

## Yüzey Dalgası Dispersiyon Verisinin Ardışık Ters Çözümü

### *Sequential Inversion of Surface Wave Dispersion Data*

EREN PAMUK<sup>1\*</sup>, FİKRET DOĞRU<sup>1</sup>, HİLMİ DİNDAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 35160 İzmir

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 35160 İzmir

Geliş (received) : 21 Temmuz (July) 2014

Kabul (accepted) : 21 Nisan (April) 2015

#### ÖZ

Bu çalışmada Çok-kanallı Yüzey Dalga Analizi yönteminden elde edilen Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisinin ters çözümü için ardışık yaklaşım önerilmiştir. Ardışık yaklaşım için türev tabanlı Levenberg-Marquardt ve sezgisel bir yöntem olan Komşuluk Algoritması birlikte kullanılmıştır. Öncelikle düşük hızlı jeolojik birimler içeren sentetik modellerin kuramsal dispersiyon eğrileri hesaplanmıştır. Bir sonraki aşamada bu kuramsal dispersiyon eğrisine yüzde beş normal dağılıma uyan gürültü eklenmiştir. Levenberg-Marquardt Algoritması ile Komşuluk Algoritması ayrı ayrı kullanılarak ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiş ve sonra ardışık ters çözüm uygulanarak elde edilen sonuç diğer iki sonuç ile karşılaştırılmıştır. Arazi çalışmasında ise İzmir ilinde Çok-kanallı Yüzey Dalga Analizi yöntemi ile toplanan veriler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ters çözüm işlemleri sonucunda elde edilen modeller mevcut sondaj verileri ve standart penetrasyon deneyi değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen ardışık yaklaşımın sentetik model çalışmasında doğru modele göreli olarak daha iyi yakınsadığı, gerçek arazi verisinde ise daha düşük hata ile modeli bulduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Çok-Kanallı Yüzey Dalga Analizi, dispersiyon eğrisi, ardışık yaklaşım, Komşuluk Algoritması.

#### ABSTRACT

In this study, a sequential approach is suggested to invert Rayleigh wave dispersion curves obtained from Multi-channel Analysis of Surface Waves. The derivative based Levenberg-Marquardt algorithm and a stochastic method Neighbourhood Algorithm is used together for sequential approach. Firstly, the theoretical dispersion curve is created from forward solution of synthetic model that contains low-velocity layers and then five percent Gaussian type noise was added to the theoretical dispersion curve. The inversion of dispersion curve is carried out using Levenberg-Marquardt and Neighbourhood algorithms separately. Sequential approach is implemented for inversion on the same dispersion curves and the obtained results are compared. Root mean square error and relative error is calculated from the inversion results of the theoretical dispersion curves and the results show that sequential approach yielded better solution to the theoretical model with the lower root mean square error according to conventional and global method. In the field study, a data set collected using Multi-channel Analysis of Surface Waves in the city of İzmir was used. The results from suggested inversion methods compared with the available borehole data and Vs values obtained from standard penetration test values. It is shown that the inversion results were compatible with stratigraphy. Consequently, this work demonstrates that sequential approach was generated models with lowest root mean square error in both theoretical and field study and shows better convergence in theoretical study.

**Keywords:** Multi-channel Analysis of Surface Waves, dispersion curve, sequential approach, Neighborhood Algorithm.

---

\* E. Pamuk

e-posta: eren.pamuk@deu.edu.tr

## GİRİŞ

Kayma dalga hızı ( $V_s$ ) bilgisi zeminin deprem sırasındaki davranışını belirlemede önemli rol oynar ve jeoteknik çalışmalarda önemli bir giriş parametresidir. Son yıllarda Rayleigh dalgalarının dispersiyon eğrileri  $V_s$  hızlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Park vd., 1999; Liu vd., 2000).

Yüzey dalgası analiz yöntemleri, yüzeye yakın yapıların zemin özelliklerinin araştırılmasında kullanılan geleneksel sismik kırılma yönteminin karşılaştığı zorluklar nedeniyle daha tercih edilir hale gelmiştir. Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW) yöntemiyle yeraltındaki jeolojik yapılara ait farklı parametreler etkin bir şekilde belirlenebilir (Park vd., 1999). Dikmen vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada MASW yöntemi için uygun atış noktası ve dizilim geometrisini belirlemiştir. Kanbur vd. (2011) Isparta'da yapmış oldukları çalışmada sismik yansıma, MASW ve ReMi (Refraction Microtremor) yöntemlerini kullanarak 35 m derinliğe kadar yerçinin 1B kesme hızı dağılımı özellikleri ortaya koymuşlardır.

Rassal bir yöntem olan Komşuluk Algoritması (KA) dispersiyon eğrilerinin ters çözümünde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sambridge, 1999; Wathélet, 2005). Geleneksel bir yöntem olan LM algoritması da ters çözüm problemlerinin çözümünde oldukça sık kullanılmaktadır. Ancak Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasından elde edilen sonuçların güvenilirliği ve algoritmanın doğru çözüme yakınsaması kullanılan başlangıç modeline bağlıdır (Chunduru vd., 1997; Fallat ve Dosso, 1999). KA ise LM algoritmasının aksine iyi bir başlangıç modeline ihtiyaç duymadan daha iyi sonuçlar üretebilir. Ancak, KA ters çözüm için daha fazla zamana gereksinim duyar.

Son yıllarda jeofizik verilerin ters çözümünde melez optimizasyon kullanımı ile ilgili araştırma sayısı artmaktadır (Chunduru vd., 1997; Başokur vd., 2007; Mendes, 2009; Çaylak vd., 2011). Global yöntem, parametre uzayı içerisinde global minimuma yakın iyi bir başlangıç modeli elde etmek ve yerel minimumlardan kaçınmak için tercih edilir. Yerel yöntemde ise global yöntemden elde edilen model parametreleri başlangıç

parametreleri olarak kabul edilerek global minimumdaki çözüme ulaşmak için kullanılır.

Bu çalışma kapsamındaki ters çözüm işlemlerinde Rayleigh dalgası temel kip dispersiyon eğrileri kullanılmıştır. Öncelikle sentetik veriler ve arazi verileri KA ve LM algoritmalarıyla değerlendirilmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında ise ardışık yaklaşım (AY) sentetik ve arazi verilerinin ters çözümünde uygulanmıştır. Arazi verilerinin değerlendirilmesi sonrasında elde edilen  $V_s$  modelleri mevcut sondaj verilerindeki jeolojik birimler ile ilişkilendirilmiştir.

## YÖNTEM

### Çok-kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (MASW)

MASW çeşitli yapay kaynakların (balyoz, ağırlık düşürme vb.) kullanıldığı bir sismik yöntemdir. Bu yöntem, Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (Spectral Analysis of Surface Waves-SASW) yöntemindeki yetersizliğinin giderilmesi için geliştirilmiştir ve sığ mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Park vd., 1999). Şekil 1'de bu yöntem için veri toplama düzeneği verilmiştir.

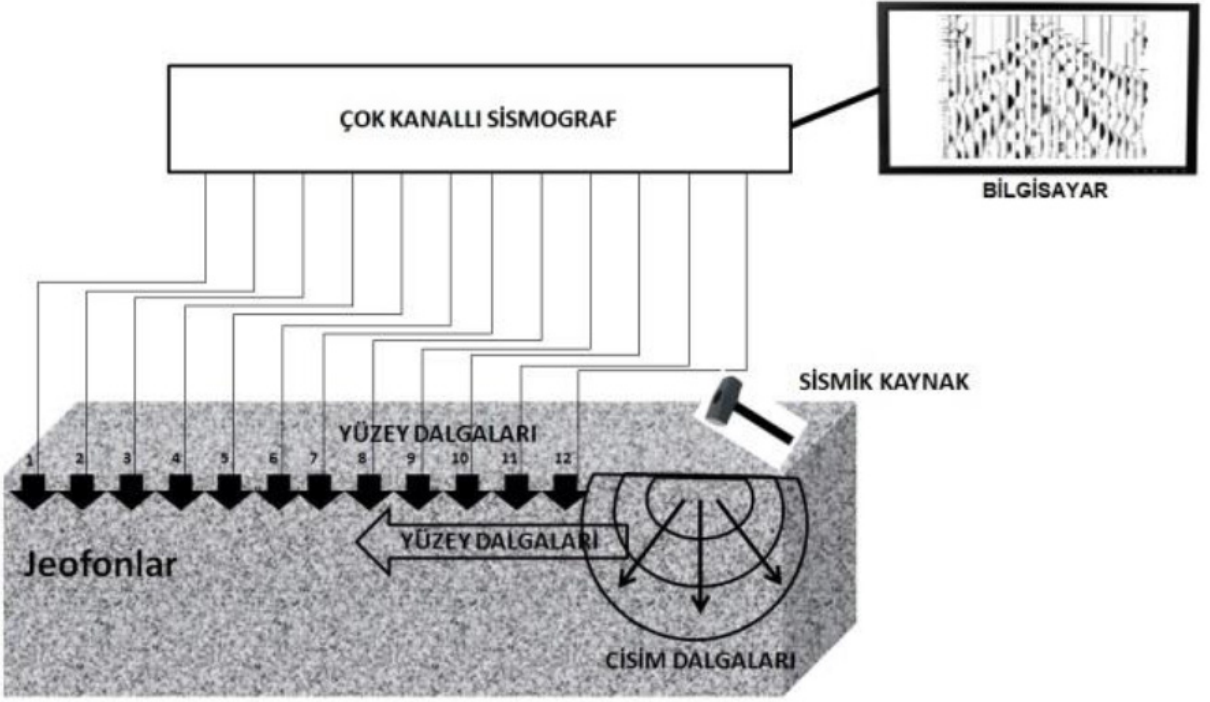
MASW yönteminde kayma dalgası hızlarının elde edilme aşamaları şu şekildedir (Şekil 2);

