

KUYU İÇİ SİSMİK TOMOGRAFİ UYGULAMALARI

Seismic Tomographic Applications in Boreholes

Aybige AKINCI*, A. Güngör TAKTAK* ve Erkan AY*

ÖZET

Bu çalışmada, son yıllarda jeofizikte oldukça sık olarak kullanılan kuyu içi sismik tomografi yöntemi, oluşturulan yapay yeraltı modellerine uygulanmıştır. Oluşturulan yeraltı modellerine göre hesaplanan kuramsal zamanlardan yararlanarak, iki kuyu arasındaki ortamın hız dağılımı en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. İlk aşamada incelenecek bölge farklı sayıda küçük hücreye ayrılmış ve hücre sayısının çözüm üzerindeki etkisi incelenmiştir. En uygun ve en doğru hız modelinin ya da hız dağılımının tesbit edilmesi için değişik λ değerleri kullanılarak her hücredeki hız değişimi farklı λ değerlerine göre grafiklenmiş ve sonucun gözle ayrımlılığının daha net olmasına özen gösterilmiştir. Sonuç olarak, λ değeri büyüdükçe çözüm, en dik iniş (steepest descent) çözümüne, λ sıfıra yaklaşırken ise kısıtsız en küçük kareler çözümüne yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, gereğinden büyük λ değeri seçildiğinde zamana bağlı standart sapma değeri artmakta dolayısı ile model ayrımlılığı azalmaktadır. Sonuçta bölgeye ait en uygun hız dağılımı, σ_1 standart sapma eğrisinin dönüm noktasının başlangıcına karşılık gelen λ değerine algoritmanın verdiği yanıt olarak alınmıştır.

ABSTRACT

Although it is unpreventable to use the direct solutions in geophysics, the essential problem is to identify the model parameters represents the data. The problem is called "inverse problem" for the determination of the model from the observational data. Here the tomographic seismic method in wells, which has been intensively used in geophysics, was applied to the synthetic underground models. Different regions between two wells were modelled with this method through the investigation of velocity variations. The purpose was to investigate the area between two wells in detail. In the first step, the area will be analyzed was divided into small and different number of cells. Therefore, effect of number of cells over solution has been analyzed. Different λ values have been used to obtain the best and the most proper velocity distribution or the velocity model. Consequently, when the value of λ is increased, solution approaches to steepest descent solution. If λ is zero, solution approaches to unconstrained least squares. Additionally, if very high λ value is selected, standart deviation value gets higher and the model resolution gets lower. The most proper velocity distribution of the region can be obtained using the λ which corresponds to the first value of inflection point of the curve of standart deviation.

GİRİŞ

1970'li yılların başından bu yana jeofizikte ters problem uygulamaları giderek yaygınlaşmıştır. Özellikle son yıllarda, çeşitli jeofizik sorunların çözümünde, gözlemsel verilerden hareket ederek yer modelini elde etme yolundaki çalışmalarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Zira problemlerin çeşitliliğine karşın, bunların tümünde matematik modelin kurulması ve parametreleştirme işlemlerinden sonraki ters çözüm, benzer genelleştirilmiş bir ters çözüm kuramına dayalı olarak elde edilmektedir. Matematik modelin kurulması sonucu, ayrıntılı çözüm işlemlerinde çoğu zaman

doğrusal ya da doğrusal olmayan bir denklem takımına ulaşılmaktadır. Doğrusal problemlerde parametreler doğrudan tek adımda elde edilebilmekte, doğrusal olmayan problemlerde ise her yinelemede ölçülen ve kuramsal veri arasındaki farkı en küçük yapan parametre farkları çözülebilmektedir.

Sismik tomografi, sayısal bir grid alanındaki oldukça geniş doğrusal denklemleri çözen bir yöntemdir (Canitez 1992). Tomografi olayı, kısaca görüntüleme işleminden ibarettir. Bugüne kadar daha çok tıp bilimlerinde, özellikle beyin tomografisinin çekilmesi ve görüntülenmesinde kul-

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü 35100 Bornova, İzmir.

lanılmıştır. Burada sorun, yapının ya da cismin belirlenmesinden dolayı daha kolay çözümlenmiştir ve sadece görüntünün ayrımlılığının artırılması problemi ortaya çıkmıştır. Jeofizikteki uygulamalarda da temel olarak aynı problemler hakimdir. Tomografik hesaplamalar için son yıllarda bir çok araştırmacı tarafından uygulanmış ve halen uygulanan ve önerilen birkaç çözüm tekniği vardır. Bunlar temel olarak ışın tomografisi (ray tomography), saçılma tomografisi (diffraction tomography) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Işın tomografisi de, kendi içinde yine üç algoritmik çözüme ayrılır. Bu üç algoritmanın genel hatları Kak (1985) tarafından verilmiştir.

Eğer cismin hacmi ya da büyüklüğü, tanımlanan dalgalardan dalga boyları ile karşılaştırılıyor ise kırınma (diffraction) ve saçılma (scattering) olayları baskın bir şekil alır (Devaney A.J. 1982, 1984). Bu durumda sistem ışın denklemi yerine dalga denklemi ile ifade edilir. Eğer, enerji ile cisim arasındaki ilişki ışın denklemi ile başarılı bir şekilde tanımlanıyor ise bu durumda ışın tomografi tekniği uygulanır.

Bu zamana kadarki çalışmaların büyük bir bölümü ışın tomografisi üzerine yapılmıştır. (Dines ve Lytle 1979, McMechan 1983, Menke, 1984, Bishop ve diğ. 1985, Ivansson 1985-1986, Peterson ve diğ. 1985, Cottin ve diğ. 1980, Gustavsson ve diğ. 1986, Ramirez 1986). Ancak ışın tomografisi tekniğinin jeofizik uygulamalarda yarattığı iki sorun aşağıdaki şekilde gözlenmiştir;

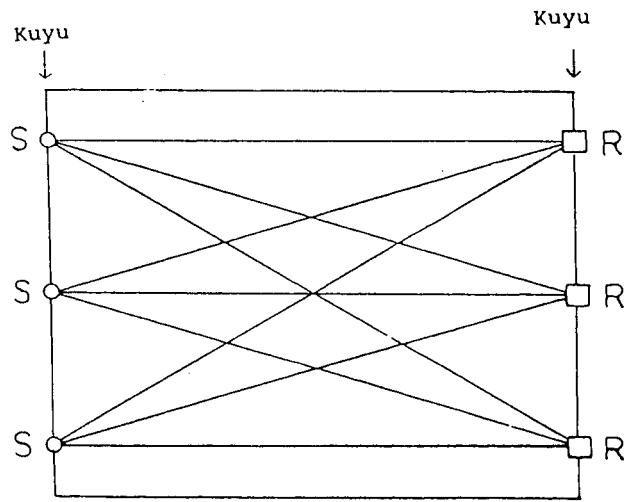
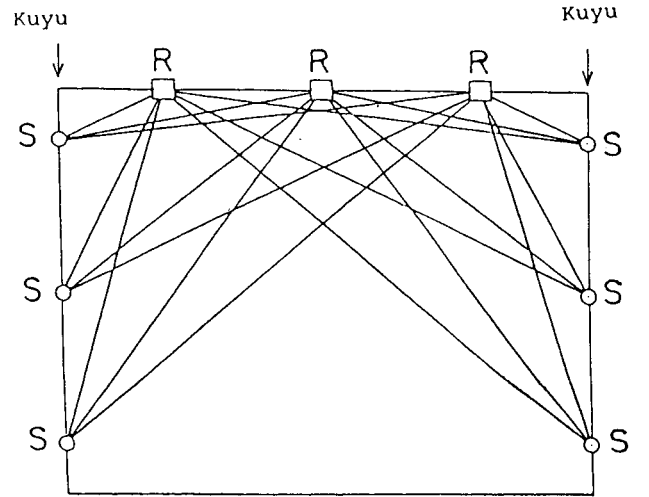
1) Kaynak alıcı arasında ilerleyen ışınların hemen hepsi cisim üzerinde ilerlemeyebilir,

2) Yeryüzündeki materyallerdeki yüksek sönümlenmenin dalga boyuna etkisi, ışın geometrisi ile ölçülemediği için ve ortamın heterojenitesi dalga boyu ile karşılaştırılmadığından saçılma ve kırınma elde edilemez.

Bundan dolayı bu problemi ortadan kaldırmaya yönelik olarak hazırlanan ve oluşturulan süzgeçlenmiş geri yayılım tomografi çözüm teknikleri yine son yıllarda jeofizik alanında kullanılmaya başlanmıştır.

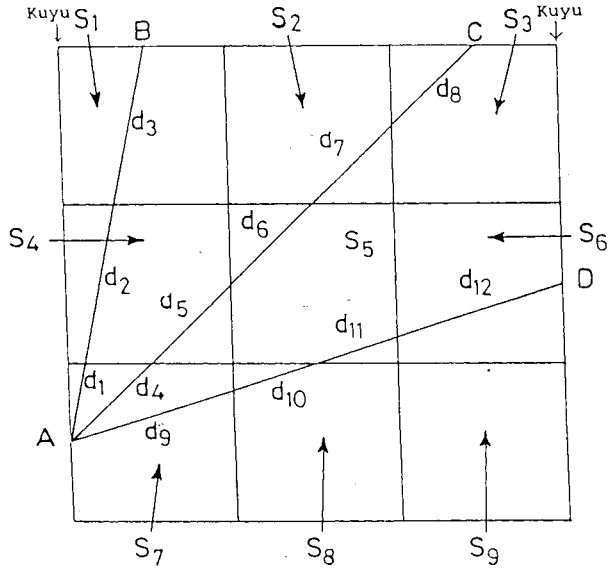
Bu çalışmada, son yıllarda jeofizikte oldukça sık olarak kullanılan kuyu içi sismik tomografi yöntemi, oluşturulan sentetik yeraltı modellerine uygulanmıştır. Yöntemde, açılan iki kuyu arasındaki bölgenin hız değişimleri incelenerek farklı yapıda olan bölgeler modellenmiştir. Çalışmanın amacı, iki kuyu arasındaki bölgenin daha ayrıntılı olarak incelenmesidir. Kullanılan kuyu içi sismik tomografi metodunun kaynak alıcı geometrisi ortamın düşey ve yatay hız değişimlerini belirleyecek şekilde olmalıdır. Yani bölgede yüksek ışın miktarı yoğunluğu elde edebilmek için kaynak-alıcı geometrisi isteğe göre ayarlanabilmekte ve böylece incelenecek bölge daha iyi görüntülenebilmektedir. Kuyu içi sismik tomografi çözümü için bir bölgede aç-

lan iki kuyudan birinin içine ya da yüzeye kaynaklar, yüzeye ya da diğer kuyunun içine ise alıcılar yerleştirilir, (Şekil-1). Işının iki kuyu arasındaki bölgede doğrusal olarak ilerlediği kabul edilerek (maksimum uzaklığın küçük olması nedeni ile) alıcılara geliş zamanı saptanır. Bunun için geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılarak, iki kuyu arasındaki bölgede oluşturulan kaynak alıcı geometrisine bağlı olarak, ışınların kaynaktan alıcıya geliş zamanları kuramsal olarak hesaplanır. Bu çalışmada ayrıca hesaplanan zamanlara belirli oranda, yapay yeraltı modeline göre, gürültü eklenerek yöntemin çözüm gücü araştırılmıştır. Daha sonra bu hesaplanan kuramsal zamanlardan yararlanarak ve böl-



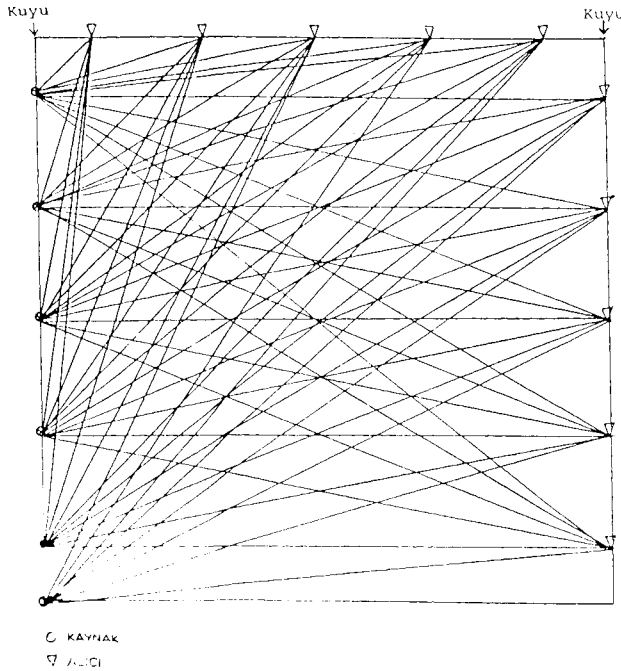
Şekil 1. Yüzey-kuyu içi ve kuyu içi sismik tomografi metodu için oluşturulan kaynak-alıcı düzeni.

