

YÜZEY DALGALI HF RADAR ANTEN SİSTEMLERİ İÇİN YÜZEYE KUPLAJ VERİMİNİ ARTTIRICI TOPRAKLAMA AĞI TASARIMLARI*

Bülent ŞEN¹

Ahmet Serdar TÜRK²

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü,
P.K. 21, 41470, Gebze, Kocaeli

Tel: 0(262) 641 23 00 / 4753⁽¹⁾ - 4755⁽²⁾ Fax: 0 (262) 646 31 87

¹e-posta: bulents@btae.mam.gov.tr , ²e-posta: ahmet@btae.mam.gov.tr

Anahtar sözcükler: Yüzeysel dalgalı HF radar anteni, anten güç kazancı, topraklama levhası, brewster açısı

ABSTRACT

The purpose in using ground screens under HF transmitting system is to obtain a sufficient antenna power gain performance over poor ground by blocking electromagnetic wave penetration into the ground. In this study, degradation of antenna efficiency in HF receiver / transmitter system, caused by poor conductive earth surface, was considered and various ground screen configurations were analyzed to remedy the problem.

1. GİRİŞ

HF antenlerin kazanç değerleri ve ışıma diyagramı karakteristikleri üzerinde konuşlandırıldıkları yer düzleminin bünye parametrelerinden oldukça etkilenmektedir. Yüzeysel dalgalı HF radarlarında kullanılan dipol veya monopol antenler toprak düzlemi üzerine yerleştirildiğinden dolayı özellikle düşük iletkenliğe sahip kuru topraklar kuplaj verimliliğini azaltmak suretiyle anten kazancını düşürmektedir. Ayrıca bu durum yüzeysel dalgası oluşumunu zorlaştıran yüksek kalkış açısı (*take-off angle*) başta olmak üzere anten ışıma karakteristiklerinde (ön/arka oranı, demet genişliği, vb.) istenmeyen sorunlara sebep olmaktadır.

Düşük iletkenliğe sahip toprak üzerine yerleştirilmiş monopol antenin ışıma karakteristiğini iyileştirmek için topraklama levhaları kullanılır. Levhalar yardımıyla elektromagnetik enerjinin toprağa sızması engellenerek omik kayıplar ortadan kaldırılmakta ve levha boyunca yansıma katsayısının +1 olmasından dolayı yüzeysel üzerindeki düşey alan şiddeti artarak yüzeysel dalga yayılımı iyileştirilmektedir. Kalkış açısının düşürülmesi sayesinde deniz yüzeyine geçişi sağlanabilen şiddeti artırılmış elektromagnetik dalga iyi bir iletken olan deniz üzerinde düşük kayıpla yayılımına devam edebilecektir.

Topraklama levhaları sadece anten empedansını kararlı hale getirmeyi, yeterince geniş yapıldığı takdirde düşey ışıma diyagramının, ideal durum olan

