

Kayıplı Yarı Uzay Toprağın Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi ile Zaman İmzası Hesabı

Talha Saydam, Osman Said Bişkin, Serkan Aksoy
Gebze Teknik Üniversitesi
Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli

tsaydam@gtu.edu.tr, obiskin@gtu.edu.tr, saksoy@gtu.edu.tr,

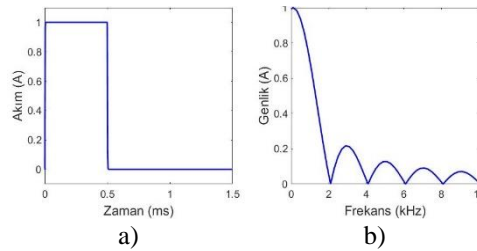
Özet: Bu çalışmada homojen kayıplı yarı-uzay toprak problemi düşük frekanslarda Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar (KS-ZUSF) yöntemi ile iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda çözülmüştür. Verici anten olarak sonsuz uzunluklu akım taşıyan iletken iki tel toprağın yüzeyine yerleştirilerek, darbe türü bir sinyal ile uyarılmıştır. Böylece alıcıdaki manyetik alanlar zaman uzayında hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları literatürdeki analitik sonuçlar ile doğrulanmıştır. Daha sonra, kayıplı ince bir toprak katmanı ve iletken gömülü bir cisim içeren daha gerçekçi ve zor bir problem KS-ZUSF yöntemi ile çözümlenerek, zaman imzaları hesaplanmıştır.

Abstract: In this study, at low frequencies, a homogeneous lossy half-space soil problem is solved by using a Quasi-Static Finite Difference Time Domain (QS-FDTD) method in two-dimensional Cartesian coordinates. As a transmitter antenna, two infinitely long current-carrying conductor wires are placed on the surface of the ground and excited by a pulse type signal. Thus, the magnetic fields at the receiver are calculated in time domain. The calculation results are validated with the analytical results in the literature. Then, time signatures of a more realistic and difficult problem involving a lossy thin soil layer and a conductive buried object are calculated by using the QS-FDTD method.

1. Giriş

Daha derinlere ulaşılabildiğinden düşük frekanslı Zaman Uzayı ElektroManyetik ZUEM, (Time Domain ElectroMagnetics, TDEM) sistemleri yeraltı suları, mineral yatakları tespiti vb. jeofizik araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu sistemlerde yer yüzeyine yerleştirilen büyük halka antenler ya da topraklanmış uzun teller ile darbe türü akımlar uyarılıp toprak altında Eddy akımları indüklenerek, alıcıda ikincil bir manyetik alan algılanır. Böylece zaman uzayı sinyalleri ile yer altı hedeflerinin tespiti sağlanır. ElektroManyetik İndüksiyon (EMİ) tabanlı olan ZUEM sistemleri düşük frekanslarda Manyeto-Kuvazi-Statik (MKS) koşulunu sağladığından, elektromanyetik dalgaların difüzyon davranışı nedeniyle nümerik çözümleri zorlayıcıdır.

Literatürde ZUEM problemleri için difüzyon denklemi çözümü ve Maxwell denklemleri çözümü tabanlı olmak üzere Zaman Uzayı Sonlu Farklar ZUSF, (Finite Difference Time Domain, FDTD) çalışmaları mevcuttur. Sonlu hızda dalga yayılım davranışı ve faz bilgisi kaybedildiğinden, difüzyon denklemi tabanlı çözümler bir kenara bırakılırsa, Maxwell tabanlı çalışmalarda ise temelde hayali (fictitious) bir dielektrik sabiti kullanılarak çözüm sağlanmaktadır [2]. Bu problemin üstesinden gelebilmek için, düşük frekanslarda MKS koşulunun geçerli olduğu problemlerin çözümü için KS-ZUSF yöntemi önerilmiştir [3]. Bu çalışmada öncelikle KS-ZUSF yöntemi kullanılarak temel ZUEM problemi olan homojen kayıplı yarı-uzay toprak problemi iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda çözümlenerek, doğrulanmıştır. Daha sonra kayıplı ince bir toprak katmanı ve iletken gömülü bir cisim içeren daha gerçekçi ve zor bir problem KS-ZUSF yöntemi ile çözümlenerek, zaman imzaları hesaplanmıştır. Verici anten olarak kullanılan sonsuz uzunluklu iletken iki tel toprağın yüzeyine yerleştirilerek Şekil 1.'de gösterilen darbe türü sinyal ile uyarılmıştır.