Adım 1- Yüzey dalgalarının kaydedildiği arazi aşaması,

Adım 2- Veri işlem ve dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi,

Adım 3- Dispersiyon eğrisinin farklı yöntemlerle ters çözümünden elde edilen yer modeli ( $V_s$ -derinlik değişimi).

MASW yönteminde arazi (gerçek) dispersiyon eğrisinin elde edilmesi kritik bir adımdır. S dalga hızının derinliğe bağlı olarak yüksek ayrımlılık ve doğrulukta belirlenmesi, çoğunlukla dispersiyon eğrisinin doğru bir şekilde elde edilmesine bağlıdır (Kanlı vd., 2006). Dispersiyon eğrisini elde etmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler içerisinde en basit olanı, farklı konumlarda kaydedilen iki sismik izin çapraz ilişkisini kullanmaktadır (Guo ve Liu, 1999). Bir diğer yöntem ise McMechan ve Yedlin'in (1981) önerdikleri kesişme zamanı-yavaşlık ( $\tau$ - $p$ ) dönüşümüdür. Bu yöntem, frekans ortamında yapıldığında frekans ortamı  $\tau$ - $p$  dönüşümü,



Şekil 1. Çok-kanallı Yüze Dalgası (MASW) veri toplama düzenekleri (Park vd., 1999'dan düzenlenmiştir.)

Figure 1. Data acquisition systems for multi-channel surface waves (modified from Park et al., 1999).

zaman ortamında yapıldığında eğim-yığıma dönüşümü adını alır ve temelinde MASW kayıtlarına Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform) ve kayma özelliği uygulanır. Bu yöntem ile, temel kıp, cisim dalgaları ve daha yüksek kipli dispersiyon eğrileri ayrılabilir.

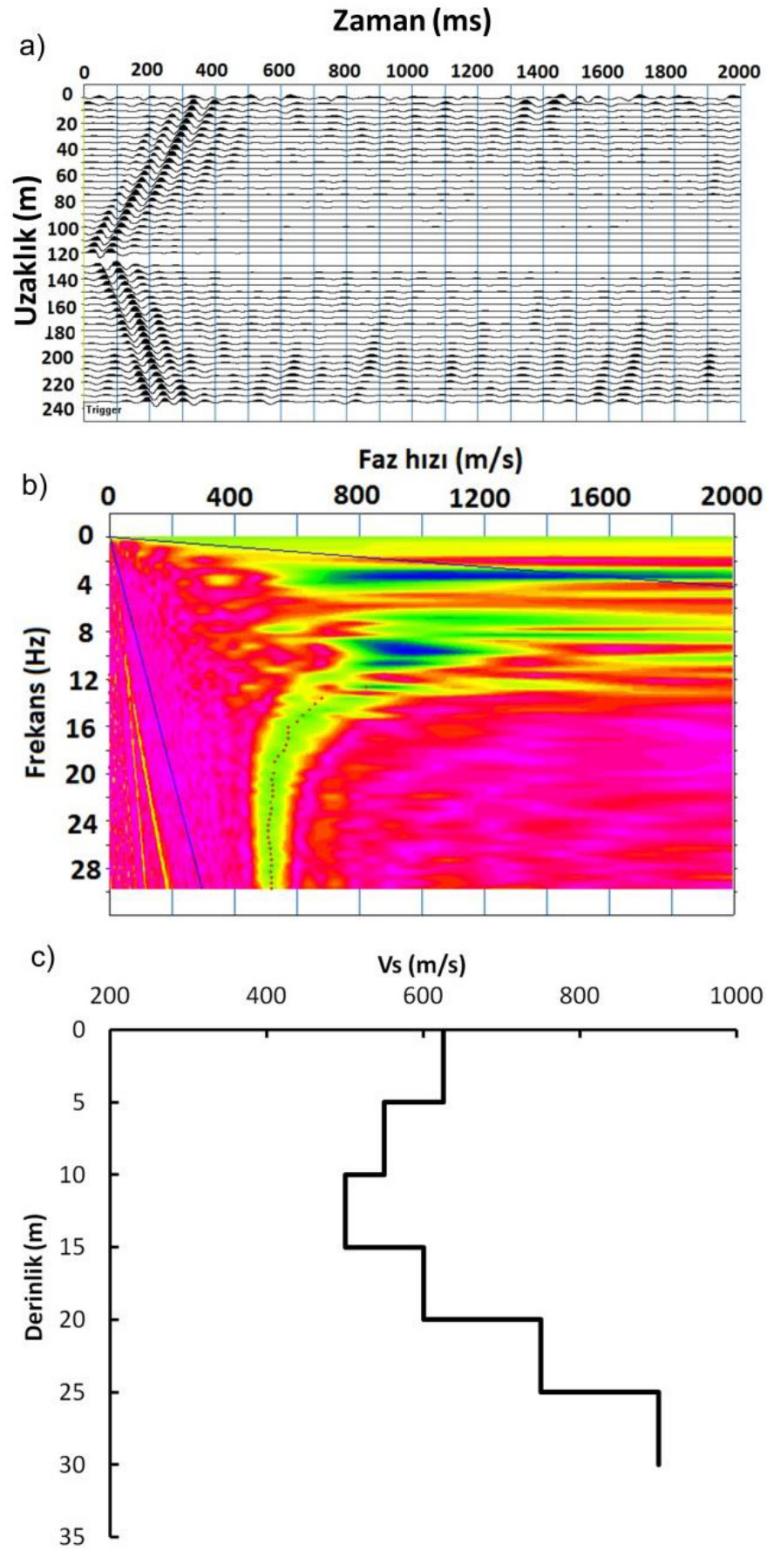
### Komşuluk Algoritması

Dispersiyon eğrilerinin ters çözümünde yaygın olarak kullanılan Komşuluk Algoritması; Genetik Algoritma, Isıl İşlem Algoritması gibi çok boyutlu parametre uzayı içerisinde modelleri en düşük hata ile elde etmek için geliştirilen bir global optimizasyon yöntemidir (Sambridge, 1999). Komşuluk algoritması her bir adımda modelleri iyileştirmek için önceki modelleri kullanır. Bu yöntem Voronoi geometrisinden yararlanarak parametre uzayının en uygun kısmını araştırmak ve bulmak için noktaların düzensiz dağılımı arasında bir ara değer bulur. Parametre uzayının doğru bir şekilde araştırılması için hesaplanan dispersiyon eğrilerinin fazla sayıda olması

gerekir (birkaç bin ile birkaç on bin). Diğer sezgisel metotlarla (Genetik algoritma, Isıl İşlem algoritması vb.) karşılaştırıldığında, KA daha az sayıda kontrol parametresi içerir (Sambridge, 1999; Wathelet vd., 2004).

