



NRW Metodu ile Malzemelerin Elektromanyetik Parametrelerinin Bulunması

Finding Electromagnetic Parameters of Materials by NRW Method

Merve DURMUŞ^{1,*}, A.Oral SALMAN², T.Şeyda YILDIRIM²

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, 34940, Türkiye

² Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 41380, Türkiye

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 14/04/2018

Kabul Tarihi : 12/06/2018

Anahtar Kelimeler

Elektromanyetik Malzeme
Karakterizasyonu

Karmaşık Elektrik ve Manyetik
Geçirgenlik

NRW Tekniği

Yansım/Geçiş Metodları

Research Paper

Received Date : 14/04/2018

Accepted Date : 12/06/2018

Keywords

Complex Permittivity and Permeability

Electromagnetic Material
Characterization

NRW Method

Reflection/Transmission Methods

Özet

NRW algoritması, malzeme karakterizasyonunda kullanılan yansıma ve geçiş ölçüm tekniğinin hesaplama yöntemlerinden birisidir. Bu çalışmada, NRW algoritması MATLAB programında yazılan bir kod ile oluşturulmuştur ve bu program CST benzetim sonuçlarından elde edilen saçılma parametrelerini girdi olarak kullanılmaktadır. Benzetimlerde dikkat edilecek en önemli nokta referans düzlemi tanımlanmasıdır. Bu düzlem malzemelerin iki yüzeyi olacak şekilde seçilir. Referans düzlemi tanımlanmadan yapılan benzetimlerin, literatürde bilinen değerlerden oldukça farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Referans düzlemi seçilerek yapılan benzetimlerde, seçilen dielektrik ve manyetik malzemelerin R, X ve Ku frekans bantlarında CST benzetimleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar MATLAB kodunda girdi olarak kullanılmıştır. Elde edilen ϵ_r (dielektrik sabiti) ve ϵ_i (kayıp terimi) değerleri literatürde bilinen değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Abstract

The NRW algorithm is one of the calculation methods of the reflection and transition measurement technique used in material characterization. In this work, the NRW algorithm is constructed with a code written in the MATLAB program, which uses the scattering parameters obtained from the CST simulation results as input. The most important point to note in simulations is to define the reference plane. This plane is chosen to have two surfaces of the measured materials. It has been observed that the simulations made without defining the reference plane give quite different results than those known in the literature. In the simulations made by selecting the reference plane, CST simulations were performed on the R, X and Ku frequency bands of the selected dielectric and magnetic materials and the obtained results were used as input in the MATLAB code. The obtained values of ϵ_r (dielectric constant) and ϵ_i (loss constancy) were compared with known values in the literature.

1. Giriş

Birçok mikrodalga uygulamasında malzemenin elektromanyetik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Özellikle benzetimlerde malzemenin karmaşık elektromanyetik parametrelerinin (ϵ , μ , σ) bilinmesi benzetim sonuçlarının doğruluğu açısından önemlidir. Bu parametrelerin mikrodalga frekanslarında ölçümleri, serbest uzay, kavite rezonatörleri, açık uçlu koaksiyel prob

ve iletim hattı teknikleri kullanılarak yapılmaktadır [1]. Geniş ve orta frekans bantlarındaki en basit malzeme karakterizasyonu tekniği iletim hattı teknikleridir. Bu teknikler, yansıma (tek port ölçümleri) ve geçiş-yansıma (iki port ölçümleri) teknikleri olarak ikiye ayrılabilir. Geçiş ve yansıma tekniklerinde, malzeme koaksiyel hattın veya bir dalga kılavuzunun içerisine yerleştirilerek saçılma parametreleri ölçümü yapılır. Bu ölçüm genellikle network analizör kullanılarak gerçekleştirilir. Saçılma parametreleri

