

## Fotonik Kristal ve Plazmonik Yapıların 3B Benzetimlerinin Hızlandırılması için Çubuk Dizilerinin İyi-Koşullu 2B Modelleri

Murat Enes Hatipoğlu, Emrah Sever, Fatih Dikmen, Özgür Eriş\*, Özgür Ergül\*,  
Gebze Teknik Üniversitesi  
Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Kocaeli  
[hatipoglume@gtu.edu.tr](mailto:hatipoglume@gtu.edu.tr), [emrahsever@gtu.edu.tr](mailto:emrahsever@gtu.edu.tr), [dikmen@gtu.edu.tr](mailto:dikmen@gtu.edu.tr)

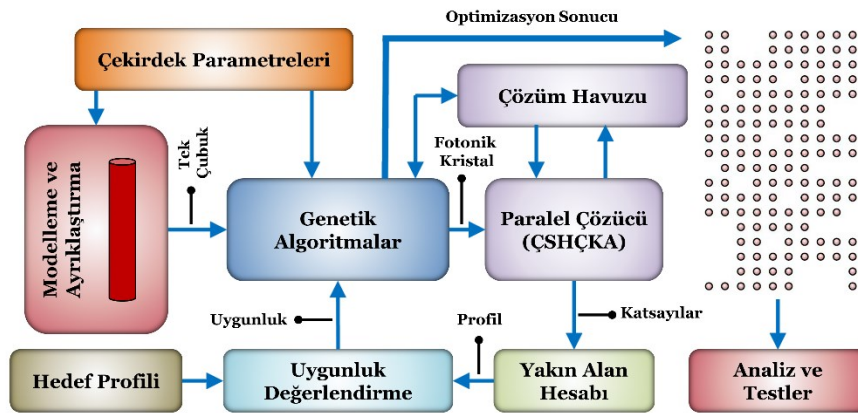
\*Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ankara  
[eris.ozgur@metu.edu.tr](mailto:eris.ozgur@metu.edu.tr), [ozergul@metu.edu.tr](mailto:ozergul@metu.edu.tr)

**Özet:** Çubuk dizileri, plazmonik, fotonik kristal ve sıfıra yakın indisli yapılar gibi yüksek frekanslı rezonans saçılma düzeneklerinin tasarımında kullanılan sonlu uzunluktaki silindirlere oluşur. Bu yapıların üç boyutta genetik algoritmalar aracılığıyla optimize edilmeleri sırasında, çok seviyeli hızlı çokkutup algoritması ile analizleri zaman darboğazı oluşturmaktadır. Öte yandan, çoğu uygulamada benzetim sonuçları silindir boyundan bağımsız nitelikler göstermektedir. Bu nedenle iki boyutta iyi koşullu çözümlerden yararlanma fikri değerlendirmeye değer bulunarak bu çalışmada iki tip çözücünün karşılaştırılması hedeflenmiştir.

**Abstract:** Rod arrays consist of finite-length cylinders used in the design of high-frequency resonance scattering assemblies, such as plasmonic, photonic crystal, and near-zero-index structures. During the optimization of these three-dimensional structures by means of genetic algorithms, analyses with the multilevel fast multipole algorithm create a time bottleneck. On the other hand, simulation results in many applications show features independent of cylinder length. For this reason, the idea of using well-conditioned solvers in two dimensions is found worth evaluating and it is aimed to compare the two types of solvers in this study.

### 1. Giriş

Nano ölçeklerde tasarlanan fotonik kristal yapılarının incelenmesine dair teknikler, Maxwell denklemlerini sağlayan elektromanyetik alanların sınır integral denklemlerinin hızlandırılmış tam dalga çözümler ile belirlenmesine dayanır. Bu çözümler örneğin [1]'de olduğu gibi diyelektrik çubukları barındıran fotonik kristal yapıları, genetik algoritmalar kullanılarak optimize ederken kullanılmaktadır. Burada geliştirilmiş simülasyon ve optimizasyon ortamının bileşenleri Şekil 1.'deki gibi verilmiştir; ancak çubuk dizilerinin yer aldığı uygulamalar için bu şema temel kabul edilebilir [2].

