



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 KURTULMUŞ¹, Mahmut G. DRAHOR^{1,2}

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35160 Buca, İZMİR

² 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

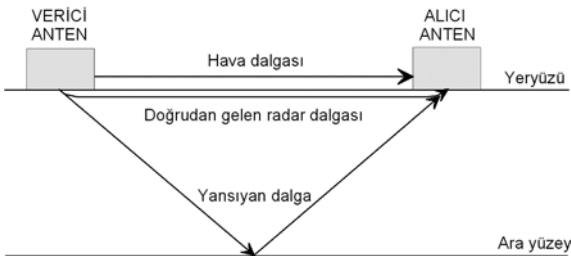
In this study, the effects of changes in the physical and geometrical properties of the subsurface features on the radargrams were tested by using synthetic spherical and cubic models for Ground Penetrating Radar (GPR) simulations. The physical parameters used in this study are the relative dielectric 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 karmaşıklaştırmakta 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 yayınan 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 10×10 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, bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri sıra-

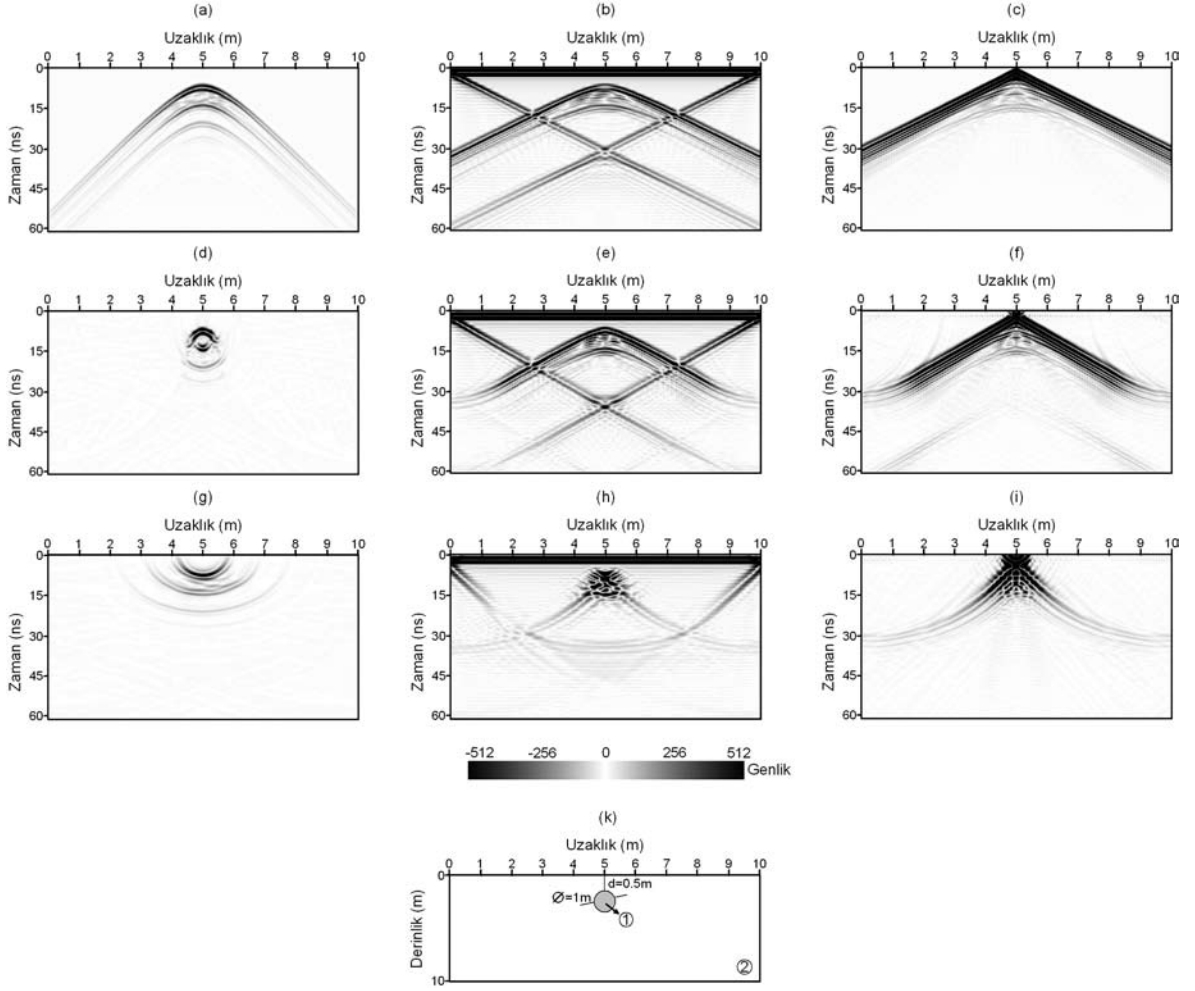
ısıyla $\epsilon_{r_1} = 1$ ve $\epsilon_{r_2} = 3$, elektrik iletkenlik değerleri $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ S/m ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri ise $\mu_1 = \mu_2 = 0$ olarak seçilmiştir.

