

TÜMLEŞİK OPTİK DALGAKILAVUZLARINDA İNDİS KUSURLARININ DALGA YAYILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hayriye ALTURAL¹ Ö. Galip SARAÇOĞLU²

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik Fakültesi,

Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi, Kayseri

¹ e-posta: alturalhayriye@hotmail.com

² e-posta: saracog@erciyes.edu.tr

Anahtar sözcükler: Etkin İndis Yöntemi, Tümleşik Optik Dalgakılavuzları, İndis Kusurları

ÖZET

Tümleşik optik dalgakılavuzlarının modal analizi yapılırken, iki boyutlu bir problemi doğrudan çözmek yerine, bu problemi tek boyutlu bir problem haline getirerek çözmek, hem analizi yapılacak dalgakılavuzu açısından hem de zaman açısından en pratik yöntemdir. Düzlemsel optik dalgakılavuzlarının analizinde en çok tercih edilen etkin indis yöntemi, bu tür problemler için ideal ve etkili bir çözüm sunar. Etkin indis yönteminde, genellikle dikdörtgen kesite sahip ve iki boyutlu bir problem olan tümleşik optik dalgakılavuzları, etkin kırılma indisi hesaplanabilir bir eşdeğer dilim dalgakılavuzu ile değiştirilir. Bu bildiride, öz kırılma indisi sabit olan bir dikdörtgen dalgakılavuzunun, yelek kırılma indisinin eksen boyunca sinüsbiçimli kusurlara sahip olması durumu ele alınmıştır. Etkin indis yöntemi kullanılarak, önce tek bir görünüş oranı için ilk üç modun, daha sonra farklı görünüş oranları için temel modun yayılım özellikleri elde edilmiştir.

1. GİRİŞ

Tümleşik optik dalgakılavuzları, küçük boyut, hafiflik elektromanyetik girişimden bağımsızlık gibi avantajları sebebiyle, ışın ayırıcıları, bağlaştırmacılar, elektro-optik kipleyciler ve algılayıcılar gibi uygulamalarda tercih edilirler.

Tümleşik optik dalgakılavuzlarının hemen hepsi, ya dikdörtgen biçiminde ya da dikdörtgen biçimine yakın öz (core) bölgelerinden oluşur [1]. Optik ve mikrodalga tümleşik devrelerini oluştururken temel eleman olan dikdörtgen dalgakılavuzları, son on beş yıl boyunca birçok araştırmacı tarafından incelendi [1-10]. Bu tür dalgakılavuzlarının yayılım özelliklerini elde etmede nokta uygunlama [9], sonlu eleman, Galerkin, birinci karışıklık [7] ve etkin indis yöntemi [6,7,11] gibi birçok sayısal ve yaklaşık yöntem kullanıldı. Bunlar arasında etkin indis yöntemi, diğer yöntemlere göre daha etkili ve daha basit olması sebebiyle öne çıkmaktadır [2].

Bu bildiride, öncelikle, etkin indis yönteminin, iki boyutlu dikdörtgen optik dalgakılavuzunun analizinde kullanımı verildi. Daha sonra, öz kırılma indisi sabit

tutulan bu tür bir dalgakılavuzunun yelek (cladding) kırılma indisinin, eksen boyunca sinüsbiçimli bir kusura sahip olması durumunda yayılan modlara ilişkin yayılım özellikleri elde edildi. Son olarak, indis kusurlarının, sabit görünüş oranına sahip dikdörtgen optik dalgakılavuzlarında dalga yayılımına etkisi ve farklı görünüş oranları için ise temel moda etkisi gösterildi.

2. ETKİN İNDİS YÖNTEMİ

Etkin indis yöntemi, ilk olarak, dikdörtgen biçiminde öze sahip basit bir dalgakılavuzunun temel modu için Marcatali'nin sonuçlarını [8] daha iyi hale getirmek amacıyla Knox ve Toullos tarafından ileri sürüldü [3]. Yöntemi uygulamak hem kolay hem de hızlı olduğu için, dalgakılavuzu problemlerini çözmede yaygın biçimde kullanıldı.

