

ÜÇ BOYUTLU KARTEZYEN KOORDİNATLARDA DÜŞÜK VE TEK FREKANSLI METAL DEDEKTÖRLERİNİN KUVAZİ-STATİK ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE BENZETİMİ

Mehmet Burak Özakın, Serkan Aksoy
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Kocaeli, TÜRKİYE.

bozakin@gyte.edu.tr, saksoy@gyte.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, gömülü iletken bir cismin düşük ve tek frekanslı (dar-bantlı) bir metal dedektörü ile tespit performansı üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemleri tabanlı Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi ile yatay konuma göre saçılan alan genlik dağılımı kapsamında incelenmiştir. Problem uzayı dairesel monokromatik verici/alıcı anten, hava-toprak ve gömülü manyetik olmayan iletken bir cisimden oluşmaktadır. Konuma göre saçılan alan genlik dağılımı, topraktan sabit bir yükseklikteki alıcı antenin yatay eksenindeki konumlarından elde edilen zaman uzayındaki elektromanyetik alan verilerinin frekans uzayına dönüştürülmesi ile hesaplanmıştır. Metal dedektörünün tespit performansını etkileyen çevresel olmayan ve değiştirilebilir parametrelerin (anten-toprak mesafesi, cisim derinliği vb.) değişimi kapsamında çeşitli senaryolar analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gömülü iletken cisim, kuvazi-statik alanlar, metal dedektörü, zaman uzayı sonlu farklar yöntemi.

1. GİRİŞ

ElektroManyetik İndüksiyon (EMİ) tabanlı bir sistem olan metal dedektörleri ile gömülü iletken ve/veya manyetik cisimlerin tespit ve teşhisi uzun yıllardır önemli bir araştırma konusudur. Metal dedektörleri gömülü iletken cisim üzerinde Eddy akımlarını indükleyerek tespit ve teşhis yapabilmektedir. Metal dedektörleri işaret kaynağı bakımından darbe üreten ve düşük tek frekanslı olmak üzere ikiye ayrılır. Her iki tip sistemin tespit ve teşhis yetenekleri önemli farklılıklar gösterdiğinden, bu sistemler ayrı ayrı incelenmelidir. Düşük ve tek frekanslı metal dedektör sistemleri nispeten daha yaygın olduğundan, incelemeler bu sistemler üzerinde yaygınlaşmıştır.

Metal dedektörlerinin donanımsal ve yazılımsal gelişimi kapsamında iki temel konu üzerinde analitik ve/veya sayısal yöntemler kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Birincisi, yanlış alarm sayısının azaltılarak tespit performansının artırılması, ikincisi teşhis ve sınıflandırma yeteneklerinin geliştirilmesidir. Bu çalışmalar üzerinde analitik olarak toprağın etkisinin incelenmesi zor olduğundan, genellikle iletken cismin boş uzayda bulunduğu durum için analitik çözümler elde edilmiştir [1], [2], [3]. Sayısal yöntemlerle toprağın etkisi incelenilebilir olsa da, metal dedektörünün düşük frekansta çalışması nedeni ile problem uzayında dalga boyundan çok küçük boyutlardaki iletken cismin modellenip analiz edilmesi için hesap zamanı ve bilgisayar kaynakları yetersiz kalmaktadır. Özel olarak zaman uzayı sayısal yöntemleri ile çözümlerde en azından tam bir periyot işaretinin oluşması için yüzbinlerce zaman iterasyonu gerekmektedir. Bu durum hem sayısal hataların artmasına hem de günümüz bilgisayarları ile aylarca süren hesaplamalara neden olmaktadır. Bu kapsamda, Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar (KS-ZUSF) yöntemi kullanılarak birim iterasyon zaman adımının büyütülmesi ile zaman uzayı sayısal yöntemlerinde bahsedilen zafiyet giderilmiştir. KS-ZUSF yöntemi ile metal dedektörü için yapılan önceki çalışmalarda sadece iki boyutta çözümler verilmiştir [4], [5]. Bu çalışmada ise problemin daha gerçekçi modellenmesi için üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemleri tabanlı KS-ZUSF çözümü ile cisim tespitini etkileyen değiştirilebilir parametrelerin (anten yüksekliği, cisim derinliği vb.) tespit performansına etkisi, konuma göre saçılan alan genlik dağılımının değişimi kapsamında incelenmiştir.

2. ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Elektromanyetik problemlerde alanların konum ve zamanda ayrıklaştırılması ile zamanda iteratif çözüm yapılabilen yöntemlerden birisi de Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemidir. ZUSF yöntemi tek bir çalıştırma ile geniş bantta frekans uzayı cevabının elde edilmesi, doğruluğu bakımından kontrol edilebilir çözümler sunması vb. nedenlerden dolayı elektromanyetik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

2.1 Kayıplı Ortamda Maxwell Denklemleri Tabanlı ZUSF Çözümü

ZUSF yönteminde Maxwell denklemlerinin kayıplı ortamda uygulanması için tüm alan ve kaynak akım bileşenleri zamanda ve konumda ayrıklaştırılarak Yee hüccesine yerleştirilir. Böylece analitik türevler yerine Taylor seri açılımından merkezi fark eş değerleri kullanılarak oluşturulan sayısal türevler ile, zamanda en ileride olan alan bileşen için ZUSF güncelleme denklemleri elde edilir. Örneğin, elektrik alanın x bileşeni E_x için ZUSF güncelleme denklemi

$$E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \left(\frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} - \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} + \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta t} \right) E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} + \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta t} \right) \left[\frac{H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - J_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

olarak verilir [6]. Burada n zaman iterasyon indisi, i, j ve k sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki hücre indislerini, Δy [m] ve Δz [m] sırasıyla y ve z doğrultularındaki birim hücre uzunluğunu, σ [S/m] elektriksel iletkenliği, ε [F/m] dielektrik sabitini, Δt [sn] birim zaman adımını gösterir. Diğer elektrik ve manyetik alan bileşenleri için de benzer şekilde güncelleme denklemleri elde edilebilir.

Üç boyutlu ZUSF çözümünün sayısal kararlılığı için $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ olması halinde, birim zaman adımı Δt 'nin

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{3}c} \quad (2)$$

olarak verilen Courant-Friedrich-Levy (CFL) kararlılık koşulunu sağlaması gereklidir [6]. Burada c [m/sn] elektromanyetik dalga yayılım hızıdır.

2.2 Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi

Düşük frekanslı elektromanyetik problemlerin klasik ZUSF yöntemi ile çözülmesi durumunda problem uzayının modellenmesi için oluşturulan hücrelerin boyutlarının dalga boyuna kıyasla çok küçük ($\lambda/10^5$ mertebelerinde) olması nedeniyle, ZUSF kararlılık koşulu ile belirlenen zaman adımı kullanılarak, sistemin en azından bir periyot işaret üretebilmesi için iteratif algoritmanın yüz binlerce kez çalıştırılması gerekmektedir. Bu durum hem günümüz bilgisayarları ile makul olmayan düzeyde hesap süresini uzatmakta, hem de yüksek sayıdaki iteratif hesaplamaların getirdiği hataları da çözüme eklemektedir. Dolayısıyla klasik ZUSF yöntemi ile düşük frekanslı problemlerin incelenmesi pratik değildir. Bu zorluğun üstesinden gelinmesi için birim zaman adımının büyütülmesi amacı ile geliştirilen Kuvazi-Statik ZUSF (KS-ZUSF) yöntemi, problemin Kuvazi-Statik şartının sağlanması durumunda dalga hızının yavaşlatılması prensibine dayanmaktadır. Kuvazi-Statik şartı Maxwell denklemleri kapsamında, frekansın yeterince düşük olması durumunda, deplasman akımının iletkenlik akımından yeterince küçük olarak ihmal edilebilir olması prensibine dayanarak $\omega\varepsilon \ll \sigma$ olarak verilir [7]. Burada ω [Rad/sn] açısal frekansı gösterir. Bu şartlar altında elektromanyetik olayın Kuvazi-Statik davranışı gereği, dalga yayılım hızının düşürülmesi mümkündür. Böylece klasik ZUSF yönteminde sıkıntı oluşturan birim zaman adımı büyütülerek, ZUSF çözümü kabul edilebilir iterasyon sayısı ile elde edilebilir. Elektromanyetik dalganın hızı temelde dielektrik sabiti ε ve manyetik geçirgenlik μ [H/m] üzerinden düşürülebilir. Bu çalışmada problemin kritik karakteristiklerinden birisi olan cidar kalınlığını değiştirmemek için ε üzerinden ölçekleme

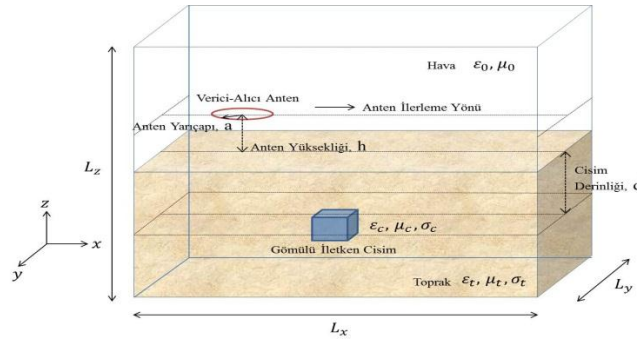
katsayısı uygulanmıştır. Buna göre boş uzayın dielektrik sabiti ϵ_0 Kuvazi-Statik ölçekleme katsayısı α ile çarpılırsa, dalga yayılım hızı

