

# Düzlemsel Kenar İnceltmenin Optik Fiber Modları Üzerine Etkisi



Mehmet Salih DİNLEYİCİ  
İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi



Yunus Emre KARATAŞ  
İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi  
yunuskaratas@std.iyte.edu.tr

## Özet

Optik fiberin kılıfının düzlemsel olarak inceltilmesi dairesel simetriyi bozmakta ve modlar üzerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Böyle bir yapının muhtemel optik haberleşme aygıtı olarak kullanılma potansiyeli vardır. Bu çalışmada optik fiber içerisinde ilerleyen modların kılıfı inceltilmiş bölgede asimetric modlara enerji aktarması ve tekrar normal fiberde ortogonal-modlar olarak ilerlemesi incelenmektedir. Bu aygıtın, farklı polarizasyon durumuna sahip mod çeşitlenmesine neden olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

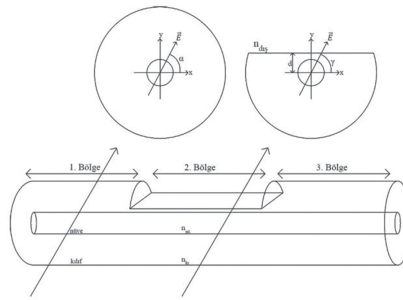
## Abstract

The normal modes of typical optical fibers have been affected by a side-polished geometry which breaking symmetry. That kind of structure has a great usage potential as a optical fiber communication device. In this paper, the normal modes of the fiber propagating through sidepolished region has been investigated. Various modal polarization rotations are observed and the results are verified experimentally.

## I. Giriş

Optik fiberin haberleşme haricinde birçok alanda da kullanılmaya başlandığı görülmektedir

(örneğin fiber sensörler). Kenar inceltilmiş fiberin normal fiber optikten farkı, belirlenen bölgenin kılıf kısmından istenilen ölçülerde düzlemsel olarak inceltilmiş olmasıdır (Şekil 1). Bu inceltme işlemi, kılıf kısmının (istenilen kırılma indisine sahip) dış ortam ile etkileşimi sağlanacak şekilde yapılır ve fiber optiğin içinde kılavuzlanan ışığı etkiler, ki bu sensör uygulamaları için önemli bir özelliktir. Dairesel simetrisi olan optik fiberin analizinden (matematiksel modellemesinden) daha farklı olarak kenarı inceltilmiş optik fiberin modellemesi oldukça karmaşık matematiksel yaklaşımlar gerektirmektedir. Maxwell denklemlerinin kenarı inceltilmemiş normal optik fiber için elektrik ve manyetik alan ifadeleri MATLAB kullanılarak çözümlenmiştir.



Şekil 1. Kenarı inceltilmiş fiber optiğin yapısı ve bölgelere göre kesit çizimleri

Fiber, merkezinde ince nüve ve onu çevreleyen çok az daha düşük kırılma indesine sahip cam kılıftan oluşur. Nüvenin yarıçapının ve nüve-kılıf kırılma indisleri

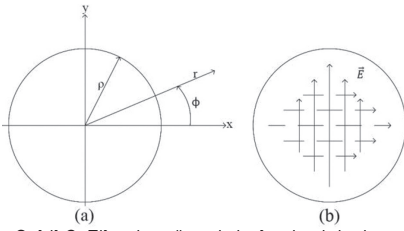
farkının ayarlanmasıyla ilerleyen mod sayısı belirlenebilir. Böylece fiberin içerisinde ilerlemesini istemediğimiz yüksek mertebeli modlar sınırlandırılabilir. Kenar inceltilmiş bölgede fiber modları iki ortogonal (dik) mod çözüm setine dönüşmektedir. Bu çözüm setleri kenarı inceltilmiş yüzeye paralel ve dik yönleri belirlemektedir. Kenarı inceltilmiş bölgeden sonra oluşan bu mod setleri normal (simetrik) optik fiberde yayılımına devam etmektedir. Girişte ışık kaynağı olarak kullanılan doğrusal polarize lazerin polarizasyon yönü kenarı inceltilmiş düzleme göre bilinmemektedir. Bu durum ikinci bölgedeki ortogonal mod setlerinin ne kadar enerji (ışık gücü) paylaşacağını belirsizleştirmektedir. Deneysel olarak yapılan çalışmalar ile mod dönüşümü ve aktarılan enerji belirlenebilmiştir.

