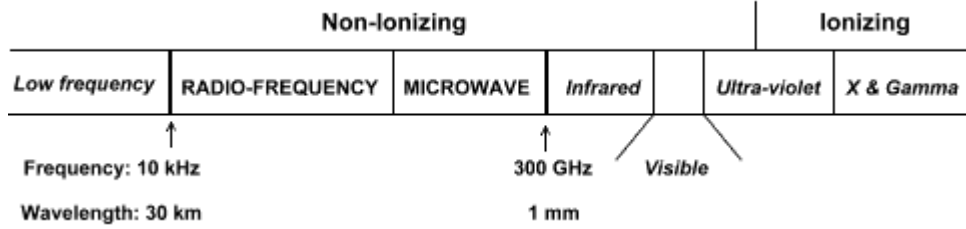


Elektromanyetik Yayınım

Dr. Cahit KARAKUŞ



Elektromanyetik yayılım spektrumu; Radyo Dalgalar, Mikro Dalgalar, Kızıl ötesi, Görünen Işık, Mor Ötesi, X-Işınları, Gamma Işınları olarak düşük frekanstan yüksek frekansa göre sıralanır.

İyonize radyasyon, elektromanyetik yayılım spektrumunda X ve Gamma ışınlarından başlayan, elektromanyetik dalgalardır. Alfa ve beta parçacıkları, Gamma ve X ışınları, nötronlar, yüksek hızlı elektronlar, protonlar ve diğer atomik parçacıklar iyonize radyasyon yayarlar. İyonize radyasyon insan hücrelerinin değişimine neden oldukları, kanser oluşturdıkları ve kromozomları değiştirdikleri için tehlikelidir. İyonlaşmanın olduğu yayınlımların dış dökülmesine, kan kanserine ve sakat doğumlara neden olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda X ışınları, Radium gibi iyonlaşmanın olduğu radyasyonlar kanser tedavisinde kanserli hücreleri öldürmek için kullanılır.

İyonize olmayan dalgalar ise Ses dalgaları, Radyo dalgaları, Mikrodalga, Kızıl ötesi ışık, Görünen ışık, ve Morötesi ışık olarak sıralanır. İyonize olmayan dalgalar girdikleri dokulara enerjilerini aktararak ısısını artırır ya da hücre zarlarının çalışma biçimini değiştirirler. Elektromanyetik dalgalar kullanılarak insanların nasıl yönlendirileceği konusundaki çalışmalar, hücre zarlarının verdiği tepkiler üzerine yoğunlaşmıştır. Elektromagnetik yayılım yapan kaynakların insan sağlığı ve çevreye verdikleri hasarların iyi incelenmesi gerekmektedir.

Elektromagnetik yayılım yapan kaynağın verici gücünden elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğu hesaplanır. Verici antenden belirli uzaklıklarda elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğu hesaplanırken, anten faktörü, anten kazancı ve kablo zayıflama parametreleri bilinirse yayılım yapan işaretin frekansından elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğuna ilişkin hesaplamalar yapılarak grafik ortamında frekansa veya alış gücüne göre çizimler elde edilir. Standartlara uygunluğunun belirlenmesinde yayılım yapan elektronik sistemlerin santimetrede mikro volt değerinde elektrik alan şiddetine ihtiyaç vardır. Elektrik alan şiddetinin (V/m) ve güç yoğunluğunun (mW/cm²) çeşitli birimlere dönüştürülmesi gereklidir.

I. TEMEL ALAN DENKLEMLERİ

Alan teorisinden, serbest uzayda Fraunhofer bölgesinde yani uzak alanda elektrik ve magnetik alan şiddetleri daima aynı fazdadır ve birbirlerine diktir. Gözlem noktasındaki Poyting vektörü

$$\bar{P} = \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*) \text{ Watt/Birim Alan} \quad (1)$$

şeklinde verilir. Burada;

E, volt/m cinsinden elektrik alan şiddeti,

H, amper/m cinsinden magnetik alan şiddetidir.