$$\epsilon_0^{KS} = \alpha \epsilon_0 \quad \Rightarrow \quad c^{KS} = \sqrt{\frac{1}{\alpha \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} c \quad (3)$$

olmak üzere $\sqrt{\alpha}$ oranında küçülür. Burada $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ [F/m] ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] olmak üzere, ϵ_0^{KS} [F/m] ölçeklenmiş dielektrik katsayısını ve c^{KS} [m/sn] ölçeklenmiş elektromanyetik dalga yayılım hızını gösterir. Ancak Kuvazi-Statik yaklaşımının ZUSF yönteminde uygulanması için, tüm problem uzayında geçerli olmasının gerekliliği unutulmamalıdır, yani tüm uzay belirli bir iletkenliğe sahip olmalıdır.

2.3 Problem Uzayının Oluşturulması

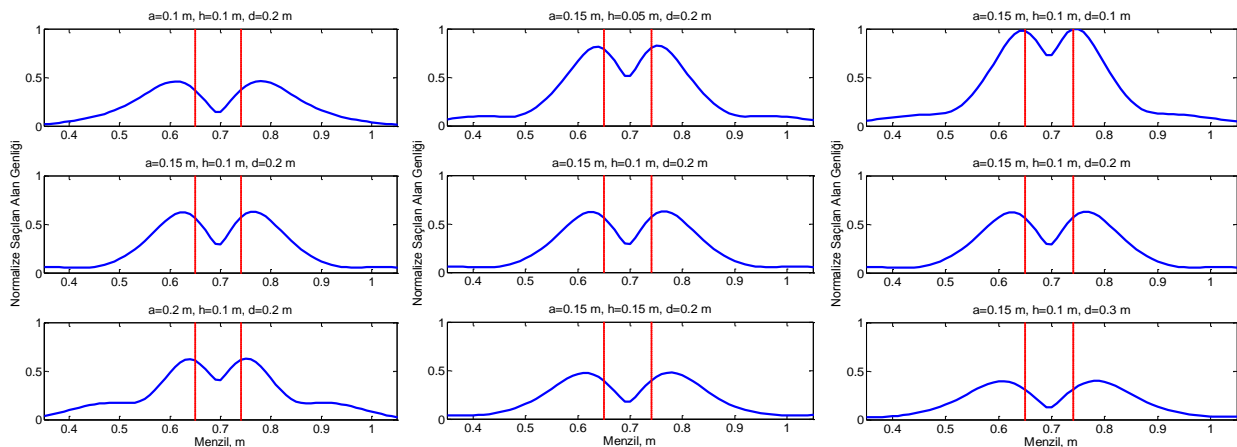
Şekil 1'de gösterilen Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı monostatik verici/alıcı dairesel anten, hava, dielektrik toprak ve gömülü iletken cisimden oluşmaktadır. Problem uzayının gerçek boyutları $L_x = 1.4$ m, $L_y = 0.75$ m ve $L_z = 0.75$ m'dir. 10 cm kenar uzunluklu gömülü küp şekilli iletken bir cismin modellenmesi için $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01$ m olarak seçildiğinden, problem uzayı x, y ve z yönündeki toplam hücre sayıları $(N_x, N_y, N_z) = (140, 75, 75)$ olacaktır. Açık uzay şartlarının sağlanması için problem uzayının çevresine ikinci mertebeden Mur türü Soğurucu Sınır Koşulu SSK, (Absorbing Boundary Condition, ABC) uygulanmıştır [6].



Şekil 1. Üç boyutlu Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı.

3. GÖMÜLÜ CİSİM İÇİN SAÇILAN ALAN ANALİZLERİ

Yapılan tüm analizler için konuma göre saçılan toplam manyetik alan genlik dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada a anten yarı çapını, h antenin yerden yüksekliğini ve d cismin derinliğini göstermektedir.



a) Anten çapının etkisi.

b) Anten yüksekliğinin etkisi.

c) Cisim derinliğinin etkisi.

Şekil 2. Gömülü iletken cisim için saçılan toplam manyetik alan sonuçları.

Problem uzayında hava boş uzay olarak modellenmiş olmakla beraber, kuvazi-statik yaklaşımdan dolayı iletkenliği son derece düşük ve $\sigma_h = 5.56 \times 10^{-6}$ [S/m] olarak alınmıştır. Toprağın bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_t = 1.5$, bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_t = 1$ ve iletkenliği kuvazi-statik yaklaşımdan dolayı $\sigma_t = 8.33 \times 10^{-6}$ [S/m] olarak alınmıştır. Gömülü iletken cismin bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_c = 2.5$, bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_c = 1$ ve iletkenliği $\sigma_c = 1 \times 10^6$ [S/m] olarak alınmıştır.

