

## Koordinat Transformasyon Tabanlı Nümerik bir Model ile Pürüzlü Yüzey Altında Gömülü Cisimlerin Elektromanyetik Görüntülenmesi

Berk Bural, Özlem Özgün  
Hacettepe Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ankara  
[buralberk@gmail.com](mailto:buralberk@gmail.com), [ozlem@hacettepe.edu.tr](mailto:ozlem@hacettepe.edu.tr)

**Özet:** Bu çalışmada, pürüzlü dünya yüzeyi altında gömülü olarak bulunan bir cismin konum ve şekil tespiti, genetik optimizasyon algoritması yardımıyla bir elektromanyetik ters saçılma problemi çözülerek gerçekleştirilmiştir. Ters problemin çözümünde kullanılan ileri problemin çözümü, koordinat transformasyonuna dayanan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin çözümü için oluşturulan ağ yapısında bulunan transformasyon bölgesi kullanılarak pürüzlü dünya yüzeyi etkileri probleme dahil edilmiştir. Bu sayede düz yüzeye sahip basit bir ağ yapısı ile problem çözülmüştür. Genetik optimizasyon algoritması MATLAB paralel programlama araç kutusu kullanılarak CPU çekirdekleri üzerinde paralelleştirilmiştir. Monte Carlo simülasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar ve istatistiksel parametreler gösterilmiştir.

**Abstract:** In this work, location and shape of an object buried under rough earth surface is determined by solving an electromagnetic inverse problem with the help of genetic optimization algorithm. The solution of the forward problem, which is used in the solution of inverse problem, is done by using finite element method based on coordinate transformation technique. Effects of rough earth surface is incorporated into the problem by using the transformation medium in the mesh created for the solution of finite element method. In this way, the problem is solved by using a simple mesh which contains flat surface. Genetic optimization algorithm is parallelized on CPU cores by using MATLAB parallel programming toolbox. The results obtained from Monte Carlo simulations and statistical parameters are demonstrated.

### 1. Giriş

Gömülü cisim tespiti, radar ve uzaktan algılama alanlarında oldukça önemli ve uzun süredir araştırmacıların ilgi duyduğu bir konu olmuştur. Bu konunun başlıca uygulama alanları mayın tespiti, jeofiziksel keşifler, yeraltı boru tespiti, medikal görüntüleme vb. gibi alanlardır. Gömülü cisim tespiti için literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde dünya yüzeyinin doğadaki pürüzlü yapısında modellenmesi, elde edilen sonuçların tutarlılığı açısından büyük önem taşımaktadır.

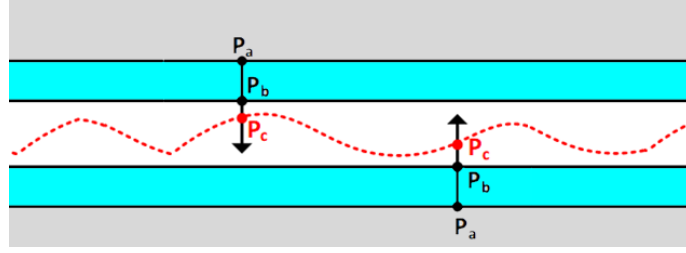
Pürüzlü dünya yüzeyi altında gömülü bulunan cisimleri görüntülemek için kullanılan yöntemler pürüzlü yüzey üstünde veya altında bulunan verici antenler tarafından cismin bulunduğu varsayılan bölgenin aydınlatılmasına dayanmaktadır [1]. Aydınlatılan bölgeden saçılan elektromanyetik alan yine yüzey üstünde bulunan alıcı antenler tarafından algılanır ve elde edilen saçılan alan bilgisi kullanılarak gömülü cismin konumu, şekli ve elektriksel parametreleri saptanmaya çalışılır. Literatürde saçılan alan bilgisini kullanarak fiziksel bir cisim hakkında bilgi elde etmek için oluşturulan problemlere elektromanyetik ters saçılma problemleri denir.

