

## Üç Boyutlu Sonlu Fotonik Kristal Yapıların Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemiyle Optimizasyon ve Benzetimleri

Navid Hosseini, Can Önal, Özgür Ergül  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Bölümü, Ankara

can.onol@metu.edu.tr

**Özet:** Bu çalışmada, istenilen yakın-alan iletim özelliklerini sağlayan fotonik kristal dizgeleri, genetik algoritmalar (GA) ve tam-dalga elektromanyetik çözümler yapabilen çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (MLFMA) ile tasarlanmıştır. Benzetimlerde fotonik kristal yapılar herhangi bir varsayımda bulunulmadan sonlu olarak modellenmiştir. Tam-dalga çözümlerinde, birleşik teğet formülasyonu (CTF) ve elektrik-manyetik akımı birleşik-alan integral denklemi (JMCFIE) kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, yeterli hassasiyette çözümler verebilen ve CTF'ye göre daha hızlı yakınsayan matris denklemleri türeten JMCFIE ön plana çıkmıştır. Sayısal deneyler ışığında, çözümlerin doğruluğundan ödün verilmeden tam-dalga çözümler hızlandırılmış ve optimizasyonlar verimli hale getirilmiştir.

**Abstract:** In this study, photonic crystal arrays are optimized to provide desired near-field properties by using genetic algorithms (GA) and the multilevel fast multipole algorithm (MLFMA). The photonic crystals are modeled as three-dimensional and finite structures in the simulations. The combined tangential formulation (CTF) and the electric-magnetic current combined-field integral equation (JMCFIE) are studied in terms of accuracy and efficiency of the full-wave solutions of numerous problems. It is observed that JMCFIE provides sufficiently high accuracy for the full-wave solutions, while it provides well-conditioned matrix equations that have faster convergence rates in comparison to those provided by CTF. As a result of numerical experiments, full-wave solutions are accelerated and the efficiency of optimizations is improved without sacrificing the quality of the optimizations.

### 1. Giriş

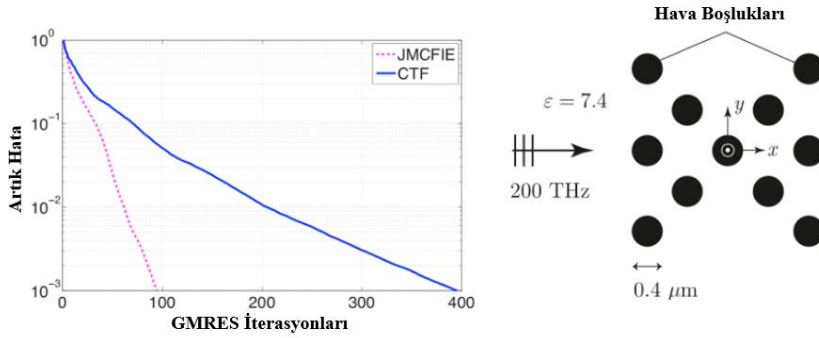
Fotonik kristal yapılar sahip oldukları özgün özellikler nedeniyle artarak popüler hale gelen insan üretimi yapılarıdır [1]. Bu yapılara ait teorik bilginin literatürde kısıtlı olması sebebiyle, istenilen elektromanyetik özellikleri elde edebilmek için, çeşitli optimizasyon mekanizmaları kullanılmaktadır [2]. Yüksek sayıda bilinmeyen içeren fotonik kristallerin çözümlerinin hızlı yapılabilmesi, optimizasyonlar için kritik önem taşımaktadır. Ancak, çözümlerin hızlı olması için benzetimlerde sonsuzluk gibi varsayımlar kullanılması durumunda da, elde edilen sonuçların doğruluğundan feragat edilmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada optimizasyonların doğru ve verimli olması için hem hızlı hem de tam-dalga elektromanyetik çözümler yapabilen çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (MLFMA) kullanılmıştır [3].

