

RF ve Mikrodalga Devre Tasarımında Dielektrik Taban Kayıp Çarpanının Mikroşerit Hat Güç Kayıplarına Etkisinin Araştırılması

Oğuzhan Kızılbey^{D*}

*1 TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, KOCAELİ

(Alınış / Received: 06.05.2022, Kabul / Accepted: 20.07.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 23.08.2022)

Anahtar Kelimeler

Dielektrik taban,
Mikroşerit hat,
Dielektrik kaybı,
İletken kaybı

Öz: Bu makalede, radyo frekansı (RF) ve mikrodalga devre uygulamalarında kullanılan farklı dielektrik tabanların kayıp çarpanlarının, mikroşerit hatlar üzerindeki güç kayıplarına olan etkileri araştırılacaktır. Araştırmanın frekans alt sınırı 1 GHz, üst sınırı ise 30 GHz olarak belirlenmiştir. Dielektrik tabanın iletkeni 35µm kalınlığında elektroçöktürme bakır olarak seçilmiştir. Test amaçlı tasarlanan mikroşerit hat her frekans için 50Ω karakteristik empedansa sahip olacaktır. Araştırmaya konu edilen dielektrik tabanlar FR4, RO3003, RO3010, RO4003C, RO4350B, RT/Duroid 5880, RT/Duroid 6002, ve RT/Duroid 6006 olmakla beraber, dielektrik taban kalınlığı standart ölçülerden biri olan 0.508 mm seçilmiştir. Araştırmanın sonucunda tüm frekanslarda en düşük güç kaybının RT/Duroid 5880 tabanda, en yüksek güç kaybının ise FR4 tabanda olduğu görülmüştür. Ayrıca frekans arttıkça bütün dielektrik tabanlarda güç kayıplarının arttığı görülmüştür.

Investigation of the Effect of Loss Factor of the Dielectric Substrates on Microstrip Line Power Losses in RF and Microwave Circuit Design

Keywords

Dielectric substrate,
Microstrip Line,
Dielectric loss,
Conductor loss

Abstract: In this article, the effects of the use of different dielectric base materials used in radio frequency (RF) and microwave circuit design on power losses on microstrip lines will be investigated. The lower frequency limit of the study was determined as 1 GHz and the upper limit as 30 GHz. Conductor of the substrate was chosen as electrodeposited copper with 35µm thickness. The microstrip line used for testing is designed as 50Ω for each frequency. The dielectric materials included in the research were RO4003C, RO4350B, RT/Duroid 5880, RT/Duroid 6002, RT/Duroid 6006, RO3003, RO3010 and FR4, but the dielectric base thickness was selected as 0.508 mm. As a result of the research, it was seen that the lowest loss at all frequencies was at RT/Duroid 5880 base and the highest loss was at FR4 base. In addition, it was observed that as the frequency increases, losses increase in all dielectric bases.

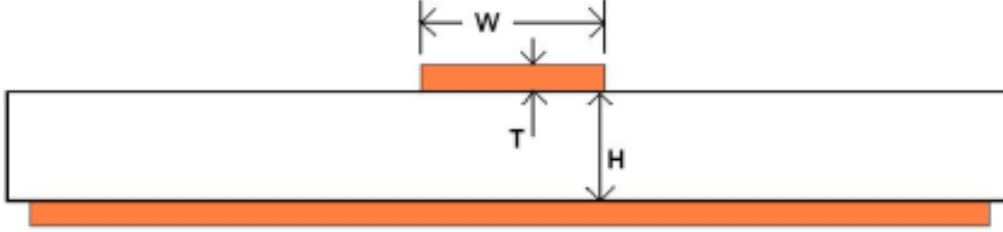
*İlgili Yazar, email: oguzhan.kizilbey@tubitak.gov.tr

1. Giriş

Elektronik devreler, çoğunlukla düzlemsel bir kart üzerine elektronik elemanların çeşitli tasarım ilkelerine uyularak dizilmesi ve birbirleri ile bağlanması ile bir bütün haline gelir. RF, mikrodalga ve hatta günümüzde milimetre dalga frekanslarında kablolu/kablosuz haberleşme ürünleri, otonom sürüş radarları, askeri radarlar, sinyal karıştırıcılar gibi birçok sivil ve askeri uygulama elektronik devre kartları içermektedir. Bu kartların bir kısmı sayısal ve düşük frekans devrelerini üzerinde taşıırken, bazıları yüksek frekans devreleri barındırmaktadır [1].

Güç kuvvetlendiricisi, düşük gürültülü alıcı, karıştırıcı, osilatör, güç bölücü, hibrit kuplör ve anten gibi aktif ve pasif yüksek frekans devrelerinin dielektrik taban üzerine kondansatör, endüktör, direnç gibi toplu devre elemanlar ve bipolar jonsiyonlu transistör, alan etkili transistör gibi aktif elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmesi

oldukça yaygın bir uygulamadır. Toplu devre elemanlarının kalite faktörlerinin sınırlı olması ve her eleman değerinin üretilmemiş olması/elde edilememesi gibi kısıtlar nedeniyle çok yüksek kalite faktörü ve sınırsız değer belirleyebilme imkanı ile toplu devre elemanlarının yerine mikroşerit hatlar tercih edilmektedir [2]. Şekil 1'de dielektrik taban üzerinde gerçekleşmiş bir mikroşerit hattın kesiti verilmiştir. Şekilde H dielektrik malzemenin kalınlığını, T dielektrik malzeme üzerindeki iletkenin kalınlığını, W ise mikroşerit hattın genişliğini temsil etmektedir.