mükemmel iletken yüzeysel üzerindeki bir antenin ışıma diyagramı karakteristiğini göstermesini sağlar. Kullanılan topraklama levhalarının büyüklüğünün *Elektromagnetik* dalga yayılımına doğrudan etkisi vardır. Genellikle büyük levhalar kullanılır, ancak HF bandındaki boyut problemlerinden dolayı antenlerin tabanlarını tamamen ya da çok büyük boyutlu iletken levhalarla kaplamak önemli bir maliyet getireceğinden genellikle iletken çubuklarla şekillendirilen ızgara türü topraklama ağları kullanılır. Büyük topraklama levhası çözümü ilk olarak *Clemmow*[1] tarafından toprak–deniz süreksizliği incelemelerinde ortaya atılmıştır. *Clemmow*, daha önce *Booker*[2] ile birlikte yaptığı ışın ve kırınım tekniklerini kullanarak çıkardıkları formülleri bu probleme uyarlamıştır. *Monteath*[3] kompanzasyon teoremi yardımıyla deniz–kara ve farklı yükselti geçişlerinin iki dipolün ortak empedanslarını nasıl etkilediğini incelemiştir. Daha sonra bu çalışma *Wait*[4] tarafından karma yol yapılarında yer dalgası yayılımı için geliştirilmiştir. Bir sonraki çalışma *Senior*[6] tarafından direkt ve *Fresnel* görüntüsü kullanılarak ele alınan yaklaşımdır. Bu yaklaşım üzerine çalışmalar yapılmıştır. Son düzeltmeler ise *Wait* ve *Conda* tarafından gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada düşük iletkenliğe sahip toprak üzerine dikili monopol türü anten dizilerinin kazanç performansları *NEC (Numerical Electromagnetics Code)* elektromagnetik sayısal hesaplama programı kullanılarak değişik topraklama ağ yapıları için incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılarak her bir ağ yapısının zayıflıkları ve üstünlükleri tespit edilmiştir. Bu çerçevede verici anten olarak kullanılan log-periyodik anten dizisi için değişik topraklama levha yapıları oluşturulmuş ve anten dizisinin kazancına olan etkileri incelenmiş, her bir topraklama ağ yapısına ait olan güç kazancı diyagramları grafiksel olarak sunulmuştur.

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

2.ELEKTROMAGNETİK TEMELLER

Sonlu iletkenliğe sahip bir ortamın karakteristik empedansı şu şekilde verilmektedir [6]:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (1)$$

Birim alandaki ortalama güç,

$$P(\text{gerçel}) = \frac{1}{2} \text{Re}(E_{\tan} \times H_{\tan}^*) \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır. İyi iletkenler için ($\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$

durumu) bu ifade aşağıdaki şekli alır:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} |Z_s| |J_{s(\text{eff})}|^2 \quad (3)$$

(3) eşitliğinden de görüldüğü üzere, birim alandaki güç kaybı yüzey empedansının genliğine ve teğetsel elektrik alanın oluşturduğu yüzeysel akım yoğunluğuna bağlıdır. Sonlu iletkenlikten kaynaklanan güç kaybını azaltmanın yolu yüzey empedansının genliğini düşürmektir. Yüzey empedansındaki artış antenin giriş empedansındaki omik direnci arttıracak ve anten ışınım verimini düşürerek güç kazancının kötüleşmesine sebep olacaktır. Anteni düşük iletken bir ortam üzerine yerleştirmekle mükemmel iletken bir ortam üzerine yerleştirmek arasındaki güç kazancı kaybı 20dB seviyelerine kadar çıkmaktadır. Omik kayıplar frekansla birlikte artmaktadır. Düşük iletken yüzey üzerine dikilmiş bir antenin güç kazanç ifadesini iyileştirmenin yolları şöyle sıralanabilir:

- Anteni mümkünse kıyıya yakın bir bölgede konuşturmak
- Yüzey empedansının gerçel kısmını düşürmek için topraklama ağ yapısı kullanmak
- Yüzey empedansının sanal kısmını ortadan kaldırmak için anten üzerinde fiziksel değişiklikler yapmak (kapasitif yükleme teknikleri) [7].

Topraklama levhasının etkileri ise şu şekilde özetlenebilir:

- Antenin giriş direncini kararlı hale getirir ve yüzey direnç değerini düşürerek güç kazancını artırır.
- Anten ışınım diyagramının kalkış açısını düşürür ve daha çok enerjinin iletim ortamına geçmesini sağlar.

