m ve S-dalga hızı 270 m/s iken, Şekil 3a'da tabaka kalınlığı değişmezken, S-dalga hızı 120 m/s'ye düşürülmüştür. Buna göre, yumuşak ara tabaka faz hızının düşük frekans bölgesinde düşmesine neden olurken, yüksek frekanslarda ise kararsız davranış göstermesine neden olmuştur (Şekil 3c). Bu etkiler A-ÇKYDA verisinin, normal dispersif duruma göre daha eğimli olmasına ve düzensizleşmesine (Şekil 3c'de zig-zag etikisi) neden olmuştur. Bununla birlikte, f-v görüntüsü üzerinde düşük frekans bölgesinde enerji dağılımında ani kopma, yüksek frekans bölgesinde ise süreksizlikler gözlenmektedir (Şekil3g).

Şekil 3b, 3d, 3f, 3h sert ara tabaka olması durumunda dispersiyon eğrisinin ve A- ÇKYDA verisi karakterindeki değişimleri göstermektedir. Şekil 1b'deki normal dispersif modele göre tabaka kalınlığı değişmemiş, ancak S-dalga hızı 700 m/s'ye artırılmıştır. Hesaplanan dispersiyon eğrisinde 20-55 Hz arasında belirgin bir hız artışı gözlenmiştir (Şekil 3d, siyah çizgi). Bu model için üretilen A- ÇKYDA verisine bakıldığında (Şekil 3f), faz hızının sığ derinlikteki artışı, düşük frekanslı yüzey dalgası bileşenlerinin daha erken, yüksek frekanslı olayların ise daha geç zamanlarda alıcılara ulaşmasını sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla düşük ve yüksek frekans bileşenlerin arasında belirgin bir zaman farkı oluşmuştur. Yapay atış verisi için hesaplanan f-v görüntüsü (Şekil 3h) temel mod dispersiyon enerji alanının 20-50 Hz aralığında hız artışını açık şekilde göstermekte ve Şekil 3h'te hesaplanan dispersiyon eğrisi ile örtüşmektedir. Bu tür analizlerde hızın artım gösterdiği bu bölümler, yüksek mod enerjisi (veya dispersiyon eğrisi) olarak yorumlanabilme yanılısına neden olabilmektedir. Bu tür durumlarda dikkat edilmesi gereken temel nokta, dispersiyon eğrisinin sürekliliğidir. Dolayısıyla, yüksek mod değerlendirmesi yapabilmek için, eğrinin yüksek hıza yönelmeye başladığı (bu modelde ~20 Hz civarında) frekans değerinde belirgin bir hız artışına (dalgasayısı katlanmasından kaynaklamayan faz hızındaki artış) sahip olması gerekir. Yüksek mod aynı frekanslı olayın daha yüksek hızda titreşmesinden kaynaklanır. Dolayısıyla, f-v görüntüsü üzerinde aynı frekans aralığında temel moddan daha yüksek hızlara sahip ikinci bir enerji alanını temsil eden dispersiyon eğrisi olarak görünür.

Şekil 4, tabaka kalınlığı değişiminin dispersiyon eğrisi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bu modelde, 3 tabakalı bir durum göz önüne alınmış ve tabakaların S-dalga hızları değiştirilmeksizin ikinci tabakanın kalınlığı 1.0 m, 4.0 m ve 10.0 m olması durumları (Şekil 4a) için dispersiyon eğrileri (Şekil 4b) hesaplanmıştır. Bu eğrilere göre, hesaplanan yapay atış verileri Şekil 4c, 4e ve 4g'de ve her biri için üzerinde teorik ve piklenen dispersiyon eğrilerinin olduğu f-v görüntüleri ise, Şekil 4d, 4f ve 4h'de gösterilmektedir. Gerçekte, her üç modelde normal dispersif ortamı temsil etmesine rağmen, Şekil 4b'de H=4.0 m için hesaplanan dispersiyon eğrisi (yeşil renkli eğri) referans alındığında, göreceli kalın tabaka (H=10 m) durumunda, faz hızının düşük frekanslarda görünür olarak daha düşük hızlara kaydığı (mavi renkli eğri), buna karşılık göreceli ince tabaka (H=1.0 m) durumunda ise, faz hızının yüksek hızlara kaydığı açıkça görülmektedir. Bu durum, uzun dalga boylu ve düşük frekanslı yüzey dalgalarının özellikle uzak alıcılara daha geç ulaşmasına ve dalga alanı yelpazesinin daralmasına neden olmuştur (Şekil 4c, e ve g).



Şekil 3. Yumuşak (sol sütun) and sert (sağ sütun) ara tabaka modellerinin dispersiyon eğri karakterinin analizi. Her bir yer modeli için (a, b) hız yapıları, (c, d) hesaplanan temel mod dispersiyon eğrisi (siyah çizgi) ve karşılaştırma için normal mod dispersiyon eğrisi (kırmızı çizgi), (e, f) yapay atış verileri ve (g, h) teorik (beyaz çizgi) ve otomatik (beyaz noktalar) piklenen dispersiyon eğrilerini içeren f-v görüntüleri. (Analysis of the dispersion curve character of soft (left column) and hard (right column) interlayer models. (a, b) velocity structures, (c, d) calculated fundamental dispersion curve (black line) and normal mode dispersion curve (red line) for comparison, (e, f) synthetic shot data and (g, h) f-v images including theoretical (white line) and automatic picked dispersion curves.)



Şekil 4. Temel mod dispersiyon eğrisi üzerinde tabaka kalınlığının etkisi. (a) üç tabakalı yer modelinde ikinci tabakanın üç farklı farklı kalınlığı için yer modelleri, (b) bu yer modelleri için hesaplanan temel mod dispersiyon eğrileri, (c, e, g) ve (d, f, h) sırasıyla, dispersiyon eğrileri için hesaplanan yapay atış verileri ve f-v görüntüleri. Karşılaştırma için, f-v görüntüleri üzerinde teorik (gri çizgi) ve otomatik (siyah dörtgenler) piklenen dispersiyon eğrileri sunulmuştur. (d, f, h) üzerindeki elipsler kalınlık değişimine göre dispersiyon eğrisindeki değişimi odaklamak için gösterilmiştir. Şekil 4a'da "H" sembolü ikinci tabaka kalınlığını temsil etmektedir. (The effect of layer thickness on fundamental dispersion curve. (a) subsurface models for three different thicknesses of the second layer in the three-layer subsurface model, (b) calculated fundamental dispersion curves for the models, (c, e, g) and (d, f, h), respectively, corresponding shot data and f-v images. For comparison, theoretical (gray line) and automatic (black rectangles) picked dispersion curves on f-v images are displayed. In Figure 4a, the symbol "H" represents the second layer thickness.)