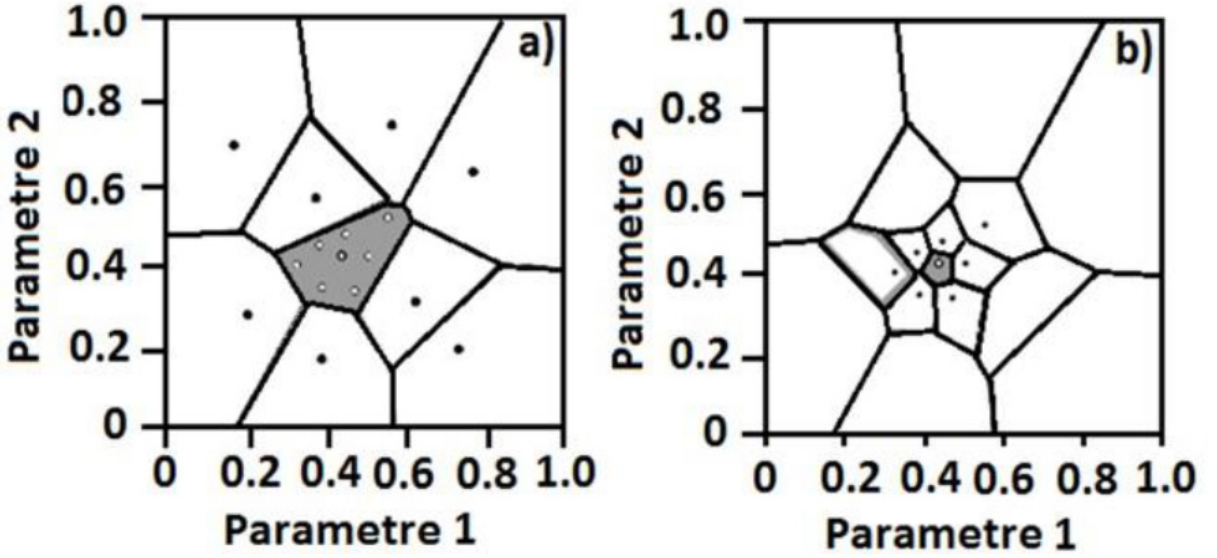
Yüze dalgası ters çözümünde en önemli parametreler; her bir tabakanın kayma dalgası hızı ( $V_s$ ), basınç dalgası hızı ( $V_p$ ), yoğunluğu ve kalınlığıdır. Benzer sezgisel metodlarda olduğu gibi KA da parametre uzayında rastgele modeller üretir ve dispersiyon eğrilerini bu modeller için hesaplar. Başlangıçta kullanılan yoğunluk değerleri, tüm parametre uzayında aynı kabul edilir, daha sonra bu değerler seçilen tüm parametrelerin değişim aralığı tarafından sınırlanır. Hesaplanan ile ölçülen dispersiyon eğrilerinin karşılaştırılması sonucundaki hata değeri elde edilen modelin istenilen modele ne kadar uzak olduğunu gösterir (Sambridge, 1999; Wathelet vd., 2004).

İki boyutlu parametre uzayı Şekil 3'te örnek olarak verilmiştir. Siyah noktalar, hesaplanan hata



Şekil 2. MASW yönteminde veri işlem aşamaları a) yüzey dalgalarının elde edilmesi b) dispersiyon analizi c) ters çözüm ile elde edilen Vs derinlik kesiti.

Figure 2. Data processing steps in the MASW method a) obtaining surface waves b) dispersion analysis c) Vs depth profile obtained from inversion.



Şekil 3. 2B'li parametre uzayı için Voronoi hücrelerinin sınırları ve modelleri, b) ilk yineleme sonrası Voronoi geometrisi (Wathelet, 2005).

Figure 3. Voronoi cells for 2D parameter space a) initial borders and models of Voronoi cells b) Voronoi geometry after first iteration (Wathelet, 2005).

için bazı model noktalarıdır (Wathelet, 2005). Şekil 3a iki boyutlu parametre uzayında Voronoi hücrelerinin sınırlarını ve modellerini (Siyah noktalar) gösteren bir örnektir. Başlangıçta  $n_{s0}$  (=9 olması durumunda) modelleri oluşturulur ve gri hücreler en düşük hata miktarına sahiptirler. Bu örnekte, bir hücrede 7 yeni model oluşturulmuştur ( $n_r=1$  ve  $n_s=7$ ). Şekil 3b ilk yineleme sonrası Voronoi geometrisini göstermektedir. Eğer gri ile gösterilen hücre en düşük hata miktarına sahipse, örnekleme yoğunluğu her bir yinelemeden sonra sistematik olarak azalmaz. Voronoi geometrisinin en önemli özelliği aynı anda iyi  $n_r$  bölgelerini örneklerken, örnekleme merkezinin bir yerden bir yere atlamasına izin vermesidir. Yeni  $n_s$  modelleri birçok hücre üzerinde dağılmışsa KA oluşturulan modellerin içerisinde en düşük hatalı modeli arayarak sonuca ulaşır. Ayrıca yeni model sayısı az sayıda hücre ile sınırlanmış ise KA daha hızlı çözüm yapar ve en düşük hatalı modeli bulmada daha başarılı olur. (Wathelet, 2005; Pamuk, 2014).

### Komşuluk Algoritması ile Ters Çözüm

Komşuluk algoritması için aşağıda verilen dört parametre gerekmektedir:

$it_{max}$ ; gerçekleştirilen yineleme sayısıdır

$n_{s0}$ ; Ters çözüm başlangıcındaki parametre uzayından rastgele seçilen model sayısıdır.

$n_s$ ; Her bir yinelemede oluşturulan model sayısı,

$n_r$ ;  $n_s$  modellerinin olduğu en iyi hücrelerin sayısı (en düşük hata ile)

Ters çözüm işlemi izleyen aşamalardan oluşur;

Adım 1.  $n_{s0}$  modelleri dizisi parametre uzayında eşit olasılıklı rassal bir dağılım şeklinde oluşturulur,

Adım 2. Hata fonksiyonu en son oluşturulan modeller için hesaplanır,

Adım 3. Oluşturulan modeller içerisinde hata miktarı en düşük olan  $n_r$  modelleri seçilir,

Adım 4. Her seçilen hücrede eşit olasılıklı  $n_s/n_r$  yeni örneklerin ortalaması oluşturulur,

Adım 5. Önceki model topluluğuna yeni  $n_s$  örnekleri eklenir ve kabul edilebilir bir hataya ulaşıncaya kadar 2. aşama tekrarlanır,

Adım 6. Bu süreç kabul edilebilir bir hata değerine ulaşıldığında sonlandırılır.

### Doğrusal Olmayan Problemlerin Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi ile Çözümü (Levenberg-Marquardt)

Eşitlik 1 doğrusallaştırılmış ters çözümde  $m$  model parametre sayısı ile  $n$  gözlemsel veri sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$A_{n \times m} \Delta p_{m \times 1} = \Delta d_{n \times 1} \quad (1)$$

Burada,  $A$  model parametrelerine göre kısmi türevlerden oluşan Jacobian dizeyi,  $d$  gözlemsel değerler ile hesaplanan değerler arasındaki farkı yansıtan “veri fark yöneyi”,  $p$  ise model parametrelerine uygulanacak düzeltme miktarlarını içeren “parametre fark yöneyi” dir.

Doğrusal olmayan denklem sistemleri için genelleştirilmiş en küçük kareler çözümü ise eşitlik 2’deki gibi verilir.

$$\Delta p = (A^T A)^{-1} A^T \Delta d \quad (2)$$

Veri bazı parametrelerin çözümü için tam bilgi içermiyorsa Jacobian dizeyinin bu parametrelere karşılık gelen sütunları sifıra yakın olur. Bu parametrelere ait özdeğerler de sifıra yakın olur. Yineleme sırasında küçük özdeğerlerin neden olduğu salınımların sönümlenmesi gerekir. Bu nedenle sönüm faktörü eşitlik 2’deki  $\lambda$ ’nın diyagonal elemanlarına eklenerek eşitlik 3 elde edilir (Başokur, 2002).

$$\Delta p = (A^T A + \varepsilon^2 I)^{-1} A^T \Delta d \quad (3)$$

Bu çözüm “Levenberg-Marquardt” ters çözümü ya da “sönümlü en küçük kareler” adını alır (Lines ve Treitel, 1984). Eşitlik 3’te  $I$  birim dizey,  $\varepsilon^2$  gerçel bir sayı ve sönüm *çarpmanı* olarak adlandırılır (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). Sönüm faktörünün alabileceği değerler, sıfır veya göreceli olarak özdeğerlerden büyük bir sayı olabilir (Başokur, 2002; Yanık, 2006).

Veri ayrımlılık dizeyi Tekil Değer Ayrışımı (SVD-Singular Value Decomposition) bileşenleri cinsinden eşitlik 4’de verilmektedir;

$$N = U U^T \quad (4)$$

Burada  $m$  boyutlu veri özvektörlerini içeren dizeydir.

Sönüm faktörünün sıfır olduğu durumda, parametre ayrımlılık dizeyi SVD bileşenleri cinsinden eşitlik 5’deki gibi bulunabilir;

$$R = V V^T \quad (5)$$

Buradaki ise parametre özvektörlerini içeren dizeydir (Menke, 2012).