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 bağıl 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 ϵ_r radar dalgalarının ilerlediği ortamın bağıl 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.

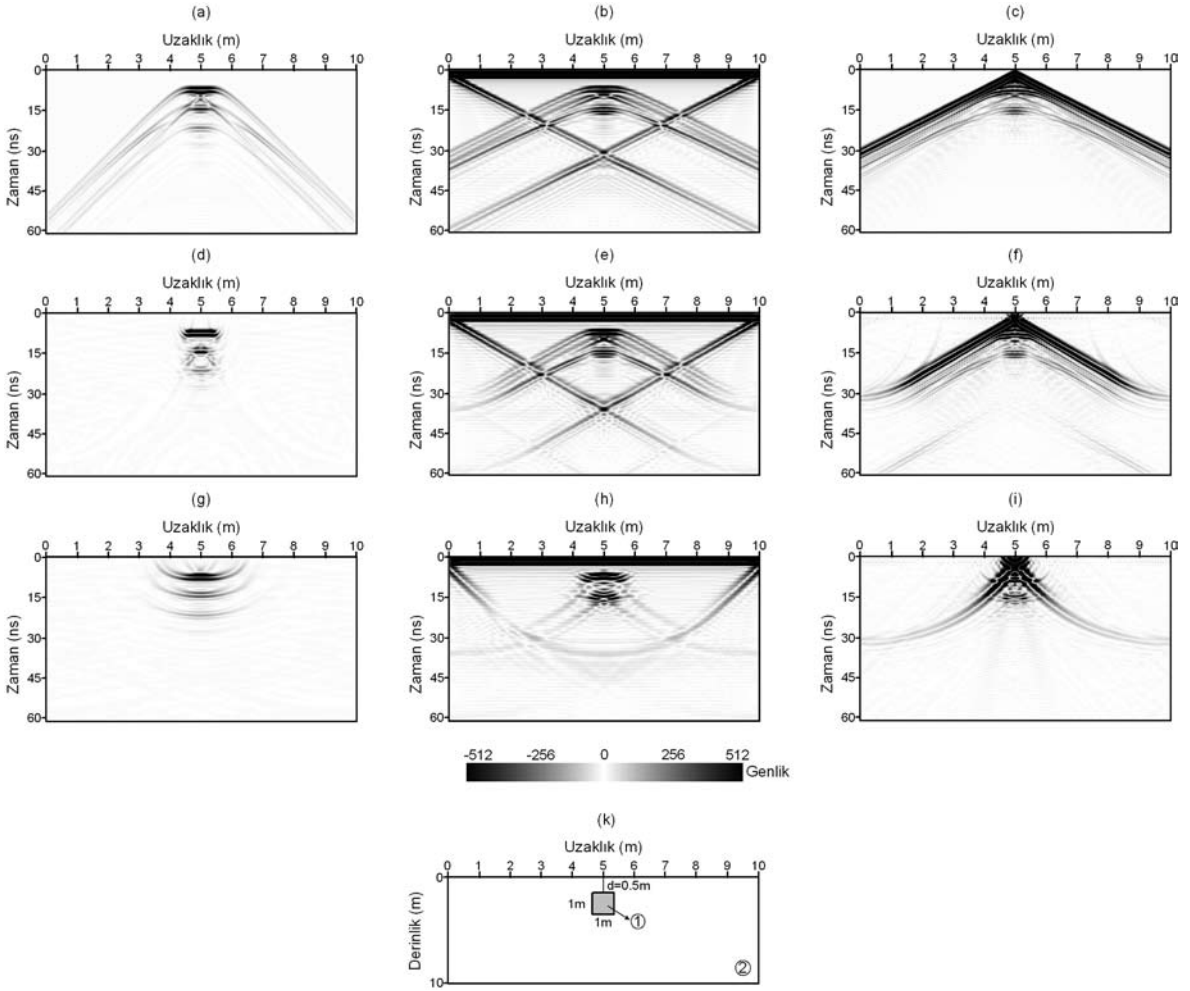
makla birlikte, nokta kaynak modelinde doğrudan gelen radar dalgalarının etkisiyle radargramlarda model yapının belirtisi görülememektedir (Şekil 2a-c ve 3a-c). Her iki modellemeye de tekdüze ortamın hız değeri ($v = 0.173$ m/ns) kullanılarak gerçekleştirilen göç işleminin patlayan yansıtıcı kaynak türü 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 değerine

