



Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM 465 - Elektromanyetik Uyumluluk Ölçme
Teknikleri



10. Ekranlama

2

Ekranlama

- Ekranlama, elektromanyetik enerjinin belli bir bölgeye girişini kısmen veya tamamen engellemek ya da belli bir bölgeden çıkışını yine kısmen veya tamamen engellemek üzere yapılan işlemin adıdır.
- Ekranlama için genel olarak iletkenlik seviyeleri yeterli metal malzemeler kullanılır.
- Ekranlama açısından üç temel mekanizma söz konusudur: Yansıma, soğrulma, iletim

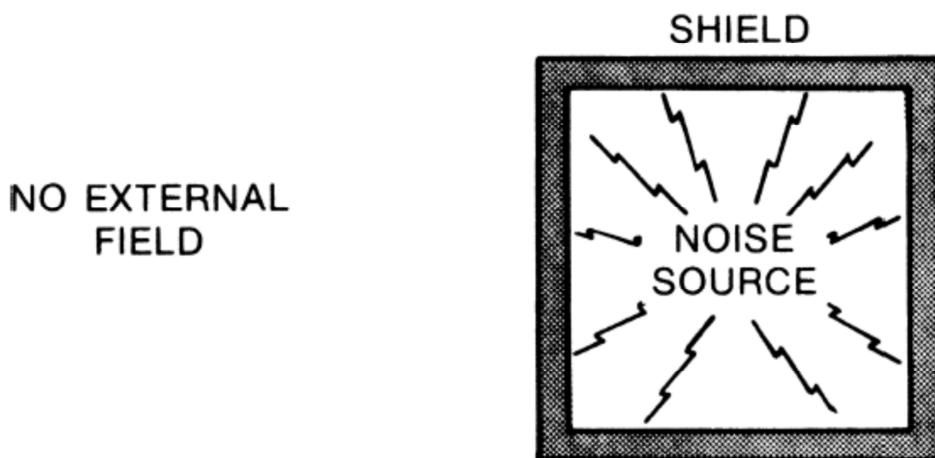


• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

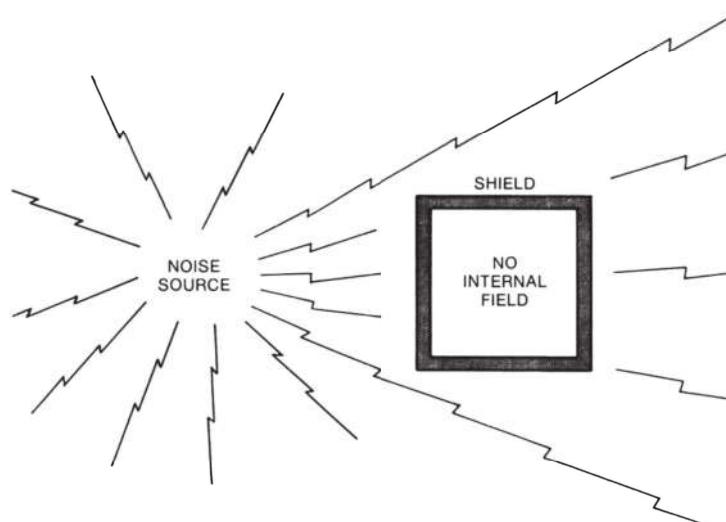
Ekranolamanın Uygulanma Yeri



Gürültü kaynağına uygulanan ekranlama



Ekranolamanın Uygulanma Yeri



Alicuya uygulanan ekranlama



Yakın Alan ve Uzak Alan

- Bir elektromanyetik enerjinin karakteristiği temel olarak kaynağın konumu, ortam ve gözlem noktasının kaynağa göre konumu temel alınarak incelenir.
- Kaynağa belli bir mesafenin altındaki uzaklıklar yakın alan (indüksiyon) alanı, söz konusu bu mesafenin üstündeki uzaklıklar uzak alan (ışırma alanı) olarak tanımlanır.



Yakın Alan – Uzak Alan Kriteri

Uzak alan kriterleri aşağıdaki gibidir:

- Anten boyutu dalga boyundan küçükse (Yönsüz antenler için):

$$\frac{\lambda}{2\pi}$$

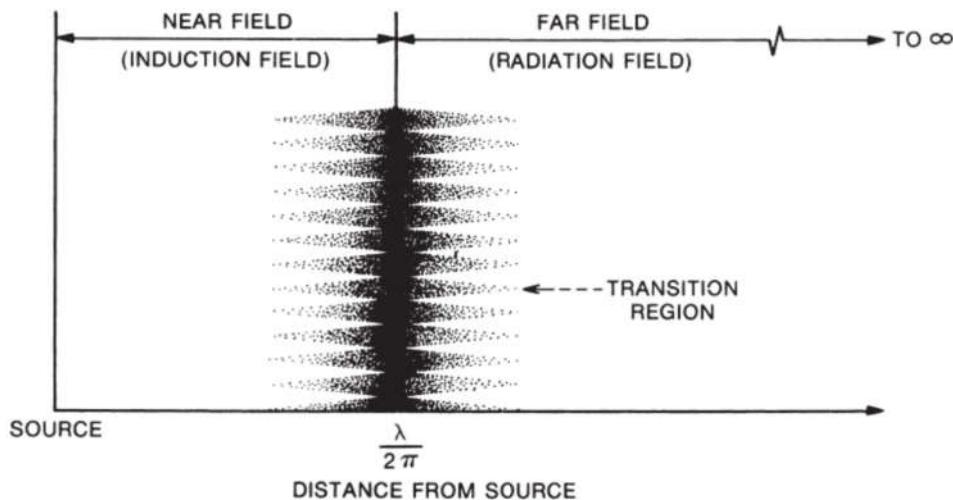
- Anten boyutu dalga boyundan büyükse (Yönlendirilmiş antenler için): (D antenin boyu)

$$\frac{2D^2}{\lambda}$$

Elektrik alan ve manyetik alan arasındaki oran uzak alan koşulları altında sabit olup değerini 377'dir. ($E/H = Z_0 = 377\Omega$)



Yakın Alan ve Uzak Alan



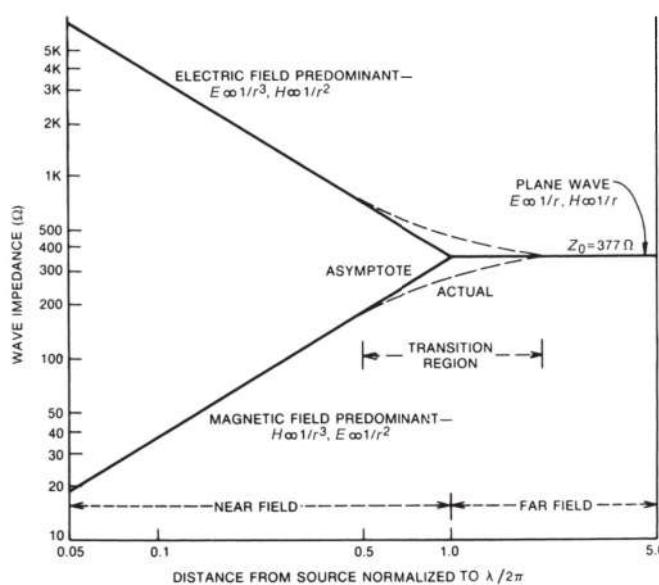
Yakın alan ve uzak alan bölgeleri



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

Yakın Alan ve Uzak Alan



Kaynaktan
uzaklığa göre
dalga
empedansının
değişimi



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

Dalga Empedansı

- Malzeme için üç temel sabit söz konusudur:
 - ϵ : Dielektrik sabiti (boşluk için $\epsilon_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ F/m)
 - μ : Manyetik geçirgenlik (permeabilite) (boşluk için $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
 - σ : İletkenlik (bakır için $\sigma_{Cu} = 5.8\pi \cdot 10^7$ S/m)
- Bir elektromanyetik dalga için dalga empedansı:

$$Z_w = \frac{E}{H}$$



Dalga Empedansı ve Karakteristik Empedans

- Bir elektromanyetik dalga için dalga empedansı:

$$Z_w = \frac{E}{H}$$

- Ortama ilişkin karakteristik empedans:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$$

- Uzak alanda düzlem dalga için dalga empedansı karakteristik empedansa eşittir.