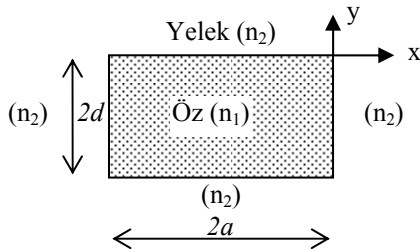
Bu yöntemde, iki boyutlu bir problem, tek boyutlu bir etkin dalgakılavuzu problemine dönüştürülür. Bu tek boyutlu problem, daha sonra, analitik olarak ya da iki boyutlu durum için gerekli olan yöntemden daha basit yöntemler ile çözülebilir. Yöntemin dikdörtgen dalgakılavuzlarına uygulanması, diğer yöntemlere göre daha basittir.

Yöntemin ana amacı, bir dikdörtgen özlü dalgakılavuzunu, etkin kırılma indisi hesaplanabilir bir eşdeğer dilim dalgakılavuzu ile değiştirmektir. Sadece dilim dalgakılavuzu için çözüm yapılması gerektiğinden bu yöntem, dikdörtgen yapıyı doğrudan çözmeyi sağlayan yöntemlerden daha etkilidir. Bununla birlikte, etkin indis yönteminin daha doğru sonuçlar vermesi için, dalgakılavuzu modlarının kesimden uzak olması gerekir [4].

x-y boyutu ile sınırlandırılmış iki boyutlu dikdörtgen dalgakılavuzunun doğrudan analizi zordur. Böyle yapılar için modal dispersiyonu hesaplamada ve mod şekillerini belirlemede muhtelif yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri, altı adet alan bileşeninin hepsini de içine alan bir lineer olmayan matris özdeğer denkleminin çözümüne dayanan ve Goell tarafından ortaya koyulmuş dairesel harmonik analizidir [9]. Bu yöntem, en doğru sonuçları

vermesine karşın zaman alıcıdır ve çok sayıda eşzamanlı denklemden oluşan bir matrisin çözümünü gerektirir. Bir başka yöntem de, sonlu eleman yöntemidir, fakat, bu yöntem de büyük matrisler içeren hesaplar gerektirdiğinden zaman alıcıdır [7]. Dilim tekniğine dayanan etkin indis yöntemi kullanılarak, sonuçların kesinliğinden çok az ödün verilmesi karşılığında zamandan ve bilgisayar belleğinden çok büyük tasarruf sağlanabilir.

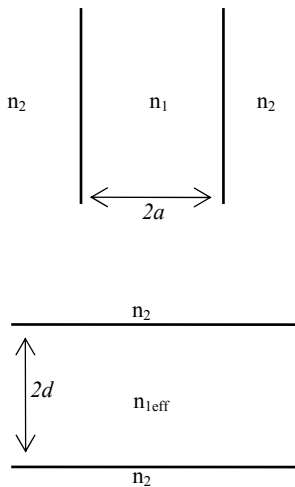
Öz bölgesinin genişliği ve kalınlığı, sırasıyla, $2a$ ve $2d$ olan ve özün ve yeğin sahip olduğu kırılma indisleri de, sırasıyla, n_1 ve n_2 olan bir dikdörtgen özlü dalgakılavuzu Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Dikdörtgen özlü dielektrik dalgakılavuzunun kesiti

Merkezdeki öz ve bunu çevreleyen yekek arasındaki indis farkı, alışılmış birçok dalgakılavuzundaki gibi küçük olduğu zaman, problem, yaklaşık olarak, iki bağımsız probleme ayrılabilir. Bu durumda, toplam iç yansıma koşulunun sağlanması için özün kırılma indisi, yeğin kırılma indisinden biraz büyüktür.