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 (ϵ_r), elektrik iletkenliği (σ) ve bağlı manyetik geçirgenliği (μ) 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.

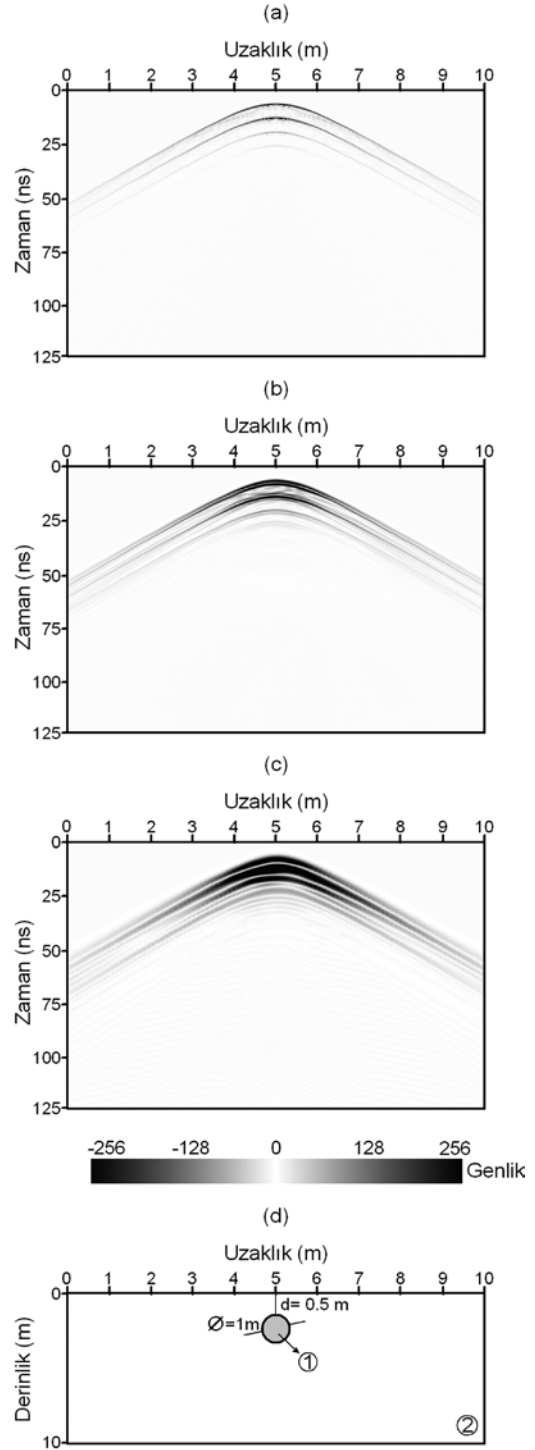
bu aşamasında model olarak, yeraltında 0.5 m derinliğe gömülmüş küre modeli üzerinde çalışılmıştır. Modellemeler sırasında yukarıda tanımlanan parametrelerin değişik değerleri için hesaplamalar yinelenmiş ve yapay radargramlar oluşturulmuştur. Daha sonra aynı modelin, ortamdaki fiziksel özellikleri değiştirilmeden, 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 (λ) 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.