3. LOG PERİYODİK ANTEN SİSTEMİ KAZANÇ ANALİZLERİ

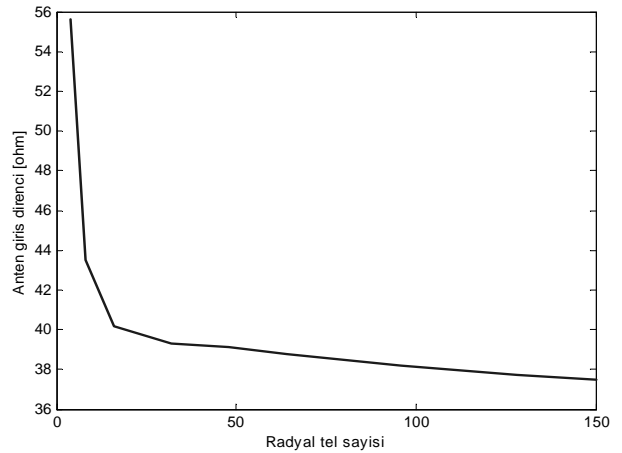
Bu çalışmanın amacı zayıf iletkenlikli toprak zemin üzerinde bulunan log-periyodik dizi antenin güç kazancını değişik topraklama ekranı tasarımları deneyerek iyileştirmektir. Sonuç olarak ulaşılmak

istenen temel parametrik değerler yüksek güç kazancı, kuplaj verimi ve düşük kalkış açısıdır. Bununla birlikte, dar düşey huzme genişliği ve yüksek ön/arka oranı da elde edilmeye çalışılacaktır. Güç kazancı diyagramları yüzey dalgasına göre değil, toplam uzay dalgasına göre çizildiği için anten kazancı hesabındaki elektrik alan şiddeti direkt dalga ile yerden yansıyan dalganın vektörel toplamıdır. Topraklama telleri toprağın altına değil üzerine veya tam üstüne yerleştirilmiştir. Çeşitli tel uzunlukları için topraklama levhasının etkisi incelenmiştir. Genel olarak tel uzunlukları geniş bant uygulamasına uyması açısından anten boylarına eşit alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri sırasıyla 13 ve 0.005 S/m'dir.

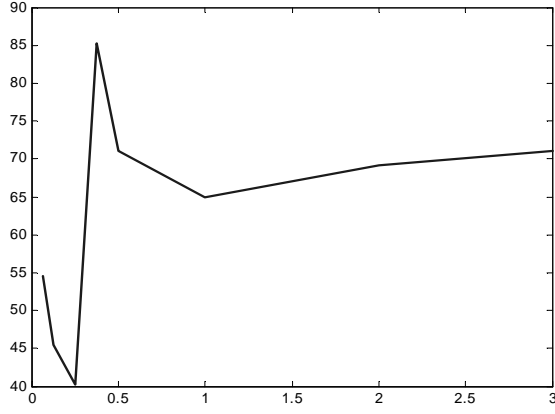
3.1. Radyal Tel Sayısının ve Uzunluğunun Anten Kazancına Etkisi

Mükemmel iletken yüzey üzerindeki $\lambda/4$ uzunluklu bir monopollü antenin ışınım direnci teorik olarak $R_{ışınım}=36\Omega$ 'dur. Bir anten sisteminin ışınım karakteristiğini iyileştirmek amacıyla yapılan topraklama ağ tasarımlarının hedefi düşük iletken ortamlardan kaynaklanan omik kayıpları en aza indirgeyerek giriş direncini 36Ω değerine mümkün olduğunca yaklaştırmaktır. Anten giriş direncinin değişimini etkileyen faktörler topraklama ağındaki radyal tel sayısı, tel uzunluğu ve tel yarıçapıdır. Örneğin; $\sigma=0.005\text{S/m}$, $\epsilon_r=13$ olan toprak üzerinde topraklama radyal telleri kullanılmadığı durumda $R_{ışınım} = 150\Omega$ olmaktadır.

N , L ve r sırasıyla, radyal tel sayısı, radyal tel uzunluğu ve tel yarıçapı ($=0.0015\text{m}$) olmak üzere anten giriş direncinin radyal tel sayısına bağlı değişimi aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Şekil 3.1a. Anten giriş direncinin radyal tel sayısına göre değişimi



Şekil 3.1b. Anten giriş direncinin uzunluğuna ($N=16$ için) göre değişimi

Grafikten de görüldüğü üzere, $N=16$ radyal tel sayısı için $l=\lambda/4$ uzunluğundan sonra anten giriş direnci büyüme yönünde eğilim göstermektedir. Dolayısıyla optimum uzunluk $l=\lambda/4$ olmaktadır.