3.2. Veri Toplama Parametrelerinin Dispersiyon Eğrisi Üzerindeki Etkileri (Influence of Data Acquisition on Dispersion Curve)

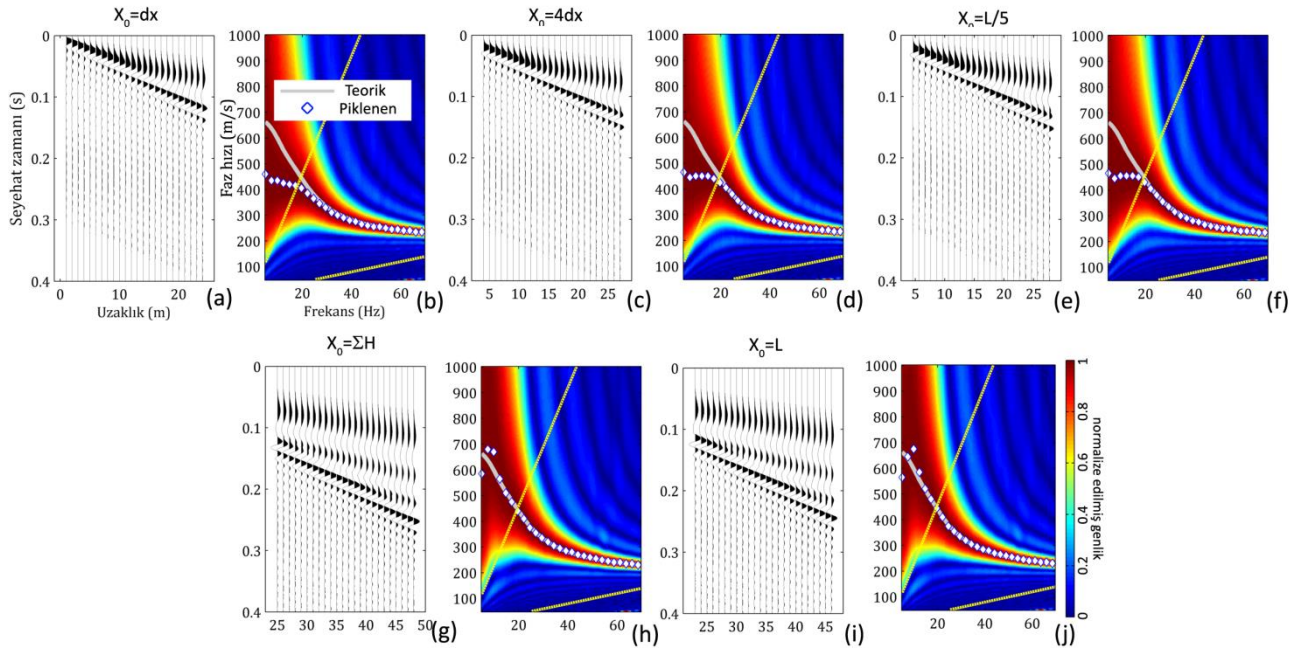
Kaliteli A-ÇKYDA verisi toplamadaki temel amaç, temel mod dispersiyon eğrisinin sürekliliği ve ayrımlılığını sağlamak için çoğunlukla Şekil 1a'da gösterilen veri toplama parametreleri X_0 , dx , L ve N 'nin seçimlerine bağlıdır. Bununla birlikte, A-ÇKYDA verisinin kayıt süresi ve örnekleme zamanı da veri kalitesi açısından önemli bir etkidir. Kaliteli bir yüzey dalgası verisi için tüm yüzey dalga paketlerini içermeli, örnekleme zamanı ise yüzey dalgası verilerinin genel özelliği olan göreceli düşük frekans içeriğine uygun seçilmelidir (Foti vd. 2017). Bu iki parametrenin seçiminde iyi tecrübe edinilmiş olup, çoğunlukla en uygun değerler seçilebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada bu kayıt süresi ve örnekleme zamanı parametreleri analiz edilmemiştir.

Veri toplama parametrelerinin farklı kombinasyonları birçok araştırmacı (Park vd. 2001 ve 2002; Zhang vd., 2004; Xu vd. 2006; Dikmen vd., 2010; Park 2011; Taipodia vd., 2018; Taipodia vd., 2021) tarafından çoğunlukla arazi ortamında test edilmiş ve elde edilen veriler yakın ve uzak alan etkileri açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise, bu parametrelerin her birinin dispersiyon eğrisini nasıl etkilediği yapay olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin birçok farklı kombinasyonları oluşturulabilir, ancak bu çalışmada her bir parametre için literatürdeki yaygın öneriler dikkate alınmıştır.

3.2.1. Kaynak Ofseti (Source Offset), X_0

Genel olarak, kaynağa en yakın veya kaynak ile ilk alıcı arası uzaklık olarak tanımlanır. Bu uzaklık, alıcı seriminin kaynaktan ne kadar uzakta başlayacağını belirler ve dolayısıyla yüzey dalgalarının tam olarak oluşması için önemlidir. Çünkü yüzey dalgaları belirli bir uzaklıktan sonra düzlem dalgalara dönüşürler ve A-ÇKYDA yöntemi de düzlem dalga hareketlerini temel alır.

