



## Yer radarı modellemesinde fiziksel ve geometrik parametre etkilerinin araştırılması

### *Investigation of the effects of physical and geometrical parameters in ground penetrating radar modelling*

T. Özgür KURTULMUŞ<sup>1</sup>, Mahmut G. DRAHOR<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Sığ Jeofizik ve Arkeolojik Prospeksiyon Araştırma ve Uygulama Merkezi (SAMER), Tınaztepe Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008

Kabul (accepted) : 14 Temmuz (July) 2008

#### ÖZ

Bu çalışmada, yer radarı yöntemi için küre ve küp şeklindeki yapay benzetim modelleri kullanılarak, yeraltında gömülü yapıların fiziksel ve geometrik özelliklerindeki değişimlerin radargramlar üzerindeki etkileri test edilmiştir. Kullanılan fiziksel parametreler; bağıl dielektrik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve bağıl manyetik geçirgenliktir. Model yapıların derinlik, şekil ve boyutları ise geometrik parametreleri oluşturmaktadır. Yapay yer radarı modelleme çalışmaları, gömülü yapıların geometrik ve fiziksel parametrelerindeki değişimlerin radar yanıtlarını önemli oranda etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Elde edilen yapay radargramlarda, model ile ortama ait bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri arasındaki zıtlığın artmasıyla, yapıdan kaynaklanan yansımaların genliklerinde kuvvetlenme, tekrarlı yansımalarda artış ve alıcılara ulaşan radar dalgalarının varış zamanlarında önemli farklar gözlenmiştir. Model yapının elektrik iletkenliği arttığında ise yapının üst yüzeyinden oluşan yansıma hiperbolü belirginleşirken; radar dalgalarının yapı içinde sönümlenmesi nedeniyle, alt yüzeyden oluşan hiperbol zayıflamaktadır. Gömülü yapının bağıl manyetik geçirgenlik değerindeki artış, modelin üst yüzeyinden oluşan yansımaların geliş zamanlarında herhangi bir fark yaratmamasına karşın, radar dalgalarının model yapı içinde yavaşlaması nedeniyle, alt yüzeyden oluşan yansımaların alıcılara daha geç ulaşmalarına neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Modelleme, sığ jeofizik, yer radarı.

#### ABSTRACT

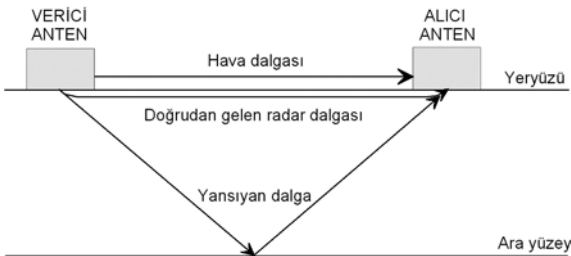
*In this study, the effects of changes in the physical and geometrical properties of the subsurface features on the radargrams were tested by using synthetic spherical and cubic models for Ground Penetrating Radar (GPR) simulations. The physical parameters used in this study are the relative dielectric permittivity, electrical conductivity and relative magnetic permeability. Depth, shape and dimensions of the synthetic model structures are also used as geometrical parameters. The synthetic ground penetrating radar modelling studies revealed that the radar responses were significantly affected by the changes of geometrical and physical parameters of the buried structures. The synthetic radargrams have revealed that the increase in the relative dielectric permittivity contrast between the*

model structures and the surrounding material, has resulted in stronger radar reflections, an increase in the multiple reflections and in larger differences of two-way travel time of the radar waves. With an increase in the electrical conductivity of the model structure, the reflection from the upper boundary of the model become clearer. Owing to the attenuation of the radar waves within the model structure, the reflections from the lower boundary become weaker. Although an increase in the magnetic permeability of the buried model structure does not affect the arrival times of the reflections from the upper boundary of the model, it causes the reflections from the lower boundary of the model to arrive the receivers at longer times by slowing down the radar waves within the model structures.

**Keywords:** Modeling, near-surface geophysics, ground penetrating radar.

## GİRİŞ

II. Dünya Savaşı'yla birlikte savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan radar sistemleri, radyo dalgalarından yararlanarak cisimlerin yerlerini ve uzaklığını belirleyebilen elektronik cihazlardır. Başlangıçta savunma amaçlı kullanılan bu elektronik aksamlar, daha sonra yeraltının fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır. Yer radarı (Ground penetrating radar) yöntemi, yeraltına gönderilen 10 ile 2000 MHz arasında değişen yüksek merkez frekanslı elektromanyetik radar darbelerinin yer içinde yayınımları sırasında karşılaştıkları farklı elektriksel ve manyetik özelliklere sahip süreksizliklerden, enerjilerinin bir bölümünün geriye yansiyarak yüzeydeki alıcı anten yoluyla kaydedilmesi ve bu yayılım boyunca geçen toplam sürenin ölçülmesi ilkesine dayanır (van der Kruk vd., 1999). Yansıyan dalganın alıcı anten ile verici anten arasındaki toplam yolculuk süresi nanosaniye düzeyindedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yer radarı sistemi ve yeraltında ilerleyen radar dalgalarının basitleştirilmiş gösterimi (Conyers ve Goodman, 1997).

Figure 1. A typical ground penetrating radar (GPR) system and radar waves into the ground (Conyers and Goodman, 1997).

Yer radarı, yüzeye yakın ortamlar içerisindeki yapılar ile bu yapıları çevreleyen ortamların fiziksel özelliklerinin araştırılmasında kullanılan önemli yöntemlerden birisidir. Eğer ortam koşulları yer radarı ölçüleri için uygunsa, örneğin ortam yüksek oranda kil ve su içermiyorsa, uygun anten seçimleriyle santimetre boyutlarındaki hedef yapıların yerleri ve gömülü oldukları derinlikler belirlenebilir. Yer radarı sistemleri bot, kızak ve tekerlekli araçlar gibi çeşitli tasarımlarla birçok alanda hızlı ve büyük boyutlu taramaları başara-bilecek özelliğe sahiptir. Son yıllarda tomografik ölçümlere olanak sağlayacak anten düzeneklerinin ortaya çıkmasıyla, yer radarı sığ aramacılıkta daha etkili bir yöntem durumuna gelmiştir. Yer radarı jeoteknik uygulamalarda mühendislik yapılarının inşa edileceği alanların yeraltı özelliklerinin saptanması ve bu yapıların donatılarının incelenmesi (Hugenschmidt, 2002), arkeoloji (Neubauer vd., 2002), çevre sorunları oluşturan gömülü yapılar ve buldukları ortamların belirlenebilmesi (Carcione vd., 2003), kentsel alanlarda alt yapı özellikleri ve sorunlarının ortaya çıkarılması ve haritalanması (Zeng ve McMechan, 1997), nehir ve göl alanlarındaki çökel tabaka istif özellikleri ve göl tabanları ile su derinliklerinin ortaya çıkarılması (Streich vd., 2006) gibi birçok soruna uygulanabilmesinin yanı sıra, adli tıp araştırmaları (Hammon vd., 2000), kara mayınlarının belirlenmesi (Lopera vd., 2007) ve buz kalınlığının saptanması (Annan ve Davis, 1977) gibi daha özel konularda da başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle, sığ jeofizik araştırmaların günümüzde en yaygın kullanılan yöntemlerinden biri durumuna gelmiştir.

Radar modellemesi, gömülü yapılar ile ortamdaki stratigrafik oluşumlar nedeniyle ortaya çıkan ara yüzeylerden kaynaklanan yansımaların

bilgisayar ortamında hesaplarının yapılarak, bu ortamlar için yapay radargramların elde edilmesini kapsar (Annan, 2001). Bu yaklaşım, ele alınan sorunun yorumlanabilmesine olanak sağlamanın yanı sıra; çalışılacak alanın özelliklerini yansıtacak modellerin oluşturulmasını da sağlayarak, arazi çalışmalarından önce uygun ekipman ve anten seçimine de yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada, yeraltında tekdüze bir ortam içine yerleştirilmiş küre ve küp şeklindeki basit model yapılar üzerinde çalışılmıştır. Yapay benzetim modelleri kullanılarak, modellemeyi doğrudan etkileyen fiziksel ve geometrik parametre değişimlerinin radar kesitleri üzerindeki etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir. Bununla birlikte, değişik merkez frekans değerlerine sahip antenler (100, 250 ve 1000 MHz) ve kaynak türlerinin (patlayan yansıtıcı, düzlem dalga ve nokta kaynak) seçiminin radar yanıtları üzerindeki etkileri de test edilmiştir. Fiziksel parametreleri model yapı ile onu çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve bağıl manyetik geçirgenlikleri oluştururken, model yapının derinliği, şekli ve boyutları da geometrik parametreleri oluşturmaktadır. Modelleme çalışmaları, REFLEXW (ver. 3.5.8) programıyla, basit geometrik yapıların benzetim modelleri için iki boyutlu olarak yapılmış ve yapay radargramlar oluşturulmuştur.

### YER RADARI MODELLEMESİ

Yer radarı çalışmalarında yeraltının tekdüze olmaması radargramları karmaşıktırmakta ve yorumlamayı zorlaştırmaktadır. Yorumlama olgusunu güçlendirmenin bir yolu da, yapay benzetim modelleridir. Son yıllarda modelleme çalışmaları ile olası radar yanıtlarının bilgisayar ortamındaki benzetimlerinin elde edilmesi yaygın ve etkili olarak kullanılmaya başlamıştır (Conyers ve Goodman, 1997; Cassidy, 2007). Yapay yer radarı modellemesinde amaç, elde edilmesi olası radar yanıtlarının bilgisayar ortamındaki benzetimlerinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşım, yeryüzündeki vericiden yer içine gönderilen radar dalgalarının iletim, yansıma ve yayılım özelliklerinin benzetimini gerçekleştirme olanağı sağlamaktadır. Benzetim çalışmaları yardımıyla, yeraltındaki gömülü hedeflerin konum, derinlik ve şekil gibi özelliklerinin yanı sıra, elektriksel ve

manyetik özelliklerindeki değişimler de incelenebilmektedir. Bu değişimlerden yola çıkarak yeraltındaki jeolojik ortamların yansıma arayüzeyleri ile yeraltındaki ortamın stratigrafik anlamda modellenebilmesi olanaklı olmaktadır. Gerçek yer koşullarına benzer yapay radar kesitlerinin üretilmesi, araştırılan problemin çözümüne katkı sağlamanın yanı sıra, tekrarlı yansıma, kırınım ve geometrik saçılım gibi radar kesitlerinin yanlış yorumlanmasına yol açabilecek etkilerin ortaya konmasında da oldukça etkili bir yöntemdir (Goodman, 1994). Ayrıca, herhangi bir çalışma öncesinde yapılacak radar benzetimlerinin gerçekleştirilmesiyle, uygun ölçüm düzeni planlanabilir ve hedef yapıları belirleyebilecek frekans değerlerine sahip antenler seçilebilir (Conyers ve Goodman, 1997).

Günümüzde gelinen noktada, yer radarı modellemesi yer içinde yayılan radar dalgalarının iletim, saçılım ve yansıma özelliklerinin üç boyutlu benzetimine olanak sağlamanın yanı sıra, antenlerin elektronik özelliklerinin benzetimine de olanak vermektedir. Söz konusu bu özellikleri yansıtan model yanıtların hesaplanmasında, basit ışın izleme ve bir boyutlu iletim-yansıma yöntemlerinden başlanarak, çok daha karmaşık ortamların çözümüne olanak tanıyan momentler yöntemi, sonlu elemanlar ya da sonlu farklar yöntemleri gibi çeşitli sayısal çözüm tekniği kullanılmaktadır (Cassidy, 2007).

İki ya da üç boyutlu modellerin farklı anten frekanslarına göre elektromanyetik yanıtlarının hesaplanmasında etkili sonuçlar veren yöntemlerden birisi de, Maxwell denklemlerinin zaman ortamında çözümüne olanak tanıyan sonlu farklar yöntemidir (Roberts ve Daniels, 1997; Xu ve McMechan, 1997; Bergmann vd., 1998). Sonlu farklar ağının hücresel özelliği nedeniyle, bu yöntemle yapılan çözümlemede basit yeraltı yapılarının yanı sıra, karmaşık yeraltı yapılarına ait model yanıtları da uzun süre gerektirmeden hesaplanabilmektedir. Ayrıca bu teknik, diğer hesaplama teknikleri ile yapılamayan ve radar kuramında önemli bir yeri olan radar anteninin yakın alanındaki gömülü hedeflerden oluşan saçılmaların modellenebilmesine de olanak vermektedir (Roberts ve Daniels, 1997).

## KULLANILAN ALGORİTMA VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Yer radarı modelleme çalışmaları iki boyutlu model yapılar için gerçekleştirilmiştir. Programda radar ışın yolları sonlu farklar hesaplama tekniği kullanarak saptanmış ve böylece bu ışın yolları yardımıyla yeraltında yayılan elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenleri hesaplanmıştır (Cassidy, 2007). Dalga yayılımının benzetimi Maxwell denklemlerinin çözümüne dayanır. Kullanılan çözüm yöntemi, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların seyahat süreleri ve genliklerinin hesaplanmasına olanak vermektedir. Oluşturulan model, öncelikle seçilen merkez frekans değerine bağlı olarak, program tarafından hesaplanan en küçük dalga boyuna göre belirlenen kritik bir uzaysal artışla, x ve z yönlerinde hücrelere ayrılmaktadır. Daha sonra, önceki zamana ait elektrik ve manyetik alan bileşenleri kullanılarak doğrudan (explicit) bir yöntem yardımıyla zamanın belirli bir noktasındaki (hesabı istenen nokta) elektrik ve manyetik alanların x, y ve z yönlerindeki bileşenleri hesaplanır. Çözümler sırasında, seçilen fiziksel parametrelerin y yönünde sabit ve frekanstan bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Çözümleme, düzlem dalga, nokta kaynak ve patlayan yansıtıcı (exploding reflector) olmak üzere üç farklı kaynak türü için gerçekleştirilebilir.

### Basit Modellerin Tanımı

Bu çalışmada, yer radarı yönteminde, yeraltında gömülü yapıların fiziksel ve geometrik özelliklerindeki değişimlerin radar yanıtları üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için, temel modeller tasarlanmıştır ve bunların benzetimleri yapılmıştır. Tasarlanan modeller, uzaklık ( $x$ ) ve derinlik ( $z$ ) olarak  $10 \times 10$  m boyutlarında bir alan içerisinde gömülü durumda bulunan küre ve küp biçimli yapılardır (Kurtulmuş, 2007). 1 m çapında tasarlanan küre modelin yeraltında homojen bir ortam içinde 0.5 m derinlikte gömülü olduğu varsayılmıştır.  $1 \times 1 \times 1$  m boyutlarındaki küp model ise, küre modele benzer şekilde, 0.5 m derinliğe yerleştirilmiştir. Her iki modelde de, 1. ortam model yapıyı, 2. ortam ise model yapının gömülü bulunduğu tekdüze ortamı göstermekte olup, bağlı dielektrik geçirgenlik değerleri sıra-

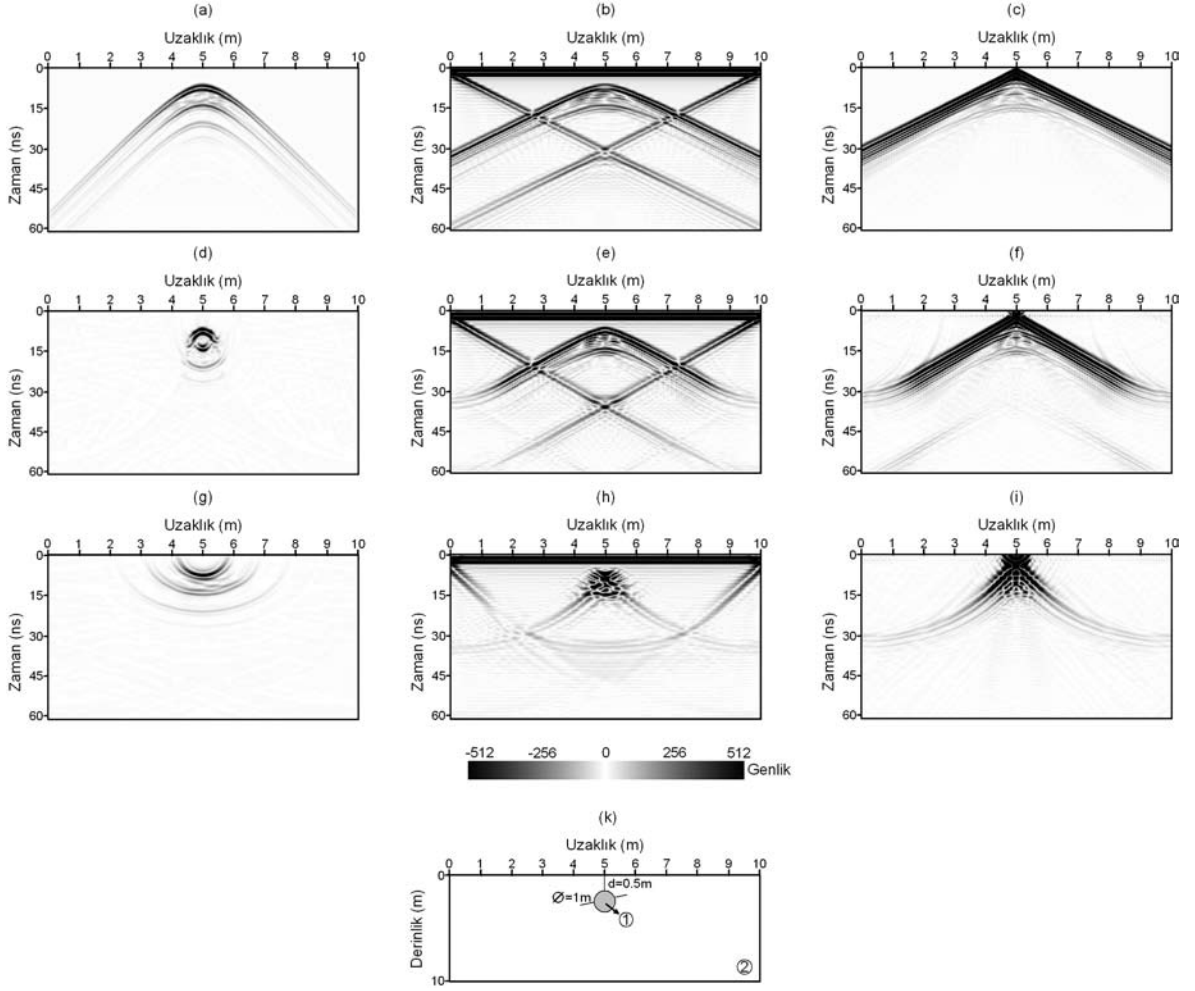
ısıyla  $\epsilon_{r_1} = 1$  ve  $\epsilon_{r_2} = 3$ , elektrik iletkenlik değerleri  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  S/m ve bağlı manyetik geçirgenlik değerleri ise  $\mu_1 = \mu_2 = 0$  olarak seçilmiştir.

Öncelikle yapay model yanıtlarını hesaplamada kullanılacak kaynak türünü belirleyebilmek amacıyla, yukarıda tanımlanan üç farklı kaynak türü için yapay radargramlar elde edilmiştir. Düzlem dalga ve nokta kaynağa ait radargramların hesaplanmasında, düzlem dalga kaynağı yeryüzüne ( $z=0$  m), nokta kaynak ise 10 m boyundaki profilin tam ortasına ve yeryüzüne ( $x=5$  ve  $z=0$ m) yerleştirilmiştir. Burada, nokta kaynak için gerçekleştirilen hesaplamaların sadece  $x=5$  ve  $z=0$  m'deki kaynak görüntüsü olduğu ve buna ilişkin tam bir radar kesitini yansıtmadığı unutulmamalıdır. Daha sonra farklı kaynak türleri için hesaplanan bu yapay radar yanıtları, Stolt (1978) tarafından bulunan göç işlemine tabi tutulup, kullanılan kaynak türlerinin model yapının gerçek şekil ve konumunu tanımlamada yeterli olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Göç işlemi sırasında yer radarı yönteminde bağlı dielektrik geçirgenlik ve radar dalga hızı arasındaki ilişkiyi veren aşağıdaki denklem kullanılarak, hem ortamın ( $v=0.173$  m/ns) hem de model yapının hız değerleri ( $v=0.3$  m/ns) için yapay radargramlar hesaplanmıştır.

$$V = \frac{C}{(\epsilon_r)^{0.5}} \quad (1)$$

Burada; V radar dalgalarının ortam içindeki hızı, C ışık hızı (0.2998 m/ns) ve  $\epsilon_r$  radar dalgalarının ilerlediği ortamın bağlı dielektrik geçirgenlik değeridir (Conyers ve Goodman, 1997). Modeller sırasında, model sınırlarında kararsızlıkların oluşmaması için soğurucu sınır koşulları kullanılarak sınır belirlemesi işlemi yapılmıştır. Şekil 2 ve 3'te yukarıda değinilen tasarımsal modeller için 250 MHz merkez frekans değerine göre hesaplanmış yapay radargramlar ile göç işlemi sonucu elde edilen radargramlar verilmiştir.

Elde edilen yapay radargramlar incelendiğinde, patlayan yansıtıcı ve düzlem dalga kaynakları için hem küre hem de küp biçimli model yapıdan kaynaklanan hiperbol şekilli belirtiler ortaya çık-



Şekil 2. Küre modelinin farklı kaynak türlerine göre elde edilen yapay radargramları ile göç işlemi sonucu elde edilen yapay radargramlar: Göç işlemi öncesi (a) patlayan yansıtıcı, (b) düzlem dalga ve (c) nokta kaynak; ortamın hız değerine ( $v = 0.173$  m/ns) göre yapılan göç işlemi sonrası (d) patlayan yansıtıcı, (e) düzlem dalga ve (f) nokta kaynak; küre modelinin hız değerine ( $v = 0.3$  m/ns) göre yapılan göç işlemi sonrası (g) patlayan yansıtıcı, (h) düzlem dalga ve (i) nokta kaynak, (k) model görüntüsü.

Figure 2. Synthetic radargrams obtained for different source types of the spherical model and their migrated sections: (a) exploding reflector, (b) plane wave and (c) point source before migration process; (d) exploding reflector, (e) plane wave and (f) point source after migration process. The migration velocity of surrounding material is 0.173 m/ns; (g) exploding reflector, (h) plane wave and (i) point source migrated after migration process. The migration velocity of sphere is 0.3 m/ns; (k) image of the model.

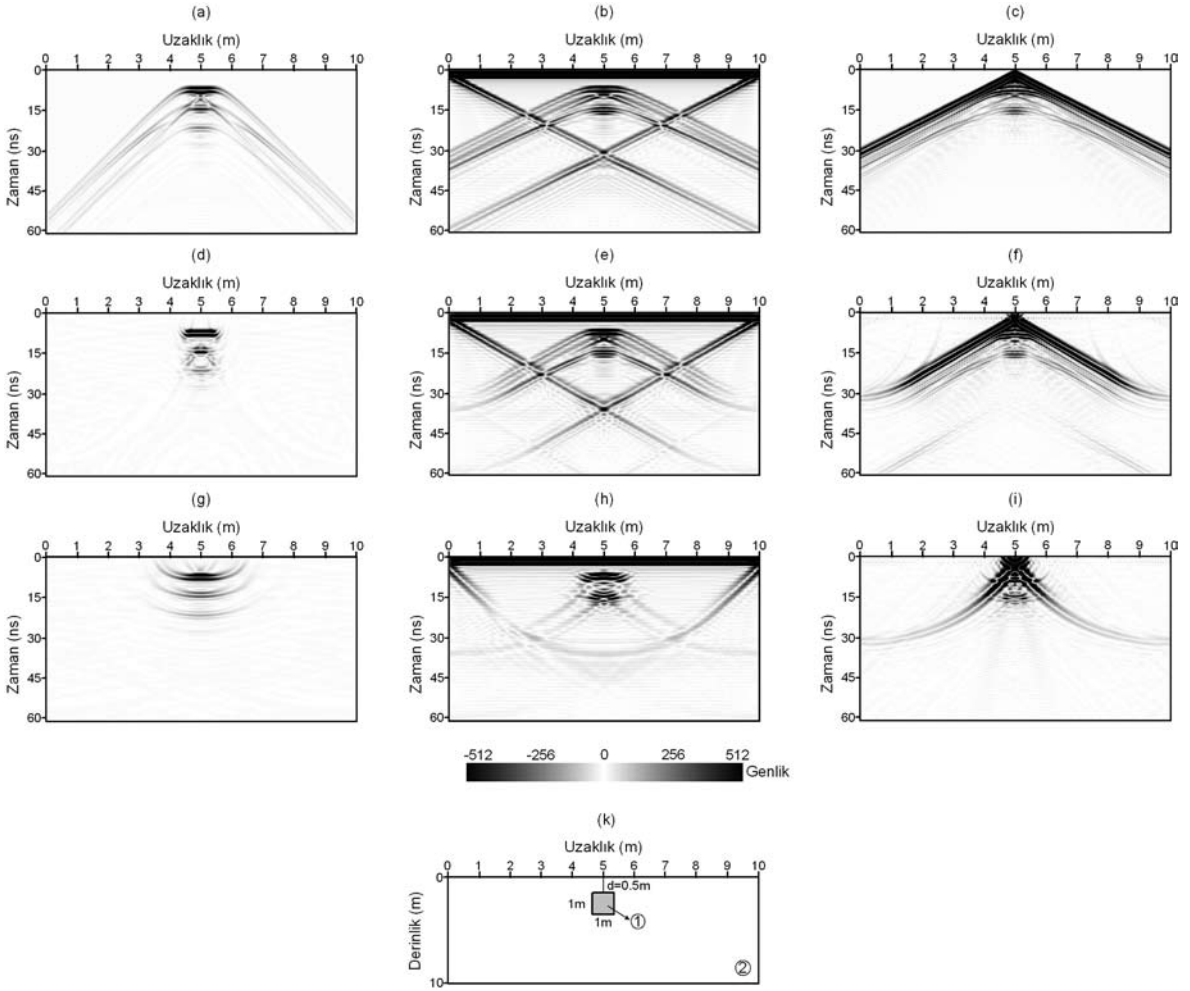
makla birlikte, nokta kaynak modelinde doğrudan gelen radar dalgalarının etkisiyle radargramlarda model yapının belirtisi görülememektedir (Şekil 2a-c ve 3a-c). Her iki modellemeye de tekdüze ortamın hız değeri ( $v = 0.173$  m/ns) kullanılarak gerçekleştirilen göç işleminin patlayan yansıtıcı kaynak türü için tasarımsal modele benzeyen bir görüntü verdiği görülmektedir. Hem küre, hem de küp modeli için göç işleminden sonra elde edilen yapay radargramlarda model yapının bu-

lunduğu yer, hiperbol kolları ortadan kalkmış olarak radargramlarda ortaya çıkmıştır (Şekil 2d ve 3d). Bununla birlikte, göç işleminde model yapının hız değeri ( $v = 0.3$  m/ns) kullanıldığında ise, yapıdan kaynaklanan yansımaların aşırı göç etmesi nedeniyle model yapının gerçek görüntüsünden uzaklaşmıştır (Şekil 2g ve 3g). Düzlem dalga modellemesinde ise, kaynak türüne bağlı olarak ortaya çıkan izler göç işlemi sonucunda giderilememiş olup, model yapının hız değeri

göre elde edilen sonuç bir oranda sade bir görüntü verse de, bu kaynak türü için model yapının belirlenmesinde başarılı bir sonuçtan söz etmek güçtür (Şekil 2e, 2h ve 3e, 3h). Noktasal kaynak modellemesinde ise, göç işlemi başarılı bir sonuç üretmemiştir (Şekil 2f, 2i ve 3f, 3i). Göç işlemi sonuçlarına göre, kaynak olarak kullanılan patlayan yansıtıcının, gömülü model yapının şekil ve konumu açısından diğer iki kaynak türüne

göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle, izleyen bölümlerde küre ve küp modelleri için bu kaynak türü kullanılarak yapılan modelleme sonuçları tartışılmıştır.

Kaynak türü ile ilgili seçimden sonra sırasıyla seçilen anten frekansı, yeraltı yapısının bağlı dielektrik geçirgenliği ( $\epsilon_r$ ), elektrik iletkenliği ( $\sigma$ ) ve bağlı manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) gibi parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışmanın



Şekil 3. Küp modelinin farklı kaynak türlerine göre elde edilen yapay radargramları ile göç işlemi sonucu elde edilen yapay radargramlar: Göç işlemi öncesi (a) patlayan yansıtıcı, (b) düzlem dalga ve (c) nokta kaynak; ortamın hız değerine ( $v=0.173$  m/ns) göre yapılan göç işlemi sonrası (d) patlayan yansıtıcı, (e) düzlem dalga ve (f) nokta kaynak; küp modelinin hız değerine ( $v=0.3$  m/ns) göre yapılan göç işlemi sonrası (g) patlayan yansıtıcı, (h) düzlem dalga ve (i) nokta kaynak, (k) model görüntüsü.

Figure 3. Synthetic radargrams obtained for different source types of the cubic model and their migrated sections: (a) exploding reflector, (b) plane wave and (c) point source before migration process; (d) exploding reflector, (e) plane wave and (f) point source after migration process. The migration velocity of surrounding material is 0.173 m/ns; (g) exploding reflector, (h) plane wave and (i) point source migrated after migration process. The migration velocity of cube is 0.3 m/ns; (k) image of the model.

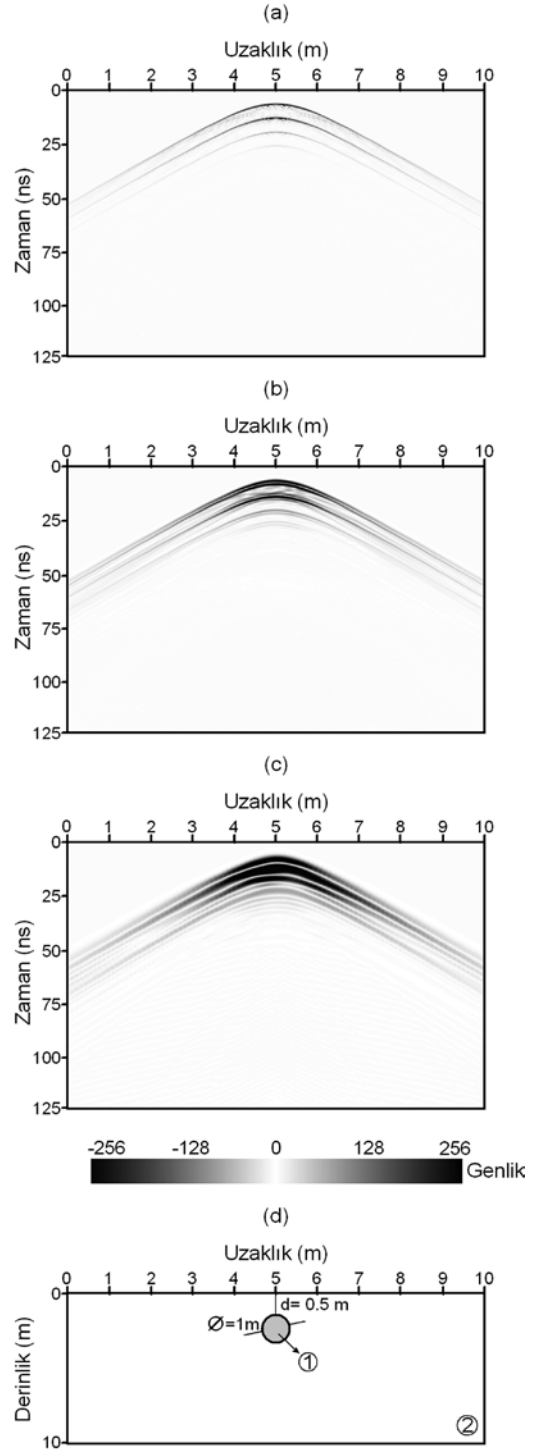
bu aşamasında model olarak, yeraltında 0.5 m derinliğe gömülmüş küre modeli üzerinde çalışılmıştır. Modellemeler sırasında yukarıda tanımlanan parametrelerin değişik değerleri için hesaplamalar yinelenmiş ve yapay radargramlar oluşturulmuştur. Daha sonra aynı modelin, ortamdaki fiziksel özellikleri değiştirilmeden, yapı boyutları ve yapının gömülü derinlikleri değiştirilerek, derinlik ve boyut etkisi araştırılmıştır. Son aşamada ise, diğer benzetim modeli olan küp modeli ile küre modeli aynı parametreler kullanılarak karşılaştırılmış ve böylece yapı şeklinin oluşturacağı değişim irdelenmeye çalışılmıştır.

### Parametre Etkileri

#### Antenin merkez frekansı

Yer radarı çalışmalarında doğru anten frekansının seçimi, yeraltı çözünürlüğü ile araştırma derinliğini belirleyebilmenin yanı sıra, yeraltına yayılan sinyalin baskın dalga boyunu ( $\lambda$ ) belirlediği için de çok önemlidir (Smith ve Jol, 1995; Conyers ve Goodman, 1997). Düşük merkez frekans değerine sahip antenler büyük dalga boylarından dolayı araştırma derinliğini arttırmaya karşın, çözünürlüğün azalmasına neden olur. Seçilen anten frekansının yapının belirlenebilirliği üzerindeki etkisini vurgulamak amacıyla üç farklı merkez frekans değeri için küre modeline ait yapay radargramlar elde edilmiştir. Hesaplamaların yapılmasında kullanılan frekans değerleri sırasıyla 1000, 250 ve 100 MHz'dir (Şekil 4).