Gözlem noktasındaki toplam güç, kürenin merkezindeki kaynaktan R yarıçaplı gözlem noktasına doğru küresel yüzey üzerinde güç yoğunluk fonksiyonunun entegrali ile aşağıda gösterildiği biçimde elde edilir.

$$\begin{aligned} P &= \iint \bar{p} \cdot d\bar{a} = \iint (\bar{E} \times \bar{H}^*) \cdot (R^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi) \bar{u} \\ &= \frac{E^2}{\eta_0} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} R^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi \\ &= \frac{E^2}{\eta_0} (4\pi R^2) \quad \text{Watt} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada R kaynak ile gözlem noktası arasındaki uzaklık ve $\eta_0 = 377\Omega = 120\pi$, Serbest uzayın karakteristik empedansıdır.

$$H = \frac{E}{\eta_0} \quad [\text{A/m}]$$

Elektrik alanda depolanan enerji,

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \iiint_V |E|^2 \, dv \quad \text{Joules} \quad (3)$$

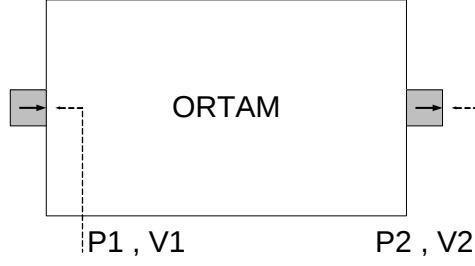
ile tanımlanır. Burada $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$ boşluk veya havanın dielektrik sabitidir, $|E|$, elektrik alan şiddetinin genliğidir. Magnetik alanda depolanan enerji

$$W_m = \frac{\mu_0}{2} \iiint_V |H|^2 \, dv \quad \text{Joules} \quad (4)$$

ile tanımlanır. Burada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ boşluk veya havanın endüktansı veya magnetik geçirgenlik katsayısıdır. $|H|$, magnetik alan şiddetinin genliğidir. Uzak alanda elektrik ve magnetik alan arasındaki ilişki

$$\eta_0 = \frac{E}{H} \quad \Omega. \text{ İle verilir.} \quad (5)$$

II. ÖLÇÜM BİRİMLERİ



- 1) dB- desibel iki güç seviyesi oranı ile tanımlandığından birimsiz sayıdır.

$$dB \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

İki güç seviyesi birbirleri ile orantı temelinde ilişkilidir. Eğer P2 güç seviyesi P1 güç seviyesinden büyük ise dB pozitifdir. Ters durumda negatiftir. $P = \frac{V^2}{R}$, eşit veya aynı direnç değerlerinde gerilimler ölçüldüğünde dB değeri gerilimler cinsinden aşağıdaki biçimde yazılır.

$$dB \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

- 2) dBW- Çıkışta ölçülen P2 [Watt] gücünün, girişte P1= 1W referans gücüne oranının logaritmik değeridir.
- 3) dBm- Çıkışta ölçülen P2 [Watt] gücünün, girişte P1= 1mW=10⁻³ Watt referans gücüne oranının logaritmik değeridir.

