

Küp Uydu Haberleşme Sistemlerine Entegrasyon İşlemleri İçin Yeni Bir Mikroşerit Yama Anten Tasarım ve Analizi

Serkan KEKİL¹ ve Emine AVŞAR AYDIN²

^{1,2}Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana

ÖZET

Bu çalışmada, C-band (4-8 GHz) ve X-band (8-12 GHz) frekans aralığında çalışabilen mikroşerit yama antenin tasarımı ele alınmıştır. Bu anten, 10 cm × 10 cm × 10 cm (1U) boyutlara sahip küp uydu (CubeSat) üzerine entegre edilecektir. Geleneksel anten tasarımlarının sınırladığı iletişim performansını iyileştirmek için yapılan bu çalışmanın literatüre yeni bir yaklaşım kazandırması hedeflenmektedir. İlk olarak, C ve X bandlarında çalışacak antenin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Önerilen anten tasarımı, CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak çalışma frekans aralığı, anten kazancı, bant genişliği ve yönlülük gibi tasarım parametreleri göz önünde bulundurularak uygun frekans aralığında çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Bu analizler sonucunda, önerilen antenin C ve X-bandında iyi bir rezonans sağladığı görülmüştür. Simülasyon ortamında analizleri gerçekleştirilen antenin yansıma katsayısı (S11) ve voltaj duran dalga oranı (VSWR) bakımından başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan simülasyonlara göre, önerilen mikroşerit yama antenin alçak Dünya yörüngesi (LEO) görevlerinde başarılı olacağı düşünülmektedir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, tasarlanmış olduğumuz antenin CubeSat üzerine dizi (array) olacak şekilde konumlandırılması hedeflenmektedir. Sınırlı boyut ve güç kaynakları, geleneksel antenlerin performansını sınırladığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle, daha yüksek kazanç, daha iyi yönlendirme, geniş kapsama alanı ve yüksek hızlı veri iletimi avantajları göz önünde bulundurulduğunda, dizi tasarıma sahip antenlerin gelecekteki uzay araştırma görevlerinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu çalışmanın, küp uydu anten teknolojisi alanında önemli bir adım olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Küp uydu (CubeSat), C-band, X-band, Mikroşerit yama anten, Yansıma Katsayısı (S11), Duran dalga oranı (VSWR)

GİRİŞ

Günümüz kablosuz iletişim sistemlerinde mikroşerit yama antenler önemli rol oynamaktadır [Yazgan, 1987]. Geniş bant özellikleri, düşük profil ve hafif yapılarıyla dikkat çekmektedirler. Bu çalışmada, C ve X bantlarında çalışan antenlerin CubeSat uygulamalarında kullanımı incelenmiş ve bu frekans aralığında çalışabilecek alternatif yenilikçi anten tasarımı üzerinde durulmuştur. Yürütülmüş bir çalışmada çok bantlı bir mikroşerit anten tasarlanmış ve bu antenin WiMax, C-band ve X-band frekans bantlarında kullanılabilirliği incelenmiştir [Badr, Hamad, 2018]. Anten alt taban malzemesi olarak FR-4 kullanılmış, ayrıca anten prototipi başarılı bir şekilde üretilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, tasarlanan antenin geri dönüş kayıpları ve VSWR değerleri çalışılan frekans aralıklarında kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür ve bu çalışmanın çok bantlı anten tasarımlarına katkıda bulunması beklenmektedir. Diğer bir çalışmada ise C-bandı ve X-bandı radar uygulamaları için tasarlanmış çift bantlı mikroşerit yama anten üzerine çalışılmıştır [Gupta, Dhillon, Khera, Marwaha, 2013]. Anten, dikdörtgen bir yama üzerinde U şeklinde bir yuvaya sahiptir ve H şeklindeki DGS (Kusurlu Zemin Alt Tabakası) ile desteklenmiştir. DGS kullanımı ile antenin bant genişliği artmıştır. 5.9 GHz'de 140 MHz, 8.8 GHz'de ise 1.21 GHz'lik bant genişliği elde edilmiştir. Anten kazancı DGS kullanımı ile artmış ve geri dönüş kaybının azaldığı görülmüştür. Önerilen antenin C ve X bandındaki radar uygulamaları için uygun olduğu ve DGS kullanımının anten performansını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada C band radar uygulamaları için koaksiyel beslemeli bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Anten alt

