

Optik fiber dalga kılavuzlarının yapı parametrelerinin incelenmesi

Ali ÇETİN^{1,*}, Hamza Yaşar OCAK²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Eskişehir.

²Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Kütahya.

Geliş Tarihi (Received Date): 19.08.2017

Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.11.2017

Özet

Optik fiber dalga kılavuzları silindirik geometriye sahip, ışığın içinde yayıldığı fotonik devre elemanlarıdır. En genel şekilde iki kısımdan meydana gelir. İç kısmı yüksek kırılma indisli çekirdek olarak adlandırılan kısımdır. Bunu çevreleyen ikinci kısım daha düşük kırılma indisine sahip olup örtü olarak adlandırılır. Optik fiberin özelliği bazı yapı parametreleriyle tanımlanır. Sayısal açıklık, bu dalga kılavuzunun ışık toplama kapasitesini belirler. Çekirdek ve örtünün kırılma indisleri, ışığın dalga kılavuzu içinde ilerleyebilmesi için toplam iç yansımaya sağlar. Normalize olmuş frekans, dalga kılavuzunda yayılan modları belirler. Çekirdek ve örtü kırılma indisleri arasındaki farkı gösteren bağıl kırılma indis farkı, ışığı bu dalga kılavuzunun nasıl kılavuzlandıracağını belirler. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen yapı parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Optik fiber, sayısal açıklık, kırılma indis, dağılım.

Investigation of structural parameters of optical fiber waveguides

Abstract

Optical fiber waveguides with cylindrical geometry are photonic circuit elements that light is guided inside. It usually consists of two parts. The inside part which is called as core has high refractive index. The second part that is surrounding the core has lower refractive index and that is called as cladding. The property of optical fiber is defined by some structure parameters. The numerical aperture determines the light-gathering capacity of this waveguide. Refractive indexes of the core and the cladding provide total internal reflection in order to propagating the light inside waveguide. Normalized frequency determines the modes that propagated in waveguide. The relative refractive index difference which indicates the difference between the core refractive index and the cladding refractive index determine how guiding the light in this waveguide. In this study, the relations between the parameters that are given above were investigated.

Keywords: Optical fiber, numerical aperture, refractive index, dispersion.

* Ali ÇETİN, acetin@ogu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-0468-8087>

Hamza Yaşar OCAK, hyasar.ocak@dpu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3094-3459>

1. Giriş

İletişim, bilginin bir yerden başka bir yere taşınması şeklinde tanımlanabilir. Bilginin ışık ile taşınma düşüncesinin kökeni çok uzun yıllar öncesine dayanmaktadır. İbnü'l Heysem'in çalışmalarında da en çok görme, ışığın kaynağı, yansıma ve kırılma olayları ele alınmıştır [1]. 1841'de Daniel Colladon ışığın su içinde kılavuzlanabileceğini yani yönlendirilebileceğini göstermiştir [2]. Aynı işlemleri 1854'de John Tyndall, Colladon'un yaptığından habersiz olarak gerçekleştirmiştir [3-5]. Bu çalışmalar karanlık ortamda yapıldığından açık havada su ile hava arasında ışıma olayı söz konusudur.

Maxwell denklemlerinin 1864 yılında ortaya çıkışından bu yana elektromanyetik dalgaların yayılımı analiz edilmektedir. Maxwell tarafından kurulan matematiksel teoriyle, ışığın elektromanyetik dalga olduğu ortaya çıkmıştır. Bu denklemler elektromanyetik dalga yayılımı ve ışığın doğasının işleyişi hakkında önemli fikirler vermektedir [6].

1880'de A. G. Bell, fotofon adı verilen aygıtı tasarlayarak ilk kez çalıştırmıştır [7]. Bu aygıtı kullanarak bir ışın demeti üzerinde ses sinyallerinin iletilebileceğini göstermiştir. Bell tarafından yapılan ışık ile bilgi taşınmasını içeren bu ilk çalışma, açık havada 200 metrelik mesafede güneş ışınına modüle ederek ses iletimini sağlamıştır. Ancak, kapalı havalarda ses sinyallerini iletim veriminin çok düşük oluşu, güneş ışınının boşlukta saçılması, aynı zamanlarda telefonun bulunması, fotofon üzerine yapılan çalışmaların durmasına neden olmuştur.