## II. Mod alan ifadeleri

Nüve yarıçapı  $p$  olan (Şekil 2(a)) ve kılıf yarıçapı sonsuza giden bir fiber düşünelim. Nüve kırılma indisi  $n_{nu}$  ve kılıf kırılma indisi  $n_{ki}$  olsun. Fiberin içinde herhangi bir modun ilerleyebilmesi için propagasyon sabitinin ( $\beta$ ) şu aralıkta olması gerekmektedir:

$$n_{nu} k \geq \beta \geq n_{ki} k.^1$$

Dalga boyu  $\lambda$  olmak üzere boşlukta propagasyon sabiti  $k=2\pi/\lambda'$ dir.



Şekil 2. Fiberin nüvesinin kesit çizimi ve LP 11 (HE 11) modunun iki ayrı birbirleri- ne dik elektrik alan profili

Tanımlamalar için gerekli para- metreler:

Boyutsuz model parametreleri

$$U = \rho(k^2 n_{nii}^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$W = \rho(\beta^2 - k^2 n_{ki}^2)^{1/2} \quad (2)$$

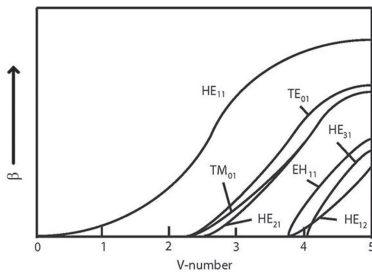
gibidir. Bu ifadelerin karesinden gelen toplam ile

$$V^2 = U^2 + W^2 \quad (3)$$

üçüncü parametreyi elde ederiz.

$$V = \rho k(n_{nii}^2 - n_{ki}^2)^{1/2} \quad (4)$$

Bu parametre,  $\beta$  gibi fiberin için- de ilerleyecek olan modları belir- ler ve normalize edilmiş frekans olarak adlandırılır. İstenmeyen yüksek mertebeli modları bastır- mak için yarıçap veya indis fark- ları ayarlanabilir. <sup>2</sup>



Şekil 3. Propagasyon sabitinin ( $\beta$ ) normali- ze edilmiş frekansa ( $V$ ) göre grafiği.

Şekil 3'te propagasyon sabiti  $\beta$  ve  $V$ 'nin desteklediği düşük mertebeli modlar görülmektedir. Hesaplamalar için  $\beta$  değerleri bu grafikten elde edilmiştir. <sup>4</sup>

Normalize edilmiş yarıçap

$$R = r / \rho \quad (5)$$

olsun.  $\Psi$ , boyuna alan ifadeleri olan  $e_z$  ve  $h_z$ ' yi belirtir ve aşağıdaki diferansiyel denklemleri sağlar. <sup>3</sup>

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + U^2 \right\} \Psi = 0; 0 \leq R < 1, \quad (6-a)$$

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} - W^2 \right\} \Psi = 0; 1 < R < \infty \quad (6-b)$$

Heryerde sınırlandırılmış olan ayrılabilir bu çözümler nüvenin içinde birinci türden Bessel fonksiyonlarına  $J_1(UR)\cos(l\phi)$  ya da  $J_1(UR)\sin(l\phi)$  ve kılıfın içinde modifiye edilmiş ikinci türden Bessel fonksiyonlarına  $K_1(WR)\cos(l\phi)$  ya da  $K_1(WR)\sin(l\phi)$  fonksiyonlarına bağlı olarak değişim gösterirler. Enine alan ifadeleri de boyuna alan ifadeleri cinsinden yazılabilir.

$$\mathbf{e}_t = \frac{i}{n^2 k^2 - \beta^2} \left\{ \beta \nabla_t e_z - \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} k \hat{\mathbf{z}} \times \nabla_t h_z \right\}, \quad (7-a)$$

$$\mathbf{h}_t = \frac{i}{n^2 k^2 - \beta^2} \left\{ \beta \nabla_t h_z + \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} k n^2 \hat{\mathbf{z}} \times \nabla_t e_z \right\} \quad (7-b)$$

$$n^2 k^2 - \beta^2 = \begin{cases} k^2 n_{nii}^2 - \beta^2 = \frac{U^2}{\rho^2}, & \text{nüve} \\ k^2 n_{ki}^2 - \beta^2 = -\frac{W^2}{\rho^2}, & \text{kılıf} \end{cases} \quad (8-a,8-b)$$

Modların her noktadaki yoğunluk değerleri Poynting vektörü ile bulunur. İlerleme yönündeki yoğunluk değerlerine sadece enine alan ifadeleri etki eder.

