

KAYAN BİLİNMEYEN BLOKLAR İLE SİSMİK KUYULAR-ARASI TOMOĞRAFI

SEISMIC CROSS-HOLE TOMOGRAPHY WITH SHIFTED UNKNOWN BLOCKS

Hüseyin TUR, Şahin AKKARGAN, Okan TEZEL, A. İsmet KANLI
İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, 34850 Avcılar-İstanbul

ÖZ: Sismik zaman tomografisinde, sismik çözümün başarısını etkileyen problemlerden birisi, bilinmeyen bloklar ile gerçek kayalar arasındaki sınırların uyum derecesidir. Sınırlı sayıda bilinmeyen için, ikiye bölünen bilinmeyen blokların sayısı arttıkça tomografik çözümlerin güvenilirliği azalmaktadır. Bilinmeyen bloklar ile gerçek kayalar arasındaki sınırların uyum olasılığını iyileştirmek amacı ile bilinmeyen blokların satır ve sütunları sistemli bir şekilde kaydırılarak belli sayıda bilinmeyen blok modelleri elde edilmiştir.

Seçilen bir seyahat süresi verisi, bu şekilde elde edilen bilinmeyen blok modellerinin her biri ile teker teker çözülmüştür. Matris çözümlerinde kullanılan Tekil Değer Ayrışması (Singular Value Decomposition) yöntemi hem çözüm vektörünü hem de ona ait hata vektörünü sağlamaktadır. Hata vektörlerinin irdelenmesi en uygun tomografik çözümlerin seçilmesinde güvenilir bir kriter oluşturmaktadır. Küçükten büyüğe sıralanmış hata vektörü ortalamaları buna iyi bir örnektir.

Anahtar kelimeler: Sismik, tomografi, kuyu-arası, bilinmeyen blok, ters çözüm.

ABSTRACT: In seismic time tomography, an important problem affecting the success of a seismic inversion is the degree of coincidence between the boundaries of unknown blocks and the actual rocks. Given a limited number of unknowns, the reliability of tomographic solutions decreases as the number of halved unknown blocks increases. In order to improve the probability of unknown block versus actual rock boundary coincidence, we applied systematical shifts in columns and rows of unknown block resulting in a number of unknown block models.

The travelttime data chosen were solved with each of the unknown block models obtained in this way one by one. The use of Singular Value Decomposition technique of matrix inversion furnishes both the solution vector and the related error vector. The examination of the error vectors provides reliable criteria in selecting optimal tomographic solutions. For instance, ascendant sort of the error vector means proved to be a dependable one.

Key words: Seismic, tomography, cross-hole, unknown block, inversion.

GİRİŞ

Bilim alanındaki gelişmelerin büyük bir hızla devam ettiği günümüz de, jeofizik bilimi de bu gelişmelere ve özellikle de bilgisayar teknolojisindeki dev adımlara paralel olarak gelişmesini sürdürmektedir.

Bilgisayarların çok sayıda veriyi aynı anda ve büyük bir hızla işleyebilme yeteneği jeofizikçilere, veri işleme ve modelleme alanlarında daha önce düşünülme-yecek bir çok olanak tanımış ve bilgisayar kullanımını esas alan pek çok yeni sayısal modelleme ve çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bunlar arasında konvolüsyon, tomografi yöntemi, ters çözüm tekniği ve benzeri yöntemler sayılabilir.

Tomografi sözcüğü jeofizik literatüründe bilgisayar çağı ile ortaya atılmış yeni bir olgu olmasına karşın, jeofizikçiler konunun ortaya çıktığı ilk günden beri tomografik araştırmaları sürdürmektedirler. Aslında 1920'lerde tuz domlarının yerini bulmak için uygulanan yelpaze sismik kırılma çalışması gerçekte bir tomografik çalışmaydı. 1970'lerden sonra ise tomografi adı altındaki çalışmalar görülmektedir. Bois ve diğerleri 1972'de kuyular-arası sismik çalışmalarını sürdürmüşler ve kuyular arasındaki hız alanını görüntülemişlerdir.

Tomografi yöntemi, diğer bilimlerde olduğu gibi jeofizikte de çeşitli amaçlı çalışmalarda uygulanmıştır. Hatta sismik alanında dahi değişik uygulamaları vardır.

Bunlardan birisi de kuyular-arası sismik tomografidir. Bu alanda McMechan 1983'te yaptığı çalışmada konvansiyonel kaynak-alıcı geometrisini kullanarak, kuyuları birbirine düz ışın yolları ile yaklaştırmış, kuyulararası ve yüzey-kuyu kaynak alıcı geometrileri için sentetik veri setleri belirlemiştir. Daha sonra bunları bilgisayar ortamında kullanabilmek için sayısallaştırmış ve ters çözüm yaparak model yapıları elde etmeye çalışmıştır.

Sismik tomografi, sismik ölçümler ile yeraltındaki bir yapının görüntüsünü ya da kesitin resmini elde etmede kullanılan bir tekniktir (Dines ve Lytle, 1979; Worthington, 1984; Bishop ve diğerleri, 1985). Tomografik görüntüler bir çok yolla ya da algoritmaların kullanılmasıyla elde edilebilir. Sismik soğrulma (Wong ve diğerleri, 1983) ve ortam hızı (Iverson, 1988) sismik tomografide kullanılan tipik parametrelerdir. Sismik prospeksiyonda, tam dalga formu yöntemleri önerilmesine rağmen tomografik çalışmalarda varış zamanı gözlemleri kullanılmaktadır (Devaney, 1984).