Şekil 1’de verilen yapı, birbirlerine dik olarak yönlenmiş biri x doğrultusunda diğeri de y doğrultusunda uzanan iki dilim dalgakılavuzu biçiminde temsil edilebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Dikdörtgen yapının eşdeğeri olan dilim optik dalgakılavuzları

Şekil 2’de gösterilen $2a$ genişliğine sahip dilim dalgakılavuzu için skaler dalga denklemi,

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + [k^2 n_x^2(x) - \beta_x^2] \Psi(x) = 0 \quad (1)$$

biçiminde yazılabilir. Denk. (1)’de k , serbest uzay dalga sayısını; β_x , x yönündeki yayılım sabitini ve $\Psi(x)$, skaler alan niceliklerini temsil eder. Benzer biçimde, Şekil 2’de $2d$ kalınlığına sahip diğerk dilim dalgakılavuzu için skaler dalga denklemi,

$$\frac{\partial^2 \Psi(y)}{\partial y^2} + [k^2 n_y^2(y) - \beta_y^2] \Psi(y) = 0 \quad (2)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada β_y , y yönündeki yayılım sabitini göstermektedir. Arayüzeylerde sınır şartlarını uygulayarak, kılavuzlanmış modlar için özdeğer denklemleri elde edilir. Bulunan ayrık çözümler yardımıyla burada ele alınan ve sonlu sayıda kılavuzlanmış moda sahip olan optik dalgakılavuzunda yayılan modların yayılım sabitleri belirlenebilir. Çoğu zaman yayılım sabitinin tam değerinin hesaplanmasını gerektirmeyen, normalize yayılım sabiti, dalgakılavuzunun dispersiyon özelliklerini elde etmek için kullanılabilir. Yayılım sabiti ile orantılı bir nicelik olan normalize yayılım sabiti,

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

ile hesaplanabilir.

3. SAYISAL HESAPLAMALAR

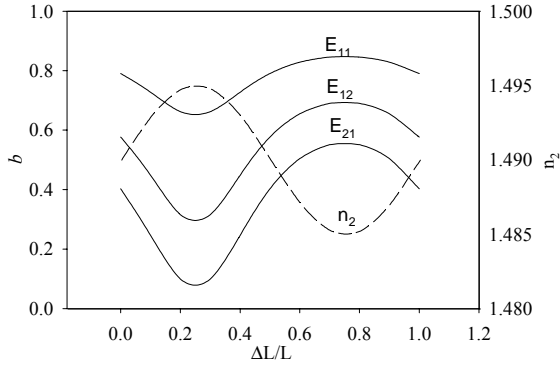
Bu bölümde, öz kırılma indisi sabit olan dikdörtgen optik dalgakılavuzuna ait yekek kırılma indisinin, Pandey ve Ojha’nın varsaydığına [12] benzer olarak,

$$n_2 = n_0 + \alpha \cdot \sin\left(2\pi \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (4)$$

şeklinde sinüsbiçimli değişime sahip olduğu dikkate alındı. n_0 ve α , birer sabittir ve n_0 , n_1 ’den biraz küçüktür. L , optik dalgakılavuzunun boyu; ΔL , kılavuz boyunun değişim miktarıdır. n_2 , eksen boyunca sinüsbiçimli kırılma indis değişimidir. Denk. (4)’teki bağıntıya göre yekek kırılma indisi, n_0 gibi orta bir indis değeri yakınında salınmaktadır. Bu çalışmada, n_0 ’a göre n_2 ’deki değişim, en fazla ± 0.32 olacak şekilde belirlenmiştir. n_2 ’deki bu değişim, indis kusurları olarak göz önüne alınabilir ve yayılan modların yayılım özelliklerini etkiler.

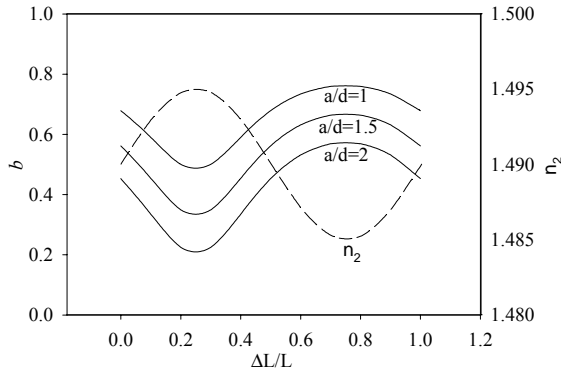
İndis kusurlarının, görünüş oranı $a/d=1.5$ olan durumu için ilk üç modun normalize yayılım sabitlerinin

kılavuz boyunca değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, ilgili modlara ait normalize yayılım sabitleri, sinüsbiçimli indis kusuru ile ters olarak dalgalanmaktadır. Grafikten ayrıca görülebileceği gibi temel moddaki (E_{11}) dalgalanma en azdır. Buradan, mod mertebesi arttıkça indis kusurlarına olan duyarlılığın da artacağı sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 3. İlk üç mod için normalize yayılım sabitinin kılavuz boyunca değişimi ($a/d=1.5$)

