

NEGATİF ELEKTRİKSEL VE MANYETİK GEÇİRGENLİĞE SAHİP METAMATERYALLER VE İLETİM HATTI YAKLAŞIMI

Cumali SABAH¹

Savaş UÇKUN²

^{1,2} Elektronik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Gaziantep Üniversitesi, 27310, Gaziantep

¹e-posta: sabah@gantep.edu.tr

²e-posta: savas@gantep.edu.tr

Anahtar sözcükler: Metamateryal, negatif elektriksel ve manyetik geçirgenlik, iletim hatları

ÖZET

Bu bildiriye ilk olarak bileşik yapıların özellikle negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryallerin genel yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra bu materyaller ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bu materyallerin karakteristiğini göstermek amacıyla iletim hattı yaklaşımı kullanılmış ve kayıpsız durum için materyal parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca metamateryallerin elektromanyetik özellikleri, fiziksel realizasyonu ve uygulama alanları ele alınmıştır.

1. GİRİŞ

Yapay materyaller kavramı ilk olarak 19. yüzyılın sonlarında Chunder'in bugünkü deyiimiyle yapay bakımsız ortam olarak adlandırılan bükülmüş yapılar üzerine (twisted structures) yaptığı mikrodalga deneyi ile başlamıştır [1]. Daha sonra bunu 1914 yılında Lindman'ın ve 1948 yılında Kock'un yaptığı çalışmalar izlemiştir [2, 3]. O zamanlardan beri yapay materyaller araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu ilgi bir çok aygıtın yapay materyaller kullanılarak yapılmasını sağlamıştır ve bunun sonucunda yeni teknikler geliştirilmiştir [4, 5]. Bunlara ilaveten, son yıllarda, yeni fikir, sentez ve fabrikasyon teknikleri henüz doğada bulunmayan ve elektromanyetik özellikleri bilinen materyallerden farklı olan yeni cins bileşik materyallerin yapımına izin vermektedir. Günümüzde metamateryaller olarak bilinen, bu bileşik yapay materyallerin elektromanyetik özellikleri son on yılda bir çok araştırma grubunun çalışma konusu olmuştur. Bu bileşik materyaller, bir ortamın içine yerleştirilen çok küçük partiküllerle kavramsallaştırılmış ve modellenmiştir. Bu materyallerin makroskopik boyuttaki elektromanyetik özellikleri partiküllerin boyutu, şekli, bileşimi, yoğunluğu, dizilişi ve düzenine, ayrıca içine partiküller yerleştirilen ortamın elektromanyetik özelliklerine bağlıdır. Bu parametrelerin her birinin özgül değerinin seçimi, tayini ve belirlenmesi, doğal materyaller içinde henüz bulunamayan metamateryallerin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve raelizasyonuna olanak sağlamıştır. Her bir parametrenin değeri sonuçlarda ve yöntemlerde

önemli rol oynamaktadır. Bunlar arasından, örneğin partiküllerin şekli yeni metamateryallerin elde edilme yöntemlerine çeşitlilik kazandırmıştır.

Yakın zamanda, belirli frekanslarda negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip bileşik materyaller ile ilgili çalışmalar kayda değer bir önem kazanmıştır. 1967 yılında, Veselago düzlemsel dalganın negatif elektriksel geçirgenliğe ve manyetik geçirgenliğe sahip materyaldeki yayılımını teorik olarak incelemiştir. Veselago, bu ortamdaki monokromatik düzlemsel dalga için Poynting vektörün yönünün faz hızının yönüyle zıt yönlü olduğunu ve düzlemsel dalga yayılım durumunun geleneksel basit ortamdakine göre ters olduğunu göstermiştir [6]. Daha sonra, Smith ve grubu mikrodalga sistemleri için bu tür bileşik ortamları fiziksel olarak gerçekleştirmiş ve bu ortamlar için alışılmışın dışında olan kırılma olayını deneysel olarak göstermişlerdir [7]. Smith, Schultz ve Shelby, Pendry'nin çalışmasından [8] esinlenilerek, Şekil 1'de gösterildiği gibi ince tel ve ucu açık çembersel rezonator (thin wire and split ring resonator, SRR), kullanarak metamateryaller dizayn etmişlerdir [9].