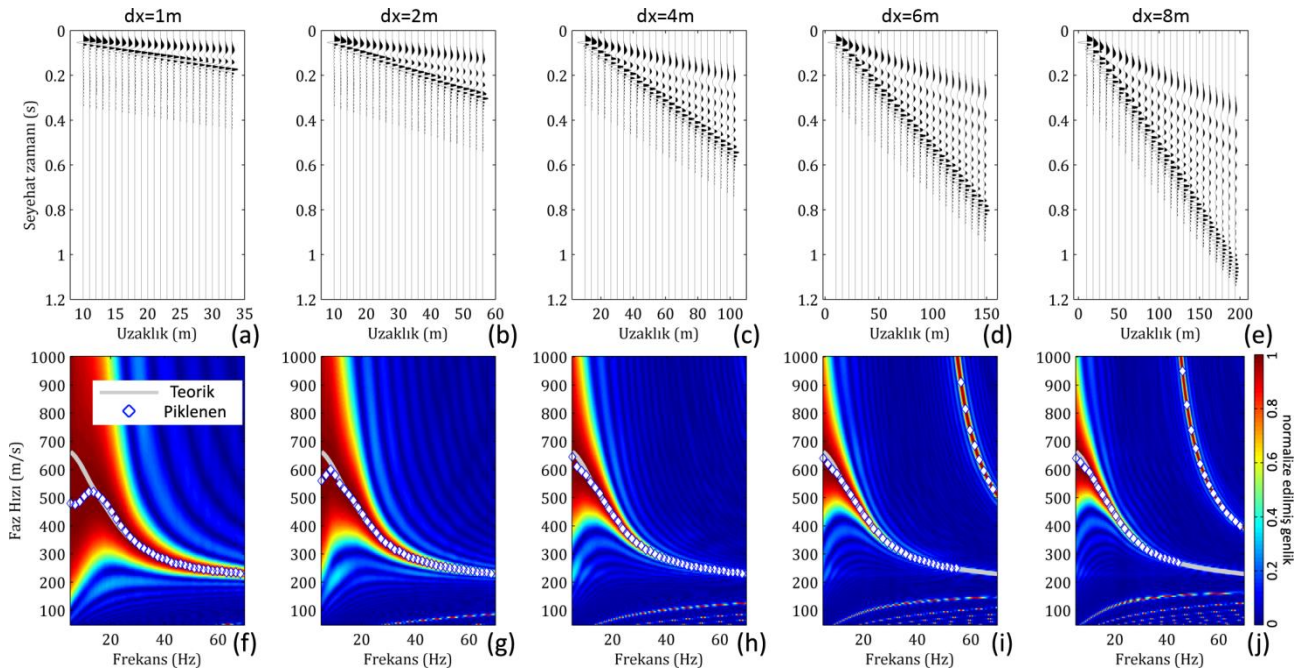
A-ÇKYDA ölçümünde profil uzunluğu, kaynak ofseti ile serim boyunun (L) toplamıdır, $P=X_0+L$. Dolayısıyla profil uzunluğunun ne kadarının kaynak ofseti ne kadarının serim uzunluğu olacağına karar verilmelidir. Park vd. (2002), kaynak ofsetinin alıcı düzeni ve araştırma derinliğinin bir fonksiyonu olması gerektiğini belirtmiştir. Zhang vd. (2004) bir dizi test sonucunda yakın ve uzak ofsetlerin, alıcı serim uzunluğunun ve maksimum dalga boyunun bir fonksiyonu olduğunu öne sürmüştür. Dikmen vd. (2010) farklı kaynak ofseti için yaptığı testlerde, bu uzaklığın en azından dört alıcı uzaklığı ($X_0 \geq 4 * dx$) kadar olmasını önermiştir. Sonuç olarak araştırmacılar, kaynak ofsetinin kısa olması durumundaki yakın alan (düzlem olmayan dalgaların bozucu girişimleri, düşük frekanslardaki yüksek mod girişimi ve enerjinin dağılması) ve uzak alan (enerjinin uzak alıcılarda aşırı soğrulması, çevresel gürültüler, cisim dalgalarının ve saçılmış dalgaların karışımı) etkilerinden sakınılması gerektiği hususunda görüş birliğine varmışlardır. Buna göre literatürde önerilen ofset uzaklığı ilişkileri dikkate alınarak yapay atış verileri (üst satır) hesaplanmış ve f-v görüntüleri üzerinde teorik ve piklenen dispersiyon eğrileri ile birlikte Şekil 5'te gösterilmiştir. Hesaplama Şekil 1b'deki temel mod dispersiyon eğrisi için kullanılan serim uzunluğu kullanılmış olup, tüm modeller için bu parametre sabittir ($L=(N-1)*dx$; $N=24$, ve $dx=1.0m$). Kaynak ofseti X_0 ise, dx , $4*dx$, $L/5$, ΣH ve L alınarak beş farklı A-ÇKYDA verisi üretilmiştir. Yapay veriler incelendiğinde, kaynak ofseti arttıkça yüzey dalgalarının kayıt zamanlarının artmasının yanında, yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerin ayrılmaya başladığı da gözlenmektedir. F-v görüntüleri genel olarak birbirine benzer olmakla birlikte, teorik dispersiyon eğrisi ile piklenen dispersiyon eğrisinin uyumu artan kaynak ofseti ile doğru orantılı olarak artmıştır. Kaynak ofsetinin dx , $4*dx$ ve $L/5$ olması durumlarında, düşük frekans bölgesinde enerjinin tam olarak odaklanmaması nedeniyle teorik ve piklenen dispersiyon eğrisi uyumu kaybolmaktadır. Ancak, yeterli dalga boyu aralıkları göz önüne alındığında (f-v görüntüleri üzerindeki sarı renkli doğrular) $X_0=4*dx$ uzaklığının asgari yeterli olduğu görülmektedir. Buna karşılık, kaynak ofsetinin, toplam kalınlık (hedeflenen derinlik) ΣH ve serim boyu (L) kadar olması durumunda ise, düşük frekanslardaki uyum büyük oranda sağlanmış olmakla birlikte, önemsiz sayılabilecek bir miktar yüksek hızlara doğru kayma olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 5. Kaynak ofseti, X_0 'ın dispersiyon eğrisi üzerine etkisi. Hesaplamada, alıcı sayısı, N , alıcı uzaklığı dx sırasıyla, 24 ve 1.0 m'dir. Yapay atış verileri (a, c, e, g, i), örnekleme zamanı $\Delta t=0.001$ s ve dalgacık süresi $t_w=0.3$ s için hesaplanmıştır. (b, d, f, h, j) teorik (gri çizgi) ve piklenen (beyaz noktalar) temel mod dispersiyon eğrilerini içeren f-v görüntülerini ve sarı çizgiler dalgaboyunun alt ve üst sınırlarını göstermektedir. (Effect of source offset, X_0 , on dispersion curve. In calculation, number of receivers, N and receiver interval, dx are 24 and 1.0 m, respectively. Synthetic shot data (a, c, e, g, i) are generated for sampling time $\Delta t=0.001$ s and wavelet duration, $t_w=0.3$ s. (b, d, f, h, j) show f-v images including curves of the theoretical (gray line) and picked fundamental dispersion (white dots) and yellow lines show minimum and maximum limits of the wavelength.)

3.2.2. Alıcı Aralığı (Receiver Interval), dx

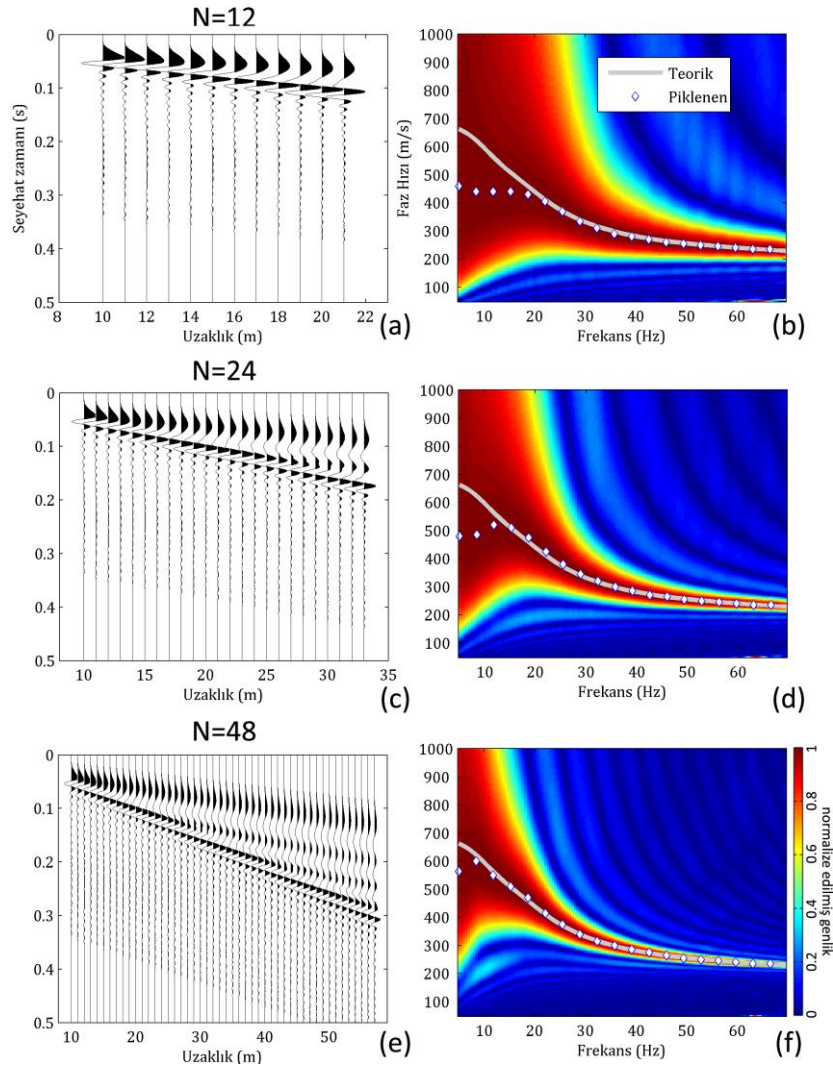
Park vd. (1998), dispersiyon eğrisinin sürekliliğini en fazla etkileyen parametrenin alıcı aralığı olduğunu ifade edilmekte ve normal olarak en küçük dalgaboyuna eşit veya ondan daha kısa ($\Delta x \leq \lambda_{\min}$, $\lambda_{\min} = V_{\min}/f_{\max}$) olmasını önermektedir. Kısa alıcı aralığı, dispersiyon eğrisinin yüksek frekans aralığını kontrol ettiği için, sığ derinliklerdeki çözünürlükle de ilgilidir. Bununla birlikte, alıcı aralığının çok kısa olması, alıcı serimi boyunca yüzey dalgalarının yetersiz yayılımına yol açar. Bu nedenle, daha uzun dalga boyları için alıcı aralığını artırmak gereklidir. Ancak, alıcı aralığının olması gerekenden daha geniş seçilmesi ise, dalgasayısı (uzaysal) katlanmasına neden olur. Bununla birlikte, alıcı aralığındaki, dolayısıyla profil uzunluğundaki aşırı artış, dalga enerjisinin soğurulmasına ve gürültü ile dalga alanlarının karışımına neden olur. Şekil 6, farklı alıcı aralıkları için Şekil 1b'deki dispersiyon eğrisi kullanılarak hesaplanmış atış verilerini ve karşılık gelen f-v görüntülerini göstermektedir. Alıcı aralığının artması aynı zamanda serim uzunluğunun da artmasına neden olduğu için yüzey dalgaalanı aşırı eğimlenmiştir (Şekil 6a, b, c, d, e). Buna karşılık, alıcı aralığının artmasının etkisi f-v görüntüleri üzerinde açıkça dalga sayısı katlanmasına neden olmaktadır (Şekil 6f, g, h, i, j). Dalgasayısı katlanması, yüksek frekans bölgesinde süreksizlik, düşük hız bölgesinde ise, katlanma ile ilişkili olarak işlem gürültüleri (artifact) oluşturur. Bunun sonucu olarak, dispersiyon eğrisinin sürekliliği bozulur ve pikleme için frekans bandı daralır. Katlanmış kısım, deneyimsiz kullanıcılar tarafından hatalı olarak yüksek mod olarak değerlendirilebilmektedir. Belirtmek gerekir ki, artan alıcı aralığı profil boyunu artırdığından, f-v görüntüsünde işaretlenen ile hesaplanan dispersiyon eğrisinin düşük frekans bölgesinde tam uyumunu sağlamıştır (Şekil 6h, i ve j). Dolayısıyla daha güvenilir bir f-v görüntüsü elde edilmiş olur.



