

## 1. Geometrik Optik

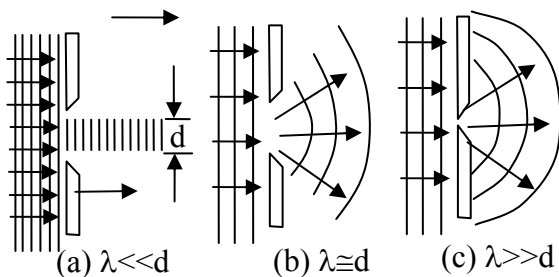
Geometrik optik düzgün düzlem elektromanyetik dalgaların farklı malzemelerin ara yüzeyinde yansıma ve kırılmasını inceler. Pratikte dalgaların madde ile etkileşmesinde düzgün düzlem dalgalardan bahsedemeyiz. Bunun yanında dalga'nın etkileştiği madde de her hangi bir şekle ve büyüklüğe sahip olabilir. Peki şimdiye kadar öğrendiklerimizi pratikte nasıl kullanacağız? Bunun cevabı cisimlerin büyüklüğüne ve gelen dalga'nın dalga boyuna nazaran yüzeylerin eğrilik yarıçapının dalga boyuna nazaran büyüklüğüne bağlı olarak değişir. “Dalga'nın madde ile etkileşmesini tanımlamak için genellikle iki yaklaşım kullanılır: Fiziksel ve geometrik optik metotları. Fiziksel optik dalga optiği olarak da bilinir: Dalga matematik olarak genlik, faz faktörü ve polarizasyon vektörü ile tanımlanır. Geometrik optik ise “ışın optiği” olarak da bilinir. Dalga'nın enerjisinin yayılma yönünü temsil eden bir ışın ile temsil edilir. Geometrik optikte ne faz ne de polarizasyon açık bir şekilde ele alınır. Yani göz ardı edilir. Yani geometrik optik fiziksel optiğin ışın yaklaşıklığı halidir. Matematiksel olarak üstün olup Maxwell denklemlerine kadar dayanabilmesine rağmen, fiziksel optik geometrik optiğe göre uygulama açısından matematiksel olarak daha karmaşıktır. Bu yüzden “fiziksel optik geometrik optiğin uygulanamaz yerlerinde veya geometrik optiğe göre daha fazla doğruluk istenen durumlarda kullanılır. Genel olarak geometrik optik metodu, cismin ebatları kendisini aydınlatan elektromanyetik dalga'nın dalga boyundan daha büyük olması durumunda kabul edilebilir sonuçlar sağlar.” İkinci gereklilik ise cisimlerin yüzeylerinin eğrilikleri dalga boyuna göre bağlı olarak düzgündür.

“Dalgaları enerji ışını olarak ele almakla geometrik optik değişik fazlarda bir noktaya gelen birçok dalgadan sorumlu değildir. Böylece fazların toplamından veya farkından dolayı girişim etkisi geometrik optiğe göre tahmin edilemez. Geometrik optik tarafından ele alınmayan başka bir olay da kırınım olayıdır. Kırınım; geometrik optikte dalga yayılımının doğrudan sapması olarak tanımlanır. Kırınım, dalgaların cisimlerin kenarları etrafında eğilmesinden sorumludur.”

**Aynalar tarafından oluşturulan görüntü:** Aynalar elektromanyetik spektrumda x-ışınları, ultravyole, infrared ve radyo dalgalar için kullanılır. Aynalar genellikle cam gibi dielektrik bir tabaka (substrate) üzerine ince bir alüminyum veya gümüş tabakayla kaplanarak elde edilir. Mükemmel bir ayna yansıması (reflectivity) 1 olan mükemmel iletken yüzeydir. İletim hattı mantığına göre ayna iletim hattının sonundaki kısa devre anlamına gelir. Şimdi görüntülerin düzlem ve küresel aynalarla nasıl oluşturulduğunu inceleyelim.

**Optik Lensler (Mercekler):** Lensler kamera, teleskop ve mikroskop gibi optik enstrümanlarda yaygınca kullanılır. Bunların yanında görüntüleme uygulamalarında da kullanılır. Lenz veya mercek, büyüklüğüne, şekline ve kırılma indisine göre tanımlanır.

Geometrik optiğin alanı, ışık homojen bir ortamdan geçerken doğrusal bir hatta sabit bir yönde ilerler ve farklı bir ortamın yüzeyiyle karşılaşınca veya ortamın optik özellikleri uzay veya zamanda homojen değilse doğrultusunu değiştirir varsayımları altında, ışığın yayılmasının araştırılmasını içerir. Geometrik optikte ışın yaklaşımı kullanılır. Işın yaklaşımında, bir ortamda hareket eden bir dalga'nın, kendi ışınları doğrultusunda doğrusal bir çizgide ilerlediğini varsayılır.