Fig. 1. Shot and receiver array for cross-borehole and surface-crosshole seismic tomography method.



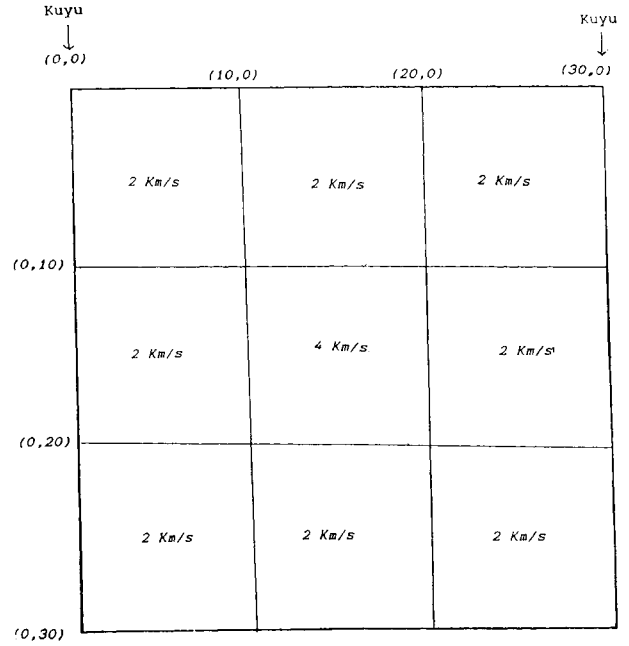
Şekil 2. Bölgenin kare yada dikdörtgenler şeklinde modellenmesi ve A-B, A-C, A-D, kaynak alıcı arasındaki düz ışın yolu, d_i her hücrede ışının izlediği yol uzunluğudur.

Fig. 2. Region to be analyzed is modeled as rectangular zones. The straightline paths A-B, A-C, A-D, between a representative transmitter and receiver location are shown, d_i is the distance travelled through the zone by the zone path.



Şekil 4. Sismik tomografi çözümü için oluşturulan, 6 kaynak ve 10 alıcıdan oluşan kaynak-alıcı düzeni.

Fig. 4. The setup for crosshole seismic tomography illustrating the positions of sources on the surface and the receivers in the borehole.



Şekil 3. 30x30 m bir alanda ($V=2000$ m/s) yer alan, $V=4000$ m/s hızına ve 10x10 m boyutlarında kare şeklindeki kuramsal yeraltı modeli (Model-I) ve I. hücre koordinatları.

Fig. 3. Synthetic underground model-I consisting of a 10x10 m square shape ($V=4000$ m/s) in a 30x30 m background ($V=2000$ m/s).

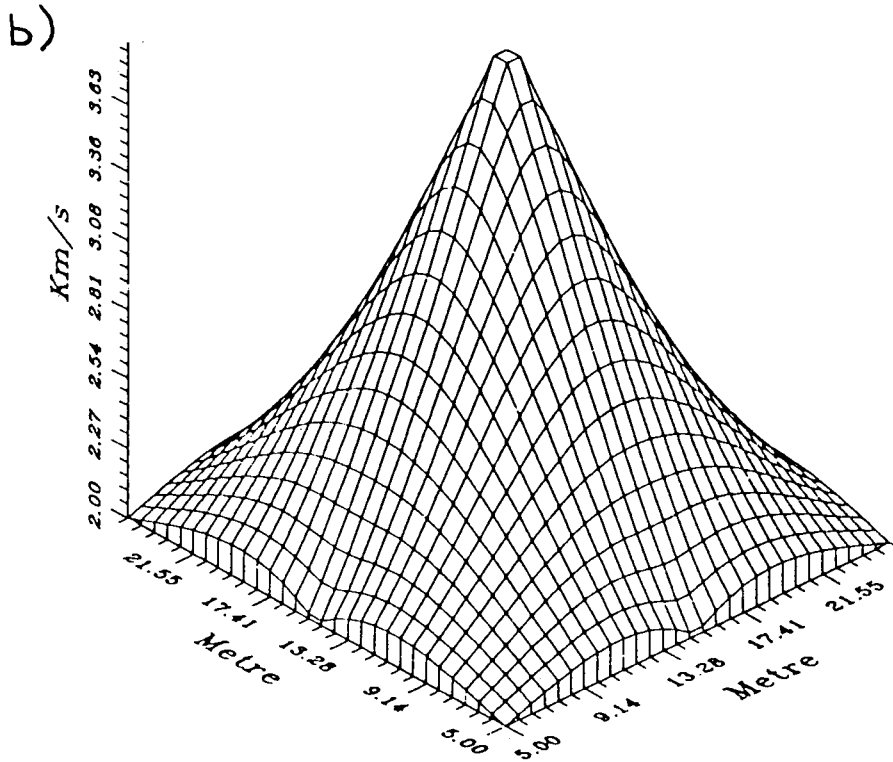
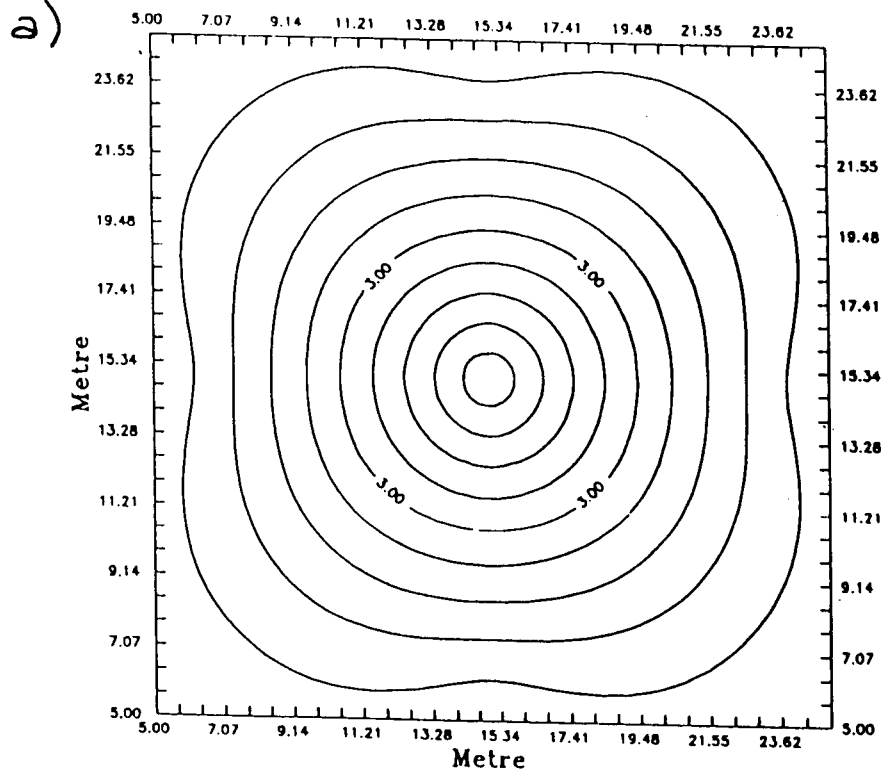
geyi farklı hücrelere ayırarak en küçük kareler yaklaşımını kullanan bir program ile iki kuyu arasında hız farklılığı olan bölgenin anomalisi ortaya çıkarılmıştır. Çalışmanın son bölümünde kullanılan algoritma gerçek arazi verilerine uygulanmış ve uygun hız dağılımının ortaya çıkartılması için değişik λ değerleri kullanılarak sonuç irdelenmiştir. Böylece kuyu içi sismik tomografi çözümü, kaynak-alıcı arasında ilerleyen ışınları kullanarak bölgedeki hız dağılımlarını diğer bir deyişle hız anomalilerini ortaya çıkartmak için kullanılmaktadır. Ayrıca bölgenin aşağıdaki özelliklerde olması ile daha iyi ve güvenilir bir çözüme ulaşmamız mümkün olacaktır. Civar ortam ile anomali arasında fark edilebilir bir hız kontrastı olmalı, bölgede yeterli bir ışın yoğunluk miktarı olmalı, çözümün güvenilirliğini arttırmak için başlangıç modeli çok iyi seçilmelidir.

2. SİSMİK TOMOGRAFİDE TEMEL DENKLEMLER

Bilindiği gibi kaynaktan alıcıya ilerleyen bir sismik sinyalin alıcıya geliş zamanı,

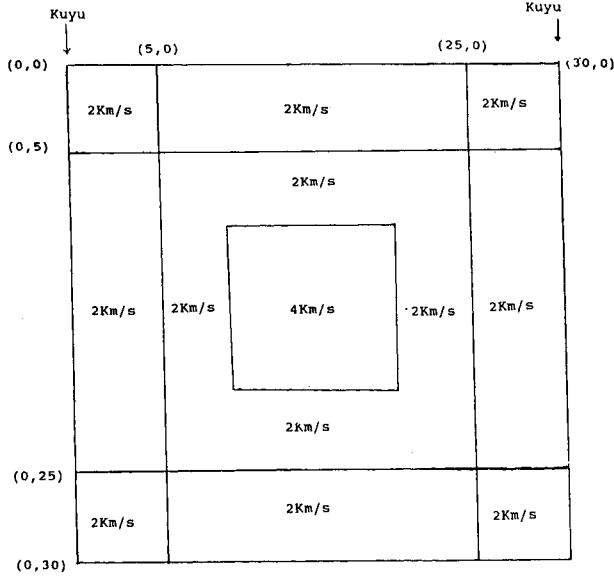
$$t_i = \int ds/V \quad (1)$$

Akıncı, Taktak ve Ay



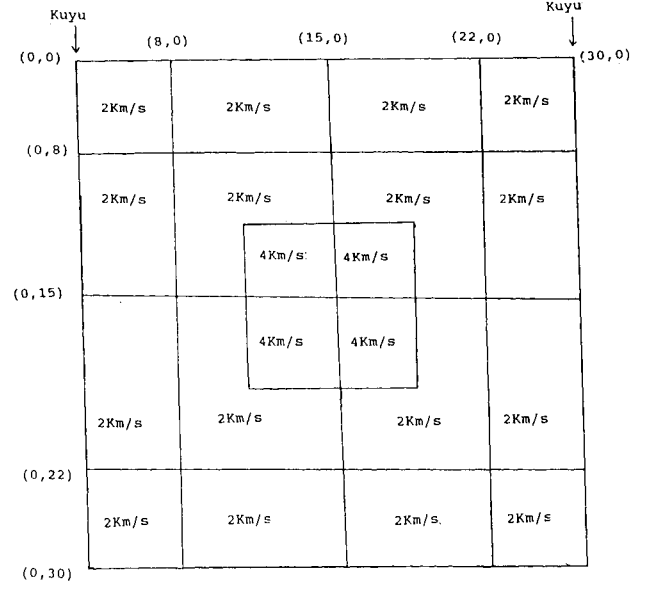
Şekil 5. Model-I'in ve I. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur eğrisi(a) yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü. (b)

Fig. 5. Velocity image obtained using the model-I and coordinates of first cell. (a), three dimensional image depending on velocity. (b)



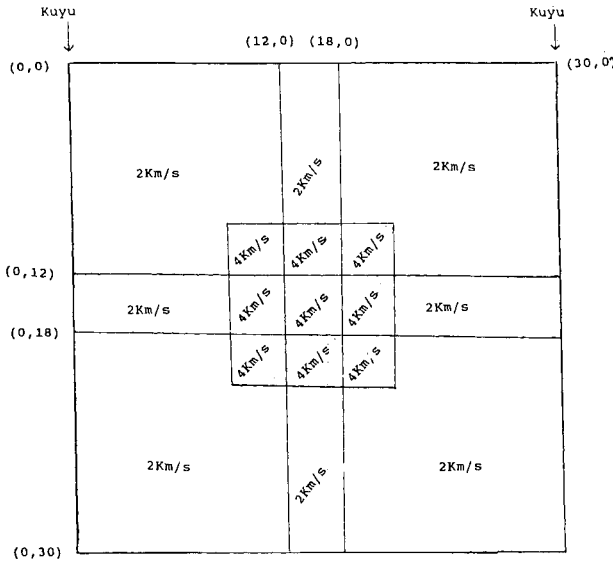
Şekil 6. Model-I'deki yapıyı ortaya çıkartmak için kullanılan 9 hücrenin koordinatları (II. hücre koordinatları)

Fig. 6. The coordinates of 9 cells (coordinates of second cell) to obtain an image of Model-I.