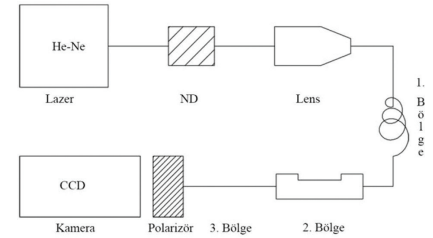
$$S = \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \hat{\mathbf{z}}\} \quad (9)$$

Bu mod çözümleri birinci ve üçüncü bölgelerdeki düzgün optik fiber için geçerlidir. İkinci bölgede kenarı inceltilmiş optik fiber için matematiksel modelleme yapmadan bu bölgenin normal optik fiber modları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İkinci bölgede modların değişen polarizasyon yönlerine göre oluşacak yeni mod profili kombinasyonlarına

bir örnek Şekil 6(b)'de gösterilmiştir.

### III. Deney düzeneği ve sonuçları

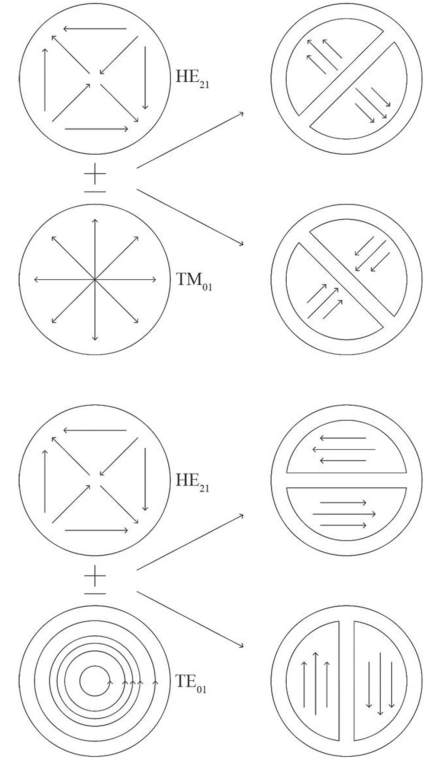
Deneyde (Şekil 4) fiber optik olarak kenarı inceltilmiş ve işlem görmemiş Corning HI1060, ışık kaynağı olarak He-Ne lazer kullanılmıştır. Lazerden çıkan kırmızı ışığın dalga boyu 632.8nm olup



doğrusal polarizedir (1/100) .

Şekil 4. Deney düzeneği.

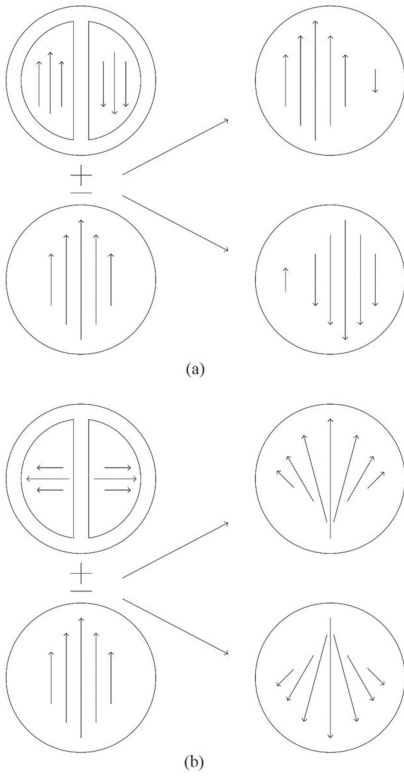
Fiberin parametreleri:



nüve çapı = 5.3  $\mu\text{m}$

Şekil 5. LP 11 modunun olası versiyonlarının bileşenleri ve elektrik alan vektör yönleri.

nüve kırılma indisi = 1.464,



nominal delta (%) = 0.48' dir.

Şekil 6. Aynı güçte LP 11 ve LP 01 modlarının farklı polarizasyon ve oryantasyon ( $l=1$  için) örnekleriyle kuple olması ve elektrik alan vektörlerinin değişimi.

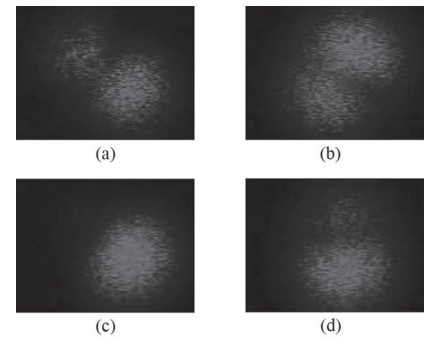
Parametrelere göre  $V$  3.762'dir. Şekil 3'e bakıldığında  $V$ 'nin değeri için fiberde sadece LP 01 ve LP 11 modları destekleniyor. Toplam ışık yoğunluğunu incelediğimizde; aynı yönde polarize durumu olan LP 11 modunun tek lobu ile LP 01 modu ters elektrik alan vektörlerine sahiptirler ve birbirlerini oranlarına bağlı olarak sönmeler durumdadırlar (Şekil 6(a)). Birbirlerine dik polarizasyon durumu olan LP 11 ve LP 01 modları ise birbirlerini sönmelmezler, aksine birleşik bir mod profili oluştururlar (Şekil 6(b)). Bu koşullar kontrol edilerek kenarı inceltilmiş bölgenin modlar üzerindeki etkisi incelenebilir. Şekil 2(b)'de LP 01 ve Şekil 5'de LP 11 modlarının bileşenlerini, olası elektrik alan ve oryantasyon ( $l=1$  için) durumları gösterilmektedir. Lazerden çıkan ışığı fibere kup-