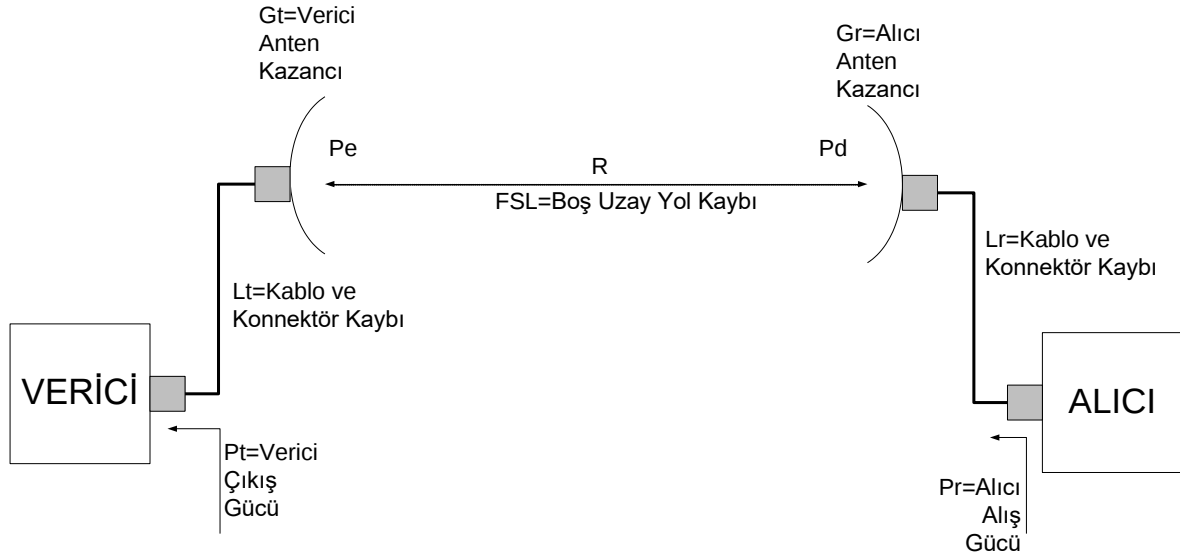
$$dB \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P_2 [\text{watt}]}{10^{-3} [\text{watt}]} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2 [\text{mwatt}]}{1 [\text{mwatt}]} \right)$$

$$\begin{aligned} dBm &= dBW + 30 \\ dBW &= dBm - 30 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dBW &= -30 + dBm = -60 + dB \mu W \\ dBV &= -60 + dBm = -120 + dB \mu V. \end{aligned}$$

III. SERBEST UZAY YOL KAYBI

Serbest uzay yol kaybı, elektromagnetik dalgadan enerjiyi emen hava gibi bir ortamın yok edici zayıflamasından farklıdır. Bir küresel dalgadaki güç yoğunluğu yayılırken uzaklığa bağlı olarak zayıflar.



P_r , alış gücü, antenin önündeki güç yoğunluğu ile alış antenin ışıma açıklığı, anten kazancı ve kablo kaybının çarpılmasıdır. Alıcı antenin önündeki güç yoğunluğu, verici gücü, anten kazancı ile kablo kaybının çarpılıp küresel yüzey alanına bölümüne eşittir. Alış gücü (6) nolu denklem ile tanımlanır. (Friis denklemi)

$$P_r = P_t G_t L_t G_r L_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \text{ Watt} \quad (6)$$