1910'da Hondros ve Debye ışığın dielektrik ortamda iletimini teorik olarak incelemiştir, ilk örtüsüz cam fiber 1920'de Schriever tarafından elde edilmiştir [5]. 1930 yılında İngiliz J. L. Baird ile Amerikalı L. W. Hansell kaplamasız fiber kablolar aracılığı ile televizyon görüntülerini tarayarak ve ileterek patent aldılar [8]. Birkaç yıl sonra Alman H. Lamm tek bir cam fiberden görüntüleri başarılı bir şekilde ilettiler. 1951 yılında A. C. S. Van Heel ile İngiltere'den H. H. Hopkins ve N. S. Kapany fiber demetleri aracılığıyla ışık iletimi üzerine deneyler yaptılar. Bu bilim adamlarının araştırmaları, tıp alanında tanı ve tedavide geniş bir kullanıma sahip olan esnek fibroskopun geliştirilmesine olanak sağladı [9]. N. S. Kapany, "Optik Fiber" kavramını literatüre kazandırmıştır [10].

Kullanılan ışık kaynaklarından gelen ışığın dağılması ve ışığı yönlendirecek ortamın uygun olmaması bu konu üzerine çalışmalarda en önemli iki sorun olarak görülmekteydi.

Theodore Maimann 1960 yılının Mayıs ayında ilk katı hal laserini (Yakut laseri) çalıştırmayı başardı. Aynı yıl Aralık ayında Ali Javan ilk kez Helium-Neon laserini keşfetti [11].

Laserin bulunması optik fiber ile ilgili çalışmalarını hızlandırdı. Laser yüksek frekansta ayarlanabilme, yönlülük, tek dalga boyulu olması, düşük demet ıraksaması gibi önemli özellikleriyle optik iletişim için iyi bir ışık kaynağı olmuştur. Işık kaynağı sorunu çözüldüğü için çalışmalar ışığı içinde yönlendirecek uygun ortam üzerine yoğunlaşmıştır.

1966'da C. K. Kao, G. A. Hockham ve A. Werts tarafından ilk kez örtülü cam fiberin kullanılabileceği önerilmiştir [12]. Başlangıçta fiber optik iletişim sistemleri 1000 dB/km'lik büyük bir zayıflamaya sahipti. On yıl içinde zayıflamanın 5 dB/km'ye düşürülmesi, bunları diğer iletişim sistemleriyle kıyaslanabilir duruma getirmiştir. Zayıflamanın 0.2 dB/km'ye kadar düşürülmesiyle kuramsal alt sınıra ulaşılmıştır.

Bugüne kadar süregelen üretim teknolojisindeki hızlı gelişmelerle fiber optik kablolar seri olarak üretilebilmekte ve bunları içeren iletişim sistemleri diğer iletişim sistemlerinden daha fazla tercih edilmektedir.

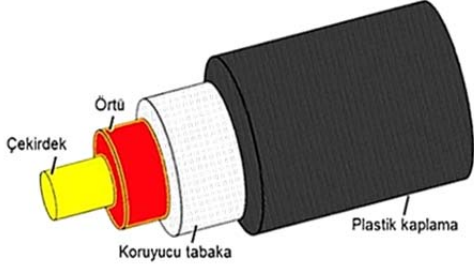
Günümüzde hemen hemen her gün yeni bir kullanma alanı ortaya çıkmakta, birçok araştırmacı optik fiberlerin temel karakteristikleri üzerine çalışmalarını sürdürmektedir [13-16].

Optik fiberin kalitesini yapı parametreleri belirler. Bu çalışmada, yapı parametrelerinin hangi niceliklere göre değiştiği, nasıl etkilendiği ve birbirleri arasındaki ilişkiler nümerik olarak incelenmiştir. Böylece, optik fiberin yapı parametreleri optimize edilerek bu tümleşik optik devre elemanlarının daha verimli kullanılması sağlanabilir.

