

Cisimlerden Yüzey Dalgası Yansıması İçin Radar Kesit Alanı Hesapları *

A. Arif Ergin^{1,2}, Sevgi Akgün¹
TÜBİTAK-MAM

¹ Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü
Gebze, Kocaeli
aergin@btae.mam.gov.tr, sevgi@btae.mam.gov.tr

² Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gebze, Kocaeli
aergin@gyte.edu.tr

Özet: Klasik radar kesit alanı (RKA) hesaplarında saçıcı üzerine gelen alanın düzlemsel bir dalga olduğu ve saçılan alanın da boş uzayda yayıldığı varsayılır. Son yıllarda yüzey dalgalarının cisimlerden saçılımının analizinde kullanılmak üzere radar denklemleri geliştirilmiştir. Bu denklemlerde saçıcının klasik RKA değerleri ufak değişikliklerle kullanılmıştır. Bu çalışmada sadece yüzey dalgasıyla uyarılan cisimlerin oluşturdukları yüzey dalgalarının klasik RKA ile ilintili serbest uzay alanlarından farklarını ortaya koymak için bir yöntem önerilmekte ve değişik saçıcılar için sonuçlar verilmektedir.

1. Giriş

Bir cismin elektromanyetik (EM) yansıtıcılığı radar kesit alanı (RKA) ile ifade edilebilir. RKA'nın standart tanımında cismin bir düzlemsel dalga ile uyarıldığı ve cisimden saçılan alanların da serbest uzayda yayıldığı varsayılmıştır. Bu varsayımlardan dolayı standart RKA tanımı, cisimlerin kılavuzlanmış EM dalgalar ile etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılamaz. Son yıllardaki bir çok uygulamada EM özellikleri farklı iki ortam arasındaki sınır boyunca ilerleyen yüzey dalgaları ve bu dalgaların sınır yakınındaki cisimlerle etkileşiminin incelenmesi önem kazanmıştır [1,2]. Serbest uzayda var olması mümkün olmayan yüzey dalgaları ile cisimlerin etkileşimlerini karakterize edebilmek için değişik yüzey dalgası RKA'ları tanımlanmıştır [3,4]. Fakat bu tanımlarda standart serbest uzay RKA değerlerine sadece sınırdan gelen yansıma eklenmiş ve yüzey dalgası ihmal edilmiştir. Bu varsayım cisim ve saçılan alanın gözlendiği noktanın sınırdan uzak olmaları ve birbirlerini doğrudan görmeleri durumunda geçerlidir. Oysa, yüzey dalgalarının en belirleyici özelliği doğrudan görüş hattının mevcut olmadığı koşullarda da EM dalgaları ile iletişim ve algılamayı gerçekleştirebilmeleridir. Bu da bir cismin serbest uzay RKA'sı ile yüzey dalgalarına cevabı arasındaki yakınlığın incelenmesini zorunlu kılmıştır.

Bir cismin yüzey dalgasına olan cevabını incelerken iki konunun üzerinde hassasiyetle durmak lazımdır. Bunlardan birincisi RKA'nın boş uzayda güç yayılımını temel alan bir tanıma sahip olduğudur. Bu tanıma göre bir cisim, üzerine gelen düzlemsel bir EM dalgadan RKA'sıyla orantılı bir gücü soğurur ve bu gücü izotropik bir şekilde boş uzaya yayar. Dolayısıyla bu yayılan güç cisimden uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak zayıflar. Eğer cisimden uzaklığı R olarak gösterirsek boş uzayda saçılan alanın zayıflaması R^{-2} ile orantılı olacaktır. Cisimlerin yansıtıcılığını uzaklıktan bağımsız hale getirmek için standart RKA'nın tanımında saçılan alanın gücü R^2 ile çarpılmıştır. Oysaki düzlemsel homojen bir sınır boyunca yayılan yüzey dalgalarının zayıflaması R ile basit bir orantı şeklinde ifade edilememektedir. Bu da cismin yüzey dalgasına olan cevabını doğrudan RKA ile ifade edilmesini güçleştirmektedir. Bu sebepten doğabilecek kavram kargaşasına yol açmamak için bu çalışma kapsamında m^2 cinsinden ifade edilen RKA'lar yerine cisimden belirli bir uzaklıkta V/m cinsinden ifade edilen saçılan elektrik alan şiddetleri karşılaştırılacaktır.