Şekil 1. Mikroşerit hat kesiti

Dielektrik taban üzerinde bir mikroşerit hattın tasarlanabilmesi için tabanın bazı özelliklerinin iyi tahlil edilmesi gereklidir. Dielektrik tabanın önemli parametreleri olarak dielektrik sabiti, kayıp çarpanı, dielektrik sabitinin ısı katsayısı, ısı iletkenlik ve cam geçiş sıcaklığı verilebilir.

Dielektrik sabiti, tabanın enerjiyi depolama özelliğini belirleyen en önemli parametredir. 2 ile 12 arasında değerlerde bağlı dielektrik sabitine sahip tabanlar elektronik devre tasarımı için temin edilebilmektedir. Dielektrik sabiti arttıkça devrenin boyutlarının küçüleceği göz önüne alınmalı ve üretim imkanına göre dielektrik taban seçimi yapılmalıdır.

Dielektrik sabitinin ısı katsayısı, sıcaklık değişimi ile dielektrik sabitinin değişimini modellemektedir. Yüksek sıcaklık değişimine maruz kalan elektronik devre kartlarında bu parametrenin düşük olması tercih edilmelidir. Dielektrik sabiti değiştiğinde tüm tasarlanan elemanların karakteristiklerinin değişebileceği unutulmamalıdır.

Isıl iletkenlik, dielektrik tabanın üzerinde taşıdığı gücün oluşturduğu ısının ne ölçüde kartın monte edildiği yüzeye yayıldığı bir göstergesidir. Yüksek güç uygulamalarında kart üzerinde kalan ısının soğutucu bloklara etkin biçimde dağıtılabilmesi için, dielektrik taban malzemesinin ısı iletkenliğinin yüksek olmasına dikkat edilmelidir.

Cam geçiş sıcaklığı, dielektrik malzemenin kırılman ve katı olan cam formundan, plastik formuna geçiş sıcaklığıdır. Bu sıcaklık derecesi bir manada tabanın güvenilirliği yüksek olarak kullanılabileceği en yüksek sıcaklık derecesini belirtmektedir. Yüksek-güç kuvvetlendiricisi uygulamalarında taban seçimi yapılırken özellikle bu parametreye dikkat edilmelidir.

Kayıp çarpanı, dielektrik tabanın dielektrik kaybını modelleyen parametredir. Kayıp çarpanının 0.015'ten yüksek olduğu tabanlar yüksek kayıplı, 0.004 ile 0.015 arası olanlar orta kayıplı, 0.004 ile 0.002 arası olanlar düşük kayıplı ve 0.002'den daha düşük değerlere sahip olanlar ise çok düşük kayıplı olarak sınıflandırılabilir. Dielektrik tabanın üzerinde geliştirilen mikroşerit hatlar 4 tür güç kaybı ile karşılaşmaktadır. Bunlar iletken kayıpları, dielektrik kayıpları, ışınma kayıpları ve yüzey dalgası yayılımı kayıplarıdır. Bu kayıplar arasında iletken ve dielektrik kayıpları güç kaybına neden olan ana etkenlerdir. Dielektrik kaybı, dielektrik taban malzemesinin kayıp çarpanı ile ilişkilendirilebilecek kayıp türüdür. İletken kayıpları ise dielektrik malzeme üzerindeki iletken kaplamasının türüne bağlı olarak değişmektedir. Dielektrik kaybı ile iletken kaybı toplandığında yaklaşık olarak toplam güç kaybı elde edilebilmektedir [3].

Değişen frekans ve değişen hat empedansları dielektrik sabitin etkin değerini belirlemektedir. Dielektrik malzemenin katalog bilgilerinde belirtilen dielektrik sabiti, efektif dielektrik sabitin hesaplanması için kullanılmaktadır. Dielektrik malzemenin, efektif dielektrik sabiti (1) bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıda u, W/H oranını belirten bir sayıdır. Malzemenin katalog bilgilerinde ifade edilen dielektrik sabiti ise ϵ_r olarak ifade edilmiştir. (1) bağıntısında geçen a ve b değişkenleri ise sırasıyla (2) ve (3) bağıntılarında verilmiştir [4].