N. Bregman, R.C. Bailey ve C.H. Chapman 1989'da yaptıkları çalışmada, öncelikle sentetik sismogram üretmişler, sonra sönümlü en küçük kareler ters çözümünü kullanarak, arazi verilerine yinelemeli olarak uygulamışlardır. Model hatalarını giderdikten sonra veriler ile sentetik sismogram karşılaştırılmış iki kuyu arası veri setinin tomografik modeli çıkartılmış ve dalga denklem modeli ile doğrulanmasını sağladıkları görülmüştür. Tur 1997'de zaman ortamında sismik-Q tomografisi çalışmasında yeni bir ışın izleme algoritması geliştirerek "Lokal Tomografi" adıyla tomografiye yeni bir yaklaşım getirmiştir.

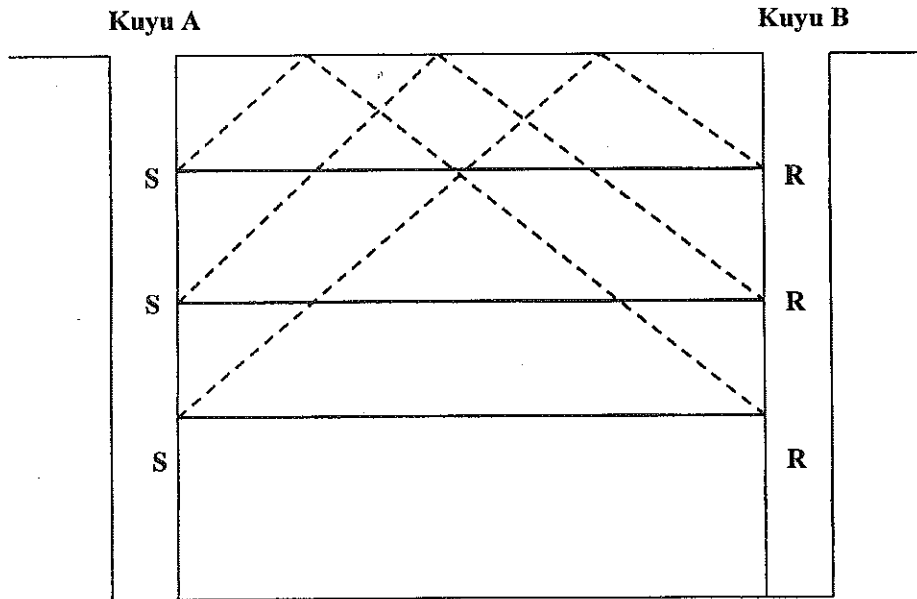
Biz bu çalışmada kuyular-arası bölgenin hız dağılımının belirlenmesi için sismik zaman tomografisine yeni bir yaklaşım getirmeye çalıştık. Amacımız katman arayüzeyleri ya da fay düzlemleri gibi belirgin süreksizlikler içeren jeolojik yapılarla ilişkili tomogramları geliştirmektir. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak düz modelleme yapılmış ve sentetik sismik izler elde edilmiştir. İkinci aşamada ise seçilen seyahat süresi verileri kullanılarak ters çözüm yapılmıştır. Ters çözüm aşamasında kullanılan bilinmeyen bloklar sistemli olarak kaydırılarak eğimli yapıların ortaya çıkarılması sağlanmıştır.

KUYULAR ARASI SİSMİK TOMOGRAFİ

Kuyu içi sismik enerji kaynakları ve sismik alıcıların son zamanlarda büyük bir gelişme göstermesi ile birlikte konvansiyonel yöntemlerin eksikliklerine bağlı olarak kuyular-arası sismik çalışmalar ilginç bir araştırma konusu olmuştur. Klasik yansıma sismiği, yüzeye yakın bir kaynaktan gelen elastik dalgaların kaydedilmesi esasına dayanmaktadır.

Bununla birlikte yüzeye yakın inceleme tabakalarında belirgin bir frekans zayıflaması ortaya çıkar. Bu tür absorpsiyon sorunlar, kuyular-arası sismik yöntemlerde kaynak ve alıcılar derine yerleştirilerek azaltılmıştır. Bu sayede yüksek frekanslı sinyalleri kaydedebilmek ve hızdaki küçük değişimleri görebilmek mümkün olmaktadır.

Şekil 1'de kuyular-arası bölgenin basitleştirilmiş bir taslağı verilmektedir. Kuyular-arası sismik çalışma-



Şekil 1. Kuyular-arası bölgenin kaynak ve alıcı düzeni.
Figure 1. Source and receiver design in the cross-hole area.

nın kaynak-alcı geometrisinin basitleştirilmiş temsili görünümünü oluşturmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi vericileri bir kuyuya, alıcıları ise diğer bir kuyuya yerleştirmek sureti ile ölçüm yapılmaktadır. Fakat kullanılacak çok fazla sayıda kaynak-alcı geometrileri vardır veya oluşturulabilir. Şekilde A kuyusunda atış noktaları, B kuyusunda ise alıcılar görülmektedir. Kesik çizgiler kara hava sınırından yansıyarak alıcılara gelen sismik dalgaları, düz çizgiler ise direkt olarak alıcılara gelen sismik dalgaları temsil etmektedir.