Dalga Empedansı ve Karakteristik Empedans

- Yalıtkanlar için $\sigma \ll j\omega\epsilon$ olduğundan karakteristik empedans aşağıdaki gibi frekanstan bağımsız verilebilir:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \sigma \ll j\omega\epsilon$$

- Buradan gerekli sabitler yerine yazılırsa boşluk için:

$$Z_0 = 377\Omega$$



Dalga Empedansı ve Karakteristik Empedans

- İlketkenler için $\sigma \gg j\omega\epsilon$ ilişkisi geçerlidir. Bu durumda karakteristik empedans (ekranlama empedansı da denir):

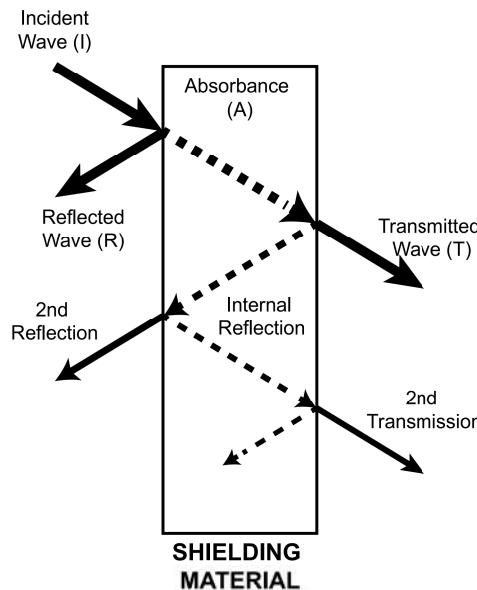
$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j) \quad \sigma \gg j\omega\epsilon$$

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = 3.68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} f$$

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = 3.68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} f$$



Ekranlama Etkinliği



**Ecran malzemesi
ile karşılaşan
elektromanyetik
dalganın yayının
bileşenleri**



Ekranlama Etkinliği

- Ekranlama etkinliği elektrik ve manyetik alanlar göz önüne alınarak dB biriminde aşağıdaki gibi verilir.

$$S_{dB} = 20 \log_{10} \frac{E_i}{E_t}$$

$$S_{dB} = 20 \log_{10} \frac{H_i}{H_t}$$

- Yansıma (R), absorbsiyon (A), çoklu yansıtma (M) bileşenleri göz önüne alınarak ekranlama etkinliği yine dB biriminde aşağıdaki gibi verilir.

$$S_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB}$$



Deri Etkisi

- Elektromanyetik dalgaların mükemmel olmayan iletken içine girmeleri deri etkisi (skin effect), girdikleri seviye de deri kalınlığı olarak adlandırılır.
- Mükemmel olmayan bir iletkende DC akımlar için kesit boyunca homojen bir akım dağılımı görülür. AC akımlar için indüklenen gerilim elektrik yüklerinin iletkenin dışına doğru yönelmesine neden olur (deri etkisi).
- Dalganın zayıflayarak %37 (1/e) seviyesine düşüğü nokta deri kalınlığı olarak tanımlanır.



Deri Kalınlığı

- Deri kalınlığı:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} [m]$$

- Boşluğa ilişkin manyetik geçirgenlik ve bilinenler yerine yazılırsa:

$$\delta = \frac{1}{\pi \mu_0} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \cong 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$



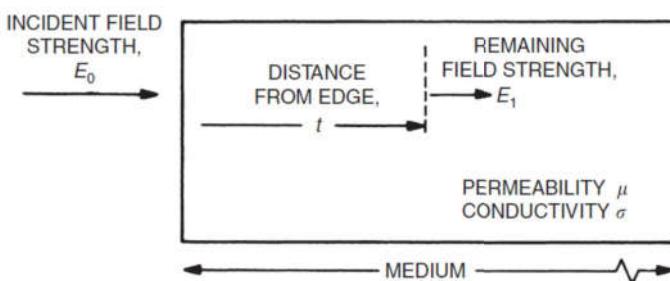
Deri Kalınlığı

f	δ
50 Hz	9.35 mm
60 Hz	8.53 mm
100 Hz	6.61 mm
1 kHz	2.09 mm
10 KHz	0.66 mm
100 kHz	0.21 mm
1 MHz	66.09 μm
10 MHz	20.90 μm
100 MHz	6.61 μm
1 GHz	2.09 μm
10 GHz	0.66 μm
100 GHz	0.21 μm

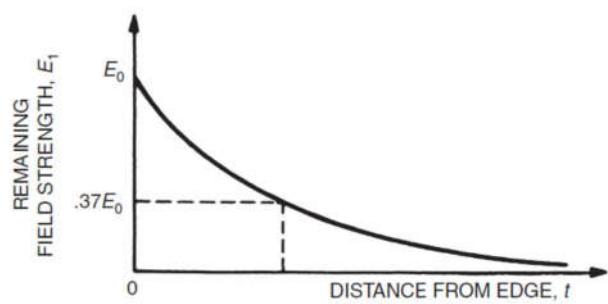
Bakır için çeşitli frekanslardaki deri kalınlığı değerleri



Deri Kalınlığı



Elektromanyetik dalganın uzaklıkla eksponansiyel olarak zayıflaması



Deri Kalınlığı

Çeşitli malzemeler için farklı frekanslardaki deri kalınlığı değerleri

Frekans	Bakır (in)	Alüminyum (in)	Çelik (in)	Mumetal (in)
60 Hz	0.335	0.429	0.034	0.014
100 Hz	0.260	0.333	0.026	0.011
1 kHz	0.082	0.105	0.008	0.003
10 kHz	0.026	0.033	0.003	—
100 kHz	0.008	0.011	0.0008	—
1 MHz	0.003	0.003	0.0003	—
10 MHz	0.0008	0.001	0.0001	—
100 MHz	0.00026	0.0003	0.00008	—
1000 MHz	0.00008	0.0001	0.00004	—



Yutma Kaybı

- Ortama giren elektromanyetik dalganın genliği uzaklıkla eksponansiyel olarak azalır.

$$E_t = E_i e^{-t/\delta}$$

$$H_t = H_i e^{-t/\delta}$$

Burada δ deri kalınlığıdır.



