

EĞİK YAYILAN HF RADYO DALGASININ İYONOSFERİK PLAZMA PARAMETRELERİNE BAĞLI SÖNÜMÜ

İbrahim ÜNAL & Osman ÖZCAN*

İnönü Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretimi Bölümü, 44280 Malatya, Türkiye

*Fırat Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 23169 Elazığ, Türkiye

iunal@inonu.edu.tr, oozcan@firat.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, iyonosferik plazma içerisinde eğik yayılan yüksek frekanslı (HF) radyo dalgalarının sönmü incelenmiştir. Dalganın sönmü terimine bağlı ifadesi, iyonosferik plazma parametrelerine ve dalganın yayılım açısına bağlı olarak elde edildi. Elde edilen bu ifadelerden genlikteki sönmünün nümerik hesaplamaları yapıldı. İncelemeler, D bölgesindeki sönmünün çok fazla olmasıyla beraber yüksekliğe bağlı dalganın söndüğünü göstermiştir. Ayrıca frekans değeri arttıkça sönmü azalmış ve en fazla sönmü yazın gün ortasında saptanmıştır.

1. Giriş

İyonosfer, radyo dalgalarını yansıtabilen atmosferin önemli bir tabakasıdır. HF bandındaki (3-30 MHz) frekanslar, iyonosferden yansıyabilen en yüksek frekanslardır. HF radyo spektrumu kullanımı, uydu-Yer haberleşme sistemlerinin yaygın olarak başlamasına rağmen, sivil ve askeri amaçlar için devam etmektedir. Olağanüstü durumlardaki haberleşme sisteminin çökmesi durumunda bu banttaki haberleşmeler hayati bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, iyonosferdeki HF yayılım karakteristiklerinin anlaşılması ve incelenmesi önemlidir. Radyo dalgaları iyonosferik plazma içerisinde yayılırken, sahip oldukları frekansa, plazma ortamındaki elektronların salınım frekansına ve ortamın kırılma indisine bağlı olarak değişik davranışlar gösterirler. Bu davranışlara bağlı olarak, dalga kırılır, yansır veya ortam tarafından soğurularak zayıflatılır. Radyo dalgalarının sönmü, iyonosferdeki elektron ve iyonların hareketlerinden dolayı diğer parçacıklarla çarpışması sonucu ortaya çıkar. Bu çalışmada, farklı iki koordinat arasında haberleşmeyi sağlayan, iyonosferik plazma içerisinde eğik ilerleyen HF radyo dalgasının sönmü incelenmektedir. Bu bakımdan ortamın iletkenliği ve dalganın yayılım bağıntılarının çözümünden, dalganın yayılım açısına bağlı olarak ortamın kırılma indisi ifadesi tanımlanmalıdır. Elde edilen uygun matematiksel ifadelerin sayısal çözümlemeleri yapılarak sönmüdeki değişimler incelenmektedir.

2. İyonosfer İçerisinde Yayılan Radyo Dalgalarının Sönmü

Bir radyo dalgası $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ ifadesiyle verilir. Buradaki ω açısal frekans ve $\mathbf{k} (= \frac{\omega}{c} \mathbf{n})$ ise dalga vektörüdür. İyonosferik plazma içerisindeki kırılma indisi ise,

$$n = \mu + i\chi \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır [1]. Bu ifadedeki reel kısım dalganın faz hızına etki eder, sanal kısım ise dalganın uzaysal zayıflamasıyla ilişkilidir. Bu denklemle verilen ifade kullanılarak, dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\left(\frac{\omega}{c} \mu \mathbf{r} - \omega t\right)} e^{-\frac{\omega}{c} \chi \mathbf{r}} \quad (2)$$

Bu dalga denklemi, radyo dalgasının $e^{-\frac{\omega}{c} \chi \mathbf{r}}$ terimiyle zayıfladığını ve $\frac{\omega}{c} \chi$ hızıyla hareket ettiğini gösterir. Bu ifadedeki sönmü miktarının analitik hesabının yapılabilmesi, ortamın kırılma indisinin bilinmesi ile mümkündür.

İyonosferik plazmanın kırılma indisi

İyonosferik plazmanın kırılma indisi, Maxwell denklemleri kullanılarak ifade edilen dalganın yayılım bağıntısından elde edilir. Buna göre Maxwell denklemleri ve $\mathbf{J}$ akım yoğunluğu $[\mathbf{J}] = [\sigma] \cdot [\mathbf{E}]$ göz önüne alınarak,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left[\mathbf{I} + \frac{i\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right] \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

ifadesi elde edilir. Burada I birim tensördür. Yüksek frekans bandı çalışıldığından, elektron hareketinin yanında iyon hareketi göz önüne alınmayacaktır [2]. x doğu, y:kuzey ve z:yukarı yön olmak üzere **B** Yer'in manyetik alanı $\mathbf{B} = \hat{z}B_0$ olarak kabul edilirse, elektron için iletkenlik tensörü aşağıdaki gibidir.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & 0 \\ -\sigma_2 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \left(\sigma_0 = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2}{(v_e - i\omega)}, \sigma_1 = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 (v_e - i\omega)}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}, \sigma_2 = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]} \right) \quad (4)$$

