

Inkjet Basım Tekniği ile Düşük Maliyetli Metamalzeme Tasarımı ve Üretimi

Barışcan Karaosmanoğlu, Hande İbili, Özgür Ergül
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara
bariscan@metu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada üç-boyutlu metamalzeme tiplerinden olan ayırık-halka rezonatörlerinin (SRR) inkjet yazıcılar ile üretimi gösterilmiştir. Çeşitli SRR dizgeleri, benzetimlerinin ardından, gümüş içerikli kartuş ile inkjet yazıcılar kullanarak basılmış ve ölçüm ortamında test edilmiştir. Ölçüm sonuçları, tasarlanan mekanizmanın düşük maliyetli olmasına karşın, üç-boyutlu metamalzemelerin basit inkjet yazıcılar ile üretilebileceğini göstermektedir.

Abstract: In this work, fabrication of a type of three-dimensional metamaterials, namely split-ring resonators (SRR), via inkjet printers is shown. Following their simulations, various SRR arrays are printed using silver-based cartridges in simple inkjet printers, and then tested in measurement environment. Despite the low cost of the designed mechanism, the measurement results demonstrate that three-dimensional metamaterials can be fabricated via simple inkjet printers.

1. Giriş

Son yıllarda, antenler, radyo frekanslarında tanımlama etiketleri, ve sensörler [1]-[6] gibi birçok kablosuz iletişim bileşeninin inkjet yazıcılar ile düşük maliyetle üretimleri gündeme gelmiştir. Frekans seçici yüzeyler (FSS) ve metamalzemelerin de bu yolla üretimi birçok araştırmanın konusu olmuştur [7]-[9]. Bu çalışmada üç boyutlu ayırık-halka rezonatör (SRR) dizgelerinin, gümüş-bazlı kartuş kullanarak inkjet yazıcılarla ucuz imalatı ele alınmıştır.

2. Düşük Maliyetli Inkjet Basımı

SRR dizgelerinin düşük maliyetli imalatı şu şekilde özetlenebilir.

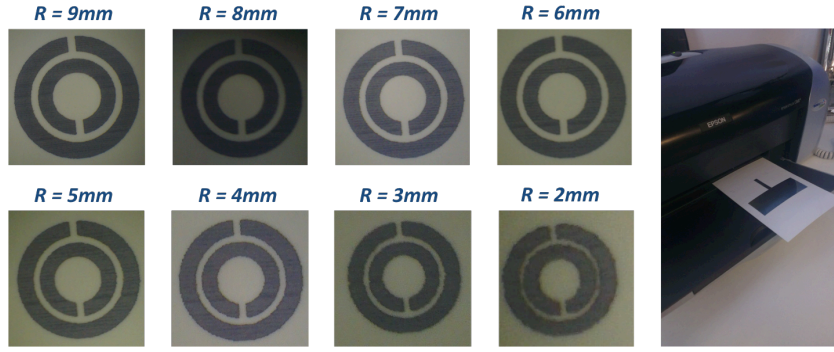
- İlk olarak, çizim programı yardımıyla, SRR'lerin şablon siyah modelleri oluşturulmaktadır. Böylece SRR katlarının baskısı, kolaylıkla, tek seferde yapılabilir. Baskılar için ticari bir inkjet yazıcı (Epson Workforce 30) ile %25 oranda gümüş içeren (Novacentrix JS-B25P) mürekkep kullanılmıştır. Bazı basım denemeleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Baskılarda fotoğraf kağıdı tercih edilmiştir. Bunun sebebi, fotoğraf kağıtlarının hem baskıya hem de ısıya normal kağıtlara göre daha dayanıklı olmasıdır.
- Baskılar yazıcıdan çıktıktan sonra 150°C'de yaklaşık bir saat fırınlanmaktadır. Bu sayede, püskürtülmüş gümüş parçacıklarının birbirlerine daha iyi tutunmaları sağlanmakta ve baskıların iletkenlikleri artırılmaktadır. Daha düşük sıcaklıkta ve/ya sürede fırınlanması iletkenlik problemlerine yol açmaktadır. Daha uzun sürelerde ise baskı kağıdında bükülmeler, hatta yanıklar meydana gelebilmektedir.
- Üç boyutlu yapılarda, baskı katlarının arasındaki uzaklığı ayarlayabilmek için köpük bazlı malzeme kullanılmıştır. Baskı kağıtları ve köpük katlar birbirlerine basit bir yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Bu sayede yapılar dayanıklılık kazanmış ve gümüş baskıların hava teması kesildiği için oksitlenmesi engellenmiştir.

Baskıların kalitesi ve hassasiyeti Şekil 1'de farklı boyutlardaki SRR'ler için gösterilmiştir. Belirli bir boyutun altında (3 mm), homojen çizgi yapısı bozulmakta ve SRR halkaları birbirine temas etmektedir. Dolayısıyla, basılabilen SRR'lerin boyutlarında sınırlar bulunmaktadır.