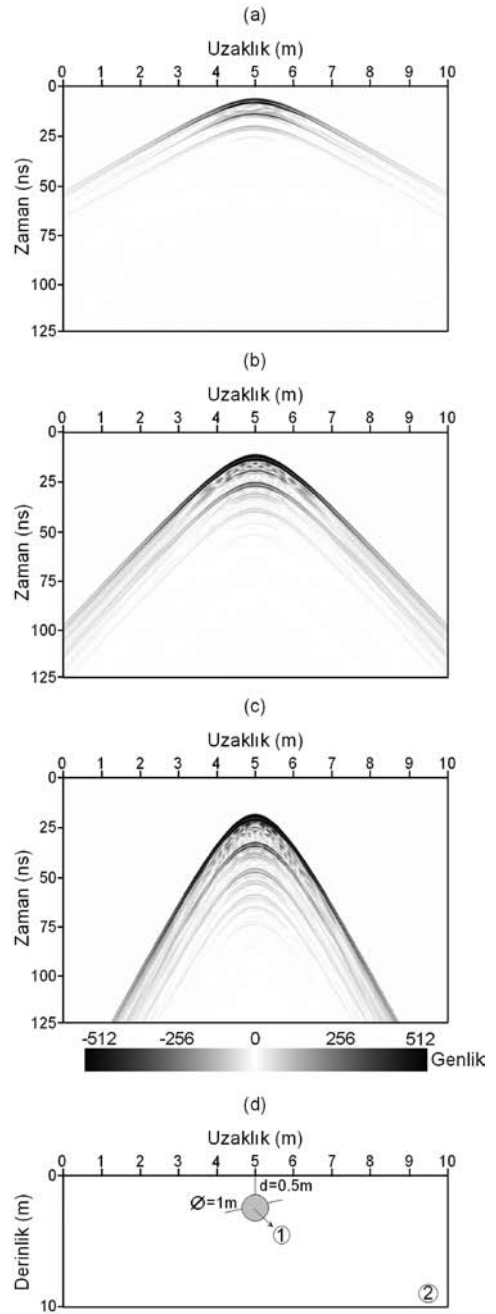
Figure 4. Synthetic radargrams obtained for different antenna frequencies of the spherical model: (a) 1000 MHz, (b) 250 MHz, (c) 100 MHz, (d) image of the model.

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 (ϵ_{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 $\epsilon_{r_1} = 1$.

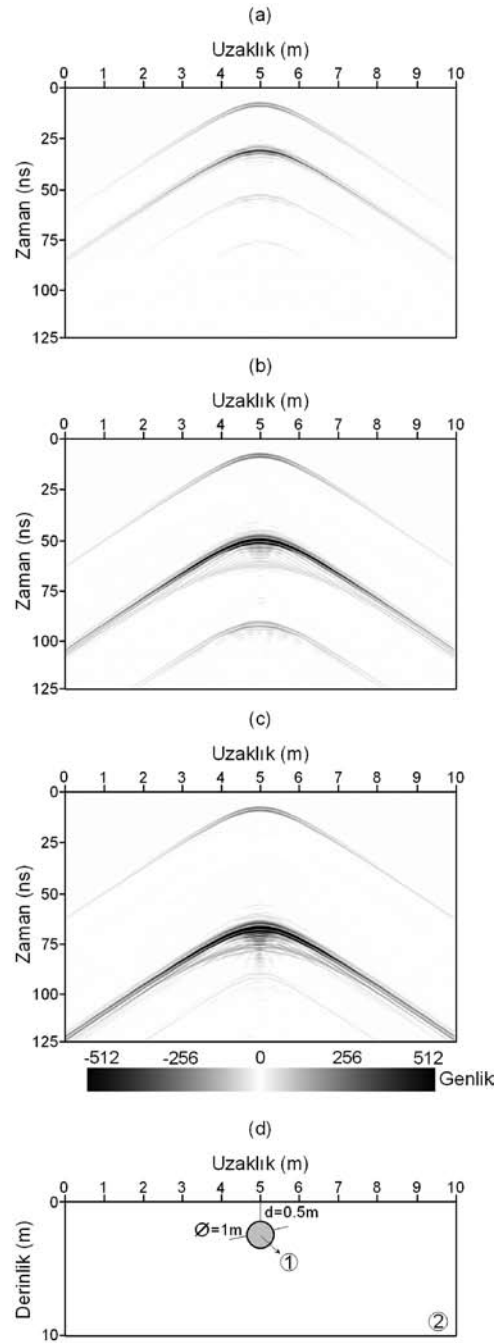
larına neden olmaktadır (Şekil 5a-c).