Bu çalışmada pürüzlü dünya yüzeyi altında bulunan iki boyutlu bir cismin konumu, şekli ve elektriksel özellikleri, elektromanyetik ters saçılma problemi çözülerek elde edilmeye çalışılmıştır. Elektromanyetik ters saçılma problemini çözmek için bir optimizasyon tekniği olan genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritma, yüzey altındaki gömülü cisme bağlı birtakım parametreleri optimize ederek maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır. Maliyet fonksiyonu, ölçülen ve ileri problemin çözümünden elde edilen saçılan alan değerlerinin farkı alınarak bulunmaktadır. Maliyet fonksiyonun hesaplanması için çözülmesi gereken ileri problem elektromanyetik saçılma problemidir. İleri problemin çözümü için ortam iki boyutlu ağ yapısı ile modellendikten sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi için oluşturulan ağ yapısında pürüzlü yüzey etkileri koordinat transformasyonu kullanılarak eklenmiştir. Bu sayede daha basit düz bir yüzeye sahip bir ağ yapısıyla çözüm yapılmıştır. Geliştirilen yöntemin performansı Monte Carlo yöntemi ile istatistiksel olarak test edilmiştir.

### 2. Koordinat Transformasyonu

Elektromanyetik saçılma problemlerini gerçeğe en yakın şekilde çözmek için dünya yüzeyini pürüzlü bir şekilde modellemek büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada pürüzlü dünya yüzeyi, ileri problemin çözümünde

kullanılacak iki boyutlu ağ yapısına koordinat transformasyonu kullanılarak eklenmiştir. Şekil 1’de gösterilen transformasyon bölgesindeki (mavi bölge) koordinatların transformasyonu ile problemin çözümüne dahil edilmiştir.



Şekil 1. Koordinat transformasyon tekniği

Transformasyon bölgeleri düz yüzeyin hemen üstünde ve altında olacak şekilde oluşturulmuş ve bu iki transformasyon bölgesinin arasında kalan bölge ağ yapısından çıkarılmıştır. Daha sonra transformasyon bölgelerindeki koordinatlara (1)’deki transformasyon uygulanmıştır.

$$\tilde{x} = x, \quad \tilde{y} = K(y - y_b) + y_c, \quad K = \frac{|y_a - y_c|}{|y_a - y_b|} \quad (1)$$

Burda  $\tilde{x}$  ve  $\tilde{y}$  transformasyon sonucu elde edilen koordinatları,  $x$  ve  $y$  transformasyon bölgelerindeki orijinal koordinatları temsil etmektedir [2]. Yeni koordinatlarla elde edilen ağ yapısı ileri problemin çözümünde kullanılmıştır. Bu çalışmada pürüzlü yüzey Gaussian olasılıksal dağılımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyin RMS yüksekliği 0.1 metre, korelasyon uzunluğu 0.5 metredir.

### 3. Ters Saçılma Problemi Çözümü

Ters saçılma problemleri, önceden ölçülmüş veya hesaplanmış verileri, fiziksel bir nesne hakkında bilgiye dönüştürmek amacıyla optimizasyon yöntemleri kullanılarak çözülen problemlerdir. Bu çalışmada pürüzlü dünya yüzeyi atında gömülü yuvarlak bir cismin şekli ve konumu, bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Toprak altına yerleştirilen birtakım çizgi kaynaklar ile aydınlatılan cisimden saçılan alan, yine toprak altında bulunan alıcı noktalarda ölçülmüştür. Genetik algoritma, bu ölçülen değerleri, cisme ait yarıçap, konum, dielektrik katsayısı, iletkenlik gibi değerleri optimize ederek tahmin etmeye çalışmaktadır. Bunun için maliyet fonksiyonu (2) olarak adlandırılan ölçülen ve tahmin edilen alan değerlerine bağlı bir fonksiyonu minimize etmektedir [3].

