



X-Bant uydu uygulamaları için dielektrik ölçüm yaklaşımı tabanlı kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı

Dielectric measurement approach based compact U-slot patch antenna design for X-band satellite applications

Orçun Kiriş^{1,*} 

Colorado School of Mines, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80401, Golden, A.B.D.

Öz

Bu çalışmada, X bant uzay uygulamaları için Flame Retardant 4 (FR4) malzemesinin dielektrik ölçüm yaklaşımına dayalı kompakt bir U-Yarıklı yama anten tasarımı sunulmaktadır. Tasarım yöntemine uygun olarak, anten tasarımlarında kullanılacak HFSS tasarım aracına, FR4 malzemesinin dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak X-bantta ölçülen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri uygulanmıştır. Daha sonra, yaklaşımın anten tasarımları üzerindeki fonksiyonel performansı, literatürdeki standart bir anten tasarımının benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Doğrulan sonuçlar ışığında, önerilen tasarım yöntemi kullanılarak X-bant uzay uygulamaları için yanıl yan yarıklara sahip yeni bir U-Yarıklı yama anten tasarımı, bir besleme hattı ile sunulmaktadır. Sunulan kompakt anten tasarımı ile merkez frekansta (9,5 GHz) 1,77 dB kazanç ve 8,53 GHz'den 10,63 GHz'e kadar frekans bant genişliği sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: U-yarıklı, X-bant, FR4, Dielektrik karakterizasyonu

1 Giriş

Antenler, elektromanyetik enerjinin yayılımı vasıtasıyla verici ve alıcı ekipman arasındaki iletişimi kablolu şekilde gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış olan sistem elemanlarıdır. Yayılan elektromanyetik enerjinin frekansına uygun olarak tasarlanması gereken antenlerin, kullanıldıkları uygulamaya özgü olarak farklı tasarım kısıtları oluşabilmektedir. Modern uydu iletişimi teknolojileri özelinde, görev yüklerinin kısıtlı alan ve ağırlık gereksinimleri doğrultusunda küçük boyutlu, hafif, düşük maliyetli, yüksek kazançlı ve yüksek yönlü antenlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Mikroşerit yama antenler, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve sistem entegrasyon kolaylığı özelliklerinden dolayı günümüz teknolojisinde oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir [1, 2]. Ayrıca, stabil empedans karakteristikleri, farklı tiplerdeki besleme yapılarına uygunlukları, düşük çapraz polarizasyon özellikleri, yama antenleri oldukça popüler hale getirmektedir.

Abstract

In this study, a compact U-slot patch antenna design based on dielectric measurement approach of Flame Retardant 4 (FR4) material is presented for X band space applications. In accordance with the design method, the measured frequency dependent dielectric constant and tangent loss values of the FR4 material at X-band using the waveguide method is applied to the HFSS design tool to be used in antenna designs. Then, the functional performance of the design method on antennas is verified by comparing the simulation and measurement results of a conventional antenna design in the literature. In the light of the verified results, a new U-slot patch antenna design with lateral side slots for X-band space applications is presented with a feed line by using the proposed design method. The presented compact antenna design provides 1.77 dB gain at the center frequency (9.5 GHz) and the frequency bandwidth from 8.53 GHz to 10.63 GHz.

Keywords: U-slot, X-band, FR4, Dielectric characterization

Diğer yandan, mikroşerit yama antenler karakteristik olarak dar bant genişliğine sahiptir ve performansları büyük ölçüde kullanılan alttaş materyalinin kalınlığına, homojenliğine, dielektrik sabitine (ϵ_r) ve tanjant kaybı ($\tan\delta$) değerine bağlıdır. Üstelik bu değerler frekansa bağlı olarak değiştiği için, farklı tasarım frekanslarında anten performansının doğru ve hassas şekilde belirlenmesi oldukça güçleşmektedir. Bazı alttaş üreticileri belirli frekans bantlarında bu değerleri bir veri seti olarak sunmaktadır. Fakat, özellikle alttaş materyallerinin yüksek frekanslardaki elektriksel özellikleri hakkındaki bilgiler oldukça kısıtlıdır. Bu durum, yüksek frekans uygulamalarında tasarım doğruluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır.

