

# Yüksek ve Geniş Arazi Şekillerinin Varlığı Halinde Yer Dalgası Yayılımı ve Sistem Kayıpları \*

Burak Polat  
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü,  
P.K. 21, 41470, Gebze, Kocaeli  
[polat@btae.mam.gov.tr](mailto:polat@btae.mam.gov.tr)

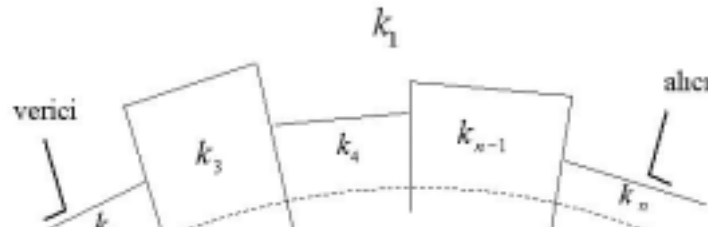
**Özet:** Bu çalışmada yüzey dalgalı HF radar sistemleri açısından büyük öneme sahip olan deniz-ada-deniz geçişlerine ilişkin yer dalgası zayıflaması Furutsu'nun integral denklem tekniğine dayanan analitik-asimptotik yöntemi kullanılarak formüle edilmiş, zayıflamanın çalışma frekansı, ada yüksekliği ve genişliğine bağlı değişimi ve iletişim sistemi kaybı sayısal olarak sunulmuştur.

## 1. Giriş

Serbest uzay yol kaybı ve antenlerin doğrultuculuk kazançları bir kenara bırakıldığında, yüzey dalgası modunda çalışan HF radar iletişim sistemlerinde sistem kaybı hesabında en önemli unsur yayılım ortamına ilişkin Sommerfeld yer dalgası zayıflama faktörünün hesabıdır. Geçen yüzyılın başından beri yazında, yeryüzünün (pürüzlülük, arazi engebeleri, atmosfer, doğa olayları vb.) fiziksel ve geometrik yapısının kanonik olarak modellendiği halde yer yüzeyi üzerinde konuşlanmış iki anten arasındaki iletişimi kavramaya yönelik gerek analitik, gerekse ampirik (grafik) ve sayısal çok sayıda matematiksel yöntem yer almıştır. Ampirik yöntemler yayılım ortamına ilişkin çok sayıda kısıtlama içerir ve doğayı sağlıklı bir şekilde modellemekten oldukça uzaktır. Sayısal teknikler kullanıldığında yayılım ortamı daha detaylı bir şekilde modellenmesine rağmen yaşanan en temel sıkıntı, özellikle radar iletişiminde olduğu gibi kilometreler mertebesinde yayılım menzilleri söz konusu olduğunda gerekli işlem süresidir. Yayılım doğrultusu üzerinde yüksek ve geniş engebeler olduğunda sayısal çözümlerin saçılma mekanizmasını ne kadar sağlıklı bir şekilde modellediği de ayrı bir tartışma konusudur. Mevcut analitik yöntemler arasında ise, özellikle dağ, tepe, vadi, yamaç, uçurum gibi yüksek ve geniş arazi şekilleri söz konusu olduğunda, özellikle HF bandı için en uygun olanının, Furutsu tarafından ilk 1957 yılında ortaya atılan ve takip eden çalışmalarla oldukça geliştirilen integral denklem formülasyonuna dayalı analitik-asimptotik yöntem olduğu kanaatindeyiz[1-8].

Bu yöntem, Şekil 1'de görüleceği gibi, yeryüzünün eğriliğini de hesaba katacak şekilde herhangi yüksekliğe, genişliğe ve elektriksel özelliklere sahip arazi parçaları boyunca elektrik alan şiddetinin çoklu rezidü serileri şeklinde ifade edilebilmesini olanaklı kılar. Ayrıca, yükseltilerin sıfır olduğu özel halde küresel homojen yeryüzü için Wait[9] tarafından verilen ve Fresnel-Kirchhoff ilkesine ve özdeğer açılımı prensibine dayalı karma yol kayıpları ifadeleri (Bremmer serileri) ile analitik olarak çakışır.

