

Yüzey İntegral Denklemleriyle Plasmonik Nanoantennelerin Elektromanyetik Güç Çoğaltma Faktörü Analizleri

Uğur Meriç Gür, İhsan Emre Üstün, Özgür Ergül
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara

mgur@metu.edu.tr, emre.ustun@metu.edu.tr, ozgur.ergul@eee.metu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, optik frekanslarında incelenen ve plasmonik özellikler gösteren, çeşitli algılama, enerji hasatı ve görüntüleme gibi uygulamalarda kullanılabilen nanoantenneler incelenmiştir. Geometri ve materyal özelliklerine bağlı olarak nanoantennelerin elektromanyetik güç çoğaltma faktörleri hesaplanmıştır. Hassas benzetimler için, yüzey integral denklemleri kullanılmış ve bu denklemler momentler metoduyla çözülmüştür. Hassas çözümler sayesinde, verilen bir geometri için çoğaltma faktörünün hangi boyutlarda ve hangi frekanslarda yüksek seviyelere çıktığı tespit edilmiştir.

Abstract: In this study, plasmonic nanoantennas, which are used for energy harvesting, sensing and imaging applications in optical frequencies, are investigated. Their electromagnetic power enhancement factors are analyzed according to the geometry and material properties. Surface integral equations are solved via the method of moments in combination with iterative algorithms for fast and accurate simulations. With those rigorous solutions, frequencies and antenna sizes, for which the enhancement factors are minimized, are determined for a given geometry of the object.

1. Giriş

Nanoantennelerin, elektromanyetik spektrumun kızılötesi ve görünür ışık bölgesinde enerji hasatı, moleküler algılama, yüzey-zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi (SERS) ve görüntüleme uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir [1],[2]. Bu frekanslarda bazı metallerin elektriksel davranışları, özellikle elektriksel geçirgenlikleri, bahsedilen uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Örneğin, plasmonik özellikler gösteren metaller, güç çoğaltımı gerektiren uygulamalar için idealdir. Plasmonik hale gelen metallerin mükemmel iletken olarak modellenemeyeceği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [3]. Örneğin, homojenleştirme uygulandığında, plasmonik yapıların elektriksel geçirgenliğinin negatif bir reel kısım ile modellenmesi gerekmektedir. Bu da var olan dielektrik çözücülerin, negatif parametreler alabilecek şekilde yenilenmelerini gerektirmektedir.

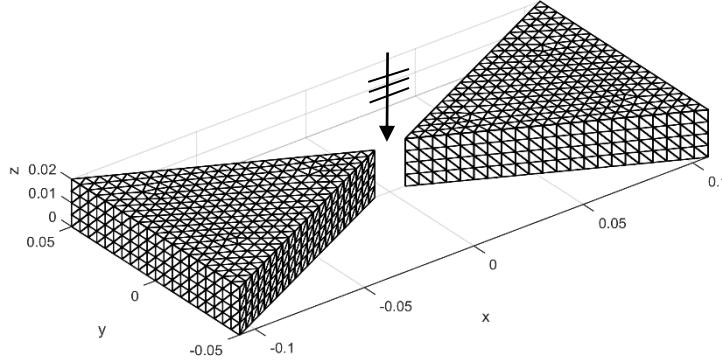
Nanoteknolojinin günden güne daha da gelişmesiyle birlikte, nanoantenneler de bilimsel literatürde popülerlik kazanmıştır. Bu antenlerin çeşitli uygulamalarda daha çok kullanılması, bu yapıların hassas elektromanyetik çözümlerine olan ihtiyacı da artırmıştır. Öte yandan, normal materyaller için geliştirilmiş olan elektromanyetik çözücülerin, plasmonik yapılara uygulanmasında çeşitli problemler bulunmaktadır. Özellikle, benzetimler için kullanılan formülasyonun seçimi, çözümlerin doğruluğu ve verimi bakımından önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, plasmonik olarak modellenen nanoantenneler, elektrik-manyetik akımı birleşik-alan integral denklemi (JMCFIE) [4], birleşik teğet formülasyonu (CTF) ve değiştirilmiş birleşik teğet formülasyonu (MCTF) gibi çeşitli yüzey integral denklemleriyle incelenmiştir. Bu formülasyonlar, papyon tipi başta olmak üzere çeşitli antenler üzerinde uygulanmıştır. Bu kapsamda, özellikle antenler etrafında toplanan güç yoğunluğunun frekansa ve geometrik boyuta göre değişimi incelenmiştir.