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tam-dalga çözümlerde, fotonik kristal yapılar üç boyutlu ve sonlu olarak, herhangi bir varsayım kullanılmadan modellenmiştir. MLFMA çözücü genetik algoritmalar (GA) ile birleştirilmiş ve çok geniş optimizasyon uzaylarına sahip olabilen fotonik kristal optimizasyonları, hedeflenen elektromanyetik karakteristikler için başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. GA'nın bir avantajı olarak, optimizasyon süresi boyunca GA popülasyonlarındaki bireylere karşılık gelen elektromanyetik problemlerin çözümü paralel olarak yapılabilmekte, bu da optimizasyonlara hız kazandırmaktadır [4]. Bu çalışma için geliştirilen GA uygulaması, MLFMA ile etkileşimini verimli olarak yapabilmekte, MLFMA'nın çözümlerde dinamik doğruluk sağlama avantajını optimizasyonların hızlandırılması için kullanılmaktadır. Ayrıca, GA ile MLFMA arasında kurulan özgün etkileşim, GA'nın daha önceden yapılmış çözümleri kullanmasına da olanak tanımaktadır.

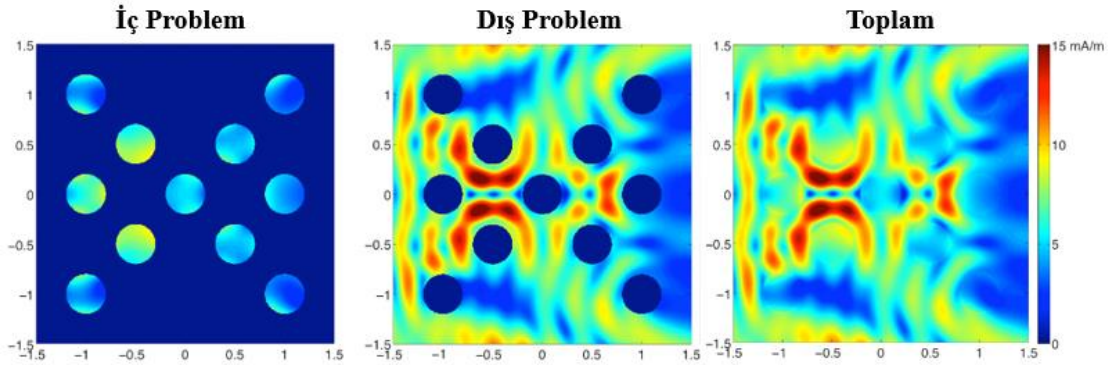
Bu bildiride, formülasyonların karşılaştırılmasına ve gerçekleştirilen optimizasyonlara örnekler verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen optimizasyon mekanizmasının yüksek etkinliğini göstermektedir.

## 2. Formülasyonların Karşılaştırılması

MLFMA elektromanyetik problemlerin tam-dalga çözümleri için Maxwell denklemlerinden elde edilmiş integral denklemlerini kullanmaktadır. Fotonik kristal yapıların çözümlerine uygun olan birleşik teget formülasyonu (CTF) ve elektrik-manyetik akımı birleşik integral denklemi (JMCFIE) ile, düzlem dalga ile aydınlatılan birçok fotonik kristal dizgenin çözümleri yapılarak, elde edilen çözümlerin doğrulukları ve hızları karşılaştırılmıştır. Örnek olarak, Şekil 1'de 11 hava çubuğundan oluşan bir fotonik kristale ait iteratif çözümler sunulmuştur. Gösterilen iterasyon grafiğinden de anlaşılacağı üzere, aynı problem için JMCFIE ile elde edilen matris denklemi, CTF ile elde edilene göre çok daha az iterasyonla ve hızlı olarak çözülebilmektedir. Şekil 2'de JMCFIE ile elde edilen manyetik alanı değerleri, hem iç hem de dış problem için gösterilmiştir. Bu grafiklerde, ışınım olmaması gereken bölgelerde düşük değerlerin elde edildiği ve dolayısıyla JMCFIE ile hassas sonuçlar üretilebildiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak fotonik kristal optimizasyonları için JMCFIE'nin kullanılması uygun görülmektedir.



Şekil 1. Toplam 11 hava çubuğu içeren fotonik kristal dizgenin 200 THz'de düzlem dalga ile aydınlatıldığı problem için CTF ve JMCFIE ile elde edilen artık hata yakınsama grafikleri.