Burada

P_r : alış güç seviyesi, Watt,

P_d : alış güç yoğunluğu, W/m²,

P_t : verici çıkış gücü, Watt,

G_t : verici anten kazancı, (nümerik),

L_t : verici tarafta hat kaybı, (nümerik),

G_r : alıcı anten kazancı (nümerik),

L_r : alıcı tarafta hat kaybı (nümerik),

R : Alıcı verici antenler arasındaki uzaklık (metre),

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Burada

λ , dalga uzunluğu, (metre),

c =ışık hızı= 3×10^8 m/s

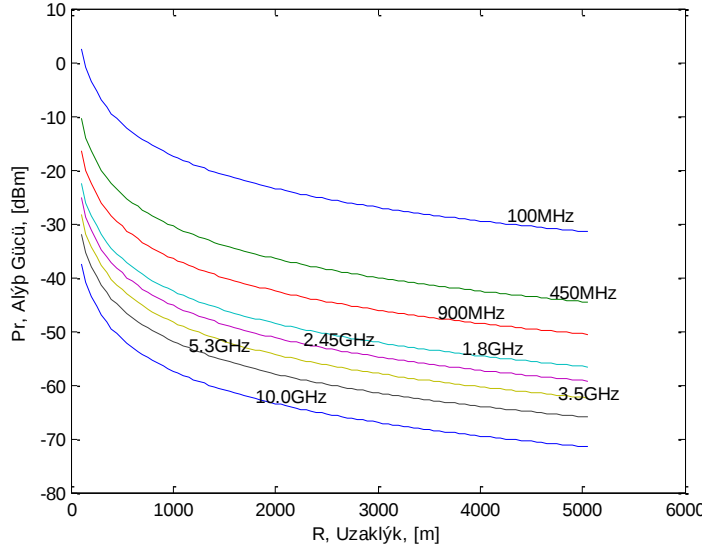
f =frekans (Hz=1/s) dir.

$\frac{\lambda^2}{4\pi}$ is ışıma açıklığıdır. Verici gücü dBW, anten kazancı dBi, kablo kaybı dB olarak verilirse (6) nolu denklemdeki alıcı güç seviyesi dBW olarak hesaplanır (7).

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (7)$$

Son terim serbest uzay yol kaybı olarak adlandırılır.

$$FSL = -20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \text{ dB.}$$



Yol kayıpları

Verici ve alıcı anten arasındaki yol kayıpları propagasyon çevre şartlarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Birebir görüşe sahip birkaç yansımaya sahip Çok yollu bir çevrede yol kayıpları:

$$L_{path} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \frac{d}{d_n} e^{-jk(d_n - d)} \right|^2$$

Burada d doğrudan 2 anten arasındaki uzaklık, Γ_n n. Sayıdaki objenin yansıma sabiti d_n n. Objenin doğrudan alıcı antene uzaklığı N toplam yansıma sayısı. Topraktaki yansıyan sinyalin genliği ve fazı dalga polarizasyonuna oluş açısına ve toprak özelliğine bağlıdır. Birbirini takip eden topraktan gelen yansıma modelindeki yol kayıpları:

$$L_{path} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 - \frac{d}{d_1} e^{-jk(d_1 - d)} \right|^2$$

Buradaki d birebir görüşteki alıcıya olan mesafe $d_1 = \sqrt{d^2 + (2h)^2}$ yansımış yol uzunluğu. Uzun mesafelerde ise ($d \gg 4\pi h^2 / \lambda$), denklemde verilen yol kaybı d^{-4} ile orantılı hale gelir.

Alıcı bölgesindeki sinyal gücü yol kaybı formülünden bulunur:

$$P_{tag} = P_t G_t L_{path}$$

IV. VERİCİ GÜCÜNDEN ELEKTRİK ŞİDDETİNİN HESAPLANMASI

Verici antenden R metre uzaktaki güç yoğunluğu

$$P_d = \frac{P_t G_t L_t}{4\pi R^2} \quad W/m^2 \quad (8)$$

Serbest uzaydaki uzak alanda elektromagnetik dalganın taşıdığı güç yoğunluğu (2) nolu denklemde verilen elektrik alan şiddetinden hesaplanır.

$$P_d = \frac{E^2}{\eta_0} = \frac{E^2}{120\pi} \quad W/m^2 \quad (9)$$

(8) ve (9) nolu denklemlerden elektrik alan şiddeti güç yoğunluğu ya da verici gücü cinsinden hesaplanabilir.

$$E = \sqrt{120\pi P_d} = 19.4\sqrt{P_d} = \frac{5.48}{R} \sqrt{P_t G_t L_t} \quad V/m. \quad (10)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik olarak ifadesi (11) ve (12) denklemlerinde verildiği gibidir.

$$P_d = -11\text{dB} - 20 \log_{10}(R) + P_t (\text{dBW}) + G_t (\text{dBi}) - L_t (\text{dB}) \quad \text{dBW}/m^2 \quad (11)$$

$$E = 14.8\text{dB} - 20 \log_{10}(R) + P_t (\text{dBW}) + G_t (\text{dBi}) - L_t (\text{dB}) \quad \text{dBV}/m \quad (12)$$