Bu çalışmada yüzey dalgalı HF radar sistemleri açısından büyük öneme sahip olan deniz-ada-deniz geçişlerine ilişkin yayılım ortamının geometrisini ve elektriksel özelliklerini dikkate alarak, yayılım ortamının genişliğine bağlı değişimi bu tekni

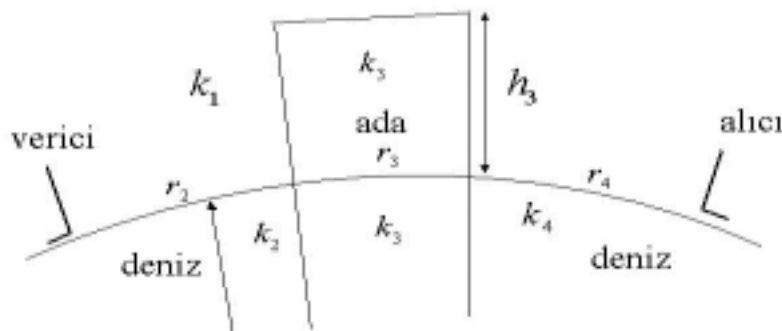


Şekil

nodeli

## 2. Formü

\* Bu çalışm



**Şekil 2.** İki boyutlu bir ada üzerinden radar iletişimi

Şekil 2’de verilen yayılım ortamı için Sommerfeld yer dalgası zayıflaması

$$F(r) = \begin{cases} \sum_{t_2} c_2^{1/2} A_{t_2}(c_2), 0 < r < r_2 \\ \sum_{t_3, t_2} (c_3 + c_2)^{1/2} A_{t_3}(c_3) T_{t_3, t_2}(c_2), r_2 < r < r_3 \\ \sum_{t_4, t_3, t_2} (c_4 + c_3 + c_2)^{1/2} A_{t_4}(c_4) T_{t_4, t_3}(c_3) T_{t_3, t_2}(c_2), r > r_2 + r_3 \end{cases}$$

ile verilir[8]. Burada  $T_{t_n, t_{n-1}}(c_{n-1})$  ve  $A_{t_n}(c_n)$  sırasıyla  $(n-1)$ .ve  $n$ . kısımların toplam yer dalgasına etkisine karşı düşer ve açık ifadeleri

$$T_{t_n, t_{n-1}}(c_{n-1}) = (y_n - y_{n-1} + t_n - t_{n-1})^{-1} \exp\{-i[c_{n-1}(t_{n-1} + y_{n-1})]\} \\ \times \begin{cases} q_n f'_{t_n}(y_{n-1, n}) - q_{n-1} f_{t_n}(y_{n-1, n}), y_{n-1} \geq y_n \\ q_n f_{t_{n-1}}(y_{n, n-1}) - q_{n-1} f'_{t_{n-1}}(y_{n, n-1}), y_{n-1} \leq y_n \end{cases}$$

$$A_{t_n}(c_n) = \sqrt{\pi} (t_n - q_n^2)^{-1} \exp\{-i[c_n(t_n + y_n) + \pi/4]\}$$

ile verilir.  $k_n$ , ortamların dalga sayısı ve  $a = (4/3) \times 6378 \text{ km}$  dünyanın etkin yarıçapı olup  $c_n$  ve  $y_n$  sayısal uzaklık ve yüksekliklere karşı düşmektedir:

$$c_n = \frac{r_n}{a} \left( \frac{k_1 a}{2} \right)^{1/3} \quad y_n = k_1 h_n \left( \frac{2}{k_1 a} \right)^{1/3} \quad y_{nm} = y_n - y_m \quad h_2 = h_4 = 0.$$

Yükseklik kazanç fonksiyonları

$$f_{t_n}(y_{n-1, n}) = W(t_n - y_{n-1, n}) / W(t_n) \quad f'_{t_n}(y_{n-1, n}) = W'(t_n - y_{n-1, n}) / W'(t_n)$$