Ters çözümdeki kısmi türevler dizeyinin sütunları, veri noktalarının parametrelerden etkileniş biçimini gösterir.  $j$ . sütun elemanları göreceli olarak yeterli sayıda yüksek değerler kapsıyorsa  $j$ . parametre duyarlı şekilde çözülebilir. Eğer değerler küçük ve eleman sayısı yetersiz ise, veri grubu  $j$ . parametreyi çözmek için kullanılmaz ve çözüm için ek bilgiye gerek vardır. Eğer,  $R$  birim dizeye yakınsa ters çözüm işleminden elde edilen parametrelerin modeli temsil ettiği kabul edilebilir ve bütün parametreler tam olarak çözülür. Bu dizeyin elemanlarının birim dizeye yakınlığı, parametrelerin gerçek değerlerine yakınlığının bir ölçüsüdür.

### LM ile Ters Çözüm

Bu çalışmada ters çözümde gerekli olan parametre sönüm faktörü ( $\varepsilon$ ) ’nın en küçük özdeğeri olarak belirlenmiştir. Sönüm faktörü sentetik çalışma için 0.003, arazi çalışması için 0.004 olarak hesaplanmıştır ve bu değer tüm yinelemelerde sabit tutulmuştur. Bu çalışmada, yineleme sayısı 50 alınarak ters çözüm yapılmıştır. Ters çözüm sonrasında matrisine SVD uygulanarak veri ve parametre ayrımlılık dizeyleri hesaplanmıştır. Böylece elde edilen parametrelerin gerçek modeli yansıtmayı yansıtmadığı ve gözlemsel verilerin çözüme katkısı gözlenmiştir.

### Ardışık Yaklaşım ile Ters Çözüm

Bu çalışmada KA ve LM Algoritmaları kullanılarak ters çözüm için yeni bir ardışık yaklaşım sunulmuştur. Ardışık yaklaşım (AY), global yöntem KA ve türev tabanlı yerel yöntem LM algoritmasının kullanılmasıyla sentetik ve arazi verilerinin ters çözümünde uygulanmıştır. Bu

yaklaşım ile KA çözümünün yerel minimumlara düşmemesini sağlarken, sonrasında LM Algoritması global minimuma daha yakın bir çözüme ulaşmamızı sağlamaktadır. KA için çok fazla yineleme sayısı gerekirken bu yaklaşımda çok daha az yineleme sayısı yeterli olmaktadır. LM algoritmasının aksine bir başlangıç modeline ihtiyaç duymayan KA ters çözüm için daha fazla zamana gereksinim duyar. LM algoritmasında gerçek modele ne kadar yakın başlangıç parametreleri verilirse o kadar düşük hata ve gerçek modeli yansıtan parametrelere ulaşılmaktadır. Bu nedenle, KA'dan elde edilen hız ve derinlik değerleri LM algoritmasına başlangıç parametreleri olarak girilerek ters çözüm yapılmıştır.

KA'da yineleme sayısı AY için 500 olarak alınmıştır ve bu yineleme sayısının sonunca elde edilen model parametreleri LM Algoritmasında başlangıç parametreleri olarak kullanılmıştır. LM Algoritmasında ise yineleme sayısı sentetiklerde olduğu gibi 50 olarak belirlenmiştir ancak RMSE değerleri incelendiğinde yaklaşık 4 veya 5 yineleme sonrası hata değeri çok az oranda değişmektedir.

### Sentetik Model Uygulaması

Çok tabakalı ve düşük hız tabakası içeren sentetik modelin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu model, yarı sonsuz tabaka üzerinde üç tabakadan oluşmaktadır (Şekil 4). Ters çözüm sonucu elde edilen dispersiyon eğrileri Şekil 5a'da verilmiş olup, LM yöntemi ile ters çözümde RMSE 2.68 m/s, KA yöntemi ile ters çözümde RMSE 2.15 m/s ve AY ile ters çözümde RMSE 0.5 m/s değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 5b'de

verilen tabaka kalınlıkları ve kayma hızlarından bağıl hatalar yüzde olarak hesaplanarak ters çözüm sonucu elde edilen modellerdeki her bir tabakanın hızları ve kalınlıklarının sentetik modele ait hızlar ve kalınlıklarla karşılaştırılması yapılmıştır (Çizelge 2).

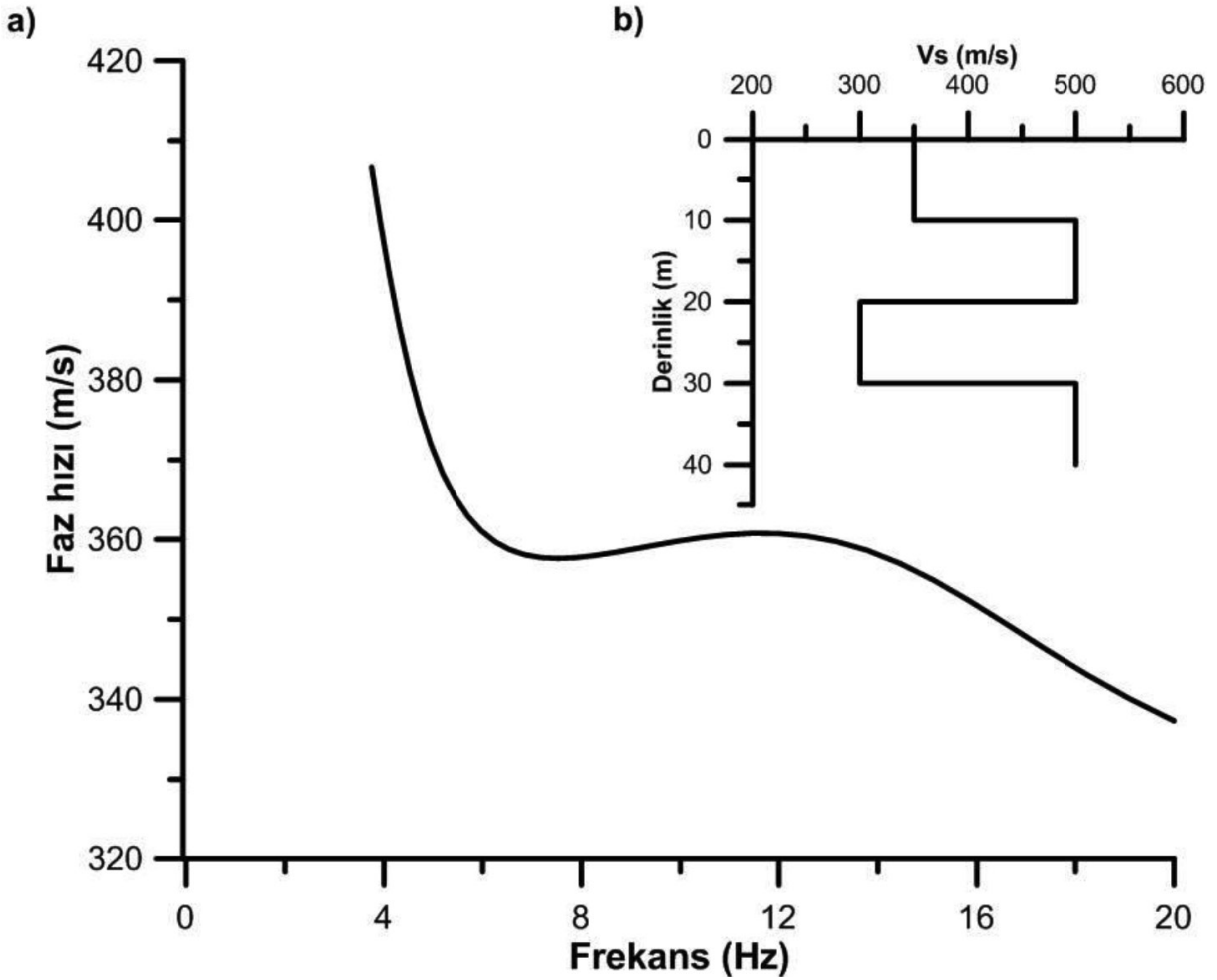
Çalışmanın bu aşamasında sentetik dispersiyon eğrisine %5 Gaussian gürültüsü eklenmiştir (Şekil 6). Öncelikle LM ve KA ile sonrasında AY ile ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir ve gürültüsüz sentetik verinin ters çözümünde kullanılan parametreler kullanılmıştır. Ters çözüm sonucu hesaplanan dispersiyon eğrileri ile sentetik dispersiyon eğrisi arasındaki RMSE değerleri LM yönteminde 2.77 m/s, KA'da 1.40 m/s ve AY'de 1.04 m/s olarak elde edilmiştir (Şekil 7a). Elde edilen RMSE değerleri bulunan sonuçların kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Şekil 7b'de ise verilen tabaka kalınlıkları ve kayma hızlarından hesaplanan bağıl hata değerleri Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Ayrıca LM algoritmasıyla gürültülü ve gürültüsüz dispersiyon eğrilerine ters çözüm uygulandıktan sonra veri ve parametre ayrımlılık düzeyleri SVD kullanılarak hesaplanmıştır. Parametre ayrımlılık düzeyinin her bir köşegen elemanının değeri yaklaşık 1, diğer matris elemanları ise 0'a yakın çıktığından çözümün gerçek modeli yansıttığı söylenebilir. Veri ayrımlılık düzeyi de, parametre ayrımlılık düzeyinde olduğu gibi köşegen elemanlar yaklaşık 1 ve diğer elemanlar yaklaşık 0 çıktığından, ölçülen verilerin parametrelerin çözümünde tam katkı sağladığı görülmüştür. Bunlara ek olarak sentetik çalışmalarda (gürültülü ve gürültüsüz) RMSE değerleriyle paralellik

Çizelge 1. Sentetik model parametreleri.