(12) nolu denklemden (11) nolu denklem çıkarılırsa dBW/m² cinsinden güç yoğunluğu dBV/m cinsinden yazılır.

$$E = 25.8 \text{ dB} + P_d (\text{dBW}/m^2) \text{ dBV}/m. \quad (13)$$

V. ALIŞ GÜCÜNDEN ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN HESAPLANMASI

Alıcı antenin ışıma açıklığında güç yoğunluğu, alış gücünün anten kazancı, kablo kaybı ve anten ışıma açıklığına bölümüne eşittir.

$$P_d = \frac{4\pi P_r}{\lambda^2 G_r L_r} \quad W/m^2 \quad (14)$$

(14) nolu denklemi (10) nolu denklemde yerine koyarsak elektrik alan şiddetini V/m cinsinden elde ederiz.

$$E = \frac{68.77}{\lambda} \left(\frac{P_r}{G_r L_r} \right)^{1/2} \quad V/m \quad (15)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik ifadesi (16) ve (17) nolu denklemlerde verilmiştir.

$$P_d = 11\text{dB} - 20 \log_{10}(\lambda) + P_r \text{ dBW} - G_r \text{ dB}_i - L_r \text{ dB} \quad \text{dBW}/m^2 \quad (16)$$

$$E = 36.8\text{dB} - 20 \log_{10}(\lambda) + P_r \text{ dBW} - G_r \text{ dB}_i - L_r \text{ dB} \quad \text{dBV}/m \quad (17)$$

VI. ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN ALICI DEVRENİN GİRİŞ GERİLİMİ CİNSİNDEN İFADESİ

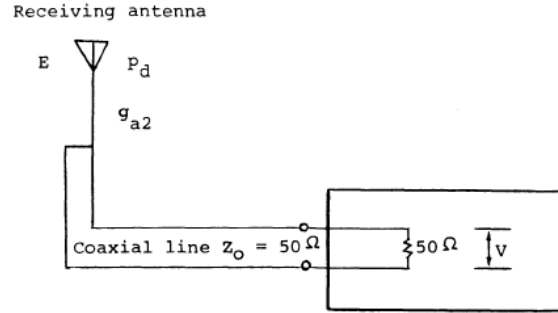


Fig. 4. Field intensity in terms of receiving voltage.

Antenden gelen işaretin maksimum, kayıpsız ve yüksek verimde alıcı devreye aktarılması için giriş empedansının konjügesinin antenin çıkış empedansına eşit olması gerekmektedir.

Antenin çıkış empedansı 50 ohm, hattın karakteristik empedansı 50 ohm ve alıcı devrenin giriş empedansı 50 ohm ise alış gücü (18) denklemi ile belirtilir.

$$P_r = \frac{V^2}{R} \quad W \quad (18)$$

Anten ışıma açıklığında güç yoğunluğu ise

$$P_d = \frac{0.251 V^2}{\lambda^2 G_t L_t} \quad W/m^2, \quad (19)$$

Alan şiddeti ise (10) nolu denklemden

$$E = \frac{9.7 V}{\lambda} \left(\frac{1}{G_t L_t} \right)^{1/2} \quad V/m \quad \text{olur.} \quad (20)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik ifadesi (16) ve (17) nolu denklemlerde verilmiştir.

$$P_d = -6 dB - 20 \log_{10}(\lambda) + V \text{ dBV} - G_t \text{ dB}_i - L_t \text{ dB} \quad \text{dBW}/m^2 \quad (21)$$

$$E = 19.8 \text{ dB} - 20 \log_{10}(\lambda) + V \text{ dBV} - G_t \text{ dB}_i - L_t \text{ dB} \quad \text{dBV}/m \quad (22)$$