Şekil 6. Alıcı aralığının dispersiyon eğrisi üzerine etkisi. Hesaplama, alıcı sayısı, N ve kaynak ofseti sırasıyla, 24 ve 10 m'dir. Yapay atış verileri (a, b, c, d, e), $\Delta t=0.001$ s ve dalgacık süresi $t_w=0.3$ s için hesaplanmıştır. (f, g, h, i, j) teorik (gri çizgi) ve piklenen (beyaz noktalar) temel mod dispersiyon eğrilerini içeren f-v görüntülerini göstermektedir. (Effect of receiver interval, dx , on dispersion curve. In calculation, number of receivers, N and source offset, X_0 are 24 and 10 m, respectively. Synthetic shot data (a, b, c, d, e) are generated for sampling time, $\Delta t=0.001$ s and wavelet duration, $t_w=0.3$ s. (f, g, h, i, j) show f-v images including curves of the theoretical (gray line) and picked fundamental dispersion (white dots).)

3.2.3. Alıcı Sayısı (Number of Receiver), N

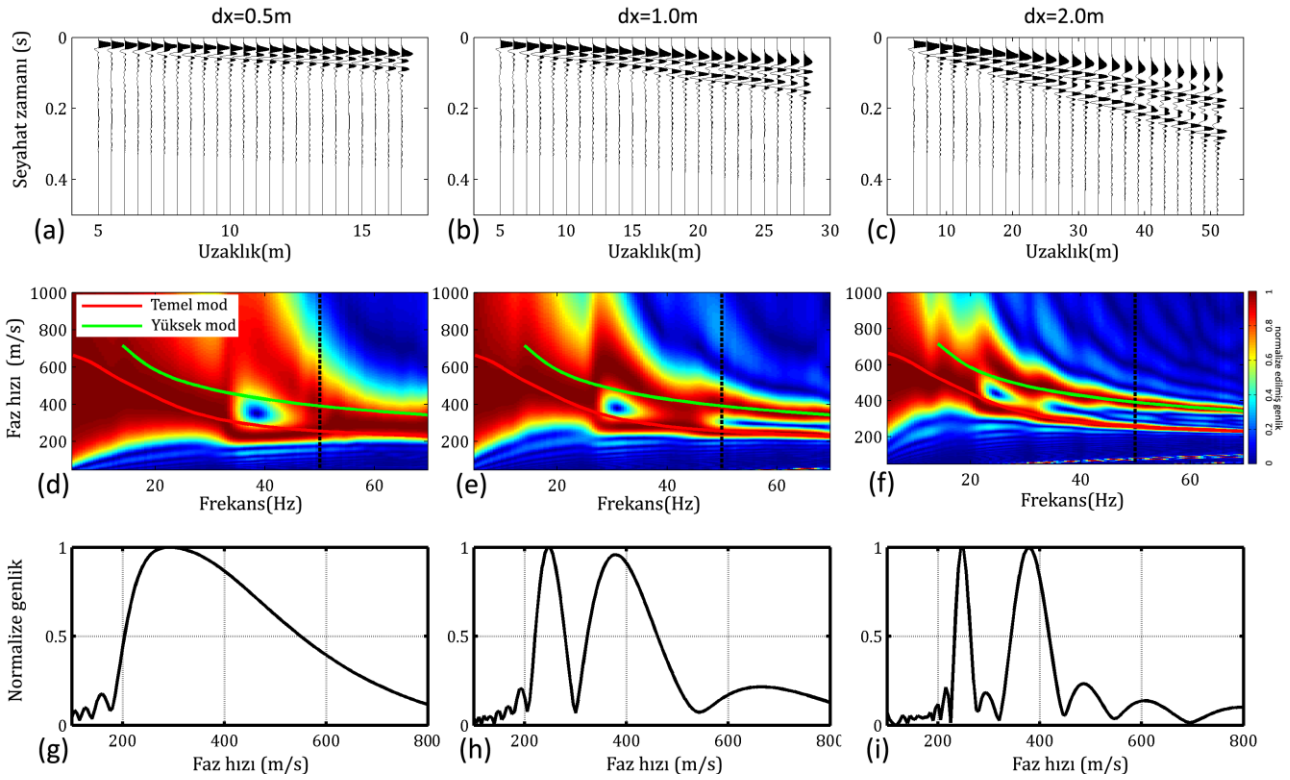
Artan alıcı sayısı serim boyunun artırır ve dispersiyon eğrisinin en geniş frekans bandında elde edilmesini sağlar. Şekil 7, sabit alıcı aralığı için alıcı sayısının artmasının A-ÇKYDA verisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 7a, 7c ve 7e'deki atış verileri Şekil 1b'deki temel mod dispersiyon eğrisine uygun olarak hesaplanmıştır. Şekil 7'de, artan alıcı sayısına bağlı olarak dalga alanı yelpazesi içindeki düşük ve yüksek frekans fazları belirgin olarak ayrılmakta olduğu görülmektedir. Dolayısıyla $N=12$ ve 24 alıcı için f-v görüntüleri üzerinde teorik ve piklenen dispersiyon eğrileri düşük frekans bölgesinde uyumsuzken, (Şekil 7b ve 7d) $N=48$ alıcı için dispersiyon eğrileri düşük frekans bölgesinde tam olarak uyumludur (Şekil 7f). Böylece, serim boyunun alıcı sayısı ile artırılmasının alıcı aralığının artırılmasına göre çok daha avantajlı olduğu söylenebilir. Çünkü, alıcı aralığının artırılması yüksek frekans bölgesinde bozulmalara ve ince tabakaların görüntülenememesine neden olabilmektedir. Ayrıca, alıcı sayısının artırılması, kısa alıcı aralığı ile uzun serim elde edilmesini sağlar. Dolayısıyla, hem sığ hem de daha derin hız bilgisi güvenilir olarak elde edilebilir ve dispersiyon eğrisinin sürekliliği de artar.