Şekil 1. Bir metamateryal örneği

Negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryaller için bir çok isim ve terminoloji önerilmiştir. Bunlardan bazıları, sol-elli ortamlar (left-handed media), negatif kırılma indeksli ortamlar (media with negative refractive index), geriye doğru dalga ortamları (backward wave media), çifte negatif

metamateryaller (double negative metamaterials, DNG), ve negatif indeksli ortamlar (negative-index media, NIM) şeklindedir. Bir çok araştırma grubu bu cins metamateryallerin değişik yönlerini çalışmaktadır ve bunlarla ilgili gelecekteki uygulama alanları için farklı fikir ve öneriler sunulmaktadır. Örneğin bu materyallerin yapımı için partiküllerin çeşitli şekillerde olabileceği önerilmiştir. Bunlardan, Ziolkowski [10] tarafından kullanılan kapasitif yüklü şeritler ve SRR (capacitively loaded sprits), ve Engheta, Nelatury ve Hoofar [11] tarafından teorik ve nümerik analizi yapılan omega yapılar önemli örneklerdir.

Bu bildiriye negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryallerin yapısı, bu materyallerin elektromanyetik özellikleri ve bunlarla ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca iletim hattı yaklaşımı kullanılarak materyal parametreleri bulunmuştur. Bir çok araştırmacı bu özellikleri göz önünde tutarak yeni yapay ortamlar tasarlamış ve bu ortamların kullanılmasıyla yeni parça, aygıt ve aletler tasarlamıştır. Ayrıca bu ortamların parametrelerinin seçimi tasarım yöntemlerine ilave bir kolaylık getirmiştir.

2. METAMATERYALİN ÖZELLİKLERİ

Metamateryaller, elektromanyetik özellikleri açısından, doğada bulunmayan yapay olarak elde edilen materyallerdir. Negatif manyetik geçirgenlik ($\mu < 0$), belirli bir frekans aralığında ucu açık kare ve çembersel halkalarla (SRR) elde edilmiştir. Bununla beraber negatif elektriksel geçirgenlik ($\varepsilon < 0$) belirli bir frekans aralığında metal çubuk dizileri ile elde edilmiştir. Bunlar çifte negatif ortamların fiziksel realizasyonu hakkında araştırmacılara kaynak teşkil etmiş ve negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip bir başka deyişle negatif kırılma indeksli yapay metamateryaller yapılmıştır. Bir ortam için kırılma indeksi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega) \mu_r(\omega)} \quad (1)$$

Çifte negatif ortamlar için belirli bir frekans aralığında $\varepsilon(\omega) < 0$ ve $\mu(\omega) < 0$ sırasıyla $\varepsilon(\omega) = |\varepsilon(\omega)| \cdot e^{j\pi}$ ve $\mu(\omega) = |\mu(\omega)| \cdot e^{j\pi}$ şeklinde yazılabilir. Böylece 1 numaralı denklem

$$n(\omega) = \sqrt{|\varepsilon(\omega)\mu(\omega)|} \cdot e^{j\pi} = -\sqrt{|\varepsilon(\omega)\mu(\omega)|} \quad (2)$$

şekline döner. Bu da negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryallerin kırılma indeksinin negatif olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, negatif kırılma indeksine sahip metamateryallerin bu özelliğinin elektromanyetik alanlar içinde ne anlama geldiğini ve neler içerdiğini

incelemek gerekir. Düzlemsel dalga çözümü için Maxwell'in dolam (curl) denklemleri

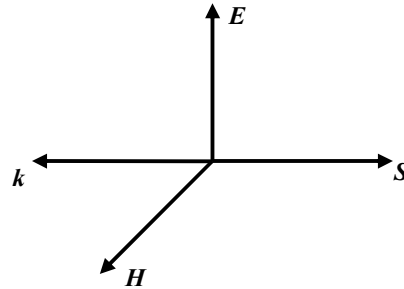
$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \omega \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\omega \varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