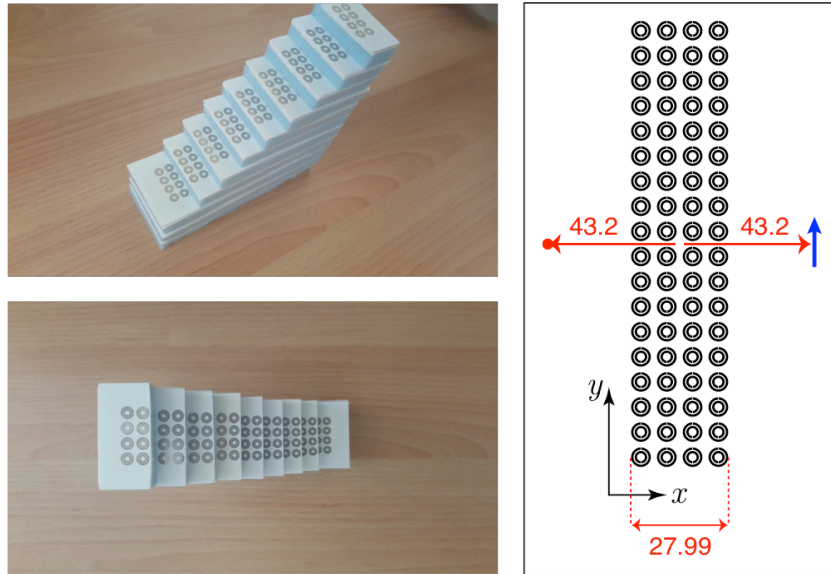
3. SRR Dizgelerinin Sayısal Benzetimleri ve Ölçümleri

Bu çalışmada ele alınan SRR dizgesine ait şablon siyah model ve tam yapı görselleri Şekil 2'de verilmiştir. Toplam 792 elemandan oluşan $4 \times 18 \times 11$ 'lik SRR dizisinde, 4×18 'lik SRR katları z ekseninde 13 mm arayla yerleştirilmiştir. Yatay eksenindeki SRR elemanlarının arasındaki mesafe 7.33 mm olarak belirlenmiştir. Yapının toplam boyutu ise $27.99 \times 130.61 \times 130.0$ mm'dir.

Dizgeyi oluşturmak için kullanılan her SRR elemanı iç içe iki halkadan oluşmaktadır. İçerideki küçük halkanın iç yarıçapı 1.2 mm, dış yarıçapı ise 1.88 mm'dir. Büyük halkanın iç ve dış yarıçapları ise sırayla 2.25 mm ve 3.0 mm'dir. Halkaların üzerinde, y ekseninde ve birbirine zıt yönde yerleştirilmiş 0.2 mm kalınlığında açıklıklar bulunmaktadır. Bu açıklıklar sayesinde hem SRR'ler hem de tüm dizge rezonansa girmektedir. SRR dizgelerinden elektromanyetik iletim problemlerinin formülasyonları için elektrik-alan integral denklemi (EFIE) kullanılmıştır. Yüzeyler sıfır kalınlıklı levhalar olarak modellenmiş ve üçgenlere ayrılmıştır. Yüzeyler üzerinde indüklenen akımlar, üçgenlerin üzerinde tanımlanan Rao-Wilton-Glisson (RWG) fonksiyonlarıyla ayrıştırılmıştır. Ayrıca, problemlerin hızlı ve etkin çözümleri için çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (MLFMA) kullanılmıştır. Benzetimlerde, SRR dizgesinin merkezinden 43.2 mm uzaklığa y yönünde bir Hertzian dipol yerleştirilmiştir. Dizgenin merkezine simetrik diğer noktada ise elektrik ve manyetik alanı değerleri hesaplanmıştır. Bu alan değerleri ile boş uzaydaki Hertzian dipolünün alan değerleri oranlanarak elektromanyetik iletim değerleri bulunmuştur.



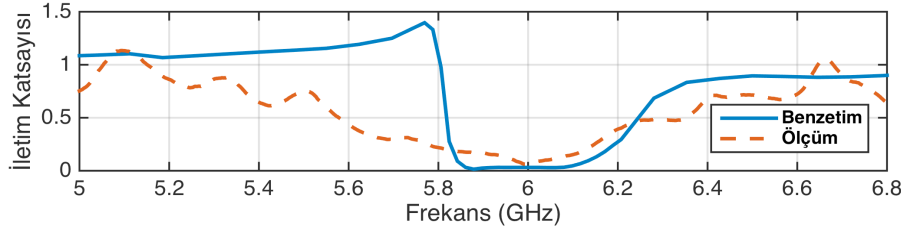
Şekil 1. Farklı SRR boyutlarının basım karşılaştırmaları ve kullanılan inkjet yazıcı.