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 ϵ_{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 yansiyıp 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 (σ_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-



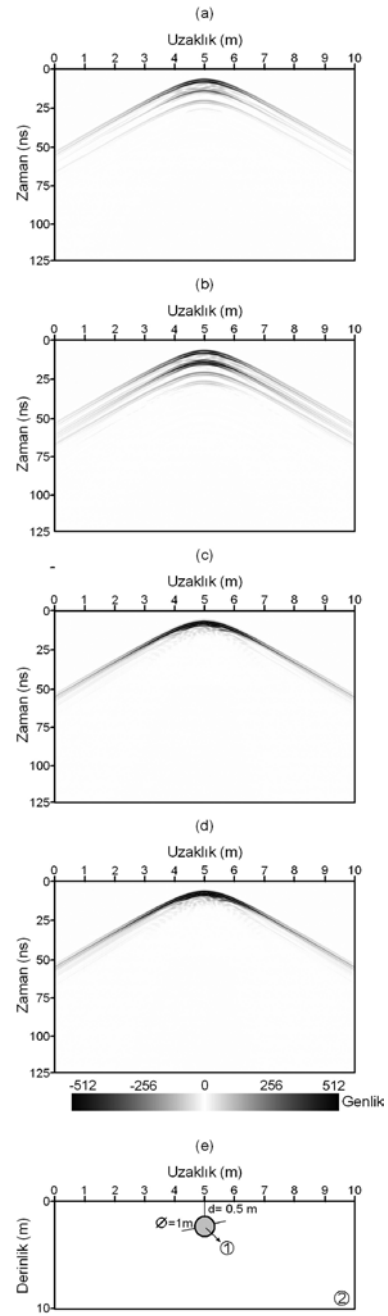
Şekil 6. Küre modelinin farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a) $\epsilon_{r_1} = 12$, (b) $\epsilon_{r_1} = 40$, (c) $\epsilon_{r_1} = 80$, (d) model görüntüsü. Model yapıyı çevreleyen ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri $\epsilon_{r_2} = 4$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

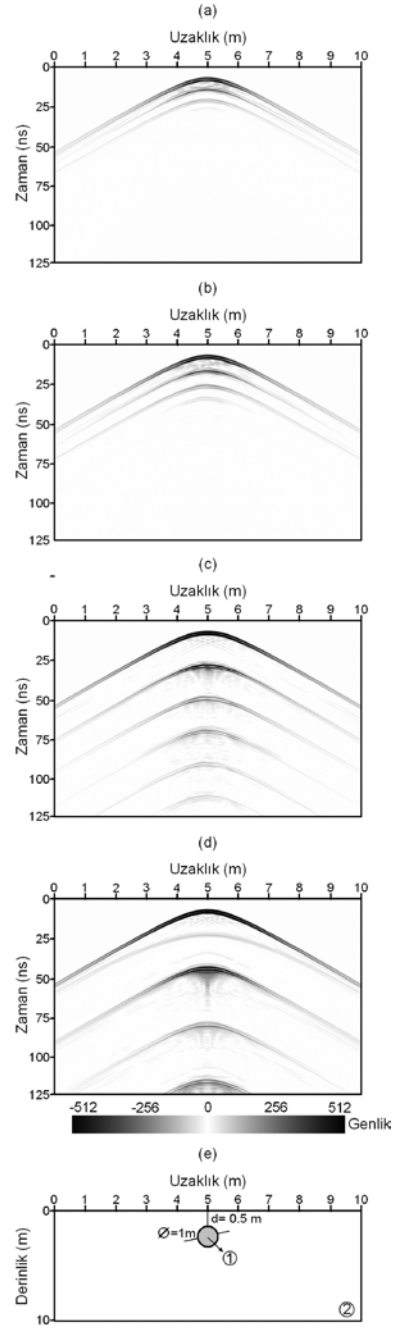
Figure 7. Synthetic radargrams obtained for different electrical conductivities of the spherical model: (a) $\sigma_1 = 0.0001$ S/m, (b) $\sigma_1 = 0.1$ S/m, (c) $\sigma_1 = 0.5$ S/m, (d) $\sigma_1 = 1$ S/m, (e) image of the model. The electrical conductivity of surrounding material is $\sigma_2 = 0$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

genlik değeri (μ_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 yansılardaki bu artış model yapının (μ_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