Şekil 7. Alıcı sayısının dispersiyon eğrisi üzerine etkisi. Hesaplamada, kaynak ofseti, X_0 ve alıcı aralığı, dx , sırasıyla, 10 m ve 1.0 m'dir. Yapay atış verileri, $\Delta t=0.001$ s ve $t_w=0.3$ s için hesaplanmıştır. (Effect of the number of receivers on dispersion curve. In calculation, source offset, X_0 and receiver interval, dx are respectively 10 m and 1.0 m. Synthetic shot data are generated for sampling time, $\Delta t=0.001$ s and wavelet duration, $t_w=0.3$ s.)

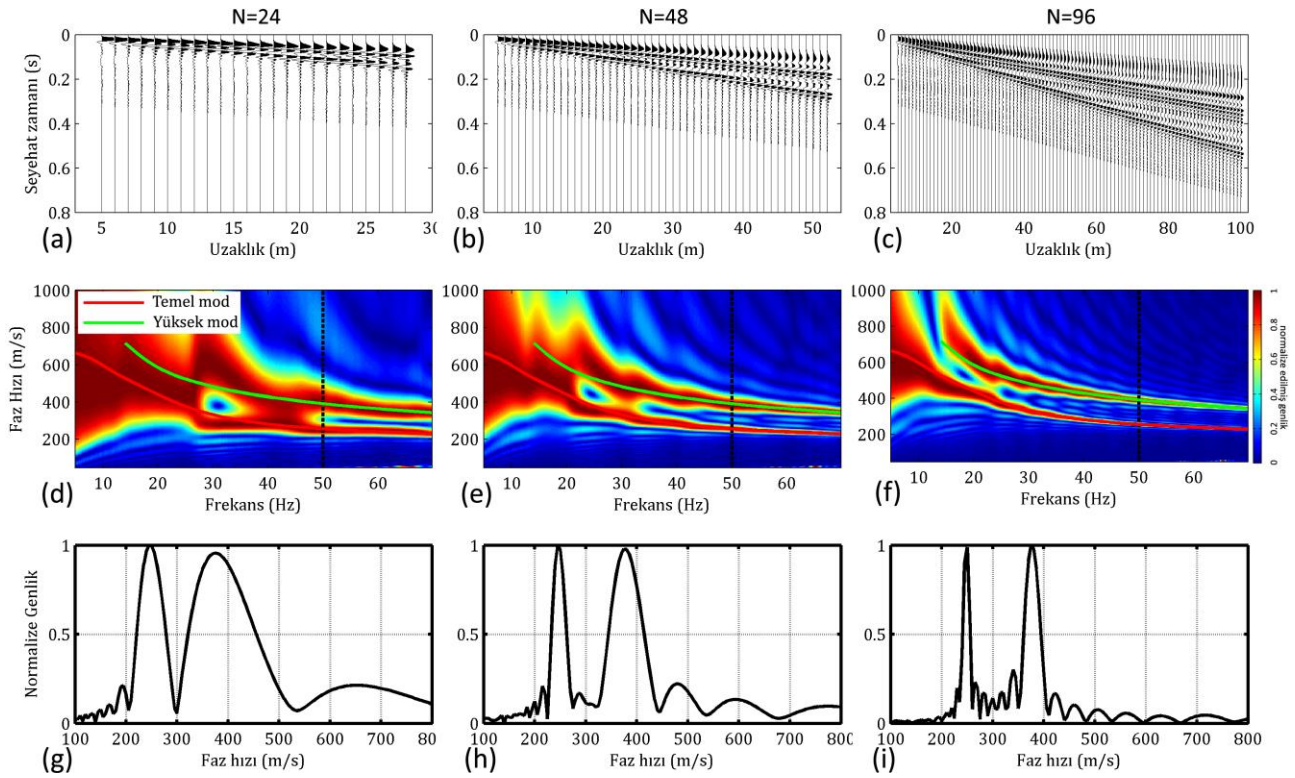
3.2.3. Serim Boyu (Spreading Length), L

Şekil 1a'da görüldüğü üzere, serim boyu, $L=(N-1)*\Delta x$, ilk alıcı ile son alıcı arasındaki mesafe iken, profil boyu, $P=X_0+L$, kaynak ile son alıcı arasındaki mesafe veya kaynak ofseti ile serim uzunluğunun toplamıdır. A-ÇKYDA literatüründe detaylı olarak tartışıldığı gibi, serim boyunun artırılması sadece temel mod dispersiyon eğrisinin çözünürlüğünü arttırmakla kalmaz, aynı zamanda temel-yüksek mod girişiminden kaçınmaya yol açan modların ayırımını da sağlar. Ancak, uzak alıcılara enerji gönderimi yetersiz olacağından, bu alıcılarda gürültünün etkinliği artacaktır. Serim boyu, iki şekilde, yani, alıcı sayısı veya alıcı aralığı artırılarak artırılabilir. Şekil 8 ve 9, serim boyunun artırılmasının temel ve yüksek mod dispersiyon eğrisi çözünürlüğü üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 8'de alıcı aralığına uygun olarak serim boyunun artırılmasının temel ve yüksek mod ayırımındaki etkisi gösterilmiştir. Yapay atış verileri (Şekil 8a, b, c), Şekil 1a'daki yer modeli için hesaplanan temel ve yüksek mod dispersiyon eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Atış verilerinin f-v görüntüleri ve teorik dispersiyon eğrileri (kırmızı çizgi temel mod ve yeşil çizgi birinci yüksek mod) Şekil 8d, e ve f'de gösterilmektedir. Çok açık olarak, alıcı aralığı $\Delta x=0.5$ m iken girişimli olan temel ve yüksek mod dispersiyon eğrisi, artan alıcı aralığı ile özellikle yüksek frekans bandında ayrılmaya başlamıştır. Ancak, düşük frekans bölgesindeki mutlak ayırım ancak $\Delta x=2.0$ m olduğunda görülmüştür (Şekil 8f). Serim boyu artırımının etkisini daha açık göstermek için her üç durum için, $f=50$ Hz' de hız boyunca enerji değişimleri Şekil 8g, h ve i'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere $\Delta x=0.5$ m alıcı aralığında her iki mod için bir ayrımlanma yoktur (Şekil 8g), $\Delta x=1.0$ durumunda ayrımlanma başlamış (Şekil 8h) ve $\Delta x=2.0$ m için ise modlar belirgin olarak birbirinden ayrılabilmiştir (Şekil 8i).