Şekil 1. Verici antene uygulanan akım sinyali ve frekans cevabı.

2. KS-ZUSF Yöntemi

Düşük frekanslarda dalga boyu problem uzayındaki cisimlerin boyutlarına göre çok büyük olduğundan, elektriksel küçük cisimlerin doğru modellenmesi için ZUSF birim konum adımlarının dalga boyuna göre çok küçük olması zorunludur. Bu durum kararlılık koşulu kapsamında klasik ZUSF birim zaman adımlarının çok küçük olmasını gerektirdiğinden, hesap süresinin çok uzun olmasına sebep olur. Bu sorunu çözmek için MKS koşulunun geçerli olduğu durumlarda KS-ZUSF yöntemi geliştirilmiştir [3]. MKS koşulunun sağlandığı durumlarda yer değiştirme akımları iletkenlik akımlarına göre çok küçük olduğundan, eğer yer değiştirme akımları tamamen ihmal edilirse Maxwell denklemleri difüzyon denklemine dönüşür. Ancak difüzyon denklemi çözümünde alanların faz bilgisi ve sonlu hızda dalga yayılımı davranışı kaybedilir. Bu nedenle KS-ZUSF yönteminde yer değiştirme akımları ihmal edilmeden, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ dielektrik sabiti bir α_k katsayısı ile ölçeklenerek tam dalga çözüm elde edilir. Bu amaçla öncelikle kompleks dalga sayısı $k = k_{reel} + jk_{sanal}$ 'nın reel ve sanal kısımları ayrı ayrı

$$k_{reel} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \underbrace{\left(\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right)}_{\sqrt{\alpha_k}}^{1/2} \quad (1)$$

$$k_{sanal} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \left(\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right)^{1/2} \quad (2)$$

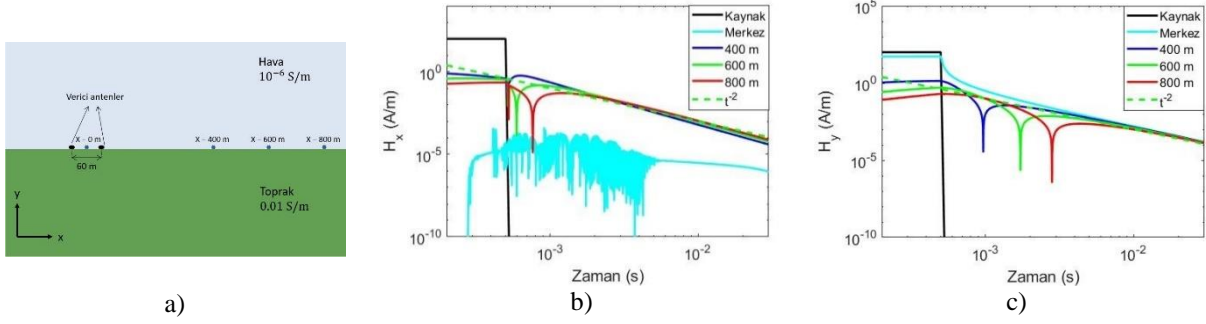
ele alınsın. Burada ω açısal frekans, c_0 boş uzay dalga yayılım hızı ve $k_0 = \omega/c_0$ boş uzay dalga sayısı olmak üzere (ε_r ve μ_r bağıl sabitler), dalga yayılım hızı c

$$c = \frac{\omega}{k_{reel}} = \frac{\omega}{\sqrt{\alpha_k} k_0} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_k}} c_0 \quad (3)$$