taban malzemesi olarak RT Duroid 5880 kullanılmış olup dikdörtgen yama anten tasarımı incelenmiştir [Narayana, Immadi, Rajkamal, Tejaswi, 2012]. Yapılan analizler sonucunda 7.1 GHz'de-14.8386 dB'lik geri dönüş kaybı elde edilmiş, ayrıca E ve H alan dağılımları simüle edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre tasarlanan antenin C band radar uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür. Bir başka araştırmada ise CubeSat uygulamaları için X-bandında yüksek kazançlı bir alt tabaka entegrasyonu ile SIW (Alt Tabaka Entegre Dalga Klavuzu) kafes destekli yama antenin tasarımı ve performansı incelenmiştir [Chen, Shie, 2019]. Önerilen antenin 8-8.3 GHz arasında çalıştığı ve SIW ile kazancın en az 9 dBi'ye çıkabileceği ölçülmüştür. Sonuç olarak, önerilen antende bant genişliği artırma ve yüksek kazanç performansı sağlayarak CubeSat ve CubeSat iletişim uygulamaları için önemli bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Başka bir çalışmada X-band uygulamaları için mikroşerit yama antenlerde farklı şekillerin karşılaştırılması ele alınmıştır. Çalışmada dikdörtgen, üçgen ve dairesel antenler tasarlanıp analizleri yapılmıştır [Kiruthika, Shanmuganantham, 2016]. Alt tabaka malzemesi olarak FR-4 seçilmiştir ve HFSS (Yüksek Frekanslı Yapısal Simülatör) programı ile analizler tamamlanmıştır. Analiz sonuçları geri dönüş kaybı, bant genişliği, kazanç gibi parametreler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Üç şeklin parametre karşılaştırma sonuçlarına göre dikdörtgen mikroşerit yama tasarımının en iyi sonucu verdiği ve X-band uygulamaları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Literatüre kazandırılmış olan bu çalışmalarda anten geometrilerine yapılmış olan değişiklikler ile C ve X-bant frekanslarında verimli antenler elde edilmiştir.

Gelişen teknoloji, iletişim sistemlerinde dizi antenlerin önemini artırmış ve bu teknolojinin kullanımını giderek yaygınlaştırmıştır. Bu antenler, bir dizi yama antenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur ve genellikle yüksek kazanç, daha iyi yönlendirme ve daha geniş kapsama alanı sunmaktadır [Aytekin, Tekbaş, Kayabaşı, 2019]. Gelişmiş yönlendirme ve veri iletim hızları, dizi antenleri tercih sebebi haline getirmiştir. Yapılan bir çalışmada 4×2 mikroşerit yama anten dizisinin tasarımı ve geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır [Harane, Ammor, 2018]. Temel anten yapısı, köşeleri kesilmiş dikdörtgen yama antendir ve dairesel polarizasyon elde etmek amacıyla özelleştirilmiştir. Tasarlanan tekli antende 3.41 dBi'lik kazanç elde edilmiştir. Bu anten dizi yapısına entegre edildiği zaman 9.37 dBi-10 dBi arasında değişen toplam kazanç elde edilmiştir. Gelecek çalışmalar için farklı simülasyon sonuçları ve anten performansını artırmak amacıyla daha fazla mikroşerit yama anten kullanımı önerilmiştir. Gerçekleştirilmiş bir başka araştırmada kullanılan anten dizisi ADS-B (Otomatik Bağımlı Gözetim-Yayın) verilerini yer istasyonuna iletmek için tasarlanmıştır [Benyamin, Wijanto, Prabowo, Prananditya, Oktaviani, 2020]. Hava trafik gözetiminde kullanılan otomatik gözetim ve yayın (ADS-B) teknolojisinin verilerini toplamak ve iletmek için kullanılmaktadır. Bu sayede uçakların kimlik numaraları, konumları, hızları ve hedefleri gibi uçuş bilgileri güvenli bir şekilde iletilerek çarpışmaların önlenmesi hedeflenmektedir. Ölçümler sonucunda 2.4 GHz frekansında-18.5 dB geri dönüş kaybı, 1.2 VSWR ve 6.08 dBi kazanç değerleri elde edilmiştir. Başka bir çalışmada 5G iletişimi için 2.3 GHz frekansında çalışan yüksek kazançlı bir mikroşerit yama array anten tasarımı ve uygulaması ele alınmaktadır [Aswoyo, Putra, 2021]. Mikroşerit antenin tasarım süreci detaylı olarak incelenip tasarlanan antenin simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılıp anten performansı değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarında tek anten için-15.2 dB geri dönüş kaybı ve 1.65 dBi anten kazancı elde edilmiştir. Array antende ise -11.45 dB geri dönüş kaybı, 12.08 dBi anten kazancı gözlemlenmiştir ve son olarak bu çalışmada 5G uygulamaları için yüksek kazançlı düşük profil mikroşerit anten dizisi tasarlanmıştır [Jiménez, Reyna, Balderas, Panduro, 2023]. Tasarlanan anten dizisi 4×4 olacak şekilde dizilmiş ve 16 adet yama anten CubeSat yüzeyine entegre edilmiştir. Bu tasarımla 3.46 GHz- 3.54 GHz aralığında iyi performans göstermesi hedeflenmektedir. Ayrıca anten ölçüm sonuçlarına göre 3.5 GHz'de 8.03 dBi kazanç ve-17.4 dB geri yansıma katsayısı elde edilmiştir. Bu çalışmayla beraber düşük profil ve yüksek performanslı anten dizisinin CubeSat yapısına entegrasyonu için başarılı bir alternatif oluşturması hedeflenmektedir.