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u} \right)^{-ab} \quad (1)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18.1}\right)^3 \right] \quad (2)$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (3)$$

Dielektrik taban üzerinde tasarlanan mikroşerit hatların temel olarak 2 adet güç kaybı ile karşı karşıya kaldığı belirtilmişti. Bunlardan ilki iletken kaybıdır ve (4) bağıntısı ile hesaplanabilir [4].

$$\alpha_c = 0.072 \frac{\sqrt{f}}{WZ_c} \cdot \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[1.4 \left(\frac{\Delta}{\delta_s} \right)^2 \right] \right) \quad (4)$$

Bu bağıntıda f frekansı, W hat genişliğini, Z_c hattın karakteristik empedansını, Δ yüzey pürüzlülüğünü, δ_s yüzey derinliğini ifade etmektedir. Bu ifadedeki karakteristik empedansın hesaplanması (5) ve (6) bağıntıları ile mümkündür [4].

$$Z_c = \frac{120\pi}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u}\right)^2} \right] \quad (5)$$

$$F = 6 + \left(2\pi - 6 \right) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{u} \right)^{0.7528} \right] \quad (6)$$

Bir diğer güç kaybı ise dielektrik kaybı olarak belirtilmişti ve (7) bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıda f frekansı, c ışık hızını, $\tan \delta$ kayıp çarpanını, ϵ_r tabanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_{re} tabanın etkin bağıl dielektrik sabitini belirtmektedir [4].

$$\alpha_D = 27.3 \frac{f \epsilon_r (\epsilon_{re} - 1) \tan \delta}{\sqrt{\epsilon_{re}} (\epsilon_r - 1) c} \quad (7)$$

2. Dielektrik Tabanlar ve Özellikleri

Günümüzde dielektrik tabanlar epoksi-camyünü (FR4) tabanlar ve teflon-seramik-hidrokarbon tabanlar olarak 2 genel başlıkta değerlendirilebilir. Bu kısımda FR4 ve teflon-seramik katkılı tabanlar, başlıklar halinde incelenecektir. Bunlar FR4, R03003, R03010, R04003C, R04350B, RT/Duroid 5880, RT/Duroid 6002, RT/Duroid 6006 tabanlarıdır.

2.1. FR4

FR4 kısaltması, İngilizce “fire retardent level-4” yani “alev geciktirici seviye-4” manasına gelen bir sınıflandırmadan gelen bir terimdir. Cam yünü ve epoksi reçine karışımından oluşan FR4 tabanlar, elektronik devre kartı üretimi için taban malzemesi olarak çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu malzemenin en yüksek çalışma sıcaklığı üretim aşamalarına göre değişebilmektedir. Üreticiler arasında ve modeller arasında değişimle beraber 130°C’den 180°C’ye kadar cam geçiş sıcaklıklarına sahip olabilir. Bu sıcaklığın yüksek olması, taban malzemesinin daha yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda bütünlüğünü koruyabilmesi için gereklidir.

FR4 malzemenin bağıl dielektrik sabiti, tüm frekanslar için sabit olmamakla beraber 4.4 olarak verilmektedir. Bu dielektrik malzemenin kayıp çarpını 0.02'dir. FR4 malzemenin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. FR4 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	4.4	-
Kayıp Çarpını ($\tan \delta$)	0.02	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	-	ppm/°C
Isıl iletkenlik	-	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	130	°C

2.2. RO3003

RO3003 yüksek frekanslı dielektrik taban malzemeleri, ticari mikrodalga ve RF uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış seramik dolgulu politetraetilflore (PTFE) kompozitlerdir. Bu dielektrik taban, rekabetçi fiyatlarla olağanüstü elektrik ve mekanik kararlılık sunmak için tasarlanmıştır. RO3003 tabanlar, seçilen dielektrik sabitinden bağımsız olarak tutarlı mekanik özelliklere sahip seramik dolgulu PTFE bazlı devre malzemeleridir. Bu, tasarımcının, çarpılma veya güvenilirlik sorunlarıyla karşılaşmadan, ayrı katmanlar için farklı dielektrik sabit malzemeler kullanan çok katmanlı devre tasarımları geliştirmesine de olanak tanır. RO3003 tabanın dielektrik sabiti 3, kayıp tanjantı 0.0010, dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi ise -3 ppm/°C olarak verilmiştir. Isıl iletkenliği 0.50 W/m/K olan malzemenin 500°C sıcaklığa kadar formunu koruyarak çalışabilmesi mümkündür. RO3003 malzemenin bazı özellikleri Tablo 2'de verilmiştir [5].

Tablo 2. RO3003 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	3	-
Kayıp Çarpını ($\tan \delta$)	0.0010	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	-3	ppm/°C
Isıl iletkenlik	0.50	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	500	°C

2.3. RO3010

RO3000 ailesinin bir parçası olan RO3010 dielektrik taban, daha yüksek dielektrik sabiti gereksinimlerinde sıklıkla kullanılan yüksek başarılı bir malzemedir. RO3003 gibi seramik dolgulu PTFE malzemeden oluşan yapısı ile yüksek frekans devre tasarımlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Dielektrik sabitinin 11.20 olması, tasarımcıya, fiziki boyutları daha küçük devreler tasarlama imkanı sunmaktadır. Bu durum seri üretim için maliyet açısından fayda sağlayabilir. RO3010 malzemenin bağıl dielektrik sabiti 11.20, kayıp çarpını 0.0022, dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi ise -395 ppm/°C olarak verilmiştir. Isıl iletkenliği 0.95 W/m/K olan tabanın 500°C sıcaklığa kadar formunu koruyarak çalışabilmesi mümkündür. Bu ısıl iletkenlik değeri, birçok seramik dolgu içermeyen PTFE taban malzemelerinden yüksektir ve bu durum yüksek güç uygulamalarında ısının dağıtılması açısından üstünlük sağlayabilecektir. RO3010 dielektrik taban yüksek ısıl iletkenlik değerini seramik dolguya borçludur. RO3010 malzemenin bazı özellikleri Tablo 3'te verilmiştir [6].