Genelde sismik çalışmalarda elde edilen verilerde, yeryüzeyinden yansıyarak alıcılara gelen dalgalar gürültü olarak düşünülür ve çoğu zaman sismogramlarda birincil yansımalarından ayrılarak elemine edilmeye çalışılır. Biz bu çalışmada bu sismik dalgaları dikkate aldık. Böylece gözlem sayısı artırılmış ve tomografik çözümler iyileşerek elde edilmiştir.

Tomografi problemi iki bilinmeyenli bir denklem sistemi ile karakterize edilebilir.

$$A \cdot X = B \quad (1)$$

denklemin sözü geçen bu denklem sisteminin matris yazılışdır. Burada,

B = Gözlem vektörü

A = Katsayılar dizayn matrisi

X = Bilinmeyenler matrisidir.

Bu denklem sisteminin çözümü için (1) nolu bağıntı A matrisinin transpozesi ile çarpılır.

$$A^T \cdot A \cdot X = A^T \cdot B \quad (2)$$

denklemin elde edilir. Burada $A^T A$ eğer I birim matrisini veriyor ise yani $A \cdot A^T$ ise, X matrisi ortogondur denir. Böylece,

$$X = A^T \cdot B \quad (3)$$

bulunur. A matrisinin transpozisini alabilmek için A matrisi Tekil Değer Ayrışması (SVD) yöntemi ile dik matris ayrıştırmaya uğratılır (Golub ve Reinsch, 1970).

$$A = U \cdot S \cdot V^T \quad (4)$$

bağıntısı elde edilir. Ayrıştırılmış matris kullanılarak A matrisinin transpozesi bulunur.

$$A^T = V \cdot 1/S \cdot U^T \quad (5)$$

Bulunan bu bağıntısı (3) bağıntısında yerine konulursa,

$$X = V \cdot 1/S \cdot U^T \cdot B \quad (6)$$

kestirilmiş çözüm elde edilmiş olur. Burada V özvektör matrisidir. Birbirine dik özvektörlerden oluşur. Verilerin yerini ve özelliklerini karakterize eder. U matrisi de bir özvektör matrisi olup model parametrelerini karakterize eder. S matrisi tekil değerlerden oluşan diyagonal öz-

vektör matrisidir. B matrisi bu çalışmada, tomogramların elde edilmesinde kullanılan seyahat süresi verilerine karşılık gelmektedir. X matrisi bilinmeyenler matrisidir. Bilinmeyen parametre hız bilgisidir.

Tomografide incelenen bölgenin aydınlatılma derecesi çok büyük önem taşımaktadır. Şekil 2'de kuyular-arası bölgenin aydınlanmasının bir ölçüsü görülmektedir. En iyi aydınlatılan kısım tomografik çözüm neticesinde, en iyi çözüme karşılık gelecektir. Şekilde kuyular-arası bölgede her bir hücrenin ne kadar sıklıkta ışın tarafından ziyaret edildiği açıkça görülmektedir. Daha koyu yerler daha açık yerlere oranla daha fazla ışın tarafından ziyaret edilen yerlerdir. Nitekim bu şekil tomogramların değerlendirilmesinde çok önemlidir. Daha az ışın tarafından katedilen daha açık kısımlara yorumcuların güvenmemesi gerekir.

Sismik zaman tomografisinde ışın izleme (ray-tracing) çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada kullanılan ışın izleme algoritması çalışmanın amacına yönelik olarak geliştirilmiştir. Işın izlemede kullanılan sismik dalga yollarının geometrisi Şekil 3'te verilmektedir.

Şekil 3'te verilen geometrik görünümünden faydalanarak aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz. Bu bağıntılar, ışın izlemede ve tomografik ters çözümde katsayılar dizayn matrisinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