Şekil 8. Model-I'deki yapıyı ortaya çıkartmak için kullanılan 16 hücrenin koordinatları (IV: hücre koordinatları).

Fig. 8. The coordinates of 16 cells (coordinates of third cell) to obtain an image of Model-I.



Şekil 7. Model-I'deki yapıyı ortaya çıkartmak için kullanılan 9 hücrenin koordinatları (III: hücre koordinatları).

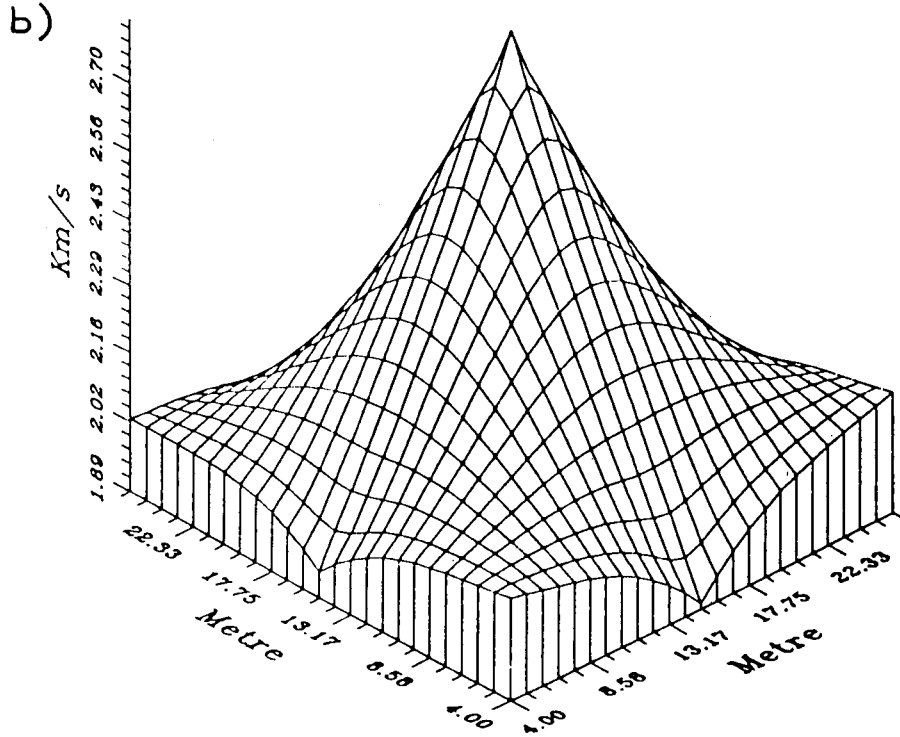
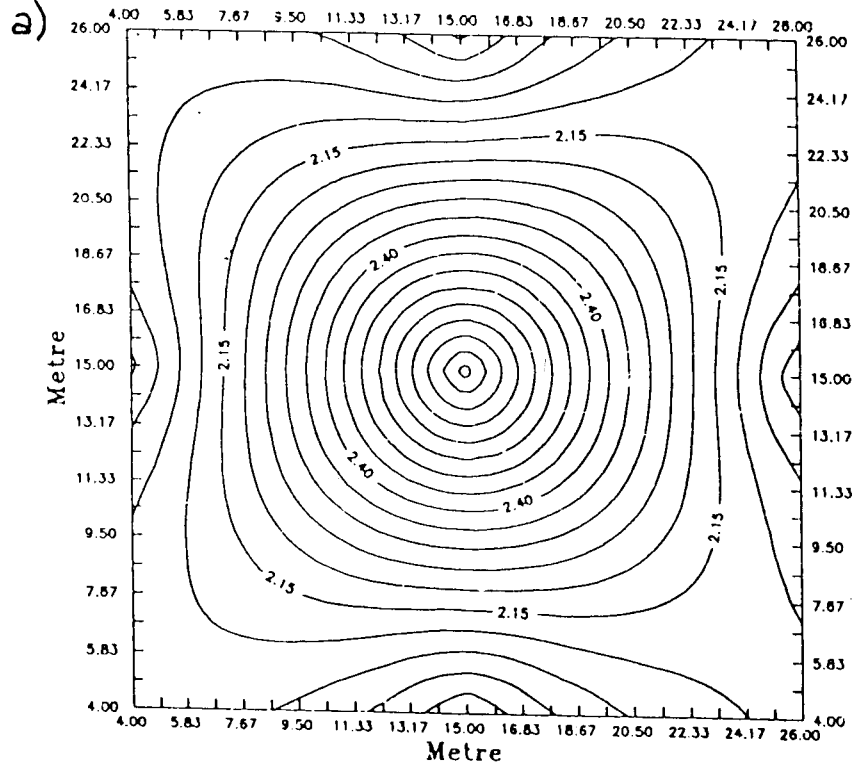
Fig. 7. The coordinates of 9 cells (coordinates of third cell) to obtain an image of Model-I.

tümlevi ile verilir. Model parametreleştirmesine bağlı olarak, değişik uygulamaları olan ters çözüm tekniğinden hareket ederek, önce iki kuyu arasındaki bölgenin ($k=1, 2, 3, \dots, n$) tane küçük hücreye ayrıldığını düşünelim, (Bois 1971). Kaynak-alıcı arasında ilerleyen ışınların geçtikleri hücrelerdeki uzunlukları ise $d_{i,k}$ olsun. Her bir k hücresi, hızın tersi olan $I_k = (1/V_k)$ yavaşlık (slowness) parametresi ile tanımlanır ise, iki kuyu arasındaki bölgeden geçen bir ışının kaynak-alıcı arasındaki seyahat zamanı,

$$t_i = \sum_{k=1}^n I_k d_{i,k} \quad i=1,2,3,\dots,N \quad (2)$$

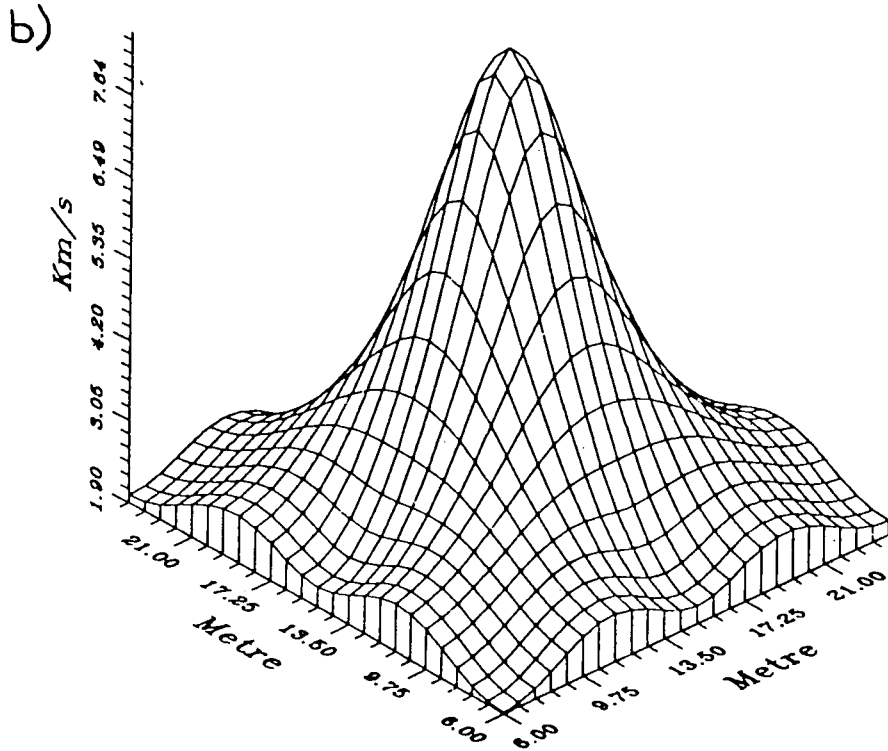
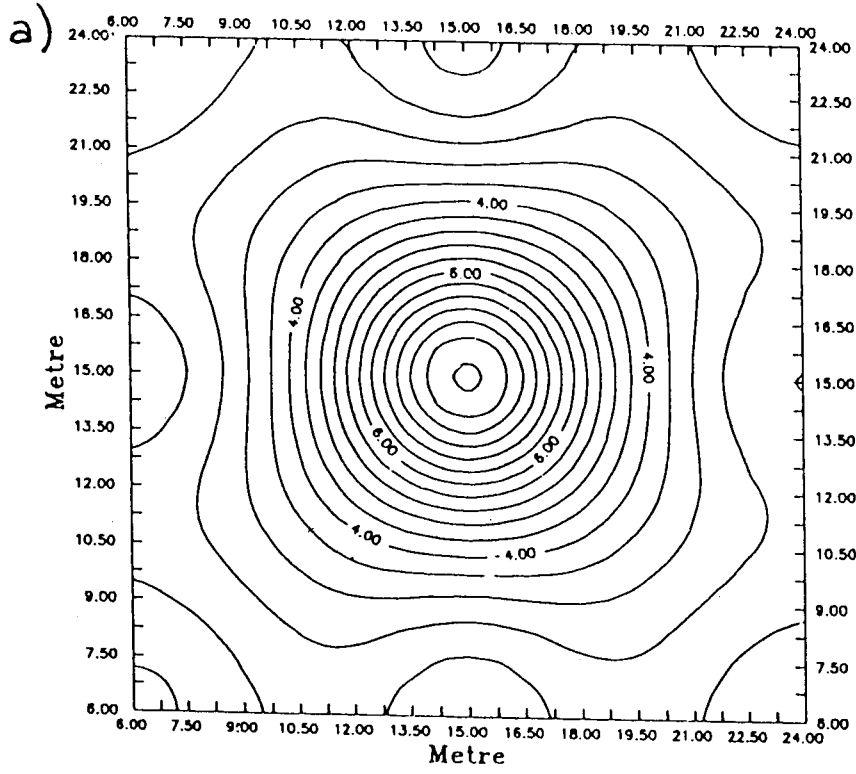
ile verilebilir. Böylece, t_i değerleri hücrelerdeki hız değerlerine göre elde edilmiş olur (Şekil 2). Basit bir şekilde temel şekil değiştirildiğinde, her bir hücrenin hız ifadesi ya da yavaşlık değerlerine ΔV_k kadar bir miktar eklendiğinde, t_i değerleri değişecektir. Bu değişim bir yönden ışın doğrultusunun değişimine, diğer yönden alınan hız değişimine neden olur. Buradaki birinci madde alınan yolun kısa olması nedeni ile ihmal edilebilir. Hesaplanan t_i zamanı ile ölçülen kayıtlardan elde edilen t_i' gözlenen zaman arasındaki farkın ($\Delta t = t_i' - t_i$) enküçük yapılması ile ΔI_k değişimleri

$$\sum_{i=1}^N d_{i,k} \Delta I_k = (t_i' - t_i) \quad (3)$$



Şekil 9. Model-I'in ve II. hücre koordinatlarının sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü (b).