Table 1. Parameters of the synthetic model.

Kalınlık (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
10	595	350	1340
10	850	500	1450
10	510	300	1290
-	850	500	1450



Şekil 4. a) Düz çözüm ile hesaplanan temel mod dispersiyon eğrisi ve b) Çizelge 1’de verilen tabaka hız modeli.  
Figure 4. a) Fundamental-mode dispersion curve generated forwardly and b) layer velocity model listed in Table 1.

gösteren bağıl hata değerleri incelendiğinde, AY ile elde edilen modelden hesaplanan bağıl hataların diğer yöntemlere göre daha düşük elde edildiği görülmektedir.

### Arazi Çalışması

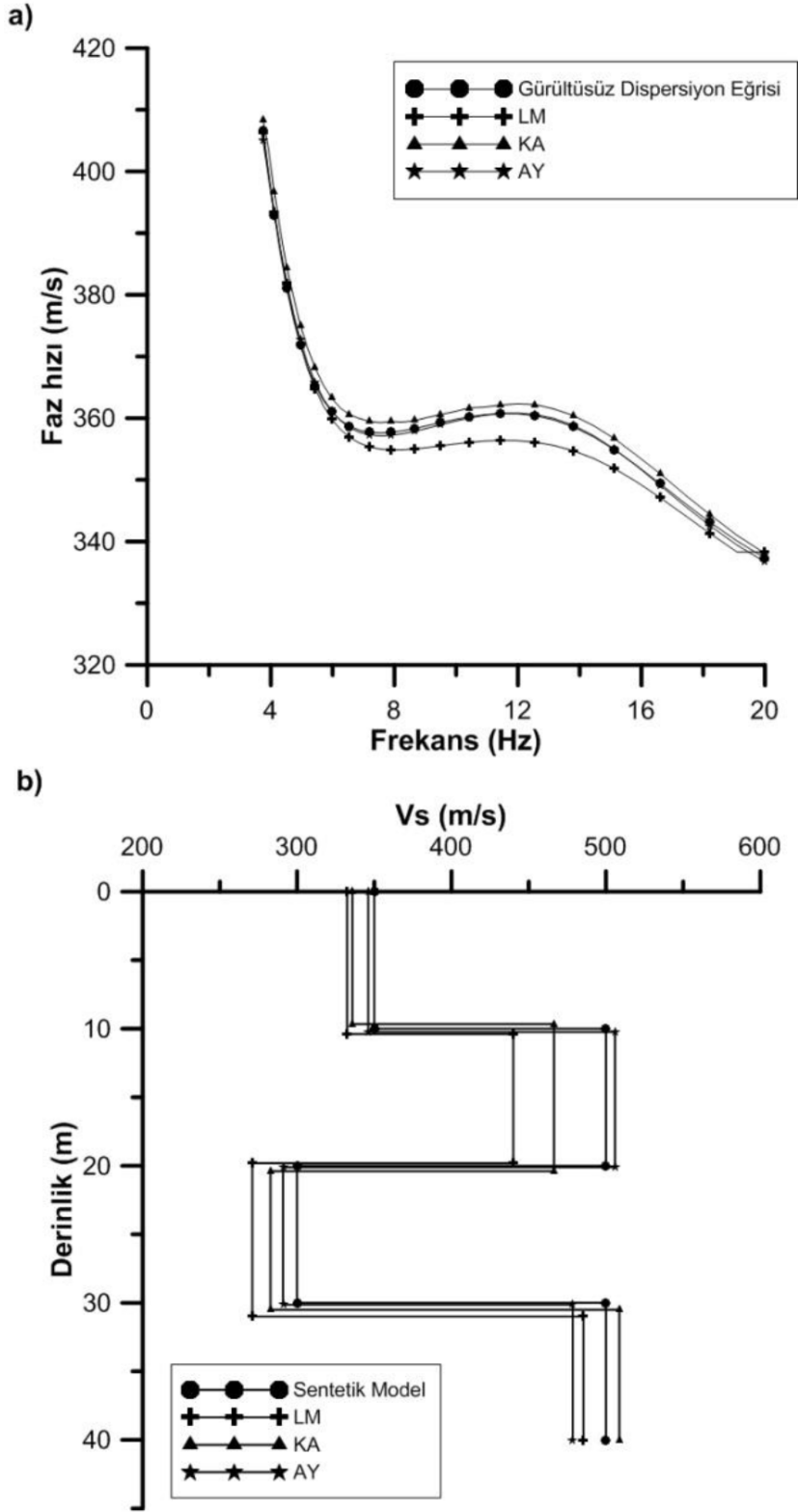
Bu çalışmada arazi MASW verisi İzmir Mavişehir bölgesinde toplanmıştır. Veri toplama işleminde 24 kanallı sismik kayıtçı ve 4,5 Hz’lik düşük frekanslı alıcılar (jeofon) kullanılmıştır. Jeofon aralığı 4 m olarak seçilmiştir. Kaynak olarak hidrolik balyoz (100 lb) kullanılmıştır. MASW yöntemi uygulamasında düz atış ile veri toplanmıştır. Kaynağın ilk jeofona olan uzaklığı

(ofset) 4 m olarak seçilmiştir (Şekil 8). Örnekleme aralığı 1 msn kayıt uzunluğu 2 sn’dir. Veri kalitesini artırmak için her noktada 3 adet ölçü alınarak yığıma (stack) işlemi yapılmıştır. Arazide elde edilen düz atış kaydı ve veri işlem teknikleri ile elde edilen dispersiyon eğrisi Şekil 9’da gösterilmiştir.

MASW çalışmasının gerçekleştirildiği alanda sondaj ve SPT-N verisi mevcut olup bu veriler Dindar (2010)’dan alınmıştır. Yapılan sondaj çalışmasına ait SPT-N verileri ve jeolojik istif Şekil 10’da verilmiştir.

Ters çözüm sonucu elde edilen Vs-derinlik kesitlerinin SPT-N – derinlik ve dolayısıyla stratigrafi





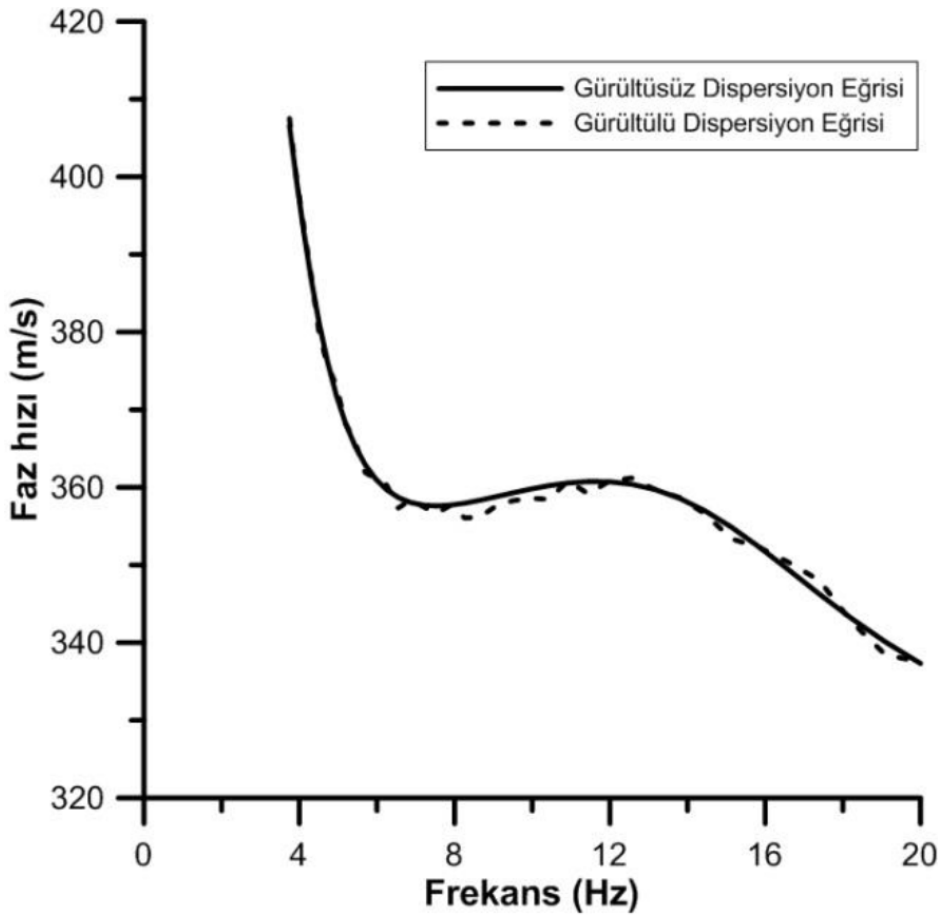
Şekil 5. Gürültü eklenmemiş veride LM Algoritması, KA ve AY ile ters çözüm sonuçları a) dispersiyon eğrileri, b) bu yöntemlerden elde edilen Vs derinlik kesitleri.