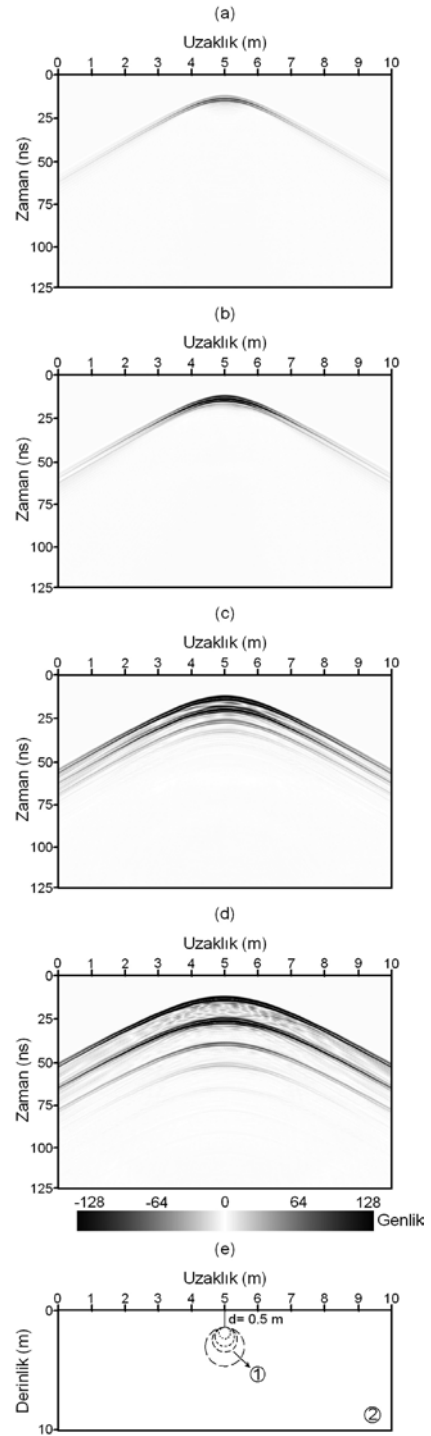


Şekil 8. Küre modelinin farklı bağıl manyetik geçirgenlik değerlerine göre elde edilen yapay radargramları: (a) $\mu_1 = 1.001$, (b) $\mu_1 = 2$, (c) $\mu_1 = 10$, (d) $\mu_1 = 30$, (e) model görüntüsü. Küre yapıyı çevreleyen ortamın bağıl manyetik geçirgenlik değeri $\mu_2 = 1$ 'dir.

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 $\mu_2 = 1$.

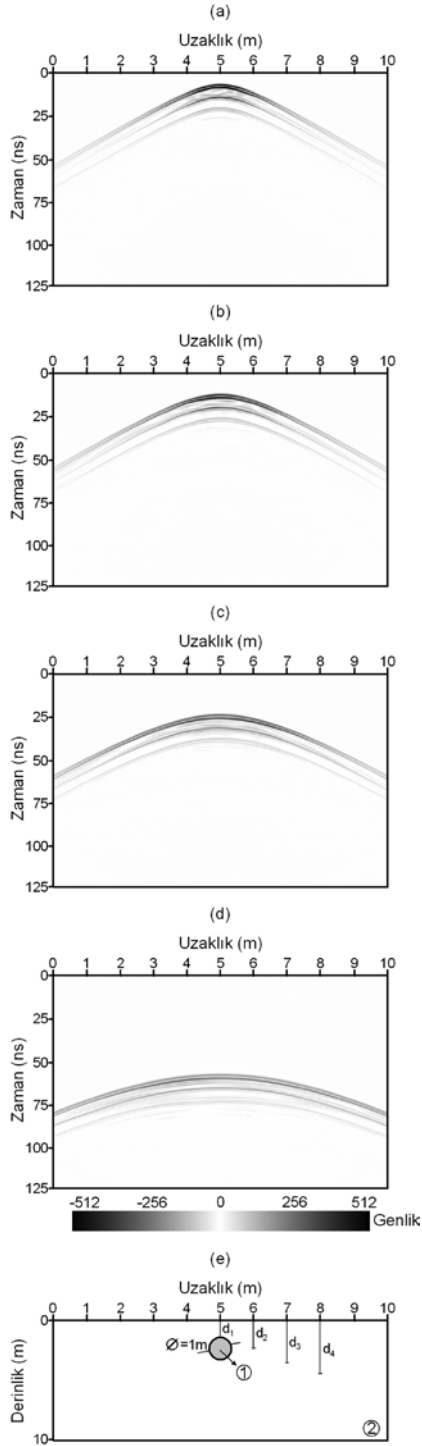
modelde olduğu gibi, 1. ortam model yapıyı, 2. ortam ise tekdüze ortamı göstermekte olup; bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla $\epsilon_{r1} = 1$ ve $\epsilon_{r2} = 3$, elektrik iletkenlik değerleri $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ S/m ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri ise $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 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 sönmülmeye uğramasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, elektromanyetik dalganın sönmülmesinde 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.