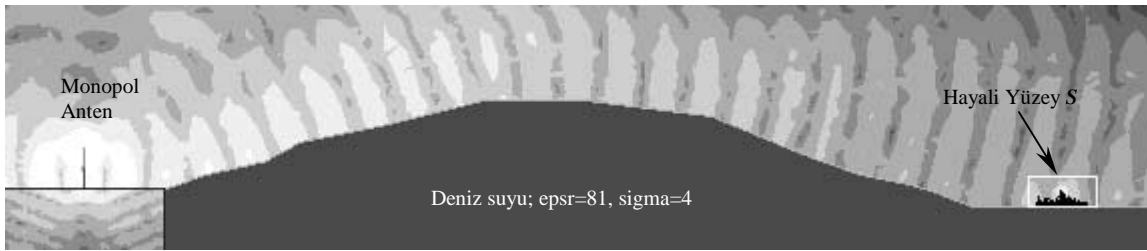
Özellikle dikkat edilmesi gereken ikinci konu ise bu çalışma kapsamında cisimlerin sadece yüzey dalgasıyla uyarıldıkları varsayılacak ve bu uyarı neticesinde saçılan alanların sadece yüzey dalgası bileşeni ile ilgilenecektir. En genel durumda bu şekilde hesaplanan saçılan alan bütün saçılan alanın sadece bir parçasını teşkil edecektir. Çünkü, en genel durumda cisim yüzey dalgasına ek olarak doğrudan gelen ve yüzeyden yansıyan "uzay" dalgalarıyla (*space waves*) da uyarılacak ve saçılan alanda da bu iki bileşen bulunacaktır. Ancak saçıcı ve gözlem noktası birbirini doğrudan görmüyorsa veya saçıcı sınırın çok yakınında ise uzay dalgalarının etkisi ihmal edilebilecek seviyede düşük olacaktır ve burada hesaplanan alan değerleri geçerli olacaktır.

* Bu çalışma Dz.K.K.'lığı Araştırma Merkezi Komutanlığı (AMERKOM) tarafından desteklenmiştir.

Bu çalışmada, bahsedilen kısıtlar altında cisimlerden saçılan yüzey dalgası şiddeti iki aşamalı bir yöntemle hesaplanmaktadır. Birinci aşamada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak saçıcının bir yüzey dalgasıyla olan etkileşimi modellenir. İkinci bölümde detayları verilecek olan bu aşamanın sonucunda cismin etrafını saran bir hayali kutu yüzeyindeki toplam elektrik ve manyetik alanlar bir dosyaya kaydedilir. Bölüm 3'ün konusu olan ikinci aşamada ise *Huygens*'in eşdeğerlik prensibi (veya daha genel manada yokolma (*extinction*) kuramı) kullanılarak birinci aşamada kaydedilen alan değerlerinden saçılan alan hesaplanır.