Şekil 2. $4 \times 18 \times 11$ SRR dizgesinin kesit görseli (solda) ve benzetim modeli (sağda). Benzetimlerde Hertzian dipol kullanılmıştır.

Bu çalışmada ele alınan ve Şekil 2’de gösterilen SRR dizgesinin boş uzaydaki rezonans frekansı yukarıda özetlenen benzetim ortamında 8.2 GHz olarak hesaplanmıştır. Kullanılan kağıdın bağıl elektriksel geçirgenliğinin 3 civarında olması ve Maxwell-Garnett varsayımının %50 dolu uzay olarak kullanılması sonucu, efektif elektriksel geçirgenlik ise 1.875 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, basılan SRR dizgesinin 6 GHz civarında rezonansa girmesi beklenmektedir. Ölçüm için SRR dizgesi eş iki dikdörtgen huni antenin arasına yerleştirilmiş ve iletilen elektrik alan değerleri ağ çözümleyici ile kaydedilmiştir.

Şekil 3’te benzetim ve ölçümlerle elde edilen elektromanyetik iletim katsayısı değerleri, frekansa bağlı olarak gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarında dielektrik etkileri frekansların kaydırılmasıyla dahil edilmiştir. Kırınım etkileri ve sonlu bir yapının benzetiminin yapılması sebebiyle, iletim değerlerinin bazı frekanslarda 1 değerinin üzerine çıktığı gözlenmektedir. Öte yandan, SRR dizgesinin, yukarıda bahsedildiği üzere, 6 GHz’de rezonansa girerek düşük iletim özelliği gösterdiği de dikkat çekmektedir. Ayrıca, ölçüm sonuçlarında da 6 GHz civarı düşük iletim değerleri elde edilmiştir. Bu bağlamda, imal edilen dizgenin istenilen elektromanyetik tepkileri verdiği söylenebilmektedir. Ancak, ölçüm sonuçlarında, benzetim sonuçlarının aksine, daha geniş ve yumuşak geçişli bir bant gözlemlenmektedir. Bu farklılık, ucuz inkjet yazıcılarda her SRR biriminin eş basılamaması ve farklı boyutlardaki SRR’lerin az da olsa farklı frekanslarda rezonansa girmesiyle açıklanabilmektedir.



Şekil 3. 4×18×11 SRR dizgesi için elde edilen iletim katsayısı değerleri.

3. Sonuç

Bu çalışmada, üç-boyutlu metamalzemelerin inkjet basım tekniği ile üretilebileceği gösterilmiştir. Standart yazıcılarda gümüş-bazlı mürekkeplerin kullanılmasıyla, mikrodalga frekanslarında rezonansa giren SRR dizgeleri imal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, inkjet üretim mekanizmasının, düşük maliyetine rağmen, kullanışlı metamalzemelerin ucuz ve hızlı üretimine olanak sağladığını göstermektedir.

Kaynaklar

- [1]. Nikitin P. V., Lam S., ve Rao K. V. S., “Low cost silver ink RFID tag antennas,” Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp., Washington DC, ABD, s.353–356, Tem. 2005.
- [2]. Yang L., Rida A., Vyas R., ve Tentzeris M. M., “RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., cilt.55, no.12, s.2894–2901, Ara. 2007.
- [3]. Rida A., Yang L., Vyas R., ve Tentzeris M. M., “Conductive inkjet printed antennas on flexible low-cost paper-based substrates for RFID and WSN applications,” IEEE Antennas Propag. Mag., cilt.51, no.3, s.13–23, Haz. 2009.
- [4]. Cook B. S. ve Shamim A., “Inkjet printing of novel wideband and high gain antennas on low-cost paper substrate,” IEEE Trans. Antennas Propag., cilt.60, no.9, s.4148–4156, Eyl. 2012.
- [5]. Öno l C., Çiftçi T., Küçük S., Karaosmanoğlu B., ve Ergül Ö., “Design, simulation, and fabrication of low-cost inkjet antennas,” Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS), 2015, s.2829–2833.
- [6]. Batchelor J. C., Parker E. A., Miller J. A., Sanchez-Romaguera V., ve Yeates S. G., “Inkjet printing of frequency selective surfaces,” Electron. Lett., cilt.45, no.1, s.7–8, Oca. 2009.
- [7]. Walther M., Ortner A., Meier H., Löffelmann U., Smith P. J., ve Korvink J. G., “Terahertz metamaterials fabricated by inkjet printing,” Appl. Phys. Lett., cilt.95, no.251107, Ara. 2009.
- [8]. Cooper J. R., Kim S., and Tentzeris M. M., “A novel polarization- independent, free-space, microwave beam splitter utilizing an inkjet- printed, 2-D array frequency selective surface,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., cilt.11, s.686–688, 2012.
- [9]. Yoo M., Kim H. K., Kim S., Tentzeris M. M., ve Lim S., “Silver nanoparticle-based inkjet-printed metamaterial absorber on flexible paper,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., cilt.14, s.1718–1721, 2015.