le etmek için 20X NA: 0.4 lens, fiberin çıkışını kaydetmek üzere de CCD dedektör dizini (CCD kamera) kullanılmıştır. Yüksek mertebeli modları bastırmak ve daha iyi mod profili gözlemlemek için fiberin başlangıç kısmı üzerinde bazı kıvrımlar uygulanmıştır. Ayrıca alınan görüntülerde ışık yoğunluğu doyum noktasına geldiği için lens ve lazer arasında ND filtre konulmuştur. Fiber ile CCD arasında bulunan rotasyonel ayarlı doğrusal polarizör yardımıyla hangi modların hangi elektrik alan doğrultusunda ve hangi oranlarla ilerlediği tespit edilmiştir.

İlk olarak kenarı inceltilmemiş düz HI1060 ile çalışıldı. Polarizörü kendi ekseninde döndürerek tüm açılardan fiberin çıkışındaki ışık yoğunluk profilleri incelendi. Tamamen ışığın yok olduğu polarizasyon açısı tespit edilmiştir, ki bu tüm ışığın (modların) lineer polarize olduğunun kanıtıdır. Polarizör  $90^\circ$  daha döndürülünce maksimum yoğunluğa sahip fotoğraf şekil 7(a)'daki gibidir. Şekil 7(a)'ya göre lazerden fiber optiğe yaklaşık %40 oranında LP<sub>01</sub> modu ve %60 oranında LP<sub>11</sub> modu kuple edildiği tespit edilmiştir. Yapılan tüm mod oranlama hesapları matematiksel modele (LMS metodu ile) uyumlandırılarak yapılmıştır.

Kenarı inceltilmiş HI1060 için maksimum ve minimum yoğunluğu gösteren deney sonuçları ise Şekil 7(b-d)'deki gibidir. Şekil 7(b)'de gözükken mod profilinde yaklaşık %25 oranında LP<sub>01</sub> ve %75 oranında LP<sub>11</sub> modları bulunduğu hesaplanmıştır. Bu şekildeki polarizasyon doğrultusuna dik doğrultudaki mod profili Şekil 7(c)'deki gibidir, bu profilde ise yaklaşık %55 oranında LP<sub>01</sub> ve

%45 oranında LP<sub>11</sub> modları bulunduğu hesaplanmıştır. Her ikisine de  $45^\circ$ 'şer derecelik polarizasyon doğrultusundaki mod profili de hesaplamalara göre yaklaşık %35 oranında LP<sub>01</sub> ve %65 oranında LP<sub>11</sub> modları bulunduran Şekil 7(d)'deki gibidir. Kenarı inceltilmiş fiber optik deneyinden elde edilen görüntülerden anlaşılacağı üzere polarizörün farklı açıları için hesaplanan mod oranları değişiklik göstermektedir. Polarizörün hiçbir açısı için yoğunluk tamamen yok olmamış ve LP<sub>11</sub> modunun iki lobu birden kaybolmamıştır. Bu da gösteriyor ki: Modlar birinci bölgede tek bir polarizasyon yönüne sahip olarak ilerlerken kenarı inceltilmiş bölgeye geldiğinde geometriden etkileniyor, farklı polarizasyon yönlerine ve lop oryantasyonuna sahip ( $l=1$  için) modlara enerji aktarıyorlar. Artık tek bir elektrik alan doğrultusuna sahip modlar değil, aynı zamanda o doğrultuya dik olan doğrultuda elektrik alanı olan modlar da mevcuttur. Buna örnek olarak şekil 7(d)'yi gösterebiliriz. Şekil 7(b) ve (c)'den  $45^\circ$ 'lik farklı polarizör açılarıdır ve farklı oryantasyonda, farklı elektrik alan yönüne sahip LP<sub>11</sub> mod profili bulundurmaktadır, dolay-



ısıyla hesaplanan mod oranları da farklıdır.

Şekil 7. Kenarı inceltilmemiş düz (a) ve kenarı inceltilmiş HI1060 optik fiber görüntü örnekleri. Kenarı inceltilmiş fiber için, (b) yoğunluğun maksimum olduğu,