Figure 5. Inversion results of LM Algorithm, NA and SA on noise-free data a) dispersion curves and b) Vs depth profile obtained from these methods.

Çizelge 2. Gürültüsüz dispersiyon eğrisi için LM Algoritması, KA ve AY ile ters çözüm sonucu hesaplanan bağıl hatalar ve RMSE değerleri.

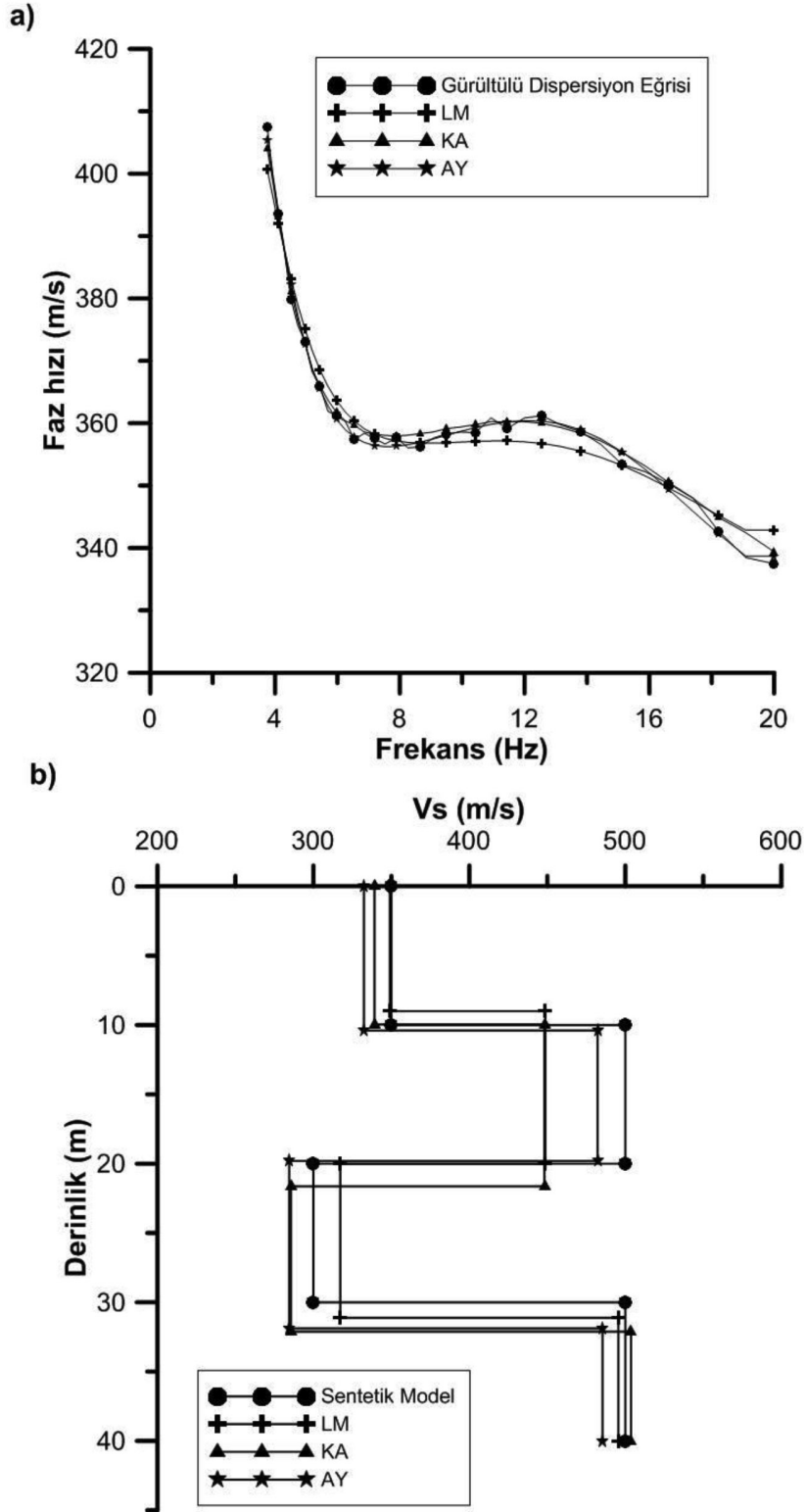
Table 2. Calculated relative errors and RMSE values from inversion results of LM Algorithm, NA and SA for noise-free dispersion curve.

Sentetik Model		LM		NA		AY		LM-Bağıl hata (%)		KA- Bağıl hata (%)		AY- Bağıl hata (%)	
h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (% hata)	Vs (% hata)	h (% hata)	Vs (% hata)	h (% hata)	Vs (% hata)
10	350	10.39	312	9.66	336	10.24	346	3.9	10.9	3.4	4.0	2.4	1.1
10	500	9.41	438	10.73	473	9.86	505	5.9	12.4	7.3	5.4	1.4	1.0
10	300	11.19	354	10.10	286	10.04	290	11.9	18.0	1.0	4.7	0.4	3.3
	500		483		481		478		3.4		3.8		4.4
RMSE(m/s)								2.68		2.14		0.5	



Şekil 6. Gürültüsüz ve % 5 gürültülü teorik dispersiyon eğrileri.

Figure 6. Noise-free and noisy (with 5 %) theoretical dispersion curves.



Şekil 7. %5 Gaussian gürültüsü eklenmiş veride KA, LM algoritmasının ve AY ile ters çözüm sonuçları a) dispersiyon eğrileri, b) bu algoritmalarından elde edilen Vs derinlik kesitleri.

Figure 7. Inversion results of NA, LM and SA in 5 % Gaussian noise data a) dispersion curves, b) Vs depth profile obtained from these algorithms.

Çizelge 3. Gürültülü dispersiyon eğrisi için LM Algoritması, KA ve AY ile ters çözüm sonucu hesaplanan bağıl hatalar ve RMSE değerleri.

Table 3. Calculated relative errors and RMSE values from inversion results of LM Algorithm, NA and SA for noisy dispersion curve.

Sentetik Model		LM		NA		AY		LM-Bağıl hata (%)		KA- Bağıl hata (%)		AY- Bağıl hata (%)	
h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (m)	Vs (m/s)	h (% hata)	Vs (% hata)	h (% hata)	Vs (% hata)	h (% hata)	Vs (% hata)
10	350	8.99	323	9.96	339	10.39	347	10.1	7.7	0.4	3.1	3.9	0.9
10	500	11.02	428	11.68	448	9.41	484	10.2	14.4	16.8	10.4	5.9	3.2
10	300	11.10	357	10.48	285	12.08	288	11.0	19.0	4.8	5.0	20.8	4.0
	500		482		503		508		3.6		0.6		1.6
RMSE(m/s)								2.77		1.40		1.04	



Şekil 8. Arazide uygulanan MASW ölçüm düzeneği.