Elde edilen grafik sonuçlarına göre incelenen parametrelerin konumsal saçılan alan dağılımı üzerindeki etkisi aşağıda açıklanmıştır.

• **Anten Çapının Etkisi:** Farklı anten çapları antenin ışıma örüntüsünü değiştirdiğinden metal dedektörünün cisim tespit başarımı etkilemektedir. Üç farklı anten çapı için topraktan sabit yükseklikte ve gömülü iletken küp cismin sabit derinliğinde konumsal saçılan alan dağılımının değişimi için kıyaslamalar Şekil 2.a’da gösterilmiştir. Buna göre anten çapı büyütüldüğünde saçılan alanın genliği artmakta ve cismin bulunduğu menzile yaklaşıldığında saçılan alan dağılımı daha da belirgenleşmektedir. Yani, anten çapının incelen aralıktaki artışı gömülü iletken küp cismin tespitini olumlu yönde etkilemektedir.

• **Anten Yüksekliğinin Etkisi:** Değişen anten yüksekliği metal dedektörünün cisim tespitinde etkin çalışmamasına sebebiyet verebilmektedir. Anten ile toprak arasındaki mesafe cisim tespiti açısından önemlidir. Bu nedenle, anten çapı ve gömülü iletken küp cismin derinliği sabit tutularak üç farklı anten yüksekliğinde konuma göre saçılan alan dağılımına etkisi Şekil 2.b’de gösterilmiştir. Buna göre, anten yüksekliği arttığında saçılan alanın genliği azalmakta ve saçılan alan dağılımı tüm konuma yayıldığından cismin bulunduğu menzilde saçılan alan belirginliğini kaybetmektedir. Yani, anten yüksekliğinin incelenen aralıktaki artışı gömülü iletken küp cisminin tespitini olumsuz yönde etkilemektedir.

• **Cisim Derinliğinin Etkisi:** Anten çapı ve antenin topraktan yüksekliği sabit tutularak, gömülü iletken küp cismin farklı derinliklerinde konuma göre saçılan alan dağılımının değişimi Şekil 2.c’de gösterilmiştir. Buna göre, cisim derinliği arttığında saçılan alanın genliği azalmakta ve saçılan alan dağılımı tüm konuma yayıldığından cismin bulunduğu menzilde saçılan alan belirginliğini kaybetmektedir. Yani, cisim derinliğinin incelenen aralıktaki artışı gömülü iletken küp cismin tespitini olumsuz yönde etkilemektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, düşük ve tek frekanslı bir metal dedektörünün üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak anten çapı, anten yüksekliği ve cisim derinliğinin gömülü iletken bir cismin tespitine etkisi incelenmiştir. Buna göre saçılan alanın genliğinin konumsal dağılımı kapsamında toprakta gömülü iletken bir cismin yataydaki menzil tespitinin belirli koşullar altında yüksek başarı ile yapılabileceği gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda toprağın manyetik dispersif etkisi kapsamında metal dedektörlerinin tespit ve teşhis performansı araştırılacaktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Das Y., McFee J. E. ve Chesney R. H., “Time domain response of a sphere in the field of a coil: Theory and experiment”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 22(4), s.360-367, 1984.
- [2] Chesney R. H., Das Y., McFee J. E. ve Ito M. R., “Identification of metallic spheroids by classification of their electromagnetic induction responses”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6(6), s.809-820, 1984.
- [3] Barrowes B. E., O’Neill K., Grzegorzczak T. M., Chen X. ve Kong J. A., “Broadband analytical magnetoquasistatic electromagnetic induction solution for a conducting and permeable spheroid”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(11), s.2479-2489, 2004.
- [4] Özakin M. B., Aksoy S., “Kuvazi-statik zaman uzayı sonlu farklar yöntemi ile dalga denklemi tabanlı iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda düşük frekanslı metal dedektörü benzetimi”, 4. Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon (USMOS) Konferansı, 14 - 15 Haziran 2011, Ankara, Türkiye, s.332-341.
- [5] Özakin M. B., Aksoy S., “Düşük ve tek frekanslı metal dedektörlerinin kuvazi-statik zaman uzayı sonlu farklar yöntemi ile iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemleri tabanlı benzetimi”, 6. Savunma Teknolojileri (SAVTEK) Kongresi, 20 - 22 Haziran 2012, Ankara, Türkiye, s.489-496.
- [6] Aksoy S., Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF) Yöntemi Ders Notları, Revizyon 1.3.6, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2012.
- [7] Aksoy S., Balıkcı A., Zabar Z., Birenbaum L., “Numerical investigation of the effect of a longitudinally layered armature on coilgun performance”, IEEE Transactions on Plasma Science, 39(1), 5-8, 2011.