2. Yöntem ve Sayısal Sonuçlar

Nanoantenneler üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalar ve sayısal benzetimlere örnek olarak, literatürde sıkça kullanılan papyon tipi nanoantenneler ele alınmıştır. Şekil 1'de gösterilen papyon tipi antenler 2888 üçgen eleman ve 4332 Rao-Wilton-Glisson (RWG) fonksiyonuyla ayrıklaştırılmış olup, gösterilen kurguda $+x$ polarizasyona sahip düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Bu nanoantennelerde materyal olarak, diğer alternatiflerine göre, kullanılan frekans bandında görece daha iyi tepkiler verdiği tespit edilmiş olan gümüş kullanılmış, gümüşün elektriksel

geçirgenliği de Lorentz-Drude modeli temel alınarak hesaplanmıştır [5]. Bu geçirgenlik değerlerinin reel kısımlarının optik frekanslarında yüksek negatif değerler aldığı bilinmektedir.

Gümüş dahil olmak üzere metallerin plasmonik özellikleri ve dolayısıyla Lorentz-Drude modellerinde kullanılan geçirgenlik değerleri frekansa bağlıdır. Dolayısıyla radyo ve mikrodalga frekanslarında kullanılan antenlerden farklı olarak, nanoantenlerin sadece elektriksel boyutları değil, aynı zamanda gerçek boyutları da önemlidir. Bu doğrultuda, nanoantenlerin hem frekansa hem de metrik boyutlara bağlı olarak incelenmeleri gerekmektedir. Şekil 1’de gösterilen 20 nm kalınlığı, 100 nm genişliği ve 207 nm uzunluğu olan papyon tipi nanoantenler üzerinde geometrik katsayıyla ölçeklendirme yapılmıştır. Örneğin, geometrik katsayının 0.5 olması, kullanılan geometrinin iki kat küçültüldüğü anlamına gelmektedir. Geometrik katsayının frekansla birlikte incelenmesiyle, verilen bir nanoanten geometrisinin güç çoğaltma faktörünün en iyi olduğu bölgeler tespit edilebilmektedir.



Şekil 1. Örnek olarak kullanılan papyon tipi antenin orijinal boyutları ve incelenen aydınlatma senaryosu. Uzunluklar mikrometre cinsinden verilmiştir.

Papyon tipi nanoantenin, CTF ve MCTF’nin kullanılmasıyla elde edilen güç çoğaltma faktörü değerleri, sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’te sunulmuştur. Bu sonuçlarda, 0.5 ile 4 arasındaki geometrik katsayılarla 250 ile 600 THz arasındaki frekanslarda nanoantenin tam ortasında hesaplanmış güç çoğaltma faktörü ele alınmıştır. Bu şekillerdeki her bir piksel, verilen bir geometrik katsayı ve frekans için elde edilen çoğaltma faktörüne karşılık gelmektedir. Güç çoğaltma faktörü ise nanoantenin tam orta noktasında toplanmış olan elektromanyetik güç yoğunluğunun, uyarım güç yoğunluğuna oranlanmasıyla elde edilmiştir. Her birinde 1296 farklı benzetim sonucu barındıran bu şekillerden de görülebileceği gibi, 450 THz’de 0.8 geometrik katsayı ile en yüksek güç çoğaltma faktörü değeri, 67 civarında elde edilmiştir. Dar bir bantta yüksek güç çoğaltma faktörü elde edildiği gözlemlenen gümüş papyon tipi nanoantenin, geometrik katsayı değeri 0.5’e ayarlandığında, görünür ışık tayfında yüksek güç çoğaltma faktörü değerleri verdiği saptanmıştır. Ayrıca, elde edilen değerlerin farklı formülasyonlarda tutarlılık göstermesi, sonuçların doğruluğunu teyid etmektedir.