Yutma Kaybı

- Ekran üzerinde yutma nedeniyle oluşan kayıp

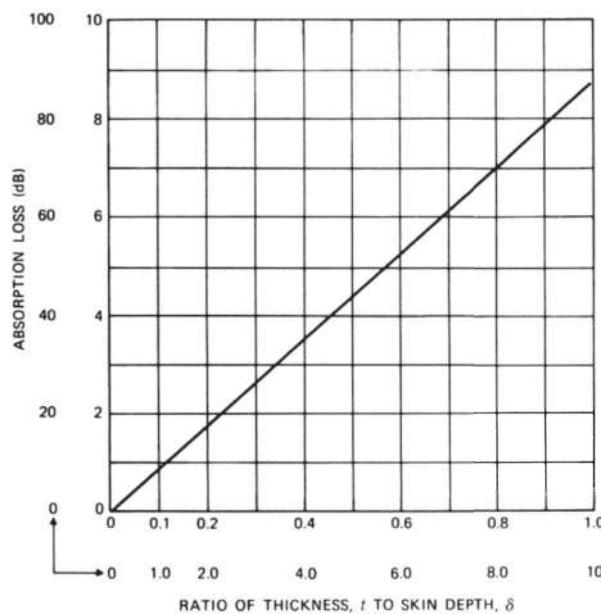
$$S_{A_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{E_i}{E_t} = 20 \log_{10} e^{\frac{t}{\delta}}$$

$$S_{A_{dB}} = 20 \frac{t}{\delta} \log_{10} e = 8.69 \frac{t}{\delta}$$

$$S_{A_{dB}} = 3.34 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$$



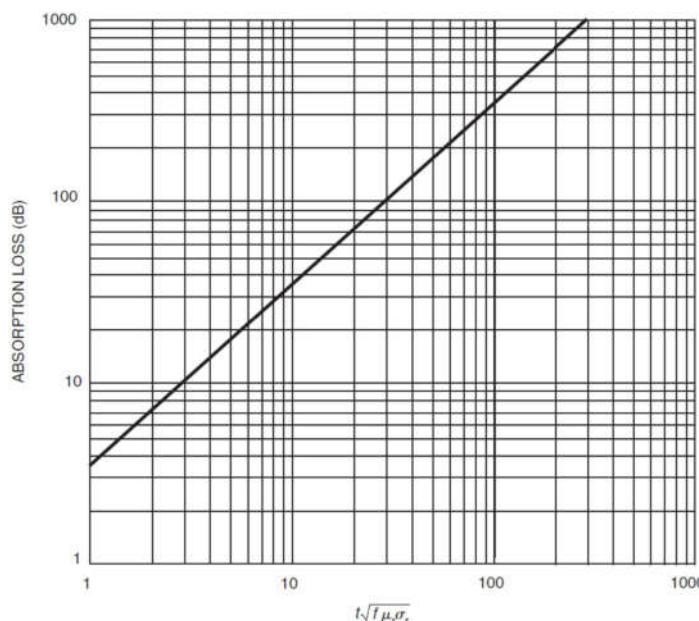
Yutma Kaybı



t/δ oranına bağlı olarak yutma kaybı karakteristiği



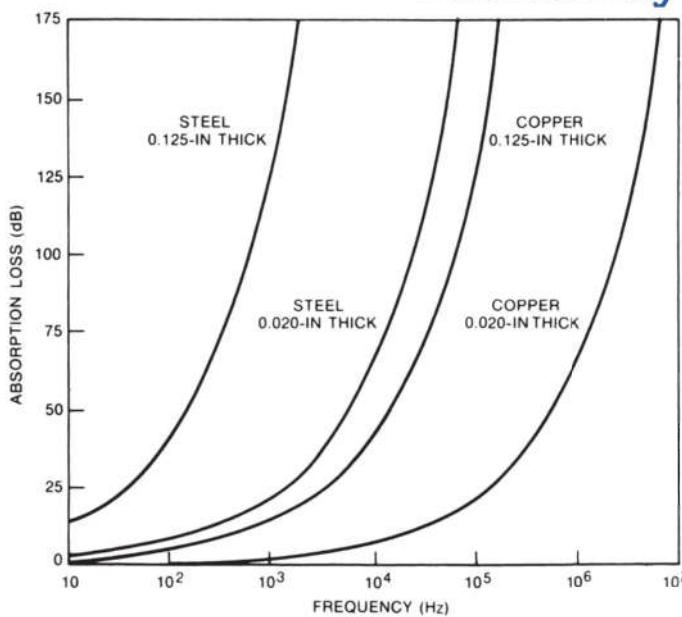
Yutma Kaybı



Universal yutma
kayıbı karakteristiği



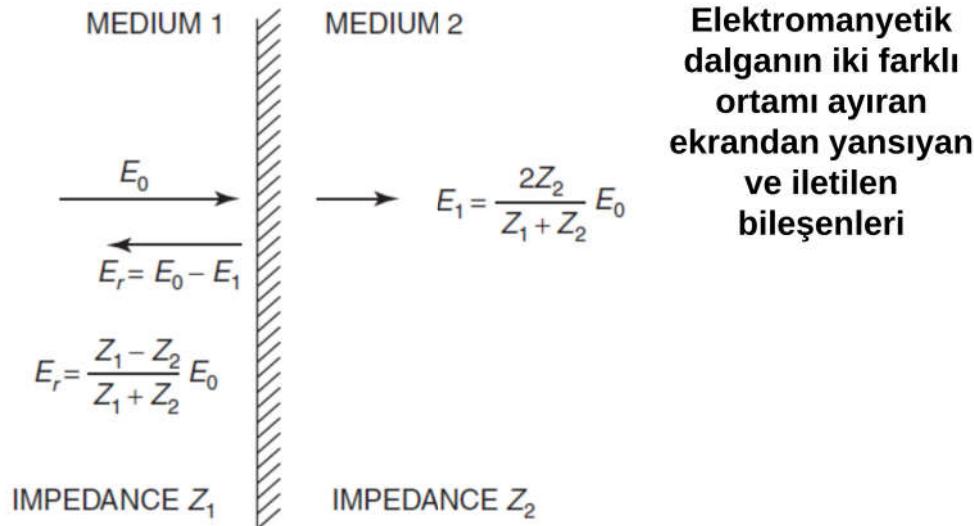
Yutma Kaybı



Farklı kalınlıklarda
çelik ve bakırın
frekansa bağlı
yutma kaybı
karakteristiği



Yansıma Kaybı



Yansıma Kaybı

- Ortam empedansları dikkate alınarak iletilen alan bileşenin belirlenmesi:

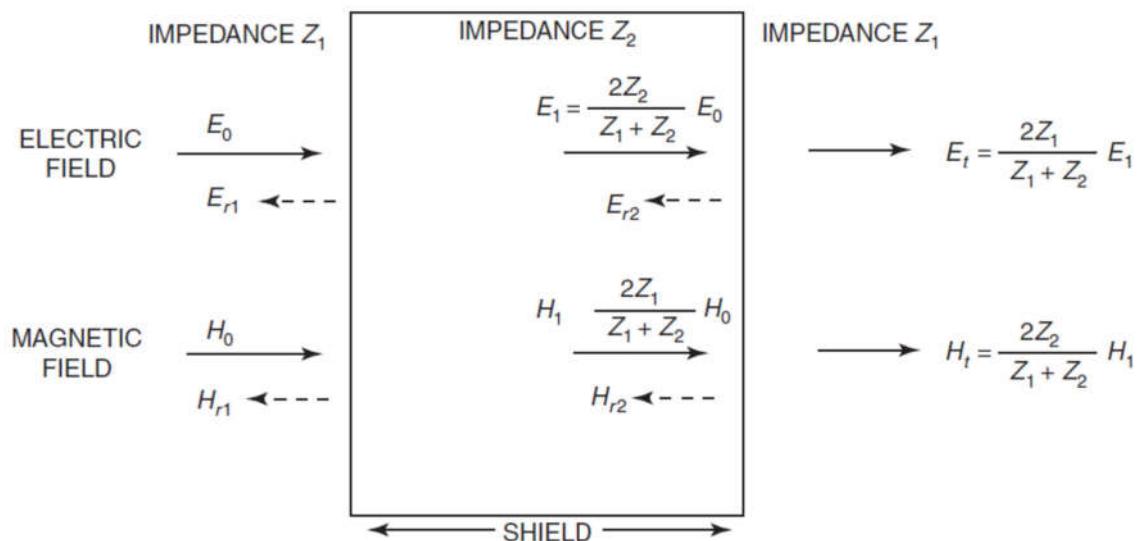
$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0$$

- Ekran üzerinden iletilen elektromanyetik dalga iki sınır ile karşılaşır.