Yukarıda verilen referanslar doğrultusunda ilk olarak C ve X-bant frekans aralığında çalışacak uygun yeni bir anten geometrisi oluşturulmuştur. Tasarlanan yama anten mikroşerit olarak 50 ohm'luk besleme yapılmış, ara yalıtkan malzeme olarak Rogers RO3006 (loss free), G-10 (loss free), FR-4, PLA ve PTFE malzemeleri seçilmiştir. Oluşturulan geometrinin CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, antenin kazanç, geri yansıma kaybı, radyasyon deseni ve diğer performans ölçütlerini belirlemek için simülasyonları yapılmıştır. Sonuç

olarak, C ve X frekans bant aralığında çalışacak uygun mikroşerit yama anten tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre tasarımın istenilen performansta çalıştığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında tasarlanan yama anten modelinin CubeSat uydu yüzeyine dizi yapıda yerleştirilmesi ve performans çıktılarının alınması hedeflenmektedir.

YÖNTEM

Bu bölümde CubeSat uygulamalarında kullanılmak üzere C ve X frekans bandında çalışacak Şekil 2’de görüldüğü gibi yeni tasarım bir microstrip antenin tasarımı CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Mikroşerit anten

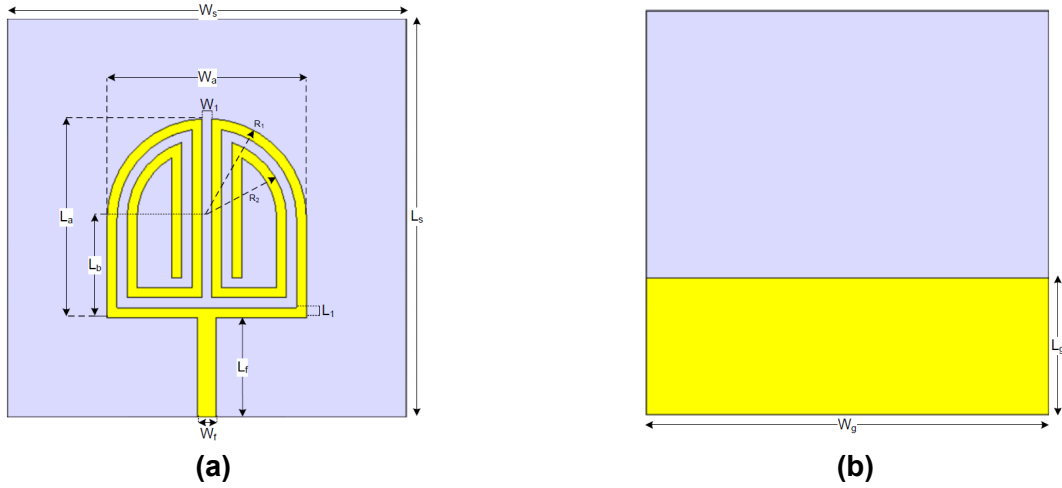
Mikroşerit antenler, yüksek frekanslı iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan anten türlerinden birisidir. Bir iletken yüzeyin üzerine yerleştirilen bir dielektrik tabaka üzerinde oluşturulan antenlerdir. Genellikle küçük boyutları, düşük maliyetli olmaları ve çeşitli frekans bantlarına çalışabilmelerinden dolayı tercih edilmektedirler [Tansarıkaya, 2007]. Mikroşerit antenler cep telefonları, WiFi, uydu iletişimi ve radar sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler yama, dielektrik alt taban, toprak düzlemi ve iletim hattı olacak şekilde dört ana bileşenden oluşmaktadır [İmamoğlu, 2019]. Antenlerin uzunluk ve genişlikleri Denklem 1-2’deki formülle hesaplanmaktadır.

$$Width = \frac{c}{2f_o\sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}}; \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right] \quad \text{Denklem (1)}$$

$$Lenght = \frac{c}{2f_o\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \right) \quad \text{Denklem (2)}$$

CST microwave studio

Elektromanyetik alan simülasyonları yapmak için kullanılan bir yazılımdır. Bu program, mikrodalga ve radyo frekansı cihazlarının tasarımı ve analizi için kullanılır. CST Microwave Studio, elektromanyetik alanların simülasyonunu gerçekleştirebilir ve sonuçlarını yüksek doğrulukla sunar. Antenler, devreler, mikrodalga bileşenler ve diğer RF (Radyo Frekansı) ve mikrodalga cihazlarının performansını analiz etmek ve optimize etmek için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. İlk olarak C ve X frekans bandında çalışacak olan mikroşerit yama antenin Tablo 1’de gösterildiği gibi tasarım parametreleri belirlenmiştir. Tasarımı tamamlanan antenin topraklama ve anten yama yani ışınım kısmı için bakır, anten alttaşı malzemesi olarak kalınlıkları ve dielektrik katsayıları (ϵ) farklı PTFE, FR-4 (loss free) ve Rogers RO3006 (loss free) malzemelerinin ataması tanımlanması yapılmıştır. Tanımlanan farklı alttaşı malzemelerin anten geri yansıma ve frekans bandına etkileri gözlenmiştir. Bu bağlamda C ve X frekans bandında çalışabilecek en uygun anten elde edilmesi hedeflenmektedir. Şekil 1’de önerilen antene ait ön ve arka yüzlerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 1: Benzetim programında tasarlanan antenin ön yüzü (a) ve arka yüzü (b).

Tablo 1. Önerilen antene ait parametreler ve ölçüleri.