$$F(p) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |E_{ij}^m - E_{ij}^e(p)|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

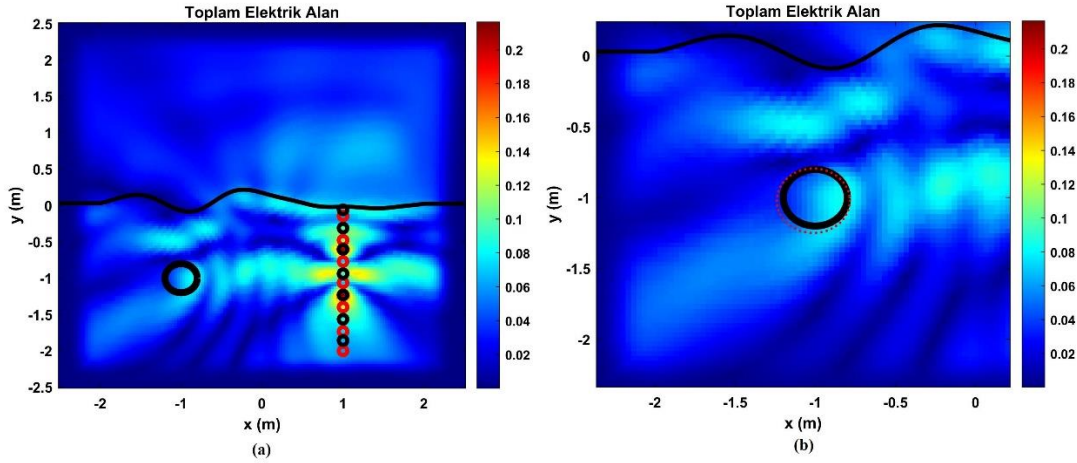
Bu eşitlikte  $I$  toplam aydınlatma sayısını,  $J$  alıcı noktaların sayısını,  $N = I \times J$  toplam veri sayısını,  $E_{ij}^m$  ölçülen alan değerini,  $E_{ij}^e$  genetik algoritma sonucu tahmin edilen alan değerini temsil etmektedir.

Genetik algoritma, doğada bulunan evrimsel sürece benzer şekilde çalışarak maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır. Bu amaç doğrultusunda cisme ait parametreler ( $p$ ) değiştirilerek ileri problem yinelemeli (iteratif) bir şekilde çözülmektedir. Bu yinelemelerin her birine jenerasyon, her bir jenerasyonda bulunan parametre seti kümesine ise popülasyon denmektedir. Parametre setinde bulunan her parametre bir kromozomu temsil etmektedir ve her kromozom belirli sayıda gen içermektedir. Her bir parametre seti için ileri problem çözümlenerek maliyet değerleri hesaplanır. Her yineleme sonucu popülasyon içerisinde en düşük maliyet değerine sahip iki parametre seti tespit edilerek birbiri arasında gen değişimi uygulanmaktadır. Bu sayede optimize edilen parametreler arasından gerçeğe en yakın olanların ileri jenerasyonlara aktarılması sağlanmaktadır. Ayrıca elitizm uygulanarak maliyet değeri büyük olan çözümlerin parametre setlerinin bir sonraki jenerasyonlarda yer almaması sağlanmıştır.