$$AB = \sqrt{(EF)^2 + |FB - EA|^2} \quad (7)$$

$$EC = \frac{EF}{1 + FB/EA} \quad (8)$$

$$CF = \frac{EF}{1 + EA/FB} \quad (9)$$

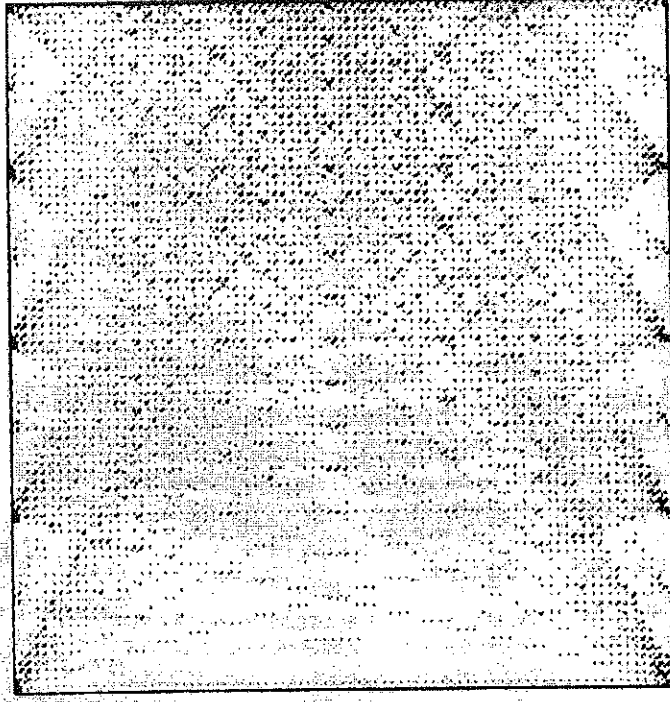
$$AC = \sqrt{EC^2 + EA^2} \quad (10)$$

$$BC = \sqrt{CF^2 + FB^2} \quad (11)$$

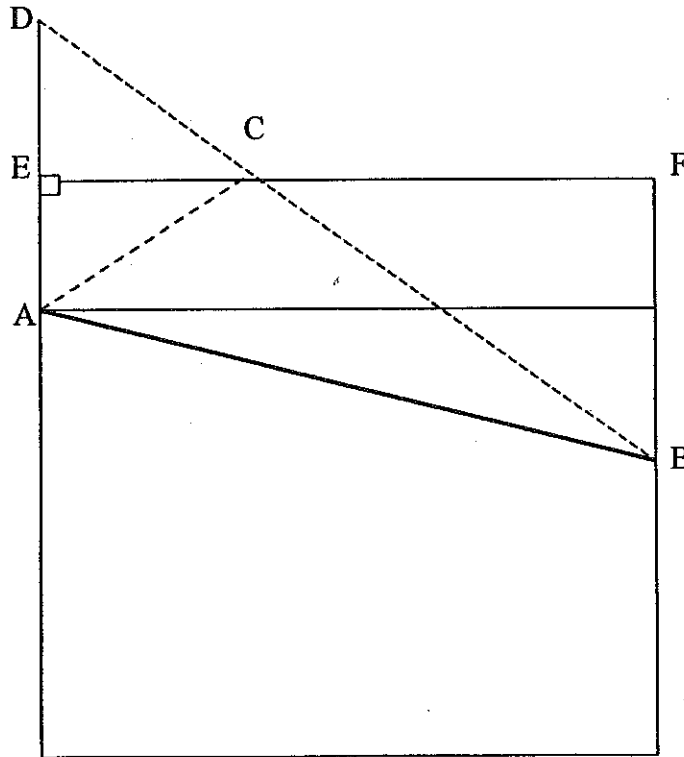
Burada olayı basite indirgeyebilmek için düz ışın yollarının kullanıldığına dikkat edilmelidir.

Işının (dalga'nın) alan içerisinde ilerlemesi ve izlenmesi için ilk önce iki kuyu-arası iki boyutlu bir alan olarak kabul edilmektedir. Bu iki boyutlu alan istediğimiz şekilde sınırlayabiliriz. Kaynak-alcı düzenleri kontrol edilebildiğinden ilerleyen ışını izleyebilmemiz de mümkündür. Şekil 4'te görüldüğü gibi öncelikle kuyular-arası alan çok küçük bloklar halinde piksel adı verilen hücrelere bölünür. Piksellerin şekli ve büyüklüğü kontrol altında olup isimleri de bilinmektedir. Yer içerisinde ilerleyen dalgaların yolları da yukarıda belirlendiği biçimde elde edilmektedir. Bu belirlenen dalga yolları adım adım takip edilir.

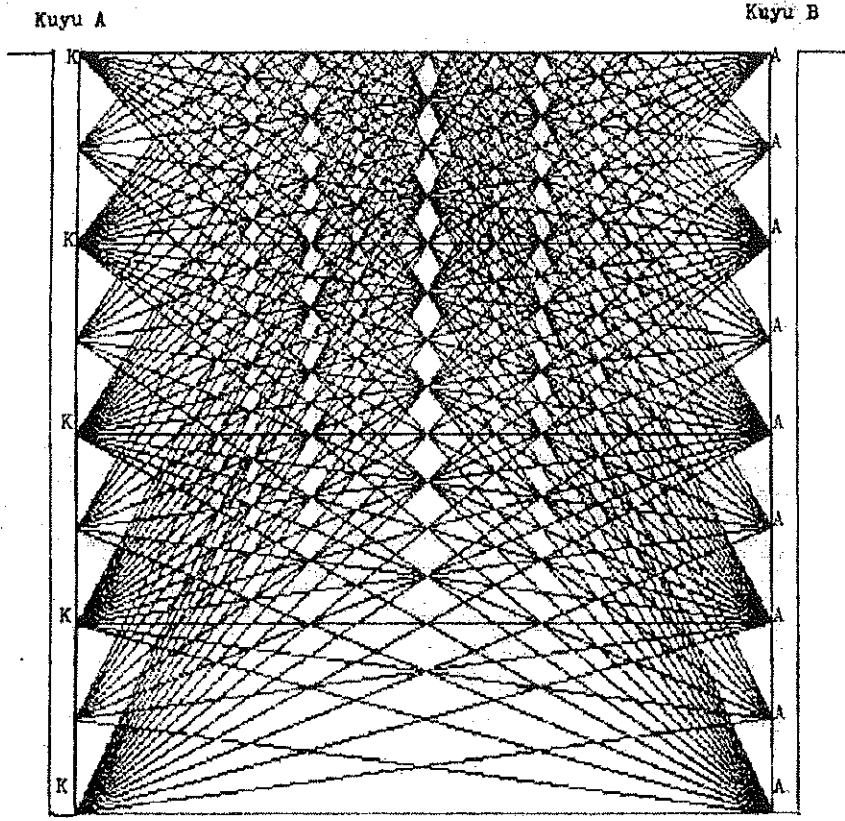
Işın ilerlerken, üzerinde seçilen adım isteğe bağlıdır. Bu ilerleme sırasında iki yönlü hareket söz konusu-