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
W_s	40	W_1	1
L_s	40	L_1	1
W_a	20	W_g	40
L_a	20	L_g	13.5
L_b	10	R_1	10
W_f	2.884	R_2	8
L_f	10		

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

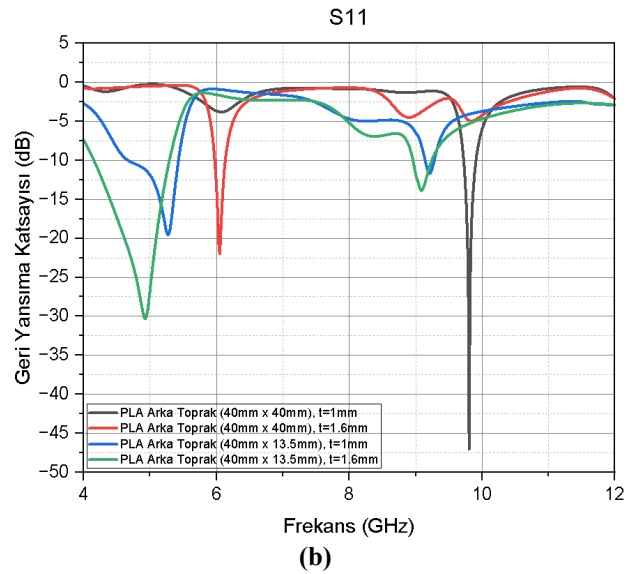
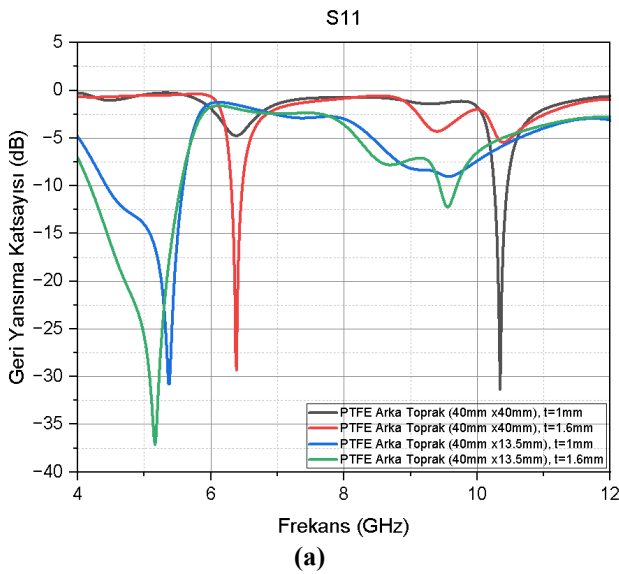
Çalışma kapsamında, farklı dielektrik özelliklere sahip yalıtkan alt taş malzemeler ve bu alttaş malzemelerin farklı kalınlıklardaki ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin C (4-8 GHz) ve X (8-12 GHz) bandında sergilemiş olduğu performanslar analiz edilmiştir ve çıktıları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre anten performansını farklı dielektrik katsayılarına sahip malzemeler ve bu malzemelerin kalınlığının (t) anten performansını etkilediği gözlemlenmiştir.