Burada ε_0 serbest uzayın dielektrik katsayısı, v_e elektron çarpışma frekansı, ω_{pe} elektron için plazma titreşim frekansı ve ω_{ce} elektron siklotron frekansdır. $\nabla = i\mathbf{k}$ [3] ve $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ olduğundan (3) ifadesi,

$$n^2 \mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = \left[\mathbf{I} + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right] \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

şekline dönüşür. Bu ifade elektromanyetik dalganın ayrılım bağıntısı olarak bilinir. Eğik yayılan dalga için $\mathbf{k} = \hat{y}k \sin \theta + \hat{z}k \cos \theta$ olarak alınıp, gerekli işlemler yapılırsa bu ifade aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} n^2 - S & iD & 0 \\ -iD & n^2 \cos^2 \theta - S & -n^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & -n^2 \sin \theta \cos \theta & n^2 \sin^2 \theta - P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

Bu ifadedeki, $P = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + iv_e)}$, $R = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega[(\omega + iv_e) - \omega_{ce}]}$, $L = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega[(\omega + iv_e) + \omega_{ce}]}$, $S = \frac{1}{2}(R + L)$ ve $D = \frac{1}{2}(R - L)$ dir. (6) denklemindeki katsayılar determinantı alınır kırılma indisi için,

$$A n^4 - B n^2 + C = 0 \quad (7)$$

elde edilir. Burada, $A = P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta$, $B = P S (1 + \cos^2 \theta) + R L \sin^2 \theta$, $C = P R L$ dir. Bu denklem reel ve sanal kısmı cinsinden yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$n^2 \cong \alpha + i\beta \left(\alpha = \frac{T U + V Y}{U^2 + Y^2}, \beta = \frac{U V - T Y}{U^2 + Y^2} \right) \quad (8)$$

Bu ifadelerdeki terimler aşağıdaki gibidir.

$$T = \omega^5 - \omega^3 (3v_e + 2\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2) + \omega \omega_{pe}^2 (2v_e^2 + \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \cos^2 \theta), \quad V = 3v_e \omega^4 - v_e \omega^2 (v_e^2 + 4\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2) + \omega \omega_{pe}^4$$

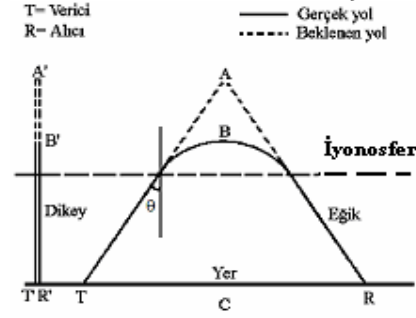
$$U = \omega^5 - \omega^3 (3v_e^2 + \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2) + \omega \omega_{pe}^2 (v_e^2 + \omega_{ce}^2 \cos^2 \theta), \quad Y = 3v_e \omega^4 - v_e \omega^2 (v_e^2 + 2\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2)$$

Sönüm terimi ve dalga denklemi

Bu işlemler sonucunda kırılma indisi için $n^2 = (\mu + i\chi)^2 = \alpha + i\beta$ olduğu görülür. Bu eşitlikten kırılma indisinin sanal kısmı ve plazma parametreleri cinsinden eğik yayılan HF dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\chi_{1,2} = \left[\frac{\mp (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} - \alpha}{2} \right]^{1/2}, \quad E = E_0 e^{i \left(\mp \frac{\omega}{c} \mu z - \omega t \right)} e^{-\frac{\omega}{c} \left[\frac{\pm (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} - \alpha}{2} \right]^{1/2} z} \quad (9)$$

3. Nümerik Analiz ve Tartışma



Şekil 1. İyonosfere dikey ve eğik gönderilen radyo dalgası yolu [1].