Elde edilen yapay radargramlar incelendiğinde, tüm frekans değerleri için model yapıdan kaynaklanan hiperbol şekilli belirti ortaya çıkmıştır. Ancak tüm radargramlarda merkez frekansa bağlı olarak hiperbollerin görüntüsü birbirlerinden farklıdır. Elde edilen şekiller, frekans değerinin küçülmesinin hiperbol özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği ve yapının ayırt edilmesini güçleştirdiğini ortaya koymaktadır. 1000 ve 250 MHz'e ait radargramlarda genelde yapının alt ve üst yüzeylerinden kaynaklanan yansımalar oluşurken (Şekil 4a ve 4b), 100 MHz için kullanılan sinyalin dalga boyunun gömülü yapının boyutundan büyük olması nedeniyle böylesi bir ayırmadan söz etmek olanaklı değildir (Şekil 4c). Bu kısımda yapılan çalışmanın sonuçlarından, ya-



Şekil 4. Küre modelinin farklı merkez frekanslarına göre elde edilen yapay radargramları: (a) 1000 MHz, (b) 250 MHz, (c) 100 MHz, (d) model görüntüsü.

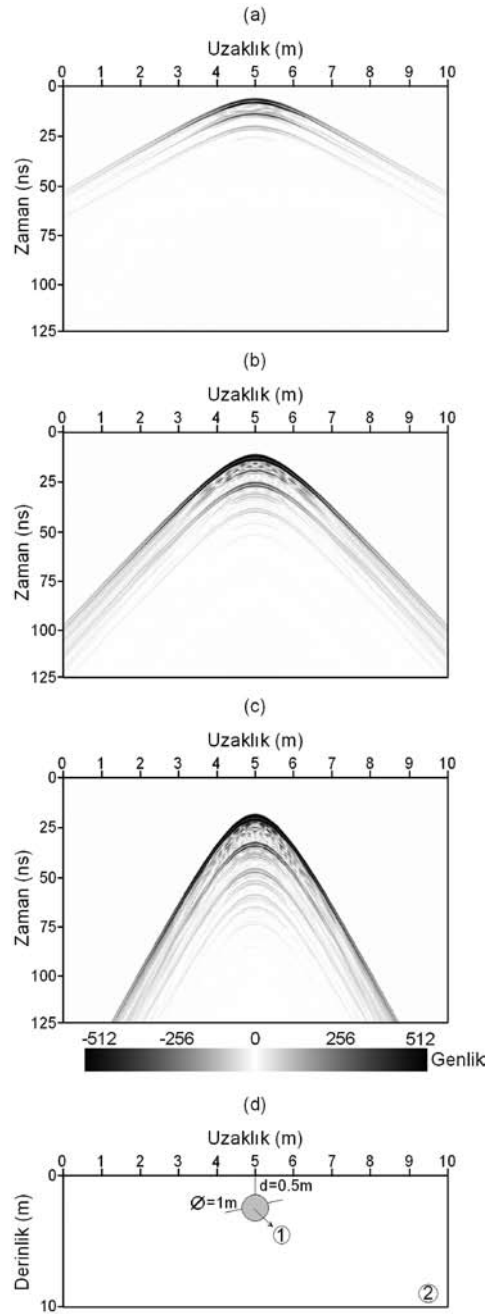
Figure 4. Synthetic radargrams obtained for different antenna frequencies of the spherical model: (a) 1000 MHz, (b) 250 MHz, (c) 100 MHz, (d) image of the model.

pay radargramların hesaplanmasında 250 MHz değerinin yeterli sonuçları verdiği düşünülerek, çalışmanın bundan sonraki aşamalarındaki modelleme işlemlerinde bu merkez frekans değeri kullanılmıştır.

### Bağıl dielektrik geçirgenlik

Elektromanyetik dalgalar zamanla değişen elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluştuğundan, içinden geçtikleri ortamların farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Bu önemli fiziksel özelliklerden biri de bağıl dielektrik geçirgenlik olup, radar dalgalarının yayılımını etkileyen en önemli parametredir. Bağıl dielektrik geçirgenlik, bir maddenin dielektrik geçirgenliğinin boşluğun dielektrik geçirgenliğe oranı ile hesaplanabilir (Annan, 2001). Radar dalgasının yeraltındaki bir yansıtıcıdan yansiyabilmesi için ortamlar arasında elektriksel bir zıtlığa gereksinim vardır. Bu olgu bağıl dielektrik anlamında düşünüldüğünde, ortaya çıkacak zıtlık artışı arayüzeylerden kaynaklanacak yansımaların genliklerinin büyümesine neden olacaktır. Böylece arayüzey daha belirgin olarak görülebilecektir. Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak, 1 m çaplı küre modelinin bağıl dielektrik geçirgenlik değeri ( $\epsilon_{r_1} = 1$ ) sabit tutulmuş ve yapıyı çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri artırılarak, model ile gömülü bulunduğu ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri arasındaki zıtlık artışının yapının belirlenebilmesindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla modelin gömüldüğü ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri ( $\epsilon_{r_2}$ ) sırasıyla 3, 10 ve 30 olarak seçilmiştir. Bu üç farklı değere göre elde edilen yapay radargramlar Şekil 5'te verilmiştir.

Elde edilen radargramlar incelendiğinde, yapıyı çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerinin artmasıyla hiperbol kollarının daraldığı görülmüştür. Küre modeli ile ortam arasındaki bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerindeki zıtlığın artışına bağlı olarak, yapıdan kaynaklanan hiperbolik yansımaların genlik değerlerinde yükselme ve tekrarlı yansımalarda artış da ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, tekdüze ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerindeki artış, yapıdan yansıyan radar dalgalarının ortam içerisinde daha yavaş hareket etmelerine ve alıcıya daha geç ulaşma-



Şekil 5. Küre modelini çevreleyen ortamın sahip olduğu farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramlar: (a)  $\epsilon_{r_2} = 3$ , (b)  $\epsilon_{r_2} = 10$ , (c)  $\epsilon_{r_2} = 30$ , (d) model görüntüsü. Model yapısının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri  $\epsilon_{r_1} = 1$ 'dir.

Figure 5. Synthetic radargrams obtained for different relative dielectric permittivities of surrounding material for the spherical model: (a)  $\epsilon_{r_2} = 3$ , (b)  $\epsilon_{r_2} = 10$ , (c)  $\epsilon_{r_2} = 30$ , (d) image of the model. The relative dielectric permittivity of spherical model is  $\epsilon_{r_1} = 1$ .



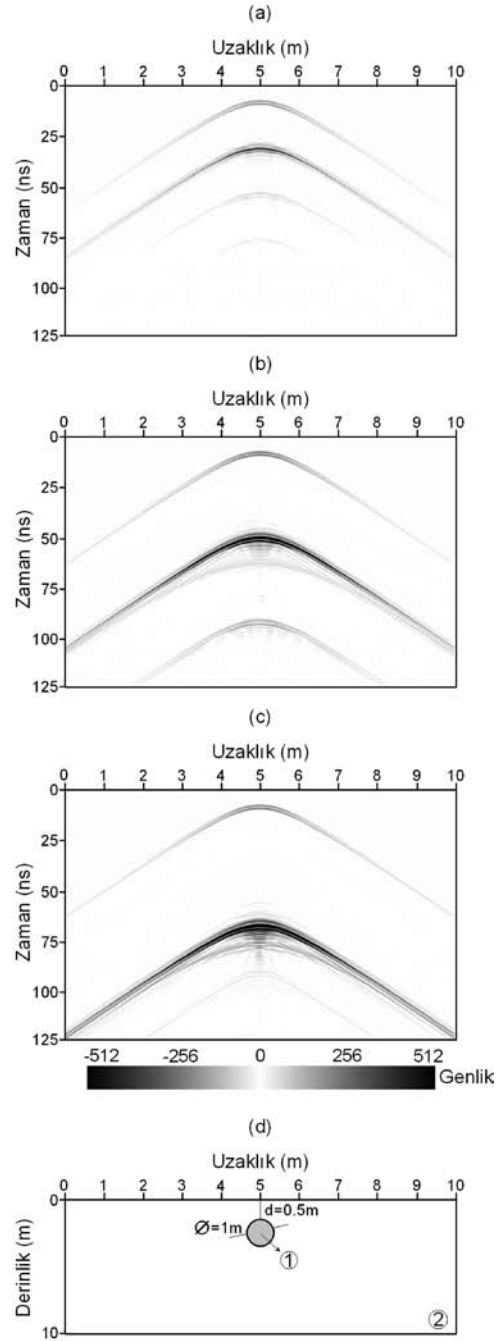
larına neden olmaktadır (Şekil 5a-c).

Uygulamanın ikinci aşamasında, model yapının dielektrik özelliğindeki artışın yapının belirlenebilirliği üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak amacıyla, yapıyı çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri ( $\epsilon_{r_2}=1$ ) sabit tutulmuş ve model yapının bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri  $\epsilon_{r_1}$  sırasıyla 12, 40 ve 80 olarak seçilmiştir (Şekil 6). Modelleme sonucunda üretilen yapay radargramlara göre, gömülü yapının bağıl dielektrik geçirgenlik değerindeki artışa bağlı olarak, yapının yüzeylerinden oluşan yansımalar arasında önemli zamansal farklar görülmektedir. Radargramlarda yapının yüzeye yakın üst bölümünden yansıyan radar dalgalarının varış zamanları aynı iken, bağıl dielektrik geçirgenlik değerindeki artışa koşut olarak alt yüzeyden yansıyıp yeryüzüne ulaşan radar dalgalarında gecikmeler oluşmaktadır. Böylece, radar dalgalarında gömülü küre içindeki dielektrik geçirgenlik artışına koşut olarak varış zamanlarında önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır (Şekil 6a-c).

### Elektrik iletkenlik

Elektrik iletkenliğe sahip ortamlar elektromanyetik enerjiyi saçıcı ortamlar olarak tanımlanmaktadır. Bu ortamlar içerisine giren elektromanyetik enerji, elektromanyetik alanın elektrik alan bileşeninin ortam içerisinde manyetik alan bileşeninden ayrılıp enerji dönüşümüne uğraması nedeniyle saçılıp hızlı bir şekilde sönmüştür ve elektromanyetik dalgalar bu ortamlarda çok fazla ilerleyemezler (Annan, 2001). Bu aşamada, daha önce kullanılan 1 m çaplı küre modelin sadece elektrik iletkenlik parametre değerleri değiştirilerek yapının iletkenliğindeki artışın radar yanıtları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tasarlanan benzetim ortamında küre biçimli yapıyı çevreleyen ortamda iletkenliğin olmadığı varsayılmış ( $\sigma_2 = 0$  S/m) ve tasarlanan modelde kürenin elektrik iletkenlik değerleri ( $\sigma_1$ ) sırasıyla 0.0001, 0.1, 0.5 ve 1 S/m seçilmiştir. Daha önceki modellerde olduğu gibi bu modelde de, kürenin ve ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri  $\epsilon_{r_1} = 3$  ve  $\epsilon_{r_2} = 1$  ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri ise  $\mu_1 = \mu_2 = 1$  olarak seçilmiştir (Şekil 7).

Elde edilen yapay radargramlar incelendiğinde, küre modelinin elektrik iletkenlik değerindeki ar-



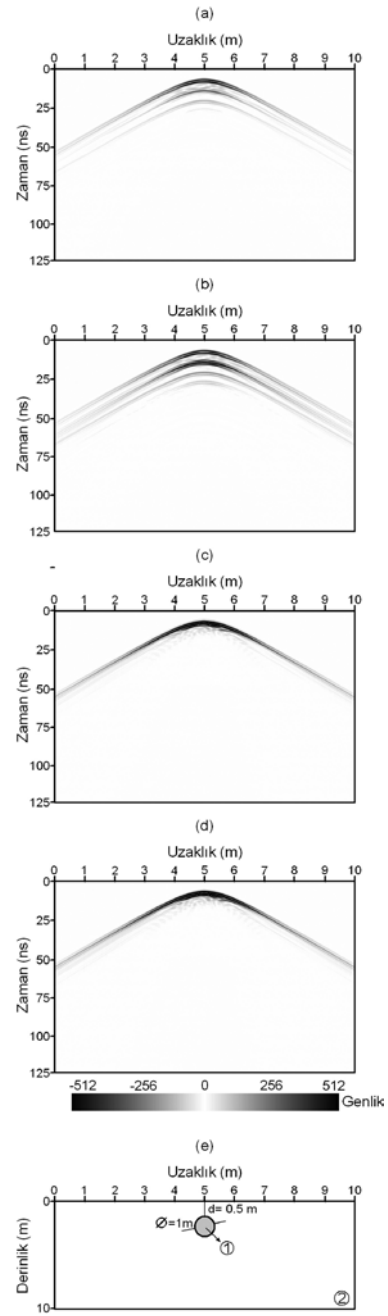
Şekil 6. Küre modelinin farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a)  $\epsilon_{r_1} = 12$ , (b)  $\epsilon_{r_1} = 40$ , (c)  $\epsilon_{r_1} = 80$ , (d) model görüntüsü. Model yapıyı çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri  $\epsilon_{r_2} = 4$ 'tür.

Figure 6. Synthetic radargrams obtained for different relative dielectric permittivities of the spherical model: (a)  $\epsilon_{r_1} = 12$ , (b)  $\epsilon_{r_1} = 40$ , (c)  $\epsilon_{r_1} = 80$ , (d) image of the model. The relative dielectric permittivity of surrounding material is  $\epsilon_{r_2} = 4$ .

tıyla birlikte hiperbolün üst kanadındaki belirgin iz sabit biçimde izlenirken, alt kanattaki genliklerin ve tekrarlı yansımaların kalktığı görülmüştür.  $\sigma_1 = 0.0001$  S/m ve  $\sigma_1 = 0.1$  S/m elektrik iletkenlik değerlerine ait yapay radargramlarda pozitif ve negatif genlikli, tekrarlayan karmaşık hiperbol görüntüleri bulunurken (Şekil 7a-b), küresel modelin elektrik iletkenlik değerinin 0.1 S/m'den büyük seçildiği durumlarda, yapının üst yüzeyinden kaynaklanan hiperbol belirginleşirken; alt yüzeyden oluşan hiperbolün etkisi giderek azalmakta ve  $\sigma_1 = 0.5$  S/m değerinden sonra da tümüyle ortadan kalkmaktadır (Şekil 7c-d). Bu durumun, yüksek iletkenlik koşulları altında model yapı içine giren radar dalgalarının, yapının alt yüzeyine ulaşmadan çok hızlı bir biçimde sönmüşlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece yüksek iletkenliğe sahip hedef yapıların zıtlık oluşturan üst yüzeylerinden yansıyan sinyallerin yeryüzüne ulaştığı ve radar dalgalarının ortam içinde sönmüşlenmesi nedeniyle derinden herhangi bir bilginin yeryüzüne ulaşmadığı model sonuçlarında izlenmektedir.

### Bağıl manyetik geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik, manyetik özelliğe sahip bir maddedeki atom ve moleküllerin dışarıdan uygulanan bir manyetik alana bağlı olarak hareket etmesi ve manyetik dipol momentlerinin dizilebilme ölçüsüdür. Bir maddenin manyetik geçirgenliğinin, boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır. Bağıl manyetik geçirgenlik parametresi radar uygulamalarında elektriksel özelliklere göre daha az bir etkiye sahip olmakla birlikte, ortamın çok yüksek manyetik geçirgenlik değerine sahip olduğu durumlarda, elektromanyetik dalgaların hareketi etkilenmektedir. Çalışmanın bu aşamasında, çapı 1 m olan küre biçimli modelin sadece bağıl manyetik geçirgenlik değerleri incelenmiş ve bu değişimin etkisi birbirlerinden oldukça farklı değerler için irdelenerek, bunların radar yanıtları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, yapıyı çevreleyen ortamın bağıl manyetik geçirgenlik değeri sabit tutulurken, gömülü model için dört farklı bağıl manyetik geçirgenlik değeri kullanılmıştır. Çevreleyen ortam için  $\mu_2 = 1$  olarak işleme sokulurken, model yapının bağıl manyetik geçir-



Şekil 7. Küre modelinin farklı elektrik iletkenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a)  $\sigma_1 = 0.0001$  S/m, (b)  $\sigma_1 = 0.1$  S/m, (c)  $\sigma_1 = 0.5$  S/m, (d)  $\sigma_1 = 1$  S/m, (e) model görüntüsü. Küre yapıyı çevreleyen ortamın elektrik iletkenlik değeri  $\sigma_2 = 0$  S/m'dir.

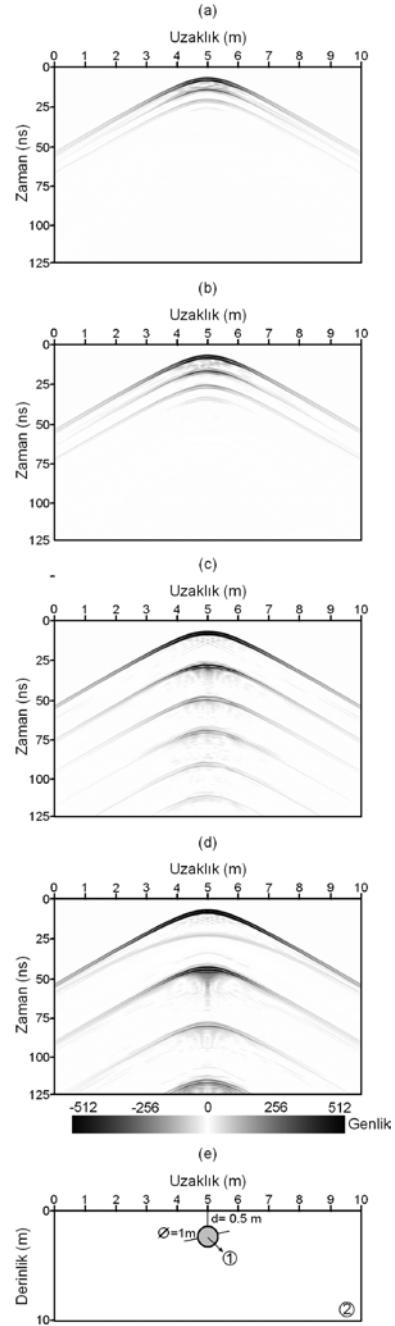
Figure 7. Synthetic radargrams obtained for different electrical conductivities of the spherical model: (a)  $\sigma_1 = 0.0001$  S/m, (b)  $\sigma_1 = 0.1$  S/m, (c)  $\sigma_1 = 0.5$  S/m, (d)  $\sigma_1 = 1$  S/m, (e) image of the model. The electrical conductivity of surrounding material is  $\sigma_2 = 0$  S/m.

genlik değeri ( $\mu_1$ ) ise sırasıyla 1.001, 2, 10 ve 30 olarak tasarlanmış ve böylece dört farklı yapay radargram elde edilmiştir (Şekil 8).

Oluşturulan yapay radargramlarda, aranan gömülü model yapının bağıl manyetik geçirgenlik değerlerindeki artışla birlikte, model yapının üst ve alt yüzeylerinden oluşan yansımalar arasında önemli zamansal farklar ortaya çıkmaktadır (Şekil 8a-d). Bu durumda modelin üst yüzeyinden kaynaklanan yansıma hiperbolünün varış zamanında herhangi bir fark oluşmamasına karşın, modelin alt yüzeyinden yansıyor yeryüzüne dönen radar dalgalarının alıcılara daha geç ulaştıkları izlenmiştir. Bununla birlikte, düşük bağıl manyetik geçirgenlik değerlerinde daha az yinelenen ve kısa zaman aralıkları içinde birbirini izleyen pozitif ve negatif genlikler; manyetik geçirgenlik değerindeki artışa koşut olarak daha fazla sayıda tekrarlanma göstermiştir. Varış zamanları arasındaki bu fark ve tekrarlı yansımalarındaki bu artış model yapının ( $\mu_1$ ) 10 ve 30 değerleri için belirgin olarak izlenmiştir (Şekil 8c-d). Bu sonuç, bağıl manyetik geçirgenlik değerindeki artışın elektrik iletkenlik değerindeki artıştan oldukça farklı radargramlar üreteceğini ortaya koymuştur. Yapılan modelleme çalışmasıyla, her ne kadar yüksek manyetik geçirgenlik durumuyla doğada yaygın olarak karşılaşılsa da, yüksek manyetik geçirgenlik değerlerine sahip olabilecek yeraltı özelliklerinin bulunması durumunda bu konunun da göz önüne alınmasının gerekli olduğu görülmüştür.

### Yapı boyutu ve derinliği

Yer radarı uygulamalarında yeraltı yapılarının belirlenebilmesi için, yapıların sahip oldukları fiziksel özelliklerin yanı sıra, bu yapıların geometrik özellikleri ve yeraltındaki konumları ile derinlikleri de önem taşımaktadır. Yapı boyutlarındaki artış, yapının belirlenebilirliğini arttıran bir etken olmakla birlikte, derinlik olgusu da yapı belirlenimini etkileyen önemli bir özelliktir. Çalışmanın bu aşamasında, ilk olarak yapı boyutlarındaki artışın modelin belirlenebilirliği üzerindeki etkisini vurgulamak amacıyla, çapı sırasıyla 0.1, 0.25, 1 ve 2 m olan ve yeraltında 1 m derinlikte gömülü bulunan küre modelleri tasarlanmıştır. Tasarlanan modelde daha önce kullanılan küre

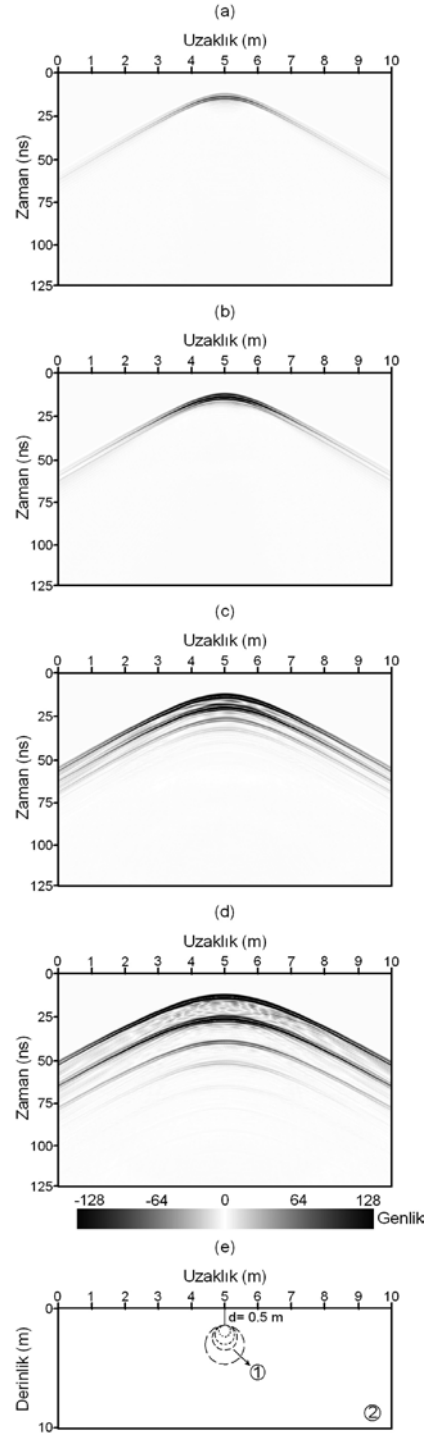


Şekil 8. Küre modelinin farklı bağıl manyetik geçirgenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a)  $\mu_1 = 1.001$ , (b)  $\mu_1 = 2$ , (c)  $\mu_1 = 10$ , (d)  $\mu_1 = 30$ , (e) model görüntüsü. Küre yapıyı çevreleyen ortamın bağıl manyetik geçirgenlik değeri  $\mu_2 = 1$ 'dir.

Figure 8. Synthetic radargrams obtained for different relative magnetic permeabilities of the spherical model: (a)  $\mu_1 = 1.001$ , (b)  $\mu_1 = 2$ , (c)  $\mu_1 = 10$ , (d)  $\mu_1 = 30$ , (e) image of the model. The relative magnetic permeability of surrounding material is  $\mu_2 = 1$ .

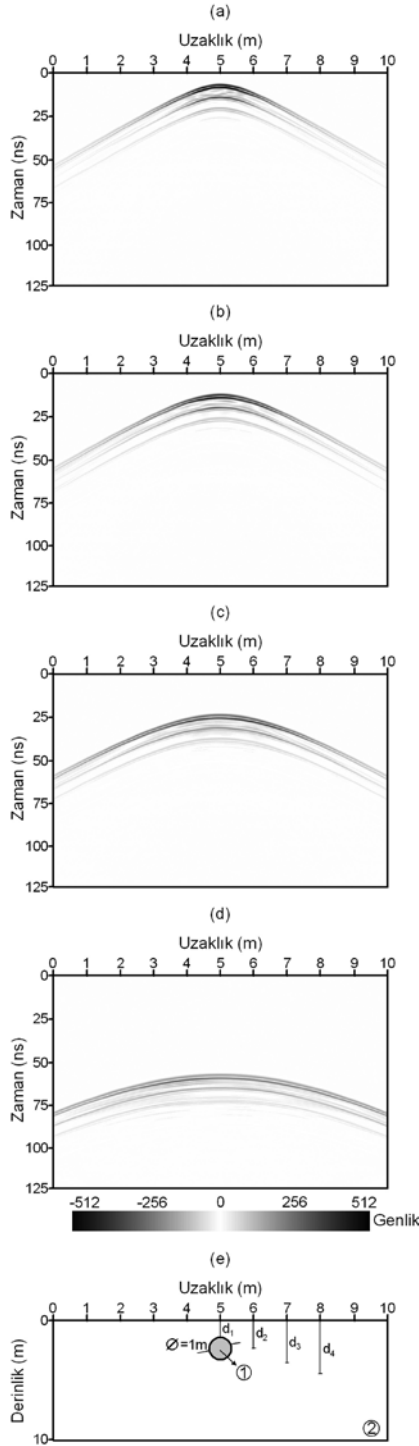
modelde olduğu gibi, 1. ortam model yapıyı, 2. ortam ise tekdüze ortamı göstermekte olup; bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla  $\epsilon_{r1} = 1$  ve  $\epsilon_{r2} = 3$ , elektrik iletkenlik değerleri  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  S/m ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri ise  $\mu_1 = \mu_2 = 1$  olarak seçilmiştir (Şekil 9). Elde edilen radargramlar incelendiğinde, dört farklı boyuta sahip modellerin tümünde hiperboller izlenebilmiştir. Çapı 0.1 m olan küre model için genlikleri çok zayıf, kolları kısa olan tek bir hiperbol elde edilirken (Şekil 9a), yapı boyutundaki artışa koşut olarak daha belirgin hiperboller elde edilmiştir (Şekil 9b-d). Böylece model çapındaki artışla birlikte ayrımlılık ve hiperbol genlikleri artmakta, ancak ikincil yansımaların belirginleşmesi nedeniyle radargramların yorumlanması da zorlaşmaktadır.

Bu konudaki çalışmanın ikinci aşamasında derinlik etkisi araştırılmıştır. Böylece yeraltında gömülü 1 m çaplı bir kürenin tekdüze bir ortam içinde dört ayrı derinlik için gömülü olduğu durum araştırılmış ve yer radarı yöntemi açısından irdelenmiştir. Tasarlanan küre modellerinde kürenin gömülü bulunduğu derinlik sırasıyla 0.5, 1, 2 ve 5 m olarak seçilmiştir. Model yapı ve onu çevreleyen ortamın fiziksel parametre değerleri ise bir önceki model ile aynı tutulmuştur. Dört farklı derinlik değeri için modelleme sonucu elde edilen yapay radargramlar Şekil 10'da verilmiştir. Elde edilen yapay radargramlar arasında en güçlü genliğe sahip olan hiperbol Şekil 10a'da görülmektedir. Yapının derine ötelenmesi, ortaya çıkan hiperbolün genliğini zayıflatmakla birlikte, hiperbolün yayvanlaşmasına da neden olmaktadır (Şekil 10b-c). Yapının 5 m derinlikte gömülü olduğu durum için, hiperbol kanatlarının aşırı biçimde yayvanlaştığı ve genliklerin de oldukça bastırıldığı açıkça görülmektedir (Şekil 10d). Buradan elde edilen sonuç, model yapının derine ötelenmesiyle, yapıdan kaynaklanan hiperbolün genliğinin hızlı bir biçimde zayıflaması ve hiperbolün karakterini yitirmesi şeklinde ortaya konmuştur. Bu durum, derine doğru nüfuz eden radar dalgalarının derinde bulunan yapılarla ulaşana değin, içinden geçtikleri ortamların özelliklerine bağlı olarak sönmelenmeye uğramasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, elektromanyetik dalganın sönmelenmesinde ortamlar arasında önemli fiziksel ayrımların et-



Şekil 9. Küre modelinin farklı çap değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a)  $R = 0.1$  m, (b)  $R = 0.25$  m, (c)  $R = 1$  m, (d)  $R = 2$  m, (e) model görüntüsü.

Figure 9. Synthetic radargrams obtained for different diameters of the spherical model: (a)  $R = 0.1$  m, (b)  $R = 0.25$  m, (c)  $R = 1$  m, (d)  $R = 2$  m, (e) image of the model.



Şekil 10. Küre modelinin farklı derinlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a)  $d = 0.5$  m, (b)  $d = 1$  m, (c)  $d = 2$  m, (d)  $d = 5$  m, (e) model görüntüsü.

Figure 10. Synthetic radargrams obtained for different depths of the spherical model: (a)  $d = 0.5$  m, (b)  $d = 1$  m, (c)  $d = 2$  m, (d)  $d = 5$  m, (e) image of the model.

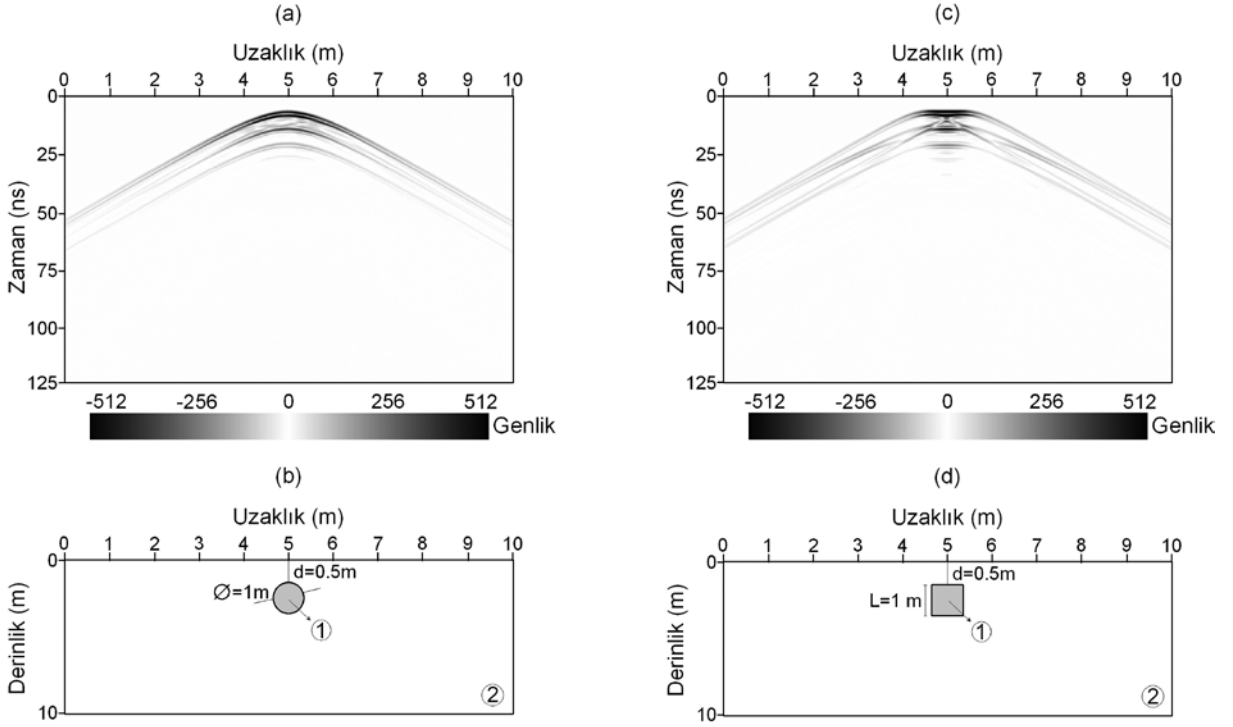
kisinin büyük olacağı ve ayrıca gömülü yapının özellikleri ile kullanılan antenin merkez frekansının da önem taşıdığı unutulmamalıdır.