2. Teori

Optik fiberler silindirik geometriye sahiptir. Geometrik yapısı Şekil 1'de görülen optik fiberde genel olarak kırılma indisi n_1 olan bir madde, kırılma indisi kendisinden daha küçük n_2 olan başka bir madde ile çevrelenmiştir.

Optik fiberlerin amacı içinde ışık taşımak olduğu için tam iç yansıma olayının sağlanması gerekir. Bu yüzden iç kısımdaki maddenin kırılma indisi dış kısımdaki maddenin kırılma indisinden daha büyük olmalıdır.



Şekil 1. Optik fiberin geometrik yapısı.

Optik fiberler, kırılma indis profillerine göre basamak indisli ve değişen indisli optik fiber kablolar olmak üzere iki gruba ayrılır. Optik fiber içindeki kırılma indisi bağlantısı

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2}; & r < a \text{ (çekirdek)} \\ n_2 (1 - 2\Delta)^{1/2}; & r \geq a \text{ (örtü)} \end{cases} \quad (1)$$

ile verilmektedir. Bağlıntıdaki a , çekirdek kısmının yarıçapını; Δ bağıl kırılma indis farkını; g profil parametresini gösterir. g sonsuz ise optik fiber basamak indisli; g , 1'den başlayarak değer alırsa optik fiber kablo değişen indisli olarak adlandırılır.

Bir ortamdaki elektrik ve manyetik alanların davranışı hakkındaki fiziksel temel, Maxwell denklemleri ile sağlanır. Elektrik alan, manyetik alan, elektrik akı yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu birbirleriyle

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2)$$

ve

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

bağıntılarıyla ilişkilidir. Burada ϵ permitivitesi ve μ permeabilitesi

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4)$$

ve

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Denklemlerdeki ϵ_0 ve μ_0 boşluğun permitivitesi ile permeabilitesi, ϵ_r ve μ_r ise maddenin bağıl permitivitesi ve bağıl permeabilitesidir. Manyetik olmayan maddeler için $\mu_r = 1$ alınır. Serbest yüklerin olmadığı ($\rho = 0$), manyetik olmayan maddeler için Maxwell denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

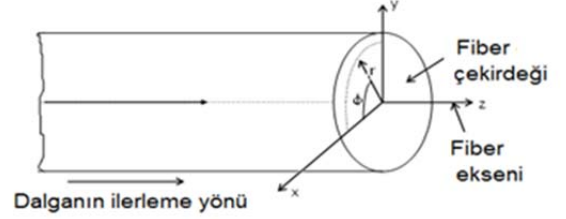
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (9)$$

3. Modelleme ve simülasyonlar

Optik fiber, silindirik geometriye sahip olduğundan Şekil 2'deki gibi silindirik koordinatlarda tanımlanabilir.



Şekil 2. Optik fiberin silindirik koordinatlarda tanımlanması.

Optik fiber silindirik geometriye sahip olduğundan bunun içindeki elektromanyetik dalganın hareketi Maxwell denklemlerinden yola çıkılarak silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi bulunur [17]:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + q^2 H_z = 0 \quad (11)$$

Silindirik koordinatlardaki parametreler (r , ϕ , z) olarak verilir. Eşitlik (10) ve (11) sırasıyla elektrik ve manyetik alanların boyuna bileşenlerinin enine değişkenler cinsinden değişimlerini ifade etmektedir.

Bu iki denklem aşağıdaki koşullar altında çözülebilir:

a) $r=0$ için elektromanyetik alan sonlu olmalıdır.

b) $r \rightarrow \infty$ için $E_z=0$ ve $H_z=0$ olmalıdır.

c) E_z , H_z , E_r , H_r , E_ϕ , H_ϕ sınırda sürekli olmalıdır.

i çekirdek ve örtü bölgelerini temsil eden indis olmak üzere

$$q_i^2 = \omega^2 \epsilon_i \mu_0 - \beta_i^2; \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

alınır.