Aynı indis kusurları altındaki incelemeye, farklı görünüş oranlarına sahip dikdörtgen optik dalgakılavuzları için devam edildiğinde, temel modun normalize yayılım sabitindeki değişim Şekil 4'te verildiği gibi elde edilir. Şekilden görüleceği gibi normalize yayılım sabitindeki dalgalanma, daha küçük görünüş oranlarında daha azdır. Buna göre, daha küçük görünüş oranlarına sahip dalgakılavuzlarının indis kusurlarından daha az etkilendiği söylenebilir.



Şekil 4. Farklı görünüş oranları için temel moda ait normalize yayılım sabitinin kılavuz boyunca değişimi

4. SONUÇ

Dikdörtgen optik dalgakılavuzunun etkin indis yöntemi ile modal analizi yapılmış ve sinüsbiçimli değişen indis kusurlarının dalga yayılımına etkisi incelenmiştir. Sabit görünüş oranı için düşük mertebeli modların indis kusurlarına olan duyarlılığının daha az olduğu görülmüştür. Farklı görünüş oranları için yapılan incelemede ise, temel

moddaki dalgalanmanın görünüş oranı ile arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kumar A., Clark D. F., Culshaw B., Explanation of Errors Inherent In the Effective-Index Method for Analyzing Rectangular-Core Waveguides, OPTICS LETTERS, Vol. 13, No. 12, pp. 1129-1131, 1988.
- [2] Chiang K. S., Dual Effective-Index Method for the Analysis of Rectangular Dielectric Waveguides, APPLIED OPTICS, Vol. 25, No. 13, pp. 2169-2174, 1986.
- [3] Knox R. M., Toullos P. P., Integrated circuits for the millimetre through Optical Frequency Range, PROC. M. R. I. SYMP. SUB-MILLIMETER WAVES, Fox J., Ed. Brooklyn, N. Y. Polytechnic Press, pp. 497-516, 1970.
- [4] Chiang K. S., Kwan C. H., Lo K. M., Effective-Index Method with Built-In Perturbation Correction for the Vector Modes of Rectangular-Core Optical Waveguides, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 17, No. 4, pp. 716-722, 1999.
- [5] Chiang K. S., Lo K. M., Kwok K.S., Effective-Index Method with Built-In Perturbation Correction for Integrated Optical Waveguides, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 14, No. 2, pp. 223-228, 1996.
- [6] Okamoto K., Fundamentals of Optical Waveguides, Academic Press, 2000.
- [7] Abou El-Fadl A. A., An Optimal Method to Study the Propagation Characteristics of Rectangular Optical Waveguides, Proc. of the Fifteenth National Radio Science Conference, NRSC'98, pp. B3/1-B3/8, 24-26 Feb. 1998.
- [8] Marcatili E. A. J., Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics, THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL, pp. 2071-2102, Sep. 1969.
- [9] Goell J. E., A Circular-Harmonic Computer Analysis of Rectangular Dielectric Waveguides, THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL, pp. 2133-2160, Sep. 1969.
- [10] Aalto T., Harjanen M., Kapulainen M., Heimala P., Leppihalme M., Development of Silicon-On-Insulator Waveguide Technology, Proc. of SPIE, Vol. 5355, pp. I/1-I/15, 2004.
- [11] Buus J., The Effective Index Method and Its Application to Semiconductor Lasers, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. QE-18, No. 7, pp. 1083-1089, 1982.
- [12] Pandey P. C., Ojha S. P., Effect of Axial Linear and Sinusoidal Variation of the Core Refractive Index on the Propagation of Some Low-Order Modes in an Optical Fiber, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 28, No. 4, pp. 265-267, 2001.