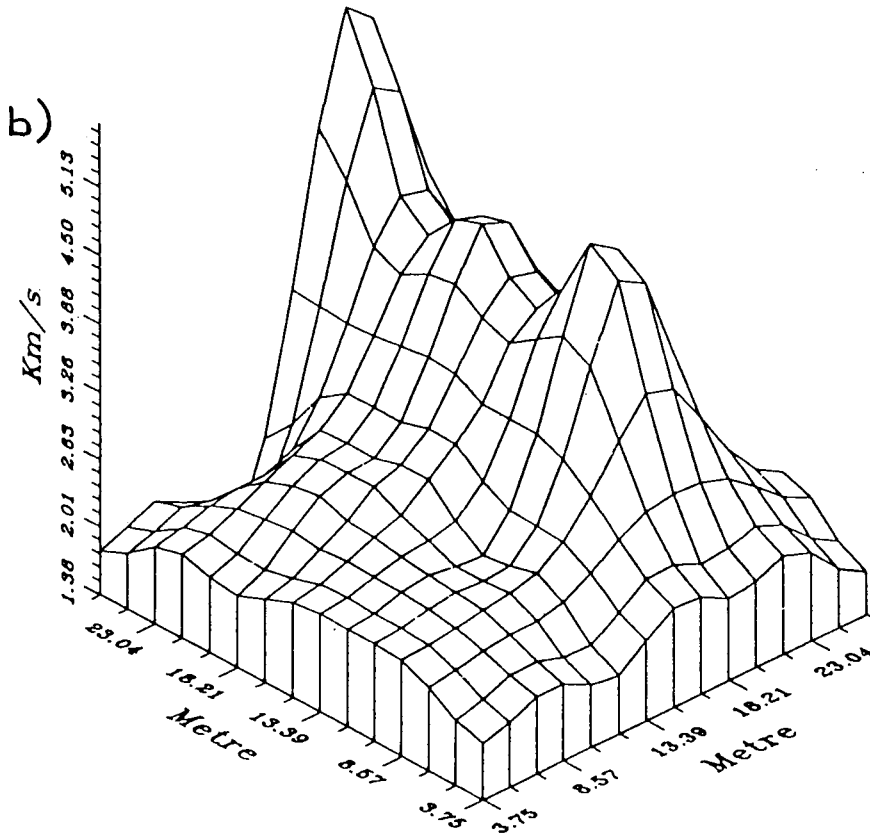
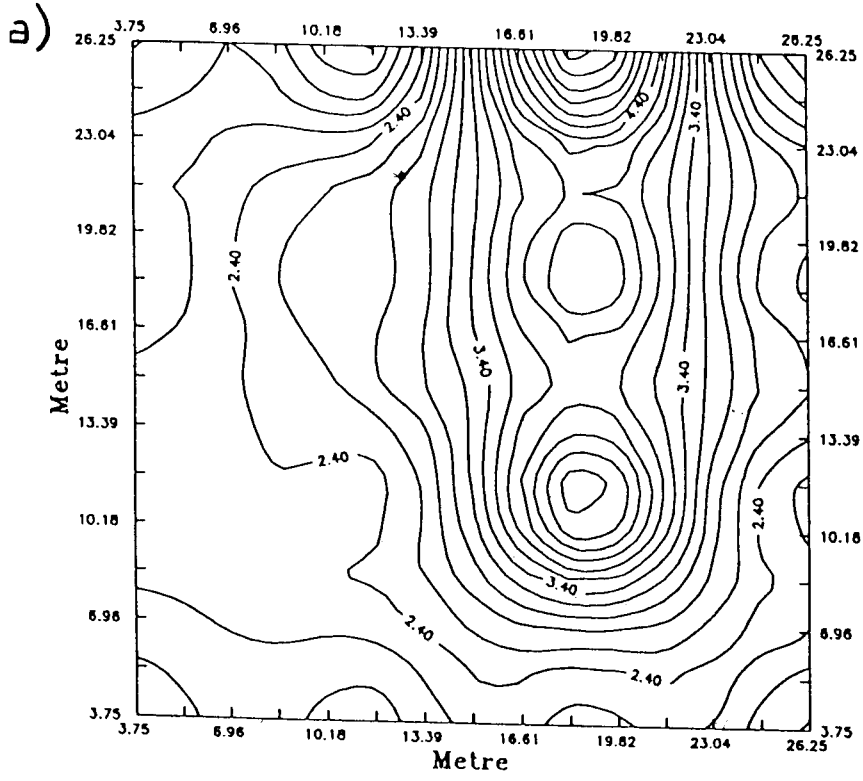
Fig. 9. Velocity image obtained using the model-I and coordinates of second cell. (a), three dimensional image of Figure-9a which depends on velocity (b).



Şekil 10. Model-I'in ve III. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü (b).

Fig. 10. Velocity image obtained using the Model-I and coordinates of third cell (a), three dimensional image depending on velocity (b).

Akıncı, Taktak ve Ay



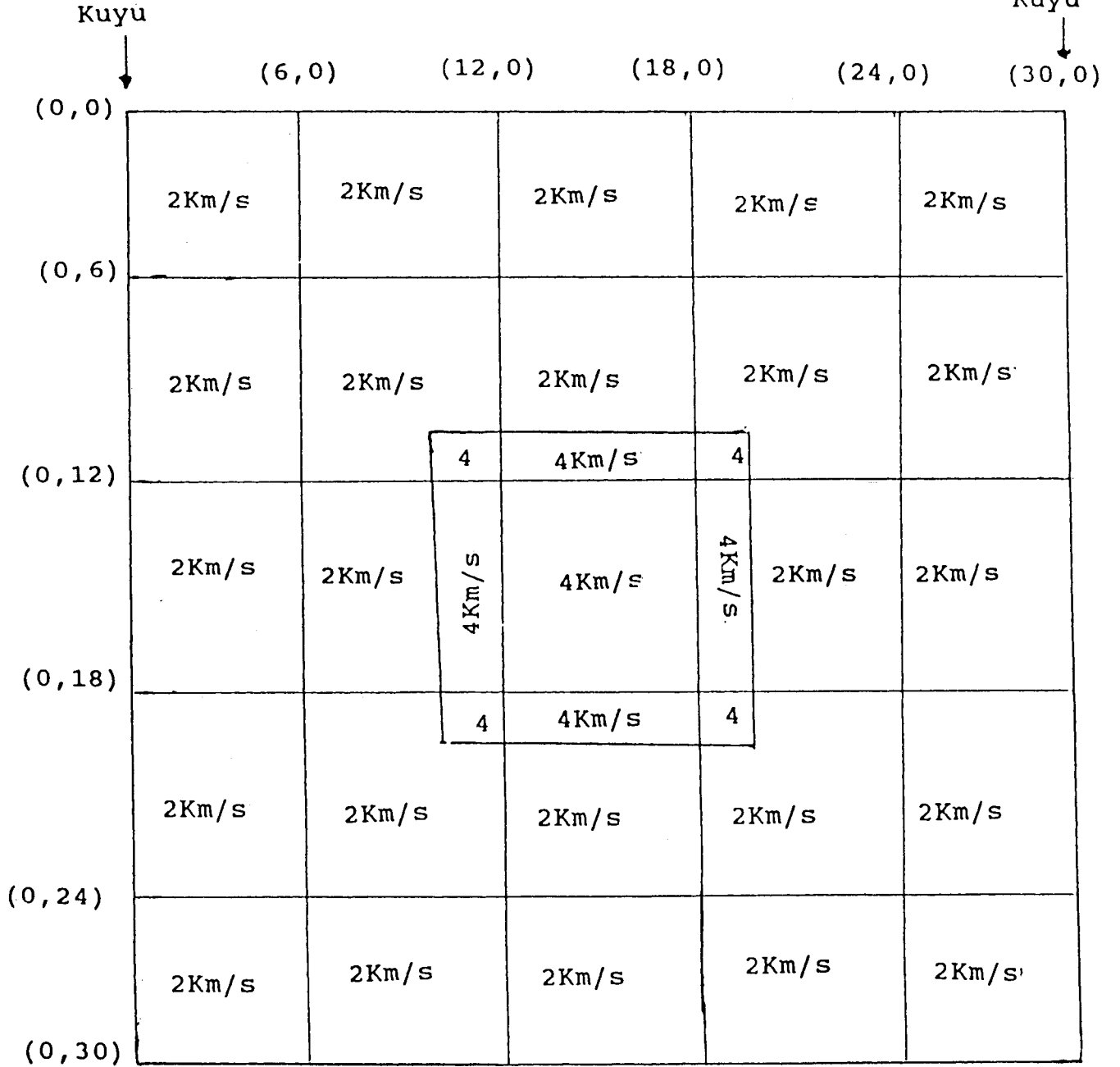
Şekil 11. Model-I'in ve IV. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü (b).

Fig. 11. Velocity image obtained using the Model-I and coordinates of fourth cell (a), three dimensional image depending on velocity (b).

Kuyu İçi Sismik Tomografi Uygulamaları

23

Kuyu



Şekil 12. Modal-I'deki yapıyı ortaya çıkartmak için kullanılan 25 hücrenin koordinatları, (V. hücre koordinatları).

Fig. 12. The coordinate of 25 cells to obtain an image of Model-I

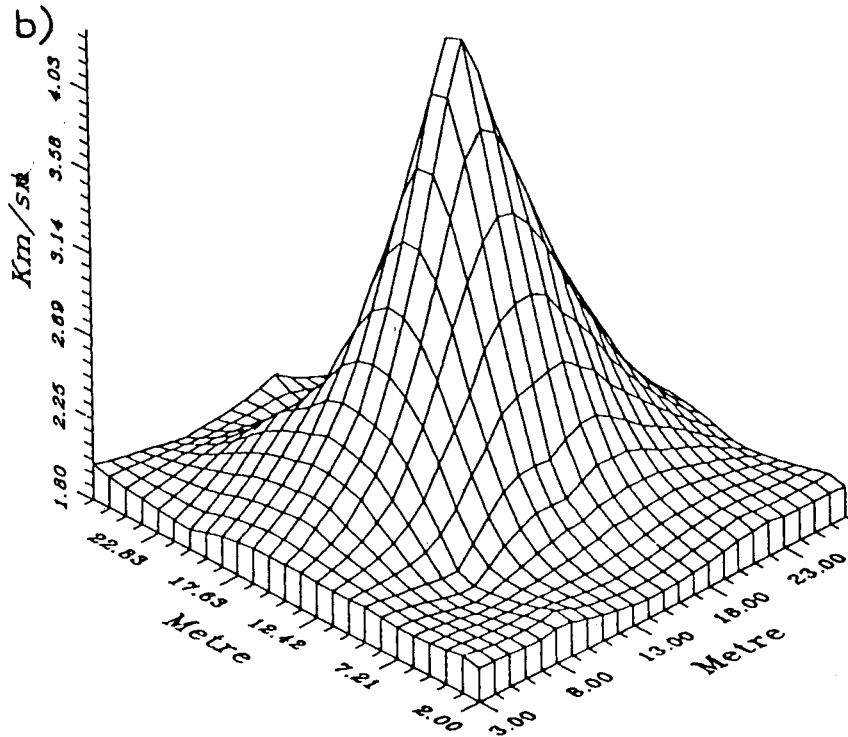
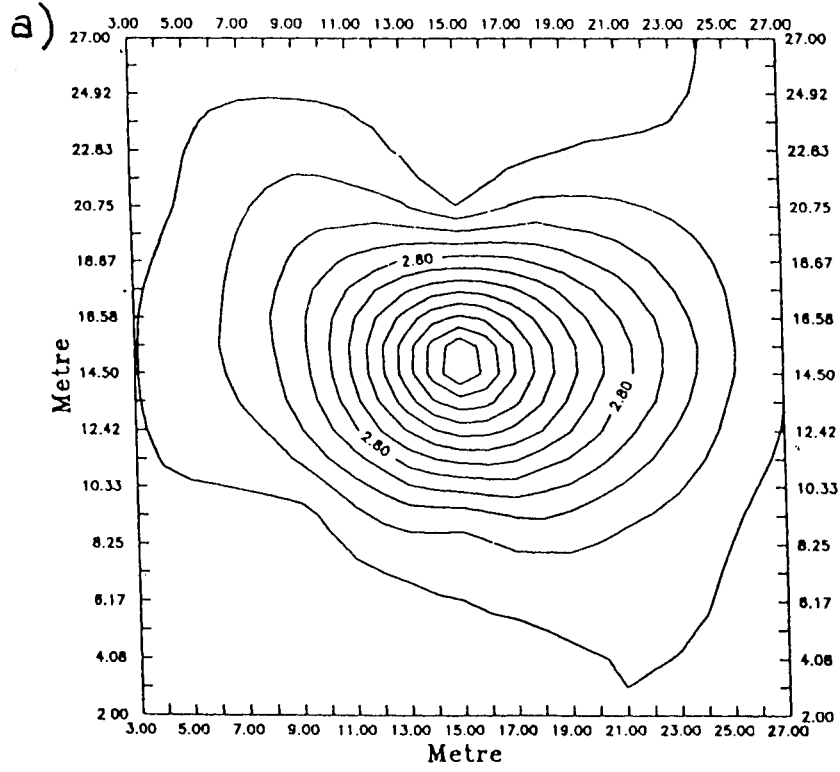
bağıntısından elde edilir. Bu denklem her ışın için;

$$\sum_{k=1}^n d_{i,k} \Delta I_k = \Delta t_i \quad (4)$$

şeklinde doğrusal bir sistem oluşturur. Buradaki N denklem ya da ışın sayısı, n bilinmeyen ya da her hücredeki hız değerlerinin sayısıdır. Biraz önce oluşturulan doğrusal sistem

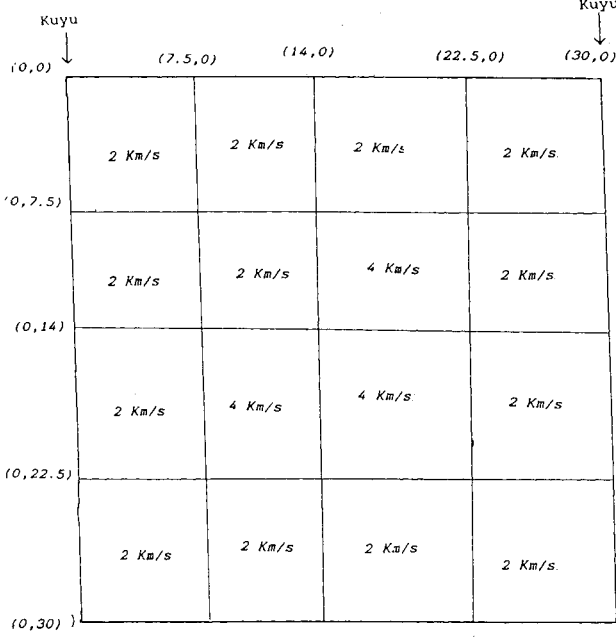
doğrudan doğruya çözülemez. Çünkü sistemin ($N > n$) aşırı tanımlı, ($n > N$) eksik tanımlı, ya da ($N = n$) tam tanımlı durumları söz konusudur. Doğrusal ve doğrusallaştırılmış bir çözüme giderken hesaplama sistemini oluşturmak için birbirinden çok farklı ΔV değerlerini almak sakıncalıdır, çözüm için bitişik hücre hız değerlerinin birbirine yakın olması ve değişimlerinin bir trend sunması gerekir.

