

## Fotonik Kristal Yapılar ile Kompakt Nano-Optik Bağlaştırıcı Tasarımları

Şirin Yazar ve Özgür Ergül  
sirin.yazar@metu.edu.tr ve ozergul@metu.edu.tr  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ankara

**Özet:** Bu çalışmada, fotonik kristallerin optimize edilmesiyle elde edilen optik bağlaştırıcı tasarımları ele alınmıştır. Fotonik kristal yapılar olarak dizi şeklinde yerleştirilmiş dielektrik nanoçubuklar kullanılmıştır. İstenilen çıktı uçlarında güç yoğunluğunu yükseltmek için genetik algoritma ile nanoçubuk dizileri üzerinde var/yok optimizasyonu uygulanmıştır. Böylece basit geometrilere sahip ve küçük boyutlardaki çubuklarla kompakt ve verimli optik bağlaştırıcılar tasarlanabilmektedir. Farklı yönlerde elektromanyetik güç iletimi sağlayan optik bağlaştırıcılara ek olarak, birden fazla girişe sahip optik bağlaştırıcılar tasarlanmış ve incelenmiştir.

**Abstract:** In this work, optical coupler designs obtained via optimized photonic crystals are discussed. Arrays of dielectric nanorods are used as photonic crystal structures. To maximize the power density at a desired port, on/off optimization is applied to nanorod arrays. This way, compact and efficient optical couplers are designed by using rods having simple geometries and small dimensions. In addition to optical couplers providing power transmission in different directions, those with multiple input ports are designed and analyzed.

### 1. Giriş

Periyodik olarak dizilen dielektrik yapıtaşlarından elde edilen fotonik kristallerin elektromanyetik dalgaların istenilen yönlerde iletimlerinde kullanılması uzun yıllardır çalışılmaktadır [1]. Bu tür yapıların elektromanyetik dalgaya istenilen yönde dönüş sağlayan verimli dalga kılavuzları olarak kullanımı birçok çalışmada detaylı olarak incelenmiştir [2]-[7]. Bu çalışmada, nanometre boyutlarındaki dielektrik nanoçubukların dizilmesiyle elde edilen fotonik kristal yapılar tasarlanmıştır. Özellikle, iletimi istenilen çıkış uçlarında yükselten kompakt ve verimli optik bağlaştırıcılar tasarlanmıştır. İstenilen çıkış uçlarına iletimin yükseltilmesi ve diğer uçlara iletimin bastırılması amacıyla, uygun maliyet fonksiyonlarının kullanıldığı genetik optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyonlar sonucunda, düz ve 90 derece iletim kabiliyetlerine sahip çeşitli optik bağlaştırıcılar elde edilmiştir. Ayrıca, nano-optik iletim hatlarında kullanışlı olabilecek çoklu giriş ve çıkışa sahip bağlaştırıcılar da tasarlanmış ve incelenmiştir.