şeklinde, zaten analitik olarak mevcut $\sqrt{\alpha_k}$ oranında ZUSF çözümünde azaltılarak, ZUSF birim zaman adımı artırılabilir. Bu durum dielektrik sabitinin α_k kadar büyütülmesi (ölçeklenmesi) ile sağlanabilir. Kuvazi-statik ölçekleme katsayısı α_k 'nın değeri hesaplanırken, problemin fiziksel davranışının bozulmaması için MKS kriteri, Nyquist kriteri, yayılım ve faz sabiti, röleksiyon zamanı, difüzyon zamanı ve iletim zaman sabitlerinin değerleri analitik çözüm kapsamında dikkate alınarak bulunmalıdır [3]. Literatürde KS-ZUSF yönteminin tek frekanslı ve darbe indüksiyonlu metal dedektörleri için doğrulama ve uygulamaları mevcuttur [4]-[5].

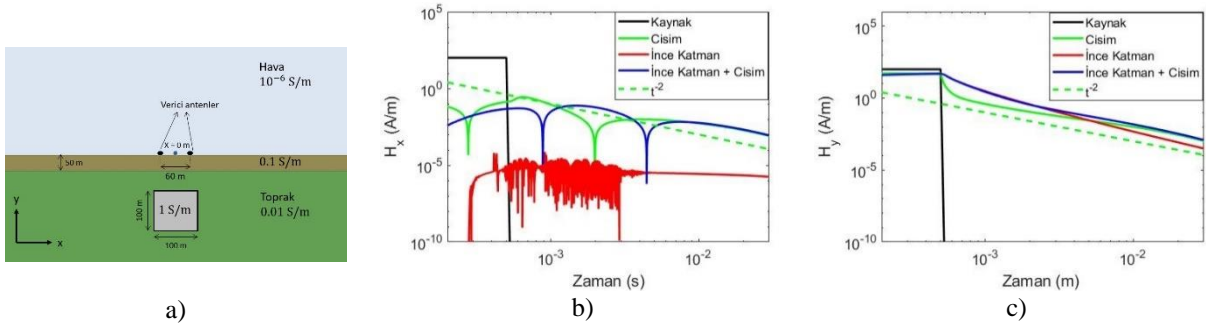
3. Kayıplı Yarı-Uzay Toprak Problemi

Kayıplı bir yarı-uzay toprak'tan yansıyan zaman sinyali, erken (early) ve geç (late) zaman aşamalarında değerlendirilebilir. Erken zaman cevabında hem düşük hem de yüksek frekanslar bulunurken, geç zaman cevabında düşük frekans bileşenleri baskındır. Üç boyutlu durumda kayıplı yarı-uzay toprak üzerine yerleştirilen büyük bir verici halka anten üzerinde akan bir doğru akımın $t = 0$ anında kapatılması ile, verici anten merkezinde yerleştirilen bir alıcı antende indüklenen manyetik alan dikey ve yatay bileşenlerinin zaman bağımlılığı analitik çözümlere göre geç zamanlarda $t^{-1.5}$ ve t^{-2} biçimindedir [1]. İki boyutta ise, analitik olarak dikey bileşen t^{-2} iken, yatay bileşenin zaman bağımlılığı kesin olarak bilinmemektedir [6]. Bu çalışmada kayıplı yarı-uzay toprak problemi iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda KS-ZUSF yöntemi ile çözülmüştür. Verici anten olarak sonsuz uzunluklu ve aralarında 60 m mesafe bulunan akım taşıyan iki iletken tel toprağın yüzeyine yerleştirilerek, darbe türü bir sinyal ile uyarılmıştır. Şekil 1.b)'de verilen kaynak frekans cevabına bakılarak ZUSF çözümü için en yüksek frekans 10 kHz olarak seçilmiştir. Kayıplı yarı-uzay toprak iletkenlik değeri 0.01 S/m ve kabul edilebilir hesap süresi için (sonuçları çok fazla etkilemeyeceği ön görülerek) havanın iletkenlik değeri MKS şartının tüm problem uzayında sağlanması için 10^{-6} S/m alınmıştır. Bu kapsamda KS ölçekleme katsayısı $\alpha_k = 9.45$ olarak hesaplanır. Verici anten yapısının merkezinde, 400, 600 ve 800 metre uzaklıktaki gözlem noktalarında hesaplanan manyetik alanların yatay ve dikey bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Buna göre KS-ZUSF ile hesaplanan manyetik alanın dikey bileşeninin t^{-2} eğrisiyle örtüşmektedir. Yine manyetik alan yatay bileşeni beklendiği gibi çok zayıf olduğu görülmektedir [1]. Ayrıca alıcı antenin konumu uzaklaştıkça manyetik alan şiddetindeki işaret değişimi (sign reversal) zamanının da geciktiği ve t^{-2} eğrisine daha geç oturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2. a) Problem geometrisi, alıcıda indüklenen manyetik alanın b) yatay bileşeni, c) dikey bileşeni.