şeklindedir. 3 ve 4 numaralı denklemlerin standart materyaller için (right-handed materials, $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$), $(\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k})$ üçlüsünün sağ-elli sistem (right-handed system) oluşturduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, negatif kırılma indeksine sahip metamateryaller için (left-handed materials, $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$), bu denklemlerin $(\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k})$ üçlüsünün sol-elli sistem (left-handed system) oluşturmaktadır. Fakat Poynting güç vektörü, negatif kırılma indeksine sahip metamateryaller için hâlâ

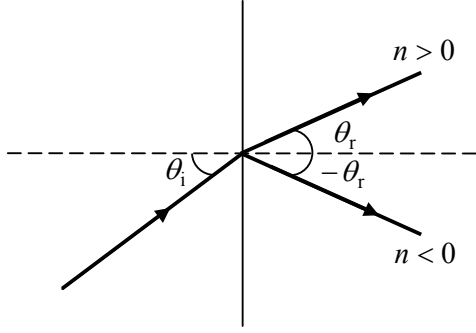
$$\mathbf{S}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \Re \{ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}^*(\mathbf{r}) \} \quad (5)$$

şeklinde olup yönü standart materyallerdeki ile aynıdır. 5 numaralı denkleme göre, \mathbf{S} vektörünün \mathbf{E} ve \mathbf{H} vektörleri ile daima sağ-elli sistem oluşturduğu söylenebilir. Anlatılan terminolojinin geometrisi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrik alan \mathbf{E} , manyetik alan \mathbf{H} , dalga vektörü \mathbf{k} , ve Poynting güç vektörünün \mathbf{S} negatif kırılma indeksli metamateryallerdeki geometrisi

Sağ-elli materyaller (right-handed materials) için \mathbf{S} ve \mathbf{k} vektörleri aynı yönlü iken sol-elli materyaller (left-handed materials) için zıt yönlüdür. Ayrıca \mathbf{k} vektörü faz hızı yönündedir. Dolayısıyla sol-elli materyaller negatif grup hızına sahip materyallerdir. Buna göre sol-elli materyaller veya negatif kırılma indeksli metamateryaller negatif grup hızına sahip materyaller olarak da adlandırılabilir. Bu durum özellikle yönbağımlı ortamlarda veya frekansa bağlı değişimlerin olduğu materyallerde oluşur. Sol-elli materyallerde faz hızı enerji akısı ile zıt yönlüdür. Bu materyallerde Doppler etkisi ve Vavilov-Cerenkov ışınımı geleneksel basit materyallerinkinden farklı olarak zıttır. Bunlara ilaveten, önemli bir özellikte Snell kuralının da zıt olmasıdır. Sağ- ve sol-elli materyaller için Snell kuralının ışın diyagramı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Sağ- ve sol-elli materyaller için Snell kuralının ışın diyagramı

Daha önce de belirtildiği gibi aynı anda negatif değere sahip olan elektriksel ve manyetik geçirgenlik ancak frekansa bağlı bir değişim olduğunda gerçekleştirilebilir. Eğer elektriksel ve manyetik geçirgenlik aynı anda negatif ise enerjinin değerinin nasıl değiştiğini de incelemek gerekir ki bilinen enerji denklemi aşağıdaki gibidir.

$$W = \epsilon E^2 + \mu H^2 \quad (6)$$

Frekansa bağlı değişim veya soğurma yok ise negatif değere sahip elektriksel ve manyetik geçirgenlik elde edemeyiz. Bu durumda $\epsilon < 0$ ve $\mu < 0$ iken 6 numaralı denkleme dayanarak enerjinin negatif olacağını söylemek doğru olmaz. Eğer frekansa bağlı bir değişim varsa 6 numaralı denklem aşağıdaki gibi yenilenmelidir.

$$W = \frac{\partial(\epsilon\omega)}{\partial\omega} E^2 + \frac{\partial(\mu\omega)}{\partial\omega} H^2 \quad (7)$$