3.2. Denize Kuplajın İyileştirilmesi

Düşey polarize log-periyodik anten dizisinin maksimum ışınma enerjisini deniz yüzeyine kuple edebilmek için enerjinin en büyük olduğu düşey açının yüzey dalga oluşturmak için gerekli olan ve dalganın yüzey ile yaptığı açı olarak tanımlanan *Brewster* açısına eşit olması gerekmektedir. Anten dizisi düşük iletken toprak yüzeyi üzerine yerleştirildiğinde maksimum ışınma açısı yatayla 20° civarlarında olmaktadır ki, bu da yüzeye maksimum enerjinin kuple edilemeyeceğinin bir göstergesidir. Buna bir çözüm olarak anten sistemi topraklama ağ yapısıyla beraber yerden $\lambda/4$ mertebesinde yükseltilir ve dizi elemanlarının dizi içerisindeki düşey konumlarına eğim verilerek antenin maksimum ışınmasının *Brewster* açısında deniz yüzeyine iletilmesi sağlanır ve dolayısıyla kuplaj kaybı ortadan kaldırılmaya çalışılır.

$$\theta = \arctan\left(\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}\right) \quad (4)$$

Burada; ϵ_2 denizin bağıl dielektrik sabiti, ϵ_1 ise havanın bağıl dielektrik sabitidir. Deniz için $\epsilon_2=70$ alındığında, (4) eşitliği kullanılarak $\theta=7^\circ$ olarak hesaplanmaktadır. Antenin yerleştirildiği konumdan itibaren 20λ uzaklıkta (uzak alan bölgesi) Elektromagnetik dalganın 7° ile deniz yüzeyine kuple olabilmesi için anten yüksekliği $h=210m$ olmalıdır. Bu sonuç uygulanabilir görülmediği için belli miktarda enerji kaybını göze alarak dalga denize kuple edilmelidir. Yapılan *NEC* analizlerinde anten sistemi yerden $h=20m$ yüksekliğe ($h \ll h_{brewster}$) yerleştirildiğinde ve 7° lik bir eğim açısı verildiğinde geniş bantta güç kazanç değerlerinde iyileşme göze çarpmaktadır ve kalkış açısı (yüzeye yapılan açı) da 8° den 5° ye düşmüştür. Sonuç olarak, daha çok

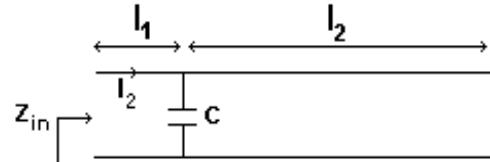
enerjinin deniz yüzeyine kuple olabilmesi için anten dizisi mümkün olduğunca deniz yüzeyine yakın yerleştirilmeli, belli bir yüksekliğe çıkarılmalı ve besleme noktalarına bir eğim açısı verilmelidir.

3.3. Geniş Bantlı Kompanzasyon

Düşük iletken toprak üzerine yerleştirilmiş bir log-periyodik anten sisteminin geniş banttaki empedans değişimi rezonans frekansından düşük frekanslarda kapasitif, rezonans frekansı üzerindeki frekanslarda ise endüktiftir. Rezonans anten düşük iletkenliğe sahip toprak üzerine yerleştirildiğinde $\lambda/4$ uzunluklu monopol anten artık rezonansa değildir ve kısa anten gibi davranmaya başlar. Anten giriş direnci karmaşık hali alır ve bu da düşük ışınma alan şiddetine ve verim kaybına yol açar. Anten üzerindeki akım dağılımını değiştirmek ve dolayısıyla anten giriş direncinin sanal kısmını bastırmak amacıyla anten üzerinde belli bir noktaya birbirine zıt yönde, paralel, sonu açık devre iki hat bağlanır. İki ayrı hat bağlanmasının nedeni uzak alanda yatay hatlardan kaynaklanacak yatay elektrik alan bileşenini iki zıt yöndeki hatlarla yok etmektir. Bu hatlar anten üzerindeki akımı böler ve anteni tekrar rezonansa götürür. Anten mükemmel iletken zemin üzerinde ise iletim hattı modelinin giriş empedansı

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot \beta l \quad (5)$$

olarak tanımlanır[4]. (5) ifadesinde görüldüğü gibi iletim hattı $\lambda/4$ uzunluğunda olsaydı iletim hattı modeline göre giriş empedansı 0Ω olacaktır.