### Yapı şekli

Tasarlanan modellerden sonuncusu, yapı şeklindeki değişimlerin radar kayıtlarına ne derece yansıtacağı ve elde edilecek radargramlarda ne tür görüntülerin oluşabileceğini ortaya çıkarmak amacıyla oluşturulan küp modeldir. Bu amaçla küp model, daha önce kullanılan ve sonuçları birçok parametreye bağlı olarak incelenen küre model ile karşılaştırılmıştır. Modelleme sırasında küpü çevreleyen ortamın fiziksel parametreleri küre model ile aynı tutulmuş ve sadece şekil değişiminin etkisi araştırılmıştır. Bu nedenle, 0.5 m derinliğe gömülmüş,  $1 \times 1 \times 1$  m boyutlarında bir küp kullanılmıştır. Buradaki tek fark model yapı şeklindeki değişikliktir (Şekil 11b-d). Elde edilen yapay radargramlar incelendiğinde, küre modelin geometrisine uygun olarak tam bir hiperbol şekli ortaya çıkarken (Şekil 11a), küp modelde hiperbolün tepe kısmının görüntüsü değişmiş ve yapı şeklindeki değişimin etkisi elde edilen sonuçlara yansımıştır (Şekil 11c). Böylece yapı biçiminin yansıma hiperbolü karakterinde önemli değişimlere neden olduğu ve radargram kayıtlarından yapı şekli hakkında bir ön bilginin edinilebileceği görülmüştür.

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; sığ jeofizik araştırmalarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan yer radarı yanıtlarının, iki boyutlu sonlu farklar modellemesiyle bilgisayar ortamındaki yapay benzetim modellerinden elde edilen sonuçların bir bölümü sunulmuştur. Modellerde, yapıların fiziksel ve geometrik parametreleri değiştirilerek, temel yapılar için oluşturulan benzetim modelleri yoluyla yapay radargramlar elde edilmiştir. Elde edilen yapay radar yanıtları, parametrelerdeki değişimlerin radar kayıtlarını önemli oranda etkilediğini göstermiştir. Model yapı ile yapının içinde bulunduğu ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri arasındaki farkın artışı, arayüzeylerden daha yüksek genlikte radar yansımalarının oluşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı



Şekil 11. Farklı geometrik şekle sahip modellerden elde edilen yapay radargramlar: (a) küre modelinin yapay radargramı, (b) küre modelinin görüntüsü, (c) küp modelinin yapay radargramı, (d) küp modelinin görüntüsü.  
 Figure 11. Synthetic radargrams obtained for different geometrical shapes: (a) synthetic radargram of the spherical model, (b) image of the spherical model, (c) synthetic radargram of the cubic model, (d) image of the cubic model.

sıra söz konusu bu artış, yapay radargramlarda tekrarlı yansımaların ortaya çıkmasına da neden olmaktadır. Bu etkiler radargramları daha karmaşık bir hale getirmekte ve bu durum radargramların yanlış yorumlanmasına da yol açabilmektedir. Ayrıca, radar dalgalarının ilerledikleri ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerindeki artış da, radar dalgalarının ortam içinde yavaşlamasına neden olmakta ve radar dalgalarının varış zamanlarını etkilemektedir.

Radar dalgalarının iletimini etkileyen diğer önemli bir parametre de elektrik iletkenliktir. Çalışmalar; kullanılan model yapıların elektrik iletkenlik değerindeki artışa koşut olarak, yapının üst yüzü ile gömüldüğü ortamın ara yüzünden daha belirgin yansımalar oluşmakla birlikte, yapının alt yüzeyinden herhangi bir yansıma oluşmadığını ortaya koymuştur. Bu durum ortamlarda elektrik iletkenliğe koşut olarak ortaya çıkan sönümlenme ile ilişkili olmaktadır.

Bağıl manyetik geçirgenlik değerleri üzerinde yapılan incelemeler ise, bağıl manyetik geçirgenlik değerinin artışı ile birlikte yapı ile ortam arayüzündeki yansımaların genliklerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Bağıl manyetik geçirgenlik değerlerindeki değişimler model ile onu çevreleyen ortam arasındaki arayüzlerden oluşan yansımaları daha da belirginleştirmektedir. Model yapının bağıl manyetik geçirgenlik değerinin artışı, yapının alt yüzeyinden yansıyor yeryüzüne dönen radar dalgalarının yüzeydeki alıcıya daha geç ulaşmasına ve yapay radargramlardaki tekrarlı yansımaların belirginleşip, artmasına neden olmaktadır. Bu durum, yüksek manyetik geçirgenlik değerine sahip ortamlardan elde edilecek radargramlar üzerinden yapılacak yorumlarda mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Radar modellemesinde elde edilen radar yanıtlarının niteliğini, model yapıların sahip oldukları

fiziksel özelliklerin yanı sıra, bunların geometrik özellikleri de belirlemektedir. Model yapı boyutlarındaki artış, yapının belirlenebilirliğini arttırmaktadır. Benzetim modellerinde radar yanıtlarını etkileyen bir diğer önemli geometrik parametrenin de yapının gömülü bulunduğu derinlik olduğu görülmektedir. Sığ derinliklerdeki model yapılar daha belirgin yansımalar üretirken, yapı derine ötelendiğinde yansıma hiperbollerini zayıflamakta ve tanımsallıktan uzaklaşmaktadır. Bu durum derinlikle radar dalgalarının sönümlenmesinden ve daha az radar enerjisinin derine ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Modelleme çalışmaları hiperbol biçimlenmesinde model yapının şeklindeki değişimin de yanıtları etkilediğini göstermiştir. Küre tipi modelde modelin geometrisine uygun biçimde tam bir hiperbol görüntüsü ortaya çıkarken, küp biçimli modelde hiperbolün tepe kısmının görüntüsü değişmiş ve yapı şeklindeki değişimin etkisi elde edilen sonuçlara yansımıştır.

Yapılan modelleme çalışmaları kullanılacak antenin merkez frekans değerinin de hedef yapıları belirlemede önemli olduğunu göstermiştir. Tasarımlanan model yapılardan elde edilen yapay radargramlarda frekans değerindeki düşüşün hiperbol özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği ve yapının ayırt edilmesini güçleştirdiği görülmektedir. Bu nedenle, yer radarı çalışmalarında yöntemin başarısını arttırmak için doğru anten frekansı seçiminin önemli olduğu görülmektedir.

Yorumlamada önemli diğer bir etken ise, elde edilen sonuçların ortamlar için yapılacak hız hesaplamalarına göre uygun göç işleminden geçirilmesidir. Böylece radargramlarda bu çalışmanın konusunu oluşturan değişik fiziksel ve geometrik özelliklere koşut olarak ortaya çıkabilecek olumsuz durumların da belirli oranlar içinde giderilebildiği gözlenmiştir. Bu nedenle, radar kayıtları üzerinde yapılacak göç işlemi yardımıyla yapılar gerçek şekillerine ve konularına daha benzer biçimlerde saptanabileceklerdir. Ancak bu çalışmada fiziksel ve geometrik değişimlerin ham radar kayıtları üzerindeki sonuçları irdelendiğinden, sadece kaynak türünü belirleme kısmında göç işlemleri hakkında bazı sonuçlar sunulmuştur.

Son olarak, arazi çalışması gerçekleştirilmeden önce, araştırma hedeflerinin daha iyi bir şekilde ortaya konması amacıyla yapılacak yapay yer radarı benzetim çalışmalarının büyük önem taşıyacağı belirtilmesi yararlı olacaktır. Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki önemli gelişmeler nedeniyle, modellemeler çok daha kısa süreler içinde ve daha gerçekçi bir biçimde oluşturulabilmektedir. Bu tür bir yaklaşımla, hem araştırma öncesi sorun hakkında yorum yapabilmeye olanağını verecek, hem de hedeflenen yapıların belirlenebilmesi için uygun yeraltı çözünürlüğünü sağlayabilecek uygun antenlerin seçilebilmesini sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Annan, A.P., 2001. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software Inc., Mississauga, Ontario, 197 p.
- Annan, A.P., and Davis, J.L., 1977. Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry. Geological Survey of Canada, Report of Activities Paper 77-1B, pp. 117-124.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O.A., and Holliger, K., 1998. Finite-difference modelling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, 63, 856-867.
- Carcione, J.M., Seriani, G., and Gei, D., 2003. Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 177-191.
- Cassidy, N., 2007. A review of practical numerical modelling methods for the advanced interpretation of ground-penetrating radar in near-surface environments. *Near Surface Geophysics*, 5, 5-21.
- Conyers, L.B., and Goodman, D., 1997. *Ground-Penetrating Radar, An Introduction for Archaeologists*. Altimira Press, California.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.

- Hammon, W.S., McMechan, G.A., and Zeng, X., 2000. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 171-186.
- Hugenschmidt, J., 2002. Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Journal Construction and Building Materials*, 16(3), 147-154.
- Kurtulmuş, T.Ö., 2007. Sığ jeofizik aramacılıkta yer radarı modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir (yayımlanmamış).
- Lopera, O., Milisavljevic, N., and Lambot, S., 2007. Clutter reduction in GPR measurements for detecting shallow buried landmines: a Colombian case study. *Near Surface Geophysics*, 5, 57-64.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., and Melichar, P., 2002. Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9 (3), 135-156.
- Roberts, R.L., and Daniels J.J., 1997. Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method. *Geophysics*, 62, 1114-1126.
- Sandmeier Scientific Software, 2008. REFLEXW ver. 3.5.8. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. User's manual. <http://www.sandmeier-geo.de>.
- Smith, D.G., and Jol, H.M., 1995. Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100.
- Stolt, R.H., 1978. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43, 23-48.
- Streich, R., van der Kruk, J., and Green, A.G., 2006. Three-dimensional multicomponent georadar imaging of sedimentary structures. *Near Surface Geophysics*, 4, 39-48.
- van der Kruk, J., Slob, E.C., and Fokkema, J.T., 1999. Background of ground-penetrating radar measurements. *Geologie en Mijnbouw*, 77, 177-188.
- Xu, T., and McMechan, G.A., 1997. GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5-dimensions. *Geophysics*, 62, 403-414.
- Zeng, X., and McMechan, G.A., 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, 62, 797-806.





## Manyetik verilerin iki-boyutlu ters-çözümü ve parametre değişim fonksiyonu

### *Two-dimensional inversion of magnetic data and parameter variation function*

**Yunus Levent EKİNCİ**

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Terzioğlu Yerleşkesi, 17020  
ÇANAKKALE

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008  
Kabul (accepted) : 21 Temmuz (July) 2008

#### **ÖZ**

Bu çalışmada, gravite verilerinin iki-boyutlu (2B) ters-çözümü için geliştirilmiş odaklama tekniğinin manyetik veriler üzerinde uygulanabilirliği irdelenmiştir. Bu amaçla MATLAB tabanlı 2B ters-çözüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile yeraltı birbirlerine eşit boyutlarda bloklara bölünmektedir. Miknatıslanma şiddeti dağılımının alanı en küçüğe indirgenerek, kaynak yapı etrafında odaklanması sağlanmaktadır. Ayrıca ters-çözüm aşamasında problemin az-tanımlı doğası gereği, ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki çakışmanın denetimi hedef modelle uyumlu sonuçlar üretmeyebilir. Bu nedenle, gerekli olan yineleme sayısının belirlenebilmesi amacıyla durdurma koşulu olarak geliştirilen parametre değişim fonksiyonunun başarısı denetlenmiştir. Kuramsal modellerle gerçekleştirilen uygulamalar, odaklama tekniğinin manyetik verilerle de başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Çalışmanın diğer bir sonucunda da, parametre değişim fonksiyonunun en küçük değeri aldığı yineleme sonunda hesaplanan miknatıslanma şiddeti dağılımının kullanılan test modelleri sağladığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İki-boyutlu ters-çözüm, manyetik, odaklama tekniği, parametre değişimi.

#### **ABSTRACT**

*In this study, the applicability of the focusing technique, developed for two-dimensional (2D) inversion of gravity data, was tested on magnetic data. For this purpose, MATLAB based 2D inversion algorithm was developed. The subsurface is divided into ensemble of equal sized blocks by the developed algorithm. The focusing is obtained around the source structure by minimizing the area of the intensity of magnetization. In addition, during the inversion stage, compatible results with the objective model may not be produced by controlling the fit between measured and calculated data due to the under-determined nature of the problem. Therefore, the success of the parameter variation function, which is developed as a stopping criterion, was investigated to find the required number of iteration. Applications on synthetic models showed that the focusing technique fields successful results on magnetic data as well. The other result of the study is that the calculated distribution of the intensity of magnetization provides test models when the parameter variation reaches to a minima against the iteration number.*

**Keywords:** Two-dimensional inversion, magnetic, focusing technique, parameter variation.

## GİRİŞ

Gravite ve manyetik alan verileri, genelde spektral yöntemler veya ters-çözüm çalışmalarıyla analiz edilir. Spektral yöntemler, dikdörtgen blokların veya prizmatik yapıların ortalama derinliğini bulabilmek için belirtilerin enerji spektrumlarının kullanımı esasına dayanmaktadır (örn. Spector ve Grant, 1970; Okuba vd., 1985; Dolmaz vd., 2005; Aydın vd., 2005). Ancak bu yöntemlerle elde edilen model parametrelerinin üreteceği yapay verinin gerçek veri ile benzeşimi göz önüne alınmazken, ters-çözüm çalışmalarında ise bu benzeşim denetlenmektedir. Belirtiye neden olan parametrelerin yeraltındaki herhangi bir fiziksel dağılımı temsil ettiği düşünülerek uygun ters-çözüm yaklaşımlarıyla doğru modele ulaşılmaya çalışılmaktadır. Potansiyel alan yöntemlerinde, model tepkisi bir dizey denklemi olarak ifade edilebilmekte ve model parametreleri doğrudan hesaplanabilmektedir. Ancak verinin model parametrelerinin tam çözümü için gerekli bilgiyi kapsamamasından dolayı, problem az-tanımlıdır (Menke, 1984). Sonucun tekil olmaması, veri ile benzeşen model tepkisinin aranmasında bazı kısıt tekniklerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu kısıt tekniklerine; değiştirgen uzayındaki başlangıç modelden olan uzaklığın en küçük yapılması veya yineleme yöntemini kullanarak tek yoğunluk çözümüne ulaşılması (Green, 1975), doğrusal programlama ile yoğunluk dağılım momentlerinin birlikte kullanılması (Safon vd., 1977), yoğunluk dağılımlarının alanlarını veya hacimlerini en küçükmeye çalışarak dağılımın kaynak kütle etrafında odaklandırılması (Last ve Kubik, 1983), bilinen uzanımaya yönelmesi (Barbosa ve Silva, 1984), blokları derinliğin tersi bir fonksiyon ile ağırlıklandırarak derinlik dengelemesi yapılması (Li ve Oldenburg, 1996 ve 1998), dalgacık dönüşümü ve logaritmik bariyer kullanımı (Li ve Oldenburg, 2003) gibi örnekler verilebilir.

Bu çalışmada; kısıt tekniklerinden, belirtiye neden olan fiziksel parametre (yoğunluk) dağılımının kaynak kütle üzerinde yoğunlaştırılması esasına dayanan odaklama tekniği üzerinde durulmuştur. Odaklama tekniği, gravite verileri üzerinde uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Last ve Kubik, 1983; Sarı ve Ergün,

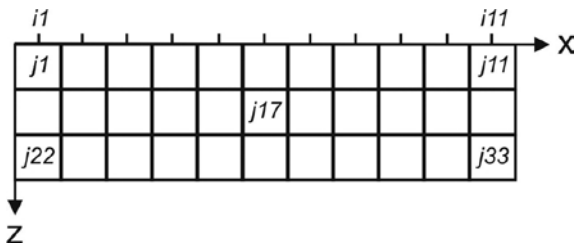
1988). Bu çalışmanın amacı ise, odaklama ters-çözümü tekniğinin manyetik veriler üzerindeki uygulanabilirliğinin irdelenmesidir. Bu amaçla yeraltı, sonlu sayıda ve birbirlerine eşit boyutlarda bloklara bölünerek manyetik belirtiye neden olan mıknatıslanma şiddeti dağılımının kaynak bloklar üzerinde yoğunlaştırılmasına çalışılmıştır. Kullanılan odaklama tekniğinin başarısı, en yoğun odaklanmanın sağlandığı yinelemenin belirlenmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla ilk yinelemeden başlayarak, algoritmanın her yineleme sonunda durdurulup hesaplanan model denetlenebilmekte ve hedeflenen çözüme ulaşılamamışsa yineleme sayısı artırılarak işlemlere devam edilebilmektedir. Ancak fazla sayıda yineleme gerektiren çalışmalarda bu yaklaşımın uygulanması oldukça güçtür. Ters-çözüm çalışmalarında, yinelemelerin durdurulması amacıyla genellikle ölçülen ve hesaplanan verilerin birbirleriyle çakışıp çakışmadığını denetleyen bir ölçüt saptanmaktadır (örn. uyum, karekök hata). Bu ölçüt değerinin önceden belirlenen bir değerden daha küçük olması durumunda, yineleme işlemine son verilebilir (Başokur, 2002). Odaklama tekniğinin, az-tanımlı denklem sistemiyle çözülmesi ve bu sisteme ağırlık fonksiyonunun da eklenmesinin etkisiyle, ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki çakışma her yineleme sonunda sağlanabilmesine karşın, mıknatıslanma şiddeti dağılımının yoğunlaştığı yineleme belirlenmemektedir. Bu nedenle, her yineleme sonunda ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki çakışmanın denetimi yerine, hesaplanan veriyi üreten mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının değişimine göre belirlenen bir ölçüt geliştirilmiştir. Parametre değişimi veya parametre normu adı verilen bu fonksiyon, ardışık yinelemelerden elde edilen mıknatıslanma şiddeti dağılım değerlerinin farklarının normuyla hesaplanmıştır.

Odaklama tekniğinde, yineleme sayısı arttıkça mıknatıslanma şiddeti dağılımı kaynak bloklar üzerinde yoğunlaşırken, diğer bloklar üzerinde indirgenmekte ve yinelemeler devam ettikçe mıknatıslanma şiddeti değerine sahip blok sayısı azalmaktadır. Bu nedenle, en yoğun dağılımın sağlandığı yinelemeden sonra daha fazla yoğunlaşma sağlanamayacağı ve son iki yinelemede hesaplanan mıknatıslanma şidde-

ti değerleri arasındaki farkın en küçük olacağı varsayımı yapılmıştır. Bu düşünceden yola çıkılarak geliştirilen parametre normu, ters-çözüm algoritmasında durdurma koşulu olarak denemiştir. Ters-çözüm aşamasında kullanılan kuramsal modellerin üreteceği manyetik belirtilerin hesaplanmasında Leite ve Leao (1985) tarafından önerilen bağıntılardan yararlanılmıştır. Uygulamalar, geliştirilen MATLAB tabanlı 2B ters-çözüm algoritması ile farklı geometri ve mıknatıslanma şiddeti dağılımlarına sahip modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, odaklama tekniğinin manyetik veriler üzerinde de başarılı sonuçlar ürettiğini ve parametre normunun en küçük değeri aldığı yineleme sonunda bloklara ait mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının kuramsal modelleri sağladığını ortaya koymuştur.

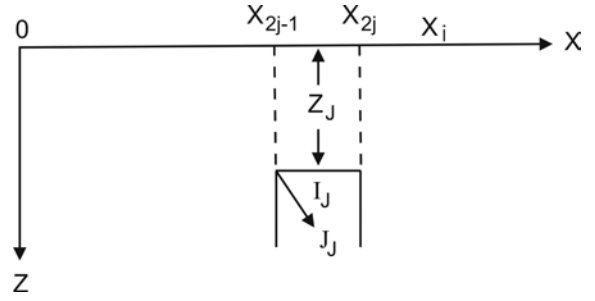
## İKİ-BOYUTLU YAPILARIN OLUŞTURACAĞI MANYETİK BELİRTİLERİN HESAPLANMASI

İki-boyutlu (2B) mıknatıslanma şiddeti dağılımının oluşturacağı belirtilerin hesaplanması amacıyla yeraltı birbirlerine eşit boyutlarda kare bloklara bölünmüş ve kendi içerisinde tekdüze olduğu varsayılan blokların mıknatıslanma şiddeti değerleri değişken olarak alınmıştır. Örneğin, Şekil 1'de verilmiş olan yeraltı yapısı için her bir gözlem noktasında bütün blokların mıknatıslanma şiddeti değerlerinin toplam etkisi hesaplanmaktadır.  $x_i$  gözlem noktasında, kenarları  $x_{2j-1}$  ve  $x_{2j}$  olan sonsuz kalınlıktaki blok modelinin derinliği  $z_j$ , mıknatıslanma şiddeti ise  $J_j$  ile tanımlanırsa (Şekil 2), bu yapının oluşturacağı manyetik alan şiddeti Eşitlik 1'den hesaplanabilmektedir (Leite ve Leao, 1985).



Şekil 1. Gözlem noktaları ve 33 adet bloğa bölünmüş yeraltı modeli.

Figure 1. Observation points and the subsurface model divided into 33 blocks.



Şekil 2. Prizmatik yapı ve parametreleri (Leite ve Leao, 1985).

Figure 2. Prismatic body and its parameters (Leite and Leao, 1985).

$$\Delta T_j(x_i) = 2J_j \{ A_{oj} [\tan^{-1}(C_{ij}/z_j) - \tan^{-1}(D_{ij}/z_j)] + 0.5B_{oj} \ln(E_{ij}/F_{ij}) \} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de verilen değişkenler ise,

$$A_{oj} = \alpha_0 \alpha_j - \gamma_0 \gamma_j, \quad B_{oj} = \alpha_0 \gamma_j + \alpha_j \gamma_0,$$

$$C_{ij} = x_{2j-1} - x_i, \quad D_{ij} = x_{2j} - x_i,$$

$$E_{ij} = D_{ij}^2 + z_j^2, \quad F_{ij} = C_{ij}^2 + z_j^2,$$

$$\alpha_j = \cos I_j \cos D_j, \quad \gamma_j = \sin I_j$$

ile tanımlanır. Burada,  $\alpha_j$  ve  $\gamma_j$  yapının manyetizasyon vektörünün,  $\alpha_0$  ve  $\gamma_0$  ise yer manyetik alan vektörünün doğrultman kosinüsleridir (Leite ve Leao, 1985). Böylece  $i$  gözlem noktası,  $M$  yapı sayısı ve  $\Delta T_0$  ise toplam manyetik alan değeri olmak üzere, bütün yapıların gözlem noktalarında oluşturacağı belirti,

$$\Delta T(x_i) = \sum_{j=1}^M \Delta T_j(x_i) + \Delta T_0, \quad i = 1, N \quad (2)$$

eşitliğinde hesaplanır. Eşitlik 1, sonsuz kalınlıktaki blok yapılar için geçerlidir. Bu çalışmada ise, sonlu kalınlıktaki bloğa ait belirtinin hesaplanabilmesi için yapının üreteceği belirti iki farklı derinlik için hesaplanmış ve aralarındaki fark alınmıştır. Böylece eşit boyutlarda kare blokların herhangi bir gözlem noktasında oluşturacağı manyetik belirti elde edilmiştir.

## İKİ-BOYUTLU ODAKLAMA TERS-ÇÖZÜMÜ

Odaklama tekniği, belirtiyeye neden olan yoğunluk dağılımını belirleyebilmek amacıyla parametre fonksiyonunu en küçük yapan ağırlıklı en küçük kareler yöntemini kullanmakta ve böylece yoğunluk dağılımının alanı en küçükğe indirgenerek belirtiyeye neden olan kaynak yapı merkezi etrafında yoğunlaşma sağlamaktadır (Last ve Kubik, 1983). Bu çalışmada, odaklama tekniğinin manyetik veriler içinde kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla kaynak yapıları ait yoğunluk değerleri yerine mıknatıslanma şiddeti değerleri kullanılmıştır. Bu teknikte, kendi içinde tekdüze olduğu varsayılan blokların mıknatıslanma şiddetleri değişken olarak alınmakta ve genel çözüm olarak aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$[G] = [A][M] \quad (3)$$

Burada;  $G$  gözlem değerleri,  $A$  her bir gözlem noktasında blokların manyetik alan değerine olan katkıları,  $M$  ise her bir bloğun mıknatıslanma şiddetini ifade etmektedir. Mıknatıslanma şiddeti dağılımını en küçük yapan fonksiyon Eşitlik 4 ile verilir (Last ve Kubik, 1983).

$$q = \sum_{j=1}^M w_{m_j} m_j^2 \rightarrow \text{en küçük} \quad (4)$$

Burada;  $w_{m_j} = f_m(m_j) / m_j^2$  olarak ifade edilir ve ağırlık fonksiyonunu tanımlamaktadır,  $m_j$  ise blokların mıknatıslanma şiddetini ifade etmektedir. Ayrıca,  $m$  fonksiyonunun Eşitlik 5'te verilen özelliğinden dolayı, boyutları  $d$  ve  $h$  olan 2B yapının alanı aşağıdaki eşitlikle tanımlanır (Last ve Kubik, 1983).

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} m^2 / (m^2 + \beta) = 0; \quad m = 0 \quad (5)$$

$$= 1; \quad m \neq 0$$

$$\text{alan} = dh \lim_{\beta \rightarrow 0} \sum_{j=1}^M m_j^2 / (m_j^2 + \beta) \quad (6)$$

Burada,  $\beta$  oldukça küçük bir değeri ifade etmekte ve ağırlık fonksiyonu,

$$W_{m_j} = (m_j^2 + \beta)^{-1} \quad (7)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Az-tanımlı denklem sistemleri için çözüm Eşitlik 8 ile tanımlandığına göre, eşitliğe ağırlık fonksiyonunun da eklenmesiyle Eşitlik 9 elde edilmektedir.

$$M = A^T (AA^T)^{-1} G \quad (8)$$

$$M = W_m^{-1} A^T (AW_m^{-1} A^T)^{-1} G \quad (9)$$

İlk yinelemede,  $W_m = I$  (birim matris) seçilir ve çözüm Eşitlik 8 yardımıyla sağlanır. Böylece belirtiyeye neden olan mıknatıslanma şiddeti dağılımı bütün bloklara gelişigüzel dağıtılır. Ancak bu durum jeolojik olarak kabul edilemeyecek mıknatıslanma şiddeti dağılımlarına neden olabilmektedir. Çünkü sadece Eşitlik 8'in kullanılmasıyla belirtiyeye neden olan bloklarla birlikte belirtiyeye neden olmayan bloklara da mıknatıslanma şiddeti değeri atanır. Bu nedenle, ağırlık fonksiyonunun ilk yinelemeden sonraki yinelemelerde işleme sokulması gerekmektedir (Last ve Kubik, 1993; Sarı ve Ergün, 1988). Bu durumda  $i$ . yineleme sırasında çözüm Eşitlik 10 ile sağlanmakta ve her yinelemede kullanılan ağırlık fonksiyonu, bir önceki yineleme sonunda elde edilen mıknatıslanma şiddeti dağılımıyla Eşitlik 11'de verildiği gibi yeniden hesaplanmaktadır (Last ve Kubik, 1983).

$$M^{(i)} = \left[ (W_m^{i-1})^{-1} A^T (A (W_m^{i-1})^{-1} A^T)^{-1} \right] G \quad (10)$$

$$\left[ W^{i-1} \right] = \left( \left[ m_j^{i-1} \right]^2 + \beta \right)^{-1} \quad (11)$$

Böylece ters-çözüm aşaması en küçük kareler çözümü ile başlamakta ve 2. yinelemeden itibaren ağırlık fonksiyonunun her adımda kullanılmasıyla da mıknatıslanma şiddeti dağılımı yoğunlaşmaktadır. Diğer bir deyişle, belirtiyeye neden olan kaynak yapı etrafındaki blokların mıknatıslanma şiddetleri artarken, diğer blokların ise azalmakta ve yineleme sayısı arttıkça dağılımın alanı küçülerek kaynak yapı üzerinde odaklanmaktadır.

Ters-çözüm algoritmalarında durdurma koşulu, genellikle ölçülen ve hesaplanan verinin birbirlerine olan benzerliği ile denetlenmektedir. Bu benzerlik, bir çakışmazlık ölçütü olarak aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$Uyum = \frac{\left( \sum_{i=1}^{ND} (d^{ölç} - d^{hes})^2 \right)^{1/2}}{\left( \sum_{i=1}^{ND} (d^{ölç})^2 \right)^{1/2}} \quad (12)$$

$$Karekök\ hata = \frac{\left( \sum_{i=1}^{ND} (d^{ölç} - d^{hes})^2 \right)^{1/2}}{ND} \quad (13)$$

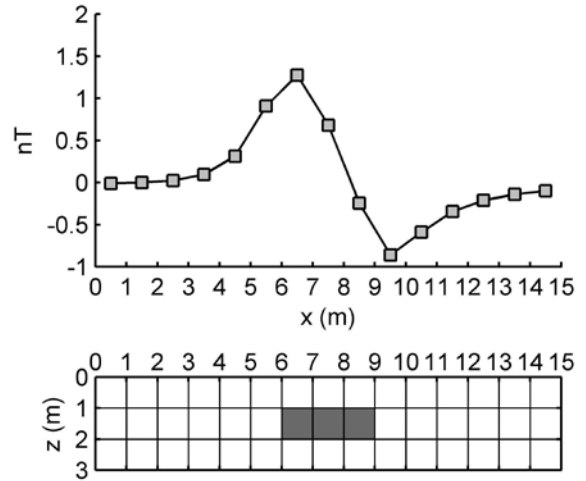
Burada,  $ND$  veri sayısını,  $ölç$  ölçülen veriyi ve  $hes$  ise hesaplanan veriyi ifade etmektedir. Ancak az-tanımlı denklem sistemleriyle ifade edilebilen problemlerde sonsuz adet çözüme ulaşılabileceğinden, ters-çözümün ölçülen ve hesaplanan verinin birbirlerine olan benzerliği ile denetlenmesi hatalı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, uygulama aşamasında durdurma koşulu olarak parametre normu olarak adlandırılan bir fonksiyon kullanılmıştır. Fonksiyon, ardışık yinelemeler sonunda hesaplanan mıknatıslanma şiddeti değerlerinin farklarının normuyla hesaplanmıştır. Bu durumda,  $m$  bloklara ait mıknatıslanma şiddetlerini göstermek üzere  $k$ . yineleme sonunda, parametre normu Eşitlik 14'ten hesaplanmaktadır.

$$parnorm = \left( \sum_{i=1}^{ND} (m^k - m^{k-1})^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

## KURAMSAL MODELLER VE UYGULAMALAR

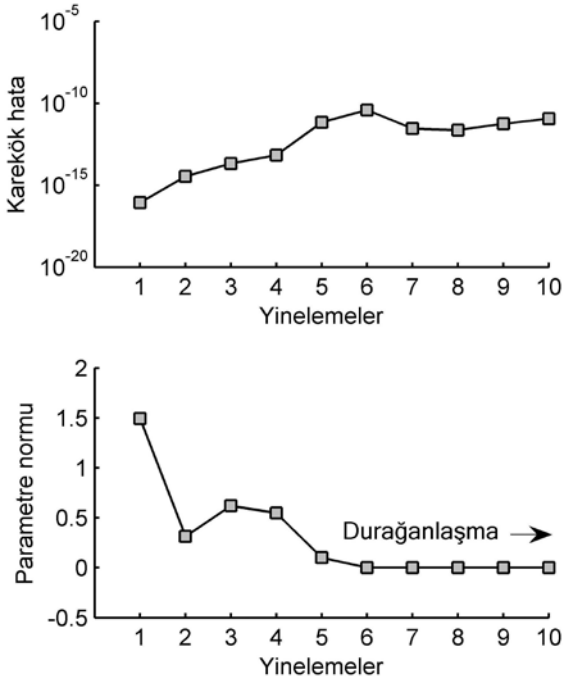
Geliştirilen ters-çözüm algoritmasının manyetik veriler üzerindeki başarısının denetlenmesi amacıyla uygulamalar kuramsal modeller yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kuramsal modellerin üreteceği belirtiler Leite ve Leao (1985) tarafından önerilen bağıntılarla geliştirilen MATLAB tabanlı 2B düz-çözüm algoritması ile hesaplanmıştır. Uygulamalarda,  $1 \times 1$  m boyutlarında  $3 \times 15$  blokla temsil edilen 3 adet farklı yeraltı modeli kullanılmıştır. Bütün modellerde veri örnekleme aralığı 1 m olarak alınmış ve toplam manyetik alan değeri ihmal edilmiştir. İlk modelde yeraltında bulunduğu varsayılan kaynak yapı  $3 \times 1$  m bo-

ylarında ve 1 m derinlikte konumlandırılmış ve 3 blokla gösterilmiştir. Hesaplamalar; bloklara ait mıknatıslanma şiddeti 1 EI (cgs), yer manyetik alanının eğim ve sapma açısı ise sırasıyla  $60^\circ$  ve  $0^\circ$  olacak şekilde yapılmıştır. Manyetizasyon vektörünün eğim ve sapma açıları yer manyetik alanının eğim ve sapma açlarına eşit olacak şekilde seçilmiştir. Model 1 ve ürettiği veri Şekil 3'de verilmiştir. Model 1'den üretilen veri, ölçü-



Şekil 3. Model 1 için kaynak yapı ve üretilen veri.  
Figure 3. The causative body and the generated data for Model 1.