Tablo 3. RO3010 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	11.20	-
Kayıp Çarpını ($\tan \delta$)	0.0022	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	-395	ppm/°C
Isıl iletkenlik	0.95	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	500	°C

2.4. RO4003C

RO4003C dielektrik taban hidrokarbon-seramik malzemeden geliştirilmiş yüksek başarılı ve düşük maliyetli bir malzemedir. PTFE içeren tabanların aksine elektronik devre kartı olarak işlenmesi tipik FR4 taban ile kart üretimi sürecine benzerlikler gösterir ve daha basittir. Bağıl dielektrik sabiti 3.55 ve kayıp çarpını 0.0027'dir. RO4003C malzemenin dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi ise +40 ppm/°C olarak verilmiştir. Isıl iletkenliği 0.71 W/m/K olan tabanın 425°C sıcaklığa kadar formunu koruyarak çalışabilmesi mümkündür. Bu ısıl iletkenlik değeri, birçok seramik dolgu içermeyen PTFE taban malzemelerinden yüksektir ve bu durum yüksek

güç uygulamalarında ısının dağıtılması açısından üstünlük sağlayabilecektir. R04003C malzemenin bazı özellikleri Tablo 4'te verilmiştir [7].

Tablo 4. R04003C Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	3.55	-
Kayıp Çarpanı ($\tan \delta$)	0.0027	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	+40	ppm/°C
Isıl iletkenlik	0.71	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	425	°C

2.5. R04350B

R04350B dielektrik taban hidrokarbon-seramik malzemeden geliştirilmiş yüksek başarılı ve düşük maliyetli bir malzemedir. PTFE içeren tabanların aksine elektronik devre kartı olarak işlenmesi tipik FR4 tabanın işlenmesi ile benzerlikler gösterir ve daha basittir. Aynı aileden gelen R04003 ile farkı FR4 gibi yanmaya karşı gösterdiği yüksek dirençtir. Bağlı dielektrik sabiti 3.66 ve kayıp çarpanı 0.0037'dir. R04350B malzemenin dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi ise +50 ppm/°C olarak verilmiştir. Isıl iletkenliği 0.69 W/m/K olan tabanın 390°C sıcaklığa kadar formunu koruyarak çalışabilmesi mümkündür. Bu ısıl iletkenlik değeri, birçok seramik dolgu içermeyen PTFE taban malzemelerinden yüksektir ve bu durum yüksek güç uygulamalarında ısının dağıtılması açısından üstünlük sağlayabilecektir. R04350B malzemenin bazı özellikleri Tablo 5'te verilmiştir [8].

Tablo 5. R04350B Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	3.66	-
Kayıp Çarpanı ($\tan \delta$)	0.0037	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	+50	ppm/°C
Isıl iletkenlik	0.69	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	390	°C

2.6. RT/Duroid 5880

RT/Duroid 5880 cam-mikrofiber takviyeli PTFE tabanlar, yüksek frekans mikroşerit devrelerini geliştirmek için tasarlanmıştır. Rastgele yönlendirilmiş mikroelyaflar, çok yüksek doğrulukla dielektrik sabit bütünlüğü sağlar. RT/Duroid 5880 tabanların dielektrik sabiti üretilen her panelde aynıdır ve geniş bir frekans aralığında sabittir. Düşük kayıp çarpanı RT/Duroid 5880 laminatların kullanılabilirliğini Ku-bandına ve üstüne kadar genişletir.

RT/Duroid 5880 tabanlar kolayca kesilir ve şekillendirilmek üzere işlenebilir. Normal veya baskılı devrelerde veya kaplama kenarlarında ve deliklerinde kullanılan sıcak veya soğuk tüm solventlere ve reaktiflere karşı dayanıklıdır. Normalde 8 ile 70µm kalınlıklı elektroçöktürme bakır veya haddelenmiş bakır folyo ile kaplanabilir. Alüminyum, bakır veya pirinç levha ile kaplama da tercih edilebilir. RT/Duroid 5880 taban siparişi verirken, kalınlık, tolerans, haddelenmiş, elektroçöktürme veya ters işlenmiş bakır folyo ve gerekli bakır folyo ağırlığını belirtmek önemlidir.

RT/Duroid 5880'in güç kaybı 0.0009'dur ve bu değer, diğer benzer dielektrik tabanlar arasında en düşük değerdir. Dielektrik sabitinin ısıl katsayısı -125 ppm/°C olarak verilmiştir. Isıl iletkenlik olarak seramik dolgu içermediğinden dolayı 0.20 W/m/K değerine sahiptir ve 500°C cam geçiş sıcaklığına sahiptir. RT/Duroid 5880 tabanın bazı özellikleri Tablo 6'da verilmiştir [9].