Şekil 3.2. Monopol antenin açık devre iletim hattı modeli

Paralel iletim hattı, uzunluğuna bağlı olarak rezonans frekansı altında hat endüktif; üstünde kapasitif işlev görür. Z_{in} empedansı, anten dizisinin bileşke giriş empedansı olmak üzere,

$$Z_{in} = Z_0 \frac{-j \frac{Z_0}{\tan \beta l_2 + \omega C Z_0} + j Z_0 \tan \beta l_1}{Z_0 + \frac{Z_0}{\tan \beta l_2 + \omega C Z_0} \tan \beta l_1} \quad (6)$$

(6) eşitliğinde görüldüğü gibi aranan C değeri $Z_{in} = 0$ yapan değeridir.

Buradaki eşitlikten C değeri hesaplanırsa ve gerçekleştirilirse monopol anten, rezonans anten gibi davranmaya başlayacaktır. (6)'dan görüldüğü gibi C değeri l_1 ve l_2 uzunluklarının uygun seçilmesine bağlıdır. Yukarıdaki teorik

hesaplamalara bağlı olarak anten üzerinde $l_1=5m$ noktasına paralel bir açık devre iletim hattı eklendiğinde (kapasitif etki) yeni giriş empedansı ve yüzey elektrik alan değerleri ($R=10km$ mesafede) iletim hatsız değerlere göre aşağıda verilmiştir.

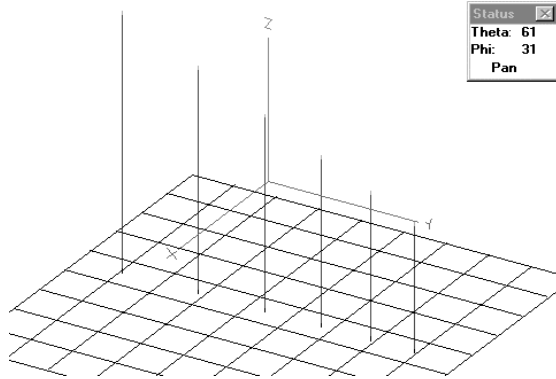
Tablo 3.1 Kompanzasyon etkisinin karşılaştırılması

	$Z_{giriş} [\Omega]$	$E_{surface} [dB\mu V]$
Kompanzasyonsuz	30.8 - j36.78	30.12
Kompanzasyonlu	25.19 + j2.27	32.45

4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Değişik topraklama ağı yapılarının etkisini görebilmek amacıyla, 3-5MHz frekanslarında kullanılabilecek ölçüde tasarlanmış altı monopol antenden oluşan bir log-periyodik anten dizisi tasarlanmıştır (Şekil 4.1). Bu anten sistemi sırasıyla mükemmel iletken, zayıf iletken toprak ve üç ayrı topraklama ağı düzlemi üzerine yerleştirilerek anten karakteristikleri sayısal olarak hesaplanmış ve teknik parametreleri verilmiştir.

1.nec : Referans anten sisteminin parametrelerini belirlemek amacıyla log-periyodik anten, mükemmel iletken toprak zemin üzerine yerleştirilmiştir