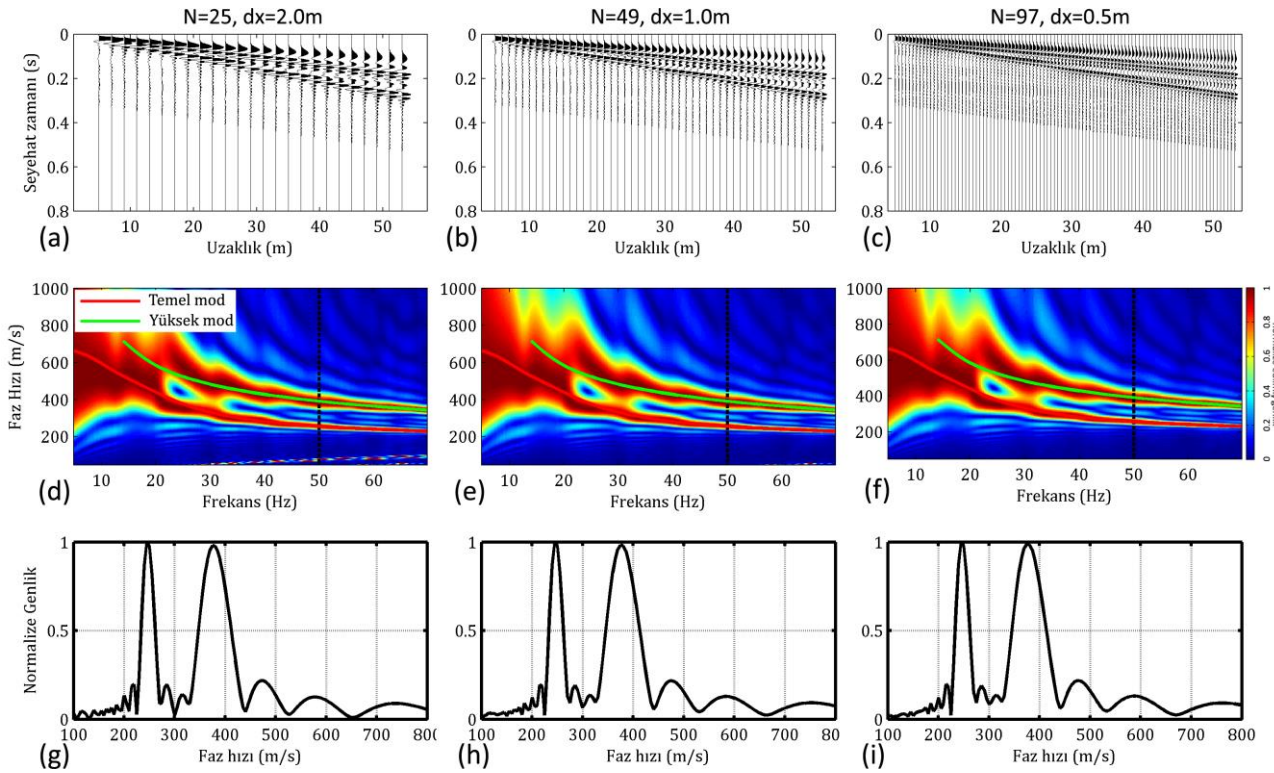
Şekil 8. Alıcı aralığı ile artırılan serim boyunun, $L=(N-1)*\Delta x$, dispersiyon eğrisi ve mod ayrımı üzerine etkisi. Hesaplama, kaynak ofseti, X_0 ve alıcı sayısı, sırasıyla 5.0 m ve 24 olarak kullanılmıştır. Yapay atış verileri, $\Delta t=0.001$ s ve $t_w=0.3$ s için hesaplanmıştır. Hesaplanan yapay veri (a, b, c), temel (kırmızı çizgi) ve yüksek mod (yeşil çizgi) dispersiyon eğrilerini içeren f-v görüntüleri (d, e, f) ve 50 Hz için hız çözünürlüğünün değişim eğrileri (f-v görüntüleri üzerinde kesikli siyah çizgi) (g, h, i) gösterilmiştir. (The effect of the spreading length, $L=(N-1)*\Delta x$, increased by the receiver interval on, dispersion curve and mode separation. In calculation, source offset, X_0 and number of receivers, N are used as 5.0 m and 24, respectively. Synthetic shot data are generated for sampling time, $\Delta t=0.001$ s and wavelet duration, $t_w=0.3$ s. The f-v images (d, e, f) including synthetic shot data (a, b, c), fundamental (red line) and higher (green line) mode dispersion curves, the variations of velocity resolution (g, h, i) at 50 Hz (dashed black lines on f-v images) are shown.)

Serim boyunun artırılmasının diğer bir yolu, alıcı aralığının sabit tutulup, alıcı sayısının artırılmasıdır. Şekil 9, alıcı aralığı $\Delta x=1.0$ m için alıcı sayısının artırılmasının etkisi incelenmiştir. Görüldüğü üzere, alıcı sayısının artırılması daha uzun profilde ölçü alınmasına ve yüzey dalgalarının daha uzun süreli yayılmasını sağlamıştır (Şekil 9a, b, c). Bununla birlikte, temel ve yüksek modlar, $N=24$ alıcılı hesaplanan atış verilerinde birbirine girişimli iken, artan alıcı sayısına bağlı birbirlerinden çok belirgin olarak ayrılmıştır. Düşük frekans bölgesindeki temel ve yüksek mod girişim etkisinin, serim uzunluğunun artmasıyla ilişkili olarak f-v görüntüleri (Şekil 9d, e, f) üzerinde ve $f=50$ Hz'deki hız değişim eğrilerinde (Şekil 9g, h, i) belirgin olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 9. Alıcı sayısı ile serim uzunluğunun, $L=(N-1)*\Delta x$, artırılmasının dispersiyon eğrilerinin ayrımlılığı üzerine etkileri. Hesaplamada kaynak ofseti $X_0=5.0$ m ve üç farklı alıcı aralığı $\Delta x_1=1.0$ m, $\Delta x_2=0.5$ m ve $\Delta x_3=0.25$ m olarak kullanılmıştır. Yapay atış verileri, örnekleme zamanı $\Delta t=0.001$ s ve $t_w=0.3$ s için hesaplanmıştır. Hesaplanan yapay veri (a, b, c), temel (kırmızı çizgi) ve yüksek mod (yeşil çizgi) mode dispersiyon eğrilerini içeren f-v görüntüleri (d, e, f) ve 50 Hz için hız değişimi eğrileri (f-v görüntüleri üzerinde kesikli siyah çizgi) (g, h, i) gösterilmiştir. (The effects of increasing spreading length, $L=(N-1)*\Delta x$, by the number of receivers on the resolution of the dispersion curves. In calculation, source offset, X_0 and three receiver intervals, $\Delta x_1=1.0$ m, $\Delta x_2=0.5$ m ve $\Delta x_3=0.25$ are used. Synthetic shot data are generated for sampling time, $\Delta t=0.001$ s and wavelet duration, $t_w=0.3$ s. The f-v images (d, e, f) including synthetic shot data (a, b, c), fundamental (red line) and higher (green line) mode dispersion curves, the variations of velocity resolution (g, h, i) at 50 Hz (dashed black lines on f-v images) are shown.)

Profil ve serim uzunluğunun sabit, buna karşılık alıcı sayısının artırılmasının dispersiyon eğrisi üzerinde etkisi ise, Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada kaynak ofseti $X_0=5.0$ m sabit alınmış ve serim boyunun eşit olması için artan alıcı sayısına karşılık alıcı aralıkları kademeli olarak azaltılmıştır. Buna göre alıcı sayısı ve aralığı çifti $[N=25, \Delta x=2.0$ m]; $[N=49, \Delta x=1.0$ m]; ve $[N=97, \Delta x=0.5$ m] olarak kullanılmıştır. Böylece sırasıyla serim ve profil boyları tüm ölçüm boyunca 48.0 m ve 53.0 m olarak sabitlenmiştir. Yapay atış verilerinden görüldüğü üzere, alıcı sayısı artırılmış olsa dahi, dalganın yayılma süresi değişmediğinden temel ve yüksek mod yüzey dalga alanlarının görünümünde serim boyunca bir değişim olmamıştır (Şekil 10a, b, c). Ancak alıcı sayısının artması yüzey dalgalarının daha fazla alıcıda örneklenmesini sağlamıştır. Hesaplanan atış verilerinin f-v görüntüleri incelendiğinde (Şekil 11d, e, f), temel ve yüksek mod enerji dağılımlarının hemen hemen birbirine eşdeğer olduğu görülmektedir. Sadece $[N=25, \Delta x=2.0$ m] durumunda düşük hız bölgesinde dalga sayısı katlanması ile ilişkili olarak alıcı aralığı etkisinden dolayı önemsiz olarak değerlendirilebilecek bir sayısal gürültü (artifact) oluşmuştur. Şekil 10g, h, i'deki $f=50$ Hz'e karşılık hız değişim eğrileri de birbirine eşdeğerdir. Bu testten anlaşılmaktadır ki, sabit profil ve/veya serim uzunluğu durumunda alıcı sayısının artırılması, dispersiyon enerji alanlarının, en geniş frekans aralığında daha sürekli görüntülenmesini sağlar ve dalga sayısı katlanmasını engeller.