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): mdurmus@piriresi.edu.tr

kullanılarak malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin hesabı için en yaygın kullanılan hesaplama yöntemi Nicolson-Ross-Weir (NRW) yöntemidir [2-3]. Bu yöntemde, ölçülen veya benzetim yapılan saçılma parametrelerinden, yansıma ve geçiş katsayıları elde edilmektedir. Kompleks elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri ise bu katsayılar kullanılarak hesaplanır. NRW metodu iteratif olmayan bir tekniktir ve hem koaksiyel hatlara hemde dalga kılavuzlarına uygulanabilir olduğu için avantajlıdır ancak yarım dalga boyunun tam katlarındaki malzeme kalınlıklarında, düşük kayıplı malzemeler için doğru sonuç vermemektedir [1-3]. Bu dezavantaj, efektif parametre (NIST - Noniterative Stable Transmission Reflection Technique) [4] ve doğrusal olmayan en küçük kareler teknikleri (Nonlinear least squares solution) [5] ile giderilmeye çalışılmıştır.

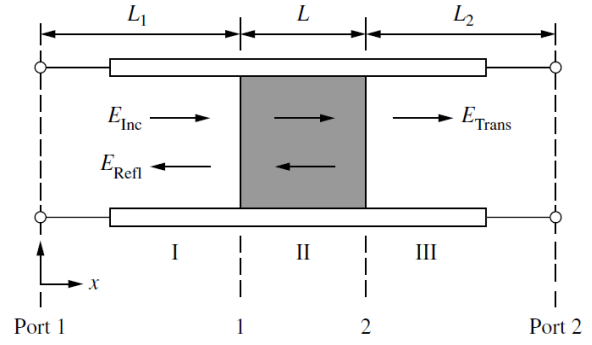
Kocaeli Üniversitesi, MİLTEK (Milimetre-dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri) Araştırma Laboratuvarında çeşitli mikrodalga malzemeleri için malzeme karakterizasyonu kapsamında, dalga kılavuzunda NRW hesaplama tekniği uygulanması düşünülmüştür. Bu çalışmada CST benzetim verileri kullanılarak NRW tekniği ile malzeme karakterizasyonu yapılabilirliğinin test edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu makalenin yapılması şu şekildedir; bu giriş kısmından sonra, 2. bölümde yansıma ve geçiş ölçüm tekniğinin formülasyonları ve NRW metodu kullanılarak malzemenin elektromanyetik parametrelerinin hesap yöntemi verilmiştir. 3. bölümde ise, R (1,7-2,6 GHz), X (8,2-12,4 GHz) ve Ku (12,4-18 GHz) frekans bantlarında her bir seçilmiş malzeme için CST benzetimlerinden elde edilen saçılma parametreleri kullanılarak, MATLAB ortamında yazılmış olan NRW algoritması ile elektromanyetik parametreler hesaplanmış, bilinen değerleri ile karşılaştırılarak sonuçlar tartışılmıştır. Bir sonraki bölümde elde edilen sonuçlar genel hatlarıyla açıklanmış ve gelecekte yapılacak çalışmalar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

2. Teorik Altyapı

Malzemenin elektromanyetik parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan, geçiş ve yansıma tekniklerinin prensipleri literatürde sistematik olarak analiz edilmiştir [6-8]. Tekniklerin genel prensiplerini açıklamak için Şekil 1'de verilen devre şeması kullanılabilir. Şekilde gösterildiği gibi malzeme, x-ekseni yönünde konumlandırılmış bir iletim hattının içine yerleştirilmiştir.

Saçılma eşitlikleri genellikle malzeme düzlemindeki elektrik alanlar yardımıyla bulunurlar. Elektrik alanlar iletim hattı içinde, şekilde gösterildiği gibi 3 bölgede incelenebilir.



Şekil 1. Bir iletim hattında, malzemeden yansıyan ve malzemeyi geçen elektromanyetik dalga [1]

Normalize olarak gelen dalga için her bölgede bu alanlar,

$$E_I = e^{(-\gamma_0 x)} + C_1 e^{(\gamma_0 x)} \quad (1)$$

$$E_{II} = C_2 e^{(-\gamma x)} + C_3 e^{(\gamma x)} \quad (2)$$

$$E_{III} = C_4 e^{(-\gamma_0 x)} \quad (3)$$

şeklinde. Burada γ_0 serbest uzayın, γ ise malzemenin bulunduğu iletim hattı kısımlarının yayılma katsayılarıdır [1]. Bunlar,

$$\gamma = j \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_r \epsilon_r}{c^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (4)$$

$$\gamma_0 = j \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (5)$$

olarak tanımlanır. Denklemlerde, ω açısal frekans, λ_c kesim dalga boyu, c serbest uzaydaki ışık hızı, ϵ_r ve μ_r ise sırasıyla malzemenin elektrik ve manyetik geçirgenlik sabitleridir.