Tablo 6. RT/Duroid 5880 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	2.2	-
Kayıp Çarpanı ($\tan \delta$)	0.0009	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	-125	ppm/°C
Isıl iletkenlik	0.20	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	500	°C

2.7. RT/Duroid 6002

RT/Duroid 6002 dielektrik taban, karmaşık mikrodalga yapılarının tasarımında gerekli üstün elektriksel ve mekanik özellikler sunan 2.94 dielektrik sabiti ile ilk düşük kayıp ve düşük dielektrik sabitine sahip tabandır. Dielektrik sabitinin ısı katsayısı -55°C ile $+150^{\circ}\text{C}$ arasında $+12$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ile son derece düşüktür, bu da kuvvetlendirici, filtre, osilatör ve gecikme hatlarının tasarımcılarına günümüzün zorlu uygulamalarında ihtiyaç duyulan elektriksel kararlılığı sağlar. Kayıp çarpanı 0.0012 olan RT/Duroid 6002, çok düşük kayıplı tabanlar arasında yer alır ve 0.60 W/m/K ısı iletkenliği ile zor çevre şartlarında kullanım için tercih edilebilir. RT/Duroid 6002 tabanın bazı özellikleri Tablo 7'de verilmiştir [10].

Tablo 7. RT/Duroid 6002 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	2.94	-
Kayıp Çarpanı ($\tan \delta$)	0.0012	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	+12	ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Isıl iletkenlik	0.60	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	500	$^{\circ}\text{C}$

2.8. RT/Duroid 6006

RT/Duroid 6006 dielektrik tabanlar, yüksek dielektrik sabiti gerektiren RF ve mikrodalga devre uygulamaları için tasarlanmış seramik-PTFE karışımı malzemelerdir. RT/Duroid 6006 taban 6.15 dielektrik sabiti değerine sahiptir ve bu tabanlar imalat kolaylığı ve kullanım kararlılığına sahiptir. Yüksek dielektrik sabitinden faydalanarak devre boyutlarını küçültmekle beraber 0.0027 gibi nispeten düşük kayıp çarpanı ile dikkat çekmektedir. Dielektrik sabitinin ısı katsayısı -410 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ olmakla beraber ısı iletkenliği 0.49 W/m/K'dir. Dielektrik sabiti, yüksek sıcaklık değişimine maruz kalan uygulamalarda yüksek değişim gösterebilir. RT/Duroid 6006 tabanın bazı özellikleri Tablo 8'de verilmiştir [11].

Tablo 8. RT/Duroid 6006 Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	6.45	-
Kayıp Çarpanı ($\tan \delta$)	0.0027	-
Dielektrik Sabitinin Isıl Katsayısı	-410	ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Isıl iletkenlik	0.49	W/m/K
Cam Geçiş Sıcaklığı	500	$^{\circ}\text{C}$

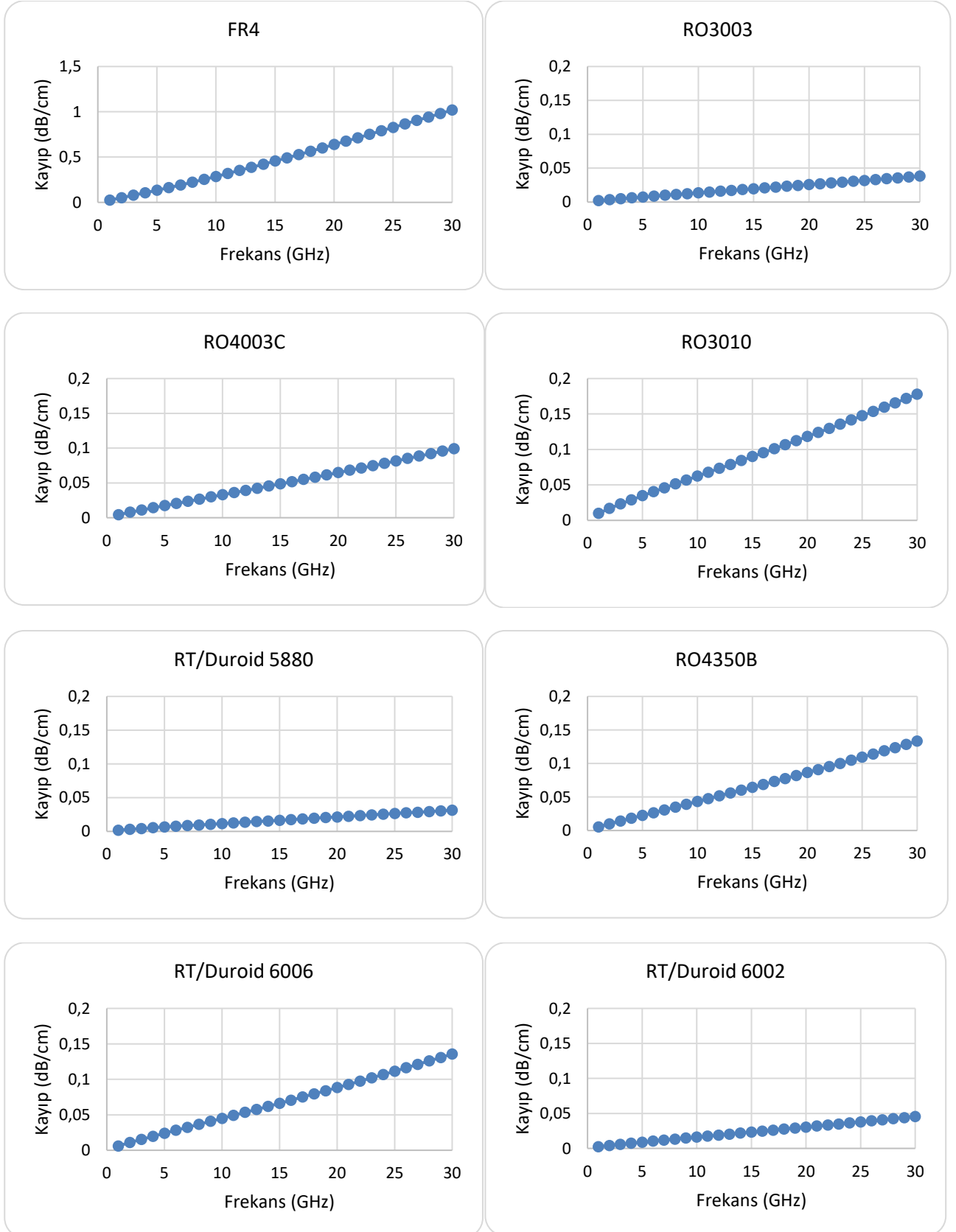
3. Mikroşerit Hat Kayıplarının Hesaplanması ve Karşılaştırma