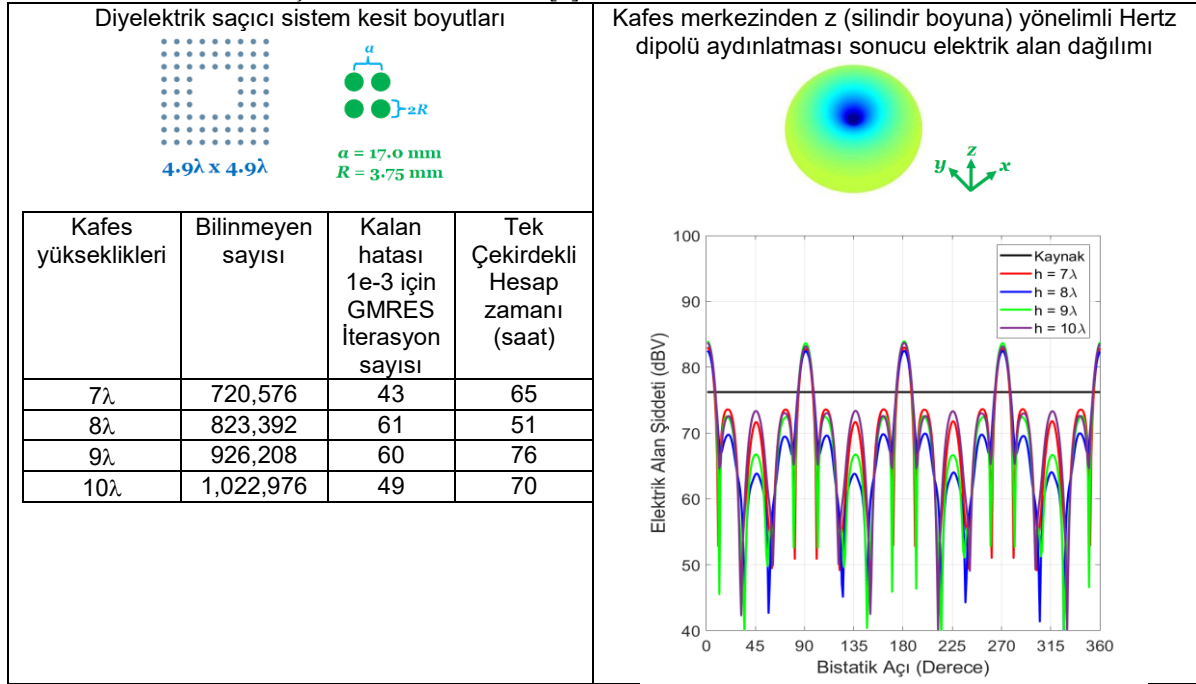


Şekil 1. Diyelektrik çubukları barındıran üç boyutlu (3B) fotonik kristallerin benzetimi ve optimizasyonu için geliştirilen ortam.

Burada hedeflenen profile varmak için optimize edilecek parametreler ve tek bir çubuk bilgileri genetik algoritmalara girilerek bir çözüm havuzu oluşturulmasına yol açılır. Bu havuzdan gelen saçıcı profilleri paralel olarak çalışan çok seviyeli hızlı çokkutup algoritmasına (ÇSHÇKA) göre aydınlatılarak çözülür ve elde edilen katsayılar ile yakın alan üretilir. Yakın alan, hedef profili ile uygunluk değerlendirmesi yoluyla karşılaştırılır ve genetik algoritmaya geri besleme verir. İstenen profile ulaşmaya kadar çözüm havuzundan saçıcı profilleri ÇSHÇKA ile işlenir. Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyonların süresinin kısaltılabilmesi için ilgili ünite bu elektromanyetik çözücüdür. Problemlerin ÇSHÇKA ile hızlandırma sırasında düşük iterasyon sayılarında istenen doğrulukta sonuç bulunmasının, ilgili problemin kullandığı yüzey integral denkleminde olduğu ve en uygun seçimin her problem için değiştiği gösterilebilmektedir. Örneğin, [3]'teki incelemeden takip edilebilir ki plazmonik yapılar için bu MCTF (modified combined tangential formulation) olmuştur. Sıfıra yakın indisli (SYİ) yapılar için de yapılmış çalışmalar ise JMCFIE (electric-magnetic current combined field integral equation) formülasyonuna işaret etmektedir [2].