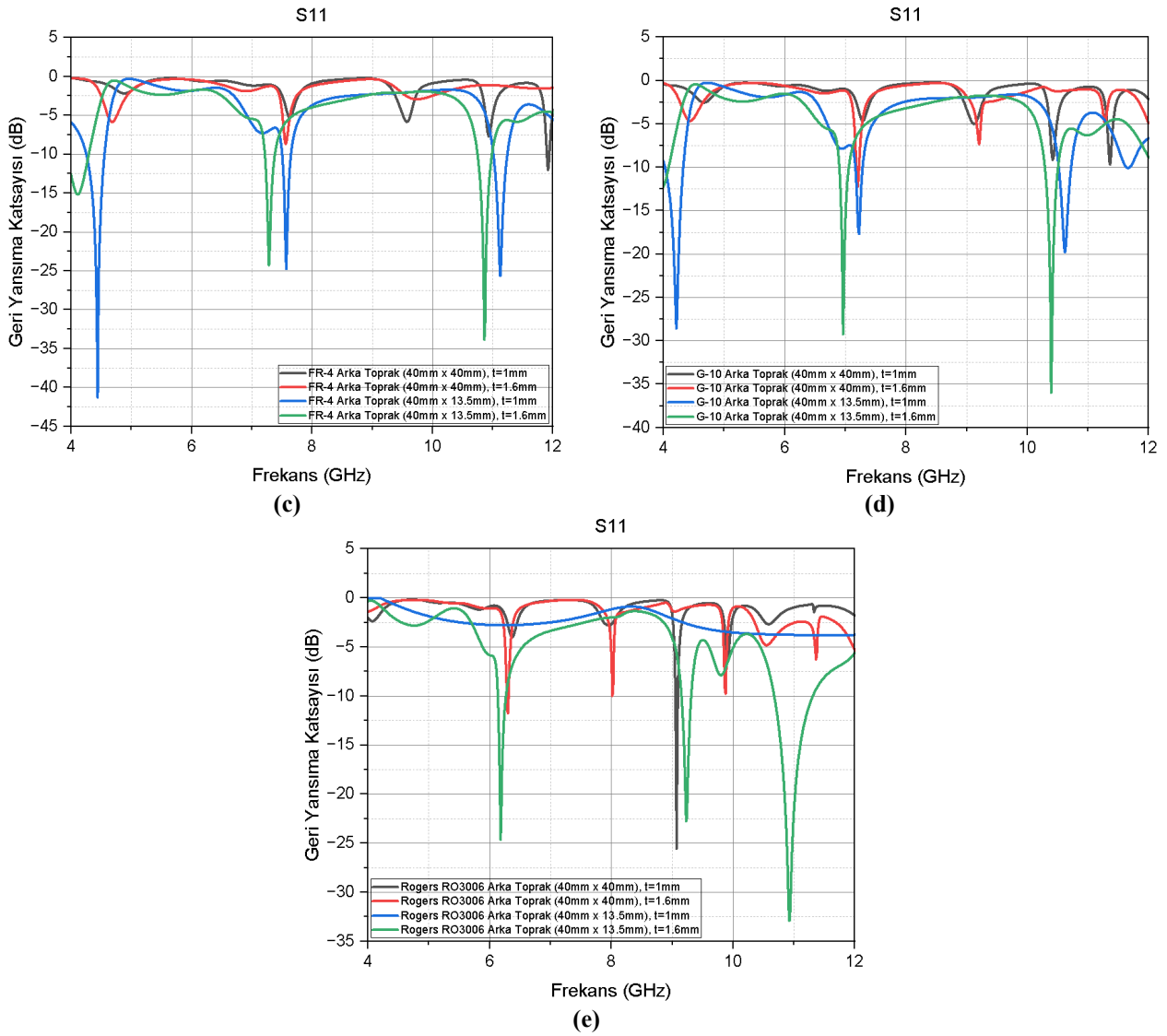
Anten tasarımlarında S11 parametresi antenin çalışmasını etkileyen önemli faktörlerdendir [Deb, Moyra, Bhowmik, 2015]. "S11" anten girişindeki yansıma katsayısını ifade etmektedir ve anten girişindeki gelen ve yansıya sinyallerin arasındaki oranı ifade etmek için kullanılmaktadır. Anten performansının optimize edilebilmesi için dielektrik malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır. Optimizasyon sürecinde tasarlanan anten için uydu iletişim alanlarında sıklıkla kullanılan anten alttaş malzemeleri dikkate alınarak farklı dielektrik katsayılarına sahip PTFE, PLA, FR-4 (loss free), G-10 (loss free) ve Rogers RO3006 (loss free) malzemeleri belirlenmiştir. Tablo 2'de verilen alt taş dielektrik malzemeler simülasyon ortamına aktarılarak aynı malzemenin farklı kalınlıklardaki ve farklı arka toprak ölçülerindeki geri dönüş kayıpları elde edilmiştir.

Tablo 2. Analizde kullanılan dielektrik malzemeler ve değerleri.

Dielektrik Malzemeler	Dielektrik Sabit Değerleri (epsr)
PTFE	2.1
PLA	2.4
FR-4 (loss free)	4.3
G-10 (loss free)	4.8
Rogers RO3006 (loss free)	6.5