### 2. Optimizasyon Ortamı ve Sayısal Benzetimler

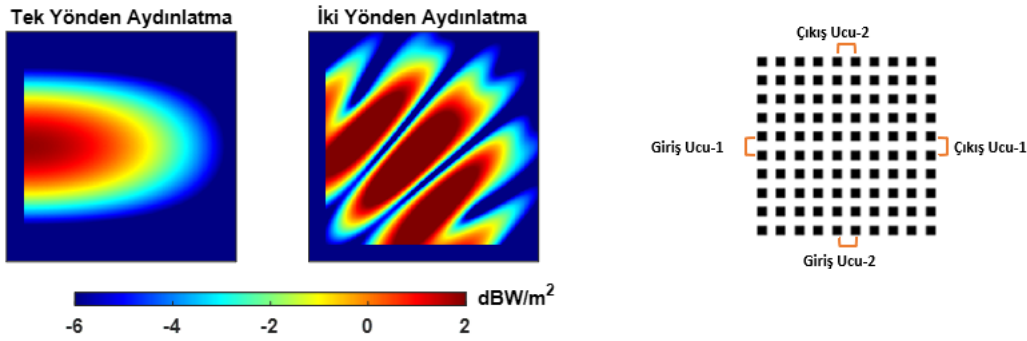
Bu çalışmada, optik bağlaştırıcı tasarımları için, özgün bir genetik algoritma (GA) mekanizmasıyla bir tam-dalga elektromanyetik çözücüsü birleştirilmiştir [8],[9]. Tam-dalga çözücüsünde, integral denklemlerine dayalı matris sistemlerinin hızlı ve hassas iteratif çözümlerini gerçekleştirebilen çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (MLFMA) kullanılmıştır [10]. GA ise, verilen dizi yapısında nanoçubukların var/yok durumlarının belirlenmesiyle istenilen iletim kabiliyetlerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Nanoçubukların var ve yok durumları sırasıyla 1 ve 0 bitleriyle ifade edilmiştir. Bu doğrultuda, örneğin  $10 \times 10$ 'luk bir dizilim yapısında, her bir konfigürasyonun ifade edilmesi için 100 bitlik bir kromozom kullanılmıştır. Doğrudan bir yaklaşımla, tüm var/yok kombinasyonlarının oluşturulup sayısal benzetimlerinin yapılması toplamda  $(2^{100}-1)$  farklı kombinasyonun denenmesi anlamına gelmektedir. Yaklaşık olarak  $1.27 \times 10^{30}$  sayısal benzetime karşılık gelen bu tür bir tasarım prosedürü mümkün olmadığından, GA gibi verimli optimizasyon mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmadaki her bir optimizasyonda, sadece 40 bireylik havuzlar 50 nesil boyunca kullanılmış ve toplamda 2000 sayısal benzetim gerçekleştirilmiştir.

Fotonik kristal problemlerinin formülasyonunda elektrik-manyetik akım birleşik alan integral denklemi (JMCFIE) kullanılmıştır [11]. Nanoçubukların yüzeylerinde sınır koşullarının sağlanması için elektrik ve manyetik akımları tanımlanmıştır. Ayrıklaştırma için Galerkin yöntemi ile hem baz hem de test fonksiyonları olarak Rao-Wilton-Glisson (RWG) fonksiyonları kullanılmıştır [12]. GMRES yöntemiyle matris denklemleri iteratif olarak çözülmüş, bu çözümlerde ihtiyaç duyulan matris-vektör çarpımları MLFMA ile hızlandırılarak hızlı ve doğru sayısal çözümler elde edilmiştir. Aşağıda, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyonlara ve elde edilen tasarımlara bazı örnekler gösterilmiştir.

### 3. Örnek Optik Bağlaştırıcı Tasarımları

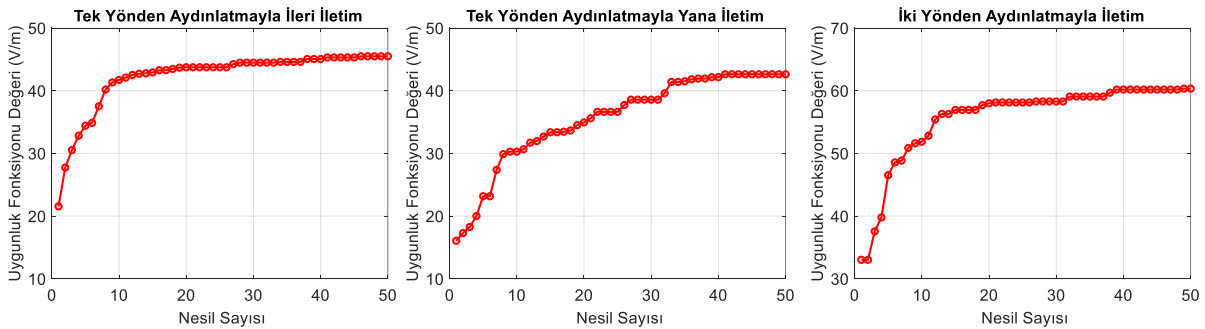
Bu makalede gösterilen örnek tasarımlarda, bağıl elektriksel geçirgenliği 4 olan dielektrik kare prizma çubuklar kullanılmıştır. Her bir prizma çubuğun kenar genişliği 150 nm ve yüksekliği 2850 nm olarak seçilmiştir. Dielektrik çubuklar, yüzeyleri arasında 150 nm mesafe olacak şekilde  $10 \times 10^3$  luk diziler şeklinde yerleştirilmiştir. Yapılar 200 THz'te bir elektromanyetik dalga kaynağı ile aydınlatılmıştır. Bu frekansta dış ortamdaki (boşluktaki) dalga boyu ( $\lambda_0$ ) yaklaşık 1500 nm olduğundan, her bir kare prizma nanoçubuğun yüksekliği  $1.9\lambda_0$  kadardır.

