

# Yüzeş Dalgası ile Aydınlatılmış Deniz Yüzeşindeki Cisimlerin Radar Kesit Alanlarının ZUSF Yöntemiyle Hesaplanması

Erkul Başaran, A. Arif Ergin  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Elektronik Mühendisliğı Bölümü, Gebze, Kocaeli  
erkul@gyte.edu.tr, aergin@gyte.edu.tr

**Özet:** Radar Kesit Alanının (RKA) standart tanımında cismin Yüzeş Dalgası (YD) ile değil de bir düzlemsel dalga ile uyarıldığı ve cisimden saçılan alanların serbest uzayda yayıldığı varsayılmıştır. Bu varsayım nedeniyle standart RKA tanımı, cisimlerin kılavuzlanmış elektromanyetik dalgalar ile etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılamamaktadır. Bu çalışmada sadece YD ile uyarılan cisimlerin oluşturdukları saçılan alanları bulmak için bir yöntem önerilmekte ve çözüm Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF) tekniğıyle nümerik olarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen yöntem üç boyutlu YD problemlerinin RKA çözümü için kullanılabilir yeni bir tam dalga çözücü ZUSF kodu olarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kod kullanılarak örnek bir saçıcı için çıktılar verilmiştir.

## 1. Giriş

Yetmişli yıllarda özellikle deniz durumu ve yüzeş akıntısı gibi çevresel ölçümlerde kullanılan Yüksek Frekans Yüzeş Dalgası (YFYD) radarları, son zamanlarda gemi, uçak ve füzelere karşı savunma amacıyla geliştirilmektedir. Deniz üstünde kullanıldığında YFYD radarlarının en önemli iki avantajı, düşey polarizasyon ile ufuk ilerisini görebilmesi ve bu sinyallerin okyanus dalgasıyla etkileşiminin basit ve anlaşılır olmasıdır. Ayrıca bu dalgaların tam dalga analizi de yapılabilmektedir. Yüzeş Dalgası (YD) çözümü ile ilgili herhangi bir paket programın olmaması ve büyük geometriler içeren problemlerin bilgisayar kaynağı yetersizliğı nedeniyle çözülememesi, en büyük iki dezavantajdır.

Yüzeş dalgası problemleri, paralel polarizasyonlu düzgün bir düzlemsel elektromanyetik (EM) dalganın, hava ve deniz suyu arasındaki bir düzlemden yansması ve kırılması olayının özel bir halidir. Bu durumda geliş açısı, Fresnel yansma katsayısının sıfır olduğu Brewster açısıdır. Kompleks değerli geliş açısı veya geliş dalga vektörü için 2. ortamın kayıplı olması durumunda 1. ortam kayıpsız olsa bile yansma sıfır yapılabilmektedir. Bu sayede ortaya çıkan dalganın elektrik ve manyetik alanları, iki ortam arasındaki yüzeş yapışarak kılavuzlanmış bir şekilde yayılacak ve Zenneck Yüzeş Dalgası (ZYD) [1] olarak adlandırılacaktır. Bu YD, deniz yüzeyinden uzağı gittikçe üstel olarak azaldığı için bir çeşit Sönen Dalga'dır.

Radar kesit alanı (RKA) ise bir cismin elektromanyetik (EM) yansıtıcılığını ifade etmektedir. Fakat RKA'nın standart tanımında cismin YD ile değil de bir düzlemsel dalga ile uyarıldığı ve cisimden saçılan alanların serbest uzayda yayıldığı varsayılmıştır. Bu varsayım nedeniyle standart RKA tanımı, cisimlerin kılavuzlanmış EM dalgalar ile etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılamamaktadır. Bu tanım yetersizliğı nedeniyle, klasik RKA değerlerine bağı kalınarak sadece sınırdan gelen yansmanın eklendiğı ve YD'nin ihmal edildiğı değişik YD RKA'ları tanımlanmıştır [2,3]. Bu yeni tanımlar, saçılan alanın gözlem noktasının ve cismin yüzeyden uzak olmaları ve birbirlerini doğrudan görmeleri durumunda geçerlidir. Oysa yüzeş dalgalarının en belirleyici özelliğı doğrudan görüş hattının mevcut olmadığı koşullarda da EM dalgaları ile iletişim ve algılamayı gerçekleştirebilmeleridir. Bu da bir cismin YD RKA'sının incelenmesini zorunlu kılmakta ve son yıllardaki birçok uygulamada YD ve bu dalgaların yüzeş yakınındaki cisimlerle etkileşiminin incelenmesi önem kazanmaktadır [4,5].