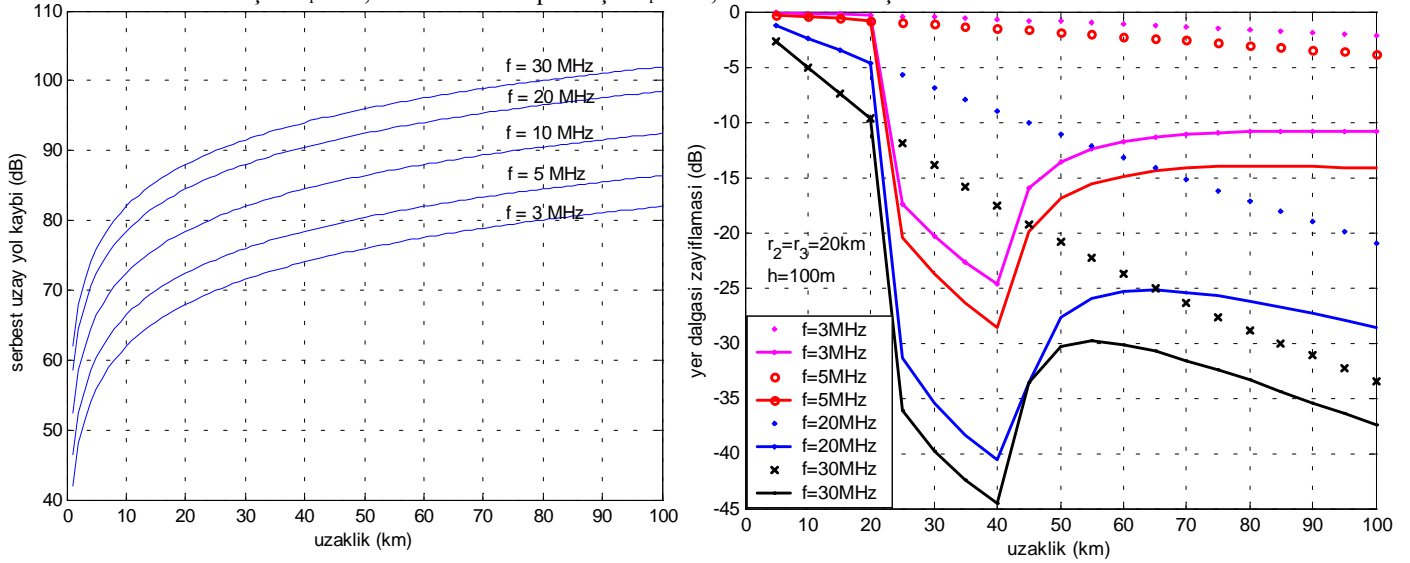
şeklinde olup  $W(t) = \sqrt{\pi} [Bi(t) - Ai(t)]$  ( $W'(t) = \frac{dW}{dt}$ ) Airy fonksiyonları ile ifade edilir.  $t_n$ ,  $n=1,2,\dots$

değerleri,  $q_n = -i \left( \frac{k_1 a}{2} \right)^{1/3} k_1 (k_n^2 - k_1^2)^{1/2} / k_n^2$  düşey polarizasyon için yer sabiti olmak üzere,

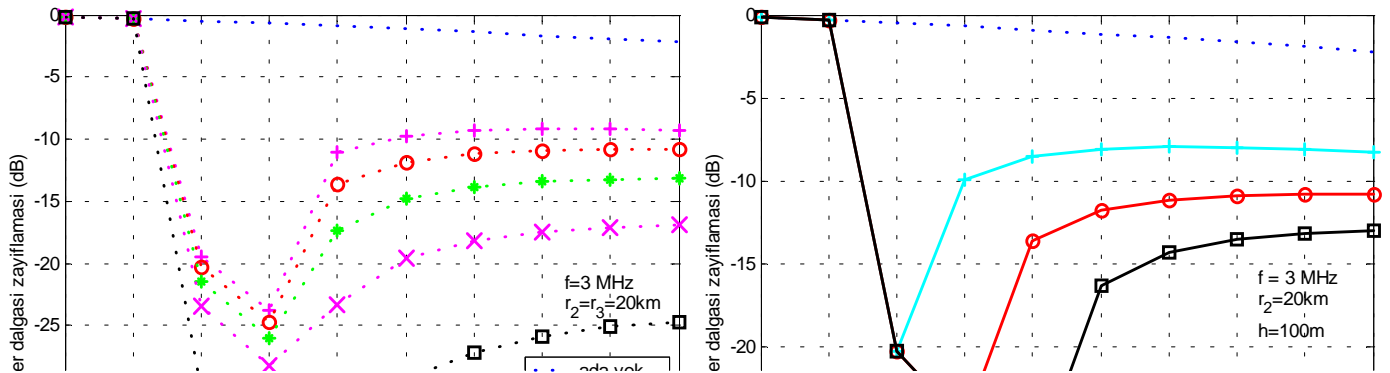
$W'(t_n) - q_n W(t_n) = 0$  denkleminin kökleri olup yer dalgası modlarının özdeğerlerine karşı düşerler. Bu değerler ayrık ve karmaşık düzlemde dördüncü dördüldüde bulunurlar ( $\text{Re}\{t_n\} > 0, \text{Im}\{t_n\} < 0$ ) ve  $n$  indisi ile mutlak olarak artarlar.