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1 \quad H_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1$$



Yansıma Kaybı



Ekranın her iki sınırında meydana gelen iletim ve yansımalar



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

Yansıma Kaybı

- Ekran kalınlığı deri kalınlığı ile kıyaslandığında yeteri kadar fazla ise bağıntılar yutma kaybı da ihmal edilerek toplam yansımalar aşağıdaki gibi düzenlenlenebilir:

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0 \quad H_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_0$$



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

Yansıma Kaybı

- Ekran metalik ve etrafındaki bölge dielektrik ise $Z_1 \gg Z_2$ olacağı aşıkardır.

$$E_t = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad H_t = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0$$

- Bu durumda ekran malzemesinde elektrik alan için girişte (ilk sınır), manyetik alan için çıkışta (ikinci sınır) yüksek oranda yansıma (düşük oranda iletim) söz konusu olur.
- Bu çerçevede elektrik alan için ince bir materyal bile iyi bir ekranlama özelliği sergiler. Fakat manyetik alan için ikinci sınır önemli olduğundan, çoklu yansımalar adı verilen ekran içindeki etkiler nedeniyle ekranlama özelliği büyük ölçüde azalır.



Yansıma Kaybı

- Z_1 yerine dalga empedansı, Z_2 yerine ekran empedansı yazılarak yansıma için ekranlama:

$$S_{R_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{E_0}{E_1} = 20 \log_{10} \frac{Z_1}{4Z_2} = 20 \log_{10} \frac{|Z_w|}{4|Z_s|}$$

- Bağıntı ekrana normal olarak gelen düzlem dalga için oluşturulmuştur. Açıının farklı olması durumunda yansıma açı ile birlikte artacaktır.



Düzlem Dalga İçin Yansıma Kaybı

- Düzlem dalga için (uzak alan koşulları) dalga empedansı boşluğun karakteristik empedansına (377Ω) eşittir. Bağıntı buna göre düzenlenirse:

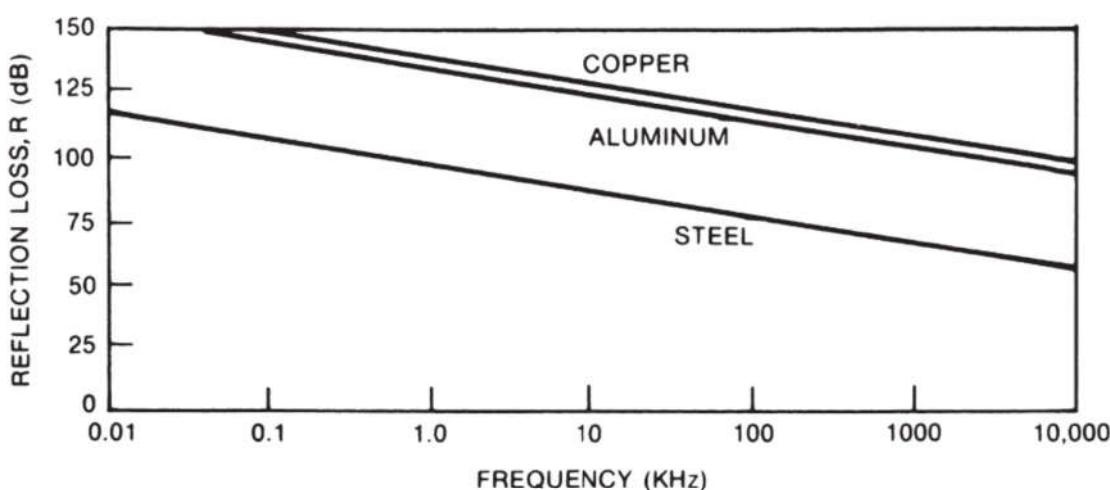
$$S_{R_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{94.25}{|Z_s|}$$

- Yüksek ekran empedansının ekranlama seviyesini düşürdüğü açıktır.
- Ekran empedansının yerine eşdeğeri yazılırsa:

$$S_{A_{dB}} = 168 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{f \mu_r} \right)$$



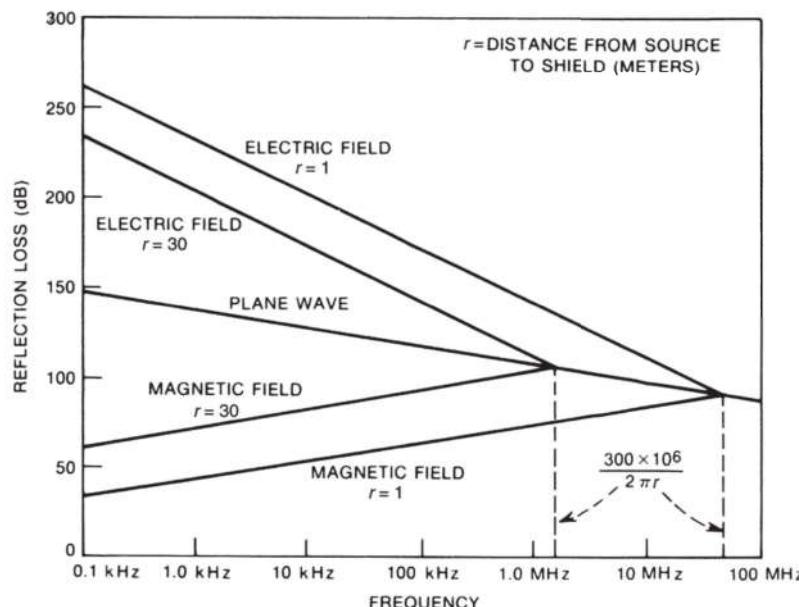
Düzlem Dalga İçin Yansıma Kaybı



Düzlem dalga için farklı malzemeler göz önüne alınarak frekansa bağlı yansıtma kaybı değişimi



Yakın Alanda Yansıma Kaybı



Bakır ekran malzemesinde kaynaktan farklı uzaklıklar için frekansa bağlı yansıtma kaybı değişimi



Elektrik Alan Yansıma Kaybı

- $r < \lambda/2\pi$ koşulu altında dalga empedansı

$$|Z_{w,E}| = Z_0 \frac{\lambda}{2\pi r} [\Omega]$$

$$|Z_{w,E}| = \frac{\lambda}{2\pi f \epsilon r} [\Omega]$$

$$S_{R,E_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{1}{8\pi f \epsilon r |Z_s|} = 20 \log_{10} \frac{4.5 \cdot 10^9}{fr |Z_s|}$$

$$S_{R,E_{dB}} = 332 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right)$$



Manyetik Alan Yansıma Kaybı

- $r < \lambda/2\pi$ koşulu altında dalga empedansı

$$|Z_{w,M}| = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda} [\Omega]$$

$$|Z_{w,M}| = 2\pi f \mu r [\Omega]$$

$$S_{R,M_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{2\pi f \mu r}{4|Z_s|} = 20 \log_{10} \frac{1.97 \cdot 10^{-6} fr}{|Z_s|}$$

$$S_{R,M_{dB}} = 14.6 + 10 \log_{10} \left(\frac{fr^2 \sigma_r}{\mu_r} \right)$$



Yansıma Kaybı İçin Toplam Durum

- Çoklu yansımalar ihmal edilerek yansıma kaybı için aşağıdaki genelleştirilmiş bağıntı elde edilir.