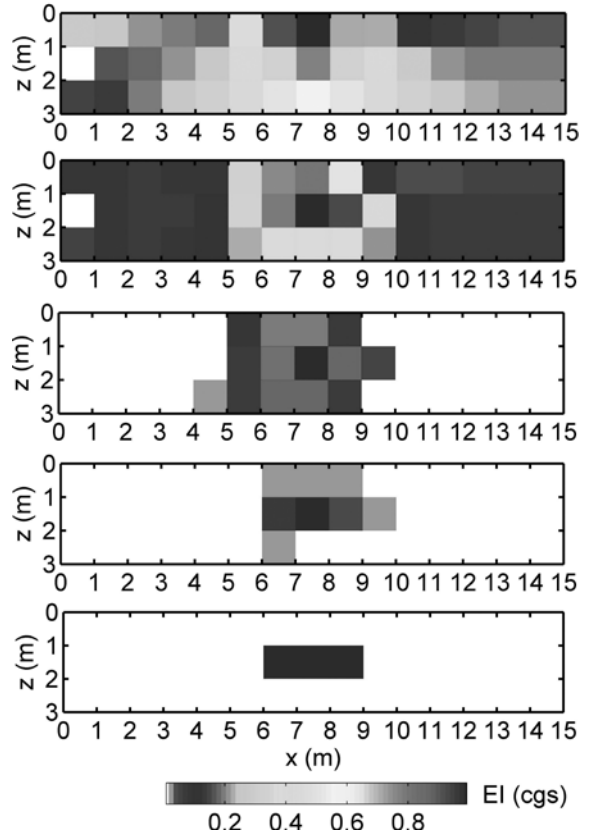
len veri olarak ters-çözüm işlemine sokulmuştur. İlk modelde yineleme sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Her yineleme sonunda ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki karekök hata ile birlikte ardışık yinelemelerden hesaplanan parametre normu değerleri de hesaplanmıştır. Burada amaç, iki farklı fonksiyonun durdurma koşulu olarak etkisinin karşılaştırılması olmuştur. Şekil 4'te 10 yineleme için her iki fonksiyonun aldığı değerler verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki karekök hata değerlerinin  $10 \times 10^{-10}$  ile  $10 \times 10^{-16}$  arasında değiştiği gözlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, ters-çözüm aşamasında elde edilen 10 farklı modelden hesaplanan veri ile ölçülen veri oldukça düşük bir hata oranıyla çakışmaktadır. Bu nedenle, karekök hatanın incelenmesiyle, bulunan modellerden hangisinin gerçek modeli (Model 1) sağladığı belirlenemmiştir. Diğer taraftan, 6. yinelemeden itibaren



Şekil 4. Model 1 için yineleme sayısına göre karekök hata ve parametre normu.  
Figure 4. Root mean square error and parameter norm against iteration number for Model 1.

parametre normunun yaklaşık sıfır değerini alıp durağanlaştığı gözlenmiştir. Buna göre, 5. yinelemeden sonra mıknatıslanma şiddeti değerlerinde bir değişiklik olmadığı ortaya konmuştur. Böylece, belirtiyeye neden olan hedef blokların mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının en yoğunlaştığı yinelemenin 5. yineleme olduğu belirlenmiştir. Şekil 5'ten de görüldüğü gibi, ilk yineleme sonunda belirtiyeye neden olan mıknatıslanma şiddeti dağılımı bütün bloklara gelişigüzel şekilde dağılmış, ikinci yinelemeden itibaren ağırlık fonksiyonunun da hesaplamalara katılmasıyla birlikte dağılım yoğunlaşmaya başlamış ve 5. yineleme sonunda mıknatıslanma şiddeti dağılımını kaynak bloklar üzerinde odaklanarak gerçek model belirlenmiştir.

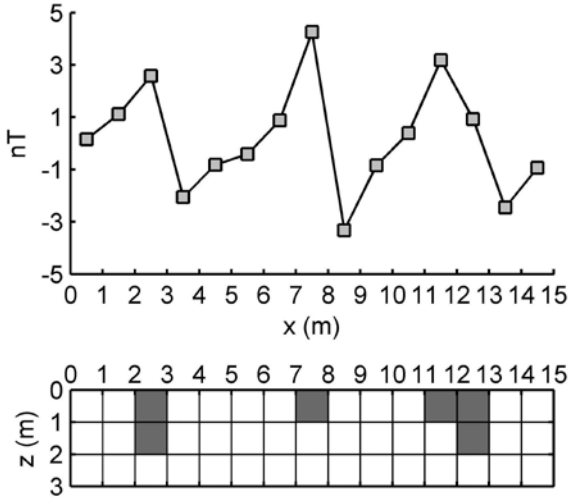
Model 2'de, 3 farklı yapıyı temsil eden 6 adet blok kullanılmıştır. Modelde, mıknatıslanma şiddetleri tek blokla temsil edilen yapı için 2 El (cgs), diğer bloklar için ise 1 El (cgs) olarak alınmış ve farklı mıknatıslanma şiddeti değerlerine sahip yapılar üzerinde algoritmanın başarısı de-



Şekil 5. Model 1 için 5 yineleme boyunca hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları.  
Figure 5. The distribution of the intensity of magnetization calculated during 5 iterations for Model 1.

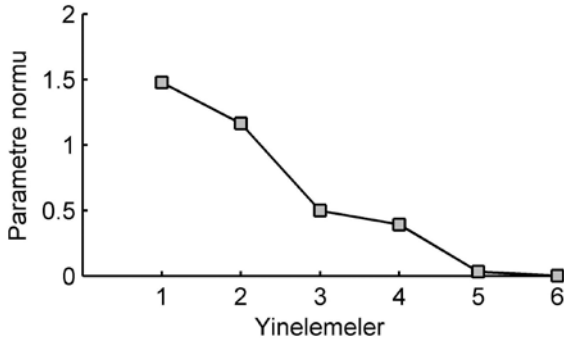
netlenmiştir. Model 2'nin üreteceği belirtinin hesaplanmasında, yer manyetik alanının ve manyetizasyon vektörünün eğim ve sapma açıları sırasıyla  $60^\circ$  ve  $0^\circ$  olacak şekilde tasarlanmıştır. Model 2 ve ürettiği veri Şekil 6'da verilmiştir. Model 1'de olduğu gibi, ters-çözüm aşamasında yineleme sayısı arttıkça mıknatıslanma şiddeti dağılımı kaynak bloklar etrafında yoğunlaşmaya başlamış ve 6. yineleme sonunda parametre normunun en küçük değerini almasıyla algoritma durmuştur (Şekil 7). Böylece, mıknatıslanma şiddeti dağılımının en yoğunlaştığı yineleme belirlenmiştir. 5 yinelemede hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.

Son modelde ise, birbirlerinden farklı mıknatıslanma şiddetindeki 3 farklı yapı kullanılmıştır. Kaynak yapılar ait mıknatıslanma şiddetleri sı-

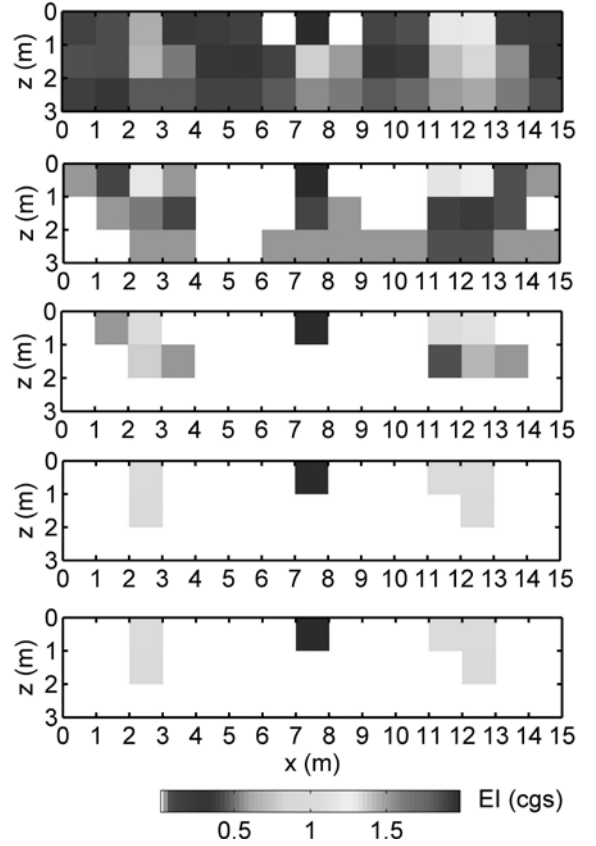


Şekil 6. Model 2 için kaynak yapı ve üretilen veri.  
Figure 6. The causative body and the generated data for Model 2.

rasıyla 1, 1.2 ve 1.5 EI (cgs) olarak alınmıştır. Bu modelde hesaplamalar, yer manyetik alanının ve manyetizasyon vektörünün eğim açıları  $90^\circ$ , sapma açıları ise  $0^\circ$  alınarak yapılmıştır. Model 3 ve ürettiği veri Şekil 9'da verilmiştir. Ters-çözüm aşaması, parametre normunun en küçük değerini aldığı 10. yineleme sonuna kadar devam etmiştir. Böylece, en yoğun mıknatıslanma şiddeti dağılımının 9 yinelemeyle gerçekleştiği belirlenmiştir. Yineleme sayısına göre parametre normu ve hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları ise, sırasıyla Şekil 10 ve 11'de verilmiştir. Şekil 11'den de görüldüğü gibi, ilk yine-



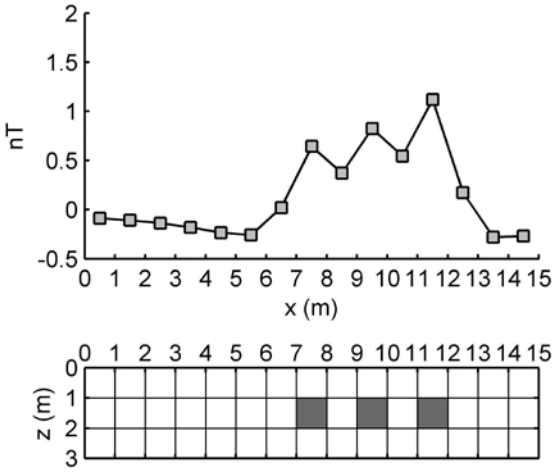
Şekil 7. Model 2 için yineleme sayısına göre parametre normu.  
Figure 7. Parameter norm against iteration number for Model 2.



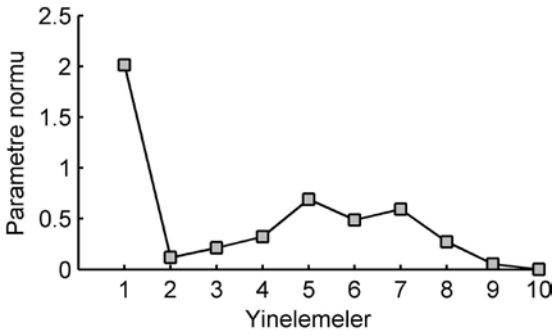
Şekil 8. Model 2 için 5 yineleme boyunca hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları.  
Figure 8. The distribution of the intensity of magnetization calculated during 5 iterations for Model 2.

lemeden sonra kaynak blokların mıknatıslanma şiddeti değerleri artarken, diğer bloklarda ise azalmaya başlamış ve 9. yineleme sonunda mıknatıslanma şiddeti dağılımı kaynak bloklar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu yinelemede blokların mıknatıslanma şiddeti değerleri 1, 1.2 ve 1.5 EI (cgs) olarak hesaplanmıştır. Her 3 modelde, ilk ve son yinelemeler sonunda hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları Çizelge 1'de verilmiştir.

Kuramsal modeller kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda odaklama yönteminin manyetik veriler üzerinde de başarılı sonuçlar verdiği ve ters-çözüm aşamasında en uygun yinelemenin parametre normu yardımıyla belirlenebildiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, yöntemin başarısının  $\beta$  seçimiyle de ilgili olduğu ve bu sabit sayının Model 1'de  $10^{-4}$ 'ten, Model 2'de  $10^{-5}$ 'ten



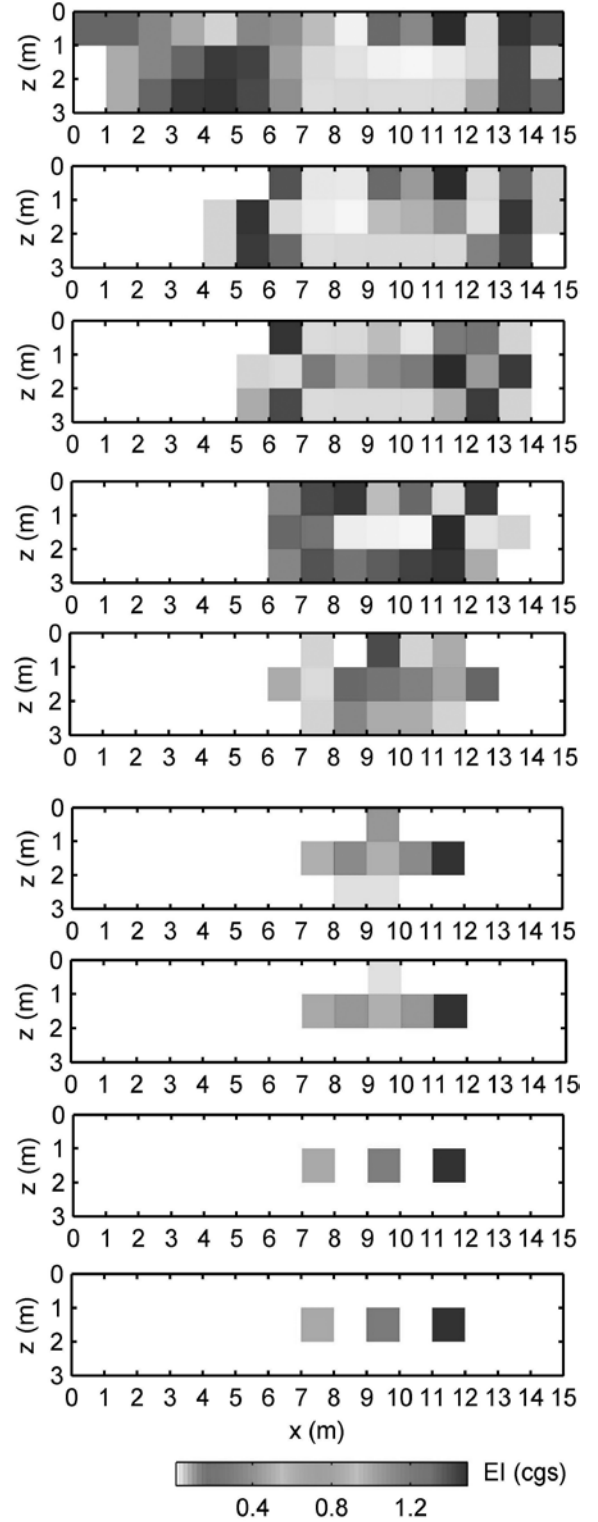
Şekil 9. Model 3 için kaynak yapı ve üretilen veri.  
Figure 9. The causative body and the generated data for Model 3.



Şekil 10. Model 3 için yineleme sayısına göre parametre normu.  
Figure 10. Parameter norm against iteration number for Model 3.

ve Model 3'te ise  $10^{-6}$ 'dan büyük seçilmemesi durumunda başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, farklı mıknatıslanma şiddetindeki yapı sayısının artmasıyla  $\beta$  değerinin azaltılması gerekmiştir. Bu çalışmada, her 3 modelin ters-çözümünde  $\beta$  değeri  $10^{-8}$  olarak seçilmiştir. Ayrıca,  $10^{-8}$  değerinin farklı mıknatıslanma şiddetindeki yapı sayısının fazla olması durumunda da başarılı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

Kullanılan ters-çözüm algoritmasında, kullanıcının belirleyeceği bir mıknatıslanma şiddeti kısıtlaması da ön bilgi olarak kullanılabilir.



Şekil 11. Model 3 için 9 yineleme boyunca hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları.  
Figure 11. The distribution of the intensity of magnetization calculated during 9 iterations for Model 3.



Çizelge 1. Model 1, 2 ve 3 için ilk ve son yineleme sonunda hesaplanan mıknatıslanma şiddeti dağılımları (EI(cgs)).

Table 1. Intensity of magnetization distributions calculated after the first and the last iteration for Model 1, 2 and 3 (EI(cgs)).

Model 1														
1. Yineleme														
0.04	0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.13	0.38	0.42	0.26	0.01	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.02
-0.11	-0.03	-0.01	-0.00	0.03	0.11	0.24	0.29	0.24	0.12	0.03	-0.00	-0.01	-0.01	-0.01
-0.08	-0.04	-0.01	0.01	0.05	0.10	0.16	0.18	0.16	0.11	0.06	0.02	0.01	0.00	-0.00
5. Yineleme														
						1.00	1.00	1.00						
Model 2														
1. Yineleme														
0.05	0.08	1.09	-0.10	-0.13	-0.17	-0.30	1.60	-0.32	-0.23	-0.26	0.79	0.91	-0.16	-0.13
-0.24	-0.07	0.33	0.19	-0.02	-0.05	0.05	0.45	0.24	-0.04	0.04	0.35	0.50	0.21	0.01
-0.14	-0.01	0.11	0.10	0.05	0.05	0.11	0.20	0.17	0.10	0.13	0.22	0.26	0.18	0.08
5. Yineleme														
		1.00					2.00				1.00	1.00		
		1.00										1.00		
Model 3														
1. Yineleme														
0.01	0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.08	0.22	0.19	0.28	0.24	0.33	0.13	0.02	0.01
-0.02	-0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.09	0.14	0.17	0.19	0.19	0.18	0.12	0.05	-0.01
-0.02	-0.00	0.01	0.01	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.14	0.14	0.13	0.09	0.05	0.00
9. Yineleme														
							1.00		1.20		1.50			

Böylece, alt ve üst limit değerlerini aşan bloklar algoritma içinde dondurulmakta ve yerine ön bilgi olarak verilen limit değerleri yerleştirilebilmektedir. Kısıtlanmalı durumda mıknatıslanma şiddeti limit değerleri gerçeğe yakın belirlenebilirse, çözüm daha az yinelemeyle tamamlanabilir. Kuramsal modellerle gerçekleştirilen uygulamalardan da görüleceği gibi, algoritma ilk yinelemede Eşitlik 8'in doğasından dolayı dağılımı gelişigüzel değerlerle gelişigüzel bloklara atamaktadır. Böylece gerçek modelde bulunmayan düşük veya yüksek mıknatıslanma şiddeti değerleri bir sonraki yinelemede çözüme girebilmektedir. Kullanılacak limit değerleri yardımıyla, bu saçılmalar gerçekleşmez ve çözümün gerçek modele yakınsaması hızlandırılabilir. Özellikle siğ amaçlı yapılan manyetik çalışmalarda,

manyetik belirtilerden bölgesel etkilerin çıkarılmasıyla elde edilen yerel etkilerin oluşturduğu belirtilerin en düşük ve en yüksek değerlerinden yapılabilecek bir yaklaşımla bir mıknatıslanma şiddeti kısıtlaması ön bilgi olarak belirlenebilir. Ayrıca çalışma alanında yapılmış sondaj varsa, bu sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde yapılabilecek ölçümlerin sonuçlarına göre bir kısıt belirleyebilmek mümkündür.

## SONUÇLAR

Bu çalışma, gravite verilerinin 2B ters-çözümü için geliştirilen odaklama tekniğinin, manyetik verilere uygulanması durumunda ne derece başarılı sonuçlar alınabileceğini saptamak için yapılmıştır. Bu amaçla, 2B yapıların ürettiği

manyetik belirtilere neden olan mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının belirlenebilmesi için geliştirilen MATLAB tabanlı 2B ters-çözüm algoritması kuramsal modeller üzerinde uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, ters-çözüm aşamasında en uygun yinelemenin hızlı bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla durdurma koşulu olarak geliştirilen bir ölçüt kullanılmıştır. Parametre normu adı verilen bu ölçüt, ardışık yinelemeler sonunda elde edilen mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının farklarının normuyla hesaplanmıştır. Uygulamalar, parametre normunun en küçüklendiği yineleme sonunda mıknatıslanma şiddeti dağılımlarının başarılı bir şekilde belirlenebildiğini göstermiştir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, parametre normunun tamamen odaklama tekniğinin doğasıyla uyumlu bir durdurma koşulu olduğudur. Bu nedenle, diğer ters-çözüm tekniklerinde de başarılı sonuçlar vermesi beklenmemelidir. Bu çalışmanın diğer bir sonucu ise, ters-çözüm algoritması içinde ağırlık fonksiyonunun hesaplanması sırasında kullanılan  $\beta$  değerinin seçiminin oldukça önemli olduğunun ortaya konmasıdır. Bu değer yapacak çalışmalarda  $10^{-8}$ 'den büyük seçilmemesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, özellikle arkeojeofizik gibi sığ amaçlı manyetik çalışmalarda, belirtilere neden olan hedef yapıların düzgün bir geometri ve güçlü mıknatıslanma şiddeti değerlerine sahip olmaları durumunda, bu yapıların yatay ve düşey geometrilerinin belirlenebilmesinde odaklama tekniğinin parametre normuyla birlikte kullanımının araştırmacı için hızlı bir yorumlama olanağı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## KATKI BELİRTME

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında fikir ve önerilerinden yararlandığı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nden Dr. Emin U. Ulugergerli'ye teşekkürlerini sunar. Yazar ayrıca yayının son haline gelmesinde gösterdikleri katkılardan dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi'nden Prof. Dr. Coşkun Sarı'ya, Prof. Dr. Mahmut G. Drahor'a ve ismi belirtilmeyen diğer hakeme teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- Aydın, I., Karat, H.I., and Koçak A., 2005. Curie-point depth map of Turkey. *Geophysical Journal International*, 162, 633-640.
- Barbosa, V.C.F., and Silva, J.B.C., 1994. Generalized compact gravity inversion. *Geophysics*, 59, 57-68.
- Başokur, A.T., 2002. Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin ters-çözümü. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, No. 4.
- Dolmaz, M.N., Hisarlı, Z.M., Ustaömer, T., and Orbay, N., 2005. Curie point depths based on spectrum analysis of aeromagnetic data, West Anatolian extensional province, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 571-590.
- Green, W.R., 1975. Inversion of gravity profiles by use of Backus-Gilbert approach. *Geophysics*, 40, 763-772.
- Last, B.J., and Kubik, K., 1983. Compact gravity inversion. *Geophysics*, 48, 713-721.
- Leite, L.W.B., and Leao, J.W.D., 1985. Ridge regression applied to the inversion of two-dimensional aeromagnetic anomalies. *Geophysics*, 50, 1294-1306.
- Li, Y., and Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61, 394-408.
- Li, Y., and Oldenburg, D.W., 1998. 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63, 109-119.
- Li, Y., and Oldenburg, D.W., 2003. Fast inversion of large scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method. *Geophysical Journal International*, 152, 251-265.
- Menke, W., 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, V. 45.
- Okubo, Y., Graf, J.R., Hansen, R.O., Ogawa, K., and Tsu, H., 1985. Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, 53, 481-494.

- Safon, C., Vasseur, G., and Cuer, M., 1977. Some applications of linear programming to the inverse gravity problem. *Geophysics*, 42, 1215-1229.
- Sarı, C. ve Ergün, M., 1988. Yinelemeli ters çözüm yöntemi ile yeraltı yoğunluk dağılımının saptanması. *Jeofizik*, 2 (1), 27-43.
- Spector, A., and Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293-302.





## Çok-kanallı yüzey dalgası analizi kullanılarak yüzeye-yakın yapıların araştırılması

### *Investigation of near-surface structures using multi-channel analysis of surface waves*

Çağrı ÇAYLAK, Coşkun SARI

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü,  
35160 Tınaztepe Yerleşkesi, Buca, İZMİR

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008  
Kabul (accepted) : 21 Temmuz (July) 2008

#### ÖZ

Bu çalışmada, sığ yeraltı yapılarının incelenmesinde Rayleigh tipi yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanılmıştır. Yüzey dalgaları, diğer tüm sismik dalga türleri arasında en güçlü enerjiye ve en yüksek sinyal/gürültü oranına sahiptir. Çok-kanallı yüzey dalgası analizi sonuçlarının doğruluğu, veri eldesinde kullanılan sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi parametrelere bağlıdır. Yüzey dalgası analizinin yapı ve ortam kesirindeki başarısı ve uygun parametre seçimi Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında gerçekleştirilen deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Bu çalışmada, 24 kanallı bir sismograf, 4.5 Hz ve 14 Hz olmak üzere iki farklı P jeofonu ve enerji kaynağı olarak da 8 kg'lık bir balyoz kullanılmıştır. Jeofon frekansının değişim etkisini test etmek amacıyla jeofon aralığı sabit tutularak ve farklı yakın açılım uzaklıklarıyla çok-kanallı veri kayıtları elde edilmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde, bir boyutlu yüzey dalgası analizi ve doğrusal olmayan en küçük kareler algoritmasına dayanan ters-çözüm yöntemi kullanılmıştır. Deneme sonuçları; sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yakın açılım uzaklığının jeofon aralığının yaklaşık üç katı olmasının uygun olacağını ve farklı yakın açılım uzaklıkları için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 14 Hz 'lük jeofon kullanımının sismik kaynak ve jeofon aralığı dikkate alındığında 4.5 Hz 'e göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok-kanallı sismik, sığ sismik, yüzey dalgaları.

#### ABSTRACT

*In this study, dispersive characteristics of Rayleigh type surface waves were utilized for the investigation of shallow subsurface structures. The surface waves have the strongest energy among all other types of seismic waves ensuring the highest signal-to-noise ratios. Reliabilities of the results of the multi-channel analysis of surface waves (MASW) depend on seismic source, offsets, and geophone's frequency and intervals during the data acquisition. The success of the structure and medium prediction of the surface wave analysis as well as selection of the appropriate parameters were documented in the field studies at the antique city of Magnesia. In this study, a 24-channel seismograph, two types of vertical component P geophones with frequencies of 4.5 Hz and 14 Hz, and 8-kg sledgehammer as energy source were used. In order to test the effect of the variations of geophone frequencies, multi-channel data records were acquired with different offsets keeping the geophone intervals fixed. One-dimensional (1D) surface wave analysis and the inversion depending on non-linear least-square algorithm were used to evaluate the data. The test results indicate that the offset distance of shallow subsurface structures should be approximately three-times of geophone intervals and 14-Hz geophone is more successful than that of 4.5 Hz considering seismic source and geophone interval for different offset distances.*

**Keywords:** Multi-channel seismic, shallow seismic, surface waves.

## GİRİŞ

Yüzeğe yakın malzemelerin elastik özellikleri ve bu özelliklerin sismik dalga hızlarının yayılmasına etkileri; yeraltısuyu araştırmaları ile mühendislik ve çevre uygulamalarında ilgilenilen temel konulardandır. Geleneksel olarak, sıg yeraltı tabakalarının görüntülenmesi için tasarlanan çok-kanallı sismik cisim ( $V_p$  ve  $V_s$ ) dalgalarının incelenmesinde yüzeğe dalgaları gürültü olarak hesaba katılmaktadır (Steeple ve Miller, 1990). Buna karşın, yüzeğe dalgaları frekans bağımlı özellikleri nedeniyle yüzeğe yakın malzemelerin elastik özelliklerini belirlemek için kullanılabilir (Park vd., 1998; Xia vd., 2000). Yüzeğe dalgalarının dispersif özelliklerinden, yaygın olarak, düzlem dalga analizinde S makaslama dalgası hızı profillerinin elde edilmesinde yararlanır.

Sismik dalgalar, yer kürenin yüzeyinde veya yakınında oluştuğu zaman, hem cisim dalgaları (P ve S), hem de yüzeğe dalgaları (Rayleigh, Love gibi) meydana gelir. Rayleigh dalgaları, P ve SV dalgalarının etkileşiminin bir sonucudur ve P-tipi dalga kaynağı kullanıldığında oluşan toplam sismik enerjinin üçte ikisinden daha fazlasına sahip olmaktadır (Heisey vd., 1982). Rayleigh dalgasının özel bir türü olan “ground roll” dalgası, göreceli olarak, düşük hız, düşük frekans ve yüksek genlikle nitelendirilir ve istenen yansıma sinyallerini maskeleyen eğilimindedir (Sheriff, 1991). Stokoe ve Nazarian (1983) ve Nazarian vd. (1983) yüzeğe yakın S-dalga hız profillerini oluşturmak için “ground roll” dalgalarının frekans bağımlı faz hızı (dispersiyon) eğrilerini analiz eden ve yüzeğe dalgalarının spektral analizi (SASW) adı verilen bir yüzeğe dalga yöntemini tanıtmışlardır. Frekans bağımlı faz hızı eğrileri, SASW yönteminde en küçük kareler tekniğini kullanılarak dönüşüme uğrattırılır (Stokoe ve Nazarian, 1983; Nazarian vd., 1983). SASW yöntemi geniş çapta bir çok mühendislik projelerinde uygulanmıştır (Sanchez-Salineri vd., 1987; Sheu vd., 1988; Stokoe vd., 1989; Gucunski ve Woods, 1991; Stokoe vd., 1994). SASW 'a alternatif olarak geliştirilen ve bir defada birden fazla alıcı ile kayıt alma avantajını sağlayan yüzeğe dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW), yüzeğe dalgalarının spektral analizinde karşılaşılan sorunları gideren hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak karşımıza çıkmıştır. Yüzeğe dalgalarının çok-kanallı analizinde, temel “mod” 'daki

Rayleigh dalgalarının cisim dalgalarından ve diğer “mod” 'daki yüzeğe dalgalarından ayrılmasını sağlayan çok-kanallı bir dizilim kullanılmaktadır (Park vd., 1999a).

Yeraltında bulunan jeolojik yapıları belirlemede birçok jeofizik yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan sismik yöntemler, farklı özelliklere sahip tabakalı ortamların kalınlıkları, hızları ve yoğunluklarının hesabından, olası yeraltı jeolojik yapıları saptayabilir. Sismik yöntemler daha çok yatay veya yataya yakın katmanlarda başarılı sonuçlar vermekle birlikte; petrol aramaları, yer kabuğunun derin kısımlarının modellenmesi ve mühendislik jeofiziği uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüzeğe-yakın yapıların zemin özelliklerinin araştırılmasında kullanılan geleneksel sismik kırılma yönteminin karşılaştığı hız terslenmesi olarak tanımlanan yüksek hızlı bir katmanın altında düşük hızlı katmanın bulunması, hedeflenen nüfuz derinliğine ulaşamaması gibi sorunlardan dolayı yüzeğe dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) yöntemi tercih edilmiştir. Yüzeğe dalgası kaynaklı analiz yöntemleri yeraltındaki jeolojik yapılara ait farklı parametreleri oldukça etkin şekilde belirlemek için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, aktif çok-kanallı yüzeğe dalga analizinin çok-sıg derinliklerdeki yapılara uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Yöntemin, günümüze değin bu derece çok-sıg derinliklere uygulanmamış olması, uygulanabilirliği açısından eksiklik olarak nitelendirilebilir. Yüzeğe dalgası analiz yönteminin uygulanabilirliği ve sonucunun doğruluğu, sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi parametrelere bağımlıdır. Bu doğrultuda, ilk olarak uygun parametre seçimi için deneme ölçülerinin yapılması öngörülmüştür. Arazi test çalışmaları, Aydın ili Germencik ilçesine bağlı Menderes Magnesia antik kentinde gerçekleştirilmiştir. Yüzeğe-yakın farklı fiziksel özelliklere sahip yeraltı yapılarının varlığından dolayı Magnesia antik kentinin test ölçüleri için uygun olabileceği düşünülmüştür. Ölçüler, farklı yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi farklı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en uygun sinyal/gürültü oranına sahip veri toplama parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen

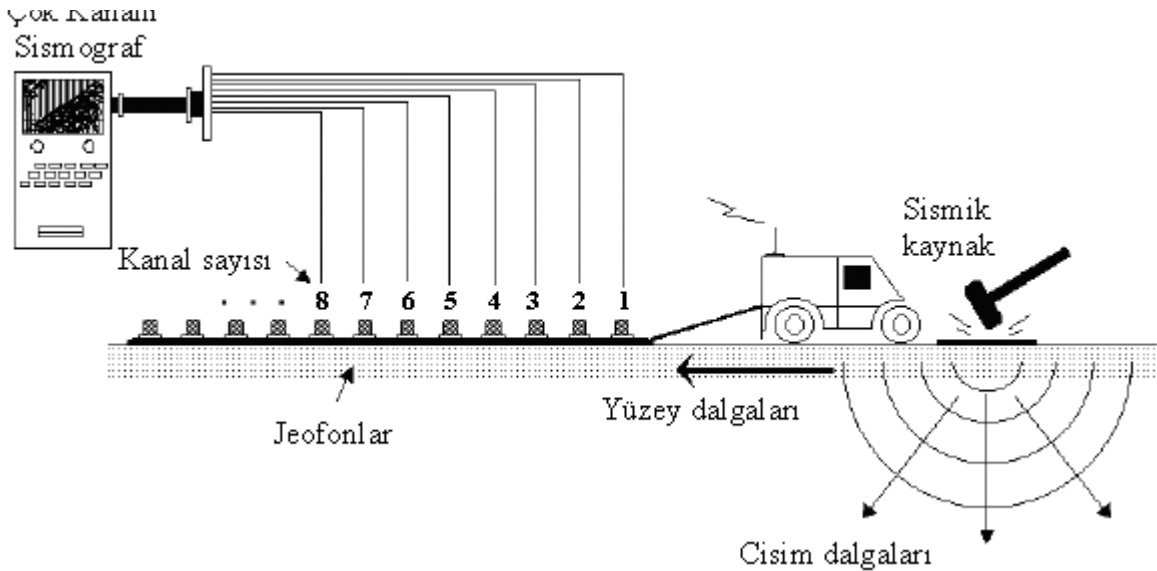
çok-kanallı atış toplulukları, bir boyutlu analiz programı yardımıyla değerlendirilmiştir.