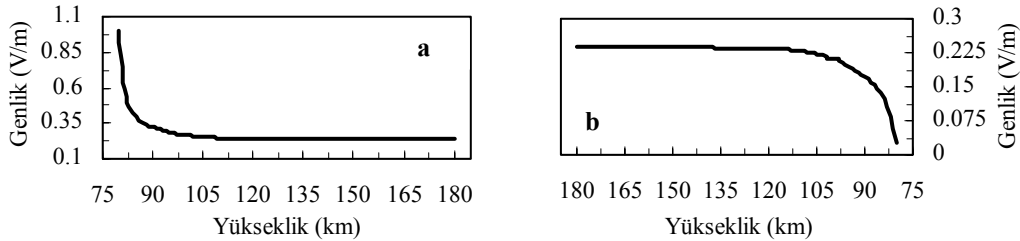
İyonosferik plazmada eğik yayılan HF radyo dalgası genliğindeki sönüm, (9) denklemi ile verilen ifade kullanılarak hesaplandı. Hesaplamalar, Güneş lekесinin minimum ($R \approx 10$) olduğu günler için Şekil 1 ile verilen eğik yayılımdaki dalganın beklenen yolu göz önüne alınarak yapıldı. İyonosfere giriş yüksekliği 80 km ve yansıma noktası ($38^\circ 41' D$ ve $39^\circ 14' K$) kırılma indisinin sıfır olduğu nokta olarak alındı. Dalganın genliğindeki toplam sönüm, dalganın yolu boyunca her 1 km için hesaplandı. Dalganın genliğinin (E_0) 1 ve giriş açısının $\theta = 60^\circ$ olduğu hesaplamaların yapılabilmesi için, ω_{ce} ve ω_{pe} gibi plazma parametrelerinin yanında elektron çarpışma frekansı da bilinmelidir. Elektron çarpışma frekansı, elektron-iyon (ν_{ei}) ve elektron-nötr parçacık (ν_{en}) çarpışma frekanslarının toplamıdır ($\nu_e = \nu_{ei} + \nu_{en}$).

Bu frekanslar $\nu_{ei} = N_e \left[59 + 4.18 \log \left(\frac{T_e^3}{N_e} \right) \right] \times 10^{-6} T_e^{-3/2}$ ve $\nu_{en} = 5.4 \times 10^{-16} N_n T_e^{1/2}$ ifadeleri ile verilir [4].

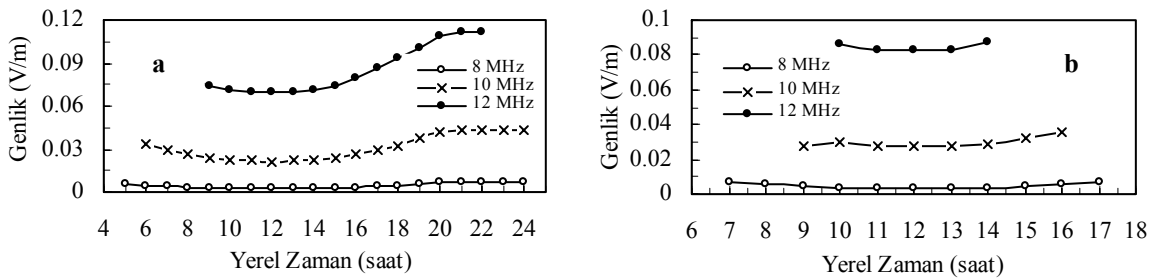
Buradaki N_e elektron yoğunluğu, N_n nötr yoğunluk ve T_e elektron sıcaklığıdır. Tüm hesaplamalar için gerekli olan parametreler International Reference Ionosphere (IRI) Modeli kullanılarak elde edilmiştir.

Sönümün yükseklikle değişimine örnek olarak Şekil 2'deki 10 MHz'lik dalganın sönümüne bakıldığında, dalganın yolu boyunca iyonosferin D bölgesindeki sönümün çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, gündüz saatlerinde daha alt yüksekliklerdeki elektron yoğunluğunun daha az olmasına rağmen, nötr parçacık yoğunluğunun ve dolayısıyla elektron çarpışma frekansının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

HF radyo dalgalarındaki dalganın yolu boyunca genlikteki toplam sönümün günlük ve mevsimsel değişimleri Şekil 3'teki gibi elde edildi. Gündüz saatlerinde sönümün daha fazla olduğu görülmektedir. Sadece yansımanın olduğu saatlerdeki veriler alınırken, diğer saatlerde dalganın iyonosferi geçerek yoluna devam etmiştir. Daha büyük frekanslı dalgalar daha az sönüme uğrarken, sönümün yazın kıştan daha fazla olduğu gözle çarpıkmaktadır. Gündüz saatlerindeki sönüm artışı, elektron yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca gündüz saatlerindeki elektron sıcaklığının artmasından kaynaklanan elektron çarpışma frekansının artışıyla da ilişkilendirilebilir.



Şekil 2. 21 Aralık saat 12.00 da 10 MHz'lik dalganın sönümünün yükseklikle değişimi (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).



Şekil 3. Dalganın yolu boyunca HF dalgalarındaki toplam sönümün günlük değişimi (a: 21 Haziran, b: 21 Aralık).

Kaynaklar

- [1]. Davies, K., Ionospheric Radio Propagation, U.S. Government Printing Office, Washington, 1965.
- [2]. İnan, U.S. ve İnan, A.S., Electromagnetic Waves, Prentice Hall Inc., New Jersey, 2000.
- [3]. Zhank, D.Y. ve Cole K.D., "Some aspects of ULF electromagnetic wave relations in a stratified ionosphere by the method of boundary value problem", Journal of Atmos. and Terr. Physics, 56(5), s.681-690, 1994.
- [4]. Rishbeth, H. ve Garriott, O.K., Introduction to Ionospheric Physics, Academic Press, New York, 1969.