

# FZM 302

## Elektromanyetik Dalgalar ve Uygulamaları II

### 9.2.3 Elektromanyetik Dalgalarda Enerji ve Momentum

Doç. Dr. Fulya Bagci  
Fizik Mühendisliği Bölümü  
Ankara Üniversitesi  
fbagci@eng.ankara.edu.tr

Bu ders sunumu hazırlanırken aşağıdaki kaynak kullanılmıştır:  
**Elektromagnetik Teori**, David J. Griffiths, Gazi Kitabevi (Çeviri: Prof. Dr. Basri Ünal)

## 9.2.3 Elektromanyetik Dalgalarda Enerji ve Momentum

Elektromanyetik alanlarda birim hacim başına depolanan enerji,

$$u = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right)$$

Tek renkli bir düzlem dalga halinde,

$$B^2 = \frac{1}{c^2} E^2 = \mu_0 \epsilon_0 E^2$$

Böylece elektrik ve manyetik katkılar eşittir.

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta)$$

Alanlar tarafından taşınan enerji akısı yoğunluğu Poynting vektörü ile verilir:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

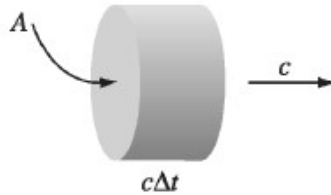
$z$  doğrultusunda ilerleyen dalgalar için

$$\mathbf{S} = c\epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{z}} = cu \hat{\mathbf{z}}.$$

ispat arka sayfada

$\mathbf{S}$  nin enerji yoğunluğunun ( $u$ ) kere dalgaların hızı ( $c$ ) olduğuna dikkat ediniz.

$\Delta t$  zamanında  $A$  alanı içinden bir  $c\Delta t$  uzunluğu geçer (Şekil 9.12) ve  $ucA\Delta t$  kadar enerji taşır. Dalga tarafından birim zamanda birim alandan taşınan enerji  $uc$ 'dir.



Şekil 9.12

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

$$= \frac{1}{\mu_0} \left( E \cdot \frac{1}{c} E \right) \hat{z}$$

$$= \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} E^2 \hat{z}$$

$$= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0}} E^2 \hat{z}$$

$$= c \epsilon_0 E^2 \hat{z}$$

$$= c \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \hat{z} = c u \hat{z}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Elektromagnetik dalgalar sadece enerji değil, momentum da taşırlar. Alanlarda depo edilen momentum yoğunluğu:

$$\vec{g} = \frac{1}{c^2} \vec{S}$$

Tek renkli düzlem dalgalar için momentum yoğunluğu:

$$\mathbf{g} = \frac{1}{c} \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{z}} = \frac{1}{c} u \hat{\mathbf{z}}.$$

Işık halinde dalga boyu çok kısadır. Makroskobik bir ölçüde çok sayıda periyot tekrarlanır. Bu yüzden ortalama değere bakarız. Karesi alınmış kosinüsün bir tam devir üzerinden ortalaması  $\frac{1}{2}$  olduğundan:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}}$$

$$\langle \mathbf{g} \rangle = \frac{1}{2c} \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}}.$$

Bir elektromanyetik dalga tarafından birim alandan taşınan ortalama güce şiddet adı verilir.  $I$  harfi ile gösterilir ve matematiksel ifadesi şudur:

$$I \equiv \langle S \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$$

Işık mükemmel bir soğurucunun üstüne düştüğünde momentumunu yüzeye verir. Bir  $\Delta t$  zamanında momentum aktarımı  $\Delta g = \langle g \rangle A c \Delta t$  'dir. Böylece ışınım basıncı:

$$P = \frac{1}{A} \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 = \frac{I}{c}$$