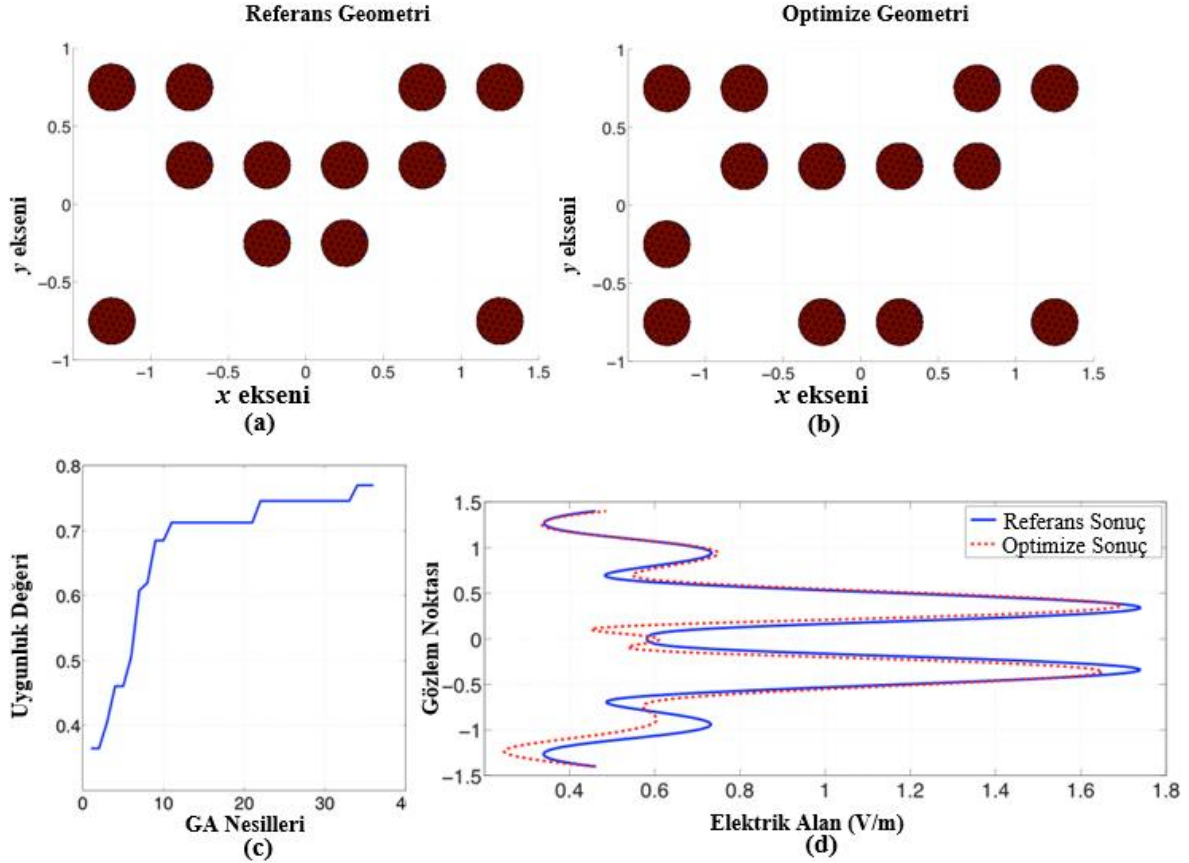


Şekil 2. Şekil 1'deki fotonik kristal yapısının 200 THz'de düzlem dalga ile aydınlatılması sonucu, JMCFIE ile elde edilen yakın-bölge manyetik alanı sonuçları.