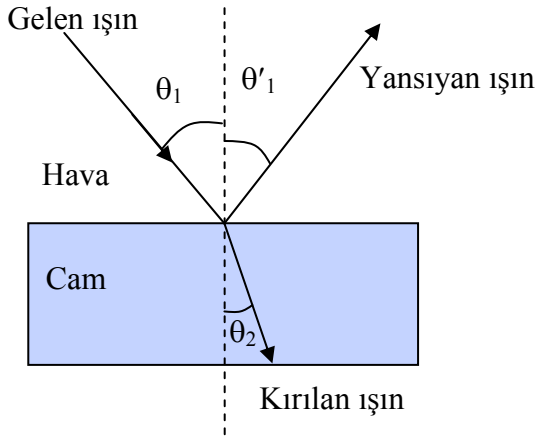
Şekil 1: Dalga, üzerinde kendi dalga boyundan çok daha büyük çaplı dairesel bir delik bulunan bir engel ile karşılaşır, (deliğin  $\lambda$  dalga boyu bir düzlem d çaplı bir delik bulunan bir engele gelmiş olsun). (a)  $\lambda \ll d$  iken ışınlar düz- çizgisel bir yolda ilerlerler ve ışın yaklaşımı geçerli kalır. (b)  $\lambda \approx d$  iken, ışınlar delikten geçip yayılırlar. (c)  $\lambda \gg d$  iken, delik küresel dalgalar yayan noktasal bir kaynak gibi davranır.

Diğer tarafından çıkan dalga doğrusal bir çizgide hareketini sürdürür (bazı küçük kenar etkileri hariç); böylece, ışın yaklaşımı geçerli olur. Şayet deliğin çapı, Şekil 1b’de gösterildiği gibi dalga boyu mertebesindeyse, dalgalar delikten bütün doğrultularda yayılacaklardır. Son olarak, delik dalga boyundan çok küçükse, delik noktasal bir dalga kaynağı gibi davranacaktır. (Şekil 1c). Benzer etkiler, dalgalar boyutu d olan opak bir nesneyle karşılaştıkları zaman görülebilir. Bu durumda  $\lambda \ll d$  iken nesne keskin bir bölge oluşturur.

Işın yaklaşımı ve  $\lambda \ll d$  varsayımı geometrik optikte kullanılır. Bu yaklaşım aynalar, mercekler, prizmalar ve bunların kullanıldığı teleskop, kamera ve gözlük gibi aletlerin araştırılması için çok uygundur.

**Yansıma:** Bir ortamda ilerleyen bir ışık ışını, ikinci bir ortamın sınırına çarpınca, gelen ışının bir kısmı birinci ortama doğru yansıtılır. Yansıyan ışınlar birbirine paraleldirler. Yansıyan ışının doğrultusu gelen ışını içeren yansıtıcı yüzeye dik olan düzlemedir. Işığın, böyle düzgün bir yüzeyden yansımaya düzgün yansıma denir. Yansıtıcı yüzey, pürüzlü ise, yüzey ışınları birbirlerine göre paralel olacak şekilde yansıtmayıp, çeşitli doğrultularda yansıtır. Herhangi bir pürüzlü yüzeyden yansıma dağınık yansıma olarak bilinir. Yüzey değişimleri, gelen ışığın dalga boyuna göre küçük olduğu sürece yüzey düzgün bir yüzey gibi davranır.

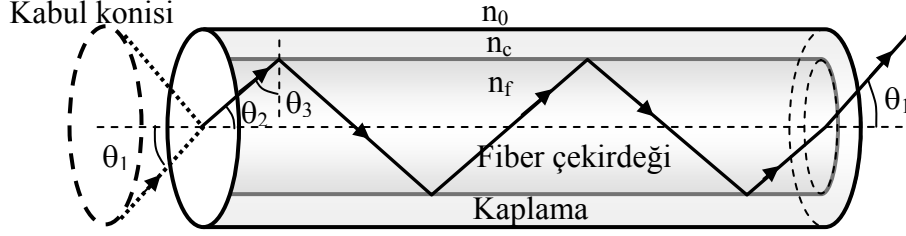
#### Kırılma:



## 19. Fiber Optik

Üst üste yansımalarla bir ışık demeti bir dielektrik çubuk şeklindeki ortam içinde kılavuzlanabilir. Böyle bir ortam optik fiberler vasıtasıyla sağlanabilir. Işık demeti veya ışını çubuğun içinde yayılacak şekilde hapsedildiği için kayıp sadece fiberin gönderilen ve alınan uçlarında ve fiber ortamında meydana gelen absorpsiyondan dolayı meydana gelir. Dielektrik malzemesi mükemmel dielektrik değildir yani kayıpsız bir ortam değildir. Fiber optik geniş bant genişliğindeki sinyallerin iletiminde ve görüntü işleme uygulamalarında oldukça kullanışlıdır. Optik fiber kablo öz veya çekirdek ile adlandırılan silindirik bir malzemeye sahip olup belli bir kırılma indisine sahiptir (n<sub>f</sub>). Bu fiber çekirdek daha düşük olan bir kırılma indisine (n<sub>c</sub>) sahip silindirik bir çerçeve veya kılıf ile

çevrilirdir. Kılıf tabakası, diğer fiberlerden optik olarak yalıtmakta kullanılır. Özellikle birden çok fiberden oluşan kablo sisteminde ışığın bir fiberden diğerine sızmasına veya geçmesini önlemek için kılıflama çok önemlidir. Tam iç yansıma şartını sağlamak için fiber çekirdek içindeki  $\theta_3$  geliş açısı  $\theta_c$  kritik açılarından daha büyük veya eşit olmalıdır. Bu şart  $n_f$  kırılma indisine sahip fiber çekirdek ortamının  $n_c$  kırılma indisine sahip kılıf ortamında ışığın kayba uğramaması için gereklidir.



Şekil 1. Tam iç yansıma için yansıma açısı kritik açıyı aştığı sürece dalgalar optik fiber içinde kılavuzlanır.

Tam yansıma için Snell yasasına göre  $\sin \theta_c = n_c / n_f$

Tam yansıma için  $\theta_3 \geq \theta_c$  ve  $\sin \theta_c = n_c / n_f$

Buna ek olarak  $\theta_2$  fiber yüzeyindeki geliş açısıyla ilgilidir.  $\theta_2$  açısı  $\theta_3$  açısını doksan dereceye tamamlayan açı olduğundan,

$$\cos \theta_2 = \sin \theta_3$$

O halde,

$$\sin \theta_3 = \cos \theta_2 \geq n_c / n_f$$

$\theta_2$  geliş açısı  $\theta_1$  ile ilişkili olduğuna göre Snell yasasından

$$\sin \theta_2 = (n_0 / n_f) \sin \theta_1$$

$n_0$  kılıfı çevreleyen ortam (eğer fiber havada ise  $n_0 = 1$ , suda ise  $n_0 = 1.33$ ) veya,

$$\cos \theta_2 = (1 - \sin^2 \theta_2)^{1/2} = [1 - (n_0 / n_f)^2 \sin^2 \theta_1]^{1/2}$$

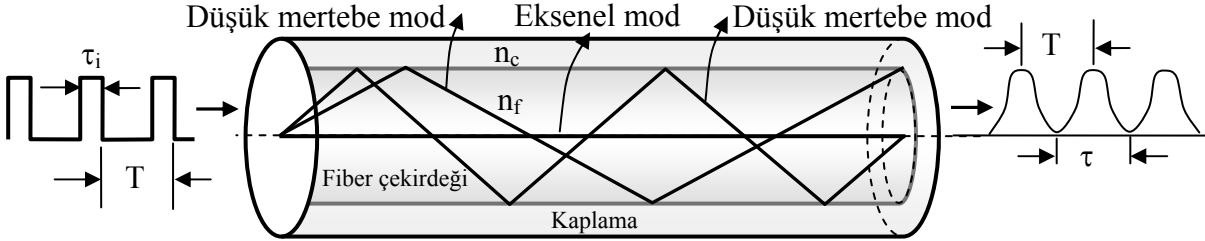
$\cos \theta_2 \geq n_c / n_f$  şartını kullanarak yukarıdaki ifadeyi düzenleyerek,

$$\sin \theta_1 \leq \frac{(n_f^2 - n_c^2)^{1/2}}{n_0}$$

Tam iç yansıma şartının sağlanması için  $\theta_1$  nin maksimum değeri  $\theta_a$  kabul açısı olarak tanımlanır. O halde

$$\sin \theta_a = \frac{1}{n_0} (n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$$

$\theta_a$  açısı, fiberin kabul koni açısı içinde fiber yüzeyine gelen her hangi bir ışık ışını fiber çekirdek içinde yayılabilecektir. Kabul koni açısı içinde büyük miktarda ışık ışını yolu vardır. Bunlar modlar olarak adlandırılır. Yani ışık enerjisinin çekirdek içinde yayılması için birçok yol vardır. Yüksek açılı ışınları fiber ekseninde yayılan ışınlarla göre daha uzun yollar kat ederler. Bunun sonucu olarak farklı modlar fiberin iki ucu arasında farklı transit zamanlarına sahiptir. Optik fiberlerin bu özelliği “modal dispersiyon” veya saçılım olarak adlandırılır ve sayısal verinin iletimi için darbenin şeklinin değişiminden kaynaklanan istenmeyen birçok moda ayrıldığı zaman ve bu sebepten dolayı da farklı modlar fibrin diğer ucuna aynı zamanda gelmezler. Bu sebeple de darbenin şekli ve uzunluğu farklılaşır veya bozulur.