Şekil 1'de gösterildiği gibi hem tek yönden hem de iki yönden aydınlatma durumları için uyarım kaynağı olarak karmaşık kaynak noktası ışını (CSPB) kullanılmıştır. Bu doğrultuda, bir CSPB'nin oluşturulabilmesi için, bir Hertzian dipol, dizi yapısının merkezinden  $1.875 \mu\text{m}$  uzaklığa  $5i$  ( $\mu\text{m}$ ) sanal konum bileşeni ile yerleştirilmiştir. Bu tür bir kaynaktan ışılan elektromanyetik dalganın ilerleme yönü diziye doğru olup polarizasyonu çubukların yüksekliği yönündedir. Sayısal çözümler için, nanoçubuk yüzeyleri 15 nm ( $\lambda/10$ ) boyundaki üçgenlerle ayrıştırılmıştır. Yukarıda özetlendiği üzere, elde edilen elektromanyetik saçılım problemleri MLFMA ile iteratif olarak, 0.001'lik yakınsama hatası ile çözülmüştür. Şekil 1 sağda optik bağlaştırıcı tasarımları için optimize edilmek üzere ele alınan çubuk dizilimi ve bu dizilim etrafında tanımlanan giriş ve çıkış uçları gösterilmiştir.



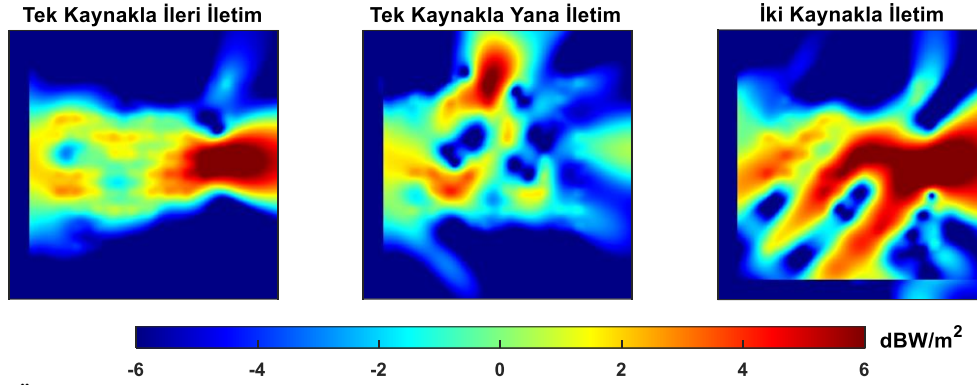
Şekil 1. 200 THz'te CSPB ile tek yönden ve iki yönden aydınlatmalar sonucunda boş uzayda oluşan elektromanyetik güç yoğunluğu ( $\text{dBW/m}^2$ ) dağılımları. Sağda nanoçubuk dizilimi etrafında tanımlanan giriş ve çıkış uçları gösterilmiştir.

Şekil 2'de üç farklı senaryo için nesil sayısına göre uygunluk fonksiyonu değerlerinin grafikleri verilmiştir. Birinci senaryoda, nanoçubuk dizisi gücün ileri yönde iletilmesini sağlayıp birinci çıkış ucuna yüksek güç sağlarken ikinci çıkış ucuna iletilen gücün azaltılması doğrultusunda optimize edilmiştir. İkinci senaryoda, elektromanyetik dalganın 90 derece döndürülmesiyle gücün ikinci çıkış ucunda yükseltilmesi ve birinci çıkış ucunda düşük tutulması hedeflenmiştir. Son senaryoda ise, iki giriş ucu da uyarılmış, birinci çıkış ucundaki güç yükseltilirken ikinci çıkış ucundaki güç bastırılmıştır.



Şekil 2. Üç farklı optik bağlaştırıcı tasarımı için optimizasyon sırasında elde edilen uygunluk fonksiyonu değerlerinin nesil sayısına göre değişimi.