8 farklı dielektrik taban kullanılarak (1)-(7) denklemleri ile 50Ω karakteristik empedansa sahip mikroşerit hat tasarımları yapılmıştır. Her tabanın dielektrik sabiti farklı olduğundan aynı empedansa sahip hatların genişlikleri farklı olmuştur. Hesaplamalarda dielektrik taban iletken kalınlığı 35 μm elektroçöktürme bakır kaplama olarak seçilmiştir. Denklem (4) ile iletken güç kaybı, denklem (7) ile dielektrik güç kaybı hesaplanmıştır. Bu 2 parametrenin toplamı, toplam güç kaybını vermektedir. Her taban ve frekans için etkin dielektrik sabiti hesabı ayrı ayrı yapılmıştır. Bağlı dielektrik sabitinin 1-30 GHz frekans bandında sabit olduğu kabul edilmiştir ve bu kabul ile etkin dielektrik sabiti hesaplanmıştır. Tüm tabanların kalınlığı 0.508 mm olarak seçilmiştir. Bu kalınlık sıklıkla kullanılan standart bir kalınlıktır.

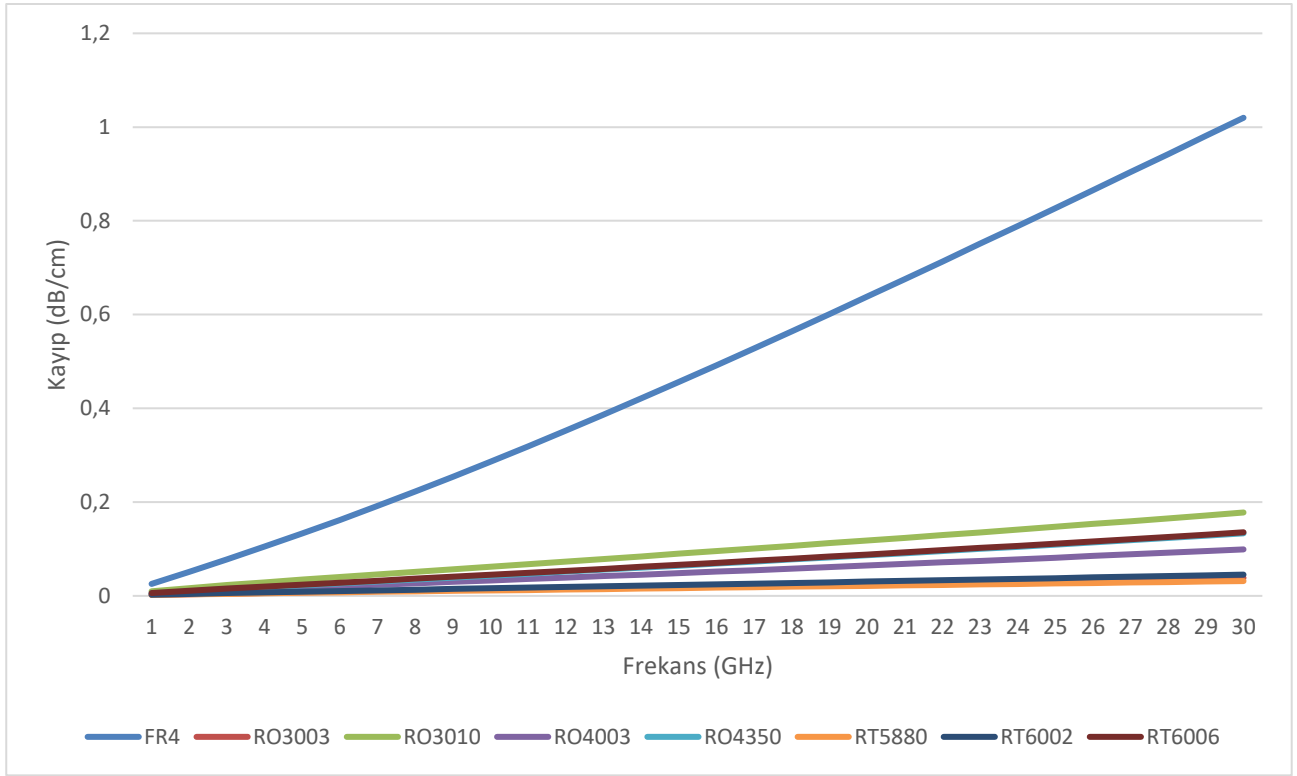
Şekil-2'de ayrı grafikler halinde tüm dielektrik tabanların kayıpları cm başına dB birimi ile 1-30 GHz frekans bandı boyunca verilmiştir. Hesaplamalara göre FR4 dielektrik taban, diğer seramik-teflon-hidrokarbon katkılı dielektrik tabanlara göre oldukça yüksek güç kaybına sahip olduğu görülmüştür. RO3003, RO3010, RO4003C, RO4350B, RT/Duroid 5880, RT/Duroid 6002 ve RT/Duroid 6006 tabanların kayıpları birbirlerine daha yakındır ve cm başına 0.005 ile 0.2 dB arasında değişmektedir.