Mikroşerit yama antenlerin operasyonel frekans bant genişliği üzerine literatürde birçok karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde, X-bantta tasarlanmış bir mikroşerit yama antenin farklı alttaş kalınlıklarındaki frekans bant genişliği performansı incelenmiş ve nispeten kalın alttaşların daha iyi bant genişliği performansına sahip

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: orcunkiris@hotmail.com (O. Kiriş)

Geliş / Received: 25.10.2022 Kabul / Accepted: 03.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1194496

olduğu gözlemlenmiştir [3]. Bir diğer çalışmada ise, birbirinden farklı dielektrik sabitlerine sahip olan alttaşların anten bant genişliği üzerine etkisi araştırılmıştır [4]. Elde edilen sonuçlar, düşük dielektrik sabiti ve düşük tanjant kaybı değerlerine sahip alttaşların, görece daha yüksek değerlere sahip olanlara göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmalarda kullanılan tam-dalga elektromanyetik alan benzetim programları, yüksek frekans yapılarının tasarımında yaygın olarak kullanılan araçlardır. Bu benzetim ve analiz programları, maliyetli ve uzun süreli üretim aşamalarından önce minimum çabayla birçok sayıda performans optimizasyonu işlemine olanak sağladıkları için verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Fakat, piyasada çok sayıda ticari alttaş çeşidinin bulunması ve bu ürünlerin her birinin frekansa bağlı elektriksel özellikleri hakkındaki bilgilerin sınırlı olması nedeniyle, benzetim programlarının kullanıcılarına her tasarım frekansında yüksek doğrulukla ve gerçeğe yakın sonuçlar vermesi oldukça güçleşmektedir.

FR4, radyo frekansı ve mikrodalga yapılarında kullanılan en popüler ticari alttaş malzemelerinden biridir ve dünya genelinde çok sayıda farklı üretici tarafından üretilmektedir. Fakat, piyasaya sunulan FR4'lere ait elektriksel özellik değerlerinin farklı üreticilerin veri sayfalarında birbirinden farklı değerlere sahip olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, üreticilerin veri sayfalarında sunulan değerlerin frekansa göre değişimi hakkında çok sınırlı düzeyde bilgi verildiği gözlenmektedir. Diğer yandan, literatürde de FR4'ün dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerlerinin frekansa ve üreticiye bağlı olarak değişimler gösterdiği bilinmektedir [5]. Bu eksikliği gidermek için FR4 malzemesi üzerine birçok elektriksel karakterizasyon çalışması yayınlanmış olsa dahi, üreticiden üreticiye farklılık gösteren elektriksel özellik bilgileri, yayınlanan sonuçların pratikte tasarımcılar tarafından doğrudan kullanıma uygun değildir [6-8].

X-bant frekansları, iletilmesi hedeflenen sinyalin hava koşullarının zayıflatıcı etkisine karşı dirençli olmasının önem arz ettiği uydu iletişimi için en yaygın kullanılan haberleşme frekans bandıdır. X-bant frekansları, Ku veya Ka gibi diğer yüksek frekans bantlarına kıyaslandığında link kopmalarına daha dayanıklı bir iletim imkânı sağlamaktadır [9]. Dalga kılavuzu ile dielektrik ölçüm yöntemi [10], X-bant frekanslarında yapılacak benzetim ve analiz işlemlerinde, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek için önerilen dielektrik ölçüm tabanlı tasarım yaklaşımı için iyi bir adaydır. Dalga kılavuzu ile frekansa bağlı olarak değişken değerlere sahip olabilen malzemelerin dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri yüksek hassasiyetle elde edilebilir. Elde edilen veri seti kullanılan tam-dalga benzetim programına girdi olarak eklenerek, tasarım sonuçlarının üretilip ölçülen yapıların performansına daha yakın olması sağlanabilir. Sunulan bu iyileştirilmiş tasarım metodu, operasyonel çalışma frekanslarında FR4 malzemenin ölçülen frekans bağımlı dielektrik özelliklerinin kullanımına dayanmaktadır. Ayrıca önerilen tasarım yaklaşımının performansı, FR4 materyalini alttaş olarak kullanan bir mikroşerit hat yapısının standart benzetim ve ölçüm sonuçları ile iyileştirilmiş tasarım yaklaşımı ile elde edilmiş sonuçların kıyaslanmasıyla doğrulanmıştır [11].

Özellikle düşük boyutları ve hafif olmaları sebebiyle, boyut ve ağırlık kısıtlamalarına tabii olan uydu sistemlerinde kritik öneme sahip olan mikroşerit yama antenler, düzlemsel yapıları sayesinde uzay araçlarının aerodinamik yapısı ile de oldukça uyumludur [12-15]. Her ne kadar uydu iletişimde dar frekans bant genişliği arzu edilen bir özellik olmasa da çoklu rezonans tasarım teknikleri ile yama antenler uydu uygulamaları için kullanışlı olabilmektedir. Çoklu rezonans yöntemi ile tasarlanmış, C ve X bantlarında yedi farklı dar operasyonel frekans bandını aynı anda kapsayan çok bantlı bir yama anteni [16]'de sunulmuştur. Bir başka çalışmada, dikdörtgen şekilli bir yama anten yapısı ile S ve X bandını kapsayan bir çoklu-bant uygulaması gerçekleştirilmiştir [17]. Uydu haberleşmesi üzerine gerçekleştirilen geniş bantlı bir X bant uygulamasında ise, 8.0-11.1 GHz frekanslarını kapsayan geniş bir Çatal-Şekilli mikroşerit yama anteni sunulmuştur [18]. Ayrıca, C-bant uydu uygulamalarında kullanılmak üzere, geniş yarıklı bir anten tasarımı çalışması [19]'da paylaşılmıştır. Diğer bir uydu haberleşmesine yönelik uygulamada ise, K ve Ku frekans bantlarında operasyonel olan bir X-Şekilli mikroşerit yama anten çalışması sunulmuştur [20]. Fakat bu antenler, çoğunlukla operasyonel tasarım frekanslarında bir dalga boyuna yakın boyutlara sahiptir ve uydu uygulamaları için kritik öneme sahip olan, daha düşük boyutlu ve daha hafif mikroşerit yama anten ihtiyaçları güncelliğini korumaktadır.