## YÜZEY DALGALARININ ANALİZ YÖNTEMLERİ

SASW yönteminin uygulamasında yayılan yüzey dalgalarını kaydetmek için sadece bir alıcı çifti kullanılır (Dobrin ve Savit, 1988). Sismik dalga enerjisi, genellikle, balyoz gibi darbeli bir kaynak tarafından üretilir. Bu nedenle, farklı araştırma derinliklerini kat etmek için denemenin birçok farklı alan düzenekleri (farklı kaynak ve alıcı aralığı) ile tekrarlanması gerekir. Sonuç olarak yöntem, fazla zaman alır ve yoğun işlemler gerektirir. Ayrıca, cisim dalgalarının (doğrudan gelen kırılan ve yansıyan P-dalgaları) ve yüzey dalgalarının yüksek “mod” ’larının varlığından dolayı, kaydedilen verinin olası kirlenmesi fark edilemez ve uygun şekilde kullanılamaz (Bath, 1973). Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) tekniği ise, var olan gürültü de SASW yönteminin eksiklerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir (Park vd., 1999a) (Şekil 1). Çok sayıda kaynak kullanılması ve yığma yapılması durumunda esas Rayleigh dalga “modu” baskın olarak elde edilir. Makaslama hızının iki-boyutlu yatay belirtilerini elde etmek için profiller boyunca birçok kayıt alınarak ters-çözümü yapılır.

MASW yöntemi, tabakalı yerküre modeli için Rayleigh dalgasında baskın bir etkisi olan S-dalga hızına dayanır. Dönüşmüş faz hızları ile derinliğe bağlı bir boyutlu S-dalga hızı fonksiyonunu tanımlayan S-dalga hızı profilleri elde edilir. MASW yönteminde, gürültüyü etkili bir şekilde kontrol etmek olasıdır. Bu nedenle, en yüksek sinyal/gürültü oranı sağlanır. Makaslama dalgası hız profiline tam bir veri işlem, yüzey dalgalarının kazancı, frekans bağımlı faz hızı eğrisinin yapılandırılması ve frekans bağımlı faz hızı eğrisinin ters-çözüm işleminden oluşur. Burada dikkat edilmesi gereken husus, makaslama dalgası hız derinlik profilini doğru saptayabilmek için geniş bantlı yüzey dalgalarının en az gürültüyle kaydedilmesidir. MASW yönteminde bant-genişliği, araştırmanın derinliği ve çözünürlüğü artırıldığı zaman yüksek sinyal/gürültü oranı hesaplanan frekans bağımlı faz hızı eğrisinde yüksek doğruluğa neden olur. Daha yüksek “modlu” veri, temel “modlu” veriden daha derin araştırma derinliğine sahiptir. Aynı zamanda, daha yüksek “modlu” veri frekansa ek olarak kaynak uzaklığına bağlı olan dönüşmüş S-dalga hızının çözünürlüğünü artırır.

İlk olarak, standart CDP formatında birkaç çok-kanallı kayıt toplanmalıdır. Yüzey dalga verilerinin elde edilmesi için yüzeyden etkiyen darbe



Şekil 1. Çok-kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeni (Park vd., 1998).

Figure 1. Data collection configuration of multi-channel (MASW) surface waves (Park et al., 1998).

türü kaynaklar için normalde 4 – 5 Hz'den küçük alçak tepki frekanslı alıcılar seçilmelidir. Sismik kaynak, jeofon (alıcı), yakın açılım (ofset), alıcı aralığı gibi veri parametreleri, "Ground roll" dalga sinyallerini arttırmak için ayarlanmalıdır (Park vd., 1999a).

Veri toplanmasından sonra, her bir atış topluluğunun 'ground roll' dalgası faz hızları hesaplanır. 'Ground roll' dalgasının frekans ve faz hız dizileri başlangıç doğrusu boyunca verinin analiz edilerek hesaplanmasını gerektirir. Bu iki dizi, her bir atış topluluğundan frekans bağımlı faz hızı eğrilerini tam olarak çıkarmak için çok önemli bir sınırlamadır (Park vd., 1999a).

Ters-çözüm işlemi, derinlik profiline eş bir S-dalga hızının oluşturulması için her bir frekans bağımlı faz hızı eğrisine uygulanmalıdır (Xia vd., 1999). Dönüşen S-dalga hız profili, jeofon aralığının ortasına yerleştirilmelidir (Miller vd., 1999). Başlangıç modelleri, ters-çözüm işleminin yakınsamasında anahtar bir etkenidir. Regresyon analizi gibi iki boyutlu veri işlem teknikleri ise, bölgesel anomalileri arttırmak için S-dalga hızının düşey kesitine kolay bir şekilde uygulanabilir. 2-boyutlu S-dalgası hız haritasında çatlaklı bölgeler, boşluklar, örtülü dolgu alan sınırları ve benzeri alanlar, düşük hız bölgeleri S-dalga anomalileri ile gösterilirken, ana kaya yüzeyi, genellikle, yüksek S-dalga hız gradyanı ile ilişkilendirilir.

## VERİ TOPLAMA PARAMETRELERİ

Bu yöntemde 'ground roll' dalgaları, genellikle, ya balyoz gibi darbe türü bir sismik kaynak ya da titreşim kaynağı kullanılarak oluşturulur. Oluşturulan dalgalar jeofonlar tarafından algılanır, sayısal olarak kaydedilir ve hemen sonra makaslama dalga hız profillerini oluşturmak için işlenir. Kaydedilen verinin işlenmesi, iki aşamadan oluşur. İlk aşamada, uygun çok-kanallı veri-işlem tekniği kullanılarak dispersiyon verisi elde edilir. İkinci aşamada ise ters-çözüm işlemine giriş olarak frekans bağımlı faz hızı eğrisi kullanılır ve S profili oluşturulur. Alan düzeneklerinde, jeofon aralığı (dx), S profilinde çözünürlükle ilişkilendirilir. Daha yüksek çözünürlük, daha küçük dx gerektirir. Jeofon aralığının en büyük araştırma derinliğinin (Zmax) onda bi-

rinden daha küçük olması önerilir (Stokoe vd., 1994).

$$dx \leq 0.1 * Z_{\max} \quad (1)$$

Kaynak ve birinci jeofon arasındaki ilk yakın açılım (dx1) ve birinci jeofon, yakın-alan etkilerinden kaçınmak için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekir (Stokoe vd., 1994).

$$dx_1 = 0.5 * Z_{\max} \quad (2)$$

Alicıların birinci ve sonuncu jeofon arasındaki uzaklık olarak verilen toplam yayılım uzunluğu (X), aşağıdaki koşula dayanılarak hesaplanır (Nazarian vd., 1983).

$$X \geq Z_{\max} \quad (3)$$

Öngörülen araştırma derinliği için, sismik kayıtçı kanallarının toplam sayısı N, en az  $X / dx$  kadar olmalıdır.

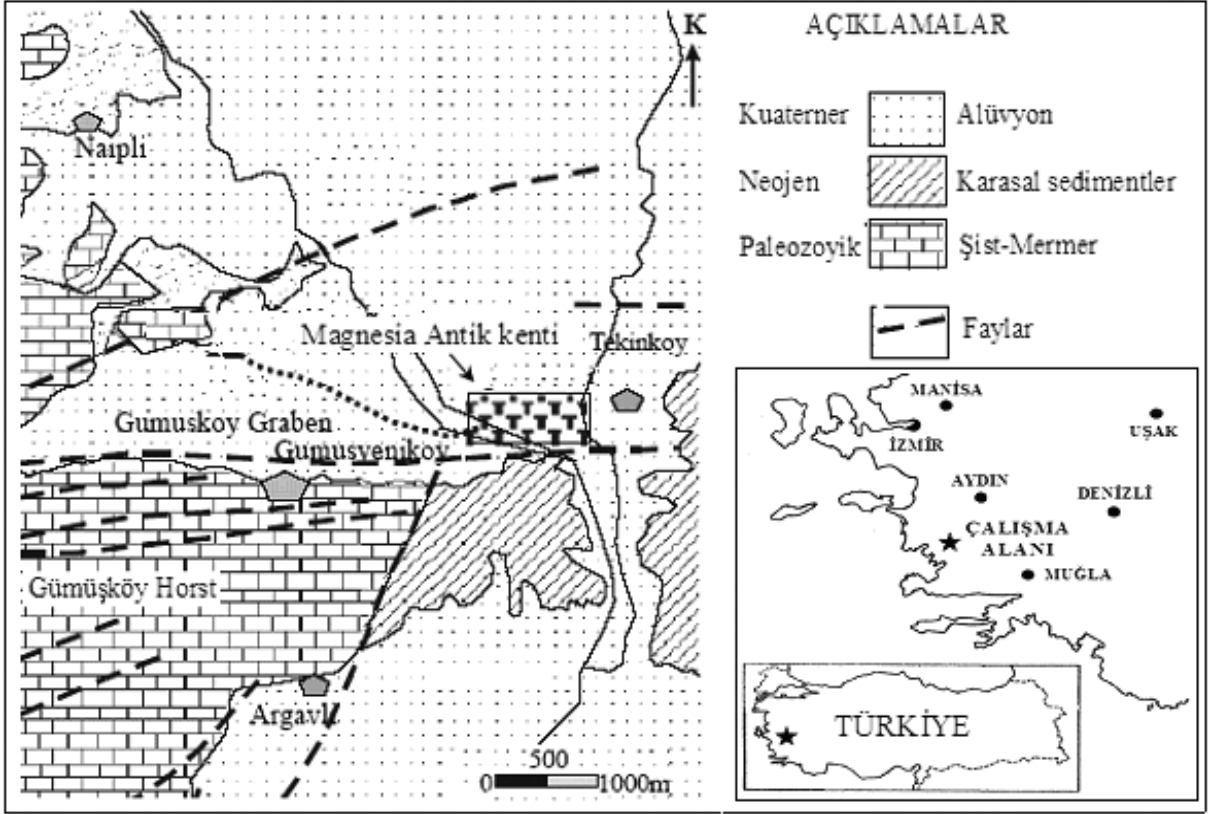
$$N \geq X / dx \quad (4)$$

Burada, N,  $X / dx$ 'den daha küçük olursa, Zmax'dan daha büyük olan alıcılarla kat edilen toplam yüzey uzaklığı için daha fazla alıcı konum değişimi gereklidir. Bu anlamda her zaman çok-kanallı bir sismik kayıtçı tercih edilmelidir. En yakın kaynak-jeofon ofset aralığı araştırma derinliğinin yarısı kadar seçilir (Park vd., 1999b).

## İNCELEME ALANININ TANITIMI

Menderes Magnesiası; Aydın ili, Germencik ilçesi Ortaklar kasabasına bağlı Tekin Köy sınırları içinde, Ortaklar-Söke karayolunun üzerinde yer almaktadır (Şekil 2). Kent, anlatılan efsane ve antik kaynaklara göre, Thessalia'dan gelen ve Magnetler olarak adlandırılan bir kavim tarafından kurulmuştur. Kent; sur ile çevrili, yaklaşık 1.5 km çapında bir alanı kapsayan, izgara planlı cadde ve sokak sistemine sahiptir ve Priene, Ephesos ve Tralleis üçgeni arasında ticari ve stratejik açıdan önemli bir konuma sahiptir. Menderes'in sürekli yatak değiştirip taşması sonucu oluşan salgın hastalıklar ve Perslere karşı daha emin bir kent kurma zorunda kalmaları nedeniyle Magnetler, M.Ö. 400 yıllarında kenti





Şekil 2. Çalışma alanının jeolojik haritası (Erişen vd., 1996 'dan değiştirilerek alınmıştır).  
Figure 2. Geological map of the study area (modified from Erişen et.al, 1996).

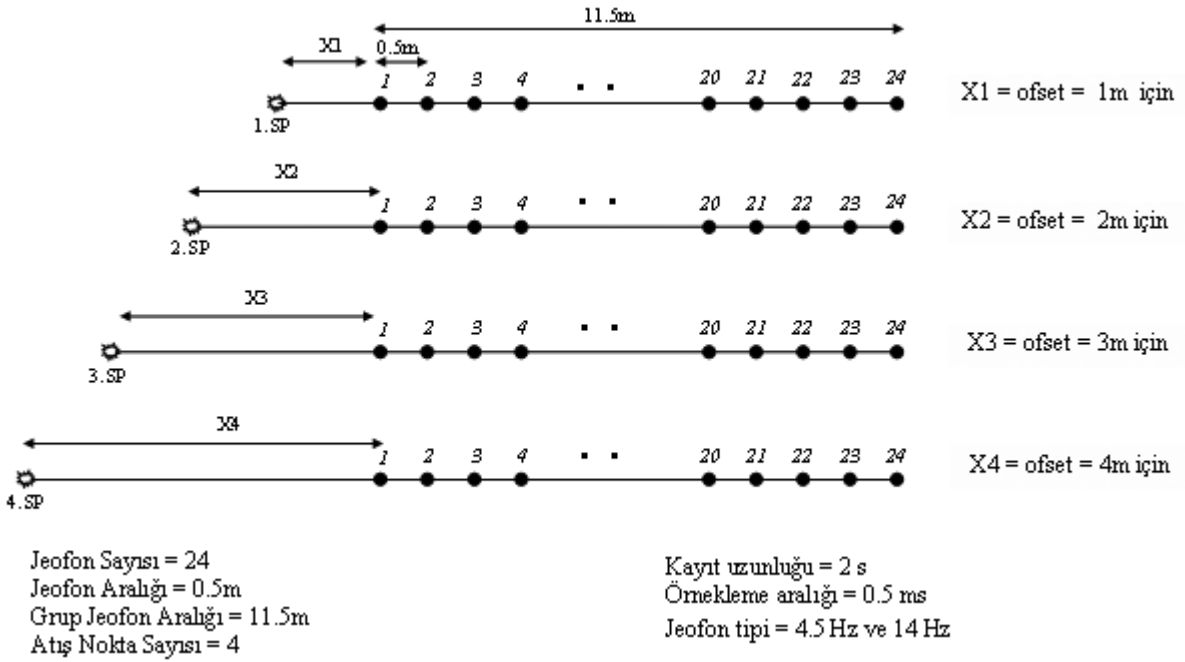
bugünkü yerinde, Gümüşçay'ın yanında yeniden kurmuşlardır. Magnesia antik kenti insan kaynaklı fazla yıkım ve tahribata uğramamıştır. Bunda akarsuların ve Gümüş Dağı'ndan inen yağmur sularının getirdiği milin kenti örtmesinin de payı yüksektir. Ancak, M.S. 17'de yıkıcı bir deprem geçirdiğinden önemli oranda zarar görmüştür (Bingöl, 2005).

Jeolojik açıdan, bölgede temeli Paleozoyik yaşlı Menderes Masifi'ne ait kayalar oluşturur. Bu kayalar gnays, şist, metakvarsit ve şistler içinde bulunan mermer mercerklerinden oluşur. Menderes Masifi'ne ait bu metamorfik temel kayaların üzerinde çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı ve kiltası aralanmasından oluşan Tersiyer (Alt Pliyosen-Üst Pliyosen) yaşlı kırıntılı çökeller uyumsuzlukla yer alır. Kuaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu birimleri yöredeki en genç oluşuklar olup, tüm birimleri uyumsuzlukla örteler (Filiz vd., 1999).

## YÖNTEMİN UYGULANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüzey dalgalarının çok-kanallı analiz (MASW) yöntemi için yapılan bu arazi çalışmasında, kırılma yönteminde kullanılan standart kayıtçılar ve jeofonlar kullanılmıştır. Alıcı olarak; 24 adet 4.5 Hz ve 14 Hz'lük P (düşey-bileşenli) jeofonu, kaynak olarak 8 kg 'lık bir balyoz ve demir plakanın kullanıldığı bu çalışmada, her bir atış istasyonunda sinyal/gürültü oranını arttırmak için ardarda 5 vuruş gerçekleştirilmiştir.

Veri toplama alan geometrisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Burada, jeofonlar (alıcılar), eşit aralıklarla bir platform şeklinde sabit olarak yerleştirilmiştir. Jeofon aralığı 0.5 m, jeofon yayılım uzunluğu (ilk jefondan son jefona uzaklık), 11.5 m'dir. Yakın açılım uzaklığı, 1, 2, 3 ve 4 m olarak değişim göstermekte olup, her iki farklı frekansa sahip (4.5 Hz ve 14 Hz) jeofonlar için dörder olmak üzere 8 noktada ölçü alınmıştır. Kayıtlarda, kayıt



Şekil 3. Veri toplama geometrisi.  
 Figure 3. Data acquisition geometry.

uzunluğu 2 s, örnekleme aralığı 0.5 ms seçilmiştir. SEG2 formatında Geometrics Smartseis Sismografi kullanılarak kaydedilen sismik kesitlerin yorumlanmasında, ters-çözüm işlemi doğrular olmayan en küçük kareler algoritmasına dayanan, bir boyutlu yüzey dalga çok-kanallı analiz yazılımı kullanılmıştır.

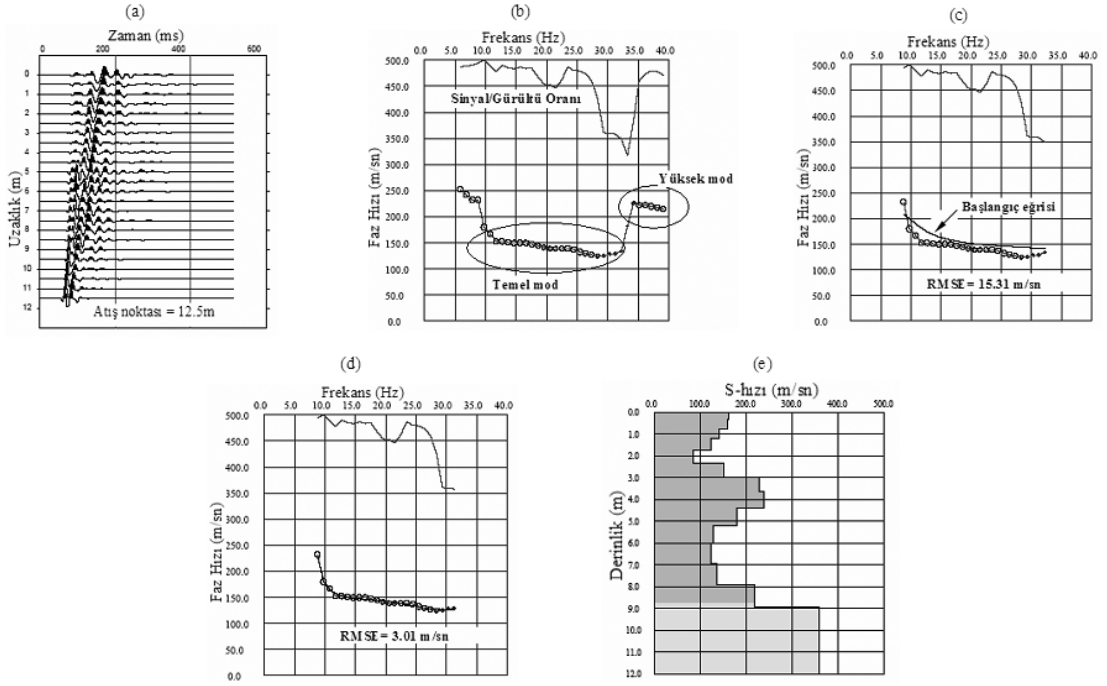
Arazi çalışmasında kullanılan kaynak, jeofon grup aralığı ve yakın açılım (ofset) uzaklığına bağlı etkin araştırma derinliği, en yüksek 10 m ile sınırlandırılmaktadır. Değerlendirmeler, araştırma derinliğinin jeofon grup aralığının yaklaşık yarısı kadar derine nüfuz edeceği düşünülerek irdelenmiş ve alan kayıtlarında herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır. Şekil 4'de atış nokta yerleri ve atış grupları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Her bir ölçü noktası için elde edilen çok-kanallı alan atış kayıtları, normal bir veri işlem sürecinden geçirilmiştir. İlk olarak, atış kaydı (Şekil 5a) temel "mod" frekans bağımlı faz hızı eğrisini çıkarmak için frekans bağımlı faz hızı eğrisine (f-k dönüşümü) dönüştürülmüştür (Şekil 5b). Frekans bağımlı faz hızı eğrisinde daha yüksek "modlar" ve sinyal/gürültü oranına bakılarak saptanan düşük kaliteli veriler çıkartılarak ters-çözüm için temel "mod" frekans bağımlı faz hızı

eğrisi belirlenmiştir. Temel "mod" frekans bağımlı faz hızı eğrisi referans olarak alınmış ve bir başlangıç eğrisi (yapay model) oluşturulmuştur (Şekil 5c). Bu başlangıç ve ölçülen model eğriler, en küçük kareler algoritması ile yinelenmeli olarak en küçük hata içerisinde kesiştirilmiştir (Şekil 5d). Sonuçta, zeminin fiziksel özelliklerini temsil eden derinliğe bağlı bir boyutlu S hız profili ve derinlik parametreleri belirlenmiştir (Şekil 5e, 6 ve 7).

## SONUÇLAR

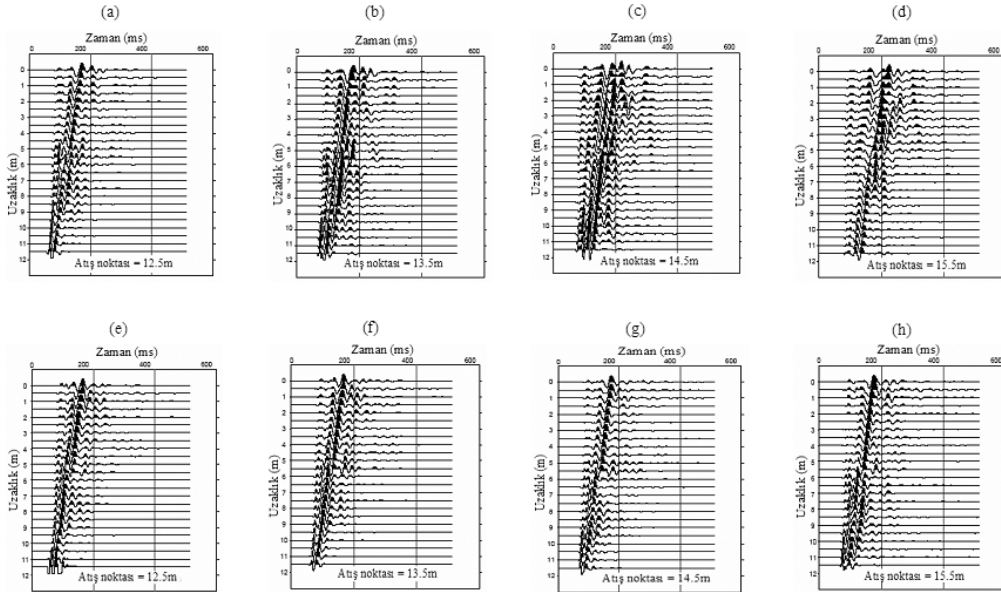
Çok-kanallı yüzey dalgası analizi yönteminin siğ yeraltı yapılarına uygulanabilirliği ve uygun parametre seçimi, Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Yöntemde, Rayleigh dalgasının frekans bağımlı faz hızı değişimi nedeniyle nüfuz derinliğinin dalga boyuna bağımlı olması ilkesinden ve veri-işlem aşamasında da Fourier dönüşümlerinden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada, sabit jeofon aralığıyla farklı yakın açılımlar kullanılarak, her iki jeofon frekansı için ortamın S-dalgası hızı değişimleri saptanmıştır. Bir boyutlu makaslama hızı profilleri nü-



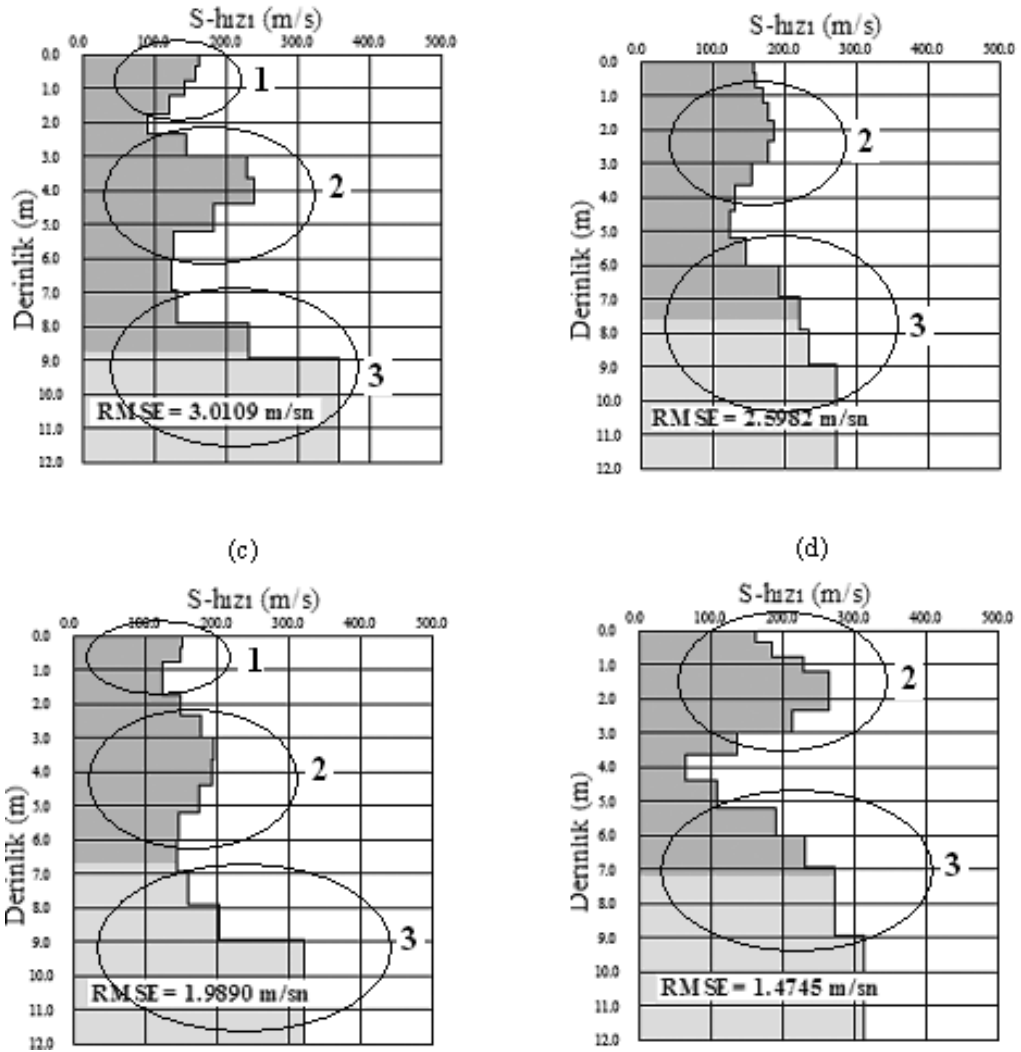
Şekil 4. Alan atış kayıtları: 4.5 Hz jeofon için (a) yakın açılım = 1 m, (b) 2 m, (c) 3 m, (d) 4 m; 14 Hz jeofon ile (e) ofset = 1 m, (f) 2 m, (g) 3 m, (h) 4 m.

Figure 4. Field shot records: (a) offset=1 m, (b) 2 m, (c) 3 m, (d) 4 m obtained from 4.5 Hz geophones; (e) offset = 1 m, (f) 2 m, (g) 3 m, (h) 4 m obtained from 14 Hz geophones.



Şekil 5. (a) Yakın açılım = 1 m (1. profil) için 24 kanallı 4.5 Hz jeofon kullanılarak elde edilen atış kaydı, (b) ölçülen verinin dispersiyon eğrisi, (c) yapay başlangıç ve ölçülen dispersiyon eğrileri, (d) final dispersiyon eğrisi ve (e) S-dalgı hız profilinin derinlikle değişimi.

Figure 5. (a) offset = 1 m (1st profile), shot record obtained from 24 channel 4.5 Hz geophones, (b) dispersion curve of measured data, (c) synthetic initial and measured dispersion curves, (d) final dispersion curve, and (e) S-wave velocity profile variation with depth.

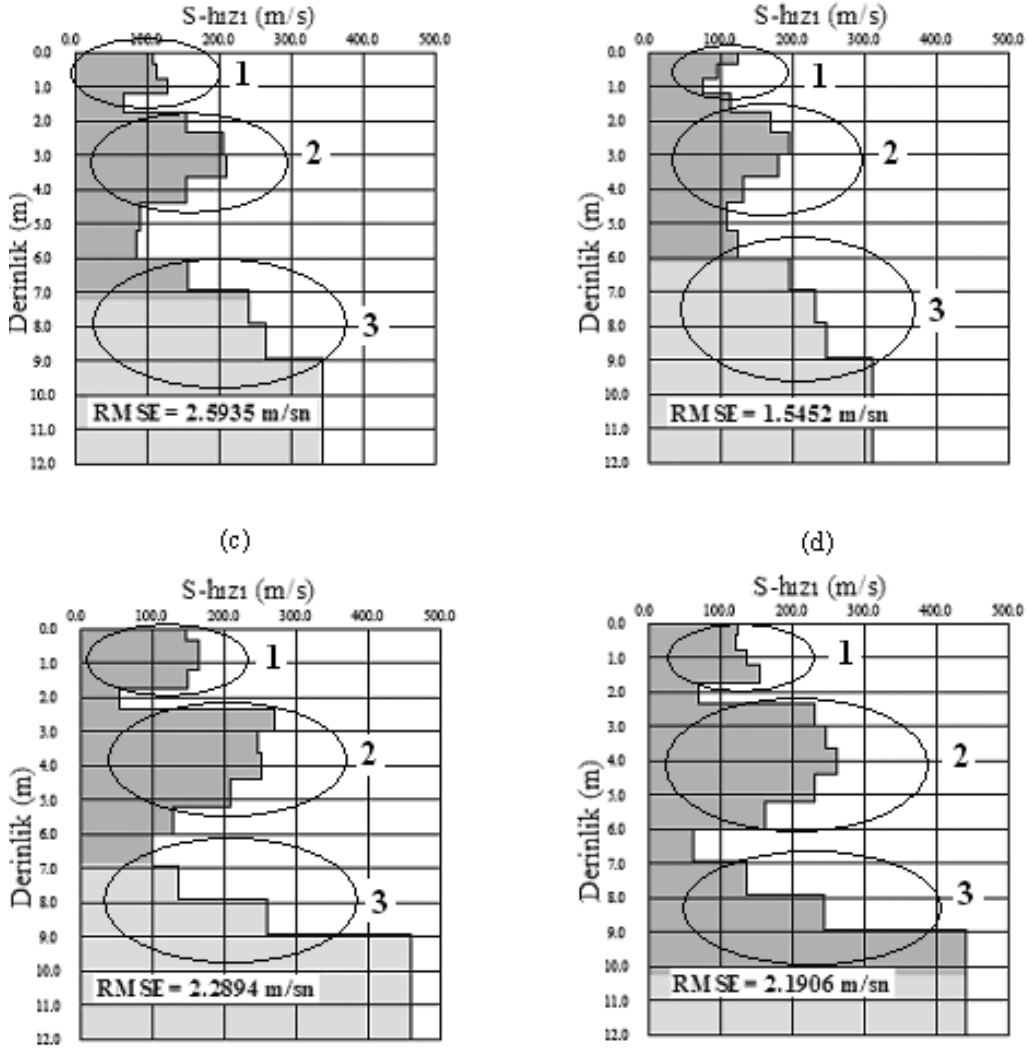


Şekil 6. 4.5 Hz jeofon kullanılarak elde edilen VS'nin derinlikle değişimi: (a) yakın açılım =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).

Figure 6. Variations of VS with depth obtained from 4.5 Hz geophones: (a) offset = 1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Soil cover, 2: Archeological material, 3: Basement rock).

fuz etki derinliği dikkate alınarak incelendiğinde, ilk 8 m'lik derinlikte Vs 100 ile 350 m/s arasında değişmektedir. 4.5 Hz jeofon kullanılarak toplanan veri kayıtları işlendiğinde, farklı yakın açılım değerleri için elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişimi birbirleriyle uyuşmamıştır. Farklı yakın açılım değerleri için, 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişim sonuçları ise 4.5 Hz'e göre birbirleriyle daha uyumludur. Örneğin, tüm yakın açılımlarda, 3 m derinlikte yaklaşık 250 m/s, 6 m için 150 m/s S-dalgası hız değeri saptanmıştır. Bu değişimler, farklı birimlerin arasın-

daki geçişler olarak nitelendirilebilir. Bunun yanı sıra, Vs'nin derinlikle değişim değerleri, 14 Hz jeofon kullanımının 4.5 Hz'e göre birim geçişlerinin ortaya çıkarılmasında daha başarılıdır. 14 Hz jeofon frekansı ile bu derinlikler için daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir ve bu sonuçlara bakılarak yorum yapılması daha uygun olacaktır. S-dalgası hızlarının derinlikle değişim sonuçları incelendiğinde, yüzeyden 2 m'lik derinliğe kadar toprak örtüsü, 2 ile 6 m arası arkeolojik malzeme ve 6 m'den sonra daha sıkı ve sert malzemeden oluşan ana kaya olarak adlandırılacak üç farklı birim



Şekil 7. 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen VS hızının derinlikle değişimi: (a) yakın açılım =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).