Kökler aynı zamanda  $\frac{dt}{dq} = \frac{1}{t - q^2}$  Riccati diferansiyel denklemini sağlar.  $|q/\sqrt{t_n}| < 1$  ve  $|q/\sqrt{t_n}| > 1$  hallerinde  $t_n(q)$  çözümü için [10]'da verilen asimptotik ifadeler kullanarak yapılacak hata  $10^{-6}$  mertebesinde tutulabilmektedir.  $|q/\sqrt{t_n}| \approx 1$  iken Riccati diferansiyel denkleminin sayısal çözümünün yapılması gerekir. Bu amaçla [11]'de verilen yordam kullanılmıştır.

Sistem kaybı ise,  $\lambda_1$ , serbest uzay dalga sayısı,  $L_f = 20 \log_{10}(4\pi r / \lambda_1)$  serbest uzay yol kaybı,  $G_T'$  (dB) ve  $G_R'$  (dB) verici ve alıcı antenlerin yeryüzünün mükemmel iletken olduğu durumdaki etkin kazançları olmak üzere  $L_s = L_f - G_T' - G_R' - 20 \log_{10}|F(r)| - 6.02$  ile verilir [12,13]. Aşağıdaki eğrilerde bünye sabitleri deniz için  $\epsilon_r = 80, \sigma = 4$  S/m ve toprak için  $\epsilon_r = 15, \sigma = 10^{-3}$  alınmıştır.



**Şekil 3a.** Serbest uzay yol kaybının frekans ile değişimi **b.** Yer dalgası zayıflamasının frekans ile değişimi



**Şekil 4a.** Yer dalgası zayıflamasının ada yüksekliği ile değişimi **b.** Yer dalgası zayıflamasının ada genişliği ile değişimi

$f$ (MHz)	$L_f$ (dB)	$F$ (dB)	$L_s$ (dB)
3	82	-10.8	88.5
5	86.4	-14.2	96.3
20	98.4	-28.6	122.7
30	102	-37.4	135.1

**Tablo 1.** HF bandında 100 km menzil için sistem kaybının frekans ile değişimi. ( $r_2=r_3=20km$ ,  $h_3=100m$ , mükemmel iletken düzlem üzerine yerleştirilmiş  $\lambda/4$  monopol anten için  $G'=-0.86$  dB [13])