Mikroşerit yama antenlere U-şekilli bir yarık eklenmesi, dar bantlı bir prob beslemeli mikroşerit yama anteninin frekans bant genişliğini önemli ölçüde artırmaktadır [21]. Artan frekans bant genişliği, temelde yama antenin doğal rezonans frekansının ve üzerindeki U-şekilli yarık yapısından oluşan rezonansın birbirine yakın frekanslarda oluşacak şekilde ayarlanmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar, düşük dielektrik sabitine sahip alttaş üzerindeki U-Yarıklı yamalarının frekans bant genişliğinin %30 civarında artışa olanak sağlayabildiğini göstermektedir [22]. Ayrıca, elde edilen operasyonel bant genişliğindeki artış oranının kullanılan alttaş malzemesinin dielektrik sabiti ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır [23-25].

Bu çalışmada, dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak ölçülen FR4 alttaş malzemesinin frekansa göre değişen dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerleri kullanılarak, X-bant uydu uygulamalarında kullanılmak üzere, yan yarıklarla desteklenmiş bir U-Yarıklı yama anten tasarımı sunulmaktadır. Öncelikle, bu çalışmada kullanılan dielektrik ölçümü tabanlı iyileştirilmiş tasarım yönteminin performansını gözlemlemek adına, literatürde standart tasarım yöntemi ile tasarlanmış ve üretilmiş bir anten çalışması önerilen iyileştirilmiş tasarım yöntemi ile tekrar edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, referans çalışmada da paylaşılan benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak, kullanılan iyileştirilmiş tasarım yönteminin pratik ölçüm sonuçlarına klasik yöntemlere göre daha yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Daha sonra aynı tasarım yöntemi kullanılarak, X-bant uydu uygulamaları için, prob beslemeli kompakt bir U-Yarıklı mikroşerit yama anten tasarımı sunulmuştur. Önerilen anten tasarımı, düşük boyutlu ve hafif yapısının yanı sıra, 8.53-10.63 GHz aralığında yaklaşık %22'lik bir frekans bant genişliği sunmaktadır.

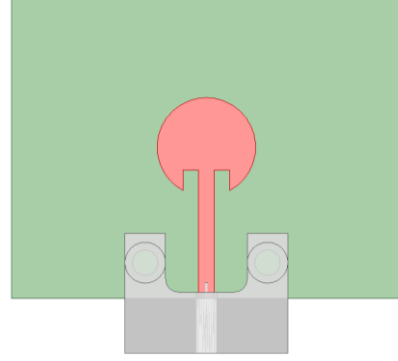
2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılmış olan alttaş materyali, radyo frekansı ve mikrodalga yapılarında kullanılan en popüler ticari ürünlerden biri olan FR4 materyalidir. FR4 uygun fiyatı, prototipleme cihazlarında kolay işlenebilir olması ve yaygın üretici ağı sayesinde kolay erişilebilir olmasından dolayı tasarımcıların ilgisini çekmektedir. Fakat, bu üretici çeşitliliği beraberinde üretim kaynaklı hassasiyet kabiliyetlerinin değişmesinden dolayı materyalin elektriksel özelliklerinde farklılıklara yol açmaktadır. Ayrıca, farklı frekanslarda farklı değerler alan materyalin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerinin, üreticilerin veri sayfalarında geniş bir frekans aralığında sunulması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durum yüksek frekans uygulamalarında kullanılan tam-dalga elektromanyetik tasarım programlarında elde edilen analiz sonuçları ile üretilen yapının ölçüm sonuçları arasında ciddi farklara sebep olmaktadır. Özellikle analiz edilen rezonans frekansı, karakteristik hat empedansı ve işlevsel performans sonuçları, ölçülen değerlerle öngörülemeyen farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, tasarım frekanslarında kullanılan materyal özelliklerinin hassas şekilde belirlenmiş olduğu, iyileştirilmiş tasarım metodlarının geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Üretim aşamasında kullanılması planlanan alttaş materyalinin, dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerinin ve bu değerlerin X-bant frekanslarında gösterdiği değişimin, yapının tasarım aşamasında bilinebilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de dalga kılavuzu yöntemidir. Bu yöntemde, pratikte kullanılacak olan alttaş materyalinden küçük bir parça alınarak, X-bant frekanslarında çalışmaya uygun olan bir WR90 dalga kılavuzu içerisine yerleştirilir ve S-parametre ölçümleri gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlar, dalga kılavuzunun içi boşaltılıp tekrarlanarak, ölçülen alttaş materyalinin elektriksel özellikleri havanın elektriksel özellikleri referans alınarak belirlenir. Belirlenen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri, tasarımda kullanılacak olan tam-dalga tasarım programına girdi olarak uygulanarak, henüz tasarım aşamasında pratikte elde edilmesi muhtemel sonuçlara yakın benzetim sonuçları elde etmek mümkün olmaktadır. Böylelikle, hassas ayarlama için üretilmek zorunda kalınan prototip sayısı ciddi şekilde azaltılmış olur. Bu tasarım metodunun sunulduğu [11]'de, FR4 materyali 8.5-11.5 GHz frekans bandında dalga kılavuzu yöntemi ile ölçülerek dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri yayınlanmıştır. Ayrıca sunulan frekansa bağlı elektriksel özellikler, bu değerler ile gerçekleştirilen bir mikroşerit iletim hattı tasarımına ait benzetim sonuçlarının, üretilmiş yapının ölçüm sonuçları ile kıyaslanması ile doğrulanmıştır.