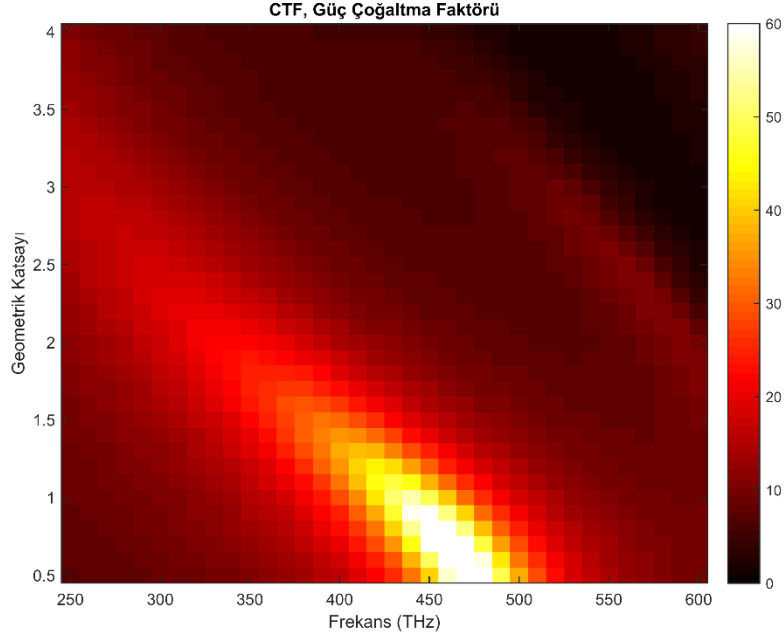
3. Sonuç

Bu çalışmada, optik frekanslarında farklı uygulamalar için kullanılabilen nanoantenler, yüksek doğrulukta yüzey integral denklemleriyle incelenmiştir. Optik frekanslarında, metallerin plasmonik özellikleri, hesaplamalara Lorentz-Drude modeliyle dahil edilmiştir. Düşük frekanslarda kullanılan antenlerden farklı olarak, elektromanyetik ölçekleme kullanılmadığından, analizlerde hem frekans hem de metrik boyutlar ele alınmıştır. Gerçekleştirilen binlerce benzetim sayesinde, verilen bir geometri için, yüksek güç çoğaltma faktörü elde edilebilen bölgeler hassas olarak tespit edilmiştir. Analizlerin farklı geometrilere de uygulanmasıyla birlikte, enerji hasatı ve benzeri uygulamalar için en iyi sonuçları veren nanoanten yapıları bulunabilecektir.

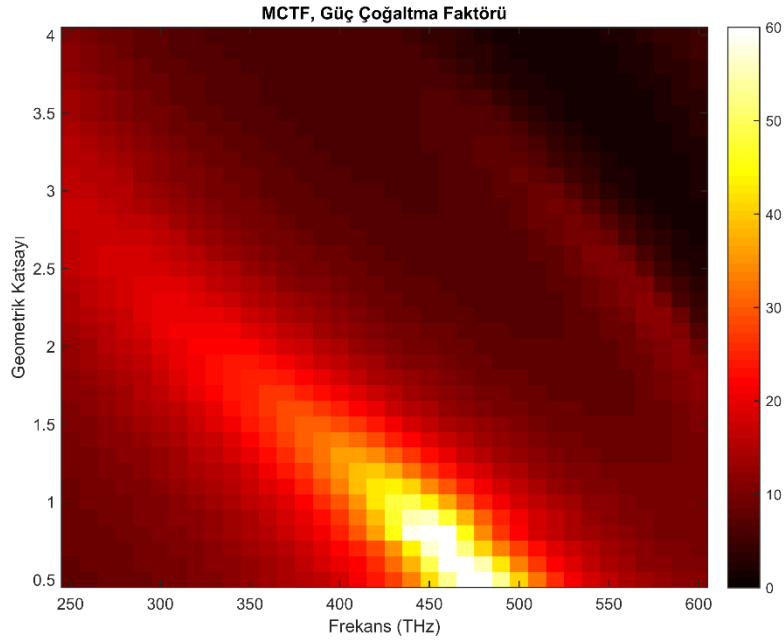
Kaynaklar

- [1]. Muhlshlegel P., Eisler H. J., Martin O. J. F., Hecht B., ve Pohl D. W., “Resonant optical antennas,” Science, cilt.308, s.1607–1609, 2005.
- [2]. Kinkhabwala A., Yu Z., Fan S., Avlasevich Y., Mullen K., ve Moerner W. E., “Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantennas,” Nat. Photonics, cilt.3, s.654–657, 2009.
- [3]. Karasmanoğlu B., Gür U.M., ve Ergül Ö., “Plasmonik özellik gösteren nanoantenlerin yüzey integral denklemleriyle yüksek doğrulukta analizleri,” URSI-Türkiye’2014 VII. Bilimsel Kongresi, Elazığ, Türkiye, s.53-55, Ağu. 2014.

- [4]. Ergül Ö., "Solutions of large-scale electromagnetics problems involving dielectric objects with the parallel multilevel fast multipole algorithm," J. Opt. Soc. Am. A., cilt.28, s.2261-2268, 2011.
- [5]. Johnson P. B. ve Christy R. W., "Optical constants of the noble metals," Phys. Rev. B, cilt.6, s.4370-4379, 1972.



Şekil 2. CTF ile elde edilmiş güç çoğaltma haritası.



Şekil 3. MCTF ile elde edilmiş güç çoğaltma haritası.