z 'ye dik düzlemdeki değişim için

$$\nabla_t^2 = \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (13)$$

eşitliği kullanılarak

$$\left(\nabla_t^2 + q_i^2 \right) \begin{Bmatrix} E_{zi}(r, \phi) \\ H_{zi}(r, \phi) \end{Bmatrix} = 0; \quad i=1,2 \quad (14)$$

şeklinde iki denklem yazılabilir.

z' 'ye dik düzlemdeki değişim için silindirik koordinatlardaki dalga denklemini gösteren eşitlikler

$$E_z(\phi, r) = F(\phi) F(r) \quad (15)$$

$$H_z(\phi, r) = F(\phi) F(r) \quad (16)$$

şeklinde yazılabilir. Fiber optiğin kesiti dairesel simetrik olduğundan, ν pozitif veya negatif bir tamsayı olmak üzere

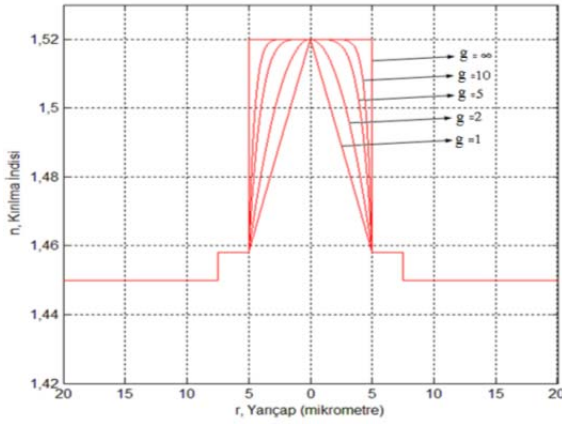
$$F(\phi) = A e^{j\nu\phi} \quad (17)$$

kabul edilir ve gerekli ara işlemler yapılrısa

$$\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F(r)}{\partial r} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (18)$$

şeklinde Bessel diferansiyel denkleminde ulaşılır.

Eş.(1) ile verilen kırılma indisinin yarıçapla değişimi g profil parametresinin sırasıyla 1, 2, 5, 10 ve ∞ değerleri için Şekil 3'de çizdirilmiştir.



Şekil 3. Optik fiberin kırılma indisinin yarıçapla değişimi.

Şekil 3'den görüldüğü gibi optik fiberin merkezi ekseninde $r=0$ konumunda çekirdeğin kırılma indisi 1.52 olup çekirdek içinde yarıçap büyüdükçe kırılma indisi değeri sabit kalmaktadır. $r=5$ μm olunca örtü tabakasına ulaşılıp kırılma indisi 1.4575 oluyorsa optik fiber basamak indisli olarak adlandırılır. Bu $g=\infty$ olduğu duruma karşılık gelmektedir. Optik fiberin merkezi ekseninde $r=0$ konumunda çekirdeğin kırılma indisi 1.52 olup bu en büyük değerden yarıçap büyüdükçe kırılma indisi değeri düşerek $r=5$ μm olunca örtü tabakasına ulaşılıp kırılma indisi 1.4575 oluyorsa optik fiber değişen indisli olarak adlandırılır. Bu durumda, $g=1$

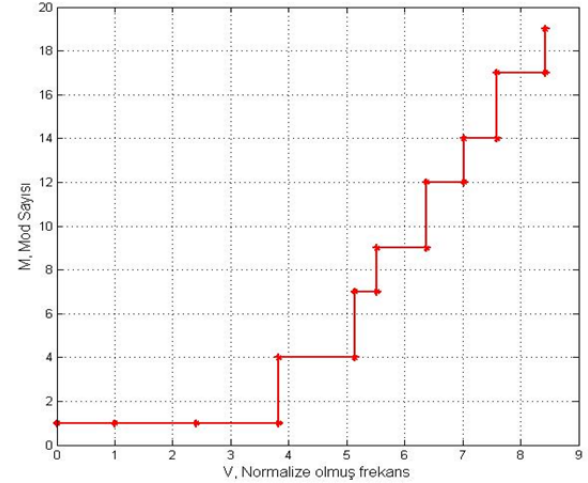
için optik fiber üçgen profile, $g=2$ için optik fiber kare profile, $g=\infty$ için optik fiber basamak indis profiline sahiptir.