2. Alan-Nesne Etkileşiminin Hesaplanması

Saçılan alanı hesaplamak için öncelikle gerekli geometrik detayları bünyesinde bulunduran bir tam dalga çözücü ile cismin etrafındaki toplam alanların hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi üzerine kurulmuş olan *Ansoft* firmasının HFSS yazılım paketi kullanılmıştır. Çevresi soğurucu sınır koşullarıyla sonlandırılmış olan hesaplama uzayına doğrudan yüzey dalgası uyarıtısı verilemediği için bu tür dalgaları uyaran bir monopollü anten de hesaplama uzayına konulmuştur. Şekil 1.'de görüldüğü üzere yüzeydeki saçıcıya sadece yüzey dalgalarının ulaşmasını sağlamak için sınır, anten ile saçıcı arasında bir tümsek oluşturulacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1.'de gri tonları olarak hesap uzayındaki elektrik alan şiddetinin yz -düzlemindeki anlık dağılımı gösterilmektedir. Antenin doğrudan görüş alanının dışındaki bölgeye, sınır tarafından kılavuzlanmış dalgaların eriştiği ve saçıcıyla etkileşimde bulunduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 1. Ansoft HFSS yazılımında yüzey dalgası ile nesnenin etkileşiminin hesap edildiği genel yapı.

HFSS çözümü neticesinde bulunan alanlar yüzey dalgasıyla cismin etkileşmesini tamamen karakterize etmektedir. Bu etkileşim sonucunda oluşan saçılan alanların bulunması için saçıcı cisimle saran hayali bir dikdörtgen prizma üzerindeki elektrik ve manyetik alanlar bir dosyaya kaydedilirler.

3. Saçılan Alanların Hesaplanması

Eşdeğerlik prensibini buradaki duruma uygun şekilde yorumlamak ve saçılan yüzey dalgalarını hesaplamak için, yüzey dikmesi (normali) \hat{n} ile gösterilen kapalı bir S yüzeyinin üzerindeki toplam elektrik \mathbf{E} ve manyetik \mathbf{H} alanların bilindiğini varsayalım ve yüzey dikmesinin baktığı tarafa “dış bölge” diğer tarafa da “iç bölge” diyelim. Yüzey eşdeğerlik prensibine (veya *Huygens* prensibine veya yokolma kuramına) göre, kaynağı iç bölgede olan ve dış bölgede gözlenen alanlar, S 'nin üzerinde bulunan ve sadece dış bölge koşullarında ışılan eşdeğer kaynakların yarattığı alanlara eşittir. Diğer bir anlatımla dış bölgedeki saçılan elektrik alan

$$\mathbf{E}^s = \int_S (\bar{\mathbf{G}}_{JE} \cdot \mathbf{J}_{eq} + \bar{\mathbf{G}}_{ME} \cdot \mathbf{M}_{eq}) dS \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $\mathbf{J}_{eq} = \hat{n} \times \mathbf{H}$ eşdeğer elektrik akımını, $\mathbf{M}_{eq} = -\hat{n} \times \mathbf{E}$ eşdeğer manyetik akımı, $\bar{\mathbf{G}}_{JE}$ ve $\bar{\mathbf{G}}_{ME}$ sırasıyla elektrik ve manyetik akımların ürettikleri elektrik alanlarını bulmayı sağlayan dyadik Green fonksiyonlarını göstermektedir. Bu Green fonksiyonları, kaynağın yüzey dalgasını taşıyabilecek sınırın varlığında ışıldığı durum için geçerli olan ışınma fonksiyonlarıdır ve doğrudan yayılan (d), sınırdan yansıyan (y) ve yüzey dalgası olarak yayılan (yd) bileşenlerinden oluşmaktadır. Yani:

$$\bar{\mathbf{G}}_{\xi E} = \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^d + \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^y + \bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd} \quad ; \quad \xi = J, M. \quad (2)$$

Bu çalışmada saçılan alanın sadece yüzey dalgası halinde yayılan kısmıyla ilgilenildiği için denklem (1)'de sadece yüzey dalgası Green fonksiyonları $\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd}$ kullanılmıştır. Bu Green fonksiyonlarının temel halleri [5] ve [6]'da verildiği gibi bir empedans düzlemi üzerinde değişik dipollerin yarattığı alan ifadeleri olarak bulunabilir. Bu ışınım fonksiyonlarının uzak alandaki genel yapısı şu şekildedir:

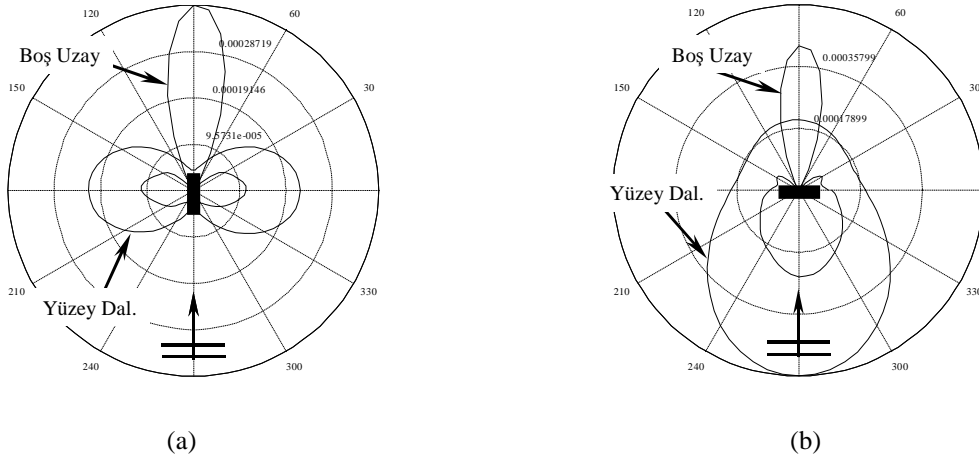
$$\bar{\mathbf{G}}_{\xi E}^{yd} = jk \bar{\mathbf{C}} (1 - \Gamma) F(w) \frac{e^{-jkR_r}}{4\pi R_r}. \quad (3)$$

Burada $j = \sqrt{-1}$, k boş uzay dalga sayısı, \bar{C} yönsel bağımlılığı ve bazı sabitleri bünyesinde toplayan bir sabit dyad, Γ sınırdaki Fresnel yansıma katsayısı, $F(w) = 1 - j\sqrt{\pi w} \exp(-w) \operatorname{erfc}(j\sqrt{w})$ yüzey dalgası zayıflama fonksiyonu, w Sommerfeld tarafından tanımlanmış olan 'sayısal mesafe' ve R_r kaynağın imajından gözlem noktasına kadar olan mesafedir.

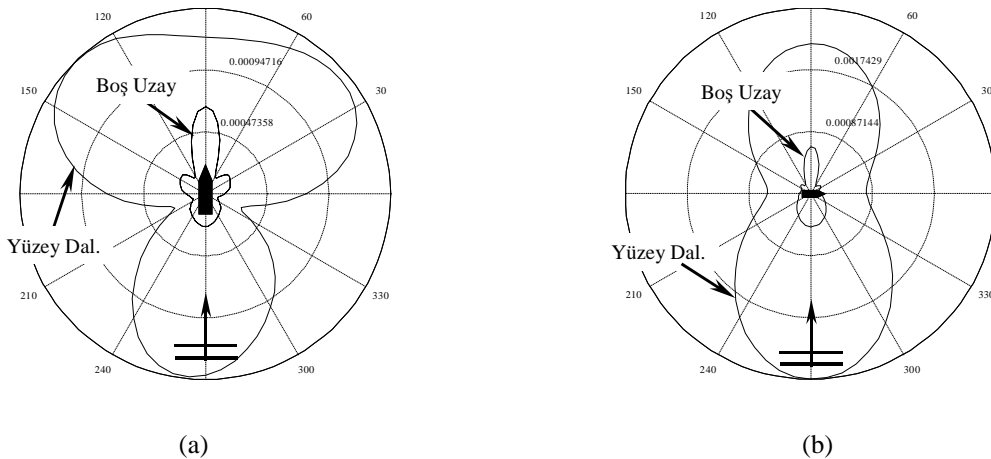
Denklem (3)'teki $F(w)$ faktörü, bir cismin yüzey dalgası ile olan etkileşiminin serbest uzayda düzlemsel bir dalga ile etkileşiminden farklı olmasını gerektirir. Çünkü saçılım örüntüsü (*scattering pattern*), Green fonksiyonundaki fazın davranışına bağlı bir girişimin sonucudur. Yüzey dalgasındaki faz yapısı ise serbest uzaydaki doğrusal faz yapısından $F(w)$ fonksiyonunun fazı nispetinde farklıdır ve farklı bir girişim örüntüsüne sebep olacaktır.