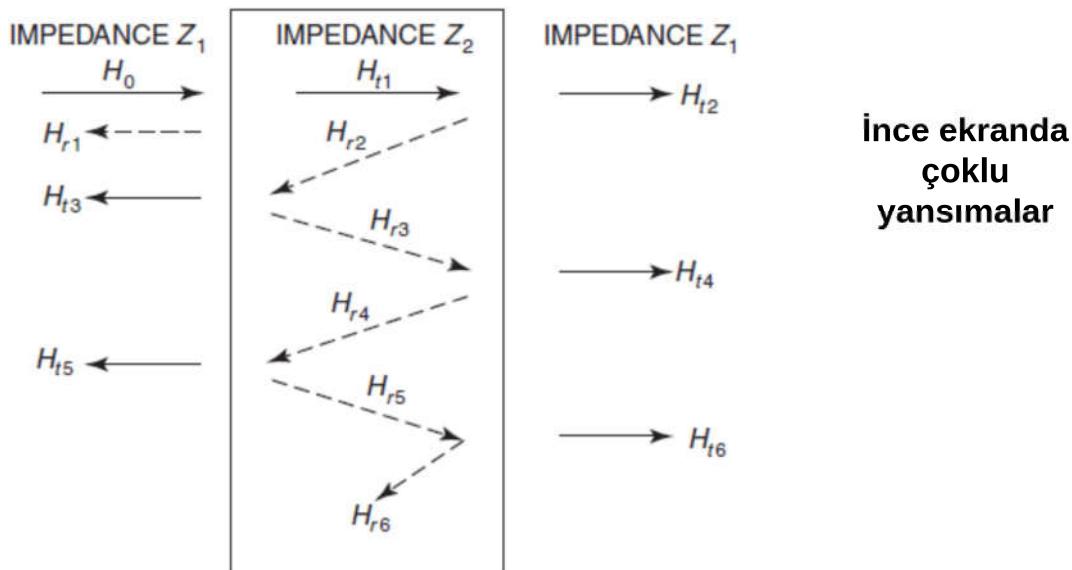
$$S_{R_{dB}} = C + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right)$$

Genelleştirilmiş yansıma kaybı bağıntısı için sabitler.

Alan Türü	C	N	m
Elektrik Alan	322	3	2
Düzlem Dalga	168	1	0
Manyetik Alan	14.6	-1	-2



Çoklu Yansımlar



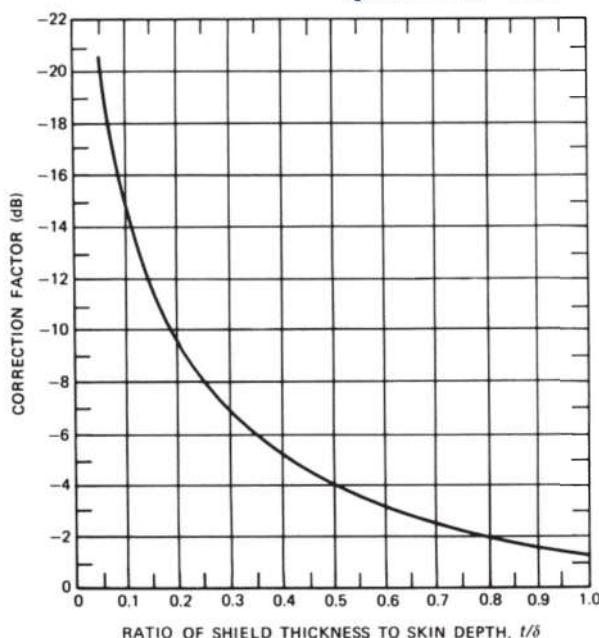
Çoklu Yansımlar

- Elektrik alan için $Z_2 \ll Z_1$ için ince bir materyal bile iyi bir ekranlama özelliği sergiler. Fakat manyetik alan için $Z_2 \ll Z_1$ için dalga büyük ölçüde birinci sınırdan geçtiğin çoklu yansımalar mutlaka dikkatle göz önüne alınmalıdır. Manyetik alan için bu çerçevede çoklu yansımalara ait bileşen:

$$S_{M_{dB}} = 20 \log_{10} \left(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right)$$



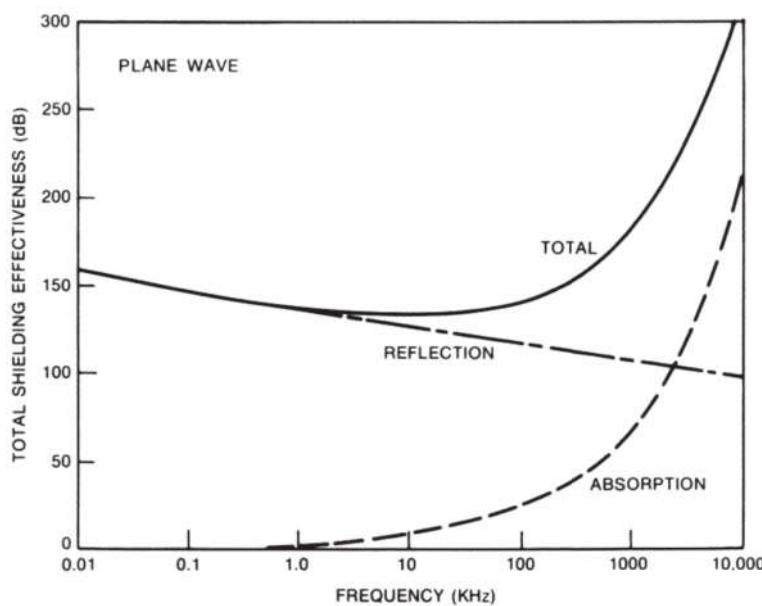
Çoklu Yansımlar



Çoklu
yansımlara
ait bileşenin
 t/δ ile
değişimi



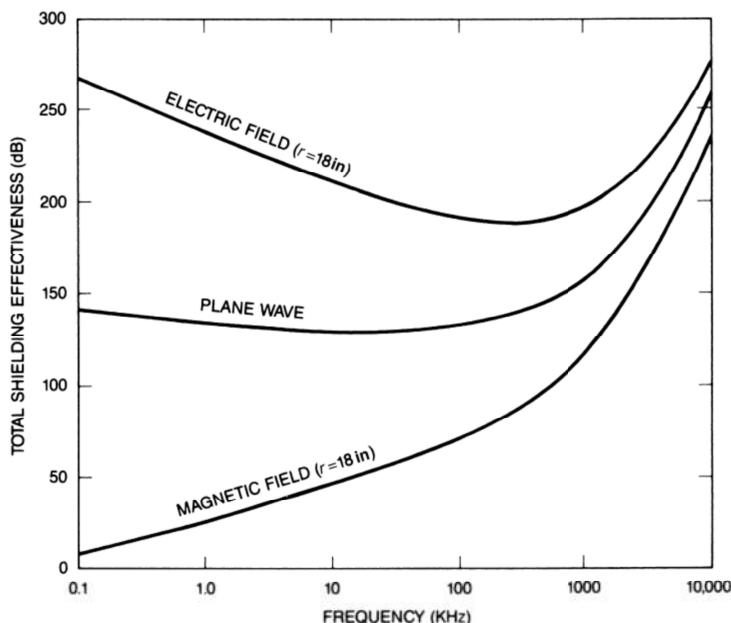
Yansıma ve Yutma Kayıplarının Toplam Etkisi



0.02 in bakır
ekran için
uzak alanda
yansıma ve
yutma kayıbü
bileşenlerini
n ve toplam
ekranlama
seviyesinin
frekansa
bağlı
değişimi



Etkisi



0.02in bakır ekran için elektrik alan, düzlem dalga ve manyetik alan durumları için toplam ekranlama seviyesinin frekansa bağlı değişimi



Elektrik Alan İçin Yansıma ve Yutma

Kayıplarının Toplam Etkisi

- Elektrik alan için düşük freksnlarda yansıtma, yüksek freksnlarda yutma kaybı temel ekranlama mekanizmasıdır.
- Yansıtma seviyeleri yüksek olduğundan elektrik alan için çoklu yansıtma etkisi ihmal edilebilir.