## 2. Çubuk Dizisinin Üç Boyutlu ÇSHÇKA Benzetimi ve İki Boyutlu Nitelikleri

Şekil 2'de bu türden uygulamalarda simülasyon konusu olan çubuk dizilere dair [4]'te değinilen parametreler ile gerçekleşen bir senaryo yer almaktadır. Dairesel kesitli ve çeşitli yüksekliklerdeki çubuk dizi kare kafes yapısı olarak oluşturulmuş ve ortasından  $\lambda=2.91\text{cm}$  olan frekansta uyarılmıştır.  $\lambda/10$  kuralı uyarınca üçgen ayrıklaştırılması yapıldıklarında kullanılan bilinmeyen sayıları ile iterasyon hataları ve çözüm zamanları Şekil 2.'deki tabloda verilmiştir. Bu formülasyon iki katmanlı yaklaşık ÇSHÇKA uygulaması ile ön-koşullanarak hızlandırılmakta ve bu sonuçlarda kullanılmaktadır [5].

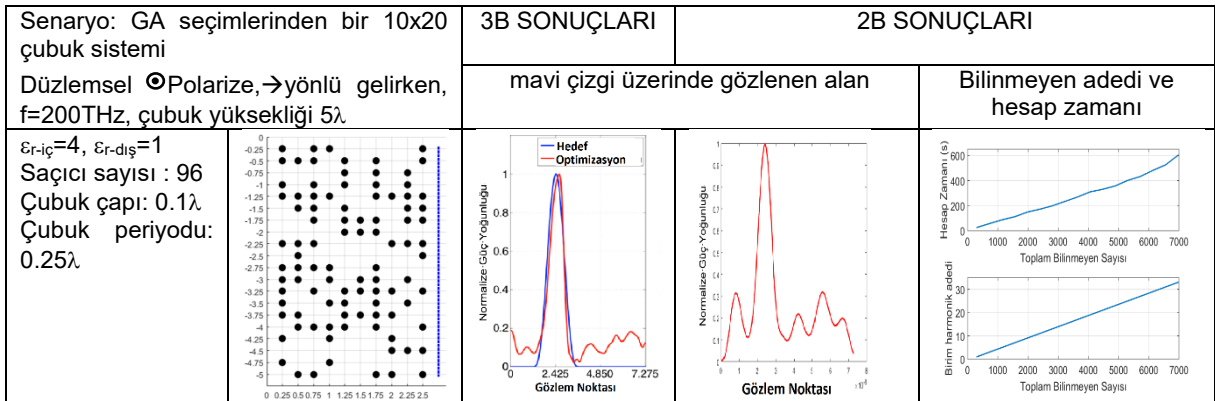


Şekil 2. Bir çubuk dizisi senaryosu için 3B çözücü başarımları.

Şekil 2'deki tablodan, hesaplamaların gerçekleşmesi için gereken zaman büyüklükleri bakımından, genetik algoritma gen havuzundan adayların her birini çözüp belirli bir tasarım hedefi için uygunluğunun değerlendirilmesi için gereken sürenin azımsanamayacak ve azaltılmasının yollarını düşünmeyi gerektirecek kadar büyük olduğu anlaşılmaktadır. Öte taraftan Şekil 2'deki farklı yükseklikler için bistatik yakın alanlara bakıldığında ilgili geometrinin silindirik özelliği, yani boyuna doğrultuda uzunluğun artmasıyla, özellikle azami değerlerin gözlemlendiği doğrultuların açıları bakımından değişimin çok az olduğu, bir karakteristik olarak göze çarpmaktadır. Bu da akıllara doğal olarak kesit düzlemi üzerinde boyuna doğrultu uzunluğu sonsuza giderken formüle edilebilecek olan iki boyutlu (2B) dalga saçılması algoritmalarını getirmektedir. Bu nedenle bazı çubuk dizi konfigürasyonları seçilerek bunların boyuna dik doğrultuda ilerleyen düzlemsel dalga aydınlatması altında 2B çözümler aracılığıyla yakın saçılan alanları karşılaştırılmıştır. Bu tür çözümler eğik geliş doğrultusunda genelleştirilerek Şekil 2'deki aydınlatma halinde boyuna düzlem dalga tayfının integrasyonu ile tanımlı Fourier dönüşümü aracılığı ile hesaba katılabilirler [8]. Böyle bir halde çözümler, aşağıda verilen sürelerin tayf örnekleme katı kadar bir sürede elde edilebilecektir.