Üretici tarafından belirtilen antenin en önemli özelliklerinden biride anten faktörüdür. Alıcı gücü ölçüldüğünde elektrik alan şiddeti ve giriş gerilimi bulunduğunda anten faktörü (23) nolu denklem ile hesaplanır.

$$\text{AntenFaktör (AF)} = \frac{E}{V} = 19.8 - 20 \log_{10}(\lambda) - G_r - L_r \quad \text{dB}$$

VII. SAR specific absorption rates

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} = \frac{J^2}{\sigma\rho}$$

J: Electric Current Density [A/m²]

Burada, E [V/m], σ [S/m] ve ρ [kg/m³]

ilgilenilen noktaya ait, sırasıyla elektrik alan şiddeti, iletkenlik ve doku yoğunluklarını göstermektedir.

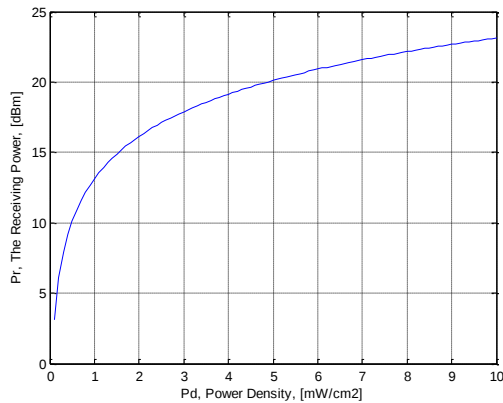
$$\rho = 1.04 \text{ gr/m}^3$$

$$J = \frac{\sigma E}{\sqrt{2}} \text{ A/m}^3 \quad \text{Analog alan değişimlerinde}$$

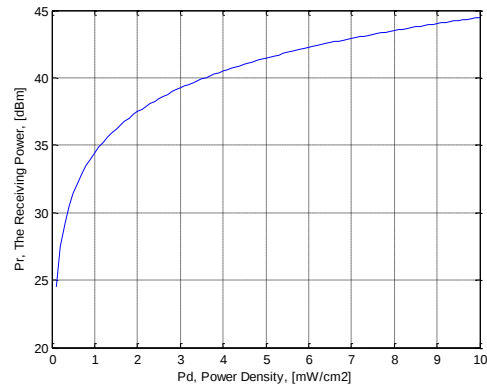
VIII. SAYISAL SONUÇLAR

Örnek -1

Alıcı anten kazancı 12.5 dBi, Alıcı taraftaki kablo ve konektör kaybı 3 dB, Koaksiyel kablo ve giriş empedans 50 ohm, İşaret frekansı 10.5GHz ve 900Mz için Güç yoğunluğu 1 mWatt/cm² ile 10 mWatt/cm² değişim için Pr değerlerini dBm olarak bulunması