Birbirine bitişik iki hücrenin yatay veya düşey olarak aynı hizada olduğunu farz ederek ve temel denklemlere



Şekil 13. Model-I'in ve V. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü (b).

Fig. 13. Velocity image obtained using the Model-I and coordinates of fifth cell (a), three dimensional model image depending on velocity (b).



Şekil 14. 30x30 m bir alanda ($V= 2000$ m/s) yer alan, $V= 4000$ m/s hızı ve ters L şeklinde bir yapıya sahip olan teorik yeraltı modeli (Model-II) ve VI. hücre koordinatları.

Fig. 14. Synthetic underground Model-II consisting of inverse L shape ($V= 4000$ m/s) in a 30x30 m background ($V= 2000$ m/s).

bağlı olarak, farkları en küçük yapacak en küçük kareler yaklaşımının kullanılması ile,

$$S = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^n (d_{i,k} \Delta I_k - \Delta t_i)^2 + \lambda (\Delta I_k - I_m)^2 \right) \quad (5)$$

elde edilir. Buradaki I_m , incelenen bölge için verilen ortalama bir yavaşlık değeridir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi λ , sonucu etkileyen önemli bir parametredir. $\lambda= 0$ alındığında esas sistem tam olarak çözülecek ve tüm ΔI 'ler kısıtlamalardan uzak serbest bir şekilde elde edilecektir. Buna karşın eğer λ çok büyük ise, bizi çözüme götürecek ΔI 'ler tamamen kısıtlanırlar ve diğer bir deyişle hepsi kendi arasında eşit değer alırlar. Bu iki uç arasında λ 'nın en uygun değerinin seçilmesi gerekir. Ancak, bu değer herhangi bir şekilde keyfi olarak seçilmemelidir. Hesaplama hataları gözönüne alınarak analitik bir şekilde saptanmalıdır. (5) bağıntısındaki S değerini en küçük yapmak için, çeşitli ΔI değerlerine göre türev alınır ve sıfıra eşitlenir.

$$1/2(\partial S/\partial \Delta I_k) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^n (d_{i,k} \Delta I_k - \Delta t_i) d_{i,k} + \lambda \sum_{k=1}^n (\Delta I_k - I_m) \right) = 0 \quad (6)$$

sonuç olarak;

$$\sum_{i=1}^N d_{i,k} \left(\sum_{k=1}^n d_{i,k} \Delta I_k \right) + \lambda \sum_{k=1}^n (\Delta I_k - I_m) = \sum_{i=1}^N d_{i,k} \Delta t_i \quad (7)$$

elde edilir. Bu eşitliğin dizeysel yazılımı ve aşağıdaki simgelerin kullanılması matematiksel gösterimi basitleştirir,

$$A = (d_{i,k}); \quad \Delta I = (\Delta I_k); \quad \Delta t = (\Delta t_i) \quad (8)$$

$$(N, n) \quad (n, 1) \quad (N, 1)$$

(4) eşitliği,

$$A \Delta I = \Delta t \quad (9)$$

şeklini alır. Bu halde (7) denklemindeki sistem düzenlenerek

$$(A^T A + \lambda \Omega) L = A^T T + \lambda I_m \quad (10)$$

şeklinde verilebilir. Buradaki Ω birim matris, L yavaşlık matrisidir. λ parametresinin fonksiyonu olarak çözüm,

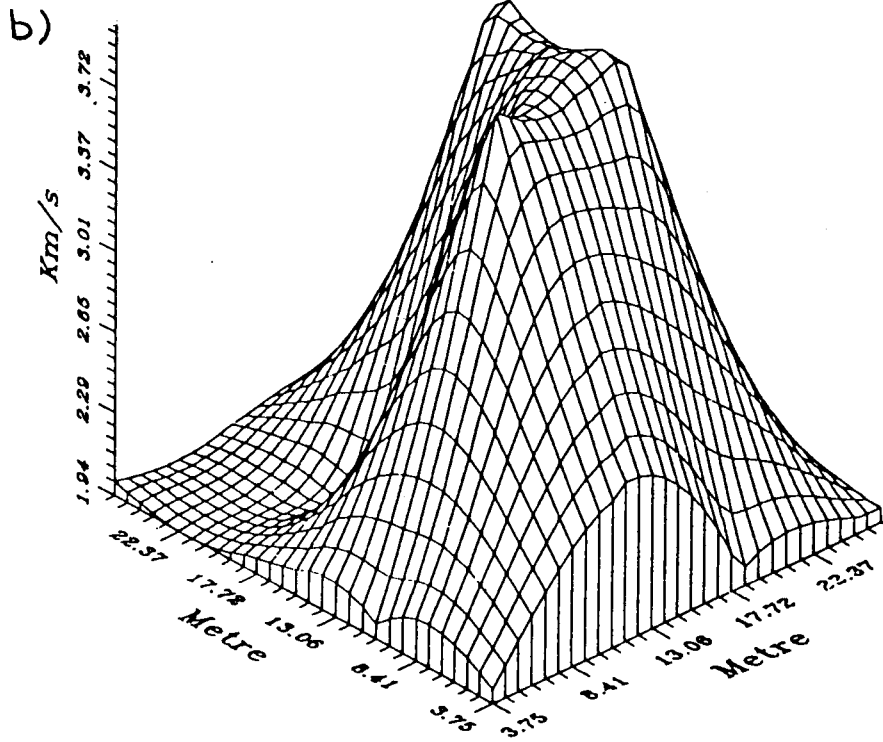
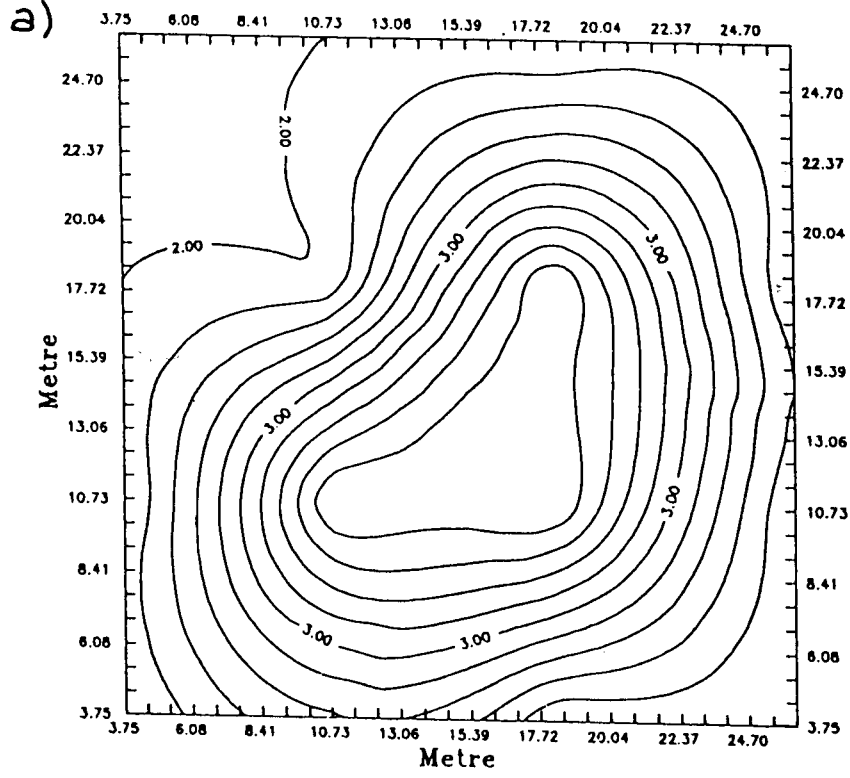
$$L(\lambda) = (A^T A + \lambda \Omega)^{-1} A^T T \quad (11)$$

şeklinde elde edilir.

UYGULAMALAR VE SONUÇLARI

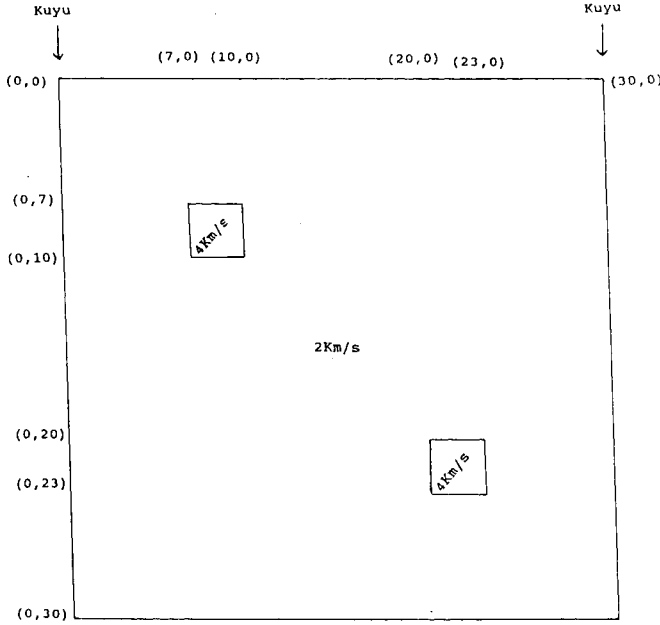
Çalışmanın ilk aşamasında kuyu içi sismik tomografi yönteminin uygulanacağı iki kuyu arasındaki bölge, çeşitli yapay yeraltı modelleri ile tanımlanmıştır. Oluşturulan bu modellerden birincisi (Model-I), Şekil-3'de görüldüğü gibi 10x10 m boyutlarında kare şeklinde bir yapıya sahiptir. Yarının hızı 4000 m/s, civar bölgenin hızı ise 2000 m/s olacak şekilde kendi içinde oldukça homojen ve iki bölge arasındaki hız kontrastı birbirinden oldukça farklı olarak verilmiştir. Bölgede oluşturulan kaynak-alıcı geometrisi bölgeyi en iyi şekilde tanımlayacağı düşünülen bir geometride düzenlenerek Şekil-4'de verildiği gibi; 6 kaynak, 10 alıcı kullanarak bölgenin taranması işlemi toplam 60 ışın elde edilerek yapılmıştır. Kuramsal modelde, iki kuyu arası ve kuyuların derinliği 30 m olarak alınmıştır.

İncelenecek bölge önce kullanılan algoritmaya bağlı olarak değişik sayıda küçük hücrelere ayrılır. Bu bölgedeki her hücre, sabit bir hız ifadesi ile tanımlanmıştır. Kaynak-alıcı arasındaki bölgede bulunan kuramsal yeraltı modeline bağlı olarak kaynak-alıcı arasında ilerleyen ışının alıcıya varış zamanı, ışının düz ilerlediği kabul edilerek hesaplanır. Bu hesaplama ışının taradığı her hücre için yapılır ve kaynak-alıcı arasındaki ışının aldığı toplam yolun tersi, zamana bölünerek ortalama yavaşlık (slowness) değerleri hesaplanır. Çalışmanın ilk bölümünde kuramsal olarak hesaplanan zamanlar, sanki arazide ölçülmüş gerçek zaman



Şekil 15. Model-II'in VI. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), görüntülenmiş yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünüm (b).