Burada enerjinin pozitif olması için

$$\frac{\partial(\epsilon\omega)}{\partial\omega} > 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\mu\omega)}{\partial\omega} > 0 \quad (9)$$

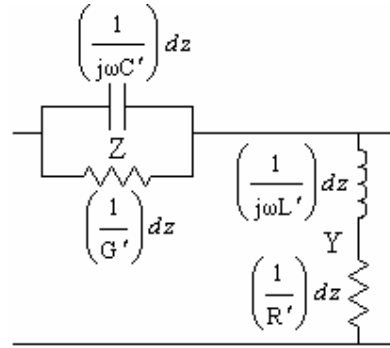
olması gereklidir. 8 ve 9 numaralı eşitsizlikler, elektriksel ve manyetik geçirgenliklerin aynı anda negatif olamayacağı anlamına gelmemektedir. Buna sahip olmak için elektriksel ve manyetik geçirgenliklerin frekansa bağlı olması, bir başka deyişle bu parametrelerin frekansın fonksiyonu şeklinde düzenlenmesi gereklidir.

Bilindiği gibi ışınlar bir ortamdan diğerine geçerken sınır şartları sağlanmalıdır. Eğer birinci ortam çift pozitif ikinci ortam da çift negatif ortam ise yansıyan ışının durumu değişmezken kırılan ışının durumu değişir. Yansıyan ışının yönü ortamların durumundan bağımsız olmak üzere daima aynıdır. Fakat kırılan ışın

geleneksel durumunun ters tarafında yerini alır. İlginç bir durum da, ışınların çift pozitif ortamdaki (double-positive medium, $\epsilon_1 > 0$ ve $\mu_1 > 0$) elektriksel ve manyetik geçirgenliği birinci ortamdaki geçirgenliklerin negatifi ($\epsilon_2 = -\epsilon_1$, $\mu_2 = -\mu_1$) olan çift negatif ortama geçiş durumudur. Bu olayda ışın iki ortamın yüzeyi arasında kırınma uğramaktadır. Fakat burada yansıyan ışın yoktur. Böylece çift negatif materyaller alışılmış olmayan kırıcı sistemlerin tasarlanmasında kullanılabilir. Bunlara mükemmel mercekler örnek gösterilebilir.

3. İLETİM HATTI YAKLAŞIMI

Bu bölümde negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryaller için iletim hattı yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşım geleneksel iletim hattı ikilisi temel alınarak incelenmiştir [12]. Eşdeğer devre modeli Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateryalin sonsuz küçük devre modeli

Bu devre, geleneksel iletim hattı eşdeğer devresinin indüktans/kapasitansın yerlerinin değiştirilmesi ve seri/paralel düzeninin tersine çevrilmesi ile elde edilmiştir. Bu iletim hattı için dalga sayısı $\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$, birim uzunluktaki empedans ve admittans kullanılarak bulunur. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$Z' = Z/dz = (G' + j\omega C')^{-1} \quad (10)$$

$$Y' = Y/dz = (R' + j\omega L')^{-1} \quad (11)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{Z'Y'} = \sqrt{(G' + j\omega C')^{-1}(R' + j\omega L')^{-1}} \quad (12)$$

Kayıpsız durumda $G' = R' = 0$ olduğundan 12 numaralı denklem

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(j\omega C')^{-1}(j\omega L')^{-1}} = \frac{1}{j\omega\sqrt{L'C'}} \quad (13)$$

şekline indirgenir. Böylece zayıflama ve yayılım faktörleri aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\alpha(\omega) = 0 \quad (14)$$

$$\beta(\omega) = -\frac{1}{\omega\sqrt{L'C'}} \quad (15)$$

Ayrıca faz ve grup hızları sırasıyla $v_p = -\omega^2\sqrt{L'C'}$ ve $v_g = +\omega^2\sqrt{L'C'}$ şeklindedir [12]. Dikkat edilirse $v_p \cdot v_g$ çarpımı bu materyal için bilinenen farklı ve ışık hızının karesine eşit değildir. ($v_p \cdot v_g \neq c_0^2$)

