

5.8 GHz’de Havacılık Uygulamaları için Radomlu Konformal Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Design of Radome-Enclosed Conformal Microstrip Patch Antenna Array for Aerospace Applications at 5.8 GHz

Burak Can KIŞLA^{1*}  Bilge ŞENEL¹ 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18.11.2024
Düzeltilme: 05.12.2024
Kabul: 16.01.2025

Keywords

Microstrip Patch Antenna
Radome
Conformal Antenna
Radome-antenna interaction

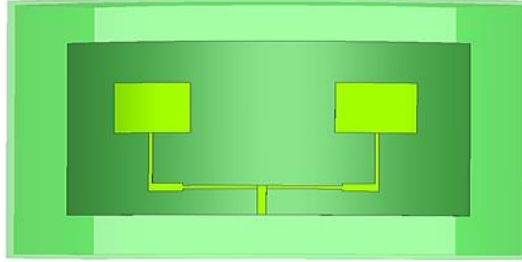
Anahtar Kelimeler

Mikroşerit Yama Anten
Radom
Konformal Anten
Radom-anten etkileşimi

Önemli Noktalar

Radom tasarımı ve konformal anten tasarımı örnek barından bu çalışma, havacılık uygulamalarında kullanılması için bir anten tasarımı sunmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada sunulan, radom ve anten birbirine entegre edilerek etkileşim analizi yapılmıştır. Etkileşim analizi sonucunda, optimizasyonu sağlanarak yapı literatürdeki örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Akademik ve sektörel olarak, radom ve anten tasarımcıları için yeni bir araştırma kaynağı ve tasarım sunulması amaçlanmıştır.

Grafiksel Özet



Özet

Bu çalışmada, C bandında bir konformal anten ve radom tasarımı gerçekleştirilmiştir. C bandı içerisinde yer alan 5.8 GHz frekansı, uydur haberleşmesi ve nano-aviyonik platformlarda kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda kullanılan antenlerin yüzeye uygun, konformal şekilde ve muhafazalı olması önemlidir. Antenler hava araçlarına entegre edilebilir ve aynı zamanda radom korumalı olmalıdır. Tasarlanan anten ve radom önemli bulgular içermektedir. Radom tasarımında çok katmanlı yansımaya yönelik analitik formüller sağlanmıştır. Radom-anten etkileşimi detaylı olarak açıklanmış ve radomun, anten parametrelerine olan etkilerine yer verilmiştir. Çalışmada metodolojik bir karşılaştırma sunabilmek için, öncelikle radom tasarımı ve parametreleri daha sonra, 2x1 düzlemsel mikroşerit yama anten tasarımı, sonrasında 2x1 konformal anten tasarımı en son olarak da radomlu konformal antenin tasarımı ve performans analizleri karşılaştırması verilmiştir. Çalışmada önerilen tek katman radomun iletim katsayısı, 0.21 dB'dir. Düzlemsel 2x1 mikroşerit yama antenin yönlülüğü 10.5 dBi, kazancı 8.1 dBi ve S_{11} 'i ise -34.64 dB olarak bulunmuştur. Konformal yapıya geçildiğinde, bu parametreler yönlülük için 8.99 dBi, kazanç için 6.56 dBi, S_{11} için ise -15.22 dB olarak simüle edilmiştir. Nihai tasarım olarak radomlu konformal antenin yönlülüğü 8.77 dBi, kazancı 6.5 dBi ve S_{11} 'i -10.152 dB'dir. Nihai tasarım olarak sunulan radomlu konformal antenin, havacılık ve uzay çalışmaları için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Abstract

In this study, a conformal antenna and radome design in the C-band were developed. The 5.8 GHz frequency within the C-band is utilized in satellite communications and nano-avionics platforms. It is essential for antennas used in such applications to be conformal to the surface and protected by a radome. These antennas should be integrable with aerial vehicles and shielded by a radome. The designed antenna and radome present significant findings. Analytical formulas for multilayer reflections have been provided for the radome design. The interaction between the radome and the antenna is explained in detail, and the effects of the radome on antenna parameters are discussed. To present a methodological comparison in the study, the radome design and its parameters are addressed first, followed by the design of a 2x1 planar microstrip patch antenna, the design of a 2x1 conformal antenna, and finally, the design and performance analysis of the conformal antenna with a radome. The transmission coefficient of the proposed radome is 0.21 dB. The directivity, gain, and S_{11} value of the 2x1 planar antenna are found to be 10.5 dBi, 8.1 dBi, and -34.64 dB, respectively. When transitioned to the conformal structure, these parameters are simulated as 8.99 dBi for directivity, 6.56 dBi for gain, and -15.22 dB for S_{11} . The directivity, gain, and S_{11} value of the conformal antenna with a radome are 8.77 dBi, 6.5 dBi, and -10.152 dB, respectively. The final design of the conformal antenna with a radome is anticipated to contribute to the literature in the fields of aviation and space studies.