Daha sonra toprak yüzeyi altında 50 metre kalınlığında 0.1 S/m kayıplı ince bir toprak katman eklenerek ve ayrıca 100 metre derinlikte 100 m x 100 m boyutunda 1 S/m iletkenlikli bir cisim yerleştirilerek hesaplamalar tekrarlanmıştır. Şekil 3'te gösterilen sonuçlara göre gömülü cisim özellikle manyetik alanın yatay bileşeni önemli ölçüde etkilenmektedir.



Şekil 3. a) Problem geometrisi, alıcıda indüklenen manyetik alanın b) yatay bileşeni, c) dikey bileşeni.

4. Sonuç

Kayıplı bir yarı-uzay toprak üzerine yerleştirilen sonsuz uzunluklu akım taşıyan iki telden oluşan verici anten yapısı düşük frekans bandında darbe türü bir sinyal ile uyarılarak toprağın zaman imzası KS-ZUSF yöntemi ile hesaplanmıştır. Sonuçlar geç zamanlardaki zaman bağımlılığı kapsamında analitik çözüm ile doğrulanmıştır. Daha sonra kayıplı ince katman ve gömülü iletken büyük cisim içeren daha gerçekçi ve zor bir problem için manyetik alanlar hesaplanmıştır. Manyetik alanların yatay ve dikey bileşenleri verici antende farklı mesafelerde hesaplanarak mesafenin ve alıcı yönünün etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalar ZUEM sistemleri ile daha kaliteli görüntüleme yapabilmek için ve problemin davranışının daha iyi anlaşılması kapsamında önemlidir. Gelecek çalışması olarak problemin üç boyutlu manyetik dispersif topraklar için KZ-ZUSF çözümü hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ward S. H. ve Hohmann G. W., "Electromagnetic Theory for Geophysical Applications", Chapter 4 in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, cilt.1, Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [2] Chang J., Wu X., Lei K., Lv P., Zhao Y. ve Meng Q., "Three-dimensional modeling of ground-airborne transient electromagnetic responses of typical models based on the finite difference approach", Journal of Applied Geophysics, cilt.197, 104545, 2022.
- [3] Özakin M. B. ve Aksoy S., "Application of magneto quasi-static approximation in the finite difference time domain method", IEEE Trans. on Magnetism, cilt.52 no.8, 7209809, 2016.
- [4] Mehmet B. Özakin ve Serkan Aksoy, (2017), "Numerical calculation of magnetic dipole fields by three-dimensional QS-FDTD method", Progress in Electromagnetic Symposium, 3293-3296.
- [5] Talha Saydam ve Serkan Aksoy, (2019), "Darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinin modellenmesi", Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon (USMOS) Konferansı, 4-15, Ankara, Türkiye, 19-21 Kasım.
- [6] Newman G. A., Hohmann G. W. ve Anderson W. L., "Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth", Geophysics, cilt.51 no.8, 1608-1627, 1986.