Manyetik Alan İçin Yansıma ve Yutma

Kayıplarının Toplam Etkisi

- Manyetik alan için hem yansıtma hem de yutma kaybı bileşenleri göz önüne alınmalıdır.
- Eğer ekran kalınsa bu nedenle yutma kaybı yüksekse ($>9\text{dB}$) manyetik alanda çoklu yansımalara ilişkin bileşen ihmali edilebilir. Ekran ince ise bu bileşen göz önüne alınmalıdır.
- Yakın alanda düşük frekans manyetik alan için yansıtma kaybı düşüktür. Manyetik alan için temel kayıp yutma temelliidir. Düşük frekanslarda bu iki bileşen de düşük olduğundan toplam ekranlama seviyesi de düşüktür. Bu bağlamda düşük frekanslar için manyetik alana yönelik ekranlama tedbiri uygulamak zordur.



Manyetik Malzemeler İle Ekranlama

- Manyetik malzemeler çok yüksek permeabilite ve görece düşük iletkenlik değerine sahiptirler.
 - Permeabilitenin artışı ile yutma kaybı iletkenlik azalmasına rağmen büyük ölçüde artar. Zira manyetik geçirgenlikteki artış, iletkenlikteki azalışa göre çok fazladır.
 - Manyetik malzemenin kullanımı iletkenlik etkisi ile yansıtma kaybını azaltır.
- Manyetik malzemelerde
 - Permeabilite frekansla değişir
 - Permeabilite alan seviyesine bağlıdır.
 - Yüksek permeabilite değerine sahip malzemeler sistemlerin manyetik özellikleri üzerinde etkin olabilirler



Manyetik Malzemeler İle Ekranlama

Çeşitli malzemelerin bağıl iletkenlik ve manyetik geçirgenlik katsayıları ve bunlarla ilinti olarak soğurma ve yansıtma kayıpları

Malzeme	σ_r	μ_r	$A \sim \mu_r \sigma_r$	$R \sim \sigma_r / \mu_r$
Gümüş	1.05	1	1.05	1.05
Bakır	1	1	1	1
Altın	0.7	1	0.7	0.7
Alüminyum	0.61	1	0.61	0.61
Brass	0.26	1	0.26	0.26
Bronz	0.18	1	0.18	0.18
Kalay	0.15	1	0.15	0.15
Kurşun	0.08	1	0.08	0.08
Nikel	0.2	600	120	3.3×10^{-4}
Paslanmaz Çelik (430)	0.02	500	10	4×10^{-5}
Çelik (SAE 1045)	0.1	1000	100	1×10^{-4}
Mumetal (1 kHz)	0.03	30,000	900	1×10^{-6}
Superpermalloy (1 kHz)	0.03	100,000	3000	3×10^{-7}



Manyetik Malzemeler İle Ekranlama

En bilinen üç ferromanyetik malzeme için iletkenlik ve bağıl manyetik permeabilite değerleri

Ferromanyetik Malzeme	İletkenlik [S/m]	Bağıl Manyetik Permeabilite
Kobalt	$1.6 \cdot 10^7$	70–250
Nikel	$\sim 1.2 \cdot 10^7$	110–600
Demir	$\sim 1 \cdot 10^7$	150–200000



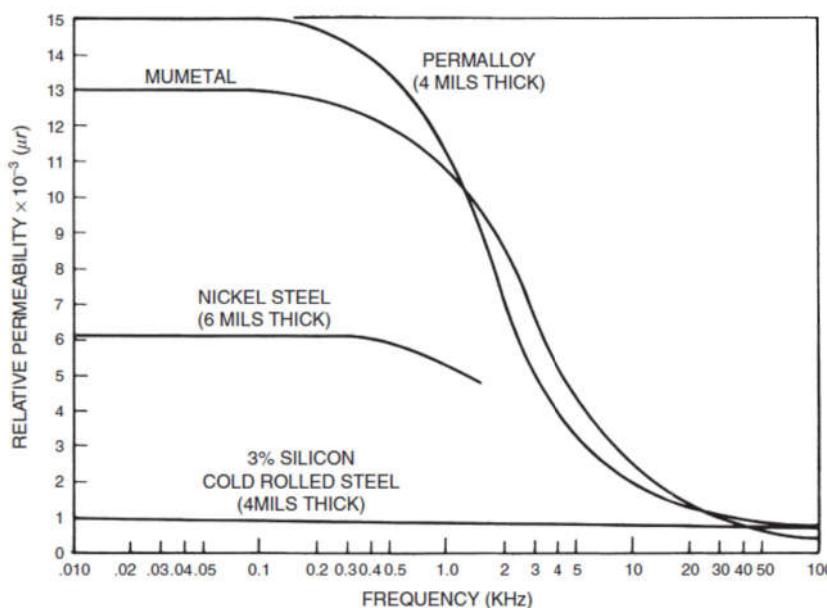
Manyetik Malzemeler İle Ekranlama

Çeliğin frekansa bağlı olarak bağıl permeabilite değerleri

Frekans	Bağıl permeabilite
100 Hz	1000
1 kHz	1000
10 kHz	1000
100 kHz	1000
1 MHz	700
10 MHz	500
100 MHz	100
1 GHz	50
1.5 GHz	10
10 GHz	1