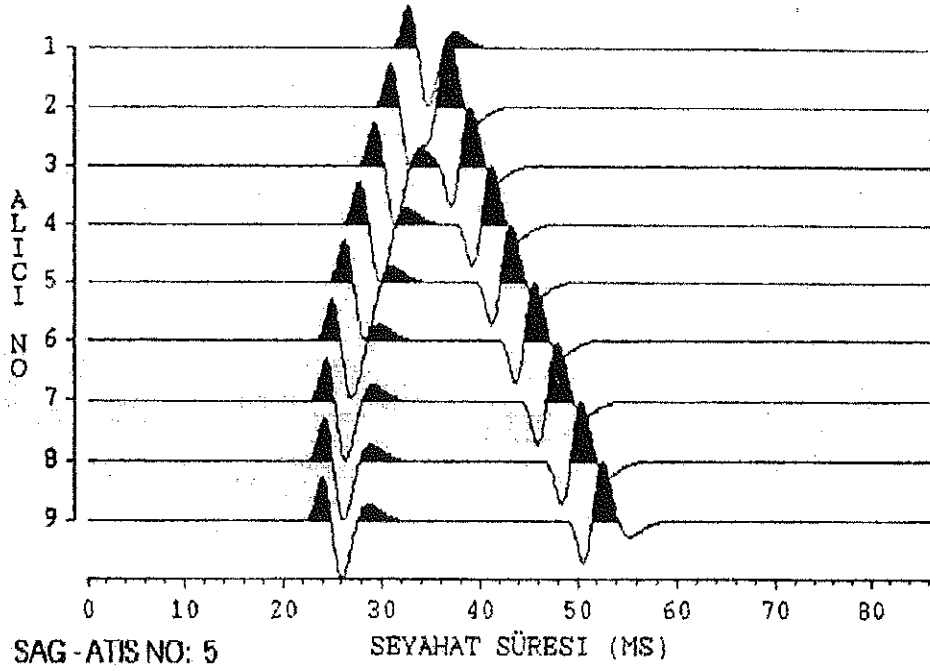
Şekil 2. Sismik ışın ziyaret miktarı sıklığı.
Figure 2. Visitation frequency of seismic rays.



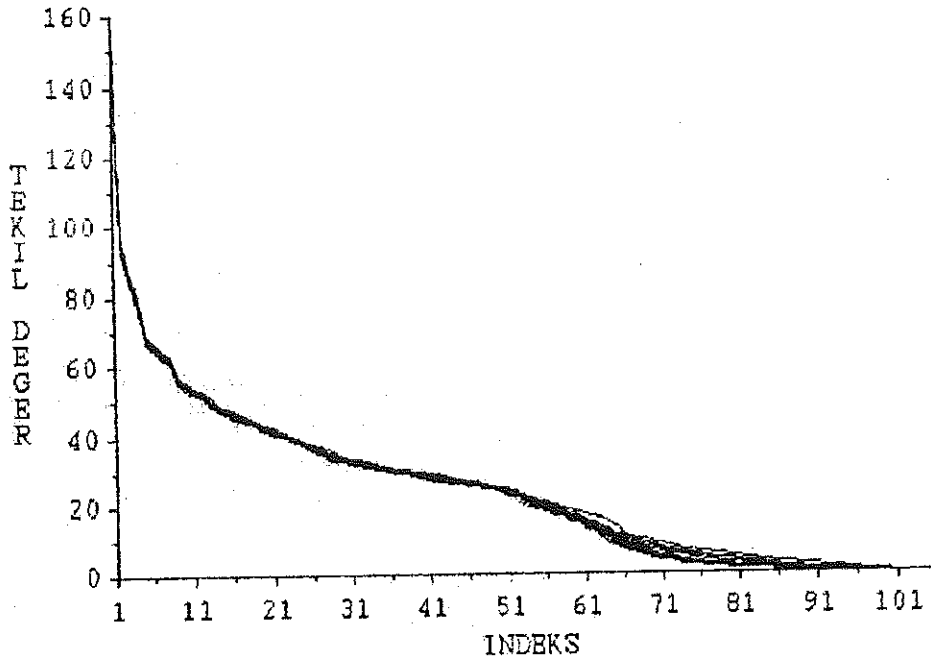
Şekil 3. Kuyular-arası bölge için dalga yolları geometrisi.
Figure 3. Geometry of wave paths in the cross-hole area.



Şekil 5. Direkt ve yeryüzeyinden yansiyarak gelen dalgalara ait ışın izlemesi.
Figure 5. Ray-tracing of direct and reflected waves from the surface.



Şekil 6. Sentetik sismik izler.
Figure 6. Synthetic seismic rays.