Eş.(18) ile verilen Bessel diferansiyel denkleminin birbirinden bağımsız iki çözümü vardır. $J_\nu(ur)$ Bessel fonksiyonu ve $Y_\nu(ur)$ Neumann fonksiyonudur. $r=0$ 'da elektromanyetik alanın sonlu olması gerektiğinden çekirdek bölgesindeki çözümler, $J_\nu(ur)$ Bessel fonksiyonları olmalıdır. Koordinat ekseninde sonsuz değer aldıkları için, $Y_\nu(ur)$ çözümleri kullanılamaz.

Bessel fonksiyonunun kökleri, optik fiber içinde yayılan elektromanyetik modların kesim değerlerini verir. Bu kesim değerlerinden yararlanılarak

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (19)$$

bağıntısı bulunur. Buna normalize olmuş frekans denir. Bu değer, boyutsuz bir parametre olduğundan optik fiberin V sayısı ya da V değeri olarak da adlandırılır. Optik fiber modları, V sayısı sırasıyla, 2.405, 3.83, 5.14, 5.52, 6.38, 7.02, 7.59, 8.42... gibi değerler aldığıda ortaya çıkar. V sayısı 2.405 değerine ulaşınca kadar sadece tek bir mod (EH) mod yayılır. Bu mod, mezelen elektromanyetik moddur. Şekil 4'de optik fiberdeki mod sayısının, V değerine göre değişimi çizilmiştir.



Şekil 4. Mod sayısının, V sayısına karşılık değişimi.

ışığın optik fiber içinde ilerleyebilmesi için, fibere girerken fiber eksenine ile yaptığı en büyük açıya kabul açısı denir ve θ_{maks} ile gösterilir. Bu açıya eşit veya daha küçük bir açıda giren ışık, çekirdek-örtü arayüzündeki tam iç yansımalarla, fiber boyunca kılavuzlanır. θ_{maks} dan daha büyük açı ile gelen ışık ise çekirdek örtü arayüzünde tam yansıma koşulunu gerçekleştirmez ve örtü içinde radyasyonla kaybolur. Böylece θ_{maks} ile tanımlanan "kabul konisi" içinde kalan ışık optik fiberin

çekirdeğinde kalarak kılavuzlanır. Şekil 5’de ilk durumu A ışını, ikinci durumu ise B ışını göstermektedir.

Üç ortamın yani çekirdek, örtü ve havanın kırılma indisleri ile kabul açısı arasında bir bağıntı bulmaya çalışalım. Şekil 5’de θ_{maks} değerinden daha küçük bir θ_1 açısıyla fibere giren ışığı inceleyelim. Snell yasasını D ve E noktalarında kullanarak

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \quad (20)$$

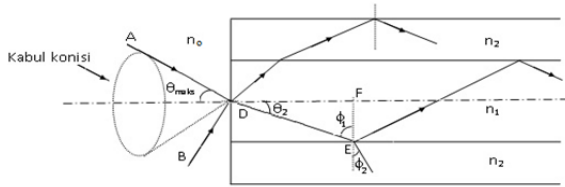
ve

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (21)$$

yazabiliriz. DEF üçgenine göre

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \quad (22)$$

dir.



Şekil 5. Bir optik fiberde kabul konisi.

θ_1 değeri için üst sınır θ_{maks} alınır. E noktasında toplam iç yansımanın sağlanabilmesi için ϕ_2 açısı $\pi/2$ değerine eşit olmalıdır. Bu sınır değerleri kabul edildiğinde Eş.(20), (21), (22) den yararlanılarak ve $\sin^2 \phi_1 + \cos^2 \phi_1 = 1$ trigonometrik özdeşliği kullanılarak

$$n_0 \sin \theta_{maks} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (23)$$

elde edilir. Boşluğun kırılma indisi $n_0=1$ kabul edilerek buna ışığın optik fibere girebileceği maksimum kabul açısı ya da ‘‘Sayısal Açıklık’’ (Numerical Aperture) denilir ve

$$NA = n_0 \sin \theta_{maks} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (24)$$

olarak ifade edilir.