Şekil 10. Sabit profil ve serim uzunluklarının dispersiyon eğrisi üzerindeki etkisi. (a, b, c) Şekil 1b'deki yer modeline göre hesaplanan temel ve yüksek mod dispersiyon eğrilerine uygun yapay atış verileri. Kaynak ofseti $X_0=5.0$ m'dir. (d, e, f) f-v görüntüleri ile birlikte karşılaştırma için temel (kırmızı çizgi) ve yüksek (yeşil çizgi) mod dispersiyon eğrileri. (g, h, i) f=50 Hz'deki faz hızı değişim eğrileri. (Effect of the constant profile length and the spreading length on dispersion curve. (a, b, c) synthetic shot data for the fundamental and higher mode dispersion curves, which are calculated for the subsurface model in Figure 1b. Source offset, X_0 , is 5.0 m. For comparison, (d, e, f) fundamental (red line) and higher (green line) mode dispersion curves on f-v images. (g, h, i) phase velocity variation curves at f=50 Hz.)

4. Sonuçlar (Results)

A-ÇKYDA ölçümünde, Rayleigh yüzey dalgası dispersiyon eğrisi, S-dalgası hızı-derinlik profilinin tam ve doğru hesaplanabilmesi için yüksek kalitede (geniş frekans aralığında sürekli ve çözünür) olmalıdır. Bu kapsamda, dispersiyon eğrisinin tabaka (geometrik ve fiziksel) ve veri toplama parametrelerinden nasıl etkilendiği yapay veriler üzerinden analiz edilmiştir. Bu analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Temel mod dispersiyon eğrisinin genel karakteri, S-dalgası hızına ve tabaka kalınlığına bağlı olarak değişir. Buna karşılık, P-dalgası hızının ve yoğunluğunun değişiminden kaynaklanan etkiler ihmal edilebilir.
- Ara tabakalardaki S-dalgası hızı azalması (yumuşak ara tabaka), temel mod dispersiyon eğrisinin düşük frekans bölgesinde yüksek hızlardan düşük hızlara doğru ani bir düşüşüne ve yüksek frekans bölgesinde ise sürekliliğin bozulmasına (kararsızlaşmasına) neden olur (zik-zak etkisi).
- Ara tabakalardaki S dalgası hızı artışı (sert ara tabaka), temel mod dispersiyon eğrisini düşük-yüksek-düşük hızlara değişen salınımlı hale getirir ve bu hız artışı yüksek mod olarak değerlendirilebilir.
- Yüzeye yakın yüksek hızlı ince veya kalın malzemelerin (asfalt, beton, bazaltik lavlar vb.) bulunması durumunda dispersiyon eğrisinin sürekliliği bozulur ve kalınlık arttıkça bu bozulma daha düşük frekanslara kayar.
- İnce tabakalar yüksek hız, kalın tabakalar ise düşük hız etkisine neden olurlar. Bu etki, ters çözümün önemli bir belirsizlik kaynağını oluşturabilir.

Veri toplama parametrelerinin analizinden elde edilen sonuçlar;

- Kaynak ofseti, X_0 arttıkça, hem Rayleigh yüzey dalgasının tam olarak oluşumu hem de temel mod dispersiyon eğrisinin daha iyi karakterize edilmesi sağlanır.

- Yapay testler, X_0 değerinin hedef kalınlık veya serim uzunluğu kadar alınmasının dispersiyon eğrisinin en geniş frekans aralığında yüksek doğrulukla işaretlenmesini sağlayacağını göstermiştir. Bununla birlikte, çok uzun kaynak ofseti kullanmak, uzak ofsetlerde gürültü girişimini ve mod girişimlerini artıracığından temel ve yüksek mod dispersiyon eğrilerinin kalitesine her zaman katkı sağlamayabilir. Ayrıca, çok uzun kaynak ofsetlerini kullanmak uygulamada her zaman pratik olmayacağı dikkate alındığında, X_0 değerinin en azından alıcı aralığının dört katı ($X_0 \geq 4 \cdot dx$) veya serim boyunun beşte biri ($X_0 \geq L/5$) kadar alınmasının yeterli olacağı gözlenmiştir.
- Alıcı aralığı (dx) dispersiyon eğrisinin sürekliliğini ve dalga sayısı katlanmasını kontrol eder. Bununla birlikte alıcı aralığının artırılması, serim dolayısıyla profil boyunun artırılmasını sağlamaktadır. Ancak, alıcı aralığının artırılması, yüksek frekans bölgesinde dalga sayısı katlanmasına neden olur ve bu durum hedeflenen en ince katmanların görüntülenememesine neden olabilir.
- Yüzey dalgası dalga formlarının tam olarak oluşması için kaynak ofsetinin seçimi önemli iken, temel ve/veya yüksek mod dispersiyon eğrilerinin sürekliliği ve çözünürlüğü için serim uzunluğu son derece önemlidir. Serim uzunluğu ($L=(N-1) \cdot \Delta x$) alıcı sayısının veya alıcı aralığının artırılması ile sağlanabilir. Daha fazla sayıda alıcı (N) kullanmak, temel mod dispersiyon eğrisinin daha geniş bir frekans aralığında ayrımlı ve sürekli olarak elde edilmesini ve yüksek modların da birbirinden ayrımlı olarak görüntülenmesini sağlar. Buna karşılık, uzun profil ve serim boyları uzak alıcılarda gürültü etkinliğinin artmasına, dolayısıyla sinyal/gürültü oranının azalmasına neden olabilir.

Sonuç olarak, yapay testler göstermiştir ki, yüksek kalitede dispersiyon eğrisi elde etmek için, en uygun uzunluktaki serim boyunun belirlenmesi gereklidir ve bu A-ÇKYDA sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Gerçek arazi çalışmalarında ortamın litolojisine, jeomorfolojisine ve ekipman imkanlarına göre kaynak ofseti, alıcı aralığı ve alıcı sayısı kaliteli veri toplamak için en uygun kombinasyonlarda seçilebilir. Bununla birlikte, bu yapay çalışmalardan elde edilen gözlemler sonucu aşağıda verilen Tablo 1'deki kombinasyonlar veri toplama parametre seçimini kolaylaştırıcı katkı sağlayabilir.

Tablo 1. Yapay testlerden gözlemlere göre, alıcı sayısı, alıcı aralığı ve kaynak ofseti için uygun değerler. Alıcı sayısı artırıldığında, alıcı aralığı azaltılmalıdır. (Convenient values for the number of receivers, receiver interval, and source offset, based on observations from synthetic tests. As the number of receivers is increased, the receiver interval should be reduced.)