Bu çalışmada sadece YD ile uyarılan cisimlerin oluşturdukları saçılan alanları bulmak için bir yöntem önerilmekte ve çözüm Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF, FDTD) tekniğıyle nümerik olarak gerçekleştirilmektedir. Saçıcı ve gözlem noktası birbirini doğrudan görmüyorsa veya saçıcı sınırın çok yakınında ise uzay dalgalarının etkisi ihmal edilebilecek seviyede düşük olacak ve burada hesaplanan alan değerleri geçerlilik kazanacaktır. İlk olarak ZUSF yöntemi kullanılarak saçıcının bir YD ile olan etkileşimi modellenmiştir. YD için bulunan alan ifadeleri, Fourier dönüşümü yardımıyla zaman uzayında elde edilmiş ve bu ifadeler, problemin

ZUSF modelinde alan kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu modelde cismin etrafını saran kapalı bir hayali yüzey üzerindeki elektrik ve manyetik alanlar kaydedilmektedir. Huygens'in eşdeğerlik prensibi kullanılarak bu alan değerlerinden saçılan alan hesaplanmaktadır. Dolayısıyla YD problemlerinin RKA çözümü için yeni bir ZUSF kodu geliştirilmiştir. Geliştirilen kod kullanılarak örnek bir saçıcı için çıktılar verilmiştir.

## 2. Saçıcı ile Yüzey Dalgası Etkileşimi

Saçıcı cismin yüzey dalgası RKA'sının hesaplanması için ZUSF hesap uzayının YD kaynağıyla uyarılması gerekmektedir. Bunu gerçeklemek için ZUSF yönteminde düzlemsel dalga uyarımında kullanılan Toplam Alan / Saçılan Alan (TA/SA) yöntemi uygulanmıştır. Burada kaynak olarak kullanılan YD, bir çeşit homojen olmayan düzlemsel dalgadır. Frekans uzayındaki YD alan bileşenleri

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}) &= E_0 \left( \hat{\mathbf{x}} + \frac{k_x}{k_z} \hat{\mathbf{z}} \right) e^{-\alpha_z z + \alpha_x x} e^{-j(-\beta_z z + \beta_x x)} \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= -\hat{\mathbf{y}} \frac{E_0}{\eta_{TM}} e^{-\alpha_z z + \alpha_x x} e^{-j(-\beta_z z + \beta_x x)}\end{aligned}\quad (1)$$

olarak bulunmuştur. Burada  $k$  dalga sayısı,  $\alpha$  zayıflama sabiti,  $\beta$  yayılma sabiti,  $\eta$  karakteristik empedanstır. Bu alanların TA/SA yöntemi için gerekli zaman uzayı karşılıkları ise

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= E_0 e^{-\alpha_z z + \alpha_x x} \left[ \cos(\omega t + \beta_z z - \beta_x x) \hat{\mathbf{x}} \right. \\ &\quad \left. + \{k_{z,r} \cos(\omega t + \beta_z z - \beta_x x) - k_{z,i} \sin(\omega t + \beta_z z - \beta_x x)\} \hat{\mathbf{z}} \right] \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= -e^{-\alpha_z z + \alpha_x x} (H_{0,r} \cos(\omega t + \beta_z z - \beta_x x) - H_{0,i} \sin(\omega t + \beta_z z - \beta_x x)) \hat{\mathbf{y}}\end{aligned}\quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $r$  ve  $i$  indisleri sırasıyla reel ve imajiner bileşenleri ifade etmektedir. Bu alan ifadeleri TA/SA yönteminde kullanılarak hesap uzayı doğrudan YD ile aydınlatılmıştır. Açık uzay şartının sağlanması için ZUSF uzayının etrafı bir çeşit soğurucu sınır koşulu olan Anizotropik Mükemmel Uyumlu Katman (AMUK, *Anisotropic Perfectly Matched Layer-APML*) [6] ile sarılmıştır. Bu şartlar altında hesap uzayı 3 bölgeden oluşmaktadır: en içte saçıcıyı da içinde bulunduran toplam alan bölgesi, arada saçılan alan bölgesi ve en dışta AMUK bölgesi.