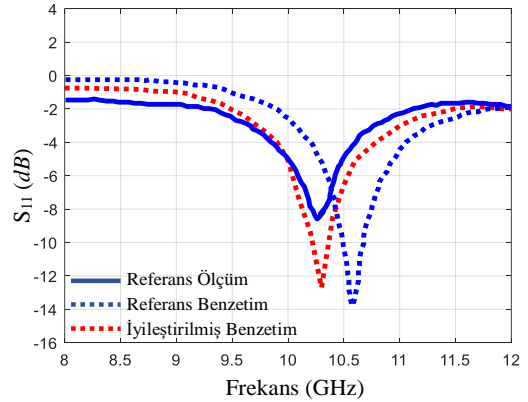
Çalışmanın bu aşamasında, dielektrik ölçümüne dayanan iyileştirilmiş tasarım metodunun anten tasarımları üzerindeki performansı analiz edilmiştir. Bu amaçla, literatürde FR4 alttaş materyali üzerine standart yöntem ile tasarlanan bir X-bant dairesel mikroşerit anten referans olarak kullanılmıştır [26]. Benzetim ve ölçüm sonuçları yayınlanmış bu anten yapısı, önerilen iyileştirilmiş tasarım yöntemi ile tekrar tasarlanmıştır. Yapılan tasarım çalışmasında, [11]'de FR4 materyali için sunulan 8.5-11.5

GHz aralığındaki frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri ANSYS-HFSS (High Frequency Structure Simulator) programına girdi olarak uygulanmıştır. Önerilen iyileştirilmiş tasarım metodu kullanılarak tasarlanan yapı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. İyileştirilmiş tasarım metodu ile yeniden tasarlanan dairesel mikroşerit anten yapısı

Kullanılan iyileştirilmiş tasarım metodunun performansını olabildiğince hassas şekilde analiz edebilmek için, tasarlanan ve üretilen antenler arasındaki yapısal farkların en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, referans alınan anten üretiminin ölçüm işlemlerinde kullanılmış olan konektör yapılarına alternatif bir ölçüm konektörü benzetim ortamında modellenmiş ve yapıya eklenmiştir. Böylelikle, ölçüm konektörünün sonuçlara olası etkileri de uygulanan iyileştirilmiş tasarım metodu ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına dahil edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, referans alınan çalışmada sunulan grafik üzerinden alınan benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalı yansımaya katsayısı (S_{11}) sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yansımaya katsayısı sonuçlarının karşılaştırması

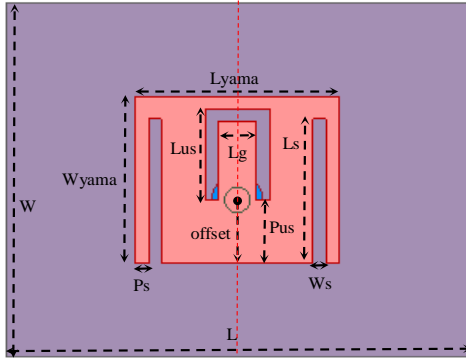
Karşılaştırmalı sonuçlara göre, standart benzetim yönteminde dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı tüm frekanslarda sabit kabul edildiğinden ($\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$), ölçüm ve önerilen yöntem sonuçları arasında standart yöntem sonuçlarından daha iyi bir uyum vardır. Özellikle, Şekil 2'deki rezonans frekansları göz önünde bulundurulduğunda, önerilen yaklaşımın tasarım doğruluğu

üzerinde sağladığı iyileştirme, ölçüm sonucuyla arasındaki uyumdan açıkça görülebilir. Bu benzerlik ayrıca, dielektrik ölçümüne dayalı benzetim metodunun anten yapılarının tasarımında oldukça kullanışlı olduğunu da göstermektedir.