Fig. 15. Velocity image obtained using the model-I and coordinates of sixth cell (a), three dimensional image depending on velocity (b).



Şekil 16. 30x30 m bir alanda ($V=2000$ m/s) yer alan, $V=4000$ m/s hıza ve 3x3 m boyutunda iki küçük kare şeklindeki kuramsal yeraltı modeli (Model-III) ve VII. hücre koordinatları.

Fig. 16. Synthetic underground model-III consisting of two small 3x3 m square shapes ($V=4000$ m/s) in a 30x30 m background ($V=2000$ m/s).

değerleri gibi kabul edilerek geliştirilen bir bilgisayar programında girdi verisi olarak işlenmiştir. Böylece programın ve algoritmanın çalışması ve çözüm gücünün irdelenmesi amaçlanmıştır. Programda kaynak-alıcı koordinatları belirlendiği gibi hücre koordinatları da istenen hücre sayısına göre otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Böylece bölgede ilerleyen ışınların kontrol edilmesi daha da kolay olmaktadır. Yukarıda anlatılan çalışma sistemine bağlı olarak, (11) denklemindeki $L(\lambda)$ 'nin çözümü, artık bölgenin değişik sayılarda küçük hücrelere bölünmesi ve A uzaklık matrislerinin oluşturulmasından ibarettir. Sonuçta elde edilebilecek parametre yavaşlık değeri yani bunun tersi olan hızın hesaplanması ile bölgenin hız dağılımı ortaya çıkartılacaktır.

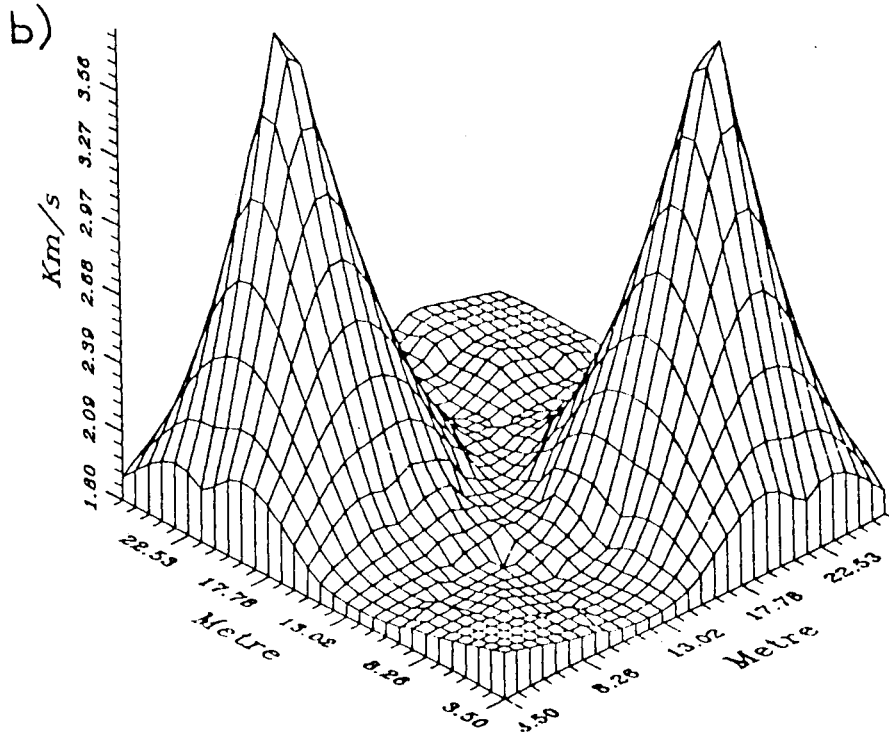
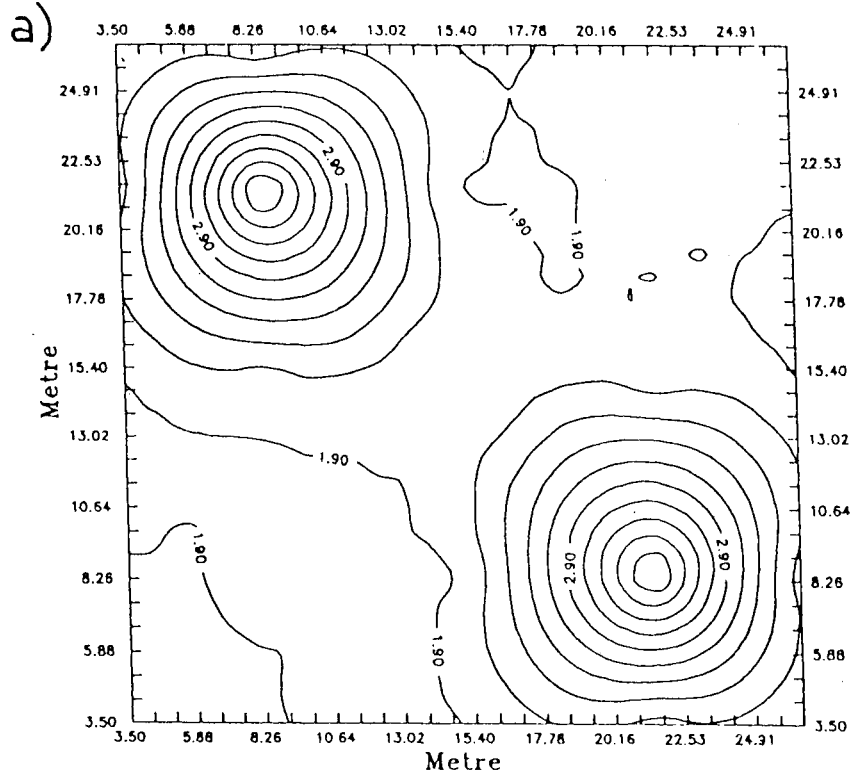
I. Model için hesaplanan hız dağılımları farklı hücre sayısı ve farklı hücre koordinatları için iki ve üç boyutlu olmak üzere Şekil-5a, b; 9a, b; 10a, b; ve Şekil 11a, b'de verilmiştir. Şekil-3'deki hücre koordinatları ve Model-I kullanılarak 9 hücre için çözüm Şekil-5a, b'de verilmiştir. Buradaki hücre koordinatları yapı sınırları ile çakışmakta ve tam bir hücre içinde tanımlanmakta olduğu için sonuç tam olarak elde edilmiştir. Ancak Şekil-6-7 ve 8'deki hücre koordinatları kullanıldığında yapı sınırları ile hücre sınırının tam olarak çakışmadığı ve sonuçta bölgedeki hız dağılımında ve hız değerlerinde bazı saçılmalar gözlenmiştir.

Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlara bağlı olarak sırası ile Şekil 9a, b; Şekil 10a, b ve Şekil 11'de hız kontur eğrileri ve hız eş yükselti eğrileri çizilerek sonucun göz ile daha iyi ayırt edilmesi amaçlanmıştır. Eğrilerden de görüldüğü gibi kontur eğrilerinin yoğunlaştığı bölge seçilen kuramsal modelde hızın arttığı bölgeyi açık bir şekilde göstermektedir. Daha sonra aynı yapı modeli kullanılmış ve hücre sayısı 25'e yükseltilmiştir, (Şekil 12). Hücre sayısı artırıldıktan sonra elde edilen hız dağılımının daha iyi olduğu sonucu ortaya çıkartılmıştır, (Şekil 13a, b).

İkinci model olarak ters L şeklinde bir yapı modeli, kullanılmıştır, (Şekil 14). Bu modelde de yapının hızı 4000 m/s, civar ortamın hızı ise 2000 m/s olarak alınmıştır. Bu model için oluşturulan kaynak-alıcı geometrisi yine birinci modelin aynısıdır. Bölge 16 hücreye bölünmüş, hücre sınırları yapı sınırları ile tam olarak çakıştırılmış ve teorik modelin aynısı elde edilmiştir, (Şekil 15a, b).

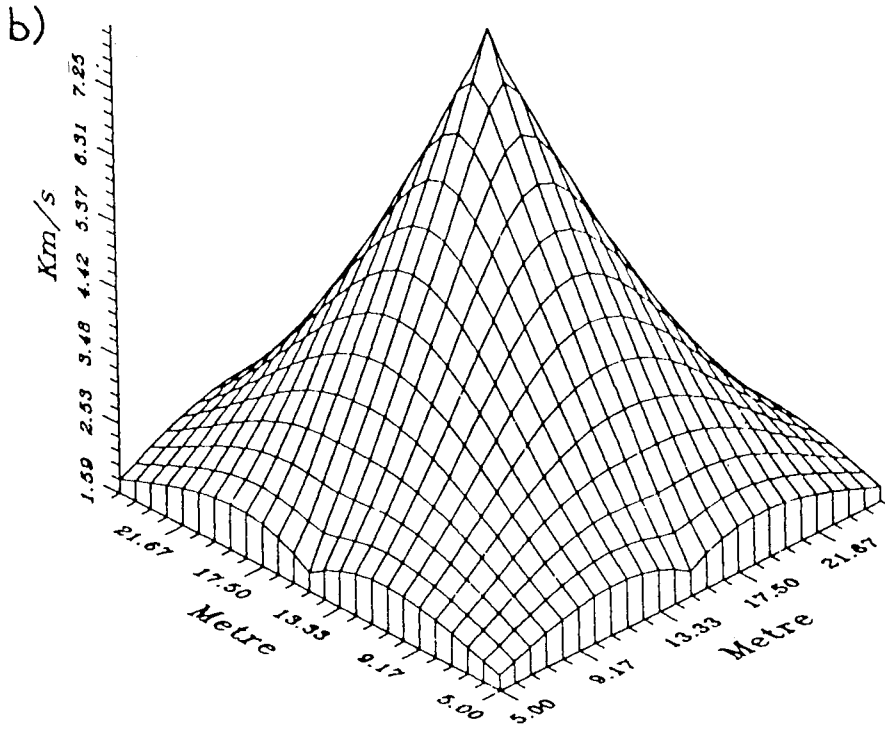
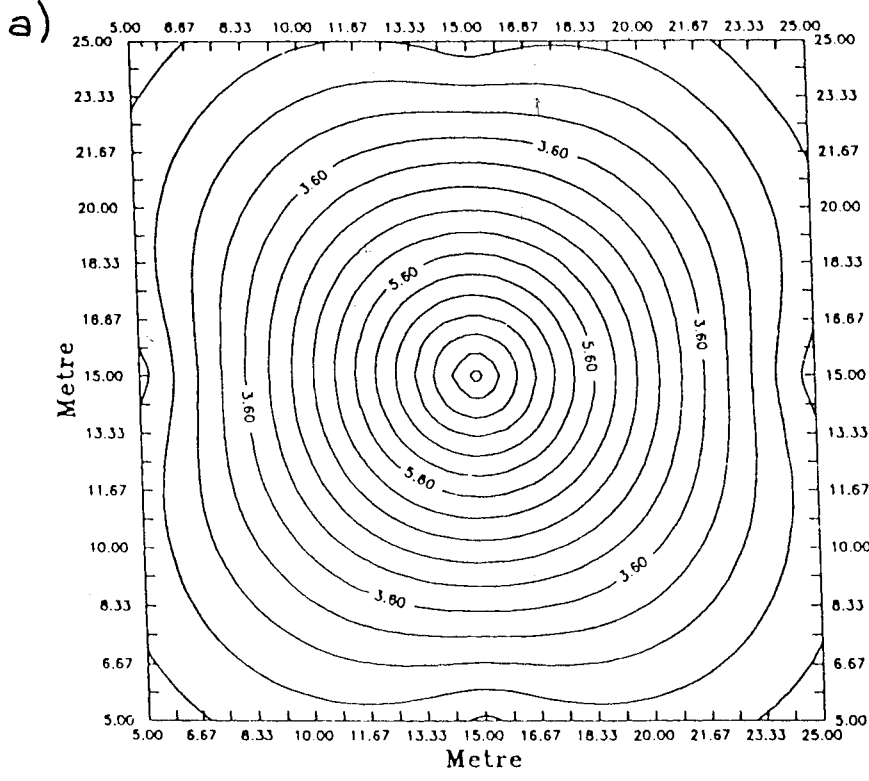
Bundan sonra oluşturulan Model-III diğerlerine oranla çok daha küçük boyutlarda bölgenin sol üst ve sağ alt köşesine yerleştirilmiş 3x3 m boyutlarında iki küçük kare şeklindeki yapı ortaya çıkartılmaya çalışılmıştır (Şekil 16). Bu modelde de küçük yapıların hızı 4000 m/s civar ortam hızı ise 2000 m/s alınarak hücreler arasında homojen bir trend sağlanmaya çalışılmıştır. 25 hücre sayısı için sonuçlar, hız kontur eğrileri ve eşyükselti eğrileri olmak üzere sırası ile Şekil 17a, b'de verilmiştir. Ayrıca buraya kadar yapılan hesaplamalarda verilerin hiç bir şekilde gürültü içermediği ve arayüzeylerde yansıma, kırılma ve diğer fiziksel kuralların çalışmadığı tamamen homojen bir ortamın varlığının kabulü yapılmıştır.