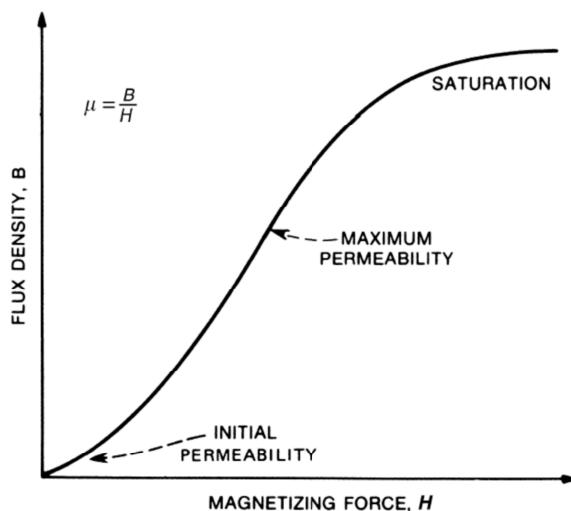
Manyetik Malzemeler İle Ekranlama



Çeşitli manyetik malzemeler için permeabilitenin frekansa bağlı değişimi



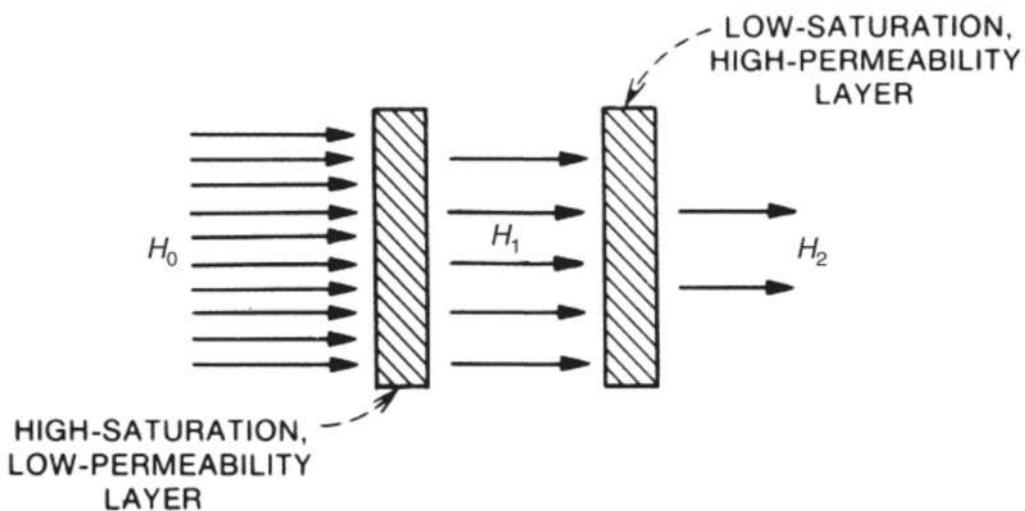
Magnetizasyon eğrisi



Tipik magnetizasyon eğrisi



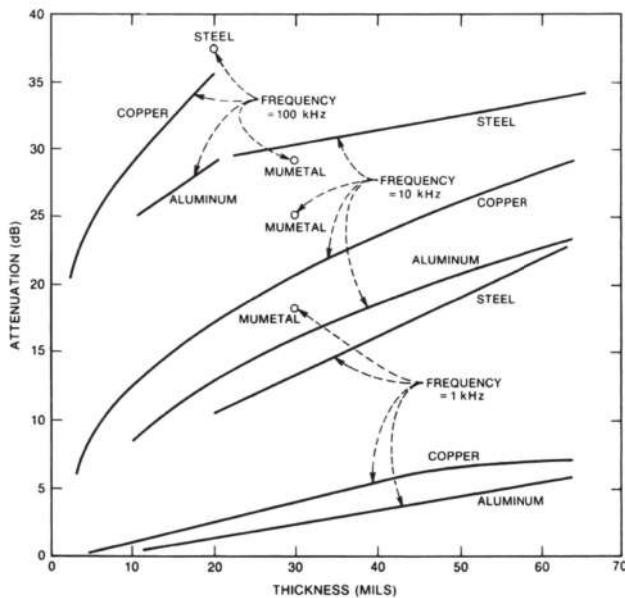
Çok katmanlı manyetik ekranlama



Saturasyonun önüne geçilmesi için çok katmanlı manyetik ekranlama



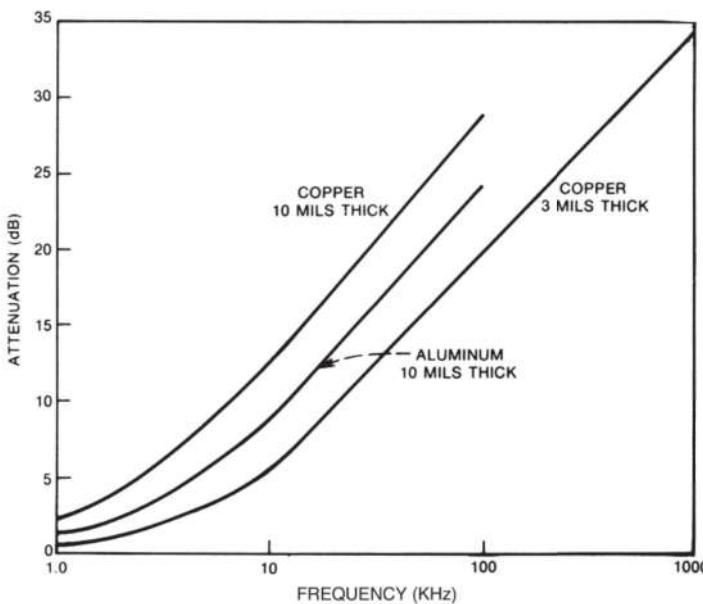
Yakın Alanda Manyetik Ekranlama Etkisi



Çeşitli
frekanslarda
yakın alanda
manyetik
ekranlama
etkisinin
malzeme
kalınlığına bağlı
değişimi



Yakın Alanda Manyetik Ekranlama Etkisi



Çeşitli iletkenler
için yakın alanda
manyetik
ekranlama
etkisinin
frekansa bağlı
değişimi



Yakın Alan ve Uzak Alan

- Eğer kaynak yüksek akım, düşük gerilim karakterli ise yakın alanda manyetik alan bileşeni baskındır ($E/H < 377$). Eğer kaynak yüksek gerilim, düşük akım karakterli ise yakın alanda elektrik bileşen baskındır ($E/H > 377$).
- Elektriksel alan ekranlaması düşük ve yüksek frekanslarda yüksek seviyelerde belli orta frekans bölgesinde düşük seviyelerdedir. Manyetik alan ekranlaması frekans artışı ile artar, düşük frekanslarda çok düşüktür.
- Yüksek iletkenlik ekranlama anlamında yansima ve yutulma seviyelerini arttırır.
- Yüksek manyetik geçirgenlik seviyelerine sahip malzemeler yutma kayıpları yüksek, yansima kayıpları düşüktür.
- Malzemenin kalınlığı arttıkça yutulma seviyesi artar.
- Ekranlama manyetik alan için düşük frekanslarda yutma biçiminde gerçekleşir. Bu işlem için yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeler kullanılır.

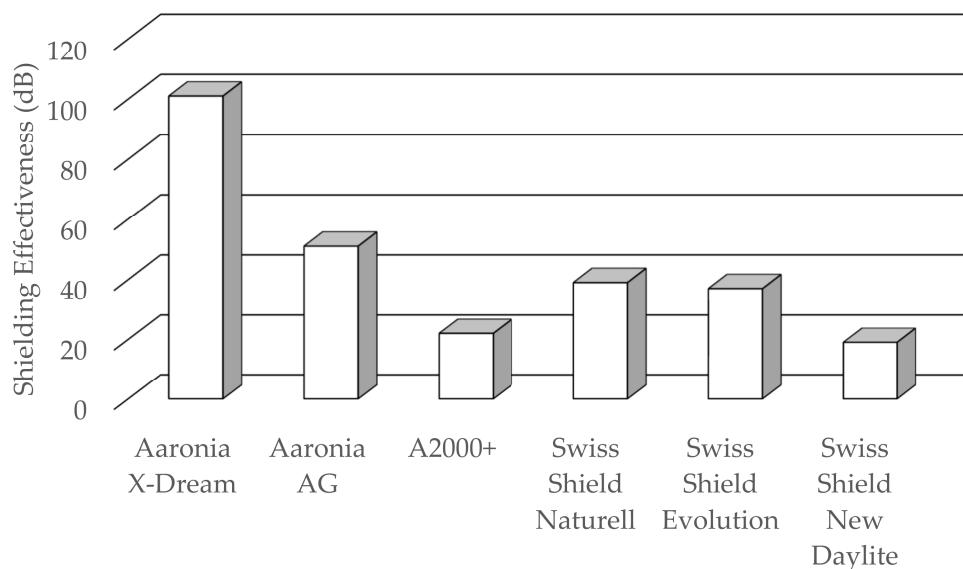


Yakın Alan ve Uzak Alan

- Elektrik alanının baskın olduğu durumda elektrik alan için ekranlama, manyetik alanın baskın olduğu durumda manyetik alan için ekranlama çözümü gereklidir,
- Absorbsiyon oranının 10dB seviyelerinin üstünde olması durumunda çoklu yansımaların etkisine yönelik parametre ihmali edilebilir.