3 Kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı

X-bant uydu uygulamalarında kullanılmak amacıyla tasarlanan kompakt mikroşerit anten yapısı, temelde yama anten ve besleme yapısı olmak üzere iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. Tasarımın yama ve besleme yapıları iki ayrı 1.6 mm kalınlıkta, 0.035 mm bakır kalınlığına sahip FR4 alttaşı materyali üzerine gerçekleştirilmiştir. Tasarım programı olarak, ANSYS-HFSS tam-dalga elektromanyetik alan benzetim programı kullanılmıştır. Tasarımda kullanılan FR4 alttaşlara ait dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri için, [11]'de FR4 materyali için sunulan 8.5-11.5 GHz aralığındaki frekansa bağlı data seti benzetim programına uygulanmıştır.

Tasarlanan prob beslemeli mikroşerit yama anten geometrisi ve tasarım parametreleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Turuncu renkli kısım iletken bakır yüzeyi, eflatun renkli kısım ise kullanılan FR4 alttaşı malzemesinin dielektrik kısmını temsil etmektedir. Prob beslemesi, yapının merkez noktasından belirli bir miktar uzakta konumlandırılmıştır. Yapıdaki tüm yarıkların genişlikleri eşit olup, tasarım kırmızı kesikli çizgiler doğrultusunda simetriktir. Önerilen kompakt yama anten tasarımı, her iki yanından kenar bütünlük ek yarıklarla desteklemiş bir merkezi U-şekilli yarıktan oluşmaktadır. Böylelikle, doğası gereği dar-bantlı olan dikdörtgen mikroşerit yama antenin doğal rezonans frekansı ile yarıkların rezonans frekansları yaklaştırılarak, tasarımın operasyonel frekans bant genişliği artırılmıştır.

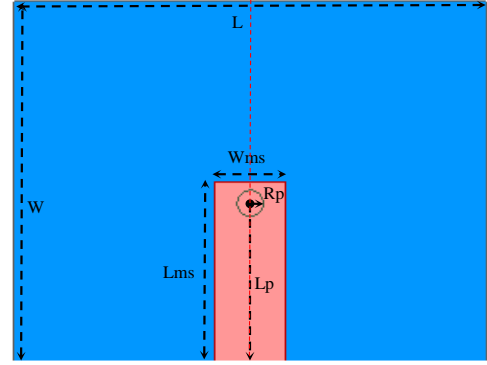


Şekil 3. Tasarlanan U-yarıklı yama anten yapısı

Kullanılan alttaşı materyallerinin üst yüzeylerinde yama anten yapısı ve mikroşerit besleme hattı bulunurken, alt yüzeyleri tamamıyla bakır kaplı durumdadır. Bakır kaplı alt yüzeylerin sırt sırta birleştirilmesi ile yama anten ve besleme yapıları bütünlüştürülmüştür. Besleme yapısı ile yama yapısı arasındaki elektriksel iletimin sağlanması amacı ile kullanılan alttaşlara 2 mm çapında açılmış eş konumlu birer delik bulunmaktadır. Bu bütünlüştürülmüş delik yapısı içinden, bir ucu mikroşerit besleme hattına ve diğer ucu yama anten yapısına temas eden iletken bir prob geçirilerek elektriksel iletim sağlanmıştır. Kullanılan iletken prob çapı,

yapıların toprak yüzeyinin içinden de geçen iletim deliğinin çapının yarısı kadar seçilerek kısa devre akımı oluşma ihtimali en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

Antenin besleme yapısı, bir mikroşerit iletim hattı ve bu hattın ucuna dikey olarak yerleştirilmiş bir iletken prob yapısından oluşmaktadır. Tasarlanan mikroşerit besleme hattı geometrisi ve tasarım parametreleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Turuncu renkli kısım iletken bakır yüzeyi, mavi renkli kısım ise dielektrik kısmı temsil etmektedir. Mikroşerit hattın karakteristik empedansı, yama anten kısmı ile bütünlüştürülmüş hali üzerinden optimize edilerek 50 Ω değerini sağlayacak boyutlara ulaşılmıştır.