Genelde kırılma indislerinin yerine

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} ; (n_1 \cong n_2) \quad (25)$$

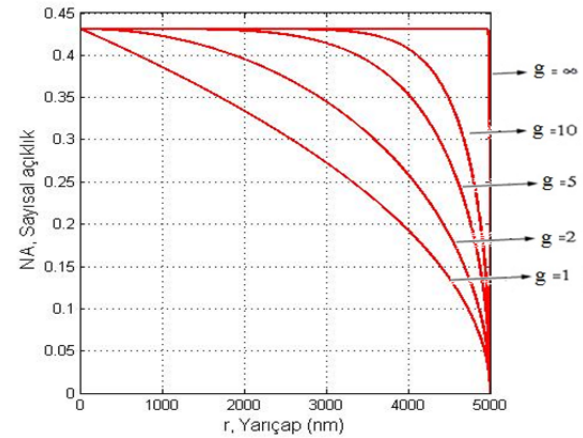
şeklinde ifade edilen ‘‘bağıl kırılma indis farkı’’ kullanılır. Bu, optik fiberin önemli yapı parametrelerinden birisidir. Bağıl kırılma indis farkı Δ değeri çok küçük ise optik fibere zayıf kılavuzlayıcı fiber adı verilir [18].

Sayısal açıklık da bağıl kırılma indis farkı cinsinden

$$NA \cong n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (26)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Sayısal açıklık, fiberin ışık toplayabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Zayıf kılavuzlayıcı optik fiberde, kırılma indis farkı küçük olduğundan sayısal açıklıkta küçük olacaktır. Eş.(24)’e göre sayısal açıklık, optik fibere giren ışığın fiber eksenine ile yaptığı en büyük açıyı verir [19]. Optik fiberin eksenine göre simetrisinden dolayı θ_{maks} açısı fiberin eksenine etrafında bir koni tanımlar. Bu koniye, kabul konisi adı verilir.

Şekil 6’da $n_1=1.52$, $n_2=1.4575$ olan bir optik fiberde g profil parametresinin sırasıyla 1, 2, 5, 10 ve ∞ değerleri için sayısal açıklığın yarıçapla değişimi çizdirilmiştir.

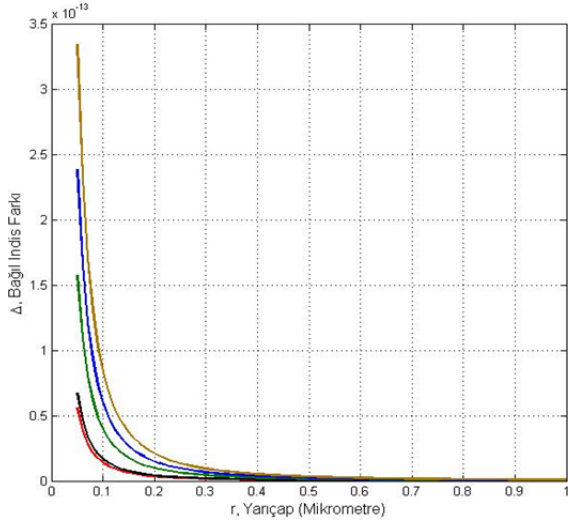


Şekil 6. Bazı g değerleri için sayısal açıklığın yarıçapla değişimi.

Eş.(24)’den görüldüğü gibi sayısal açıklık boyutsuz bir parametre olup sadece optik fiberin çekirdek ve örtü kısımlarının kırılma indisleri n_1 ve n_2 değerlerine bağlıdır. Sayısal açıklık değeri Şekil 6’dan görüldüğü gibi optik fiberin eksenine üzerinde çekirdeğin en büyük kırılma indis değeri 1.52 için 0.4313 iken fiber ekseninden dışarıya doğru yarıçap doğrultusunda gidilirse tüm profil parametreleri için sıfır değerine düşmektedir.