## 3. Saçılan Alanların Hesaplanması

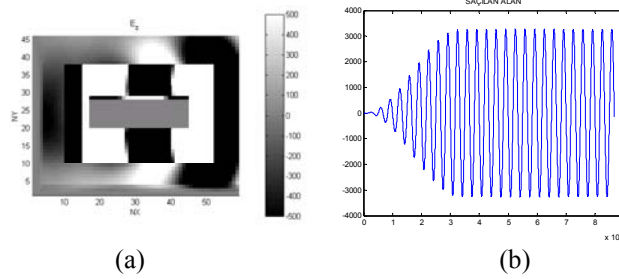
Saçılan alan bölgesinde tanımlanmış hayali bir kapalı S integral yüzeyi üzerinde saçıcıdan gelen elektrik ve manyetik alanların teğetsel bileşenleri örneklenmektedir. Saçıcı YD ile aydınlatıldığından bu alanlar sadece saçılan YD'na ait alanlardır. Daha sonra S yüzeyi üzerindeki  $\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}$  elektrik ve  $\mathbf{M} = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}$  manyetik akımlar hesaplanmaktadır. Burada  $\hat{\mathbf{n}}$ , S yüzey normalidir ve yüzeyin dışına doğrudur. Huygens eşdeğerlik prensibine göre kaynağı S yüzeyinin içinde olan ve S'nin yüzey normalinin baktığı dış bölgede gözlenen alanlar, S'nin üzerinde bulunan ve sadece dış bölge koşullarında ışılan eşdeğer kaynakların oluşturduğu alanlara eşittir. Bu prensip kullanılarak saçılan elektrik alan

$$\mathbf{E}^s = \int_S (\bar{\mathbf{G}}_{JE} \cdot \mathbf{J} + \bar{\mathbf{G}}_{ME} \cdot \mathbf{M}) dS \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $\bar{\mathbf{G}}_{JE}$  ve  $\bar{\mathbf{G}}_{ME}$ , sırasıyla  $\mathbf{J}$  ve  $\mathbf{M}$  akımlarının ürettikleri elektrik alanları bulmayı sağlayan dyadik Green fonksiyonlarını göstermektedir. Kaynağın ışınma fonksiyonlarını tanımlayan bu Green fonksiyonları,  $\xi = J, M$  olmak üzere  $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E} = \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^d + \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^y + \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd}$  şeklinde bileşenlere sahiptir ve YD'nı taşıyabilecek sınır var ise geçerlidir. Burada  $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^d$  doğrudan yayılan,  $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^y$  sınırdan yansıyan ve  $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd}$  yüzey dalgası olarak yayılan bileşenleri göstermektedir. Bu çalışmada hesap uzayı YD ile aydınlatıldığı için diğer bileşenler söz konusu olmadığından ve YD için RKA hesaplanmak istendiğinden denklem (3)'te sadece yüzey dalgası Green fonksiyonları  $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd}$  kullanılmıştır. Bu Green fonksiyonları, bir empedans düzlemi üzerinde değişik dipollerin oluşturduğu alan ifadeleri olarak bulunabilir ve temel halleri [7]'de verilmiştir.