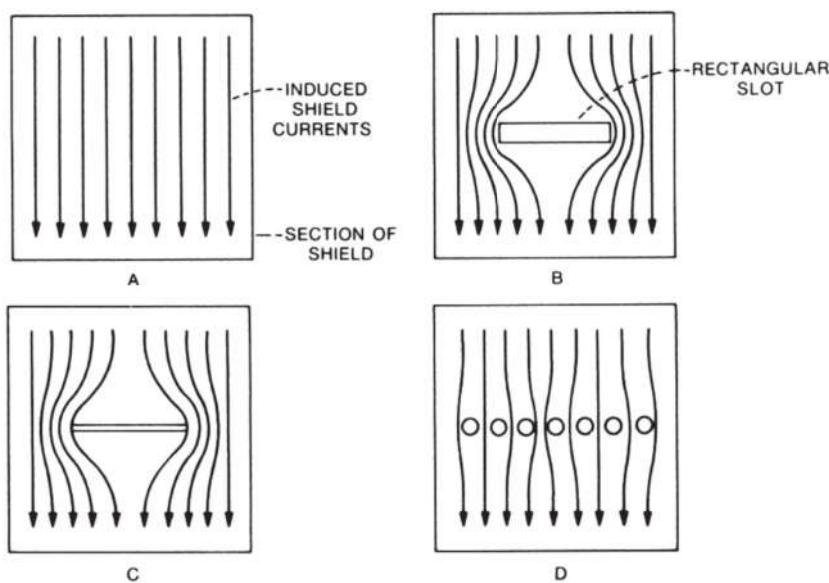
Çeşitli Ekranlama Malzemeleri



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

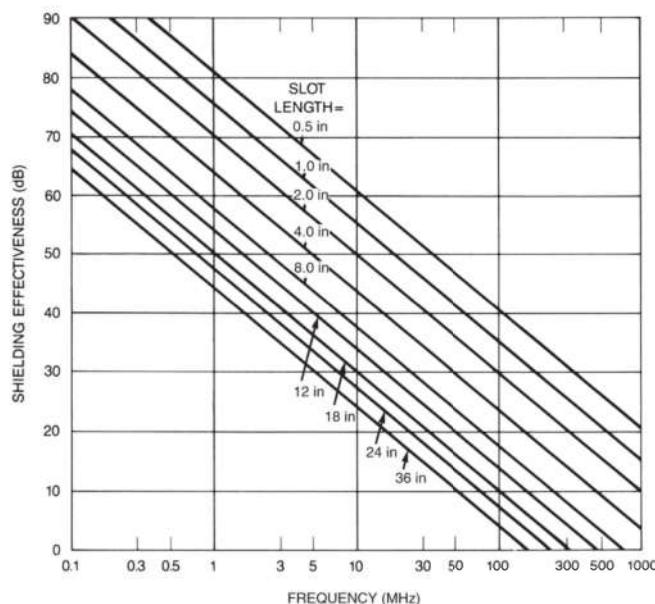
Açıklıklar



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

Açıklıklar



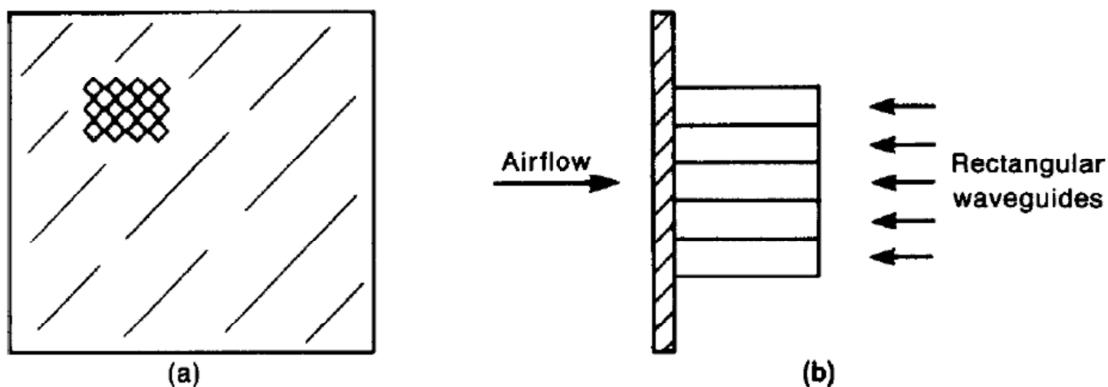
Açıklıklar

20dB Ekranlama için maksimum slot boyu

Frequency (MHz)	Maximum Slot Length (in)
30	18
50	12
100	6
300	2
500	1.2
1000	0.6
3000	0.2
5000	0.1



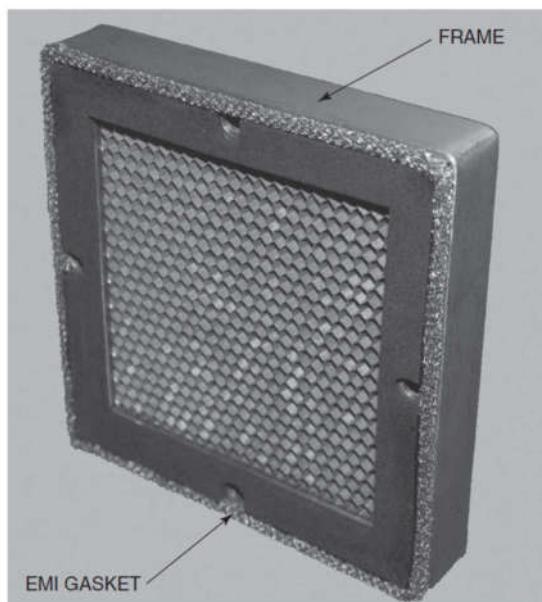
EMI & EMC Havalandırma Paneli



Palpeteği yapıda havalandırma paneli



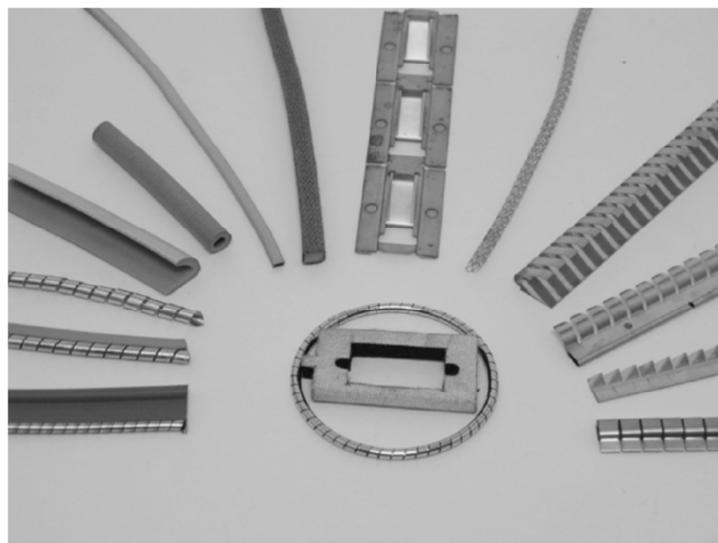
EMI & EMC Havalandırma Paneli



Palpeteği
yapıda
havalandırma
paneli



EMI Gasket



Çeşitli EMI gasketler



• Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•