Oluşturulan modellerin kullanılması sonucu elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi hücre sayısı arttıkça çözüm gücü daha da artmaktadır. Eğer bölgede ilerleyen ışın sayısını artırarak aynı işlemleri tekrarlayacak olursak sonuçların gerçek modele daha iyi uyum sağladığını ve bölgenin çok daha ayrıntılı olarak ortaya çıkartıldığını gözleyebiliriz. Bu zamana kadar yapılan kuramsal çalışmaların hiç biri daha önceden bahsedildiği gibi gürültü içermemekte ve oldukça ideal bir ortam ortaya koymaktadır. Bu idealliği biraz daha ortadan kaldırarak gerçek veriye daha yakın bir veri ortaya koymak ve algoritmanın çözüm gücünü araştırmak için I. Model kullanılarak hesaplanan ilk varış zamanlarına, varış zamanlarının % 10'u oranında zaman değeri gürültü olarak eklenmiştir (% 10'luk gürültü sadece yapı dışındaki ortamda ilerleyen ışınlar eklenmiştir). Eklenen gürültü sonucunda Şekil-18a, b'de gözlemlendiği gibi yapının veri belli olmasına rağmen hız değişimlerinde anormal artışlar gözlenmiştir. Bunun için değişik λ değerleri kullanılarak her hücredeki hız değerleri ile zamana bağlı standart



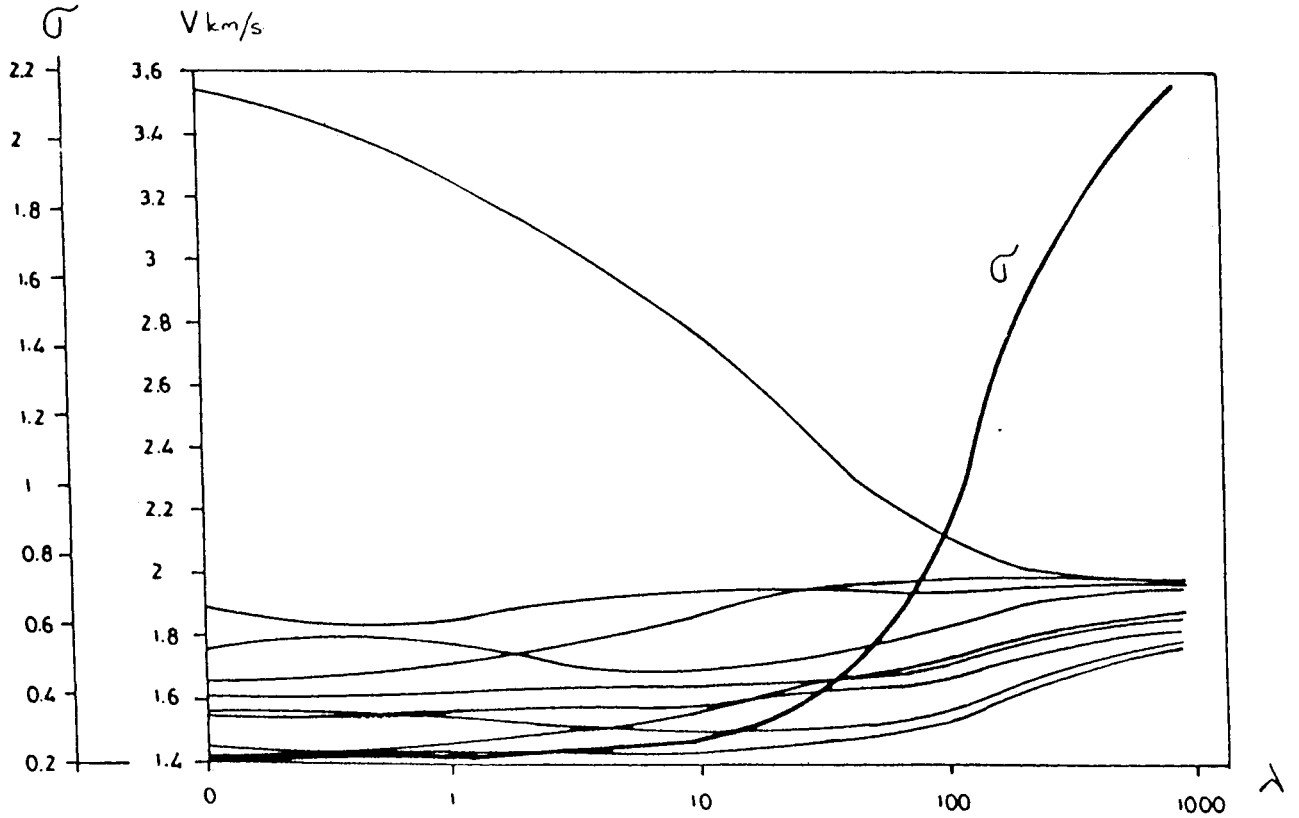
Şekil 17. Model-III'in ve VII. hücre koordinatlarının kullanılması sonucu görüntülenen yapının hız kontur haritası (a), görüntülenmiş yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünüm (b).

Fig. 17. Velocity of image obtained using the model-III and coordinates of seventh cell (a), three dimensional image of Figure-17a which depends on velocity (b).



Şekil 18. Şekil 3'deki Model-I'in ve I. hücre koordinatlarının kullanılması ile veriye % 10 gürültü eklenerek $\lambda = 0$ için elde edilen hız kontur eğrisi (a), yapının hız değişimine bağlı üç boyutlu görünümü (b).

Fig. 18. For $\lambda = 0$ velocity image obtained using Model-I in Figure-3, coordinates of first cell with % 10 noise is added to the data (a), three dimensional image depending on velocity (b).



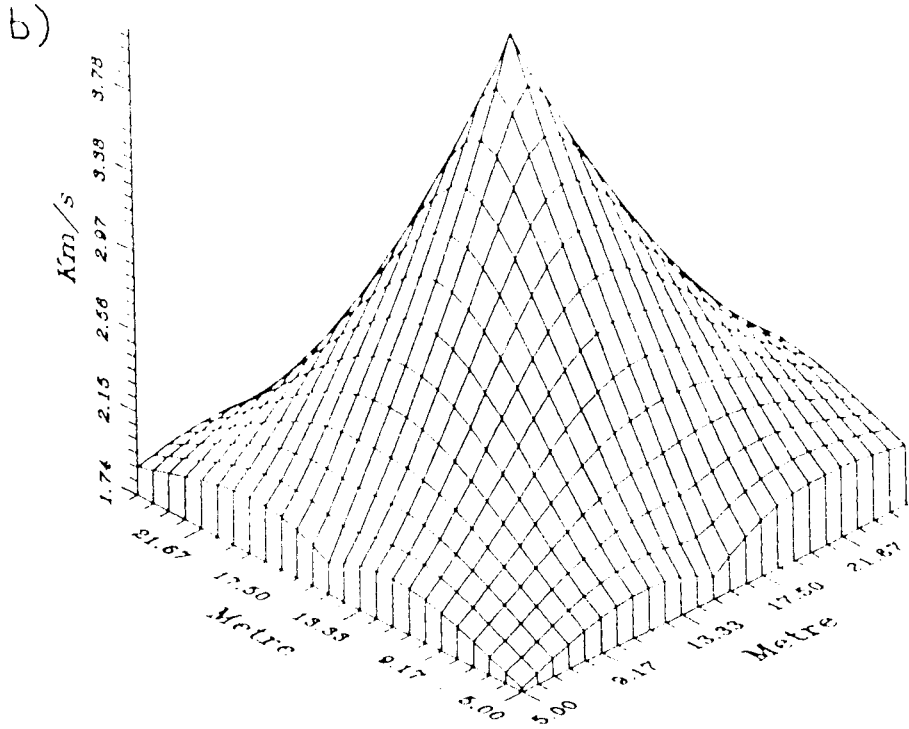
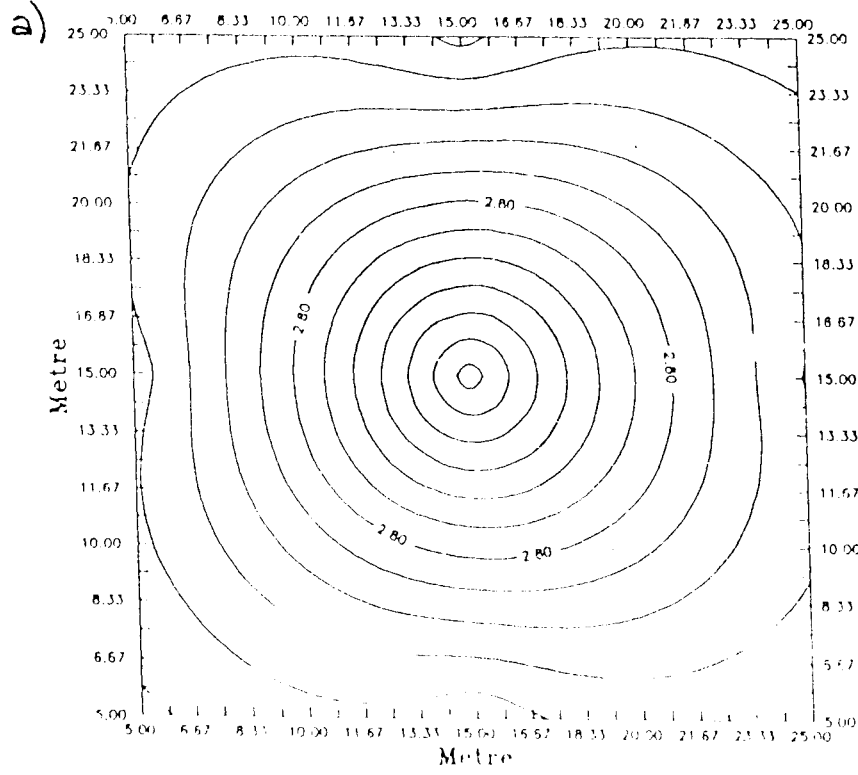
Şekil 19. Uygun yeraltı modelinin seçilmesi için kullanılan ödünleşme eğrisi. Zamana bağlı standart sapma ve her hücredeki hız değerlerinin λ parametresine göre değişim grafiği.

Fig. 19. Trade-off curve obtained using proper underground model, according to parameter λ , graphics of standart deviation which depend on time and velocity in each cell.

sapma değerlerindeki değişimler irdelenmiştir. λ değerlerine bağlı olarak oluşturulan bu değişim çizelgesinde (Şekil 19) görüldüğü gibi, artan λ değerleri ile model ayrımlılığı azalmakta ve zamana bağlı standart sapma değeri artmaktadır. Bölgeye ait en uygun hız modelini ortaya çıkartmak için standart sapma eğrisinin dönüm noktasının başlangıcına karşılık gelen $\lambda = 10$ değeri kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve bölgeye ait en uygun hız modeli ortaya çıkarılmıştır (Şekil 20a, b).