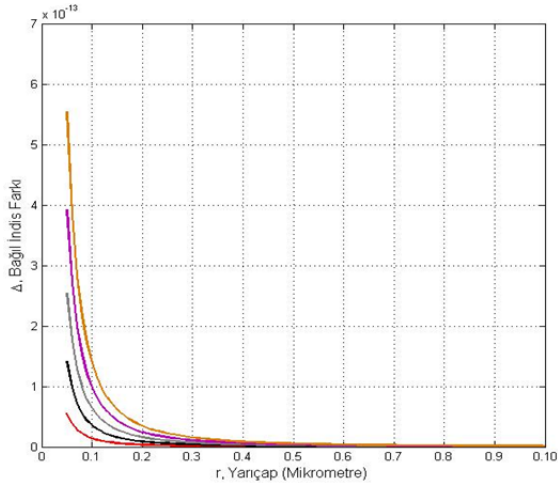
Aşağıdaki şekillerde Bağıl kırılma indis farkı Δ ’nın r yarıçapına göre değişimi farklı parametreler için verilmektedir. Şekil 7’de tek mod durumunda yani frekans parametresi $V=2.405$ alınmıştır. Dalga boyunun $\lambda=632,8$ nm, $\lambda=694$ nm $\lambda=810$ nm, $\lambda=1310$ nm ve $\lambda=1550$ nm değerleri için Bağıl

kırılma indis farkı Δ' 'nın r yarıçapına göre değişimi çizdirilmiştir.



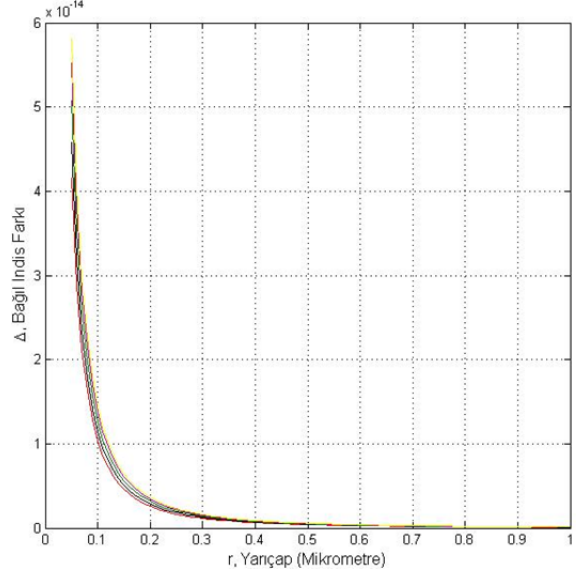
Şekil 7. Bağlı kırılma indis farkı Δ' 'nın farklı dalga boyları için r yarıçapına göre değişimi.

Şekil 8'de tek dalga boyu durumu ele alınmıştır. Dalga boyunun $\lambda=632,8$ nm olduğu durumda $V=2.405$, $V=2.831$, $V=5.135$, $V=6.380$, $V=7.588$ değerleri için Bağlı kırılma indis farkı Δ' 'nın r yarıçapına göre değişimi çizdirilmiştir.



Şekil 8. Bağlı kırılma indis farkı Δ' 'nın farklı V değerleri için r yarıçapına göre değişimi.

Şekil 9'da tek mod durumu ele alınmıştır. Yani $V=2.405$ alınmıştır. Dalga boyunun $\lambda=632,8$ nm olduğu durumda $n_1=1.42$, $n_2=1.458$, $n_3=1.52$, $n_4=1.62$, $n_5=1.68$ değerleri için yani farklı çekirdek kırılma indisleri için Bağlı kırılma indis farkı Δ' 'nın r yarıçapına göre değişimi çizdirilmiştir.



Şekil 9. Bağlı kırılma indis farkı Δ' 'nın farklı kırılma indis değerleri için r yarıçapına göre değişimi.

Her üç şekilde de bağlı kırılma indisi aynı karakterde davranış göstermektedir.

4. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, dalga kılavuzunun içine ışığı alabilme kapasitesini belirleyen sayısal açıklık incelendi. Farklı profil parametreleri için sayısal açıklığın değişik azalmalarla yarıçap arttıkça sifıra yaklaştığı tespit edildi. Dalga kılavuzu içinde yayılan mod sayısının normalize olmuş frekans (boyutsuz frekans parametresi) değeriyle arttığı görüldü. V sayısı büyüdüğünde mod sayısının V değerinin karesiyle orantılı olduğu belirlendi. V değerinin, tek modu besleyen optik fiber tasarımını sağlayacağı söylenebilir. Çekirdek ve örtü kırılma indisleri arasındaki farkı gösteren bağlı kırılma indis farkının fiber yarıçapına göre değişiminin, farklı dalga boyları için, farklı kırılma indisleri için ve farklı boyutsuz frekans parametreleri için aynı karakterde olduğu görüldü. Yarıçap büyüdükçe bağlı indis farkının sifıra doğru yaklaşmakta ve asimtotik bir davranış gösterdiği tespit edildi.

Yukarıda bahsedilen yapı parametrelerinin optimizasyonları yapılarak optik fiberlerin endüstride, medikal tanı, görüntüleme ve cerrahi işlemlerde, ses ve görüntü sinyallerinin iletimi ile haberleşmedeki kullanım alanları genişletilebilir.

Kaynaklar

- [1] Topdemir, H.G., **Işığın Öyküsü: Mitolojiden Matematiğe Işık Kuramlarının Tarihsel Gelişimi**, Tübitak Popüler Bilim Kitapları, Ankara, (2000).
- [2] Hecht, J., **City of Light: The Story of Fiber Optics**, Oxford University Press, (2004).
- [3] Ghatak, A. ve Thyagarajan, K., **An Introduction to Fiber Optics**, Cambridge University Press, (1998).
- [4] Crisp, J., **Introduction to Fiber Optics**, Elsevier, (2005).
- [5] Senior, J.M. ve Jamro, M.Y., **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**, Pearson Education, (2009).
- [6] Pollack, G.L. ve Daniel R.S., **Electromagnetism**, Addison-Wesley, (2002).
- [7] Pasachoff, N. (Çeviri Uslu, L.), Alexander Grahambell bağlantı kurmak, **Tübitak Popüler Bilim Kitapları**, (2000).
- [8] Wilson, J. ve Hawkes, J.F.B., **Optoelectronics: An Introduction**, Prentice Hall, (1988).
- [9] Kapany, N.S., **Fiber Optics**, Academic Press, NewYork-London, (1967).
- [10] Kapany, N.S. ve Burke, J.J., **Optical Waveguides**, Academic Press, NewYork-London, (1972).
- [11] Aydın, R., **Lazer ve Temel Uygulamaları**, Odtü Yayıncılık, (2016).
- [12] Kao, K.C. ve Hockham, G.A., Dielectric Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies, **Proceedings IEE**, 113, 1151-1158, (1966).
- [13] Yan, C., Huang, S.J., Miao, Z., Chang, Z., Zeng, J.Z. ve Wang, T.Y., 3D Refractive Index Measurements of Special Optical Fibers, **Optical Fiber Technology**, 31, 65-73, (2016).
- [14] Peng, Y., Jia, H. ve Fang, L., Theoretical Analysis of Hollow Ring-Core Optical Fibre for Transmitting Orbital Angular Momentum Modes, **Journal of Modern Optics**, 64-18, 1818-1832, (2017).
- [15] Wang, H., Chen, M.Y., Wu, X.S., Li, R.H., Cai, Z.M., Li, L.M., Yang, J.H., Zhu, Y.F. ve Fu, P.P., Single-Mode Operation in Few-Mode Optical Fibre Based on Resonant Coupling, **Journal of Modern Optics**, 64, 8, 866-870, (2017).
- [16] Mishra, A.K., Kumar, M., Kumar, D. ve Singh, O., Modal Study of Plasma Cladded Cylindrical Optical Fiber, **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, 27, 7, 868-876, (2013).
- [17] Çetin, A., Fiber optik dalga kılavuzlarında ışık enerjisi ölçümü, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).
- [18] Gloge, D., Weakly Guiding Fibers, **Applied Optics**, 10, 2252-2258, (1971).
- [19] Matsumura, H., The Light Acceptance Angle of a Graded Index Fibre, **Optical and Quantum Electronics**, 7, 81-86, (1975).