Elektrik alan denklemlerinde bulunan C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) sabitleri, iletim hatları için geçerli olan sınır koşullarından bulunurlar. Saçılma parametreleri de, (1-3) denklemlerinin sınır koşulları kullanılarak çözülmesi ile elde edilirler. Şekil 1'de gösterilen iletim hattı y - ekseninde simetrik olduğu için saçılma matrisi de simetriktir ($S_{12} = S_{21}$). Buna göre saçılma parametreleri,

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (6)$$

$$S_{22} = R_2^2 \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (7)$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (8)$$

olarak verilebilir. (6-8) denklemlerinde Γ yansıma katsayısı, T iletim katsayısı, R_1 ve R_2 ise iki porttaki referans düzlemi dönüştürücüleridir [1]. Referans düzlemleri Şekil 1'de gösterilen 1 ve 2 nolu düzlemlerdir ve L_1, L_2 uzaklıkları portların malzeme düzlemine olan uzaklıklarıdır. Referans düzlemi dönüştürücüleri (R_1, R_2) bu uzaklıklardan tanımlanır.

$$R_i = \exp(-\gamma_0 L_i) \quad (i=1,2) \quad (9)$$

İletim ve yansıma katsayıları ise,

$$T = \exp(-\gamma L) \quad (10)$$

$$\Gamma = \frac{(\gamma_0/\mu_0) - (\gamma/\mu)}{(\gamma_0/\mu_0) + (\gamma/\mu)} \quad (11)$$

olarak elde edilirler. μ_0 serbest uzayın, μ malzemenin manyetik geçirgenliğidir ($\mu = \mu_0 \mu_r$).

Saçılma parametrelerinden ($S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$), iletim T ve yansıma Γ katsayılarının bulunması, buradan da karmaşık dielektrik ve manyetik geçirgenlik sabitlerinin elde edilmesi için farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu hesaplama yöntemlerinden, en yaygın kullanılanı NRW yöntemidir. Bu yöntemde yansıma ve iletim katsayıları şu şekilde tanımlanır.

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (12)$$

burada K ,

$$K = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2) + 1}{2S_{11}} \quad (13)$$

ile verilir. (12)'de pozitif veya negatif işaret, $|\Gamma| \leq 1$ şartını sağlayan değere göre seçilir. İletim katsayısı,

$$T = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (14)$$

elektrik ve manyetik geçirgenlik sabitleri ise,

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{(1/\lambda_c^2) - (1/\lambda_0^2)}} \quad (15)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[(1/\lambda_c^2) - (1/\Lambda^2) \right]} \quad (16)$$

olarak elde edilir. Burada, Λ işlem kolaylığı için tanımlanmış bir değişkendir ve (17)'den hesaplanır.

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (17)$$

L ise, malzemenin kalınlığıdır, bu uzunluk optimum, $L = \lambda_g/4$ olarak alınır [1] ve malzeme içerisinde fazın fazla değişmemesini sağlar. λ_g kılavuz dalga boyudur,

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0} \right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^2}} \quad (18)$$

ile tanımlanır. Burada f_c , kesim frekansı, λ_c , kesim dalga boyu, f_0, λ_0 serbest uzay çalışma frekansı ve dalga boyudur. Kesim frekansı f_c ,

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2} \quad (19)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada, m, n sırasıyla x ve y eksenindeki mod indisi, a ve b ise kılavuz boyutudur. λ_g kesim dalga boyunda sonsuz değerinden, çalışma frekansı arttıkça azalır [9].