Şekil 2. Optik fiber içinde modal dispersiyondan dolayı dikdörtgen darbelerin distorsiyonu.

Şekilde görüldüğü gibi dar bir kare darbesi  $\tau_i$  genişliğine sahip olup bir  $T$  zaman aralığı ile ayrılmışlardır. Bu darbe optik fiberin giriş ucuna gelmektedir. Fiber çekirdeğin içinde yayıldıktan sonra, modal dispersiyon darbenin yayvanlaşmış sinüs dalgası haline gelmesine sebep olur. Dalganın genişliği  $\tau$  yayvanlaşma zamanı ile karakterize olur. Eğer çıkış darbesi  $\tau > T$  olacak kadar yayvanlaşmış olursa iletilen mesajın okunamaz hale gelmesine sebep olur. Fiber kabloda iletilen darbenin fiberin ucunda ayırt edilebilir kalabilmesi için  $\tau$  nun  $T$  den daha kısa olması gerekir. Güvenlik sınırı için ise pratikte  $T \geq 2\tau$  gereklidir.  $\tau$  yayılma genişliği fiber kablonun ucuna gelen en yavaş ışınla en hızlı ışın arasındaki  $\Delta t$  zaman gecikmesine eşittir. En yavaş ışın en uzun mesafeyi kat eden ışın olup fiber kablonun giriş yüzeyine  $\theta_a$  kabul açısıyla gelen ışına karşılık gelir. Şekil 2 deki geometriden ve yukarıda ifade edilen denklemlerden bu ışın  $\cos \theta_2 \geq n_c / n_f$  bağıntısına uyar.  $L$  uzunluğundaki bir optik fiber için böyle bir ışının aldığı yolun uzunluğu

$$L_{\max} = \frac{L}{\cos \theta_2} = L \frac{n_f}{n_c}$$

$$u_p = \frac{c}{n_f} \text{ hızıyla yayılma zamanı}$$

$$t_{\max} = \frac{L_{\max}}{u_p} = \frac{Ln_f^2}{cn_c}$$

Minumum zaman ise eksenindeki ışına karşılık gelir.

$$t_{\min} = \frac{L}{u_p} = \frac{Ln_f}{c}$$

O halde toplam zaman gecikmesi,

$$\tau = \Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{Ln_f}{c} \left( \frac{n_f}{n_c} - 1 \right)$$

İletilen sinyallerden istenen bilginin alınabilmesi için T ile gösterilen giriş darbeleri katarındaki darbeler arası periyodun  $2\tau$  dan daha kısa olması tavsiye edilmektedir. Bu, sonuçta fiberde iletilebilen veri hızı veya saniyedeki eşdeğer darbe sayısı (saniyedeki bit sayısı) aşağıda verilen formülle sınırlandırılacağı anlamına gelir.

$$f_p = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\tau} = \frac{cn_c}{2Ln_f(n_f - n_c)} \quad (\text{bits/s})$$

**Örnek 1.** Hava ortamında bulunan 1 km uzunluğundaki fiber optik kablonun fiber çekirdeği 1.52 olan bir kırılma indisine, kılıf malzemesi ise 1.49 kırılma indisine sahiptir. a)  $\theta_a$  kabul açısını, b) fiber kabloda iletilebilecek maksimum kullanılabilir veri hızını hesaplayınız ve c) Kılıf malzemesinin kırılma indisi 1.50 olması durumunda fiber kabloda iletilebilecek maksimum kullanılabilir veri hızı ne olur?

Çözüm:

$$\text{a) } \sin \theta_a = \frac{1}{n_0} (n_f^2 - n_c^2)^{1/2} = (1.52^2 - 1.49^2)^{1/2} = 0.3 \text{ ve } \theta_a = 17.5^\circ$$

$$\text{b) } f_p = \frac{cn_c}{2Ln_f(n_f - n_c)} = \frac{3 \times 10^8 \times 1.49}{2 \times 10^3 \times 1.52 \times (1.52 - 1.49)} = 4.9 \text{ Mb/s.}$$

$$\text{c) } f_p = \frac{3 \times 10^8 \times 1.50}{2 \times 10^3 \times 1.52 \times (1.52 - 1.50)} = 7.4 \text{ Mb/s.}$$