4. Nümerik Sonuçlar

Yüzey dalgası saçılımının serbest uzay saçılımından farkını incelemek amacıyla, değişik cisimlerden iki türlü saçılma da incelenmiştir. Burada iki örnek cisim ile ilgili sonuçlar sunulacaktır. Bunlardan birincisi basit bir geometri olan $40 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ kartezyen boyutlardaki bir dikdörtgen prizma, ikincisi ise $65 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 11.5 \text{ m}$ azami kartezyen boyutlardaki bir tanker modelidir. Öncelikle, söz konusu olan cisim 3 MHz'de arkadan ve yandan bir düzlemsel dalga ile aydınlatılmış ve serbest uzayda xy -düzlemi üzerinde cisimden 5 km uzaktaki elektrik alanın z bileşeni hesaplanmıştır. Bu hesap hem HFSS yazılımıyla gerçekleştirilmiş hem de daha ilerde yüzey dalgası hesaplarında kullanılacak program tarafından gerçekleştirilerek iki yönlü doğrulama yapılmıştır. İkinci olarak, söz konusu cismin, Şekil 1'deki yapı içinde, yüzey dalgası ile etkileşiminden doğan yakın alanlar hesaplanıp bir dosyaya kaydedildikten sonra bir dış program tarafından okunarak denklem (1)'e göre xy -düzlemi üzerinde cisimden 5 km uzaktaki elektrik alanın z bileşeni hesaplanmıştır. Serbest uzay ve yüzey dalgası hesapları arasında bir normalizasyon sağlanması açısından bulunan alanlar cismin merkezindeki gelen alanın büyüklüğüne normalize edilmiştir. Yüzey dalgası durumu için bu normalizasyonun geçerliliği tartışılabilir. Ancak buradaki temel ilgi odağımızın genel saçılım örüntüsünün ne şekilde etkilendiğini göstermek olduğunu hatırlatmak istiyoruz. Yapılan hesaplamaların sonuçları kutu için Şekil 2'de, tanker modeli için de Şekil 3'te verilmiştir.

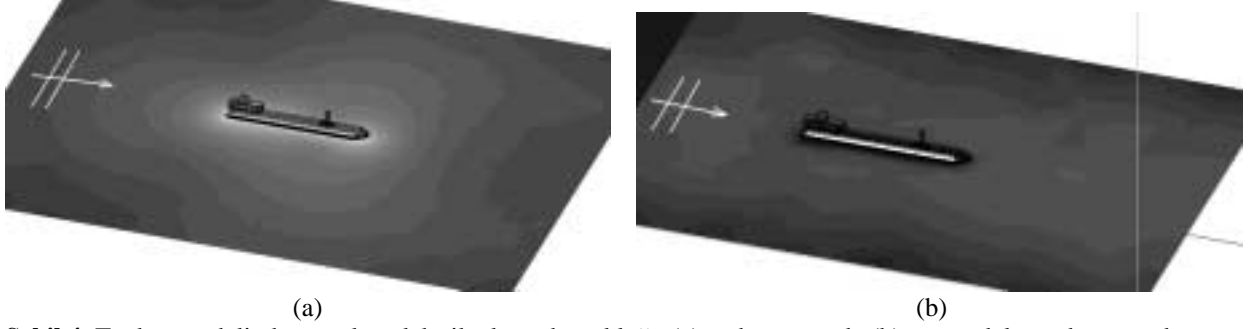


Şekil 2. Kutu geometrisinden saçılan elektrik alanın z bileşen büyüklüğü (a) arkadan (b) yandan aydınlatma.