Şekil 7. Veri çekirdeğinin spektrumu.
Figure 7. Spectrum of data kernel.

da bir hücre kaydırılması ile elde edilebilir. Bu çalışmada ters çözümde kullanılan ve bilinmeyen bloklar yatay ve düşey yönde 7'şer kez kaydırılıp farklı eğime sahip yapıların tomogramları elde edilmiştir.

Seçilen çeşitli modellere ait her bir seyahat süresi verisi 15 adet bilinmeyen blok modellerinin her biri ile teker teker çözümlenerek en iyi tomogramı veren çözüm bulunmaktadır. Çünkü S.V.D. yöntemi hem çözüm vektörünü hem de ona ait hata vektörünü sağlamaktadır. Hata vektörlerinin irdelenmesi en iyi tomografik çözümün seçilmesinde güvenilir bir kriter oluşturmaktadır. Küçükten büyüğe sıralanmış hata vektörü ortalamaları buna iyi bir örnektir. Şekil 8'de kuyular-arası bölgenin ortasında düşük hızlı kaya kütleli modeli yer almaktadır. Bu modele ait seyahat süresi verileri kullanılarak 15 adet bilinmeyen blok modeli ile ters çözüm yapılmış ve 15 adet çözüm elde edilmiştir. Yine 15 adet hata vektörü çözümü elde edilip Tablo 1'de verilmektedir. Bu çözümler içerisinde en iyi çözümün hata vektörü ortalaması en düşük olan ve saçılmaların en az olduğu çözüme karşılık geldiği görülmüş ve en az ortalama kare hataya sahip üç çözüm Şekil 9'da gösterilmektedir.

Bu üç çözüm Tablo 1'de verilen en düşük ortalama kare hata ve saçılma değerlerinin bulunduğu tomografik çözümlerdir. İlk ikisi mümkün olan en iyi çözümlerdir. Bu üç çözümün dışında kalan çözümler başarılı değildir. Bunun nedeni, kayaç sınırları ile bilinmeyen bloklardan oluşan spesifik ters çözüm modelleri arasın-

daki uyumsuzluktur. Algoritmanın ne denli başarılı olduğunu görebilmek için farklı yer modellerine ait tomogramlar elde edilmiştir. Elde edilen bu tomogramlar ve hata gösterimleri Şekil 10'da verilmektedir.

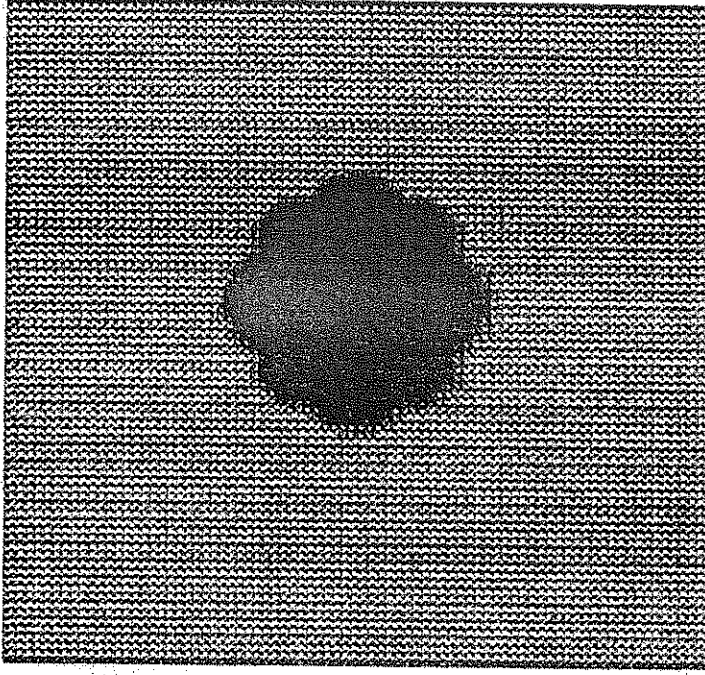
SONUÇLAR

Bu çalışmada günümüze kadar olan sismik tomografi çalışmalarından farklı olarak tomografiye yeni bir yaklaşım getirilmeye çalışılmıştır. Amaç; belli başlı jeolojik yapıların eğim düzlemlerinin çözümlenmesidir. Düşünülen bu eğim düzlemleri yatay, düşey ve eğimli hız süreksizlikleri ve iki kuyu arasındaki kütleli yapılarıdır. Bu amaçla yatay ve düşey yönde sistemli olarak kaydırılmış bilinmeyen bloklar kullanılmıştır.

Ayrıca, yer yüzeyinden yansıyan alıcılara gelen sismik dalgalar gözönünde bulundurulmuş ve bunların gözlem sayısını artırarak tomografik çözümlerde çözüme katkı sağladıkları görülmüştür.

SUMMARY

Seismic tomography is widely used to perform forward and inverse modeling in both seismic prospecting and seismology. Underground structures such as fault zones, volcanic and geothermal fields and boundary layers could be monitored by this method. It also provides examining of elastic wave propagation through earth crust in three dimensions.



Şekil 8. Kuyular-arası bölgenin ortasında düşük hızlı kaya kütleli modeli.
Figure 8. Model of low velocity rock in the middle of cross-hole medium.