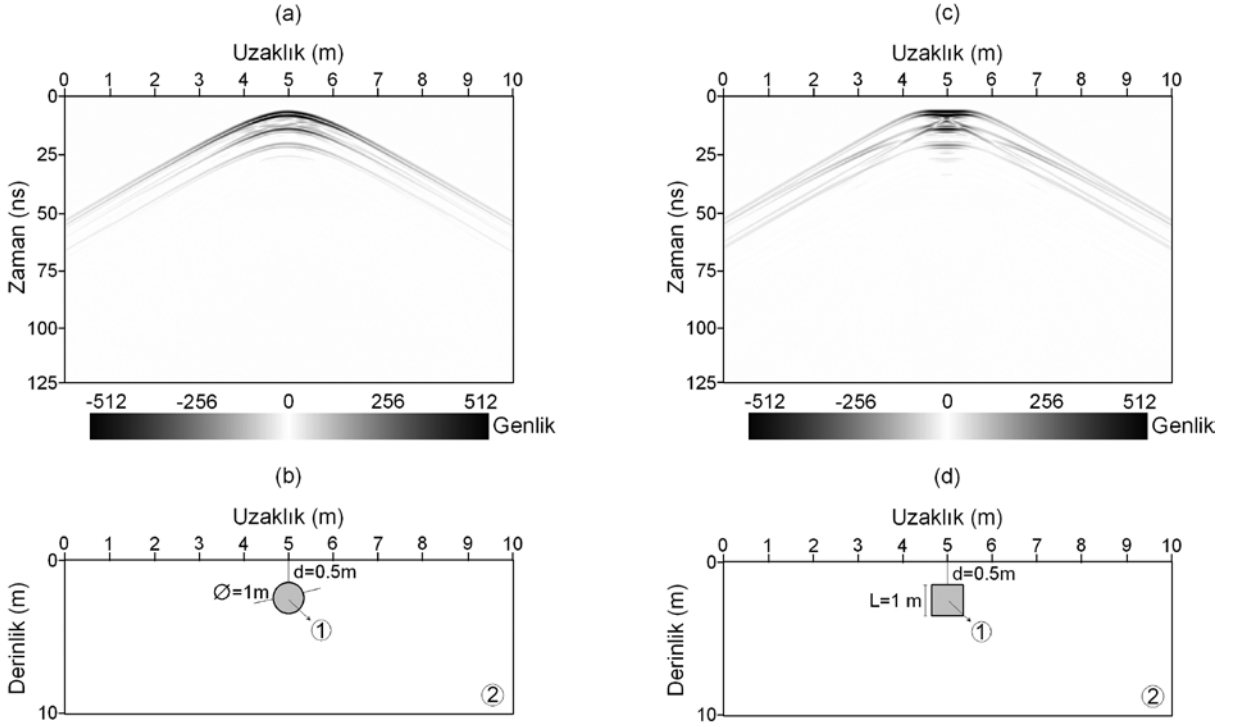
kisinin büyük olacağı ve ayrıca gömülü yapının özellikleri ile kullanılan antenin merkez frekansının da önem taşıdığı unutulmamalıdır.

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; siğ 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 hiperbolleri 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.