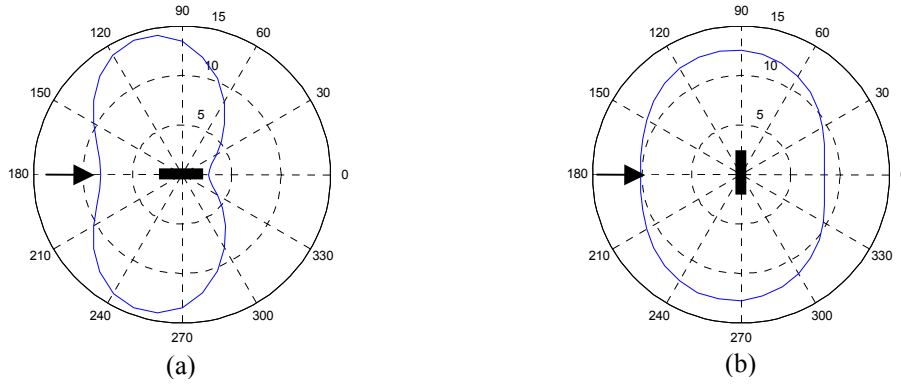
#### 4. Nümerik Sonuçlar ve Öneriler

Burada yüzey dalgası saçılımını incelemek için örnek bir saçıcıya ait sonuçlar verilecektir. Saçıcı  $40m \times 10m \times 3m$  kartezyen boyutlarda bir dikdörtgen prizma olarak seçilmiş ve ZUSF uzayının merkezine yerleştirilmiştir. Saçıcı 3 Mhz frekansındaki bir YD ile arkadan ve yandan aydınlatılmıştır. Arkadan aydınlatma için örnek bir alan dağılımı Şekil-1a'da verilmiştir.  $9.10^{-6}$  sn (2000 zaman adımı) sonra üç boyutlu ZUSF uzayındaki elektrik alanın z bileşeninin ( $E_z$ ) SA bölgesinde gözlenen zaman cevabı Şekil-1b'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ZUSF uzayındaki  $E_z$  için (a) xy –düzlemindeki alan dağılımı, (b) saçılan alan zaman cevabı.

Yakın alan bileşenlerinin verileri kullanılarak serbest uzayda xy-düzlemi üzerinde cisimden 5 km uzaktaki saçılan  $E_z$  hesaplanmış ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2a'da YD  $180^\circ$  yönünden saçıcıya arkadan gelmektedir. Şekil 2b'de ise aynı dalga saçıcıyı yandan aydınlatmaktadır.



Şekil 2. Dikdörtgen prizmadan saçılan saçılan  $E_z$  alanı; (a) arkadan aydınlatma, (b) yandan aydınlatma.

Bu çalışmada sadece YD ile uyarılan cisimlerin oluşturdukları saçılan alanları bulmak için bir yöntem önerilmiş ve çözüm ZUSF koduyla nümerik olarak gerçekleştirilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1]. J. Zenneck, "Über die Fortpflanzung ebener electromagnetische Wellen langs einer ebenen Leiterfläche und ihre Beziehung zur drachtlosen Telegraphie," Annalen der Physik, 23, s. 848-866, 1907.
- [2]. Ponsford A.M., Srivasta S.K., "A comparison between measured and modelled radar cross section from a groundwave radar," Proc. of IEE 5th Conf. on Sys. and Tech., IEE 339, s. 61-65, 1991.
- [3]. Sevgi L., "Target reflectivity and RCS interactions in integrated maritime surveillance systems based on surface-wave high-frequency radars," IEEE Antennas and Propagation Magazine, 43(1), s. 36-51, 2001.
- [4]. Sevgi L., Ponsford A., Chan H.C., "An integrated maritime surveillance systems based on surface-wave high-frequency radars, part I: theoretical background and numerical simulations," IEEE Antennas and Propag. Mag., 43(4), s. 28-43, 2001.
- [5]. Milsom J.D., "HF groundwave radar equations," HF Radio Systems and Techniques, IEE Conference Publication No:411, s. 285-290, 1997.
- [6]. Gedney S.D., "An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 44(12), s. 1630-1639, 1996.
- [7]. King R.J., "Electromagnetic wave propagation over a constant impedance plane," Radio Science, vol. 4(3), s. 255-268, 1969.