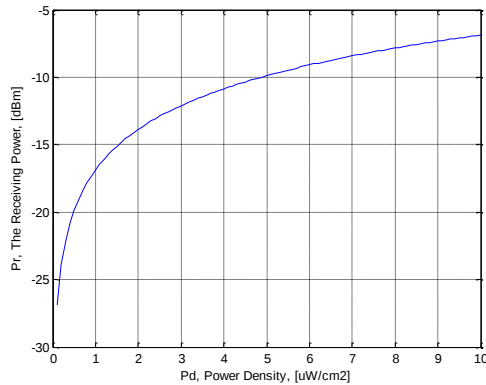
Şekil.1.a f=10.5 GHz



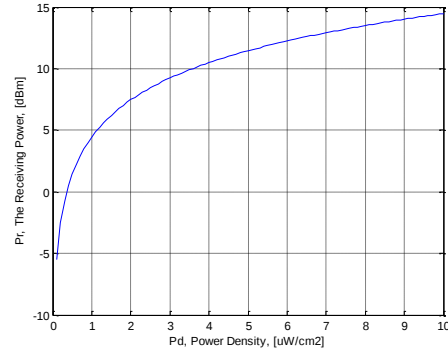
Şekil.1.b f=900MHz

Örnek -2

Alıcı anten kazancı 12.5 dBi, Alıcı taraftaki kablo ve konektör kaybı 3 dB, Koaksiyel kablo ve giriş empedans 50 ohm, İşaret frekansı 10.5GHz ve 900MHz için Güç yoğunluğu 1 uWatt/cm² ile 10 uWatt/cm² değişim için Pr değerlerini dBm olarak bulunması



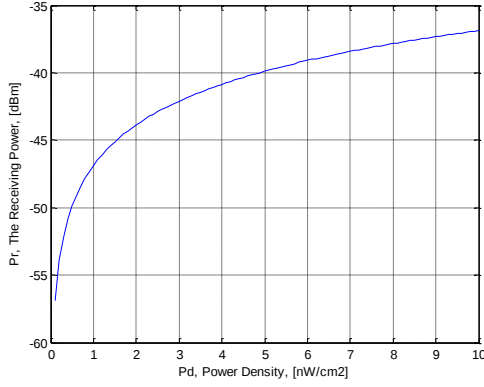
Şekil.2.a f=10.5 GHz



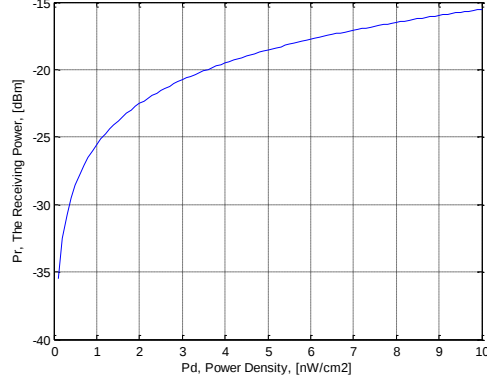
Şekil.2.b f=900MHz

Örnek -3

Alıcı anten kazancı 12.5 dBi, Alıcı taraftaki kablo ve konektör kaybı 3 dB, Koaksiyel kablo ve giriş empedans 50 ohm, İşaret frekansı 10.5GHz ve 900 MHz iken Güç yoğunluğu 1 nWatt/cm² ile 10 nWatt/cm² değişim için Pr değerlerini dBm olarak bulunması



Şekil.3.a f=10.5 GHz

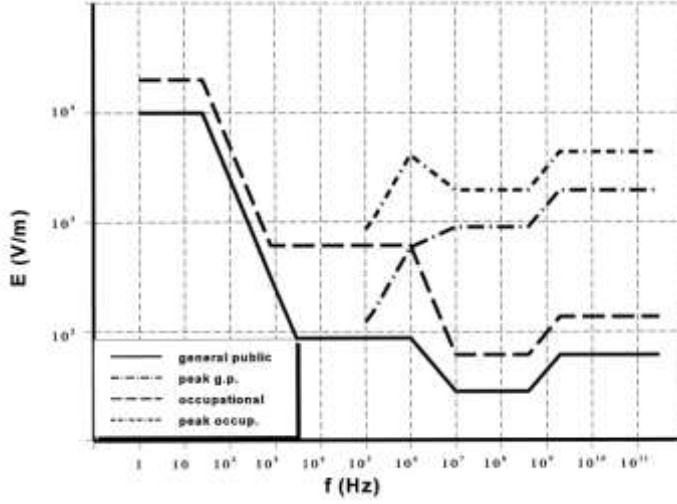


Şekil.3.b f=900MHz

IX. MİKRODALGA YAYINIMININ SAĞLIĞA ETKİLERİ

Arthur Firstenberg' in Microwaving Our Planet kitabında insan sağlığı açısından üzerinde durulacak noktalar;