Şekil 4. Tasarlanan mikroşerit besleme hattı yapısı

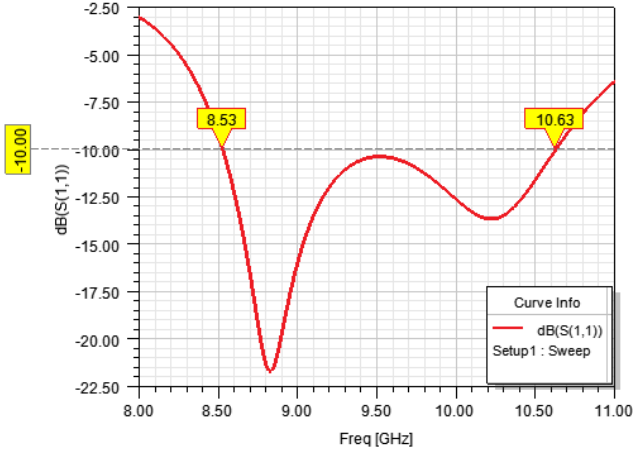
Tasarlanan prob beslemeli yama antenin bir mikroşerit iletim hattı ile sunulması, sunulan antenin dizi anten elemanı olarak kullanılması durumunda besleme ağı oluşturulmasına uygunluğunu artırmaktadır. Ayrıca sunulan anten yapısında, yama antenin bakır kaplı toprak yüzeyi ile besleme yapısının bakır kaplı olan toprak yüzeyinin birleştirilmesi ile yama antenin yayılım performansının, mikroşerit besleme hattının yayılımından etkilenmesi ihtimali en aza indirgenmiştir. Tasarlanan yama anten ve besleme hattı yapısına ait tasarım parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)
W	14
L	18
Wyama	6.6
Lyama	7.9
Lus	3.6
Lg	1.5
Ls	5.7
Ps	0.5
Pus	2.5
Ws	0.5
offset	2.5
Wms	2.73
Lms	7
Rp	1
Lp	6.2

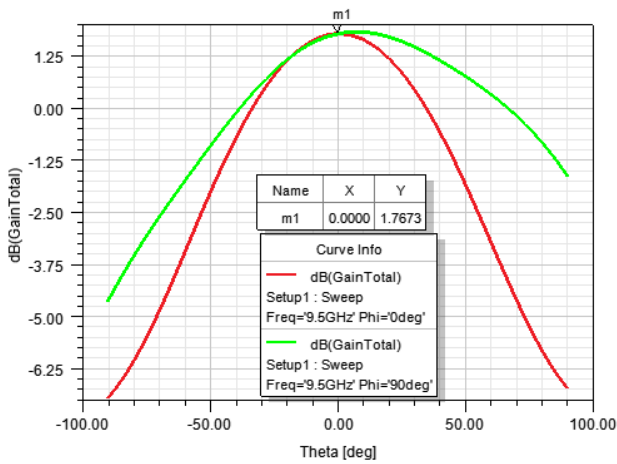
4 Benzetim sonuçları

Kullanılan dielektrik materyalin fiziki ölçüm sonuçlarına dayanan iyileştirilmiş tasarım metodu ile tasarlanan U-yarıklı yama anten yapısı, ANSYS-HFSS programı ile tam dalga elektromanyetik alan benzetim işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5'te benzetim işleminden elde edilen yansıma katsayısı grafiği sunulmuştur.



Şekil 5. Tasarlanan antenin yansıma katsayısı grafiği

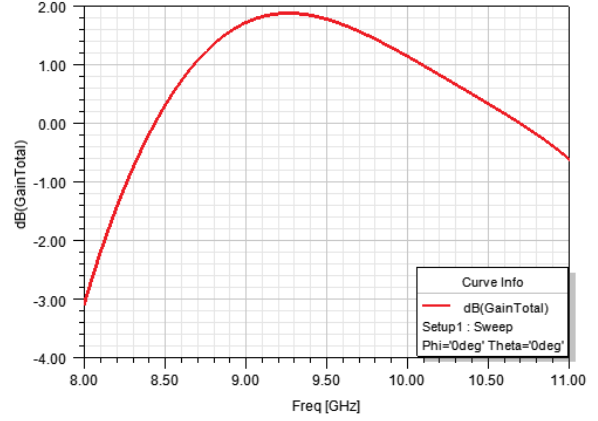
Elde edilen yansıma katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde, tasarımın -10 dB referans değeri altında, 8.53-10.63 GHz aralığında 2.1 GHz kadar bir frekans bant genişliğine sahip olduğu gözlenmektedir. Operasyonel frekans olarak 9.5 GHz merkez kabul edildiğinde, elde edilen bant genişliğinin yaklaşık %22 olduğu anlaşılmaktadır. Belirlenen merkez frekansta anten tasarımının açısız değişime karşılık kazanç ışınım örüntüsü Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasarlanan antenin 9.5 GHz merkez frekansındaki kazanç ışınım örüntüsü