Bu materyal için frekansa bağlı empedans ve admitans sırasıyla, $Z' = j\omega\mu$ ve $Y' = j\omega\varepsilon$ şeklindedir. Kayıpsız durum için yukarıda verilen denklemler sırasıyla 10 ve 11 numaralı denklemlere eşitlenirse elektriksel ve manyetik geçirgenlik

$$\varepsilon(\omega) = -\frac{1}{\omega^2 L'} \quad (16)$$

$$\mu(\omega) = -\frac{1}{\omega^2 C'} \quad (17)$$

şeklinde bulunur. 16 ve 17 numaralı denklemlerden de anlaşılacağı gibi elektriksel ve manyetik geçirgenlik bu materyal için negatiftir. Dolayısıyla bu materyal için elektriksel ve manyetik geçirgenlikler ve bunların negatif olduğu iletim hattı yaklaşımı ile bulunmuş oldu. Bu uygulama kayıplı ortamlar için de genişletilebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metamateriyaller incelenmiştir. Metamateriyallerin temel özellikleri ve elektromanyetik dalganın bu materyaller içindeki davranışları açıklanmıştır. İletim hattı yaklaşımı kullanılarak kayıpsız durum için metamateriyalin elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri elde edilmiştir. Bu uygulama kayıplı ortamlar için de genişletilebilir.

Ayrıca araştırmacılar metamateriyallerin potansiyel uygulama alanları hakkında öneriler sunmaktadır. Faz kompanzatorleri, faz konjektörleri, ince/yoğun/alt-dalga-boylu kovuk ve dalga kılavuzları, farklı mod bağlaştırıcı, başlık ve anten kapakları bunlardan bazılarıdır. Potansiyel uygulama alanlarının çok olmasından dolayı metamateriyaller ile ilgili çalışmalar hızla devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bose J. C., On the Rotation of Plane of Polarisation of Electric Waves by a Twisted Structure, PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY, Vol. 63, pp. 146-152, 1898.
- [2] Lindell L. V., Sihvola A. H., Kurkijarvi J., Karl F. Lindman: The Last hertzian and a Harbinger of Electromagnetic Chirality, IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION MAGAZINE, Vol. 34, No. 3, pp. 24-30, 1992.
- [3] Kock W. E., Metallic Delay Lenses, BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL, Vol. 27, pp. 58-82, 1948.
- [4] Sabah C., Uçkun S., Plane wave reflection and transmission through multilayer chiral slabs, BIANISOTROPIC 2004, PROCEEDINGS OF THE 10th CONFERENCE ON COMPLEX MEDIA AND METAMATERIALS, pp. 29-32, Het Pand, Ghent, Belgium, 2004.
- [5] Harvey A. F., Optical Techniques at Microwave Frequencies, PROCEEDINGS OF THE IEE, Vol. 106, Part B, pp. 141-157, 1959.
- [6] Veselago V. G., The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ , SOVIET PHYSICS USPEKHI, Vol. 10, No. 4, pp. 509-514, 1968.
- [7] Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S., Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 84, No. 18, pp. 4184-4187, 2000.
- [8] Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J., Stewart W. J., Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE TRANSACTION ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Vol. 47, No. 11, pp. 2075-2081, 1999.
- [9] Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S., Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, SCIENCE, Vol. 292, No. 5514, pp. 77-79, 2001.
- [10] Ziolkowski R. W., Tailoring the Electromagnetic Responses of Metamaterials: Double Negative Metamaterial Designs and Experiments, IEEE-Nano'2002 Conference, Washington DC, 2002.
- [11] Engheta N., Nelatury S., Hoofar A., The Role of Goemtry of Inclusion in Forming Metamaterials with Negative Permittivity and Permeability, XXVII URSI GA'02, Maastricht, The Netherlands, 2002.
- [12] Caloz C., Itoh T., Transmission Line Approach of Left-Handed (LH) Materials and Microstrip Implementation of an Artificial LH Transmission Line, IEEE TRANSACTION ON ANTENNAS AND PROPAGATION, Vol. 52, No. 5, pp. 1159-1166, 2004.