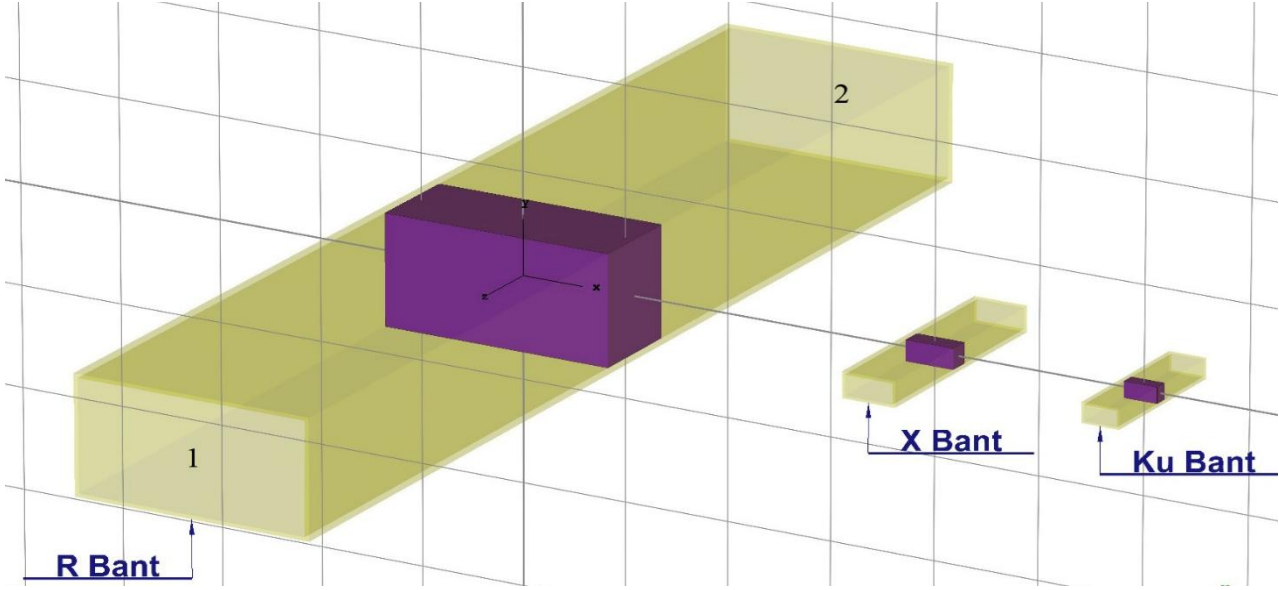
3. CST Benzetimleri ve MATLAB Kullanılarak Elektromanyetik Parametrelerin Hesaplanması

Bir önceki bölümde, iletim ve yansıma katsayılarından malzemenin elektromanyetik parametrelerinin nasıl elde edileceği anlatılmıştır. Bu hesaplamalar MATLAB ortamında yazılan kod ile yapılacaktır. Programa girdi olarak kullanılacak olan veriler, CST paket programından elde edilecektir. R (1,7-2,6 GHz), X (8,2-12,4 GHz) ve Ku (12,4-18 GHz) frekans bantlarında dalga kılavuzu modelleri CST benzetim programında oluşturulmuştur. Kılavuzların yükseklikleri ve genişlikleri standart boyutlarda, uzunlukları ise dalganın yeterince ilerleyebilmesi için üç kılavuz dalga boyu ($3\lambda_g$) olacak şekilde alınmıştır. Bu uzunluklar R bant, X bant ve Ku bant için sırasıyla 54,36cm, 11,34cm ve 7,59cm şeklindedir. Bu kılavuz dalga boyları, her frekans bandı için, bandın merkezi frekansındadır. R bant, X bant ve Ku bant için sırasıyla 2,15 GHz, 10,3 GHz ve 15,2 GHz olarak hesaplanmıştır. Kılavuzların uyarımları dalga kılavuzu

portu seçilerek yapılmıştır.