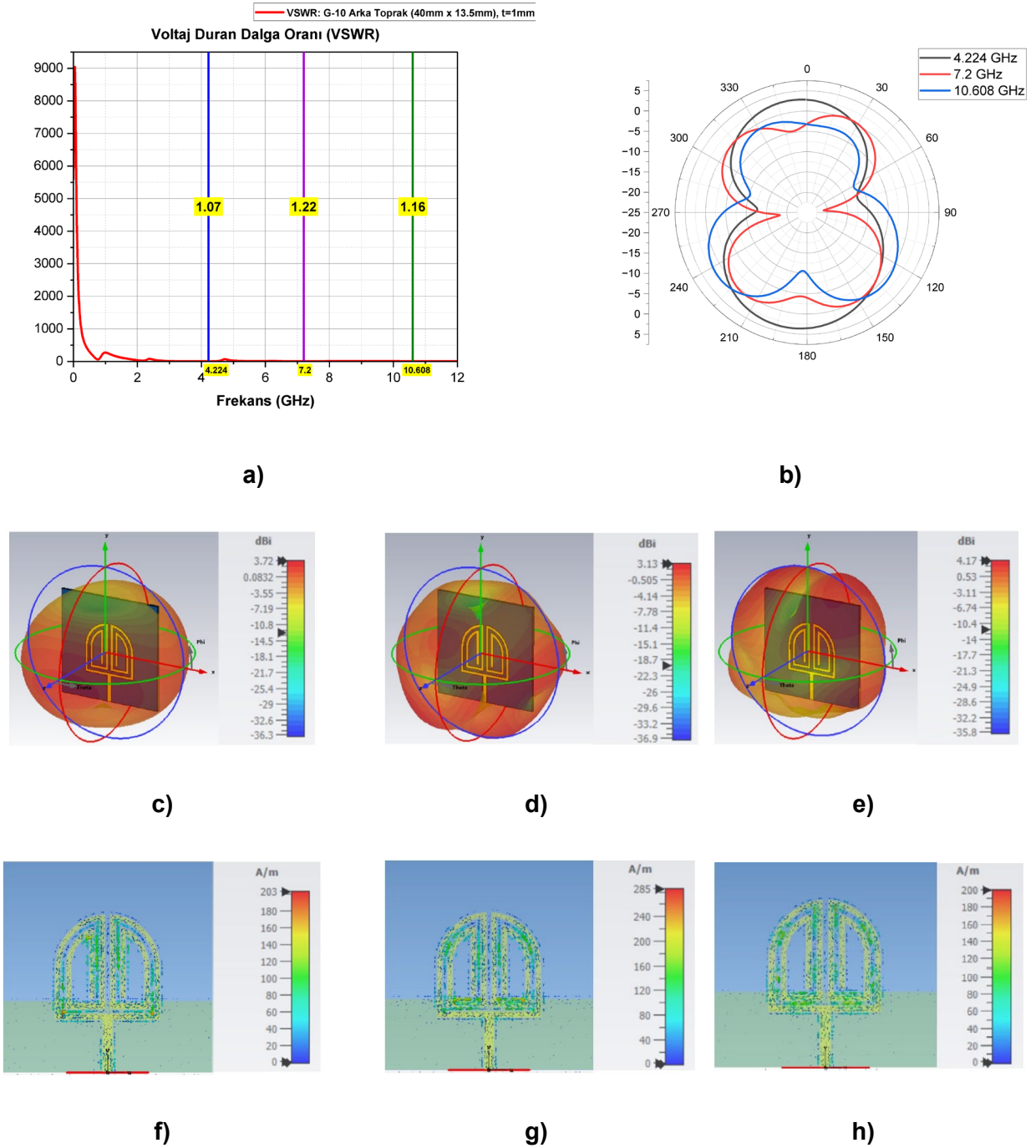
Şekil 2'de görülen yansıma katsayısı simülasyon grafiklerinde de görüldüğü üzere, PTFE'nin 1 mm kalınlıkta ve arka toprak 40 mm x 40 mm ölçülerinde iken X bandında-29.32 dB'lik bir değerle bir kez rezonansa girdiği, arka toprak 40 mm x 13.5 mm ölçülerinde ise C bandında-30.76 dB'lik geri yansıma değeri elde edilmiştir. Aynı dielektrik malzemenin 1.6 mm kalınlığında ve 40 mm x 40 mm arka toprak ölçülerinde-33.28 dB değerinde C bandında bir kez rezonansa girdiği, arka toprak 40 mm x 13.5 mm boyutlarına ayarlandığı zaman C bandında-37.11 dB'lik geri yansıma değeri elde edilmiştir. Diğer bir alternatif malzeme olan PLA incelendiğinde 1 mm kalınlık ve arka toprak 40 mm x 40 mm olacak şekilde ölçeklendirildiğinde X bandında-35.11 dB'lik değerle rezonansa girdiği, arka toprak 40 mm x 13.5 mm olarak ölçeklendirildiğinde ise C bandında-37.11 dB ile bir kez rezonansa girdiği görülmüştür. Dielektrik malzeme kalınlığı 1.6 mm olarak simülasyon gerçekleştirildiğinde, arka toprak 40 mm x 40 mm iken C bandında-21.35 dB ile bir kez rezonansa girdiği, arka toprak ölçüleri 40 mm x 13.5 mm olduğunda ise hem C hem de X bandında-30.31 dB ve-13.86 dB'lik değerler ile rezonansa girdiği gözlemlenmiştir. Anten yapımında yaygın olarak kullanılan FR-4'ün 1 mm kalınlıkta ve arka toprak 40 mm x 40 mm olacak şekilde ölçeklendirildiğinde X bandında -12 dB'lik bir geri yansıma katsayısı elde edilmiştir. Arka toprak 40 mm x 13.5 mm olarak simülasyon çıktıları alındığında hem C bandında hem de X bandında -40 dB, -24.94 dB ve -29.72 dB rezonans değerlerinde üç kez rezonansa girdiği görülmüştür. Aynı malzeme için kalınlık 1.6 mm yapıldığında, arka toprak 40 mm x 40 mm ölçülerinde antenin çalışmadığı görülmüş. Arka toprak ölçüleri 40 mm x 13.5 mm olacak şekilde ölçeklendirildiğinde hem C hem de X bandında-15.16 dB, -24.26 dB ve -33.8 dB'lik yansıma katsayı değerlerinde rezonansa girdiği görülmüştür. Diğer taraftan, G-10 malzemesinin 1 mm kalınlıkta ve arka toprak 40 mm x 13.5 mm ölçülerinde hem C hem de X bandında-27.11 dB, -17.78 dB ve -21.33 dB değerlerinde rezonansa girdiği, arka toprak 40 mm x 40 mm ölçülerinde ise C ve X bantlarında rezonansa girmediği görülmüştür. Son olarak, Rogers RO3006 için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Arka toprak 40 mm x 40 mm ve 1 mm kalınlıkta antenin C bandında-22.44 dB yansıma katsayısı elde ettiği, arka toprak 40 mm x 13.5 mm olarak ölçeklendirildiğinde ise antenin çalışmadığı gözlemlenmiştir. Aynı anten için kalınlık 1.6 mm olarak ayarlandığında, antenin hem C hem de X bandında-12.21 dB, -10 dB ve-10.1 dB yansıma katsayı değerleri elde edilmiştir. Arka toprak 40 mm x 13.5 mm olarak simülasyon başlatıldığında ise antenin hem C hem de X bandında-24.61 dB,-22.74 dB ve -33 dB'lik geri yansıma katsayıları elde edilmiştir. Şekil 2'de elde edilen geri yansıma katsayı grafiklerine göre, anten tasarımı için dielektrik malzeme, dielektrik malzeme kalınlıkları ve arka toprak ölçeklendirmenin tasarlanan antenin karakteristik özelliklerine olan etkisi görülmektedir. Antenler için genel olarak arka toprak 40 mm x 13.5 mm olacak şekilde ölçeklendirildiğinde antenin hem C hem de X bantlarında çalışabildiği görülmüştür.