Figure 7. Variations of VS with depth obtained from 14 Hz geophones: (a) offset =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Soil cover, 2: Archeological material, 3: Basement rock).

ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, yakın açılımın jeofon aralığının yaklaşık üç katı olduğu durumda, verilerde sinyal/gürültü oranı daha yüksektir ve S-dalgası hızı daha belirgin bir değişim göstermektedir. Ölçülen ve hesaplanan frekans bağımlı faz hızı eğrilerine uygulanan ters-çözüm işlemi sonucunda bunlar arasında iyi bir çakışma sağlanmış olup, karekök (rms) hata 1.47 ile 3 m/s arasında değişmektedir.

MASW yöntemi; sismik kırılma, yansıma, kuyu içi, kuyuda yapılan ölçümler, tomografi ve sondaj çalışmalarına göre çok daha hızlı ve etkin

bir şekilde kullanılabilir. Yöntem, günümüzde pek çok zemin (jeoteknik, mikro bölgelendirme, mühendislik jeofiziği amaçlı) yapısının ve kayma dalga hızının ( $V_s$ ) saptanmasında etkili bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Buna göre; ölçüm alma, alınan ölçümlerin sonuçlarının kolay ve kısa zamanda değerlendirildiği çok-kanallı yüzey dalga analizi yöntemi, arkeolojik alanlar da dahil olmak üzere, kentsel alanlarda sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yaygın olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, Ö. Arda İşçi ve H.Aslıhan Çelik (Dokuz Eylül Üniversitesi)'e arazi çalışmalarındaki yardımlarından dolayı ve ayrıca yayının son şekline gelmesinde önemli katkılarından dolayı Mahmut G. Drahor ve Gökhan Göktürkler (Dokuz Eylül Üniversitesi)'e teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Bath, M., 1973. Introduction to the Theory of Seismology. A Halsted Press Book, Birkhauser Verlag, Basel.
- Bingöl, O., 2005. Menderes Magensiası/Magnesia on the Meander: Theatron. Homer Yayınları, İstanbul.
- Dobrin, M.B., and Savit, C.H., 1988. Introduction to Geophysical Prospecting. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N., and Koçak, A., 1996. Turkish Geothermal Inventory. MTA General Directory, Ankara.
- Filiz, Ş., Tarcan, G. ve Gemici, Ü., 1999. Germencik (Aydın) jeotermal alanlarının hidrojeo- kimyasal açıdan incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 1 (1), 41-64.
- Gucunski, N., and Wood, R.D., 1991. Instrumentation for SASW testing, Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics, S. K. Bhatia and G. W. Blaney (eds.), American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication. No. 29, pp. 1-16.
- Heisey, J.S., Stokoe II, K. H., and Meyer, A. H., 1982. Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. Transportation Research Research Record No. 852, 22-31.
- Miller, R.D., Xia, J., and Park, C.B., 1999. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas. Open-file Report-Kansas Survey 99-9.
- Nazarian, S., Stokoe, K.H., and Hudson, W.R., 1983. Use of spevtral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. Transportation Research Record, 930, 38-45.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts , pp. 1377-1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999a. Multi-channel analysis of surface waves (MASW). Geophysics, 64, 800-808.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Hunter, J.A., and Harris, J.B., 1999b. Higher mode observation by the MASW method. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 524-527.
- Sanchez-Salinerio, I., Roesset, J.M., Shao, K.Y., Stokoe II, K.H., and Rix, G. J., 1987. Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements. Transportation Research, 1136, 86-95.
- Sheriff, R.E., 1991. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Third edition, Society of Exploration Geophysicists.
- Sheu, J.C., Stokoe II, K.H., and Roesset, J.M., 1988. Effect of reflected waves in SASW testing of pavements: Transportation Research, 1196, 51-61.
- Steeple, D.W., and Miller, R.D., 1990. Seismic-reflection methods applied to engineering, environmental, and groundwater problems. The Society of Exploration Geophysicists. Investigations in Geophysics, 5, S.H. Ward (ed.), 1: Review and Tutorial, 1-30.
- Stokoe II, K.H., and Nazarian, S., 1983. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves. Proceeding of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland.
- Stokoe II, K.H., Rix, G.J., and Nazarian, S., 1989. In-situ seismic testing with surface wave. Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, pp. 331-334.

- Stokoe, K.H., II, Wright, G.W., James, A.B., and Jose, M.R., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Geophysical Characterization of Sites, R.D. Woods, (ed.), Oxford Publishers, New Delhi.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., and Harris, J. B., 1999. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments. Proceedings of the 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp. 437–440.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 2000. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 1295–1298.







## Isparta yerleşim alanı kuzey kesiminin sığ S-Dalgası kesitinin çıkarılmasında Kırınım-Mikrotitreşim Tekniğinin (ReMi) kullanılması

### *Use of Refraction-Microtremor Technique (ReMi) of shallow S-wave truncation of the northern edge of Isparta urban area*

Zakir KANBUR<sup>1</sup>, Muhittin GÖRMÜŞ<sup>2</sup>, Süveyla KANBUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008

Kabul (accepted) : 21 Temmuz (July) 2008

#### ÖZ

Sismik Kırılma-Mikrotitreşim (ReMi) tekniği, yüzeye yakın tabakalara ait ortalama makaslama dalgası hız yapısını elde etmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, Isparta'nın kuzeyinde, temelde yer alan Üst Kretase yaşlı karbonatlar, Paleosen-Eosen yaşlı kırıntılılar ile Pliyo-Kuvaterner yaşlı daha genç çökeller arasındaki yapının ortaya konması amacıyla kullanılmıştır. Pliyo-Kuvaterner yükseltisini yaklaşık kuzey-güney doğrultusunda kesen bir profil boyunca toplam 15 noktada ReMi verisi elde edilmiştir. Bu veriler, derinliğe ve makaslama dalgası hızına dönüştürülerek profil boyunca ana kaya topoğrafyası ve ana kayaya kadar mevcut tabaka derinlikleri ile hızları belirlenmiştir. Hızlar ve derinlikler dikkate alınarak olası faylanma noktaları saptanmıştır. Arazi ve ReMi verileri, yaklaşık BKB ve KB-GD doğrultulu olası eğim atımlı normal fayların Pliyo-Kuvaterner yükseltisinin oluşumunda etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmayla ReMi tekniği kullanılarak yüzeye yakın ana kaya ve güncel yapıların kolayca ortaya konabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Isparta havzası, makaslama dalga hızı, Rayleigh dalgası dispersiyonu, sismik-kırılma mikrotitreşim tekniği.

#### ABSTRACT

The refraction-microtremor (ReMi) technique has been recently developed to obtain near subsurface average shear-wave velocity. The technique is used in this study for the purpose of delineating the subsurface structure between the Upper Cretaceous carbonates, Paleocene-Eocene clastics and the Plio-Quaternary sediments. ReMi data along a profile at the edge of the northernmost Isparta Basin were collected at 15 sites and converted to velocity and depth section. In addition to the basement topography, the subsurface layers and their depths, and velocities were determined. By considering depth and the corresponding velocity along the profile, possible fault location was interpreted. The field and ReMi data obtained suggest that the Pli-Quaternary topography is controlled by possible WNW and NW-SE normal fault systems. In conclusion, this study shows that the ReMi technique may also be useful method for delineating near surface bedrock topography and involving structure such as fault in addition to shear-wave velocity information.

**Keywords:** Isparta basin, shear-wave velocity, Rayleigh wave dispersion, refraction microtremor technique.

## GİRİŞ

Çökel havzalarda ana kaya topoğrafyası ve bunları örten çökellerin neo-tektonik yapılarının belirlenmesi, özellikle deprem bölgelerinde önemli konulardan biridir. Jeofizikte sismik, gravite vb. gibi değişik birçok teknik bu amaçla kullanılmaktadır. Bu tekniklerin amaç, zaman, fiyat ve yer uygunluğu gibi kısıtlamaları göz önüne alındığında, en ekonomik olan yöntemin seçilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Son yıllarda geliştirilen kırılma-mikrotitreşim (ReMi) tekniği (Louie, 2001), 30 m ortalama S dalgası hızı ( $V_{s30}$ ) ve yeterli açılımla 100 m derinliğe kadar tabaka kalınlıklarının ve hızlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Oldukça kolay ve ekonomik görünen bu teknik, bilinen kırılma sismiği cihazı ve çevresel gürültünün sismik kaynak olarak kullanılmasıyla yer altındaki tabaka kalınlıkları ve makaslama dalga hızlarının belirlenmesine dayanır. Gerek log verileriyle, gerekse aynı amaçla geliştirilen diğer tekniklerle yapılan karşılaştırmalar, ReMi tekniğinin iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir (Louie, 2001; Scott vd., 2004; Thelen vd., 2005; Richwalski vd., 2007; Anderson vd., 2007; Chávez-García vd., 2007).

Saha ve çevresi ile Isparta Büklümü kuzeyinde, bugüne kadar çok sayıda tektonik ve stratigrafik amaçlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Gutnic vd., 1979; Koçyiğit, 1983 ve 1984; Karaman vd., 1988; Karaman, 1994; Görmüş ve Özkul, 1995; Yağmurlu vd., 1997; Poisson vd., 2003a ve 2003b; Robertson vd., 2003; Alçiçek vd., 2005). Buna karşın, temel kayalar ile bunları örten genç çökeller arasındaki yapıyı jeofizik yöntemleri kullanarak değerlendiren bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma, ReMi tekniğini kullanarak ilk kez bir sahada ana kaya ile bunları örten çökeller arasındaki yapıyı ortaya koymak amacını taşımaktadır. Elde edilen sonuçların, özellikle güncel tektonik hatların belirlenmesine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

## ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİK KONUMU

Çalışma sahasındaki stratigrafik amaçlı çalışmalarda (Gutnic ve Poisson, 1970; Gutnic, 1977; Gutnic vd., 1979; Yalçınkaya, 1989; Akbulut, 1980; Sariz, 1985; Karaman vd., 1988; Kara-

man, 1990; Karaman, 1994; Görmüş ve Özkul, 1995), temelde Üst Kretase yaşlı otokton Söbüdağ kireçtaşı biriminin yer aldığını belirtilmektedir. Temel kayaları, Paleojen yaşlı kırıntılı çökeller örtmektedir. Sahada Pliyosen-Kuvaterner yaşlı birimler olarak Gölcük volkanikleri ve güncel çökeller gözlenmektedir. Saha ile ilgili stratigrafik ve tektonik bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

*Üst Kretase karbonatları:* Sahada Üst Kretase; kalın, masif tabakalı Söbüdağ kireçtaşı ve plaketli, ince-orta tabakalı Senirce kireçtaşı ile temsil edilir. Sığ denizel karakterli kireçtaşları olan Söbüdağ kireçtaşının Davras kireçtaşlarının üst kesimlerine karşılık geldiği belirtilmektedir (Görmüş ve Özkul, 1995). Üst Kretase yaşlı karbonatlar açık denizel özellikte Senirce kireçtaşı (Çiğdemtepe kireçtaşı) ile sonlanırlar.

*Paleojen kırıntılıları:* Koçtepe ve Isparta formasyonu olarak bilinen kırıntılı çökeller Üst Kretase yaşlı karbonatları uyumsuz olarak örter (Karaman vd. 1988). Bu ilişkiyi farklı şekillerde yorumlayan çalışmalar da bulunmaktadır. Açık denizel karakterli bu kırıntılı kayalar kumtaşı, kilitaşı, marn ve çakıltası aralanmalarından oluşmaktadır. Paleojen'in temelini daha ince kırıntılı kayalar oluştururken, üste doğru ritmik aralanmalı kırıntılıların yaygın olduğu gözlenir.

*Gölcük volkanikleri:* Çünür Tepe çevresinde gözlenen trakiandezitik ve volkanokırıntılı çökeller, temeldeki kayaları keserek çıkan Pliyo-Kuvaterner yaşlı kayaları temsil ederler.

*Pliyo-Kuvaterner çökelleri:* Sahada, etek ve ova çökelleri olmak üzere iki farklı çökel alanı bulunmaktadır (Görmüş vd., 2003).

Isparta Büklümü veya Isparta üçgeni gibi adlarla bilinen batı Toros kesimi, tektonik açıdan da Geç Miyosen öncesinde sıkışma (Likya, Antalya ve Beyşehir-Hoyran Nap sistemlerinin gelişimi), Geç Miyosen-günümüz zaman aralığında açılma rejimlerinin (Göller yöresinin göl grabenlerini ve dağ yükselimleri) ve depremelliğin etkin olarak yaşandığı bir bölgedir. Miyosen öncesinde bir sıkışma tektoniğinin ve bindirmelerin gerçekleştiği Isparta çevresinde bölgenin, doğu kesimde Beyşehir-Hoyran napları, batıda Likya napları ve orta kesimde ise Antalya naplarının etkisinde kaldığı bilinmektedir (Koçyiğit, 1983 ve 1984;

Şenel, 1984 ve 1997; Robertson, 1993; Robertson, 2000; Glover ve Robertson, 1998; Temiz vd., 2001; Poisson vd., 2003a ve 2003b; Şentürk ve Yağmurlu, 2003). Geç Miyosen sonrası-günümüz aralığında ise, bir sıkışma fazı ile keşilmiş iki ayrı genişleme döneminin varlığından, bunlardan sonuncusunun da Pliyo-Kuvaterner yaşlı neotektonik dönemde geliştiğinden söz edilmekte olup, oluşan göllerin birer graben havzası olduğu belirtilmektedir (Koçyiğit, 1983, 1984, 2003 ve 2005; Koçyiğit ve Özacar, 2003; Koçyiğit ve Deveci, 2007; Yağmurlu vd., 1997; Poisson vd., 2003a ve 2003b; Robertson vd., 2003; Yağmurlu, 2000). Bu genişlemenin D-B (Eğirdir, Kovada fayları), KB-GD (Burdur fayları), KD-GB (Aksu fayı, Beyşehir fayları) ve K-G (Acıgöl fayları) olduğu düşünülürse, farklı yönlerdeki gerilmelerin neo-tektonik dönemde etkin olduğu gözlenir. Benzer şekilde, volkanik dayk gelişimleri de (Pliyo-Kuvaterner yaşlı Gölcük volkanikleri ile ilişkili) dikkate alındığında farklı yönlerde çekme gerilmeleri ile bükümün şekillendirildiği görülür. Antalya'nın kuzeyinde bulunan Harmançık, Şuhut, Dombayova, Gölcük-Isparta, Eğirdir-Kovada, Tavas ve Antalya çöküntülerinin doğu ve batı kenarını sıralayan fay takımları K-G gidişli olup, bu fayların kinematik analizi ve neden olduğu depremlerin odak mekanizması çözümleri, faylar boyunca güncel genişlemenin D-B yönünde olduğunu göstermektedir (Koçyiğit, 2000). Glover ve Robertson (1998), Aksu havzası ve Kovada grabenini çevreleyen ve Eğirdir gölünde birleşen bir iç Isparta açısının varlığından da söz etmektedirler. Isparta Ovası, Isparta açısının kuzey merkezi civarlarında yer almaktadır. KD gidişli Burdur Fay Zonu; Isparta üçgenininin batı kenarını, KB gidişli Akşehir Fay Zonu ise doğu kısmını oluşturur (Koçyiğit ve Özacar, 2003).

Çalışma sahasında önceden belirlenmiş olan Söbüdağ fayı yaklaşık K-G gidişli olup Söbüdağ yükselimini kontrol etmektedir (Karaman vd., 1988; Görmüş ve Özkul, 1995). "V Kuralı" ve kesen-kesilen birimler dikkate alındığında, Söbüdağ fayı düşeye yakın eğim atımlı bir fay olarak yorumlanmaktadır. Süleyman Demirel Üniversitesi Kampüsü'nden (Şekil 1) batıya doğru Isparta-Çimento Fabrikası çevresine kadar yaklaşık 5-6 km uzanan bu fayın doğu kesimlerine Paleojen kırıntılılarına rastlanmaktadır.

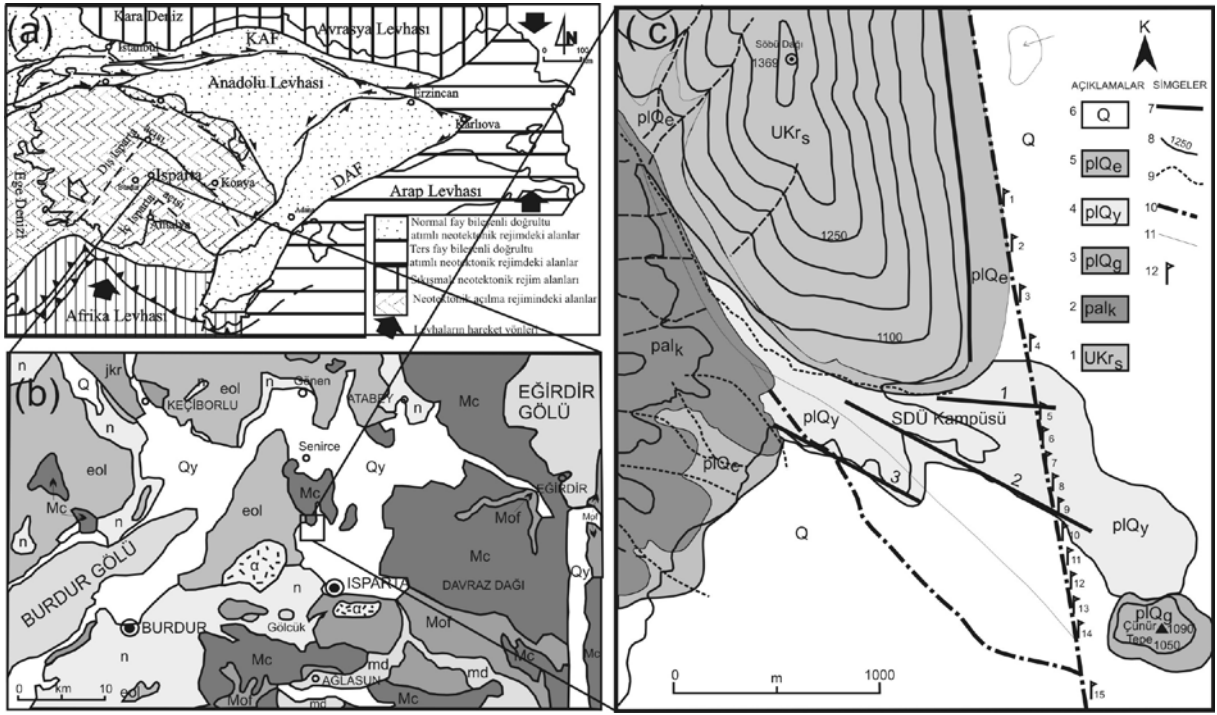
## YÖNTEM

Bu çalışmada, yüzeye yakın ana kaya topografyası ve tabakaların yapısal özelliklerinin belirlenmesi için ReMi tekniği kullanılmıştır. ReMi tekniği, neotektonik dönemde Batı Anadolu genişleme rejimi içerisinde şekillenen Isparta grabeninin kuzey kenarında Söbüdağ kireçtaşı ile ova çökelleri arasında kalan ve yamaç düğüntüleri ile alüvyal yelpazenin oluşturduğu bir yükselti üzerinde uygulanmıştır (Şekil 1). Çalışmada, belirlenen alanda 100 m derinliğe kadar olan yapıların derinlikleri ve hızlarının elde edilmesi için temel olarak  $V_{s30}$  olarak bilinen 30 m derinlik ortalama S- dalgası hız bilgisi için Louie (2001) tarafından geliştirilen ReMi tekniği kullanılmıştır. Teknik, temel olarak iki ilkeye dayanır. Birincisi trafikten, ya da başka nedenlerden kaynaklanan çevresel gürültülerin standart sismik kırılma ekipmanı kullanılarak belirli bir zaman süresince çizgisel olarak kaydedilmesidir. Çalışmada 4.5-14 Hz düşey jeofonlar kullanılmıştır. Kullanılan jeofonların doğal frekansı derinlik penetrasyonunun jeofon frekansı ile ters orantılı olması nedeniyle hedef derinliğe bağlıdır. Ayrıca, x ve t boyutları, hedeflenen derinliğe göre değişmektedir.  $V_{s30}$  için 100-150 m açılım yeterli iken, 100 m derinlik için 250-300 m açılım uygundur. İkinci ilke ise, veri kaydının yavaşlama (hızın tersi)-frekans (p,f) dönüşümünün yapılmasıdır. Bu yolla Rayleigh dalgası diğer dalgalardan ayrılır ve görünür hıza karşı gerçek faz hızı saptanır.

S-dalgası hız bilgisinin elde edilmesi temel olarak 4 adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda aşağıda verilen ifadeyle, düşey partikül hızının  $p-\tau$  dönüşümü yapılmaktadır (Thorson ve Claerbout, 1985).

$$A(p = p_0 + ldp, \tau = kdt) = \sum A(x = jdx, t = idt = \tau + px) \quad (1)$$

$p-\tau$  dönüşümü, çeşitli x noktalarında aynı anda ölçülmüş izlerden oluşan bir sismik kayıt  $A(x,t)$  boyunca çizgi entegrali olarak tanımlanmaktadır. Yavaşlama  $p = dt / dx$  ile tanımlanır ve x doğrultusundaki eğimi verir. x ve t  $\Delta x$  ve  $\Delta t$  şeklinde (1) nolu eşitlikte gösterildiği gibi, ayrıklandırılır ve integral bu ayrık değerlerin toplamından oluşur. Dönüşümde ortaya çıkan eğim-



Şekil 1. (a) İnceleme sahasının yer bulduru haritası (Koçyiğit ve Özacar, 2003'den değiştirilerek hazırlanmıştır), (b) 1/500.000 ölçekli jeoloji haritası (Pamir ve Erentöz, 1963'den değiştirilmiştir; Q: Kuvaterner, karasal, ayrılmamış, Qy: Holosen yeni alüvyon, n: Neojen, karasal, ayrılmamış,  $\alpha$ : Andezit, spilit, porfirite, md: Miyosen, denizel, ayrılmamış, eol: Eosen-Oligosen, Mc: Mesozoyik-Tersiyer (geniş kapsamlı seri), Mof: Mesozoyik (ofiyolitli seri), Ekseriya Kretase, jkr: Jura-Kretase ve (c) çalışma sahası ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (1. UKrs. Üst Kretase karbonatları -Söbüdağ kireçtaşı, 2. palk. Paleojen kırıntılı çökelleri-Kayıköy formasyonu., 3. plQ<sub>g</sub>. Pliyo-Kuvaterner Gölçük volkanikleri, 4. plQ<sub>y</sub>. Pliyo-Kuvaterner alüvyal yelpaze, 5. plQ<sub>e</sub>. Pliyo-Kuvaterner etek döküntüleri, 6. Q. Ova çökelleri, 7. Eğim atımlı faylar, 8. Düzceç eğrileri, 9. Vadi, 10. Asfalt yol, 11. Tali yol, 12. ReMi ölçü noktaları).

Figure 1. (a) Location map of the study area, (b) geological map of the area with a scale of 1/500,000 (modified from Pamir and Erentöz, 1963; Q: Quaternary, terrestrial, undifferentiated, Qy: Holocene alluvium, n: Neogene, terrestrial, undifferentiated,  $\alpha$ : Andesite, spilit, porfirite, md: Miocene, marine, undifferentiated, eol: eocene-oligocene, Mc: Mesozoic-Tertiary (comprehensive serie), Mof: Mesozoic (ophiolitic serie), mainly Cretaceous, jkr: Jurassic-Cretaceous, and c) simplified geological map of the study area and its surroundings, 1. UKrs. Upper Cretaceous carbonates-Söbüdağ limestone, 2. palk. Paleogene clastics-Kayıköy formation, 3. plQ<sub>g</sub>. Plio-Quaternary aged Gölçük Volcanics, 4. plQ<sub>y</sub>. Plio-Quaternary aluvial fan, 5. plQ<sub>e</sub>. Plio-Quaternary slope deposits, 6. Q. Quaternary plain deposits, 7. Faults, 8. Elevation contours, 9. Valley, 10. Asphalt road, 11. Road, 12. ReMi survey points).

ler boyunca belirlenen  $\tau$  değerine karşı gelen  $x$  değerlerinden  $p$  değeri belirlenir. Eğimi veren doğru boyunca her izdeki genliklerin toplamı, belirlenen  $\tau$  ve  $p$  çiftine karşılık gelecektir ki bu faz hızını verir.

İkinci adım veri,  $p - \tau$  ortamından  $p-f$  ortamına McMechan ve Yedlin (1981)'in gösterdikleri gibi Fourier dönüşümünden oluşmaktadır.

$$F(p, f = mdf) = \sum A(p, \tau = kdt) e^{i2\pi m k d f} \quad (2)$$

Bu dönüşümü izleyen üçüncü adımda, Louie (2001) tarafından gösterildiği gibi, güç spektrumu alınır. Güç spektrumu  $F(p, f)$  ile bunun karmaşık eşleniğinden oluşur.

$$S(p, f) = F(p, f) \cdot F(p, f) \quad (3)$$

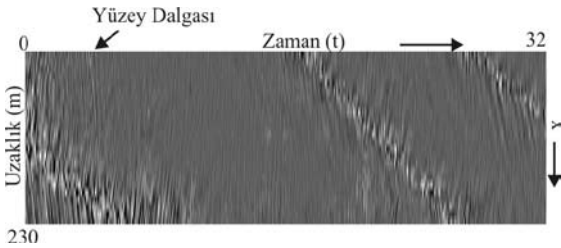
Bu şekilde alıcı profili boyunca  $p - \tau$  çiftinin düz ve ters yöndeki dönüşümlerinin toplamı alınır.

$$S(|p|, f) = F(p, f) + F(-p, f) : S_{toplum}(|p|, f) = (\sum S(p, f)) \quad (4)$$

Böylece her iki yöndeki yavaşlık değerlerinin tek bir  $|p|$  ekseninde toplanması sağlanır ve toplam,  $S(|p|, f) |p|, f$  uzayında elde edilmiş olur. Bu dönüşümlerin arka arkaya uygulanması sonucunda uzaklık-zaman  $(x, t)$  ortamında bulunan sismik kayıt hızının tersi olan yavaşlama ve frekans  $(p, f)$  ortamına dönüştürülmüş olur.

## ARAZİ UYGULAMASI

Kuramsal olarak anlatılan yöntem, uygulamada da veri toplama, veri işlem ve ters-çözüm olmak üzere, üç aşamadan oluşmaktadır. Veri toplama aşamasında bu çalışmada 24 kanallı sismograf ve 4.5 Hz'lik jeofonlar kullanılmıştır. Çalışma alanında arazi koşullarının izin verdiği ölçüde belirlenen yükseltiyi kapsayacak şekilde ölçü noktaları belirlenmiştir. İlk dört ve son ölçü aralıkları 250 m alınırken, esas değişim beklendiği diğer ölçü noktaları 125 m ile aralıklandırılarak yaklaşık 2300 m boyunca toplam 15 noktada ReMi verisi elde edilmiştir. 100 m araştırma derinliği hedef alındığından, ReMi verisi bu hedef derinliğine göre düzenlenmiştir. Buna göre 10 m kanal aralığı, 2 ms örnekleme aralığı ile 32 s kayıtlar elde edilmiştir. Her bir araştırma

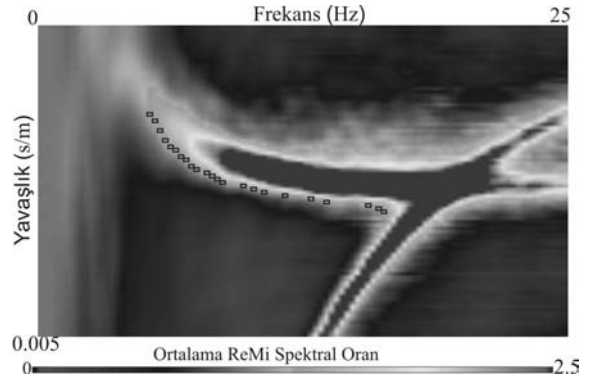


Şekil 2. 1 nolu ölçüm noktasında alınan tipik ReMi verisi.

Figure 2. Typical ReMi data collected from the the first point.

noktasında 7-10 kayıt elde edilerek ReMi spektral oranının yükseltilmesi hedeflenmiştir. Şekil 2, bir numaralı ölçü noktasından elde edilen ReMi verisini göstermektedir.

İkinci aşamada zaman uzaklık  $(x, t)$  ortamında elde edilen verilerin  $\tau$ - $p$  dönüşümü yapılarak güç spektrumları elde edilmiştir. Her araştırma noktasında kaydedilen bütün verilerin güç

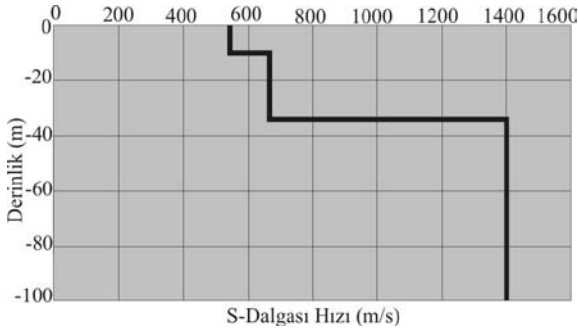


Şekil 3. Şekil 2'de gösterilen gürültü kaydının güç spektrumu.

Figure 3. Power spectrum of the data shown in Figure 2.

spektrumları incelenmiş, üst üste yığılarak ortalamaları alınmış ve veri kalitesi artırılmıştır. Şekil 3 birleştirilmiş güç spektrumunu göstermektedir. Spektrum üzerinde, uyumlu faza karşılık gelen güç spektrumu değerleri büyük olacaktır. Bunlar işaretlenerek, periyot (frekans) ile faz hızının veya hızın tersi olan yavaşlık değişimi elde edilebilir. Şekil 3'te, içi boş siyah kutular şeklinde işaretlenen değerlere karşılık gelen frekans-yavaşlık çifti kullanılarak, periyot bağımlı faz hızı eğrisi (Şekil 3'te içi boş kutucuklarla) elde edilmiştir.

ReMi ölçülerinden elde edilen güç spektrumundan gösterildiği gibi, elde edilen dispersiyon eğrisine uyan kuramsal verinin hesaplanması gerekir. Kuramsal verinin hesaplanmasında, yeraltının elastik tabakalardan oluştuğu varsayımıyla, her bir tabaka sismik S-dalgası hızı (VS), P-dalgası hızı (VP), yoğunluk ( $\rho$ ) ve tabaka kalınlığı ( $h$ ) olmak üzere dört parametre ile temsil edilmiştir. Rayleigh dalga hızı, daha çok tabaka kalınlığı ve S-dalga hızına bağımlı olduğundan, ters-çözüm işleminde sadece bu iki parametre kullanılabilir. Ölçülen ve kuramsal frekans bağımlı faz hızı eğrilerinin çakışmasını sağlayan tabaka parametreleri, deneme-yanılma veya ters-çözüm yöntemleri ile hesaplanır. Şekil 4'te, profilin ilk ölçü noktasından elde edilen ReMi verisinin dönüştürülmesiyle elde edilen VS ve derinlik bilgisi verilmiştir. Bu sonuç, Şekil 3'te içi boş kutucuklarla gösterilen dispersiyon eğrisine karşı gelen kuramsal dispersiyon eğrisinden elde edilmiştir.



Şekil 4. Şekil 3'te içi boş kutucuklarla gösterilen pik dispersiyon eğrisine karşı gelen kuramsal dispersiyon eğrisinden elde edilen  $V_s$  hızları ve derinlikleri ( $V_s$  modellemesi 3 tabaka için yapılmıştır).

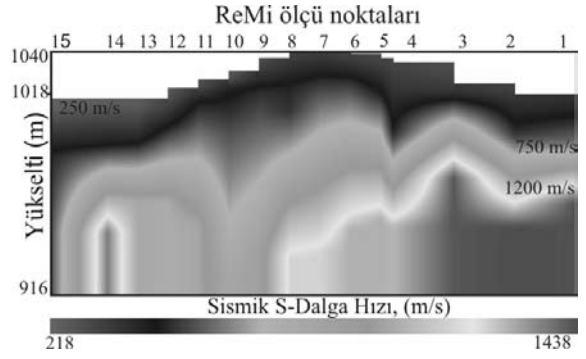
Figure 4.  $V_s$  velocity and depths obtained from theoretical dispersion curve corresponding to peak dispersion curve shown by empty box in Figure 3. ( $V_s$  is modelled for 3 layers).