### 3. Çubuk Dizilerinin 2B İyi Koşullu Saçılma Matrisi ile Analiz Sonuçları ve Karşılaştırma

Çubuk dizilerinin kesiti dairesel olarak varsayıldığından [6] ve [7] ile çalışılmış iyi koşullu 2B saçılma matrisi (İK2BSM) yöntemi kullanılmıştır. 3B çubuk dizi kesitleri kare gibi dairesel kesit simetrisinden az sapmış olduğunda da bu yöntem T-Matrisi yöntemi [8] ile örtüşerek tatmin edici sonuçlar vermektedir. Şekil 3'te anlatılan aydınlatma senaryosu altında belirli bir ışınma hedefi için genetik algoritmalar ile optimize edilerek elde edilen 3B kare kesitli çubuk dizilerinden oluşan bir sistemin dairesel kesitli biçiminin İK2BSM ile çözümlerinin 3B çözümler ile karşılaştırılması yer almaktadır. İK2BSM çözümlerinin hesaplama zamanının birimi "saniye"dir. Bu vaka için birim dairesel çubuk kesit alanı  $0.04\lambda^2$  olan kare çubuk kesit alanı düzeyinde tutulmuştur ve İK2BSM çözümleri ile gözlem çizgisi üzerindeki alan değeri, silindirik başına 3 harmonik alındığındaki en düşük bilinmeyen adedinde dahi 3B çözümlerinin sonuçları ile örtüşmektedir. Ayrıca tüm harmonik seçimleri için çözüm yakınsamaktadır. Yine de harmonik ve bilinmeyen sayısı artırılarak mevcut çözümlerin artan bilinmeyen sayıları için çözüm zamanları çıkarılmak istenmiştir. 10x20 çubuk sistemi için 7000 civarında bilinmeyen için 10-20 dakika arasında süre gerektirdiği görülmektedir. Bu türden sürelerin gerçek gereksinimin ancak birim saçıcıların kesitlerinin dalga boyunun katlarıncaya boyutlara varmaları halinde ortaya çıkacağı kolaylıkla öngörülebilir.



Şekil 3. Genetik algoritma ile tespit edilmiş 3B çubuk dizisi ve aynı aydınlatma altında 2B çözümler ile değerlendirilmesine dair sonuçlar

### 4. Sonuç

Modern yüksek frekanslı haberleşme sistemleri gibi çeşitli alanlarda önemli yer edinen çubuk dizilerinin tam dalga benzetimleri için 3B süreçlerin yerine veya bunların hızlandırılmasında kullanılmak üzere 2B çözümlerinin çok daha kısa sürelerde doğru sonuç verdiği bazı örnekler ile gösterilmiştir. Bu, iki çözümlerinin gelecekte bütünleştirilmesine yönelik çabaları teşvik edici bir sonuçtur.

### Kaynaklar

- [1]. Karaosmanoğlu, B., Eray, H., ve Ergül, Ö., "Full-wave optimization of three-dimensional photonic-crystal structures involving dielectric rods," J. Opt. Soc. Am. A., 37, 7, 1103–1113, July, 2018.
- [2]. Karaosmanoğlu, B., Özmü, U., ve Ergül, Ö., "Novel SIE Formulations for Accurate and Stable Analysis of Near-Zero-Index Materials", in Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp., Atlanta, ABD, 1453–1454, Temmuz 2019.
- [3]. Karaosmanoğlu, B., Yılmaz, A., ve Ergül, Ö. "A comparative study of surface integral equations for accurate and efficient analysis of plasmonic structures", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 6, 3049–3057, June, 2017.
- [4]. Huang, X., Lai, Y., Hang, Z.H., Zheng, H., ve Chan, C.T. 2011, "Dirac cones induced by accidental degeneracy in photonic crystals and zero-refractive-index materials", Nature Materials, çevrimiçi basım tarihi: 29 Mayıs 2011 | doi: 10.1038/nmat3030.
- [5]. Önel, C., Üçüncü, A., ve Ergül, Ö., "Efficient multilayer iterative solutions of electromagnetic problems using approximate forms of the multilevel fast multipole algorithm," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 16, 3253–3256, 2017.
- [6]. Sever, E., Dikmen, F., Tuchkin, Y. A., ve Sabah, C., "A numerically stable algorithm for scattering from several circular cylinders including metamaterials with different boundary conditions", Optik, 168, 667–676, 2018.
- [7]. Dikmen F., Sever E., Vatanserver S., ve Tuchkin Y. A., "Well-conditioned algorithm for scattering by a few eccentrically multilayered dielectric circular cylinders" Radio Sci. 50 , 99–110, 2015.
- [8]. Chew. W. C. Waves and Fields in Inhomogeneous Media. Wiley-IEEE Press New York, ABD, 1999.