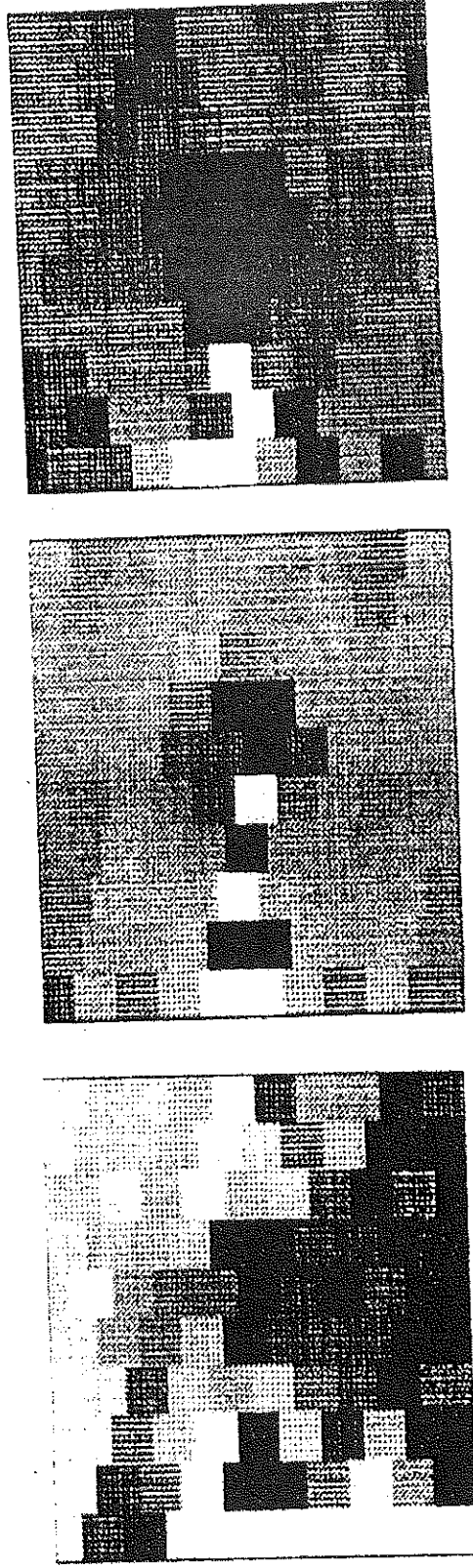
Tablo 1. Kuyular-arası bölgede düşük hızlı kaya kütleli modeline ait ortalama kare hata ve saçılmalar.
Table 1. Root mean square errors and scatterings for low velocity rock model in the cross-hole medium.

Çözüm Modelleri	Hata Vektörü Ortalamaları	Saçılmalar
H01	16	13
H08	63	177
H14	551	3042
H15	1347	9969
H12	1844	7988
H02	2039	9110
H06	2039	13356
H03	2588	16626
H11	3533	32824
H10	6186	40945
H05	7096	39637
H13	48575	487562
H07	97601	970214
H09	167321	1402122
H04	31769796	31840430

Seismic tomography is the art of imaging earth's interior using data obtained at the surface and well. The approach, is completely different from conventional CDP stacking, in which each reflector is positioned based on its very existence due to acoustical impedance

contrast at an interface and the stacking velocity obtained on trial basis during the focusing attempts.

The conventional CDP stacking techniques do not require any priori information apart from the field