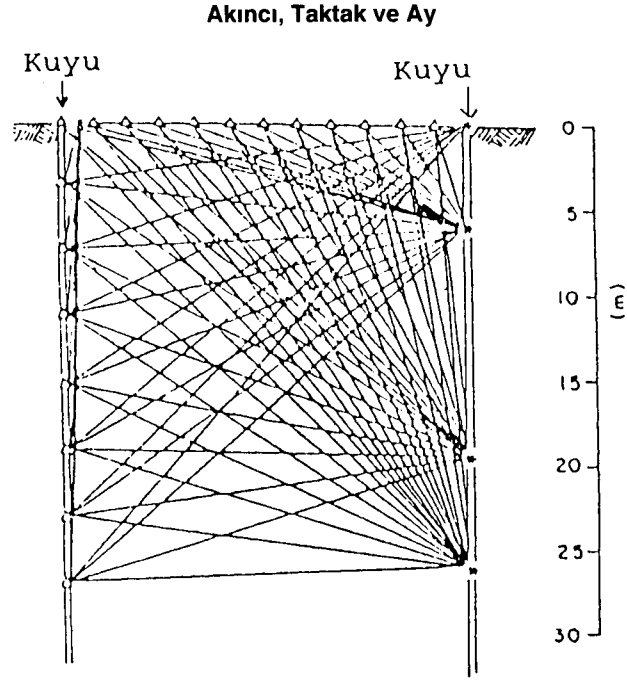
Çalışmanın son bölümünde kullandığımız algoritma gerçek arazi verilerine uygulanarak sonuçlar irdelenmiştir. Kullanılan gerçek arazi verileri İtalya-Roma yakınında açılmış iki kuyudan yararlanarak ve arazide Şekil 21'deki kaynak-alıcı geometrisi kullanılarak elde edilmiştir. Bölgede açılan kuyuların derinliği 30 m, iki kuyu arasındaki mesafe ise 30 m olmak üzere 5 kaynak 16 alıcı kullanılarak elde edilen sismik kayıtların ilk varış zamanları okunmuş ve gözlenen veri şeklinde algoritmada kullanılmıştır. Bölge önce 20 hücreye ayrılmış ve ortalama bir başlangıç hız değeri verilerek bölgenin hız dağılımı ortaya çıkartılmaya çalışılmıştır. En uygun ve en doğru hız modelinin ya da hız

dağılımının tesbit edilmesi için değişik λ değerleri kullanılarak her hücredeki hız değişimi değişik λ değerlerine göre grafiklenmiş ve sonucun gözle ayrımlılığının daha net olmasına özen gösterilmiştir. Zira bilindiği gibi λ değeri büyüdükçe çözüm en dik iniş (Steepest Descent) çözümüne, λ sıfıra yaklaşırken ise, kısıtsız enküçük kareler çözümüne yaklaşır. Bununla birlikte, gereğinden büyük seçilen λ değeri yavaş değişen bir hız dağılımı ortaya koyarken, model seçilebilirliğini de düşürecektir (Kuleli 1992). Sönüm parametresine bağlı olarak, model varyansının değişimi ve veri uyumsuzluk fonksiyonunun varyansındaki değişim, ödünleşme eğrisi (trade-off curve) aracılığı ile izlenebilir. Şekil 22'den de görüldüğü gibi artan λ değerleri ile model ayrımlılığı azalmakta ve zamana bağlı standart sapma değeri artmaktadır. Bölgeye ait en uygun hız dağılımı σ_i standart sapma eğrisinin dönüm noktasının başlangıcına karşılık gelen λ değerine algoritmanın verdiği yanıt olarak alınmıştır. Burada $\lambda = 10$ değeri kullanılarak elde edilen hız modeli bölgeyi en iyi tanımlayan model olarak seçilmiştir. Bölgeye ait hız kontur eğrisi ve hız eş yükselti eğrisi sırası ile Şekil 23a ve b'de verilmiştir.



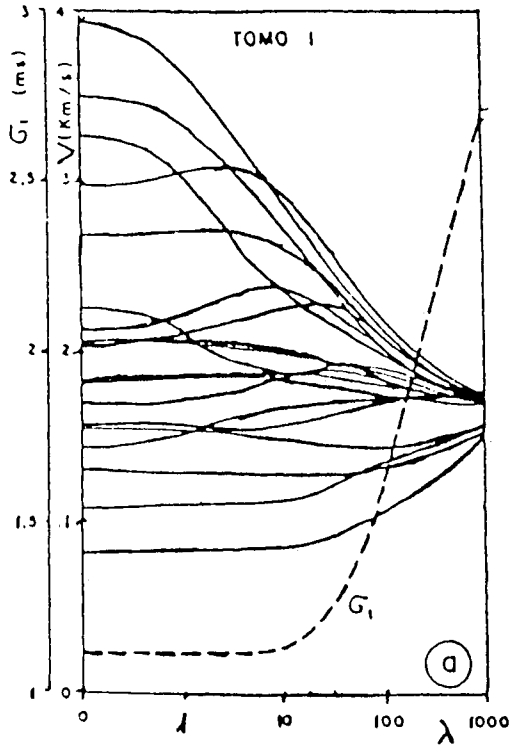
Şekil 20. Şekil 3'deki Model-I'in ve I. hücre koordinatlarının kullanılması ile veriye % 10 gürültü eklenerek $\lambda = 10$ için elde edilen hız kontur haritası, (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünüm (b).

Fig. 20. Velocity image obtained for $\lambda = 10$ using model-I. First cell coordinates and added data with noise % 10 (a), three dimensional image of Figure-20a which depends on velocity (b).



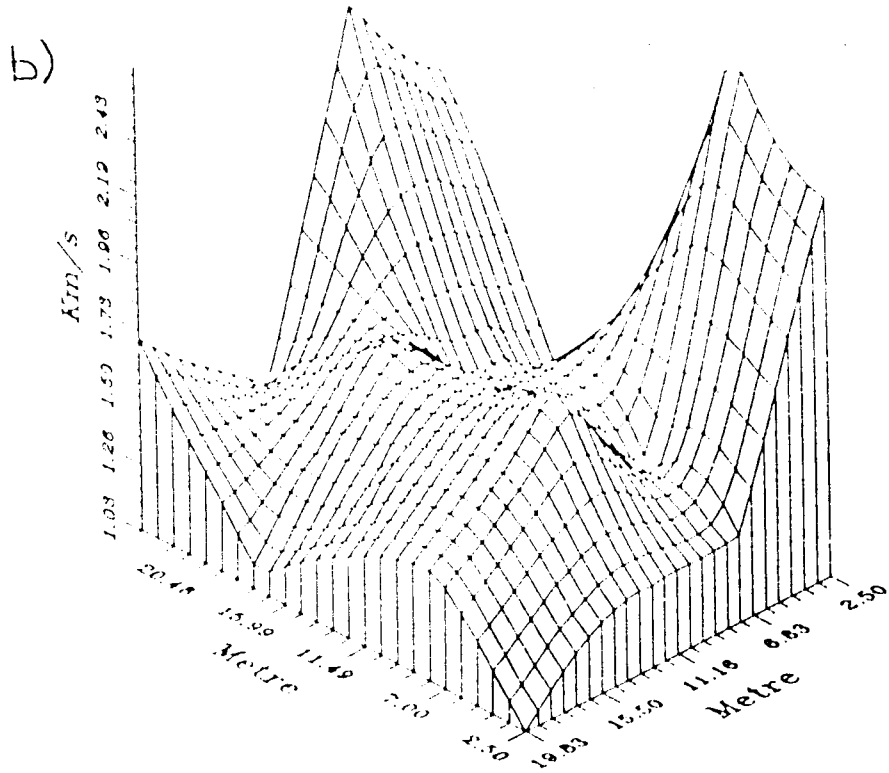
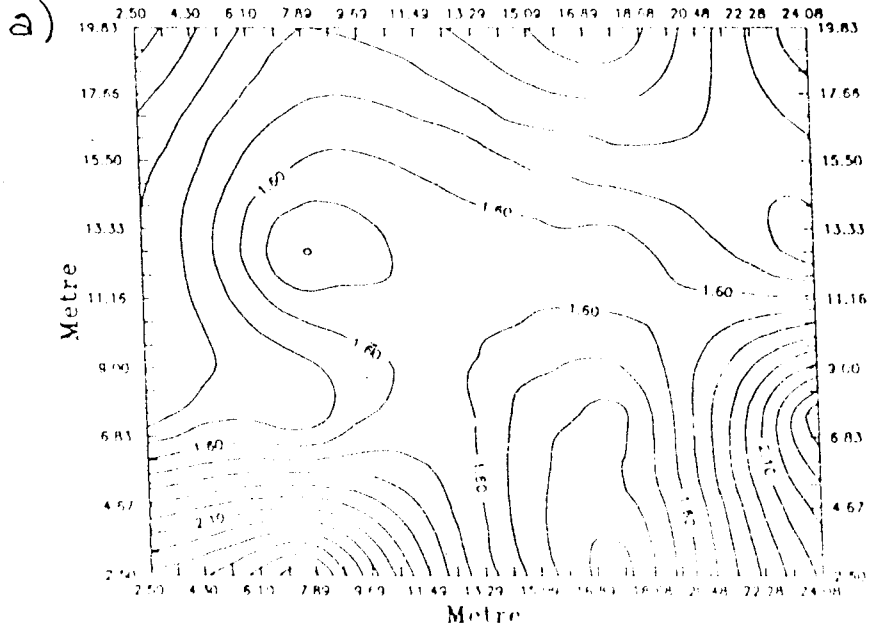
Şekil 21. Arazide, 5 kaynak ve 19 alıcı kullanılarak oluşturulmuş kaynak alıcı düzeni.

Fig. 21. The setup for borehole seismic tomography illustrating the positions of 5 sources on the surface and 19 receivers.



Şekil 22. Uygun yeraltı modelinin seçilmesi için kullanılan ödünleşme eğrisi. Zamana bağlı standart sapma ve her hücredeki hız değerinin λ parametresine göre değişim grafiği.

Fig. 22. Trade-off curve obtained using underground model, according to parameter λ . Graphics of standart deviation which depends on time and velocity in each cell.



- Şekil 23. Şekil-21'deki kaynak alıcı geometrisine bağlı olarak elde edilen iki kuyu arasındaki bölgenin hız anomali haritası (a), yapının hız değişimine bağlı olarak elde edilen üç boyutlu görünümü (b).
- Fig. 23. Velocity image map of area between two holes which depends on shot and receiver array in Figure-21 (a), three dimensional image depending on velocity (b).

KAYNAKLAR

- Bernabini, M. and Cardarelli, E. 1988, Tomografia-Seismica con Misure Dirette di Velocita In; Atti 60 convenaz, Geopisica Della Terra Solida, C.N.R., Roma, 595-607.
- Bernabini, M., Cancaniccia, M. and Cardarelli, E. 1990, Seismic survey of some pillars of collisioum, Archeometry, 677-686.
- Bernabini, M. and Cardarelli, E. 1990, Programma di Acquisizione Dati Per il Calcolo Della Distanze Dei Percorsi Parziali e Totoli Del Raggio Sismica Uno Volta Decisa La Scompartientazione de Effetture, Generale Prospezi- oni, Roma.
- Bois, P., La Porte, M., Lavergne, M. and Thomas, G. 1971, Essai de determination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, Geophysical Prospecting 19, 42-83.
- Bois, P., La Porte, M., Lavergne, M. and Thomas, G. 1972, Well to seismic measurements, Geophysics 37, 471,480.
- Bishop, T.N., Bube, K.P., Gutler, R.T., Langan, R.T., Love, P.L., Resnick, J.R., Shuey, R.T., Spindler, D.A. and Wyld, H.W. 1985, Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media, Geophysics 50, 903-923.
- Bishop, I. and Styles, P. 1990, Seismic tomographic imaging of a buried concrete target, Geophysical Prospecting 38, 169-188.
- Canitez, N. 1992, Jeofizikte modellemenin amaç ve kapsamı. Jeofizikte Modelleme Kollokyumu Ders Notları, İstanbul, 1992, 11-32.
- Devaney, A.J. 1982, A filtered back propagation algorithm for diffraction tomography, Ultrasonic Img. 4, 336-350.
- Devaney, A.J. 1984, Geophysical diffraction tomography, I.E.E.E. Trans. 22, 3-13.
- Dines, K.A. and Ltyle, R.J. 1979, Computerized geophysical tomography, Proceedings of the I.E.E.E. 67, 1065-1073.
- Gustavsson, M., Ivansson, S., Moren, P. and Phill, J., 1986, Seismic borehole tomography measurement system and field studies, Proc. I.E.E.E. 74, 339-346.
- Ivansson, N.S. 1985, A Study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low-velocity zones. Geophysics 50, 969-988.
- Ivansson, N.S. 1986, Seismic borehole tomography theory and computational methods. Proc. Inst. Electr. Electron. Eng. 74, 323-338.
- ak, A.C. 1985, Tomographic imagining with diffracting and nondiffracting sources, In Haykin S. Ed., Array Signal Processing 351-428.
- Kuleli, H.S. ve Canitez, N. 1992, Sismik tomografi, Jeofizikte Modelleme Kollokyumu Ders Notları, İstanbul, 1992, 215-223.
- Mc Mechan, G.A. 1983, Seismic tomography in boreholes, Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 74, 601-612.
- Menke, W. 1984, The resolving power of cross-borehole tomography, Geophys. Res. Lett. 11, 105-108.
- Peterson, J.E., Paulsson, B.N.P. and McEvelly, T.V. 1985, Application of algebraic reconstruction techniques to cross-hole seismic data, Geophysics 50, 1566-1580.
- Ramirez, A.A. 1986, Recent experiments using geophysical tomography in fractured granite, I.E.E.E. 74, 347-451.