Alıcı Sayısı, N	Alıcı aralığı, dx	Kaynak ofseti, X_0
$N < 24$	$4.0m \leq dx \leq 2m$	$X_0 \geq 4 \cdot dx$ veya $X_0 \geq L/5$
$N \geq 24$	$0.5m \leq dx \leq 2m$	

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar sayın editör Çağlayan BALKAYA'ya, yapıcı eleştirileri ile makalenin gelişimine katkı sağlayan isimleri belirtilmemiş olan sayın hakemlere teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. 2nd ed. University Science Books; 2002.
- Beatty, K. S., Schmitt, D. R., Sacchi, M., 2002. Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure, Geophysical Journal International 151:622-631.
- Buchen, P. W., Ben-Hador, R., 1996. Free-mode surface-wave computations. Geophysical Journal International, 124 (3), 869–887.
- Chen, X., 1993. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space, Geophys. J. Int., 115, 391-409.
- Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E., & Finetti, I., 2003. Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments. In SEG International Exposition and Seventy-Third Annual Meeting, 24-31 October 2003, Dallas, Texas (Vol. 22, pp. 1247–1250).
- Dal Moro, G., Ferigo, F., 2011. Joint analysis of Rayleigh and Love wave dispersion for Near-surface studies: issues, Criteria and Improvements. Journal of Applied Geophysics 75: 573–89.
- Dal Moro, G., Keller, L., Moustafa, S.R., Al-Arifi, N., 2016. Shear-wave velocity profiling according to three alternative approaches: a comparative case study. Journal of Applied Geophysics 134: 112–24.

- Dikmen, Ü., Arısoy, M. Ö., ve Akkaya, İ., 2010, Offset and linear spread geometry in the MASW method: *J. Geophys. Eng.*, 7, 211–222.
- Foti, S., Parolaj, S., Albarello, D., ve Picozzi, M., 2011. Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization: Survey in Geophysics, 32, 777–825.
- Foti S, Lai CG, Rix GJ, Strobba C. Surface wave methods for near-surface site characterization. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2015.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Giulio, G.D., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., Socco, V., 2017. Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project, *Bulletin Earthquake Engineering*, 1–54.
- Gao, L., Xia, J., Pan, Y., Xu, Y., 2016. Reason and condition for mode kissing in MASW method, *Pure Appl Geophys.*, 173(5):1627–38.
- Hisada Y., 1994. An efficient method for computing Green's function for a layered half space with sources and receivers at close depth, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 1456-1472.
- Hisada Y., 1995. An efficient method for computing Green's function for a layered half space with sources and receivers at close depth (part 2), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 1080-1093.
- Ivanov, J., Park, B. C., Miller, R. D., Xia, J., 2005. Analysing and Filtering Surface-Wave Energy By Muting Shot Gathers. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10:307–322
- Kanlı, A. I., Tildy, P., Pranay, Z., Pınar, A., Hermann, L., 2006. Vs30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey, *Geophysical Journal International*, 165:223-235.
- Karlı, H., Şenkaya, G., Şenkaya, M., Güney, R., 2017. Investigation of soil structure in Uzungöl settlement area by Shallow Seismic Methods, *Eurasian Journal of Soil Science*, 6, 134-143.
- Kennett, B. L. N., 1983. *Seismic wave propagation in stratified media*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lai, C.G., (1998). "Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- Lai, C.G., ve Rix, G.J., 1998, Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization: Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, 258 pp.
- Lai, C.G., Foti, S., Rix, G.J., 2005. Propagation of data uncertainty in surface wave inversion. *J Environ Eng Geophys*, 10(2):219–28.
- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., Ivanov, J. M., 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock, *The Leading Edge*, 12:1392-1396.
- Olafsdottir, E.A., Bessonon, B., Erlingsson, S., 2018. Combination of dispersion curves from MASW measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 473–487.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record" 68th Annual International Meeting of Society of Exploration Geophysics, Expanded Abstract 1377-1380.
- Park, C. B., Miller, R. D., ve Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves (MASW): *Geophysics*, 64, 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 2001. Offset and resolution of dispersion curve in 724 multichannel analysis of surface waves (MASW), *Proceedings of the SAGEEP*, 725 SSM4, 1-6.
- Park, C.B., Miller, R.D., ve Miura, H., 2002. Optimum field parameters of an MASW survey: Extended Abstract, SEG-J, May 22-23, Tokyo.
- Park, C. B. 2011. Imaging dispersion of MASW data-Full vs. selective offset scheme, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 16:13-23.
- Pei D., 2007. Modeling and inversion of dispersion curves of surface waves in shallow site investigations, Ph.D. Thesis. Reno, NV, University of Nevada.
- Pei, D. Louie, J. N., Pullammanappallil, S.K., 2008. Improvements on Computation of Phase Velocities of Rayleigh Waves Based on the Generalized R/T Coefficient Method , *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 1, pp. 280–287.
- Rix, G.J., Lai, C.G., 2000. Software package tools for surface wave analysis. Available at the WEB site: http://www.ce.gatech.edu/~grix/surface_wave.html#Software.
- Sauvin, G., Vanneste, M., Heureux, J.S.L., L'Heureux J-S., O'Connor P., O'Rourke S., 2016. Impact of data acquisition parameters and processing techniques on S-wave velocity profiles from MASW—Examples from Trondheim, Norway. In: *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting*. 2016, 1297–306.
- Song, X., Gu, H., 2007. Utilization of multimode surface wave dispersion for characterizing roadbed structure, *Journal of Applied Geophysics*, 63(2):59–67.
- Şenkaya, M., Karlı, H., 2016. Joint inversion of Rayleigh-wave dispersion data and vertical electric sounding data: synthetic tests on characteristic sub-surface models, *Geophysical Prospecting*, 64, 228-246, 2016.
- Şenkaya, M., Karlı, H., Socco, V.L., Foti, S., 2020. Obtaining reliable S-wave velocity depth profile by joint inversion of geophysical data: the combination of active surface-wave, seismic refraction and electric sounding data, *Near Surface Geophysics*, 18, 659-682.
- Taipodia, J., Baglari, D., Dey, A., 2018. Recommendations for generating dispersion images of optimal resolution from active MASW survey, *Innovative Infrastruct. Solut.* 3, 1–19.
- Taipodia J., Dey, A., Gaj S., Baglari D., 2020. Quantification of the resolution of dispersion image in active MASW survey and automated extraction of dispersion curve. *Computer and Geoscience*, 135:104360-1-19.
- Taipodia J., Dey, A., Gaj S., Baglari D., 2020. Influence of receiver layout on active MASW survey conducted at different sites having varying substrata characteristics, *Arabian Journal of Geosciences (2021)* 14: 1143.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., 2010, Determination of density from seismic velocities, the 19th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey 23 – 26 November Ankara / Turkey.

- Vanlı Senkaya, G., Senkaya, M., Karsli, H., Güney, R., 2020, Integrated shallow seismic imaging of a settlement located in a historical landslide area, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79 1781–1796.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave, *Geophysics*, 64:691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Tian, G., 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes, *Journal of Applied Geophysics*, 52(1):45–57.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Ivanov, J., Tian, G., and Chen, C., 2004, Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface geophysics: The Leading Edge, 23(8) 753–759.
- Xu, Y., Xia, J., Miller, R. D., 2006. Quantitative estimation of minimum offset for multichannel surface-wave survey with actively exciting source, *Journal of Applied Geophysics*, 59:117-125.
- Yılmaz, O., Eser, M., 2002. A unified workflow for engineering seismology, 72nd Ann. Mtg. SEG (Salt Lake City, UT) pp 1496–9.
- Zhang, S.X., Chan, L.S., 2003. Possible effects of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion, *Journal of Applied Geophysics*, 53(1):17–29.
- Zhang, S. X., Chan, L. S., and Xia, J., 2004, The Selection of Field Acquisition Parameters for Dispersion Images from Multichannel Surface Wave Data: *Pure appl. Geophysics*, 161, 185–201.