Benzetim programında her frekans bandı için oluşturulan kılavuzların orta noktasına çeşitli malzemeler konularak referans düzlemi tanımlamadan ve tanımlanarak saçılma parametrelerinin analizi yapılmıştır. CST programında referans düzlemi, port özellikleri kısmında, seçilen portun referans düzleminde uzaklığı girilerek sağlanmıştır. Bu uzaklıklar Şekil 1’de tanımlanmış olan L_1 ve L_2 uzaklıklarıdır ve eğer deneysel gerçekleştirme

yapılacaksa bu düzlemin altında, elektromanyetik parametreleri ölçülecek malzemenin boyutlarında ayrı bir dalga kılavuzu parçası kullanılıp, kalibrasyonun o parçanın giriş ve çıkışlarından yapılmasına denk gelir. Malzeme kalınlığı yukarıda anlatıldığı gibi kılavuz dalga boyunun dörtte biri olarak seçilmiştir ($\lambda_g / 4$) ve R Bant, X bant ve Ku bant için sırasıyla 4,53cm, 0,94cm ve 0,63cm’dir. Üç frekans bandı için oluşturulan ölçekli CST modelleri Şekil 2’de verilmiştir.

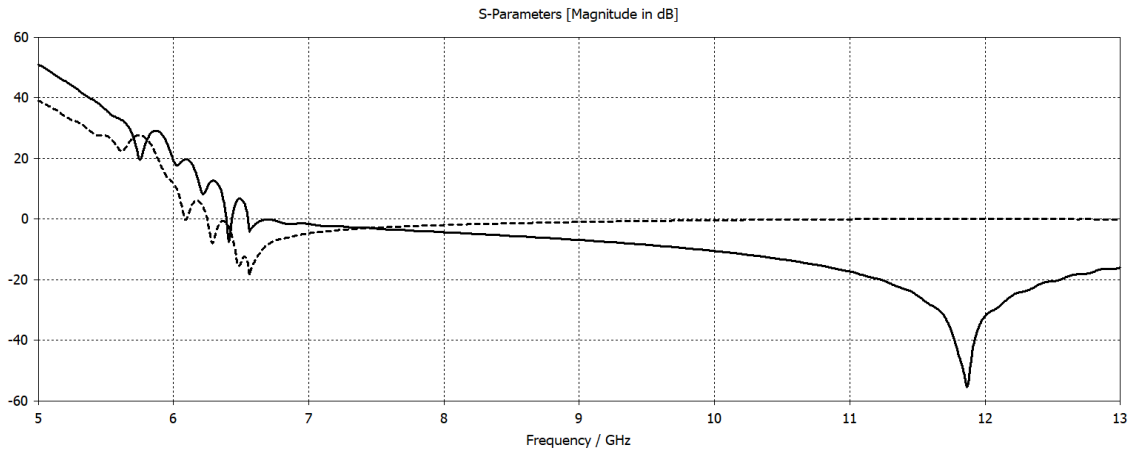


Şekil 2. R, X ve Ku frekans bantları için içlerine malzeme konulmuş olan dalga kılavuzunun ölçekli modelleri

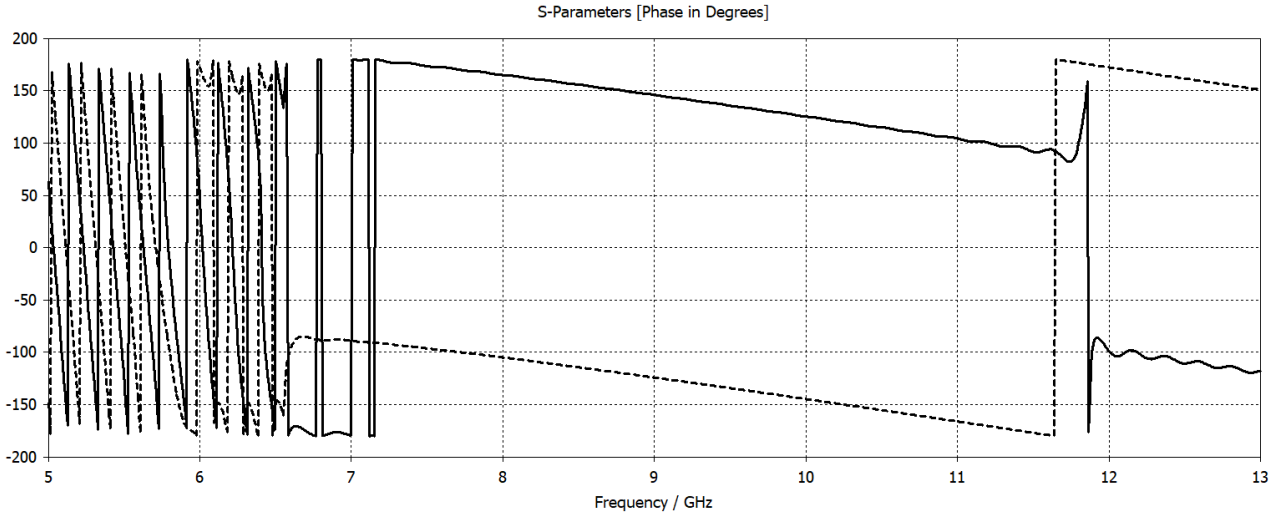
Modellemeden sonra çalıştırma adımında her frekans bandı için farklı malzemeler konularak zaman düzleminde analizler yapılmıştır. Bu analiz ilk olarak referans düzleminin önemini anlamak için bu düzlem tanımlanmadan yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar NRW analizinin gerçekleştirildiği MATLAB kodunda girdi olarak kullanılarak, mikrodalga frekanslarında kullanılan bazı dielektrik ve manyetik malzemeler için elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri elde edilmiştir (Tablo.1).