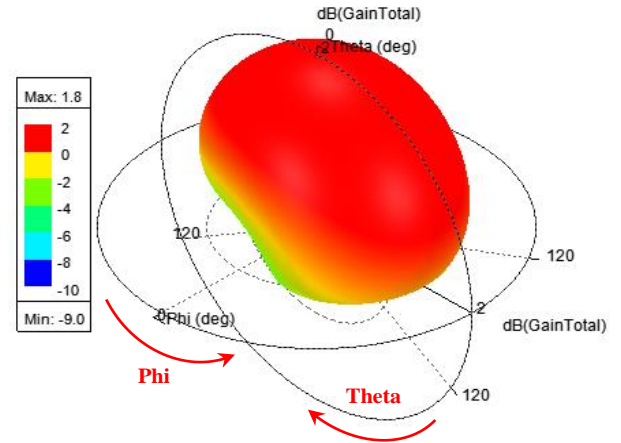
Birbirine dik iki ayrı düzlemde sunulan kazanç ışınım örüntü grafiği incelendiğinde, tasarlanan antenin nişan hattı (boresight) ekseninde yaklaşık 1.77 dB anten kazancına sahip olduğu ve tatmin edici bir yarı güç hüzmeye genişliğine sahip olduğu gözlenmektedir.

Şekil 7'de tasarlanan antenin frekans değişimine karşılık nişan hattı doğrultusundaki kazanç grafiği verilmiştir. Sunulan anten tasarımının 8.53-10.63 GHz aralığındaki operasyonel frekans bandında, anten tasarımının sağladığı en düşük kazanç değeri 0.11 dB ve en yüksek kazanç değeri 1.87 dB olarak gözlenmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan antenin frekansa göre kazanç grafiği

Tasarlanan antenin tüm ışınım açılarındaki kazanç ışınım performansının incelenmesi adına, merkez frekanstaki 3-boyutlu kazanç ışınım örüntüsü Şekil 8'de sunulmuştur. Elde edilen örüntü incelendiğinde, anten tasarımının geniş bir açısız genişlikte oldukça homojen bir kazanç örüntüsü sağladığı görülmektedir.



Şekil 8. Tasarlanan antenin 9.5 GHz merkez frekansındaki 3-boyutlu kazanç ışınım örüntüsü

Benzetim sonuçları ile operasyonel performansı gözlemlenen anten tasarımı kompakt yapısıyla da ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada sunulan kompakt U-Yarıklı yama anten tasarımının literatürdeki benzer frekans bandında operasyonel olan mikroşerit antenler ile boyutsal olarak karşılaştırması Tablo 2'de gösterilmiştir. Karşılaştırmalı tablo incelendiğinde, önerilen anten tasarımının benzer uygulama alanına sahip en yakın alternatifi ile arasında genişlikte %22, uzunlukta %25 ve toplam hacim olarak %40 oranında daha düşük boyutlu bir anten tasarımı olduğu gözlenmektedir.

Tablo 2. Önerilen anten tasarımının boyutsal olarak benzer frekanstaki alternatif çalışmalarla kıyaslanması

Referans	Frekans bandı (GHz)	Bant genişliği @ Rezonans frekansı	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Yükseklik (mm)
[16]	C & X-Bant	%5.66 @ 9.55 GHz	35.5	55	2.5
[17]	S & X-Bant	~ %1.13 @ 8.9 GHz	17.79	21.96	1.588
[18]	X-Bant	%30.93 @ 9.7 GHz	18	24	1.57
Önerilen çalışma	X-Bant	%22.11 @ 9.5 GHz	14	18	1.6