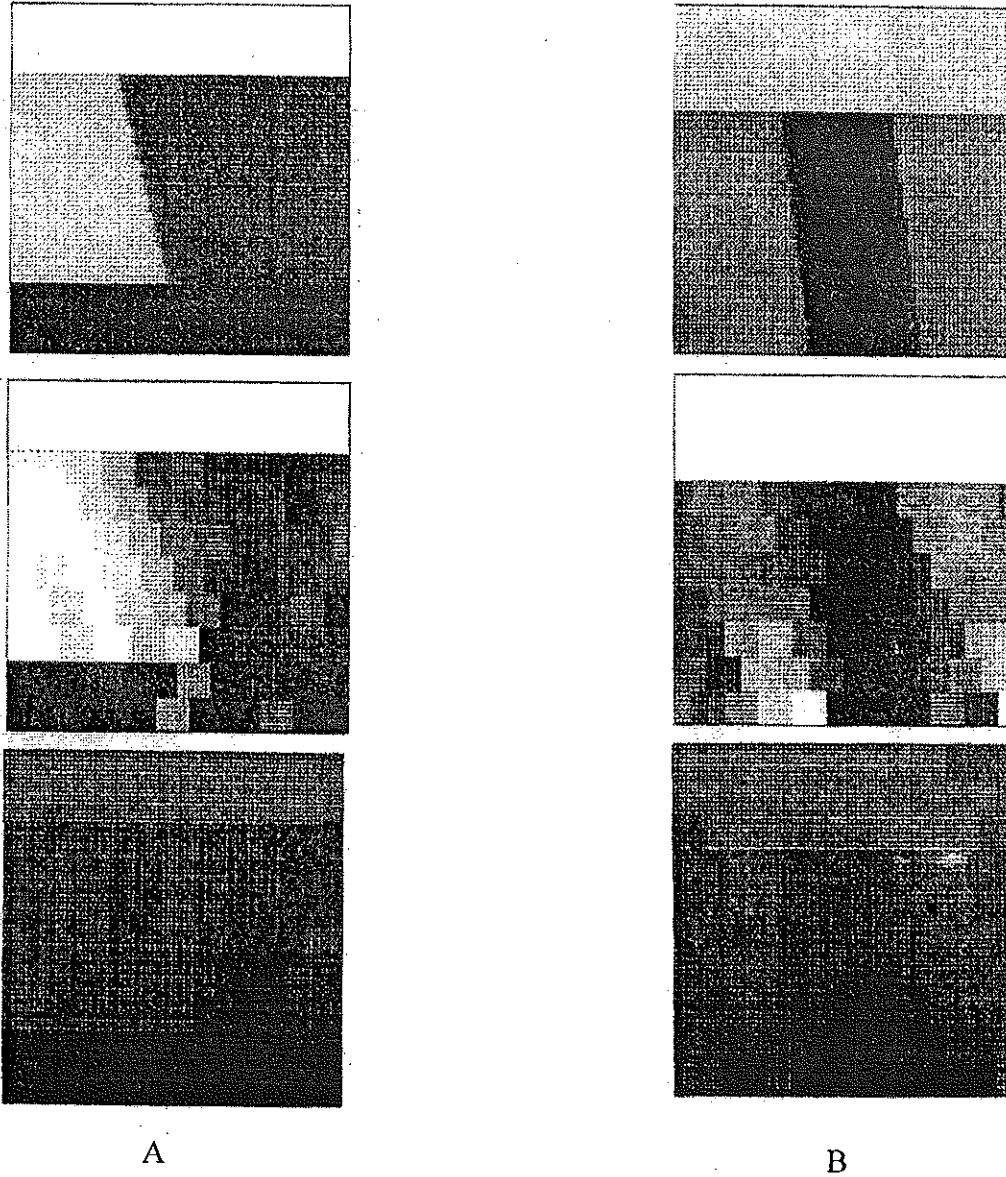


Şekil 9. Düşük hızlı kaya kütleli modeline ait en iyi üç çözüm.
Figure 9. The best three solutions for the model of low vealocity rock.

geometry definitions (station locations, source-receiver patterns, etc.). Conversely, the seismic tomography provides better results when a priori information is available from other disciplines, such a conventional stack sections, well-logging, etc.

In seismic tomography, ray-tracing is essential to compute the coefficients matrix. The correct (in optimal sense) ray-tracing, however, requires a priori knowledge about subsurface structure which we actually try to solve. At first, this seems a paradox, i.e. the priori knowled-

ge we intend to use is the problem we are trying to solve. Nevertheless, the geometry of layer acoustical interface and interval velocities are readily available from conventional stack sections. This information is to be used for optimal ray-tracing from which the coefficients matrix can be computed the elements of a coefficients matrix are distances (say, in meters) traveled by a particular seismic ray within any cell. Our expectancy from seismic tomography is to shade light on the unresolved parts of conventional stack sections.



Şekil 10. (A) yukarıdan aşağıya sırası ile fay modeli, tomografik çözüm ve hata gösterimi; (B) eğimli dayk modeli, tomografik çözüm ve hata gösterimi.
Figure 10. (A) Figure of the fault model, tomographic solution and error result are given from top to bottom respectively; (B) Figure of the sloped dike model, tomographic solution and error result are given from top to bottom respectively.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Bishop, T.N., Bube, K.P., Cutler, R.T., Langan, R.T., Lowe, P.L., Reinsch, J.R., Shuey, R.T., Spindler, D.A., Wyld, H.W., 1985,** Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media: *Geophysics* 50, 903-923.
- Bois, P., La Porte, M., Lavargne, M., and Thomas, G., 1972,** Well to well seismic Measurements, *Geophysics* 37, 471-480.
- Bregman, N.D., Bailey, R.C., and Chapman, C.H., 1989,** Cross-hole seismic tomography, *Geophysics*, V. 54, 200-215.
- Devaney, A.W., 1984,** Geophysical diffraction tomography: *Inst. Electr. Electron. Eng. Trans. Geosince and Remote Sensing, GE-22*, 3-13.
- Dines, K.A., and Lytle, R.J., 1979,** Computerized geophysical tomography: *Proc., Inst. Electr. and Electron. Eng.*, 67, 1065-1073.
- Golub, G.H., and Reinsch, C., 1970,** Singular value decomposition and least square solution, in *Wilkinson, J., and Reinsch, C., Eds., Handbook for automatic computation, II, linear algebra: Springer-Verlag.*
- Iverson, W.P., 1988,** Crosswell logging for acoustic impedance: *J. Petr. Tech.*, 75-82.
- McMechan, G.A., 1983,** Seismic tomography in boreholes: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 74, 601-602.
- Tur, H., 1997,** Zaman Ortamında Sismik "Q" Tomografisi, Doktora Tezi.
- Wong, J., Hurley, P., West, G.F., 1983,** Crosshole seismology and seismic imaging in crystalline rocks: *Geophys Res. Lett.*, 10, 686-689.
- Worthington, M.H., 1984,** An introduction to geophysical tomography: *First Break*, 2, 20-26.

Makalenin geliş tarihi : 13.12.1999
Makalenin yayına kabul tarihi : 16.04.2001
Received : December 13, 1999
Accepted : April 16, 2001