Bu değerler literatürde bilenen değerler ile karşılaştırıldığında sonuçların oldukça hatalı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun üzerine yukarıda L_1 ve L_2 olarak verilen referans düzlemleri CST’de tanımlanarak benzetimler tekrar yapılmıştır.

Elde edilen bu sonuçlara örnek olarak X-bant dalga kılavuzunda, teflon için CST saçılma parametrelerinin genlik ve faz grafikleri Şekil 3’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Teflon için referans düzlemi tanımı yapılarak CST benzetimlerinden elde edilen saçılma parametrelerinin (S_{11} — , S_{21} ----), a) genliği (dB) b) fazı (derece)

Benzetimlere bakıldığında X-banttaki kesim frekansının 6,558 GHz’te olduğu gözlemlenmektedir. Kesim frekansının altındaki frekanslarda oluşan yükselme, referans düzlemi tanımlamasından kaynaklanmaktadır. Malzeme karakterizasyonunda kullanılacak olan S

parametreleri, R bantta 2,15 GHz, X bantta 10,3 GHz ve Ku bantta 15,2 GHz’teki değerleri alınarak (genlik ve faz) yazılan MATLAB koduna (Ek-A) girdi olarak verilmiştir. Kodun koşturulmasından sonra elde edilen elektrik ve manyetik geçirgenlikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Mikrodalga frekanslarında sık kullanılan bazı dielektrik ve manyetik malzemelerin, referans düzlemi tanımlanmadan elde edilen elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri

Dielektrik Malzemeler (ve bilinen geçirgenlik değerleri)	NRW											
	R BANT				X BANT				Ku BANT			
	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)
Teflon ($\epsilon_r = 2,1$, $\epsilon_r = 0,0004$)	1,577	24,9	0,04	9900	2,98	41,9	0,14	34900	0,56 2	73,2	0,013	3150
Polietilen ($\epsilon_r = 2,23$, $\epsilon_r = 0,0007$)	5,67	154	0,32	45600	11	394	0,34	48470	7,3	228	0,021	2900
Polimid ($\epsilon_r = 3,5$, $\epsilon_r = 0,0094$)	0,34	90,3	0,001	89,36	0,77	78	0	*	14,6 2	317	18,37	200000
Silikon ($\epsilon_r = 11,9$, $\epsilon_r = 0,0030$)	0,67	94,4	0,051	1600	0,5	95,8	0,55	18234	0,32	97,3	1,06	35000
FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$, $\epsilon_r = 0,1000$)	1,63	62,1	0,8	700	0,67	84,4	0,3	200	1,01	76,5	0,1	0
Manyetik Malzemeler	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)
Eccosorb SFU-5.5 ($\mu'_r = 1,59$, $\mu''_r = 0,98$)	3,7	133	2,4	145	1,6	0,63	6,6	574	7,91	398	1,96	100

Tablo 1’de görülmektedir ki referans düzlemi tanımlanmadan elde edilen sonuçlar bilinen değerlerden çok farklıdır ve hata miktarları büyüktür.