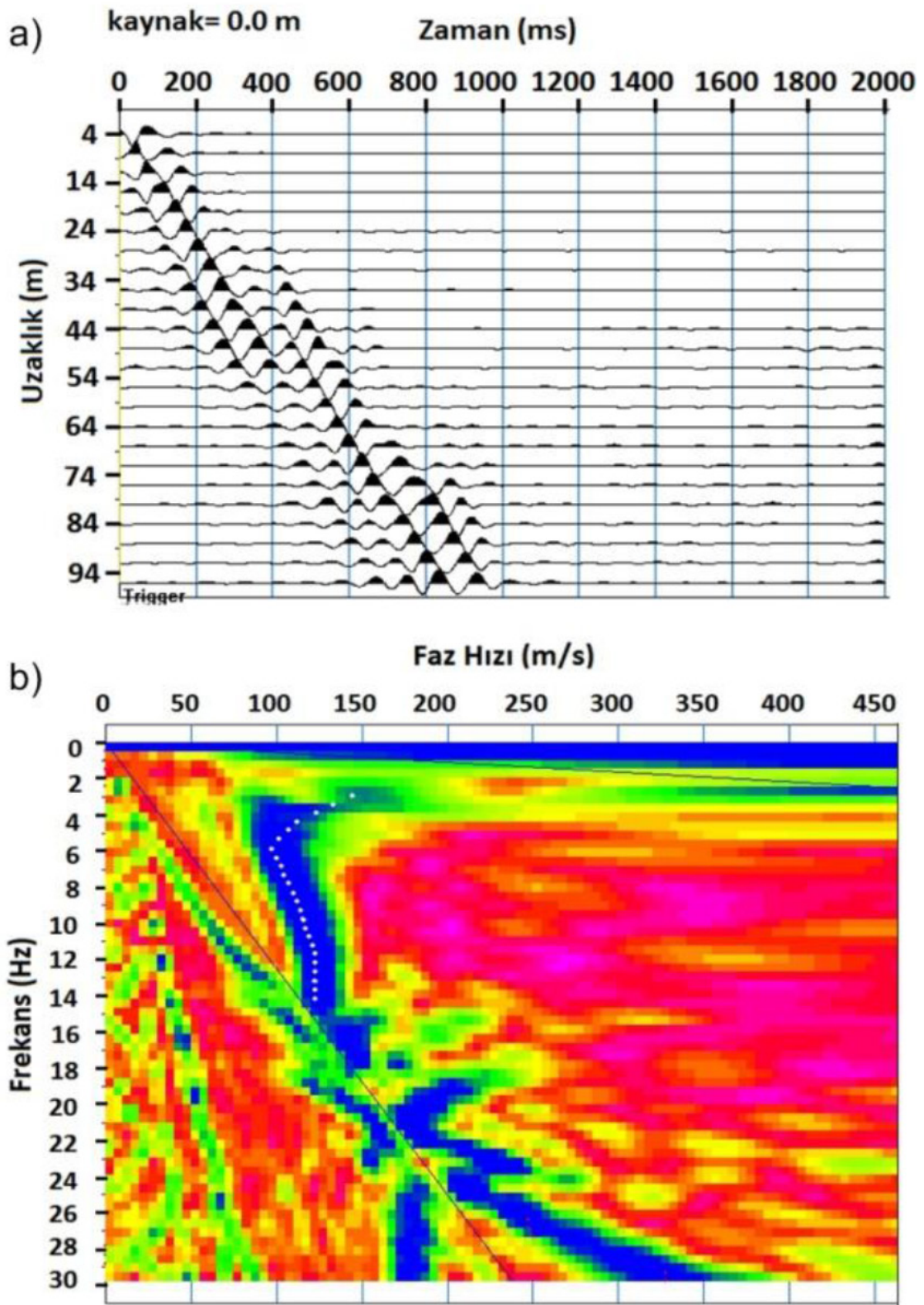
Figure 8. Applied MASW measuring setup in the field.

ile uyumlu oldukları görülmektedir (Şekil 11). Ters çözüm sonucunda hesaplanan RMSE değerleri, LM yönteminde 4.21 m/s, KA'da 3.40 m/s ve AY'de 2.35'dir. Sentetik çalışmada olduğu gibi arazi verilerinin ters çözümü sonrasında veri ayrımlılık ve parametre ayrımlılık düzeyleri incelenmiş ve sentetik çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir.

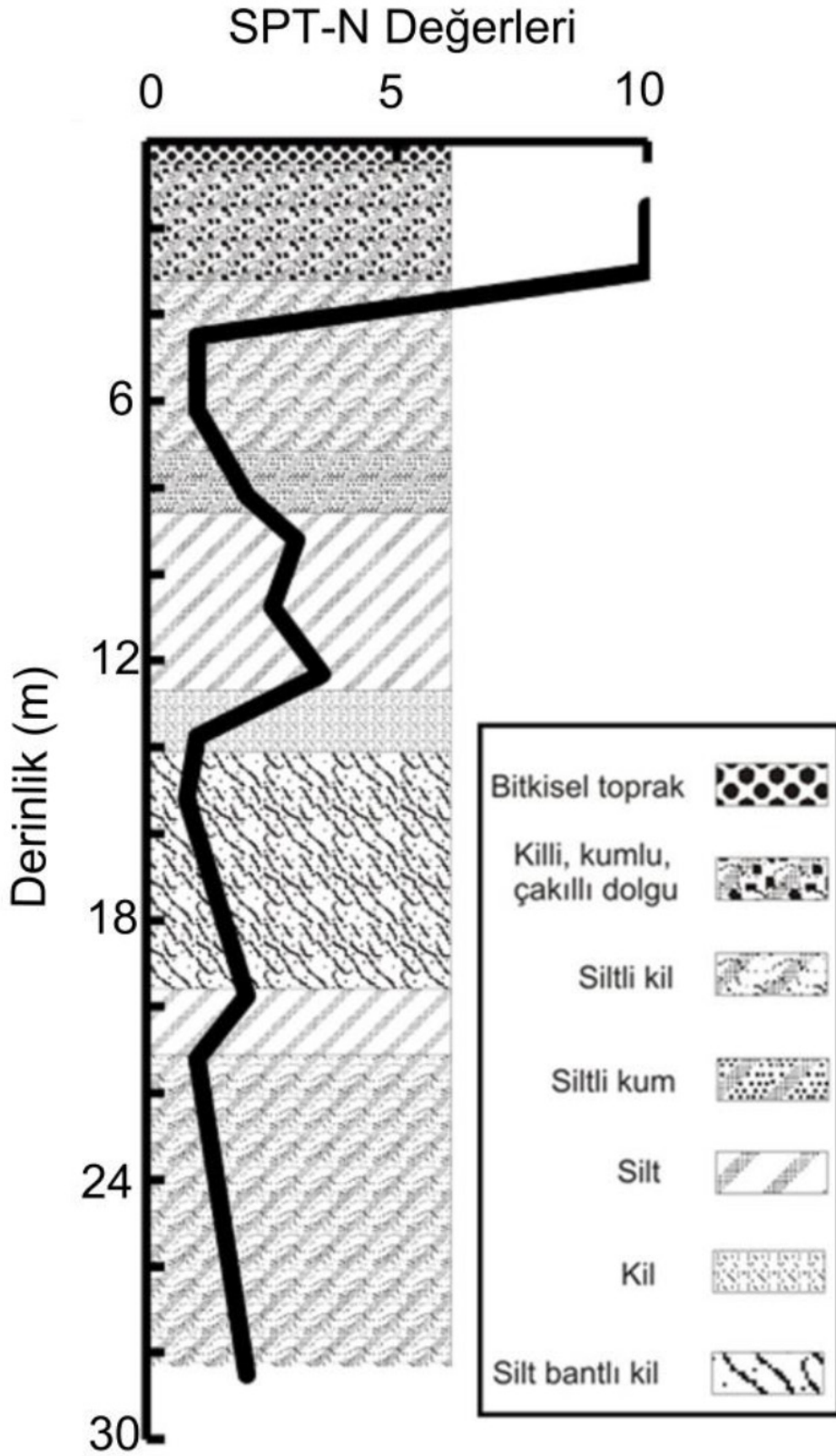
## SONUÇLAR

Bu çalışmada MASW ile elde edilen dispersiyon eğrilerinin ters çözümü için bir sıralı melez yaklaşım önerilmiştir. Önerilen AY'de Levenberg-Marquardt ve Komşuluk Algoritmaları birlikte kullanılmıştır. Ters çözümde herhangi bir başlangıç modeline gereksinim duymayan KA yerel minimumlardan kaçınmak, global minimuma yakınsamak ve LM için gerekli olan başlangıç modelini elde etmek için kullanılmıştır. Bu şekilde

LM Algoritması kullanılarak global minimuma en yakın noktada ve en kısa sürede ulaşılması hedeflenmiştir. AY ile KA yöntemindeki çok fazla yineleme sayısı ve aşırı süre gereksinimi azaltılmıştır. Bu yöntemler hem sentetik (gürültülü ve gürültüsüz) hem de arazi verilerine uygulanmıştır. Ters çözüm sonucunda tabaka kalınlıkları ve kayma dalgası hızlarının karekök ortalama hataları karşılaştırılmış ve AY'den elde edilen sonuçların doğru modele daha iyi yakınsadığı görülmüştür. Sentetik çalışmalarda (gürültülü ve gürültüsüz) AY ile elde edilen modellerden hesaplanan bağıl hatalar daha düşük değerlidir. Sonuç olarak, jeoteknik çalışmalar için önemli bir parametre olan kayma dalgası hızlarının daha doğru ve güvenilir bir şekilde elde edilebilmesi için geleneksel algoritmalar ve global yöntemlerin birlikte kolaylıkla uygulanabilirliği görülmüştür.