Şekil 3. Tanker modelinden saçılan elektrik alanın z bileşen büyüklüğü (a) arkadan (b) yandan aydınlatma.

Saçılan alan örüntüleri arasında en göze çarpan fark, serbest uzayda ileri saçılım yönündeki büyük şiddetli saçılan alanın yüzey dalgali saçılımda gözlenmemesidir. Bu, yüzey dalgasıyla uyartıda cisimlerin gölgeleme etkisinin zayıf olduğu şekilde yorumlanabilir. Şekil 4'te tankerin arkadan aydınlatıldığı durumda etrafındaki elektrik alanın toplam büyüklüğü serbest uzay ve yüzey dalgali durumlar için gösterilmiştir. Gölgeleme etkisinin yüzey dalgası durumunda az olduğu Şekil 4'te açıkça görülmektedir. Diğer dikkati çeken nokta ise ileri saçılım yönünün dışındaki yönlere saçılım örüntüsünün büyük farklılıklar göstermemesidir. Son olarak, iki yöntemle elde edilen alan büyüklükleri arasında fark olduğu gözlenmektedir. Bu fark, yukarıda bahsedilen normalizasyon yönteminden kaynaklanabileceği gibi yüzey dalgaları ile serbest uzay dalgalarının sönme hızlarının farklı olmasından da kaynaklanabilir.



Şekil 4. Tanker modelinden saçılan elektrik alanının büyüklüğü (a) serbest uzayda (b) yüzey dalgası durumunda.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada cisimlerden belirli bir empedansa sahip bir sınırdan ilerleyen yüzey dalgalarının saçılmasını incelemek için bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde cismin yüzey dalgası ile etkileşimi bir tam dalga çözücüsü olan *Ansoft* firmasının HFSS paket yazılımından faydalanılarak gerçekleştirilmiş ve daha sonra *Huygens* prensibinden yararlanılarak uzak alanda saçılan yüzey dalgalarının alanları hesaplanmıştır. Bu şekilde hesaplanan saçılmış yüzey dalgalarının aynı cisimden serbest uzayda saçılan düzlemsel dalgalar ile farkları incelenmiştir. İki durum arasındaki en belirgin fark, ileri saçılım yönünde yüzey dalgali durumda saçılım seviyesinin düşük oluşudur. Oysa, serbest uzayda en büyük saçılma yönü bu yöndür. Bu temel özelliğin değişik dalga boyları ve değişik cisimler için de geçerli olup olmadığı araştırılmaktadır. Ayrıca, iki durumdaki sonuçların mesafeden bağımsız olarak büyüklük açısından da karşılaştırılabilir hale getirilmesi için de çalışmalar devam etmektedir.

Kaynaklar

- [1]. Sevgi L., Ponsford A. ve Chan H.C. "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars, part I: theoretical background and numerical simulations," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 43(4), s. 28-43, 2001.
- [2]. Milsom J.D., "HF groundwave radar equations," *HF Radio Systems and Techniques*, IEE Conference Publication No: 411, s. 285-290, 7-10 Temmuz 1997.
- [3]. Ponsford A.M. ve Srivasta S.K., "A comparison between measured and modelled radar cross section from a groundwave radar," *Proc. of IEE 5th Int. Conf. On HF Systems and Techniques*, IEE 339, s. 61-65, Edinburgh, 1991.
- [4]. 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.
- [5]. King R.J., "Electromagnetic wave propagation over a constant impedance plane," *Radio Science*, 4(3), s. 255-268, Mart 1969.
- [6] Maclean T.S.M. ve Wu Z., *Radiowave Propagation Over Ground*, Chapman & Hall, Londra, İngiltere, 1993.