Dolayısıyla formülasyonlarda da yer alan referans düzlemi tanımı yapılmadan NRW algoritmasında doğru sonuçlar elde edilememektedir.

Tablo 2. Mikrodalga frekanslarında sık kullanılan bazı dielektrik ve manyetik malzemelerin, referans düzlemi tanımlanarak elde edilen elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri

Dielektrik Malzemeler (ve bilinen geçirgenlik değerleri)	NRW											
	R BANT				X BANT				Ku BANT			
	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)	ϵ_r	Hata (%)
Teflon ($\epsilon_r = 2,1$, $\epsilon_r = 0,0004$)	2,197	4,62	0,0240	5900	2,210	5,24	0,002	300	2,216	5,5	0,0009	125
Polietilen ($\epsilon_r = 2,23$, $\epsilon_r = 0,0007$)	2,363	5,97	0,0400	5614	2,408	8,01	0,005	614	2,382	6,8	0,0160	2185
Polimid ($\epsilon_r = 3,5$, $\epsilon_r = 0,0094$)	2,685	23,3	0,0220	134	2,605	25,6	0,002	78,8	2,640	24,6	0,0030	68,1
Silikon ($\epsilon_r = 11,9$, $\epsilon_r = 0,0030$)	4,689	60,6	0,0440	1366	4,528	61,9	0,029	867	4,568	61,6	0,0100	233,4
FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$, $\epsilon_r = 0,1000$)	2,820	34,4	0,0197	80	2,759	35,8	0,015	85,1	2,790	35,1	0,0120	88
Manyetik Malzemeler	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)	μ'_r	Hata (%)	μ''_r	Hata (%)
Eccosorb SFU-5.5 ($\mu'_r = 1,59$, $\mu''_r = 0,98$)	0,001	99,9	0,463	52,7	0,449	71,8	0,512	47,7	0,369	76,8	0,666	32,05

Tablo 2’ye bakıldığında malzemenin bilinen değerleriyle, NRW yöntemi ile hesaplanan değerleri karşılaştırılırsa, örneğin teflon için her bantta yaklaşık aynı ϵ_r değerleri elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur, frekansla fazla değişmemesi gerekir ve NRW değeri bilinen değerine oldukça yakındır. Aynı durum polietilen ve polimid içinde geçerli olup, hata oranının bir miktar yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak NRW ile elde edilen silikon ve FR-4 malzemelerinin ϵ_r değeri bilinen değerlerinden oldukça düşük çıkmıştır. Dolayısıyla yüksek dielektrik katsayısına sahip malzemelerde NRW sonuçları bilinen değerlerinden sapmıştır.

Genel olarak elde edilen ϵ_r değerleri bilinen değerlerden yüksek çıkmıştır. Manyetik özellikler gösteren bir malzeme olan Eccosorb SFU-5.5’in μ'_r değerleri beklenenden oldukça küçük ancak μ''_r değerleri bilinen değere yakın çıkmıştır.

Sonuç olarak CST girdileriyle çalıştırılan NRW metodundan elde edilen elektromanyetik parametrelere bakıldığında, düşük ϵ_r değerine sahip malzemelerde bilinen değerlerle yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu yakınlığın sağlanmasında referans düzlemi uygulaması oldukça yararlı olmuştur.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada uygulamalarda çok kullanılan bazı mikrodalga malzemelerinin, CST benzetim sonuçları NRW algoritması için yazılan bir koda yerleştirilerek elektrik ve manyetik geçirgenlik sabitleri bulunmuştur. CST’de referans düzlemi tanımlanmadan yapılan benzetimlerin sonuçları bilinen değerlerden çok farklı çıkmıştır ve hata miktarları büyüktür. Bununla beraber referans düzlemi tanımlanarak elde edilen sonuçların çok daha doğru olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerlere bakıldığında düşük ϵ_r