## 3. Optimizasyon Sonuçları

Geliştirilen optimizasyon mekanizmasının testleri için, referans olarak seçilen fotonik kristallerin iletim özellikleri hedef olarak belirlenmiş ve optimizasyonlar sonucu bu özellikleri en iyi sağlayan fotonik kristallerin bulunması amaçlanmıştır. İstenilen referansa yakınsayabilmek için önceden belirlenen sayıda dielektrik çubuk ile başlanılan optimizasyonlarda, optimizasyon parametresi olarak dielektrik çubukların dizilişleri kullanılmakta ve istenilen özellikleri en uygun biçimde sağlayan fotonik kristal yapısı bulunmaktadır. Örnek olarak, Şekil 3(a)'da referans olarak verilen bir fotonik kristal yapısı ve optimizasyonlar sonucu elde edilen yapı gösterilmiştir. Bu testlerde de, fotonik kristaller dairesel hava çubuklarından oluşmakta ve yapıların bulunduğu dış ortam geçirgenliği 7.4 olan dielektrik malzeme olarak modellenmektedir. Referans yapıya ait yakın bölge elektrik alanı değerleri 200 THz'de düzlem dalga ile aydınlatma sonucu elde edilmiştir. 4x6 dizge formasyonu ile başlanılan optimizasyon problemi, 24 bitlik 1 ve 0'lardan oluşan GA bireyleri ile modellenmiştir. Bu durumda optimizasyon problemi  $2^{24}$  ihtimal içeren bir optimizasyon uzayına sahip olmaktadır. GA bireylerinin 1 ve 0'lardan oluşması, sırasıyla bu bitlere karşılık gelen hava çubuklarının belirlenen konumda olacağını ve olmayacağını belirtmektedir. Optimizasyon hedefi olarak, referans yapının yakın-alan karakteristiğine %75

oranında benzerlikte yakın-alan özellikleri gösteren bir yapının bulunulması amaçlanmıştır. GA nesillerinin her birinde elde edilen ve optimizasyon amacına en uygun geometrinin uygunluk değerini gösteren Şekil 3(c)'de, %70 başarı oranına 10 nesil sonucunda ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Her bir GA neslinde 20 adet birey kullanıldığı için yaklaşık 200 tam-dalga çözümü ile %70 başarı oranının yakalandığı, %75'lik başarı oranına ulaşmak için ise 25 nesil daha gerektiği görülmektedir. Optimizasyon sonucunda elde edilen yapı Şekil 3(b)'de gösterilmiştir. Şekil 3(d)'de ise, referans ve optimizasyonlar sonucu elde edilen yakın-bölge elektrik alanı değerleri karşılaştırılmıştır. Optimizasyonlar sonucu elde edilen grafiğin referans değerler ile son derece tutarlı olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3. (a) Referans geometri, (b) optimize edilmiş geometri, (c) GA nesillerine göre uygunluk değeri yakınsaması, (d) referans ve optimize edilmiş olan fotonik kristallerin yakın-alan sonuçları.

#### 4. Sonuç

GA ve MLFMA'nın birbirlerine entegre edilmesi ile üç boyutlu fotonik kristallerin optimizasyonları için hızlı ve hassas bir optimizasyon ortamı geliştirilmiştir. Optimizasyon mekanizmasının etkinliği,  $2^{24}$  olasılık içeren optimizasyon uzaylarının 700 deneme gibi az sayıda tam-dalga çözümüyle taranabilmesiyle gösterilmiştir. Tam-dalga çözümleri kapsamında, CTF ve JMCIE'nin performansları doğruluk ve hız açısından karşılaştırılmış, optimizasyon amacına uygun olarak avantaj sağlayan JMCIE optimizasyonlarda tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sunulan optimizasyon mekanizmasının kabiliyetlerini göstermektedir.

#### Kaynaklar

- [1]. Wu H., Jiang L. Y., Jia W., ve Li X. Y., "Imaging properties of an annular photonic crystal slab for both TM-polarization and TE-polarization," J. Opt., cilt.13, 2011.
- [2]. Gagnon D., Dumont J., ve Dubé L. J., "Beam shaping using genetically optimized two-dimensional photonic crystals," J. Opt. Soc. Am. A, cilt.29, s.2673-2678, 2012.
- [3]. Ergül Ö. ve Gürel L., The Multilevel Fast Multipole Algorithm for Solving Large-Scale Computational Electromagnetics, Wiley, 2014.
- [4]. Rahmat-Samii Y. ve Michielssen E., Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms, Wiley, 1999.