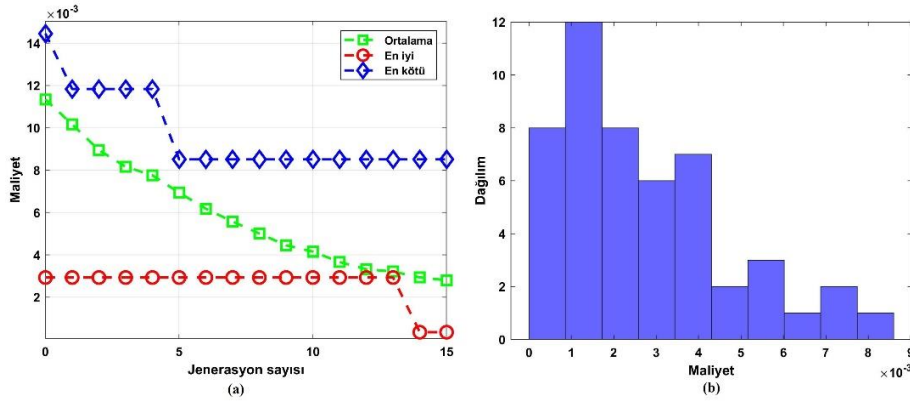
Bu çalışmada kullanılan toplam jenerasyon sayısı 15, popülasyon sayısı ise 100’dir. Kromozom sayısı 10, her bir kromozomda bulunan gen sayısı ise 7’dir. Algoritma boyunca çözülen toplam ileri problem sayısı 1500’dir. İleri problem sayısının fazlalığından doğan hesaplama yükü, algoritmanın CPU çekirdekleri üzerinde paralelleştirilmesi ile hafifletilmiştir. Aynı anda birden fazla ileri problem çözümlenerek daha hızlı sonuç elde edilmiştir.

#### 4. Nümerik Sonuçlar

Bu kısımda, pürüzlü dünya yüzeyi altında gömülü bulunan yuvarlak bir dielektrik cismin, sondaj (borehole) görüntüleme yöntemi ile aydınlatılarak elde edilen toplam elektrik alan verileri kullanılarak çözülen ters saçılma probleminin sonuçları gösterilmiştir. Şekil 2.a'da yer altına yerleştirilen alıcı ve verici kaynaklar ile tespit edilmeye çalışılan yuvarlak 20 cm yarı çaplı gömülü cisim gösterilmiştir.  $x = 1$  m'de bulunan 7 verici çizgi kaynak ikili ve üçlü şekilde gruplandırılarak toplam 18 farklı aydınlatma yapılmıştır. Aydınlatma için kullanılan elektromanyetik dalganın frekansı 300 MHz, polarizasyonu ise  $TM_z$ 'dir. Gömülü cismin dielektrik katsayısı  $1.5 - j0.0012$ , toprak için kullanılan dielektrik katsayısı ise  $3.343 - j0.108$ 'dir. Ters saçılma probleminin çözümü ile elde edilen cismin şekli, Şekil 2.b'de orijinal cismin şekli ile karşılaştırılmıştır, dielektrik katsayısı ise  $3.629 - j0.198$  olarak bulunmuştur. Ters saçılma problemi Monte Carlo yöntemi ile 50 defa çözümlenerek algoritmanın performansı test edilmiştir. Hesaplanan maliyet fonksiyonlarına ait değerlerin jenerasyonlar boyunca değişimi Şekil 3.a'da gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen 50 maliyet değerinin dağılımı Şekil 3.b'de histogram grafiği olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Çizgi kaynak aydınlatmasının gösterimi, (b) Orijinal cisim (siyah) ve ters problem çözümü ile elde edilen cisim (kırmızı)



Şekil 3. (a) Maliyet fonksiyonunun jenerasyonlara göre değişimi, (b) Maliyet değerinin dağılımı

#### Kaynaklar

- [1]. Gürbüz T., Aslanyürek B., Karabulut P.E., Akduman İ., "An Efficient Nonlinear Imaging Approach for Dielectric Object Buried Under a Rough Surface," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., cilt. 52, no.5, s. 3013-3024, 2014.
- [2]. Özgün Ö., Kuzuoğlu M., "A Transformation Media Based Approach for Efficient Monte Carlo Analysis of Scattering from Rough Surfaces with Objects," IEEE Transactions on Antennas and Propagation., cilt. 61, no.3, s. 1352-1362, 2013.
- [3]. Özgün Ö., Kuzuoğlu M., "Coordinate transformation aided finite element method for contour detection of breast tumors in microwave imaging," International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering., cilt. 34, no.10, 2018.