Şekil 2: Tasarlanan antenin farklı dielektrik alt taş ve kalınlıklara göre frekansa karşı yansımaya katsayısı grafiği, sırasıyla (a) PTFE, (b) PLA, (c) FR-4 (loss free), (d) G-10 (loss free), (e) Rogers RO3006 (loss free).

Yukarıdaki farklı alt taş ve kalınlıklarının anten performansı üzerinde sergiledikleri performanslar göz önüne alındığında ayrıca uydu teknolojilerinde de sıklıkla kullanılan malzeme olan G-10 referans alınarak antenin yansımaya katsayısı dışındaki voltaj duran dalga oranı (VSWR), ışınım örüntüsü, uzak alan (far-field) ve yüzey akım yoğunlukları gibi önemli anten parametreleri de analiz edilerek Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Tasarlanan antenin sırasıyla (a) VSWR grafiği, (b) ışınım örüntüsü, (c) uzak alan (far-field) [(c) 4.224 GHz, (d) 7.2 GHz, (f) 10.608 GHz], (d) Yüzey akım yoğunluğu [(f) 4.224 GHz, (g) 7.2 GHz, (h) 10.608 GHz].

SONUÇ

Yapılan bu çalışmada CubeSat uydularında kullanılmak üzere C ve X bant aralığında çalışabilecek özgün bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi farklı alt taş alt malzemelerin anten performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir ve performans bilgileri de Tablo 3'te verilmiştir. Farklı alt taş malzemelerinden alınan veriler ışığında C ve X bandında çalışabilecek antenin CubeSat uydulara entegrasyonu sağlanabilecektir.

Tablo 3. Farklı dielektrik alt taş malzemelerin anten rezonans ve verimindeki etkisi.

Dielektrik Malzeme	t (1 mm)		t (1.6 mm)		t (1 mm)		t (1.6 mm)	
	Arka Toprak (40 mm × 40 mm)		Arka Toprak (40 mm × 40 mm)		Arka Toprak (40 mm × 13.5 mm)		Arka Toprak (40 mm × 13.5 mm)	
	Rezonans Frekansı (GHz)	Anten Kazancı (dBi)	Rezonans Frekansı (GHz)	Anten Kazancı (dBi)	Rezonans Frekansı (GHz)	Anten Kazancı (dBi)	Rezonans Frekansı (GHz)	Anten Kazancı (dBi)
PTFE	10.344	10.2	6.384	7.96	5.364	2.1	5.16 9.528	2.21 4.81
PLA	9.804	10.06	6.048	7.69	5.268 9.192	2.41 4.54	4.932 9.06	1.98 4.55
FR-4 (loss free)	11.916	8.37	-	-	4.44 7.56 11.1	3.88 3.21 4.38	4.116 7.272 10.836	2.13 3.7 5.87
G-10 (loss free)	-	-	7.188	8.21	4.224 7.2 10.608	3.59 3.2 4.1	3.972 6.948 10.368	2.74 3.62 5.46
Rogers RO3006 (loss free)	9.072	7.15	6.288	4.87	-	-	6.168 9.204 10.896	3.16 4.19 7.3

Bu çalışmada tasarlamış olduğumuz anten hem boyut bakımından hem de kazanç bakımından C ve X – Bantlarında çalışan diğer antenlere göre avantajlı olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler ışığında ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutması adına her bir dielektrik malzeme ve arka toprak ölçülerinin değişiminden elde edilen verilerin literatüre katkı sağlanması adına detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda ise dizi anten entegrasyonu gerçekleştirilecektir.

Tablo 4. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırma tablosu.