### 3. Yorumlar

Şekil 3b ve 4a,b'de deniz-ada-deniz geçişleri için yer zayıflamasının HF bandında frekans, ada yüksekliği ve genişliğine bağlı değişimi verilmiştir. Örnekleme adımı 10km seçilmiştir. İyi iletken (deniz) ortam üzerinden kötü iletken (kara) ortama geçişte işaretin (elektrik alanın) seviyesinde ani bir düşüş gözlenir. Bunun nedeni, kötü iletken olan ortamda omik kayıpların iyi iletken ortamdakine kıyasla daha fazla olmasıdır. Karadan tekrar denize geçişte ise bu durumun tersi, yani işaretin (tekrar zayıflamaya geçmeden önce) belli bir uzaklığa kadar tekrar yükselmesi söz konusudur. Bu olaya yazında toparlanma etkisi (*recovery effect*) adı verilir ve ilk kez deneysel olarak Millington ve Isted[14] tarafından gözlenmiştir. Formülasyon, adanın ön ve arka yüzlerinin hemen yakın bir civarı dışında her yerde geçerlidir ve adanın ayrıtları arasındaki çoklu etkileşimleri göz ardı etmektedir; yani elektriksel olarak büyük genişliğe sahip adalara uygulanmalıdır. Omik kayıpların ada yüksekliği ile artışının dramatik oluşu ise yer dalgalarının yüksek adaların varlığı halinde denizlerde yayılımı ile ilgili verdiği ip uçları açıdan son derece ilginç ve önemlidir. Yüksek kayıpların temel nedeni adaların dikdörtgen kesitli olarak modellenmesidir. Bu bağlamda dikdörtgen kesitli adalardan saçılma mekanizması yayvan adalardankinden oldukça farklıdır[15]. Seri gösterilimlerde kullanılan toplam kök seçiminde, elektrik alanın (tercihen ayrıtlara yakın) herhangi bir noktada belli bir değere çok küçük bir mutlak hata ile (söz gelimi  $10^{-2}$ ) yakınsaması gerektiği dikkate alınmalıdır.

### Kaynaklar

- [1] K. Furutsu, "Wave propagation over an irregular terrain", J. Radio Res. Lab., cilt 2, 345-398, 1957a.
- [2] K. Furutsu, "Wave propagation over an irregular terrain", J. Radio Res. Lab., cilt 4, 135-153, 1957b.
- [3] K. Furutsu, "On the theory of radiowave propagation over inhomogeneous earth", J. Res. Natl. Bur. Stand., kısım. D, cilt 67, sy.39-62,1963a..

- [4] K. Furutsu, "On the statistical theory of electromagnetic waves in a fluctuating medium (I)", J. Res. Natl. Bur. Stand., kısım D, cilt 67, 303-318, 1963a.
- [5] K. Furutsu, "Calculated curves for groundwave propagation over inhomogeneous earth with pronounced topographical features", J. Res. Natl. Bur. Stand., kısım D, cilt 69, sy. 1011-1025, 1965.
- [6] K. Furutsu, R.E. Wilkerson, "Optical approximation for residue series of terminal gain in radiowave propagation over inhomogeneous earth", Proc. Inst. Electr. Eng., cilt 118, sy. 1197-1202, 1971.
- [7] K. Furutsu, R.E. Wilkerson, R.F. Hartmann, "Some numerical results based on the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth", J. Res. Natl. Bur. Stand., kısım D, cilt 68, sy.827-846, 1964.
- [8] K. Furutsu, "A systematic theory of wave propagation over irregular terrain", Radio Science, cilt 17, no.5 sy.1037-1050, 1982.
- [9] J.R. Wait, "Diffraction and scattering of the electromagnetic groundwave by terrain features", Radio Science, cilt 3, sy.995-1003, 1968.
- [10] J.R. Wait, "On the excitation of electromagnetic surface waves on a curved surface", IRE Trans. Antennas Propag., cilt 8, no.7 sy. 445-448, 1960
- [11] J.R. Wait, "On the calculation of ground wave attenuation factor at low frequencies", IEEE Trans. Antennas Propag., cilt.14, no.7 sy. 515-517, 1966 (düzeltme: cilt 27 no.2 sy. 286, 1979).
- [12] K. Norton, "System loss in radio wave propagation", J. Res. Natl. Bur. Stand., kısım D, cilt 63, no.1, sy.53-73, 1959.
- [13] E.D.R. Shearman, "Propagation and scattering in MF/HF groundwave radar", IEE Proceedings, cilt 130, kısım F, no.7, 1983.
- [14] G. Millington, G.A. Isted, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. Part 2. Experimental evidence and practical implications", Proc. Inst Elec. Engrs. cilt 97, kısım III no.48 sy. 209-217, 1950.
- [15] B. Polat, "Adaların Varlığı Halinde Yer Dalgası Yayılımı", URSI-TÜRKİYE'2002 Bilimsel Kongresi ve Ulusal Genel Kurul Toplantısı ,18-20 Eylül 2002.