- Firstenberg (p. 41) de elektromagnetik dalga ile ışınlama beyin dokusundaki kalsiyum iyonlarının değişimine neden olduğunu belirtmektedir.
- Chiang et al. (1989), yaptığı çalışmalarda; 0–4 mW/cm² ile 120 mW/cm².” (p. 22) Arasındaki radyo dalgalarının beyaz kan hücrelerini hareketlendirdiğini gözlemlemiştir.
- Kan üzerine yapılan diğer bir çalışmada, Guinea domuzları üzerinde 30 gün boyunca 1, 5, 10, ve 50 mW/cm² elektromagnetik güç yoğunluğu uygulandığında kan akışındaki değişimlerin 1 mW/cm² büyük etki gösterdiği , ve 50 mW/cm² daha az etki gösterdiği gözlenmiştir.
- Almanya daki Medical University of Lubeck den Dr. Lebrecht von Klitzing, Bazı insanların 10 nanowatts/cm² den düşük güç yoğunluklarında bile hastalandığını ileri sürmüştür. Dr. Lebrecht bebeklerin 1 nanowatt/cm² güç yoğunluklarında bile etkilenecek kadar hassas olduğunu söylemiştir.
- IRPA (International Radiation Protection Association) genel halk için maruz kalınacak güç yoğunluğu seviyesinin 1mW/cm², Radyo Frekansında çalışanların ise 5mW/cm² olduğunu önerir. Maruz kalma limitleri 6 dakika ile sınırlandırılmıştır.
- Genel kabul mikrodalga ışımanın vücut organlarında emilen enerji ile ilgili olduğudur. Duyarlı organlar; Göz, Baş ve beyindir. Mikrodalga frekanslarında çalışanların baş ağrısı, Göz yorgunluğu, Aşırı halsizlik, bitkinlik, uykusuzluk tan şikayet ettikleri raporlanmıştır. Bunların tümünün mikrodalga vücut sinir sistemini etkilemesi ile ilgili olduğu görülmektedir.



10MHz ve 6GHz arasındaki frekans aralığında, etkilere karşı korumak için SAR birimi kullanılır. 6 GHz den 300GHz e kadarki frekanslarda ise vücut yüzeyine yakınındaki organlarda ısıtmadan korunmak için elektromagnetik dalganın güç yoğunluğunun zamandaki ortalaması dikkate alınır. Bu frekans aralığında organlara elektrik alanın girme derinliği küçük olduğundan, ve emilen enerjiyi değerlendirmedeki sıkıntılardan dolayı SAR iyi bir ölçüm değildir.

X. RADYO FREKANSI YAYINIMLARINDAN KORUNMA STANDARTLARI

1. IEEE Std C95.1™-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991,1999)
2. ARPANSA, Maximum Exposure Levels to radiofrequency Fields – to 3KHz to 3GHz
3. U.S. MILITARY RESEARCH AND EXPOSURE STANDARDS, HEALTH AND SAFETY OF RADIO FREQUENCY RADIATION (NON-IONIZING RADIATION)
4. IRPA, International Radiation Protection Association Recommendations

XI. KAYNAKLAR

1. Measurements and Computations of Electric Field Intensity and Power Density, SAMUEL Y. LIAO, MEMBER, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. IM-26, NO. 1, MARCH 1977
2. GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP Guidelines
3. The Electrical Conductivity of Human Cerebrospinal Fluid at Body Temperature, Stephen B. Baumann,* David R. Wozny, Shawn K. Kelly, and Frank M. Meno, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 44, NO. 3, MARCH 1997
4. Biological Effects of Radio-Frequency/Microwave Radiation, Eleanor R. Adair, Fellow, IEEE, and Ronald C. Petersen, Fellow, IEEE, TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002
5. RADIATION PROTECTION STANDARD Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields — 3 kHz to 300 GHz, ARPANSA, May, 2002
6. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE C95.1-1991, 1999,2005