Şekil 3'te, yukarıda özetlenen üç optimizasyon sonucunda elde edilen optik bağlaştırıcı tasarımlarının etrafında oluşan güç yoğunluk grafikleri verilmiştir. Bu üç senaryo için tasarlanan optik bağlaştırıcılar sayesinde, güç yoğunluğunun yükseltildiği ve azaltıldığı çıkış uçlarında elde edilen güç yoğunluğu değerleri arasındaki fark sırasıyla 17.8 dB, 9.0 dB ve 24.4 dB olmuştur.



Şekil 3. Üç farklı optik bağlaştırıcı tasarımının uygun biçimlerde uyarılması sonucu etraflarında oluşan güç yoğunluğu dağılımları.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, fotonik kristal yapılarla elde edilen kompakt nano-optik bağlaştırıcı tasarımları incelenmiştir. Örnek olarak, kare prizma şeklindeki nanoçubuklar diziler halinde kullanılmış ve bu çubuklara uygulanan var/yok optimizasyonları ile elektromanyetik iletim uçlar arasında kontrol edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon mekanizmasıyla, bu makalede gösterildiği üzere, gücü düz ve 90 derece döndürerek ileten tek giriş-çıkış bağlaştırmalara ek olarak, iki girişli yapılar tasarlanabilmektedir. Oldukça kompakt yapılara sahip bağlaştırmalar, istenilen iletim konfigürasyonlarını verimli biçimlerde gerçekleştirebilmektedir. Elde edilen olumlu sonuçlar, bu tür optimizasyonların üç boyutta değişim gösteren tasarımların elde edilmesi için de kullanılabilirliğini göstermektedir.

#### Kaynaklar

- [1]. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N. ve Meade R.D., "Photonic crystals: molding the flow of light," Princeton University Press, Ekim 2011.
- [2]. Mekis A., Chen J. C., Kurland I., Fan S., Villeneuve P. R. ve Joannopoulos J. D., "High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides," Physical Review Letters, cilt.77 no.18, s.3787–3790, Ekim 1996.
- [3]. Talneau A., Lalanne P., Agio M. ve Soukoulis C.M., "Low-reflection photonic-crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths," Optics Letters, cilt.27 no.17, s.1522–1524, Eylül 2002.
- [4]. Pissort D., Michielssen E., Ginste D. V. ve Olyslager F., "Fast-multipole analysis of electromagnetic scattering by photonic crystal slabs," Journal of Lightwave Technology, cilt.25 no.9, s.2847–2863, Eylül 2007.
- [5]. Ergül Ö., Malas T. ve Gürel L., "Analysis of dielectric photonic-crystal problems with MLFMA and Schur-complement preconditioners," Journal of Lightwave Technology, cilt.29 no.6, s.888–897, Mart 2011.
- [6]. Gagnon D., Dumont J. ve Dube L. J., "Beam shaping using genetically optimized two-dimensional photonic crystals," Journal of the Optical Society of America A, cilt.29 no.12, s.2673–2677, Aralık 2012.
- [7]. Altınoklu A. ve Ergül Ö., "Nano-optical couplers for efficient power transmission along sharply bended nanowires," ACES J., cilt. 34 no. 2, s. 228–233, Şubat 2019.
- [8]. Önel C. ve Ergül Ö., "Optimizations of patch antenna arrays using genetic algorithms supported by the multilevel fast multipole algorithm," Radioengineering, cilt.23 no.4, s.1005–1014, 2014.
- [9]. Önel C., Karaosmanoğlu B. ve Ergül Ö., "Efficient and accurate electromagnetic optimizations based on approximate forms of the multilevel fast multipole algorithm," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. cilt.15, s.1113–1115, 2016.
- [10] Ergül Ö. ve Gürel L., The Multilevel Fast Multipole Algorithm (MLFMA) for Solving Large-Scale Computational Electromagnetics Problems, Wiley-IEEE, 2014.
- [11]. Yla-Oijala, P. ve Taskinen, M., "Application of combined field integral equation for electromagnetic scattering by dielectric and composite objects," IEEE Trans. Antennas Propag., cilt.53 no.3, s.1168–1173, Mart 2005.
- [12]. Rao S. M., Wilton D. R. ve Glisson A. W., "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," IEEE Trans. Antennas Propag., cilt.30 no.3, s.409–418, Mayıs 1982.