Referanslar	Anten Boyutu	Frekans aralığı	Geri dönüş kaybı (S ₁₁)	Bant genişliği	Kazanç
[Badr, Hamad, 2018]	25 mm x 37mm x 1.575 mm	3.2-3.4 GHz (WiMax) 6.57-6.8 GHz (C-Band) 7.24-7.57 GHz (X-Band)	3.2 GHz (-23dB) 6.67 GHz (-15.74 dB) 7.39 GHz (-22.4 dB)	200 MHz (WiMax) 230 MHz (C-Band) 330 MHz (X-Band)	-
[Gupta, Dhillon, Khera, Marwaha, 2013]	25 mm x 23 mm	5.9 GHz (C-Band) 8.8 GHz (X-Band)	5.9 GHz (-23.6 dB) 8.8 GHz (-18.28 dB)	140 MHz (C-Band) 1210 MHz (X-Band)	1.2 dBi (5.9GHz) 4.4 dBi (8.8 GHz)
[Tubbal, Raad, Theoharis, Iranmanesh, Abulgase, Khan, 2022]	68 mm x 68 mm x 2.54 mm	4.7-5.2 GHz(C-Band) 7.4-7.8 GHz (X-Band)	4.9 GHz (-18dB) 7.7 GHz (-18dB)	500MHz (C-Band) 400 MHz (X-Band)	5.9 dBi (5.1 GHz) 4.7dBi (7.9 GHz)
[Elkady, Abdullah, Darwish, 2024]	100 mm x 100mm x1.6 mm	1.5 -29 GHz(S, C, X, Ku, K, Ka Band)	4 GHz-12 GHz (S ₁₁ <-10dB)	1400 MHz	4 dBi -10 dBi
[Chen, Shie, 2019]	36 mm x 40 mm	8 -8.3 GHz(X-Band)	8.56 GHz (-35 dB)	500 MHz	9 dBi (7.8-8.3 GHz)
Çalışmamız	20 mm x 20 mm x 1mm	4.04 - 4.34 GHz(C-Band)	4.224 GHz (-29.3 dB)	300 MHz (C-Band)	3.59 dBi(4.224 GHz)
		7.14 -7.26 (C-Band)	7.2 GHz (-19.96 dB)	120 MHz (C-Band)	3.2 dBi (7.2 GHz)
		10.49 - 10.7 GHz(X-Band)	10.608 (-22.51 dB)	210 MHz (X-Band)	4.1 dBi (10.608 GHz)

Kaynaklar

Aswoyo, B., & Putra, A.H. (2021). High Gain Microstrip Square Patch Array Antenna 4 x 4 Element 2.3 GHz for 5G Communication in Indonesia. 2021 International Electronics Symposium (IES), 102-107.

Aytekin, R., Tekbaş, M., & Kayabaşı, A. (2019). Yağı-Uda Dizi Yama Anten Benzetimleri ve Gerçekleştirilmesi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1(1), 98-107.

Badr, S., & Hamad, E. K. (2018). Design of multiband microstrip patch antenna for WiMax, C-band and X-band applications. Aswan Engineering Journal (AswEJ), 1-7.

- Benyamin, S. O., Wijanto, H., Prabowo, V. S. W., Prananditya, H., & Oktaviani, S. M. (2020, November). Design and characterization of rectangular array microstrip antenna for Cubesat S-band transmitter. In 2020 3rd International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT) (pp. 476-481). IEEE.
- Chen, S. L., & Shie, M. H. (2019, July). A compact High gain X-band Patch antenna for Cube and small satellite applications. In 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (pp. 1561-1562). IEEE.
- Deb, P., Moyra, T., & Bhowmik, P. (2015, February). Return loss and bandwidth enhancement of microstrip antenna using Defected Ground Structure (DGS). In 2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN) (pp. 25-29). IEEE.
- Elkady, H. M., Abdullah, H. H., & Darwish, S. M. (2024). Multiband circularly polarised CubeSat antenna operating in S, C, X, Ku, K, and Ka bands. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 18(2), 82-95.
- Gupta, S., Dhillon, S. S., Khera, P., & Marwaha, A. (2013, September). Dual band U-slotted microstrip patch antenna for C band and X band radar applications. In 2013 5th International Conference and Computational Intelligence and Communication Networks (pp. 41-45). IEEE.
- Harane, M. M., & Ammor, H. (2018, November). Design & Development of 4x2 Microstrip Patch Antenna Array with Circular Polarized Elements for Satellite Application. In 2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT) (pp. 1-4). IEEE.
- İmamoğlu, F. (2019). Mikroşerit antenlerin tasarım ve performans optimizasyonu (Master's thesis, Bursa Uludağ University (Turkey)).
- Jiménez, D. A., Reyna, A., Balderas, L. I., & Panduro, M. A. (2023). Design of 4× 4 Low-Profile Antenna Array for CubeSat Applications. *Micromachines*, 14(1), 180.
- Kiruthika, R., & Shanmugantham, T. (2016, October). Comparison of different shapes in microstrip patch antenna for X-band applications. In 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT) (pp. 1-6). IEEE.
- Narayana, M. V., Immadi, G., Rajkamal, K., & Tejaswi, M. S. R. S. (2012). Microstrip Patch Antenna for C-band RADAR applications with Coaxial fed. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 118-122.
- Tansarıkkaya, İ. (2007). Geniş Bandlı Yama Anten Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, (Türkiye)).
- Tubbal, F., Raad, R., Theoharis, P. I., Iranmanesh, S., Abulgase, S., & Khan, M. U. A. (2019, December). Dual band slot antenna with F-shaped slits for C-band and X-band applications. In 2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (pp. 1-4). IEEE.
- Yazgan, E. (1987). Mikroşerit antenler. Department of Electrical and Electronics, Hacettepe University.