Bu makale kapsamında incelenen dielektrik tabanların tamamının 1-30 GHz frekans bandındaki toplam güç kayıpları aynı grafikte karşılaştırma amaçlı olarak Şekil-3'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde FR4 dielektrik tabanın toplam güç kaybının seramik-teflon-hidrokarbon katkılı diğer tabanlardan ayrıştığı gözlenmektedir.

30 GHz frekansında FR4 dielektrik tabanın kullanımı, cm başına 1 dB güç kaybı getireceği çarpıcı bir sonuçtur. Keza 5 GHz'de yaklaşık 0.1 dB/cm, 10 GHz'de yaklaşık 0.3 dB/cm, 20 GHz'de 0.6 dB/cm kayıpların olacağı hesaplanmıştır. En düşük kayıplı taban olan RT/Duroid 5880 ise 5 GHz'de yaklaşık 0.01 dB/cm, 10 GHz'de yaklaşık 0.02 dB/cm, 20 GHz'de 0.03 dB/cm ve 30 GHz'de 0.04 dB/cm olarak hesaplanmıştır.

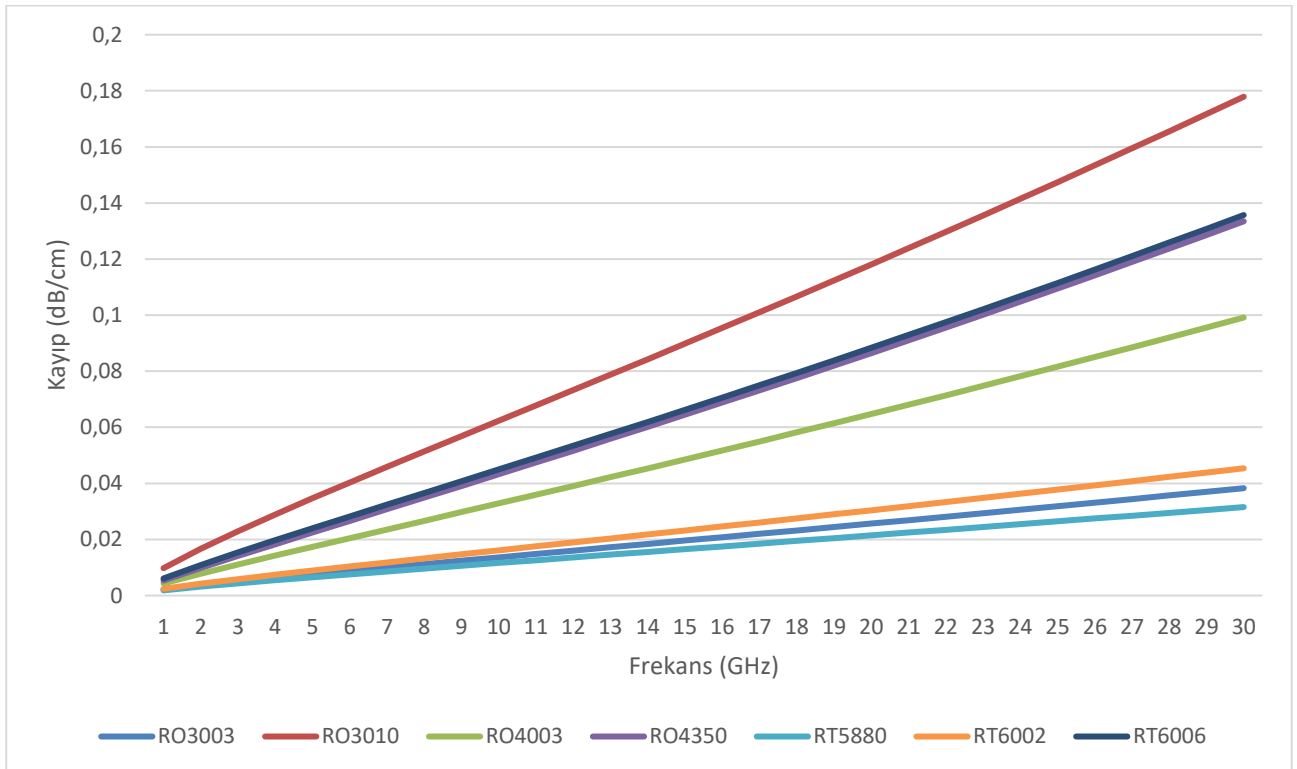


Şekil 2. Çeşitli dielektrik tabanlarda tasarlanan 50Ω mikroserit hatların 1-30 GHz frekans bandında güç kayıpları