Şekil 4.1. Log-Periyodik anten dizisi

Tablo 4.1. 1.nec'e ait teknik parametreler

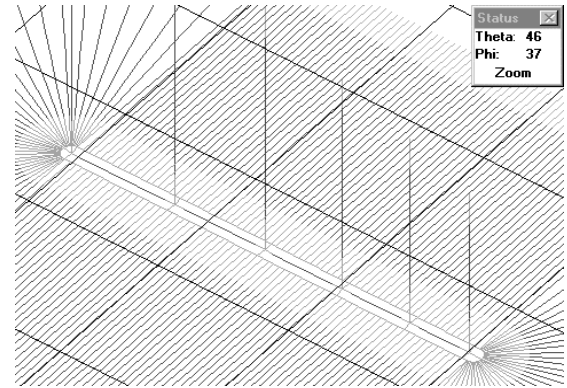
	3MHz	4MHz	5MHz
Güç Kazancı [dB]	9.01	9.6	9.17
Kalkış Açısı [°]	0	0	0
Düşey Huzme [°]	N/A	N/A	N/A
Ön/Arka oranı [dB]	11.9	17.73	15.03

2.nec : Düşük iletken toprak zemin üzerine yerleştirilmiş log-periyodik anten dizisi ($\sigma=0.005 S/m, \epsilon_r=15$) (Şekil 4.1)

Tablo 4.2. 2.nec'e ait parametreler

	3MHz	4MHz	5MHz
Güç Kazancı [dB]	-14.15	-17.25	-14.54
Kalkış Açısı [°]	20	18	19
Düşey Huzme [°]	37	32	29
Ön/Arka oranı [dB]	2.7	1.19	1.54

3.nec: Aşağıdaki topraklama ağı yapısı ile beraber zayıf iletken toprak zemin üzerine yerleştirilmiş log-periyodik anten dizisi ($\sigma = 0.005 S/m, \epsilon_r = 15$) (Şekil 4.2)

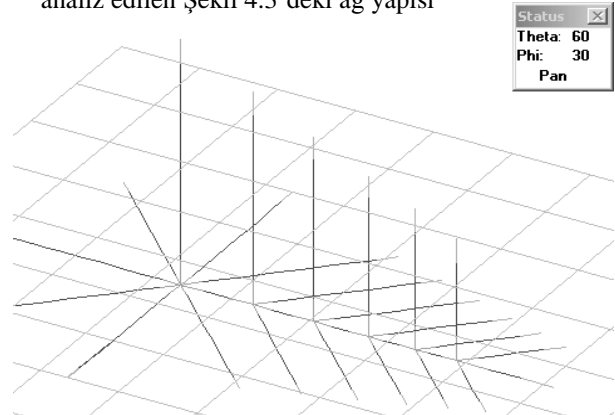


Şekil 4.2. Topraklama ağı yapısı-1

Tablo 4.3. 3.nec'e ait parametreler

	3MHz	4MHz	5MHz
Güç Kazancı [dB]	2.18	0.23	1.39
Kalkış Açısı [°]	22	22	24
Düşey Huzme [°]	40	39	45
Ön/Arka oranı [dB]	11.56	18.02	11.04

4.nec: Topraklama ağının maliyetini düşürmek ve aynı zamanda optimum güç kazancı sağlamak için analiz edilen Şekil 4.3'deki ağı yapısı

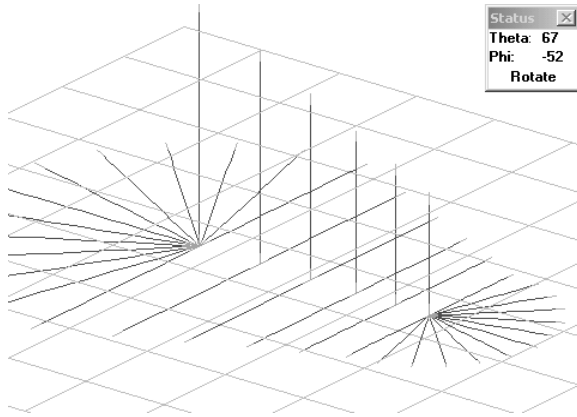


Şekil 4.4. Topraklama ağı yapısı-2

Tablo 4.3. 4.nec'e ait parametreler

	3MHz	4MHz	5MHz
Güç Kazancı [dB]	1.4	0.17	0.07
Kalkış Açısı [°]	23	24	24
Düşey Huzme [°]	42	44	35
Ön/Arka oranı [dB]	6.19	16.55	8.69