(dielektrik sabiti) değerlerine sahip malzemeler için, bilinen değerler ile yaklaşık sonuç verdiği ve ϵ_r değeri büyüdükçe hata miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ϵ_r (kayıp terimi) değerlerinin hata miktarlarının ϵ_r hata miktarlarına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Elektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerindeki bu hata miktarlarının nedeni ise benzetim ortamının Maxwell denklemlerinin nümerik olarak yaklaşık çözümlerinin kullanmasından dolayı olduğu ve analitik ve deneysel değerlere göre doğal olarak içinde hata barındırmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Yapılan çalışmanın özgün kısmını, dielektrik ve manyetik malzemelerin geçirgenlik sabitlerinin NRW algoritması kullanılarak elde edilen değerlerinin, literatürdeki gibi deneysel verilerden değil de benzetim sonuçları kullanılarak elde edilmesi, ayrıca benzetim kısmında ise referans düzlemlerinin (kalibrasyon düzlemleri) tanımlanması ile daha doğru sonuçların elde edilmiş olması oluşturmaktadır.

Kaynaklar

- [1]Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K., 2004. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization, John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [2]Nicolson A. M., Ross G. F., 1970. Measurement of The Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, **19**(4), 377-382.
- [3]Weir W. B., 1974. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. Proceedings of The IEEE, **62**(1), 33-36.
- [4]Boughriet A.H., Legrand C., Chapoton A., 1997. Noniterative Stable Transmission/Reflection Method for Low-Loss Material Complex Permittivity Determination. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **45**(1), 52-57.
- [5]Baker-Jarvis J., Geyer R. G., Domich P. D., 1992. A Nonlinear Least Squares Solution with Causality Constraints Applied to Transmission Line Permittivity and Permeability Determination. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, **41**(5), 646-652.
- [6]Baker-Jarvis J., Vanzura E. J., Kissick W. A., 1990. Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission/Reflection Method. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **38**(8), 1096-1103.
- [7]Baker-Jarvis J., 1990. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Permittivity Measurements. NIST

Technical Note, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, 1990.

- [8]Baker-Jarvis J., Janezic M.D., Grosvenor J.H.Jr., and Geyer R.G., 1993. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability. NIST Technical Note, 1355. National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO.
- [9]Balanis C.A., 1989. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley and Sons, West Sussex, England.

Ekler

Ek-A: NRW Algoritması için MATLAB Kodu

```
s1=input('s11 in değerini giriniz = ');
% kullanicidan S11 değeri alındı.
s2=input('s21 nin değerini giriniz = ');
% kullanicidan S21 değeri alındı.
f1=input('Calisma frekansini giriniz (GHz)= ');
% R bant için 2.15 GHz, X bant 10.3 GHz, Ku bant 15.2 GHz.
fc=input('Kesim frekansini giriniz (GHz) = ');
% R için 1.372 GHz, X için 6.557 GHz, Ku için 9.486 GHz.
L=input('Malzeme kalinligini giriniz (cm) = ');
% R için 4.53cm, X için 0.94 cm, Ku için 0.63 cm.
f=(f1)*10^9; % Frekans değeri Hz'e çevrildi.
f_c=(fc)*10^9; % Frekans değeri Hz'e çevrildi.
lambda0=((3*10^8)/f)*100;
% Serbest uzay dalga boyu.
lambdac=((3*10^8)/f_c)*100 ;
% Kesim dalga boyu.
X=((s1^2-s2^2)+1)/(2*s1);
% X değişkenin denklemi verilen formüle göre yazıldı.
ref=X+((X^2-1))^0.5;
% Yansımaya katsayısı değeri.
if abs(ref) < 1
    ref=X+((X^2-1))^0.5;
else
    ref=X-((X^2-1))^0.5;
end
T=((s1+s2-ref)/(1-((s1+s2)*ref)));
% İletim katsayısı değeri.
c=((1/(2*pi*L))*log(1/T))^2 * -1 ;
% formülasyondaki 1/delta^2 yerine c değişkeni yazıldı.
d=sqrt(c); % 1/delta değeri de c'nin kareköküne eşitlendi.
T1=(1+ref)/(1-ref);
b=lambda0^-2;
e=lambdac^-2;
g=(b-e).^0.5;
h=( 1/(2*pi*L) ) * log(1/T);
ur=(T1*d) / (g)
% Manyetik geçirgenlik değeri.
er=(lambda0 ^2 /ur)*(e - h^2)
% Elektrik geçirgenlik değeri.
```