5 Sonuç

Bu çalışmada, FR4 malzemesinin dielektrik ölçüm yaklaşımı ile iyileştirilmiş bir anten tasarım metodu kullanılarak, X bant uzay uygulamaları için kompakt bir U-Yarıklı yama anten tasarımı önerilmiştir. Tasarımda kullanılan ANSYS-HFSS tam-dalga elektromanyetik benzetim programına, FR4 malzemesinin dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak X-bantta ölçülen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri uygulanmıştır. İyileştirilmiş bu tasarım metodunun anten tasarımları üzerindeki performansı, literatürdeki standart bir anten tasarımının benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Doğrulan bu tasarım yöntemi kullanılarak X-bant uzay uygulamaları için yanal yan yarıklarla desteklenmiş bir U-Yarıklı yama anten tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarım, yapının dizi elemanı olarak kullanılabilmesini kolaylaştıran bir mikrodalga besleme hattı ile birlikte sunulmuştur. Sunulan anten tasarımı, merkez operasyonel frekansta 1.77 dB kazanç ve %22 frekans bant genişliği sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen tasarım literatürde benzer frekans bantları için tasarlanmış alternatifleri ile boyutsal olarak kıyaslanarak, boyut ve ağırlık kısıtlamalarına tabii olan uydu uygulamaları için kullanışlı bir mikroşerit anten tasarımı olduğu gösterilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design. Wiley, 2016.
- [2] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Microstrip antenna design handbook. Artech house, 2001.
- [3] S. Fatima Farida, et al., Effect of substrate thickness and permittivity on the characteristics of rectangular microstrip antenna. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, pp. 598-599, Washington, DC, USA, 1998.
- [4] M. Y. I. M. Inam, Analysis of Design Optimization of Bandwidth and Loss Performance of Reflectarray Antennas Based on Material Properties. Modern Applied Science, 4, 28-35, 2010. <https://doi.org/10.5539/mas.v4n1p28>.
- [5] J. R. Aguilar, M. Beadle, P. T. Thompson, and M. W. Shelley, The microwave and RF characteristics of FR4 substrates. IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology, pp. 2/1-2/6, London, UK, 1998.
- [6] E. L. Holzman, Wideband measurement of the dielectric constant of an FR4 substrate using a parallel-coupled microstrip resonator. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54, pp. 3127-3130, 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.877061>.
- [7] G. C. Hock, C. K. Chakrabarty, Emilliano and M. H. Badian, Dielectric verification of FR4 substrate using microstrip bandstop resonator and CAE tool. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), pp. 894-898, Kuala Lumpur, 2009.
- [8] P. S. Bansode, K. Makhija, S. A. Gangal and R. C. Aiyer, Nondestructive measurement of dielectric constant using a 2.4 GHz microstrip patch antenna. 2nd International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS), pp. 219-223, Pune, 2015.
- [9] W. L. Pritchard, Satellite communication-an overview of the problems and programs. Proceedings of the IEEE, 65, 294-307, 1977. <https://doi.org/10.1109/PROC.1977.10483>.
- [10] J. Baker-Jarvis, Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, Technical Report 1341, 1995.
- [11] O. Kiriş, F. Ozturk and M. Gokten, A Dielectric Measurement-Based Design Approach for X-Band Applications on FR4 Substrate. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 783-784, Montreal, QC, Canada, 2020.
- [12] W. Imbraile, S. Gao, and L. Boccia, Space Antenna Handbook. Wiley, Hoboken, 2012.
- [13] Kraus, J. D. and R. J. Marhefka, Antennas: For all Applications. McGraw-Hill, 2002.
- [14] M. Ayad, M. Benziane, K. Saoudi, A. Arabi, M. Rezki and S. Medjedoub, Conception and study of a patch antenna for VSAT application. 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), pp. 433-437, Sétif, Algeria, 2022.
- [15] S. B. Sharma, A. Ugle and K. Parikh, A Novel U-slot Aperture Coupled Annular-Ring Microstrip Patch Antenna for Multiband GNSS Applications. 14th

- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-3, Copenhagen, Denmark, 2020.
- [16] N. Prema, "Design of multiband microstrip patch antenna for C and X band," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127, pp. 8812-8818, 2016.
- [17] A. K. Sidhu and J. S. Sivia, Microstrip Rectangular Patch Antenna for S and X band applications. International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 248-251, Chennai, India, 2016.
- [18] M. N. Rahman, M. T. Islam, N. Misran and M. Samsuzzaman, A tuning fork-shaped microstrip patch antenna for X-band satellite and radar applications. 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), pp. 1-2, Langkawi, Malaysia, 2017.
- [19] M. S. Ellis, Z. Zhao, J. Wu, X. Ding, Z. Nie, and Q.-H. Liu, A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64, 1552-1555, 2016. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2526076>.
- [20] M. Samsuzzaman, M. Islam, N. Misran, and M. M. Ali, Dual band X shape microstrip patch antenna for satellite applications. *Procedia Technology*, 11, 1223-1228, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.317>.
- [21] T. Huynh and K. F. Lee, Single-layer single-patch wideband microstrip antenna. *Electronics Letters*, 31, 1310-1312, 1995. <https://doi.org/10.1049/el:19950950>.
- [22] K. F. Lee, K. M. Luk, K. F. Tong, S. M. Shum, T. Huynh and R. Q. Lee, Experimental and simulation studies of the coaxially fed U-slot rectangular patch antenna. *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 144, 354-358, 1997. <https://doi.org/10.1049/ip-map:19971334>.
- [23] K. F. Lee, S. L. S. Yang and A. Kishk, The versatile U-slot patch antenna. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 3312-3314, Berlin, Germany, 2009.
- [24] M. Clenet and L. Shafai, Multiple resonances and polarisation of U slot patch antenna. *Electronics Letters*, 35, 101-103, 1999. <https://doi.org/10.1049/el:19990087>.
- [25] K.-F. Tong, K.-M. Luk, K.F. Lee and R.Q. Lee, A broad-band U-slot rectangular patch antenna on a microwave substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48, 954-960, 2000. <https://doi.org/10.1109/8.865229>.
- [26] A. A. Qureshi, M. U. Afzal, T. Tauqeer and M. A. Tarar, Performance analysis of FR-4 substrate for high frequency microstrip antennas. *China-Japan Joint Microwave Conference*, pp. 1-4, Hangzhou, China, 2011.