Şekil 3. FR4 ve diğer dielektrik tabanların kayıplarının frekansla değişimi

FR4 dielektrik tabana göre çok daha az güç kaybına sahip diğer seramik ve PTFE katkıli tabanların kendi aralarında güç kayıpları Şekil 4'te verilmiştir. Bütün frekanslarda en düşükten en yükseğe güç kaybı RT/Duroid 5880, RO3003, RT/Duroid 6002, RO4003, RO4350, RT/Duroid 6006, RO3010 şeklinde olmuştur. Güç kaybını artıran temel faktörün kayıp çarpanı olmasıyla birlikte dielektrik sabitinin artmasının da toplam güç kaybını artırdığı dikkat çekmiştir.



Şekil 4. RO ve RT serisi dielektrik tabanların güç kayıplarının frekansla değişimi**4. Tartışma ve Sonuç**

Bu araştırma makalesinde 1-30 GHz frekans bandında, 0.508 mm kalınlığında RT/Duroid 5880, RO4003C, RO4350B, RO3003, RO3006, RO3010, RT/Duroid 6002, RT/Duroid 6006 ve FR4 dielektrik tabanları kullanılarak tasarlanan 50Ω karakteristik empedansa sahip mikroşerit hattın güç kaybı hesaplamaları yapılmış ve dielektrik tabanların karşılaştırmaları verilmiştir. Araştırmanın sonunda şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Dielektrik taban malzemesinin kayıp çarpanı, frekans yükseldikçe artırarak mikroşerit hat üzerindeki işaretin maruz kaldığı dielektrik kaybının yükselmesine neden olmaktadır.
- 1-30 GHz frekans bandında en düşük kayıp, RT/Duroid 5880 dielektrik taban tarafından gösterilmiştir. Aynı zamanda en düşük kayıp çarpanına sahip olan dielektrik taban da RT/Duroid 5880'dir. Bu yönüyle güç kaybı toleransı olmayan RF ve mikrodalga devre tasarımlarında ilk sırada tercih edilebilir.
- En yüksek güç kaybı tüm frekans bandı boyunca FR4 taban tarafından sergilenmiştir. Özellikle birkaç GHz üzeri frekanslarda FR4 tabanın neden olduğu kaybın çok yüksek olması sebebiyle, bu taban malzemesi ile yüksek frekans devre tasarımı gerçekleştirmenin tercih edilmesi durumunda karşılaşılabilecek yüksek güç kaybı hesaba katılmalıdır.
- Dielektrik sabiti daha yüksek olan tabanlarda, özellikle dielektrik kaybı artacaktır ve bu da topla güç kaybını artıran bir faktör olacaktır. Bununla beraber dielektrik sabitinin artırılması sonucunda devrenin boyutlarının küçülmesi sağlanacağından, oluşan güç kaybının bir miktar tolere edilmesi sağlanabilir. Dielektrik taban seçimi yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır.
- Dielektrik sabitinin etkin değeri, frekans yükseldikçe katalog verisine yaklaşmaktadır.
- Mikroşerit hat üzerinden ilerleyen dalganın iletken ve dielektrik kaybı toplamı yaklaşık olarak toplam güç kaybını vermektedir.
- RT/Duroid 5880 en düşük güç kaybını sağlayan dielektrik taban olmakla beraber, ısıl iletkenlik ihtiyacı ön plana alınacak ise, RO3003 benzer dielektrik sabiti ve güç kaybı ile RF ve mikrodalga uygulamalarında iyi bir alternatif olabilir.

Kaynakça

- [1] Pozar, D. M. 2011. Microwave Engineering. 4th, edition. Wiley. Boston, 732s.
- [2] Hong, J. S. 2011. Microstrip Filters for RF and Microwave Applications. 2nd, edition. Wiley. New Jersey, 635s.
- [3] Edwards, T. C ve Steer M. B. 2008. Foundations for Microstrip Circuit Design. 4th, edition. Wiley. United Kingdom, 659s.
- [4] Garg, R., Bahl I. ve Bozzi M. 2013. Microstrip Lines and Slotlines. 3rd, edition. Artech House. United States of America, 589s.
- [5] Anonim, 2020. RO3003 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [6] Anonim, 2020. RO3010 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/ro3000-series-laminates/ro3010-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [7] Anonim, 2020. RO4003 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [8] Anonim, 2020. RO4350 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/ro4000-series-laminates/ro4350b-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [9] Anonim, 2020. RT/Duroid 5880 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [10] Anonim, 2020. RT/Duroid 6002 Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6002-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).
- [11] Anonim, 2020. RT/Duroid 6006 and 6010.2LM Series Laminates. <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6006-and-6010-2lm-laminates> (Erişim Tarihi: 06.05.2020).