## BULGULAR

Çalışma alanında yaklaşık 2.5 km'lik bir profil boyunca 15 ölçü noktasında (bkz. Şekil 1c) elde edilen ReMi verisi tek tek işlenerek hız-derinlik ortamına dönüştürülmüş ve tek boyutlu bu bilgiler birleştirilerek iki boyutlu hız-derinlik kesiti elde edilmiştir (Şekil 5). Kesit yatayda 2300 m uzaklığı düşeyde 100 m'yi göstermektedir. Şekil incelendiğinde, düşey yönde 3 farklı ana hız ortamı göze çarpmaktadır. Kesit, düşey ve yanal yöndeki hız değişimleri göz önüne alınarak yorumlanmıştır (Şekil 6). ReMi kesitinden elde edilen temel hızlar ve arazi gözlemleri birleştirilerek çalışma alanına ilişkin jeolojik yorum aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

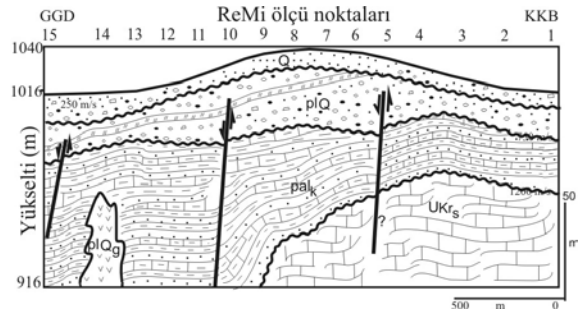
Üst Kretase karbonatları, Toroslarda Beydağları kireçtaşı olarak bilinen otokton istifeye aittirler. Karbonatlar, ReMi kesitinde (bkz. Şekil 5 ve 6) sismik makaslama hızı 1200 m/s ve daha büyük hızlara karşı gelmektedir. Kesitte bu birim, kuzeyde yaklaşık 50 m derinlikten başlayarak güneye doğru derinleşerek 9. ve 10. ölçü noktaları civarlarında ani bir derinlikle kaybolmakta ve yerini daha genç birimlere bırakmaktadır.

Paleojen kırıntılıları, ReMi kesitinde Üst Kretase karbonatlarının hemen üstünde 750-1200 m/s aralığında sismik kesme hızına sahip kaya birimleri olarak yorumlanmıştır.



Şekil 5. Hız-derinlik ortamına dönüştürülmüş toplam 15 ReMi verisinin birleştirilmesiyle elde edilmiş iki boyutlu hız-derinlik kesiti.

Figure 5. 2D depth-velocity section obtained by adding 15 ReMi data converted to depth-velocity sections.



Şekil 6. Şekil 5'deki ReMi verileri dikkate alınarak çıkarılmış enine jeoloji kesiti (UKr<sub>s</sub>: Üst Kretase karbonatları, pal<sub>k</sub>: Paleojen kırıntılı çökelleri, PIQ<sub>g</sub>: Gölcük volkanikleri, PIQ: Pliyo-Kuvaterner çökelleri, Q: Etek ve ova çökelleri).

Figure 6. Geological cross-section obtained from the ReMi data in Figure 5 (UKr<sub>s</sub>: Upper Cretaceous carbonates, pal<sub>k</sub>: Paleogene clastics, PIQ<sub>g</sub>: Gölcük volcanics, PIQ: Pliyo-Quaternary sediments, Q: Slope and plain deposits).

Gölcük volkanikleri, ReMi kesitinin sonuna doğru ova çökelleri altında makaslama dalgası hızı Üst Kretase karbonatları hızına yakın hız değerlerine ulaşmaktadır. 13. ve 14. ölçü noktaları civarında yaklaşık 60 m derinlikte ortaya çıkıp kısa mesafelerde kaybolan bu yapı bir dayk görünümündedir.

Pliyo-Kuvaterner çökelleri; etek alanı, vadi ağzlarında gelişen yelpaze görümlü, düşük eğimli alüvyal yelpaze çökeller ile belirgin bir geometri içermeyen yamaç döküntülerini kapsar. Graben

alanları ise daha az eğimli, rüzgar vb. çökelleri içeren kesimlerdir. Söbüdağ etekleri ile Çünür Tepe arasındaki çökellerin eski bir alüvyal yelpaze ile yeni gelişen ikincil ve üçüncül yelpazeler şeklinde olduğu düşünülmektedir. Yamaç döküntüleri Söbüdağ eteğinde gelişmiştir. Sismik makaslama dalgası hızları alüvyal yelpaze çökellerinde 350-550 m/s aralığında ortaya çıkmaktadır. Ova çökelleri ise, üniversite yerleşkesinin güney kesimlerde gözlenir ve sismik makaslama dalgası 220-350 m/s aralığındadır (bkz. Şekil 1 ve 5).

## JEOLJİK YAPILAR

ReMi verisi ve saha gözlemleri dikkate alındığında, alüvyal yelpazelerin içerisinde gelişmiş üç adet eğim atımlı fay belirlenmiştir (bkz. Şekil 1 ve 6). İlk eğim atımlı fayın Söbüdağ eteğinde geliştiği düşünülür. Bu fay yaklaşık D-B gidişli olup, arazi verisine rastlanılmamıştır. ReMi tekniği ile elde edilen yeraltı görüntüsünde bu fayın dağ ve etek arasında gelişmiş bir fay olması olasıdır.

Yelpaze içerisinde gelişen ikinci fay, KB-GD gidişlidir. Söbüdağ eteğinde, Süleyman Demirel Üniversitesi Yerleşkesi ile Isparta Ovası arasındaki belirgin bir şekilde gözlenen morfolojik yüksekliğin bu fay ile kontrol edildiği anlaşılmaktadır. Her ne kadar bir kısım dolgu malzemesi ile yelpaze üzerinde düzleştirmeler gerçekleştirilmişse de, bu yükselti oluşumunun belki de Pliyosen sonlarında başlayan ve bir vadi ağzında sel, akma gibi süreçlerle buraya çökelen sedimanlar olduğu görülür. Doğu ve batı yerleşkelerinin arasında ise, alüvyal yelpaze çökelleri, 1-2 m kalınlıkta yataya yakın tuf ara tabakalarını da içerir. Çalışma alanında bulunan binaların yapım aşamasında açılmış yol yarmasında 1-2 m atımla tuf tabakasının ovaya doğru çöktüğü de önceki arazi çalışmalarında gözlenmiştir. ReMi tekniği ile elde edilen görüntüde de ikinci fay belirgin bir şekilde izlenmektedir.

Üçüncü eğim atımlı fayın yelpazenin en güney kısmında ova-yelpaze yüksekliğini kontrol eden fay olarak geliştiği görülmektedir. Bu kesimlerde Eosen yaşlı kırıntılı çökellerin yelpaze çökellerinin altında bulunduğu gözlenmiştir. Fay KB-GD gidişlidir. Sonuçta, topoğrafik veriler, çökel-

zellikleri, arazi gözlemleri ve ReMi tekniği bulguları, Isparta Ovası ile Üniversite Yerleşkesinin yükseltisi farklılığının eğim atımlı faylar ile kontrol edildiğini göstermektedir

## SONUÇLAR

ReMi yöntemi, Isparta'nın kuzeyinde temelde yer alan daha yaşlı (karbonatlar, kırıntılılar) ile daha genç çökeller (Pliyo-Kuvaterner yaşlı neotektonik graben dolgusu) arasındaki yapıyı ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. ReMi kesitinde gözlenen farklı hız bilgileri, Üst Kretase yaşlı karbonatlar, Paleosen-Eosen yaşlı kırıntılılar, Gölcük volkaniklerine ait dayk oluşumları ve Pliyo-Kuvaterner çökellerinin ayırımını açık bir şekilde ortaya koymuştur. Pliyo-Kuvaterner çökellerinin ana kaya üzerindeki yaklaşık kalınlığının, 20 ile 40 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, saha ve ReMi verilerinden elde edilen bilgilerden, yaklaşık BKB ve KB-GD doğrultulu eğim atımlı normal fayların, Pliyo-Kuvaterner horstunun oluşumunda etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmayla, ReMi tekniğinin yüze yakın kayaların ayırımının yapılabilmesinde ve güncel neo-tektonik yapıların yapısal özelliklerinin ortaya konmasında yararlı sonuçlar verilebileceği gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, A., 1980. Eğirdir Gölü güneyinde Çandır (Sütçüler-Isparta) yöresindeki Batı Torosların jeolojisi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 23 (1), 1-9.
- Alçiçek, M.C., Kazancı, N., and Özkul, M., 2005. Multiple rifting pulses and sedimentation pattern in the Cameli Basin, southwestern Anatolia, Turkey. Sedimentary Geology, 173, 409-431.
- Anderson, N., Thitimakorn, T., Ismail, A., and Hoffman, D., 2007. A comparison of four geophysical methods for determining the shear wave velocity of soils. Environmental and Engineering Geoscience, 13 (1), 11-23.
- Chávez-García, F.J., Domínguez, T., Rodríguez, M., and Pérez, F., 2007. Site effects in a volcanic environment: A comparison

- between HVSR and array techniques at Colima, Mexico. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(2), 591-604.
- Glover, C., and Robertson, A., 1998. Role of regional extensional and uplift in the Plio-Pleistocene evolution of the Aksu Basin, SW Turkey. Journal of the Geological Society, 15, 365-388.
- Görmüş, M. ve Özkul, M. 1995. Gönen-Atabey (Isparta) ve Aglasun (Burdur) arasındaki bölgenin stratigrafisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 43-64.
- Görmüş, M., Caran, Ş., Başayığıt, L., Çoban, H., Hilal, H.A., Uysal, K. ve Şenol, H., 2003. Eğirdir-Senirkent-Senirce (Isparta) arasındaki Pliyo-Kuvaterner sedimanları ve Landsat 7 ETM+ görüntülerinde yorumu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Özel sayı, 7 (2), 57-72.
- Gutnic, M., 1977. Geologie du Taurus Pisidien au nord d'Isparta, Turquie. Principal resultats, extraits des notes de. M. Gutnic entre 1964 et 1971 par O. Monod, Université du Paris-sud Orsay, p. 130.
- Gutnic M. et Poisson A., 1970. Un dispositif remarquable des chaines tauriques dans le sud de la courbure d'Isparta (Turquie meridion bale). Comptes Rendus Academie des Sciences, Paris 270, 672-675.
- Gutnic, M., Monod, O., Poisson, A. et Dumont, J.F., 1979. Géologie des Taurides Occidentales (Turquie). Memoires Société Géologique de France, Paris137-1, p. 1412.
- Karaman, M.E., 1990. Isparta güneyinin temel jeolojik özellikleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 33, 57-67.
- Karaman, M.E., 1994. Isparta-Burdur arasının jeolojisi ve tektonik özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 37, 119-134.
- Karaman, M.E., Meriç, E. ve Tansel, İ., 1988. Çünür (Isparta) dolaylarında Kretase-Tersiyer geçişi. Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi, 4, 80-100.
- Koçyiğit, A., 1983. Hoyran Gölü (Isparta Büklümü) dolayının tektoniği. Türkiye Jeoloji Bülteni, 26 (1), 1-10.
- Koçyiğit, A., 1984. Tectono-stratigraphic characteristics of Hoyran Lake region (Isparta Bend). Proceedings of the International Symposium of Geology of Taurus Belt, O. Tekeli and M.C. Göncüoğlu ( eds.), MTA, Ankara, 53-68.
- Koçyiğit, A., 2000. Ege bölgesinin aktif tektoniği. Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu (BAD-SEM) Bildiriler Kitabı, İzmir, 30-38.
- Koçyiğit, A., 2003. Orta Anadolu'nun genel neotektonik özellikleri ve depremselliği. Türkiye Petrol Jeologları Bülteni Özel Sayı, 5, 1-24.
- Koçyiğit, A., 2005. Denizli Graben-Horst System and the eastern limit of the West Anatolian continental extension: basin fill, structure, deformational mode, throw amount and episodic evolutionary history, SW Turkey. Geodinamica Acta 18, 167-208.
- Koçyiğit, A., and Özacar, A., 2003. Extensional neotectonic regime through the NE edge of the outer Isparta Angle, SW Turkey: New field and seismic data. Turkish Journal of Earth Sciences, 12, 67-90.
- Koçyiğit, A., and Deveci, Ş., 2007. A N-S-trending active extensional structure, the Şuhut (Afyon) graben: Commencement age of the extensional neotectonic period in the Isparta Angle, SW Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 16, 391-416.
- Louie, J.N., 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(2), 347-364.
- McMechan, G.A., and Yedlin, M.J., 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation. Geophysics, 46, 869-874.
- Pamir, H.N. ve Erentöz, C., 1968. 1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları, Konya



- Paftası, [http://www.mta.gov.tr/v1.0/haritalar/jeoloji\\_haritalari/lejand/konyalejand.html](http://www.mta.gov.tr/v1.0/haritalar/jeoloji_haritalari/lejand/konyalejand.html), Erişim tarihi: 10.07.2008.
- Poisson, A., Wernli, R., Sagular, E.K., and Temiz, H., 2003a. New data concerning the age of the Aksu Thrust in the South of the Aksu valley, Isparta Angle (SW Turkey): consequences for the Antalya Basin and the Eastern Mediterranean. *Geological Journal*, 38, 311-327.
- Poisson, A., Yağmurlu, F., Bozcu, M., and Şentürk, M., 2003b. New insights on the tectonic setting and evolution around the apex of the Isparta Angle (SW Turkey). *Geological Journal*, 38, 257-282.
- Richwalski, S.W., Picazzo, M., Parolai, M., Milkereit, C., Baliva, F., Albarello, D., Roy-Chowdhury, K., and Zschau, H., J., 2007. Rayleigh wave dispersion curves from seismological and engineering-geotechnical methods: a comparison at the Bornheim test site (Germany). *Journal of Geophysical. Engineering*, 4, 349-361.
- Robertson, A.H.F., 1993. Mesozoic-Tertiary sedimentary and tectonic evolution of Neotethyan carbonate platforms, margins and small ocean basins in the Antalya Complex, Southwest Turkey. L.E., Frostick, and R.J., Steel (eds.), *Tectonic Controls and Signatures in Sedimentary Successions*, Special Publication of the International Association of Sedimentologists, Oxford, International, Blackwell, 20, 415-465.
- Robertson, A.H.F., 2000. Mesozoic-Tertiary tectonic-sedimentary evolution of a south Tethyan oceanic basin and its margins in the southern Turkey. *Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area*, E. Bozkurt, J.A. Winchester, and J.D.A. Piper (eds.), Special Publication of Geological Society, London, 20, 97-138.
- Robertson, A.H.F., Poisson, A., and Akıncı, Ö., 2003. Developments in research concerning Mesozoic-Tertiary Tethys and neotectonics in the Isparta Angle, SW Turkey. *Geological Journal*, 38, 195-234.
- Sarız, K., 1985. Keçiborlu kükürt yataklarının oluşumu ve yörenin jeolojisi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi (yayımlanmamış).
- Scott, J.B., Clark, M., Rennie, T., Pancha, A., Park, H., and Louie, J.N., 2004. A shallow shear-wave velocity transect across the Reno, Nevada area basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 2222-2228.
- Şenel, M., 1984. Discussion on the Antalya nappes. *Proceedings of the International Symposium on Geology of Taurus Belt*, O., Tekeli, and M.C. Göncüoğlu (eds.), MTA, Ankara, 41-51.
- Şenel, M., 1997. 1:250.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları No: 4, Isparta paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etüdları Dairesi, Ankara.
- Şentürk, M. ve Yağmurlu, F., 2003. Acıgöl ve Burdur Gölü arasındaki bölgenin jeolojik ve sismotektonik özellikleri. *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel Sayı 7(2), 11-24.
- Temiz, H., Poisson, A., and Anrieux, J., 2001. The Plio-Quaternary extensional system of the western side of the Isparta Angle in SW Turkey. 4th International Symposium on Eastern Mediterranean. *Geology, Isparta, Turkey*, Abstracts, pp. 125-129.
- Thelen, W.A., Clark, M., Lopez, C.T., Loughner, C., Park, H., Scott, J.B., Smith, S.B., Greschke, B., and Louie, J.N., 2005. A transect of 200 shallow shear velocity profiles across the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (3), 1055-1067.
- Thorson, J.R. and Claerbout, J.F., 1985. Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion. *Geophysics*, 50, 2727-2741.

Yağmurlu, F., 2000. Burdur fayının sismotektonik özellikleri. Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, İzmir, Bildiriler Kitabı, 143-152.

Yağmurlu, F., Savaşçın, Y., and Ergun, M., 1997. Relation of alkaline volcanism and acti-

ve tectonism within the evolution of the Isparta Angle, SW Turkey. *Journal of Geology*, 15, 717-728.

Yalçinkaya, S., 1989. Isparta-Aglasun (Burdur) dolaylarının jeolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (yayımlanmamış).



## Remote Sensing At Kerkenes: Combining Geophysical and Other Methods

### *Kerkenes’de Uzaktan Algılama: Jeofizik ve Diğer Yöntemlerin Birleştirilmesi*

**Nurdan ATALAN ÇAYIREZMEZ<sup>1</sup>, Pınar ERTEPINAR KAYMAKÇI<sup>2</sup>, Geoffrey D. SUMMERS<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ministry of Culture and Tourism of Turkish Republic, General Directorate for Cultural Properties and Museums, Ulus, ANKARA

<sup>2</sup> Department of Geological Engineering, Middle East Technical University, ANKARA

<sup>3</sup> Settlement Archaeology Graduate Program, Institute of Social Sciences, Middle East Technical University, ANKARA

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008  
Kabul (accepted) : 28 Temmuz (July) 2008

#### ABSTRACT

Kerkenes, which lies to the south of Sorgun in the province of Yozgat is the location of the largest Iron Age capital in Central Anatolia. The low mountain is a granitic batholith with perennial water seeping from fissures. Buildings were mostly timber framed with granite used for foundations. The city was short-lived, being founded around 600 BCE and destroyed by fire, probably by Croesus King of Lydia, in the 540s. Thus, there is only one building level. These three factors (granite, a single building level and intense burning) make this ancient city an ideal choice for a program of remote sensing. The current period of investigation began in 1993 since when there have been annual campaigns. Remote sensing methods have included, from the top down, satellite imagery, photography from a manned hot air balloon, aerial photography from a tethered blimp, close contour differential Global Positioning System (GPS) survey, and geophysical survey.

This paper first presents remote sensing methods that were compared along a 140 m test strip at Kerkenes. Gradiometer and electric resistance surveys, conducted over the test area at different times, were compared with close contour differential GPS and aerial photographs of the same area. Results are evaluated in terms of both archaeology and expenditure of resources is made while a concluding section looks at the utility of combining remote sensing survey results in a Geographic Information System (GIS). At Kerkenes it is seen that the electric resistance survey gives better results than gradiometer survey, however it is slower and can only be conducted in spring. It is also found that GPS survey gives more detailed topographic details than the aerial photographs. GIS provides excellent tools for the management of the data for archaeological sites similar to Kerkenes.

**Keywords:** Archaeology, electric resistance, geophysics, GIS, GPS, gradiometer, Kerkenes.

#### ÖZ

*Yozgat iline bağlı Sorgun ilçesinin güneyinde bulunan Kerkenes, Orta Anadolu’da Demir Çağı’nın en büyük antik yerleşkesidir. Yerleşkenin bulunduğu granit kütlesi, çatlaklarından bütün yıl boyunca su sızan bir batolittir. Yerleşke-deki binalar genellikle granit temelli olup ahşap üst örgüden oluşmaktadır. Antik kent M.Ö. 600 civarında kurulmuş olup, olasılıkla Lidya Kralı Krezüs tarafından M.Ö. 540’larda bir yangın sonucu tahrip olmuştur. Bu nedenle tek yerleşim katı bulunmaktadır. Bu üç faktör (yapı malzemesi olarak granit kullanılmış olması, şehrin tek bir seviyeden*

*oluşması, ve şiddetli yangın geçirmiş olması) bu antik kentte uzaktan algılama programının uygulanmasını ideal kılar. Bu alanda yapılan çalışmalar, 1993 yılında başlamış olup yıllık kampanyalarla sürdürülmektedir. Uzaktan algılama yöntemleri, yukarıdan aşağıya, uydu görüntüsü, balondan çekilen fotoğraf, ve hava fotoğrafı incelemelerini, sık kontür diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) ölçümlerini ve jeofizik yöntemleri içerir.*

*Bu makale ilk olarak, Kerkenes'de 140 m'lik deneme alanında kullanılan uzaktan algılama yöntemlerinin karşılaştırmasını sunar. Aynı alanda yürütülmüş sık kontür diferansiyel GPS ve hava fotoğrafları ile karşılaştırıldığında gradyometre ve elektriksel direnç araştırmaları farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Sonuçların hem arkeoloji, hem de kaynakların kullanımı açısından değerlendirilmesi ile uzaktan algılama yöntemlerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile birleştirilmesi, sonuç bölümünde ele alınmaktadır. Kerkenes'de elektriksel direnç ölçümünün yavaş ve yalnızca bahar aylarında yapılmasına karşın, gradyometre yüzey araştırmasına göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca GPS yüzey araştırmasının da hava fotoğraflarına göre topoğrafik ayrıntıları verdiği anlaşılmıştır. CBS, Kerkenes gibi arkeolojik alanların verilerinin yönetiminde üstün araçlar sunmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Arkeoloji, elektrik direnç, jeofizik, CBS, GPS, gradyometre, Kerkenes.

## INTRODUCTION

Archaeology started with the collection of antiquities and people in search of valuable objects started digging archaeological sites. Mapping and excavation techniques were improved with the introduction of theoretical studies which were followed by scientific surveys and excavations. However, destruction caused by archaeological excavations and, in the second half of the twentieth century, mechanized alteration of landscapes on a large scale called for other solutions. These necessities led to the development of remote sensing techniques for archaeology that included the introduction of aerial photography, satellite imagery, a variety of geophysical methods and GIS. These techniques offer the archaeologist non-destructive opportunities to find answers for specific questions.

Surface or near-surface features-usually uppermost 1-2 m in archaeology- can be measured with remote sensing techniques (Kwamme, 2003). Kerkenes is the good example such a site, because most of the archaeological remains are less than 1 m.

At Kerkenes a combination of aerial photography with a blimp and manned hot air balloon, close contour differential GPS survey and flux-gate gradiometer survey of the entire 2.5 km<sup>2</sup> walled city has been complimented by more restricted electric resistance survey. The purpose has been to provide a plan of the entire city so as to permit urban analyses using GIS

tools while also creating simulations for public outreach and education.

Kerkenes is an Iron Age capital situated on a granitic batholith, at an altitude of about 1400 m above sea level, in central Turkey (Figure 1). Plausibly identified with Pteria, the city appears to have been founded around 600 BCE. It was looted and burnt in the 540s, probably by the forces of Croesus king of Lydia. (For a recent overview see Summers, 2006 and also the extensive web site: <http://www.kerkenes.metu.edu.tr/>). Thus, most of the Iron Age city lies just below the modern ground surface with much, including the seven kilometres of stone defences, visible on the surface. Nowhere is there more than a single level of Iron Age building even the steepest slopes were built on. Three factors, the granitic geology, the single period of occupation and the destruction by fire make Kerkenes an ideal site for the application and development of remote sensing techniques in general, and geophysical exploration in particular.

## GEOLOGY AND GEOMORPHOLOGY OF THE KERKENES

The granitic body on which Kerkenes located is one of a number of large granitic complexes within the Central Anatolian Crystalline Complex (CACC) (Erlor and Göncüoğlu, 1996). The CACC is a collage of magmatic, metamorphic and ophiolitic rocks belonging to Alpine-Himalayan orogenic system and lies within

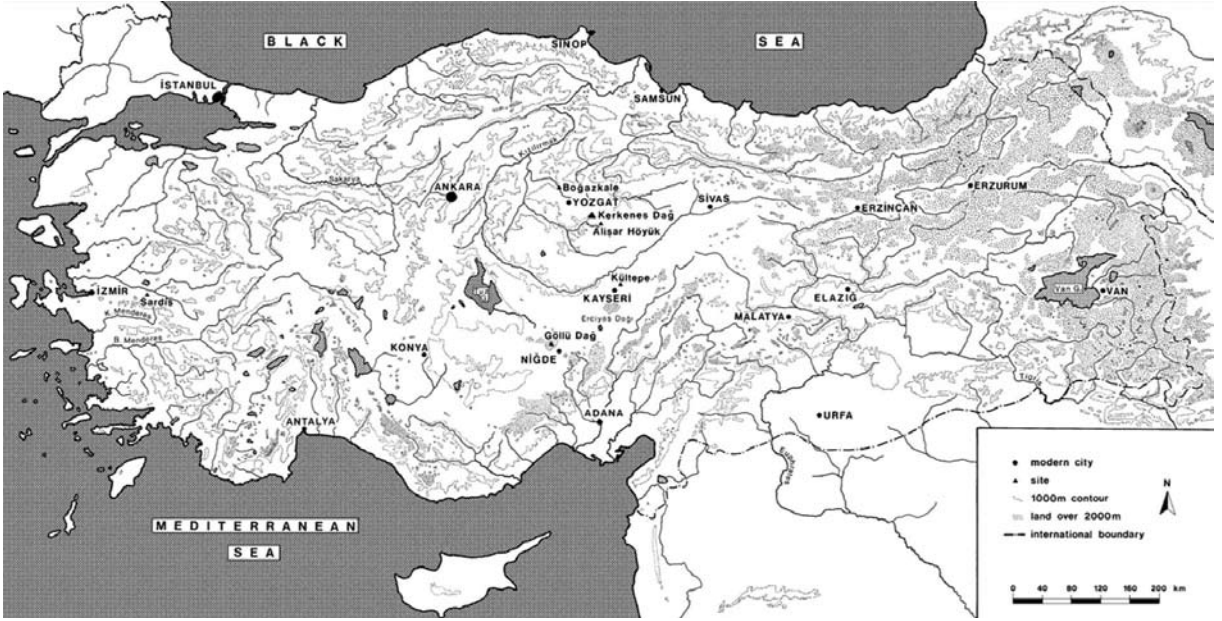


Figure 1. Location map of Kerkenes.  
Şekil 1. Kerkenes'in yer bulduru haritası.

the Kırıkkale, Yozgat, Kırşehir, Sivas, Nevşehir, Kayseri and Niğde area. The CACC can be divided into three principal lithological units; Central Anatolian metamorphics, Central Ana-

tolian ophiolites and Central Anatolian granitoids among which granitoids dominate. The Yozgat batholith covers an area of about 750 km<sup>2</sup> of which the Kerkenes granitoid forms the

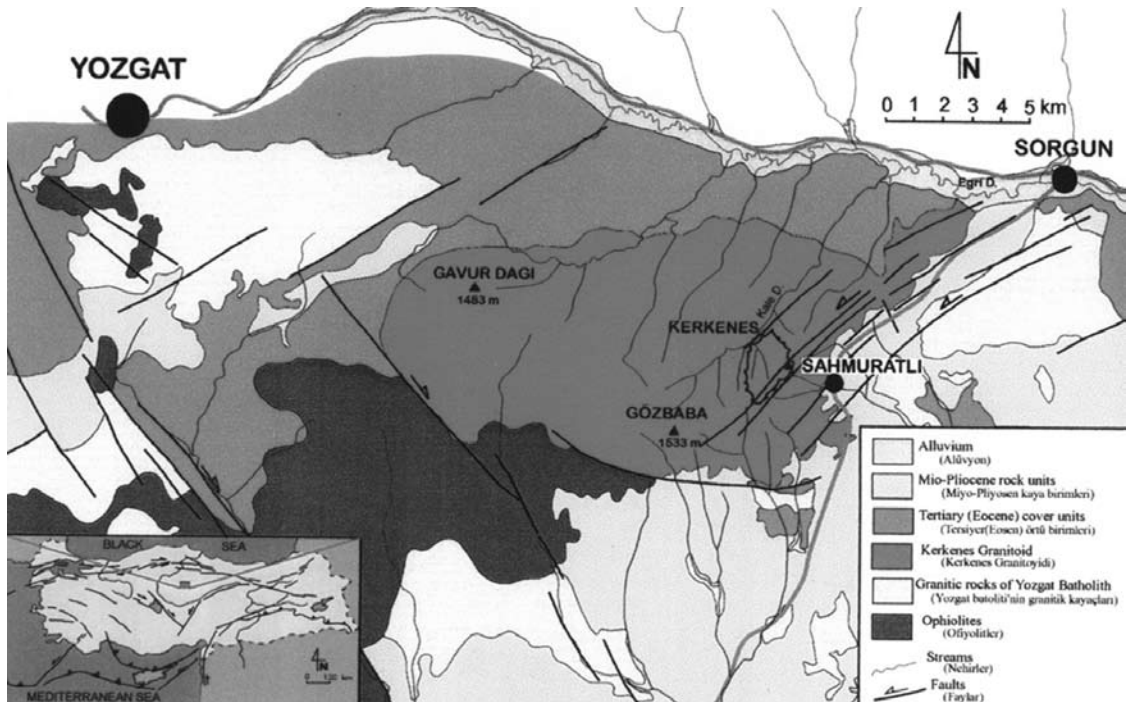


Figure 2. Map showing the geology, main drainage system and major faults of the Kerkenes region (Aydın, 2004).  
Şekil 2. Kerkenes bölgesinin jeolojisini, drenaj sistemini ve ana fayları gösteren harita (Aydın, 2004).

northeastern subunit covering an area of about 130 km<sup>2</sup> (Figure 2) (Demirel, 2004; Eler and Göncüoğlu, 1996). The topographic relief and distribution of rock units in the region are controlled mainly by northeast-southwest trending faults. As granitoids are relatively more resistant to erosion they form highlands while the lowlands are underlain by the Upper Cretaceous ophiolitic rocks and Tertiary sedimentary units. The formation of a very steep slope on the eastern edge of the Kerkenes batholith is due to a dip-slip fault zone caused by differential vertical displacement. The southwest-facing terrain where the ancient city is located has a gentler slope which is incised by surface run-off and small gullies. The lower areas are covered by residual soil formed from weathering of the granite. Small scale faults and systematic joint patterns cause to secondary porosity and permeability of the batholith along which ground water percolates to the surface, thus providing water resources for the ancient city. Altered granite forms the main storage for subsurface water (Eler and Göncüoğlu, 1996).

### AN OVERVIEW OF REMOTE SENSING AT KERKENES

The current series of annual campaigns began in 1993. A brief overview of earlier exploration is given in Summers and Summers (1998). Methods of remote sensing utilised at Kerkenes have included, from the top down: satellite imagery using multi spectrum Landsat and Quickbird (Aydın, 2004); photography from a manned hot air balloon (Figure 3). A single, memorable flight made with the Cappadocia Cloud Nine balloon team in August 1993. The flight was kindly organised by Wulf Schirmer and the balloon expertly piloted by Erik Lars; aerial photography with a helium filled tethered blimp in 1993 and 1994 supplemented by kite photography in 1995; close contour differential GPS survey using Trimble equipment between 1997 and 2000 (Figure 4) (Branting and Summers, 2002); total station survey of visible features; and various methods of geophysical survey, fluxgate gradiometer, electric resistance, discussed in more detail below, and ground penetrating radar (GPR). In 1996 and in

2000 GPR survey has been tried at Kerkenes by Lewis Somers from Geoscan Research and by Abdullah Ateş from Ankara University; however it was unsuccessful (Summers et al., 1996; Summers et al., 2002).

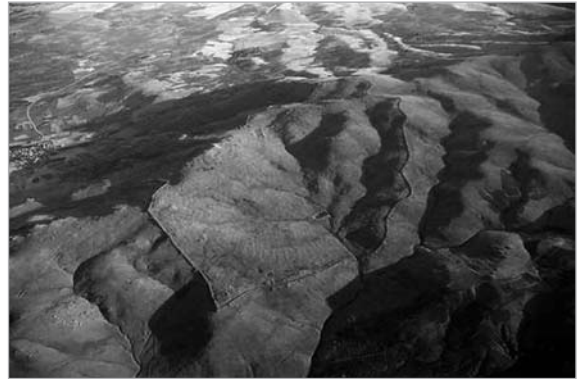


Figure 3. Kerkenes and its surroundings from the Cloud 9 Cappadocia Hot Air Balloon in 1993 with the northern tip of the city at the bottom (The Kerkenes Project Archive-93slhb0233).

Şekil 3. Kerkenes'i (ortada) ve çevresini gösteren Balon fotoğrafı, (Fotoğraf 1993 yılında Cloud 9 Cappadocia Sıcak Hava Balonu ile çekilmiştir. Kerkenes Projesi Arşivi-93slhb0233).

In 1996, test trenches were excavated to permit some comparison of geophysical imagery, obtained with a Geoscan FM36 fluxgate magnetometer, with buried remains. Issues of particular concern were geology, construction materials, depths of deposit and the extent of burning.

The remainder of this paper focuses on the combination of some of these methods on a 140 metre wide strip across the lower part of the city stretching from the northeast stretch of city wall to the west limit.

### GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS

At Kerkenes geophysical methods have been using since 1993. First year gradiometer and electric resistance surveys have been tried by Lewis Somers from Geoscan Research. However electric resistance survey results were not clear. Between 1993-1997 first season of the gradiometer survey was completed. Between 1998-2002 second season of gradiometer surveys have been conducted and all city has been

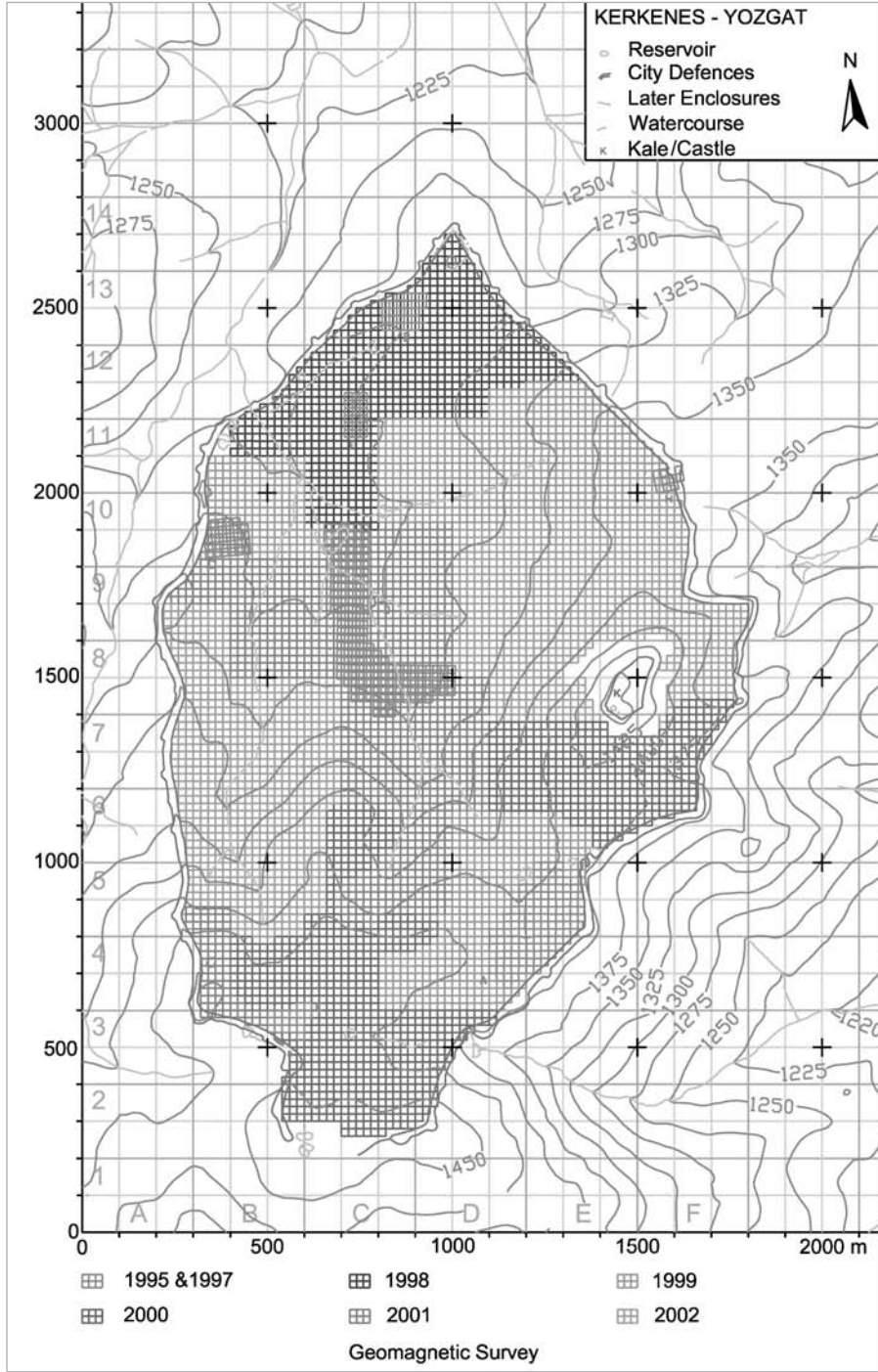


Figure 4. Progress map of the gradiometer survey.  
Şekil 4. Gradyometre yüzey araştırmasının ilerleyişini gösteren harita.

surveyed without steep slope areas (like castle) (Figure 5). Almost 2 square kilometres, 200 hectares were surveyed. In 1998 electric resistance survey has been tried, due to the equipment problems results were not good (Özcan

et al., 1999). In 2001 by Harald von der Osten-Woldenburg experimental field work took place to conduct electric resistance and electromagnetic induction methods (Von der Osten-Woldenburg, 2005).

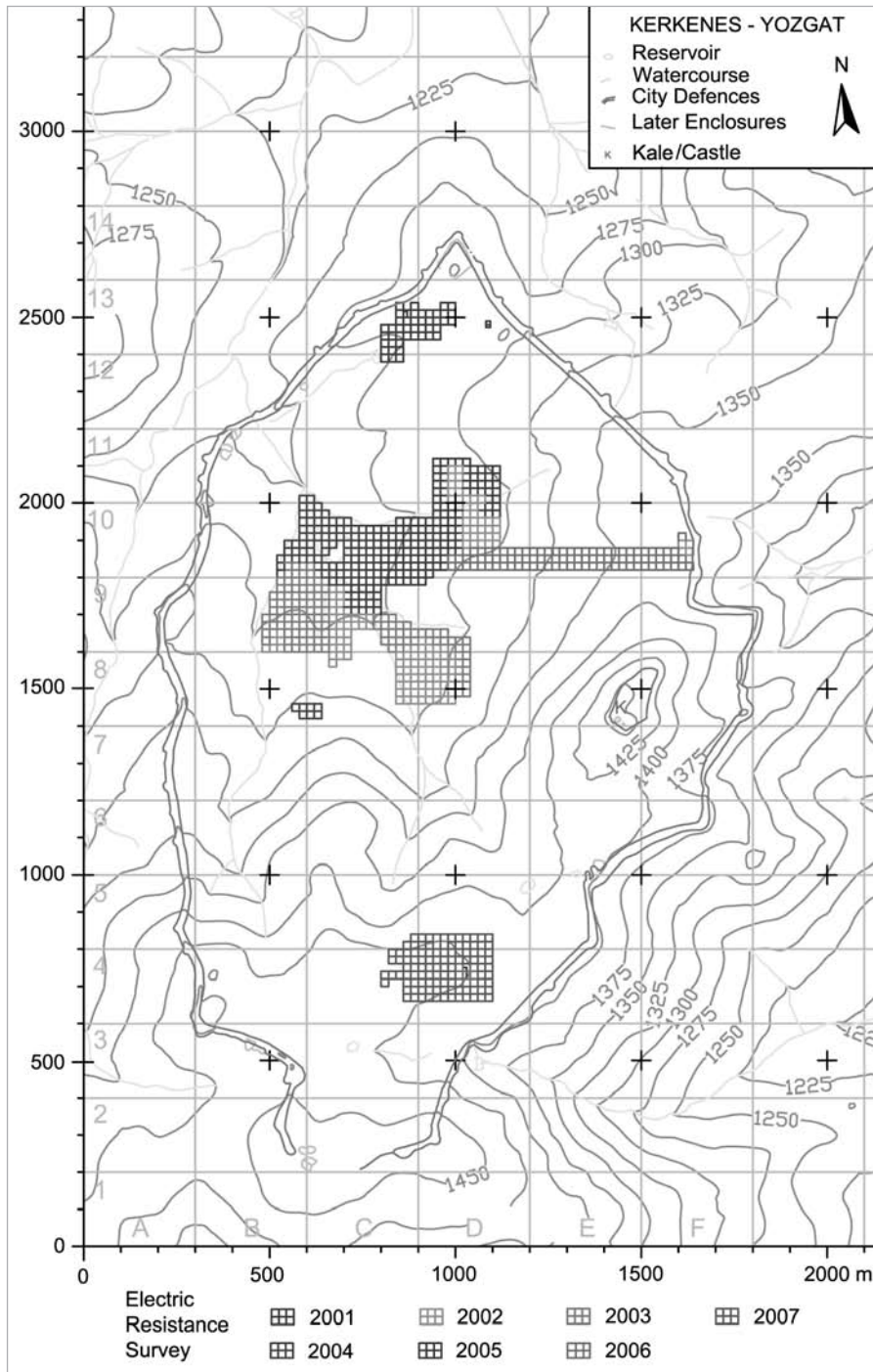


Figure 5. Progress map of the electric resistance survey.

Şekil 5. Elektrik direnç yüzey araştırmasının ilerleyişini gösteren harita.

Data collections standards have been created by geophysicists for gradiometer and electric resistance survey at Kerkenes. Field forms were prepared for each 20x20 m grid to be filled in by trained team members. Data col-

lection was by teams trained workmen some of whom also learnt to download data and print out raw data on a daily basis. In this paper gradiometer and electric resistance survey results will be compared with GPS and aerial



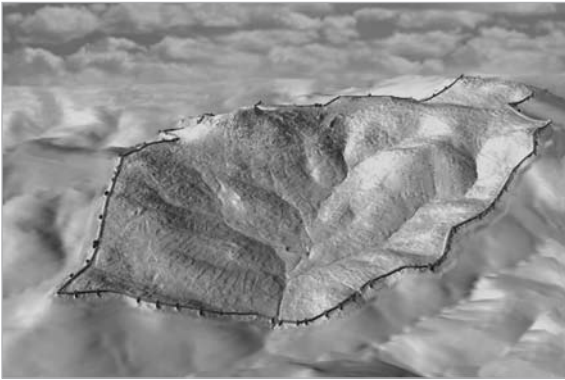


Figure 6. Digital Elevation Model (DEM) of Kerkenes created from GPS data. (The north tip of the city is at bottom left) (The Kerkenes Project Archive).

Şekil 6. Kerkenes'in GPS verilerinden elde edilmiş Sayısal Yükseklik Modeli (Şehrin kuzey uç noktası alt sol tarafta görülmektedir) (Kerkenes Projesi Arşivi).

photographs of 140 meter long test strip (Figures 7 and 8).

In this paper, gradiometer and electric resistance survey results will be compared with GPS and aerial photographs of a 140 meter long test strip (Figures 7 and 8).

### Fluxgate Gradiometer Survey

Fluxgate gradiometer survey is a well developed method for the recognition of subsurface cultural features on certain types of archaeological site. The method measures local anomalies in the magnetic field of the earth which may be caused by natural and manmade features. The Geoscan FM36 Fluxgate gradiometer can measure up to eight readings per meter, collects data quickly and is easy to use (Karadut, 2002).

Magnetic anomalies within archaeological sites measured with gradiometer. In archaeological sites firing of the soil or firing of the artifacts can intensify the magnetic field that owing to thermoremanent magnetism (Kwamme, 2003). The destruction of the Kerkenes by fire makes Kerkenes an ideal site for gradiometer survey.

Although survey at Kerkenes began in 1993, most was done between 1998 and 2002 (see Figure 5). Steep slopes, rock outcrops, stone

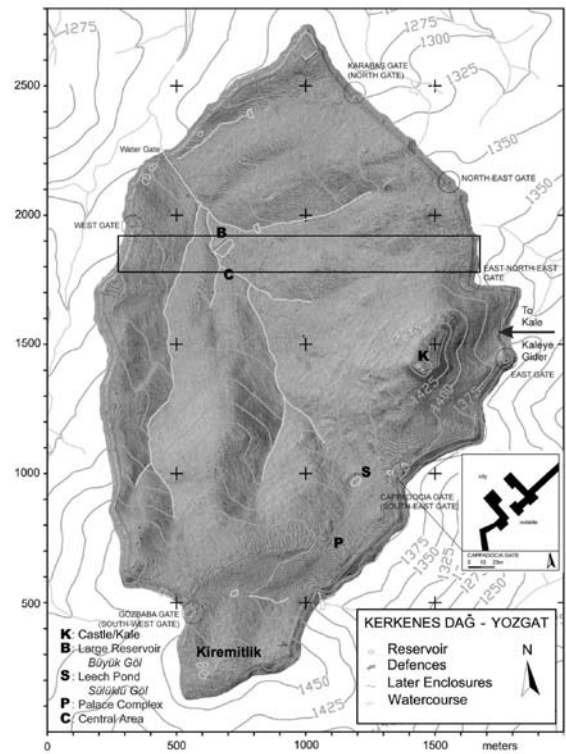


Figure 7. Contour map of Kerkenes showing 140 m wide strip selected for intensive remote sensing survey and GIS analysis.

Şekil 7. Ayrıntılı uzaktan algılama yüzey araştırması ve CBS analizi için seçilen 140 m genişliğindeki alanı (siyah dikdörtgen) gösteren Kerkenes'in kontur haritası.

strewn surfaces and vegetation made the FM 36 an ideal choice. It is probable that the new generation of Geoscan machines would increase overall efficiency of data collection in the field by some 50%. Once Lewis Somers of Geoscan Research had determined the most appropriate sampling strategy for Kerkenes, balancing the need for speed and the difficulties of managing huge data sets on the one hand with quality of data collection and clarity of imagery on the other, and had given basic training to key team members, local workmen were trained to conduct the survey, download data, print out work sheets and even to make composite images. Much of this was done under the stern and ever watchful eye of an expert. On a good day it was possible to survey forty grids by working in two shifts. Using two machines in a single shift gave the same result and permitted improved management of the data. At Kerkenes data was col-

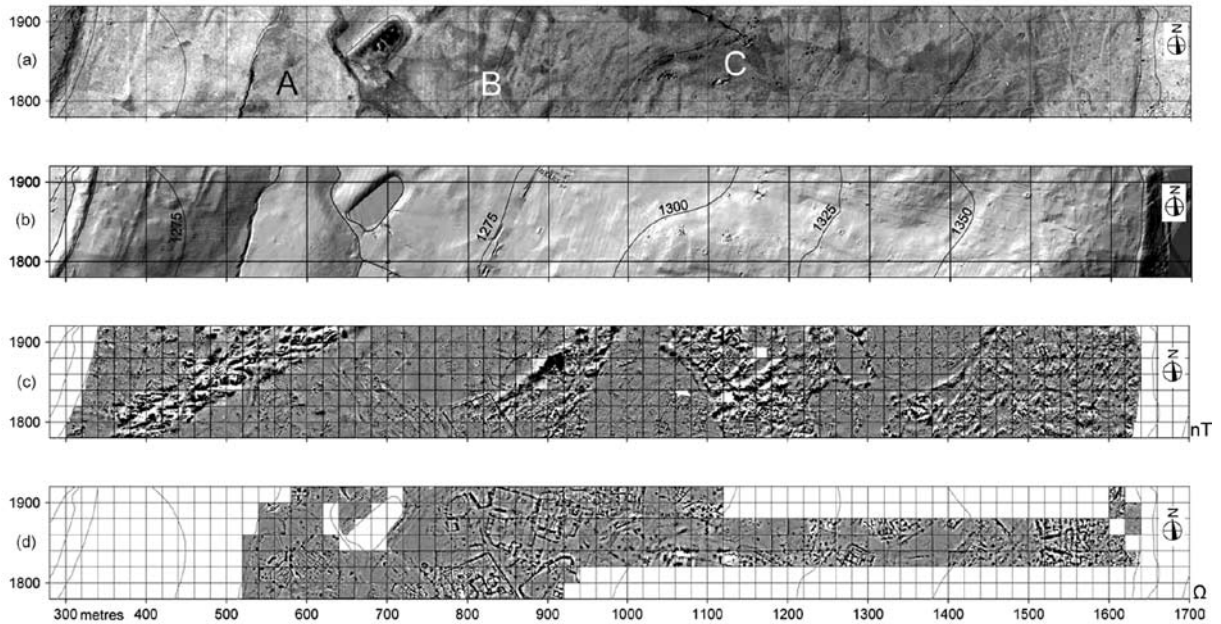


Figure 8. (a) Mosaic of rectified balloon photographs, (b) TIN model made from differential GPS data, (c) gradiometer survey image and d) electric resistance survey image.

Şekil 8. (a) Rektifiye edilmiş mozaik fotoğraf, (b) GPS verisinin TIN modeli, (c) gradyometre yüzey araştırması sonucunda oluşturulan harita ve d) elektrik direnç yüzey araştırması sonucunda oluşturulan harita.

lected in 20 x 20 m grids at a density of four readings per metre at one metre traverse intervals, while trial grids were surveyed with much higher sampling strategies. The starting point was the South-western corner of each grid with data collected from south to north in zigzag mode. The entire city except the rocky acropolis, with its later castle, was surveyed by this method. Downloading and pre-processing was done in Geoplot 3.0 software using the zero mean traverse function to eliminate the zigzag effect. In order to smooth the composite files the data was interpolated. According to the different site characteristics at Kerkenes different data ranges were acquired in each area so that different clipping ranges were required to remove noise. For example,  $\pm 10\text{nT}$ ,  $\pm 20\text{nT}$  were chosen for the geologically and archaeologically quiet areas,  $\pm 30\text{nT}$  and  $\pm 45\text{nT}$  were chosen for noisy areas. In Geoplot 3.0 composite files were rotated 270 degrees clockwise to get North at the top. The small composite files were then exported from Geoplot 3.0 to Surfer 8.x software as text files and combined in Surfer due to the

size of the data. The void (dummy) data value was set to Surfer 8.x's (1.70141E+038) instead of Geoplot's (2047.5) so that, during the gridding process the natural neighbour algorithm does not fill the blank areas. The data was gridded using nearest the neighbour method in Surfer (Aydın, 2004).

Anomalies of the data can be filtered successfully by using low, high and band-pass filters. Both of them tried for Kerkenes and the high-pass filtered anomalies show an enhanced image where wall ruins of the buried structures become clearer (Ateş et al., 2003).

### Electric Resistance Survey

Electric resistance survey has been conducted over selected areas using a Geoscan RM 15 with a sampling strategy of 0.50 m with a twin probe array which is much easier to use than the Wenner array on sites with difficult ground conditions such as Kerkenes. A current of 1 mA is sufficient for electric mapping with electrode intervals of the order of 0.5 m (Von der Osten-

Woldenburg, 2005). Downloading and pre-processing was done in Geoplot 3.0 software and data exported to Surfer 8.x.

Because most of the cultural deposits at Kerkenes are no more than 1m in depth results have been good, making continuation of this survey worthwhile despite the relatively slow progress (compare Figures 5 and 6). Where the surface is strewn with stones tumble or preserved wall tops extra-long mobile probes permit the frame to straddle protruding rocks. There might be some advantage in redesigning the frame for such circumstances. Electric resistance survey is restricted to a few weeks each spring, after the last snow, which can fall late in April, and before the surface dries out, usually in early June. Water resources are insufficient for the employment overhead irrigation to dampen soil in advance of survey.

### Surface Simulations

A three-dimensional simulation of the surface was produced by Trimble GPS equipment between 1997 and 2000 (Summers et al., 2002) (see Figure 6). It was possible to simultaneously employ three mobile receivers with one base station. Workmen collected some 1,400,000 individual readings (Branting and Summers, 2002). It has been possible to combine, or mosaic, and rectify photographs taken from both a manned hot air balloon and from a tethered blimp. These photographic images can then be draped over the digital elevation model (DEM) so as to create simulations of the surface. Interpretation of geophysical images should be combined with verification on the ground (ground-truthing) so that buried cultural features can be identified with the greatest possible confidence. GIS software permits the enhancement of features, and linear features such as walls in particular. CAD applications allow the creation of architectural reconstructions while GIS makes virtual reality possible.

### THE TEST STRIP

In 2006, 60x140 m line running down the steep north-eastern slope of the city, from the defensive wall to the central sector (Figures 7 and 8), was selected for electric resistance survey. The

primary aim was to compare and integrate the results of resistance and gradiometer survey over a variety of terrains with a range of geomorphological, geological and hydrological features. A secondary aim was to test the hypothesis, based on surface observation and gradiometer imagery, that there were indeed built structures on the very steep slopes which were little different to those seen on more level urban areas within the site. An overall objective was to develop future remote sensing research strategies at Kerkenes as well as to experiment with GIS analysis and virtual reality reconstructions.

### COMPARISON OF THE METHODS

Combination of DTMs derived from close contour GPS survey with balloon-borne photography permit the accurate mapping of archaeological features visible on the surface. Useful results can only be achieved, however, by with verification and observation on the ground to identify such cultural and natural features as city defences, streets, buildings and compounds, streams, gullies, ponds, outcrops bedrock and vegetation.

Imagery derived from gradiometer and resistance reveals buried archaeological and natural features, sometimes with outstanding clarity. Generally at Kerkenes magnetic survey results are clearer where there is subsoil overlying the bedrock. While all of the factors influencing the clarity of the magnetic imagery are not fully understood, and there is room for geophysical research here, it is clear that the intensity of the burning is a major factor. Resistance imagery, on the other hand, is largely controlled by changes in the water content of natural and built features as well as of subsoil and bedrock. The burnt material generally has lower water content and therefore displays higher resistance, while loose wall footings and fractured bed rock has higher water content thus lower resistance. However, systematic fractures within the bed rock results in anisotropy in the resistance values which is great value for the purpose of archaeological mapping. For example, the area denoted by "A" in Figure 8a shows a buried structure on the magnetic image (Figures 8 and 9) which cannot be seen on either the DEM (Figure 8b) or

the aerial photograph (Figure 8a). In addition, some buildings that can be seen on the magnetometer image are more clearly depicted on the resistance image. Further, area "B" shows the enclosure wall of an urban block that is evident on both the aerial photograph and the gradiometer image, although the geometries and fine details are seen with more clarity on the resistance map. Area "C" provides an example in which structures that cannot be seen in the gradiometer data because of background noise from the underlying geology are visible on the resistance map.

In summary, at Kerkenes the resistance image is usually clearer than the magnetic. This is especially true where bedrock lies close to the surface. Assiduous study of the imagery reveals, however, that there are very few if any features appear on the resistance which cannot be made out on the magnetic. Aerial photography is often of considerable help in interpretation of the geophysical imagery while close contour GPS data permits transformation of remote sensing imagery into three-dimensional simulations.

## REMOTE SENSING AND GIS ANALYSIS OF KERKENES DATA

### Image Enhancement

Images obtained from the geophysical sur-

veys can be processed and various enhancement techniques, similar to those applied to satellite images, can be applied. In the case of Kerkenes the geophysical images in Figure 8 were processed in Geoplot 3.0 and prepared with Surfer 8.x software. The boxed area of Figure 9 provides an example of what can be done by processing resistance data in TNTmips in which spatial high-pass filters were used to enhance linear features and to extract the edges or boundaries (Figure 9).

### GIS Operations

Structures were identified and the buildings and compounds were digitized from both the resistivity survey and the gradiometer survey, while features identified on the GPS data and the aerial photographs were separately digitized. After processing in Geoplot and Surfer all the data from the mapped strip were integrated into ArcGIS Desktop for analysis (Figure 10). In a first stage of analysis an overlay operation was performed to check which structures were present in all four images. In a second stage, the two-dimensional geophysical maps were combined and transformed into three-dimensional simulations using close contour differential GPS data. As anticipated, the results were of considerable help in the interpretation of the geophysics, the narrowness of the surveyed strip notwithstanding.

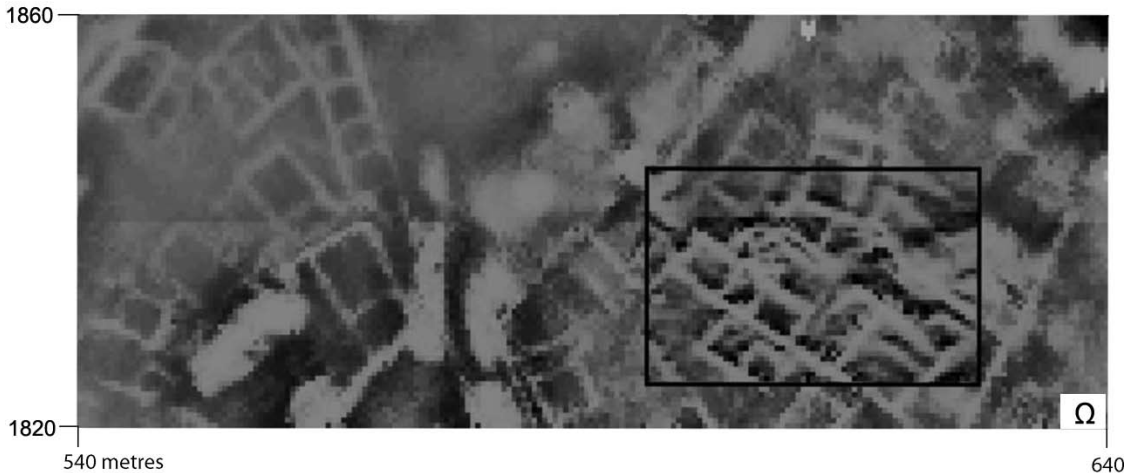


Figure 9. Image of the raw resistance data with filtered data in the box.

Şekil 9. Orijinal elektrik direnç haritası ve siyah kutunun içerisinde filtrelenmiş görüntüyü gösteren harita.



Figure 10. Three-dimensional simulation of the strip with combined data sets.

Şekil 10. Veri setlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş çalışılan alanın üç boyutlu benzetimi.

## RESULTS

At Kerkenes, a range of remote sensing methods have been used since 1993. In making an evaluation of the techniques it is valuable to remember that developments in technology over the fifteen years since the inauguration of the project have surpassed all expectation. Much of what was done now seems archaic. Balloon photography was all made with 35mm cameras loaded with black and white negative or colour slide film. The time and effort involved in processing these films so as to produce rectified mosaics is considerable, although the development of scanners with good resolutions has made this task less irksome. If the director of the project were to undertake a similar survey today director would use digital photography.

The differential GPS survey was the most innovative of all the techniques used at Kerkenes and the results of continuing geophysical survey, verification on the ground and excavation are routinely transformed into three-dimensional images. Further, the GPS data is an essential component of any GIS analysis undertaken with Kerkenes data. Lighter and more mobile differential GPS systems are now available which,

significantly, permit real time mapping with the ability to put in break lines and to record individual features (such as walls) visible on the surface. Equally recent are developments in Light Detection and Ranging (LIDAR) which offer an alternative method in countries where the aerial collection of data is possible (Doneus et al., 2008; Romain and Burks, 2008).

Fluxgate gradiometers with larger memories, faster download times and other improvements to the hardware would make survey significantly faster, but would not improve the quality of the data. The terrain at Kerkenes is so rugged that the employment of magnetometers with multiple sensors would not be viable. Resistance survey, which is approximately eight times slower and gradiometer survey, undoubtedly produces clearer results. Restriction to a few weeks in the spring, when there is sufficient moisture in the ground, is an additional limiting factor. This survey is certainly worth continuing, but will not be employed on the steepest slopes or where out-cropping rock makes survey impractical.

Ground penetrating radar (GPR) has been tried at Kerkenes on several occasions with no useful result, apparently because of the properties of the granite and granitic soils. Some early

experiments with electromagnetic magnetic induction were very promising (Von der Osten-Woldenburg, 2005), making this method a promising one for the future as machines designed specifically for archaeological prospection become available.

In 1996, test trenches were dug at various locations within the city specifically in order to verify and clarify the geophysical results. These sondages, together with more recent excavations designed principally for other purposes, have demonstrated the veracity of the imagery.

## CONCLUSIONS

The results of geomagnetic and resistance survey combined with close contour differential GPS survey, balloon photography and verification on the ground permit the recognition of buried structures and features with varying degrees of clarity over very large areas. It is thus becoming possible to create virtual reality simulations of urban sectors in ways that will permit the application of analytical GIS programs (Branting et al., 2007). Aspects of the urban dynamics of this ancient capital currently under investigation include Transportation GIS (Branting 2004); relations between topography, geology, hydrology and the line chosen for the city defences (Atalan Çayırezmez, 2006); aspects of urban planning and population estimation (Summers 2007; Summers and Summers 2006).

Results of this approach are permitting archaeologists to approach some ancient cities; those that are short-lived do not lie beneath deep overburden, in entirely new ways. Creation of three-dimensional simulations raises new types of questions and allows the identification of new problems that can be approached by the combined application of old techniques, e.g. excavation, and new methods, e.g. GIS analysis. On these on sites like Kerkenes archaeologists are no longer asking geophysicists to show them where to dig. Rather, analysis of remote sensing data is throwing out new challenges to archaeologists.

It is appropriate here to offer some comments on the combination of these data sets in a GIS. The graphic images that GIS make it possible

to produce are impressive. Such imagery is of great importance in disseminating the results of archaeological investigation to a broad public as well as to students and colleagues, and indeed to funding bodies. Whether it is necessary to use GIS in order to produce such graphic imagery is not, however, clear. A trained graphic artist supervised by an archaeologist can do much in programs such as Surfer 8.x and Autodesk 3ds Max. If the time, expertise and effort expending in putting these kinds of data bases into a GIS is to justified there has to be analytical or archaeological results beyond the convenience of having everything archived in the same system, although for a long-term research program such as that at Kerkenes a single archive is in itself an achievement of worth. One major problem, probably the major problem, is that in order to enter data into a GIS in forms that make it possible run analysis there has to be considerable interpretation of the remote sensing imagery. Enclosed spaces (rooms, buildings, courtyards) have to have four sides, to take the most obvious example. Kerkenes team run the risk of proving the obvious, or of confirming rather testing interpretations. On the other hand, the very processes of interpretation involved creating GIS data bases provide many new insights and raise a host of new questions. If both hardware and software are to continue to develop at the same rate over the ensuing years there is great reason for optimism over the future prospects of remote sensing combined with GIS analysis of short-lived urban sites.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Of the many individuals who have made contributions to this research we would especially thank Dr. Scott Branting from The Center for Ancient Middle Eastern Landscapes (CAMEL) at the Oriental Institute, Françoise Summers from Middle East Technical University, Lewis Somers from Geoscan Research, Nahide Aydın, David Monsees, and Tuna Kalaycı. The results from the 2006 survey which form the core of this paper were obtained through grants from Toreador Turkey, the Archaeocommunity Foundation, John Kelly Consulting Inc. and the Jou-

kowsky Family Foundation. Research facilities at Kerkenes owe much to the Erdoğan Mustafa Akdağ Eğitim Kültür Vakfı and Yibitaş Yozgat Cimento. Complete acknowledgments to team members, sponsors and collaborating institutions are to be found on the back cover of the annual Kerkenes News.

## REFERENCES

- Atalan Çayırmez, N., 2006. Relationships between topography and Kerkenes (Turkey), A GIS analysis. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara (unpublished).
- Ateş, A., Erdem, E., Bilim, F. ve Aydın, N., 2003. Magnetic enhancement over buried features in Kerkenes Mountain, Yozgat, Turkey. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 6, 137-142.
- Aydın, Z.N., 2004. The application of multi-sensor remote sensing techniques in archaeology. MSc Thesis, University of Mississippi, Mississippi (unpublished).
- Branting, S., 2004. Iron Age pedestrians at Kerkenes Dağ: an archaeological GIS-T approach to movement and transportation. PhD Thesis, The University at Buffalo, SUNY (unpublished).
- Branting, S., and Summers, G., 2002. Modeling terrain: the Global Positioning System (GPS) survey at Kerkenes, Turkey. *Antiquity*, 76, 639-640.
- Branting, S., Wu, Y., Srikrishnan R., and Alta-weel, M.R., 2007. SHULGI: A geospatial tool for modeling human movement and interaction. *Proceedings of the Agent 2007 Conference on Complex Interaction and Social Emergence*, ANL/DIS-07-2, M.J. North, C.M. Macal, and D.L. Sallach (eds.), Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, pp. 475-487.
- Demirel, S., 2004. Origin and significance of a quartz-tourmaline breccia zone within the Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (unpublished).
- Doneus, M., Brise, C., Fera, M., and Janner, M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35 (4), 882-893.
- Erler, A., and Göncüoğlu, M.C., 1996. Geologic and tectonic setting of the Yozgat batholith, Northern Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey. *International Geology Review*, 38, 714-726.
- Karadut, E., 2002. Kerkenes (Yozgat) sahasında arkeolojik amaçlı jeofizik çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara (yayımlanmamış).
- Kwamme, K.L., 2003. Terrestrial remote sensing in archaeology, [http://www.cast.uark.edu/%7Eekvamme/Class-archprosp/Kwamme-Terrestrial\\_Remote\\_Sensing.pdf](http://www.cast.uark.edu/%7Eekvamme/Class-archprosp/Kwamme-Terrestrial_Remote_Sensing.pdf), 23.07.2008.
- Özcan, M., Çağlar, D., Summers, G.D., Summers, F., and Stronach, D., 1999. Report on the 1999 season at Kerkenes Dağ, <http://www.kerkenes.metu.edu.tr/kerk1/11prelim/1999/english/urban.htm>, 29.07.2008.
- Romain, W.F., and Burks, J., 2008. LiDAR analyses of prehistoric earthworks in Ross County, Ohio. <http://www.ohioarchaeology.org/joomla/index>, 24.03.2008.
- Summers, G.D., 2006. Aspects of material culture at the Iron Age capital on the Kerkenes Dağ in Central Anatolia. *Ancient Near Eastern Studies*, 43, 164-202.
- Summers, G.D., 2007. Public spaces and large halls at Kerkenes. *Anatolian Iron Ages 6: The Proceedings of the 6th Anatolian Iron Ages Colloquium at Eskişehir*, A. Çilingiroğlu and A. Sagona (eds.), Peeters Press, Leuven, pp. 245-263.
- Summers, G.D., Summers, M.E.F., Baturayoğlu, N., Harmanşah, Ö., and McIntosh, E.R., 1996. "The Kerkenes Dağ survey, an interim report". *Anatolian Studies*, XLVI, 201-234.
- Summers, G.D., and Summers, F., 1998. The Kerkenes Project, *Ancient Anatolia*. Ancient Anatolia, R. Matthews (ed.), BIAA, London, pp. 177-194.

Summers, G., and Summers, F., 2006. Aspects of urban design at the Iron Age city on the Kerkenes Dağ as revealed by geophysical survey. *Anatolia Antiqua*, 14, 71-88.

Summers, G.D., Summers, F., Stronach, D., and Özcan, M., 2002. "Kerkenes Dağı Projesi 2000", 23. Kazi Sonuçları Toplantısı 1.Cilt, Ankara, 439-448.

Von der Osten-Woldenburg, H., 2005. Applications of Ground-Penetrating Radar, magnetic and electrical mapping, and electromagnetic induction methods in archaeological investigations. <http://www.archaeogeophysics.info/pdf.html>, 21.07.2008.