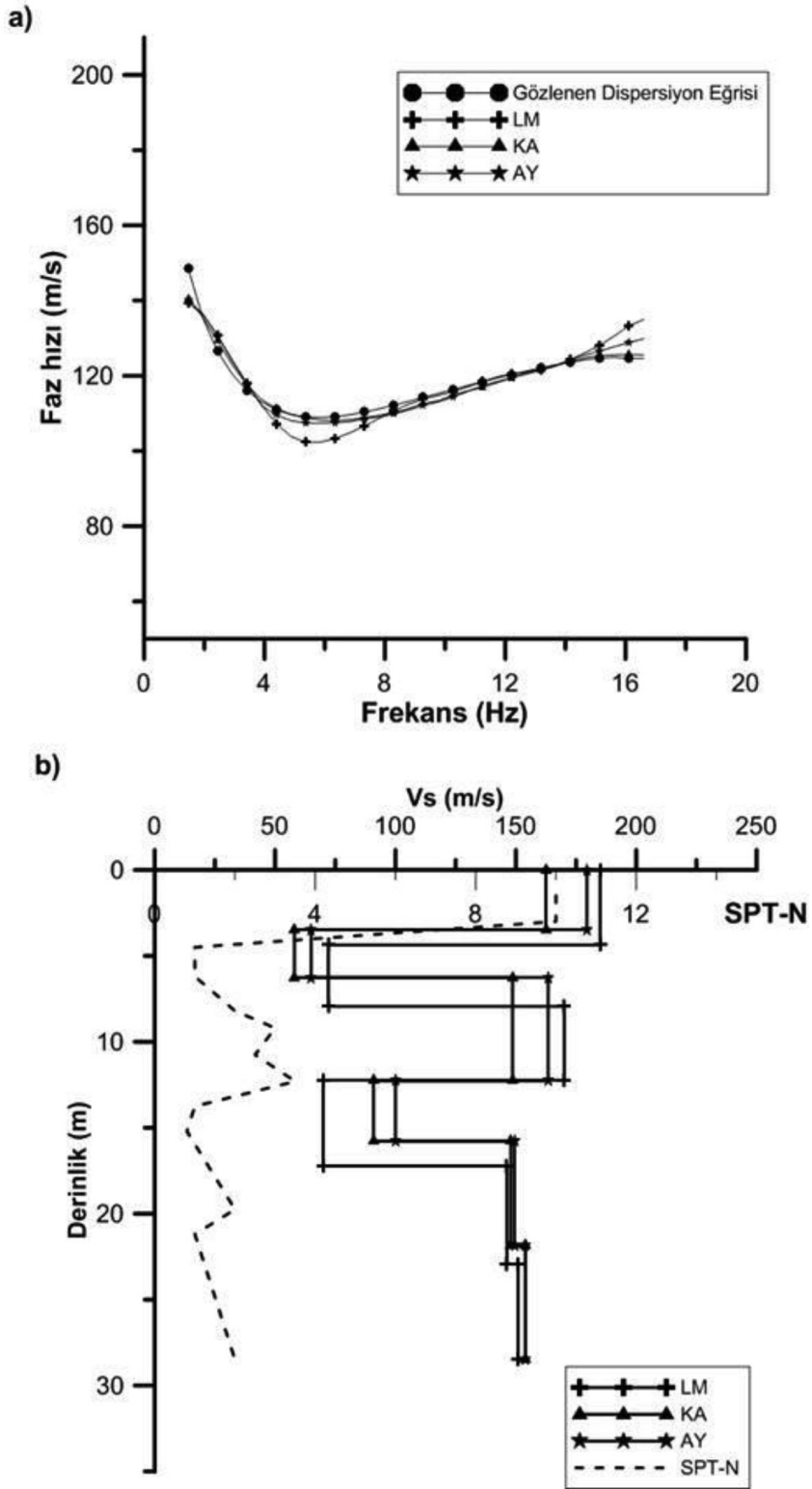


Şekil 9. Düz atış kaydı ve dispersiyon eğrisinin seçimi.  
Figure 9. Forward shot record and selecting dispersion curve.



Şekil 10. Arazideki SPT-N ölçüm sonuçları ve sondaj stratigrafi verileri.

Figure 10. SPT-N results and borehole stratigraphic data.



Şekil 11. Arazi verisinin KA, LM ve AY algoritması ile ters çözüm sonuçları a) dispersiyon eğrileri, b) bu algoritmalarla elde edilen Vs derinlik kesitleri ve SPT-N değerleri.

Figure 11. Inversion results of NA, LM and SA on field data a) dispersion curves, and b) Vs depth profile obtained from these algorithms and SPT-N values.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, makaleye yapıcı eleştirileri ile katkı sağlayan hakemler Prof. Dr. Emin CANDANSA-YAR ve Doç. Dr. Ünal DİKMEN'e, değerli yorum ve görüşlerinden yararlandıkları Doç. Dr. Gökhan GÖKTÜRKLER'e teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Başokur, A. T., Akça, I., ve Siyam, N. W. A., 2007. Hybrid genetic algorithms in view of the evolution theories with application for the electrical sounding method. *Geophysical Prospecting*, 55, 393-406.
- Başokur, A.T., 2002. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Problemlerin Ters-Çözümü. *Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları*, Ankara.
- Chunduru, R. K., Sen, M. K., ve Stoffa, P. L., 1997. Hybrid optimization methods for geophysical inversion. *Geophysics*, 62, 1196-207.
- Çaylak, Ç., Göktürkler, G., ve Sarı, C., 2011. Inversion of multi-channel surface wave data using a sequential hybrid approach. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9, 19-28.
- Dikmen, Ü., Arisoy, M.Ö., ve Akkaya, İ., 2010. Offset and linear spread geometry in the MASW method. *Journal of Geophysics and Engineering*, (Special Issue: On near Surface Geophysics for the Study and the Management of Historical Resources), 7, 211-222.
- Dindar, H., 2010. İzmir Metropolitan Alanına Yerleştirilecek Olan Kuvvetli Yer İstasyonlarının Zemin Özelliklerini Tanımlamaya Yönelik Jeofizik Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Fallat, M. R., ve Dosso, S. E., 1999. Geoacoustic inversion via local, global and hybrid algorithms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 3219-3230.
- Guo, T., ve Liu, L., 1999. Non-intrusive evaluation of submarine tunnel foundation using dynamic high-frequency surface wave prospecting. *Environmental and Engineering Geophysics Society*, Oakland, 67-74.
- Kanbur, Z., Silahtar, A., ve Özsoy, C., 2011. Sığ Sismik Yansıma, MASW ve ReMi Yöntemleri ile Sığ Yapıların İncelenmesi: Isparta Yerleşim Merkezi Kuzeyi Pliyo-Kuvaterner Çököl Yapı Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15-3, 224-232.
- Kanlı, A. I., Tildy, P., Prónay, Z., Pınar, A., ve Hermann, L., 2006.  $V_{s30}$  mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey. *Geophysical Journal International*, 165, 223-235.
- Levenberg, K., 1944. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- Lines, L.R., ve Treitel, S., 1984. A review of least squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Liu, H. P., Boore, D. M., Joyner, W. B., Oppenheimer, D. H., Warrick, R. E., Zhang, W., Hamilton, J. C., ve Brown, L. T., 2000. Comparison of phase velocities from array measurements of Rayleigh waves associated with microtremor and results calculated from borehole shear-wave velocity profiles. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 666-678.
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- McMechan, G. A., ve Yedlin, M. J., 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46, 869-874.
- Mendes, M., 2009. A hybrid fast algorithm for first arrivals tomography. *Geophysical Prospecting*, 57 803-809.



- Menke, W., 2012. Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic press.
- Pamuk, E., 2014. İzmir (Buca) bölgesinde yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen kayma dalgası hızlarının (vs) analizi ve mikrotremor uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Park, C. B., Miller, R. D., ve Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64, 800-808.
- Sambridge, M., 1999. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, 479-494.
- Wathelet, M., 2005. Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. Doktora tezi, Liege Üniversitesi, Belçika.
- Wathelet, M., Jongmans, D. ve Ohrnberger, M., 2004. Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, 2, 211-221.
- Yanık, K., 2006. Yüzey Dalgası Dispersiyon Verilerinden Sönümlü En Küçük Kareler Ters-Çözüm Yöntemi ile S-Dalga Hızlarının Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