5.nec: Düşük frekanslar için ön/arka oranını ve yüksek frekanslar için güç kazancı değerini artırmak için ek radyal teller eklenmiş topraklama ağ yapısı (Şekil 4.4)



Şekil 4.4. Topraklama ağ yapısı-3

Tablo 4.5. 5.nec'e ait parametreler

	3MHz	4MHz	5MHz
Güç Kazancı [dB]	-0.4	-0.25	1.06
Kalkış Açısı [°]	22	21	23
Düşey Huzme [°]	40	37	42
Ön/Arka oranı [dB]	17.5	18.77	7.08

5. DEĞERLENDİRME VE YORUMLAR

- Anten mükemmel iletken düzlem üzerine konulduğunda en yüksek güç kazancı değerini 0° kalkış açısında almakta, bu da yüzey üzerine dalga kuplajını en büyük yapmaktadır. Fakat mükemmel iletken üzerinde düşey yansıma katsayısı 1'e yaklaştığı için 0° kalkış açısında yüzey dalgası oluşmaz, oluşan direkt dalga ile yerden yansıyan dalganın toplamıdır. Yapılan tüm topraklama ağ çalışmaları amacı Tablo 4.1'deki değerlere mümkün olduğunca yaklaşabilmektir.
- Log-Periyodik anten sisteminin herhangi bir topraklaması olmadığı durumda kazanç değerleri büyük oranda düşmektedir. Bunun nedeni

ortamdaki omik kayıpların artmasıdır. $\sigma=0.005S/m$ için toprağın yüzey direnç değeri yaklaşık olarak 100Ω değerindedir. Bu da antenin verimliliğini dolayısıyla kazancı büyük ölçüde düşürmektedir.

- Şekil 4.2'de verilen topraklama ağ tasarlanmış ve anten kazancı 15dB iyileştirilmiştir. Bu ağ yapısının dezavantajı çok sayıda tel kullanılması zorunluluğudur. Dolayısıyla fiziki açıdan zor ve yüksek maliyetli olmaktadır.
- Şekil 4.3'te daha az sayıda tel kullanan özel bir yapı denenmiş ve benzer performans elde edilmiştir. Ancak maliyeti azaltmak yaklaşık 3dB güç kazancı azalmasına ve düşük frekanslarda ön/arka oranı kötüleşmesine neden olmuştur. Buna karşın Şekil 4.4'teki konfigürasyon tasarlanmış ve ön/arka oranı düzeltilmiştir.
- Topraklama ağ yapısında simetriyi sağlamak çok önemlidir. Aksi takdirde asimetrik yapı olan bölgelerde elektrik alanı toprağa geçişi engellenemeyeceği gibi anten ışın diyagramı karakteristiği de bozulacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Clemmov P.C., "Radio propagation over a flat earth across a boundary separating two different media", Phil. Trans. Roy. Soc., Londra, cilt 246, s.1-55, 1954.
- [2] Booker H.G. ve Clemmov P.C., "A relation between the Sommerfeld Theory of radio propagation over a flat earth and the theory of diffraction at a straight edge", Proc. IEE, 1950, Londra, pt. 3, cilt 97, s.18-27.
- [3] Monteath G.D., "Application of the compensation theorem to certain radiation and propagation problems", Proc. IEE, Ekim 1951, Londra, pt. 4, cilt 98, s.23-30.
- [4] Wait J.R., "Electromagnetic Waves in Stratified Media", Pergamon Press, NY, A.B.D., 1962.
- [5] Senior T.B.A., "Radio propagation over a discontinuity in the earths electrical properties-I", IEE Monograph 192R, Ağustos 1956, Londra, s.1-11.
- [6] Jordan Edward C. ve Balmain Keith G., "Electromagnetic Waves And Radiating Systems", Prentice-Hall Inc., 1950.
- [7] Collin Robert E., "Antennas And Radiowave Propagation", McGraw-Hill Book Company, 1985.