*Corresponding author, e-mail: y12230171011@ogr.sdu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konformal antenler, geleneksel dikdörtgen şeklindeki antenlerin yerine, platformun geometrisine uyum sağlayabilen, yüzeylere mükemmel bir şekilde entegre edilebilen tasarımları ifade eder [1]. Elektromanyetik dalgaların iletimi ve alımı sırasında, antenlerin üzerini kaplayan radomlar, çevresel koşullardan ve düşman tehditlerinden kaynaklanan zararları engellemek için kullanılır [2]. Radomlu konformal antenler, her iki bileşeni bir araya getirerek hem elektromanyetik performansı optimize etmeye hem de mekanik dayanıklılığı artırmaya yönelik bir çözüm sunar.

Konformal anten tasarımı, birçok teknik zorluğu içinde barındırır ve bu nedenle bir dizi disiplinin birleşimini gerektirir. Elektromanyetik teoriden malzeme bilimine, elektromanyetik dalgalarının yayılmasından mekanik mukavemete kadar birçok alanı içerir. Bu tasarımlar, radar, iletişim ve elektronik harp sistemlerinin güvenilirliği ve performansı için kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, sivil havacılık ve uzay sektörleri için de önemli olan hava platformlarında ve uydu sistemlerinde kullanılır. Konformal antenlerin radomlarla bir araya getirilmesi, zorlu bir denge gerektirir. Bu denge, elektromanyetik performansın korunması, radomun mekanik dayanıklılığının sağlanması ve platformun aerodinamik özelliklerinin etkilenmemesi arasında kurulmalıdır. Bu nedenle, radomlu konformal anten tasarımı, mühendislerin yaratıcılığını, analitik yeteneklerini ve malzeme bilgisini en üst düzeye çıkarmalarını gerektirir [3,4].

Radomlu konformal antenlerin uygulama alanları oldukça geniştir. Savunma endüstrisinde, bu antenler savaş uçakları, denizaltılar ve askeri araçlar gibi platformlarda radar sistemleri için ideal bir seçenek olabilir. Uzay araştırmalarında, sivil havacılıkta ve ticari

iletişim sistemlerinde de bu antenlerin uygulamaları bulunmaktadır. Tasarım ve uygulama süreçleri, elektromanyetik benzetimler, malzeme mühendisliği ve aerodinamik analiz gibi disiplinler arası çalışmaları içerir. Bu alan, sürekli olarak gelişen teknolojik ihtiyaçlara uygun olarak araştırmacılar ve mühendisler tarafından aktif bir şekilde keşfedilmektedir [5,6].

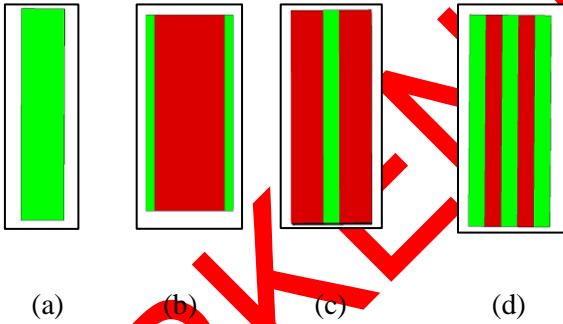
Havacılık ve uzay sistemlerinde, telemetrisinin L-bandı ve S bandı frekans aralıklarından C bandına doğru ilerlediği bilinmektedir. C bandına bu geçişin nedeninin iki yönlü olduğu yaygın olarak anlaşılmaktadır. Birincisi, L ve S frekans bantları, farklı pazarlar tarafından çeşitli nedenlerle yeniden tahsis yoluyla büyük ölçüde azaltılmıştır ve ikincisi, çoğu uygulama için gereken bant genişliği katlanarak büyümüştür. Bu sadece askeri uygulamalarda değil, sivil havacılık platformlarında da tercihi söz konusudur. C Bant bölgesine geçişte özellikle konformal yapılar ön plandadır [7].

Elektromanyetik performansın optimize edilmesi ve mekanik dayanıklılığın artırılması, gelecekteki konformal anten tasarımlarının başarısı için kritik önem taşımaktadır ve bu alandaki çalışmaların önemini vurgulamaktadır [8]. Sonuç olarak, konformal antenler, radomlar ve radomlu konformal anten tasarımı, modern iletişim ve savunma sistemlerinin temel taşlarından biri olmaya devam etmektedir. Bu makale, konunun karmaşıklığını ve stratejik önemini anlamak isteyen mühendisler, araştırmacılar ve savunma endüstrisinde olanlar için bir başlangıç noktası sunmayı amaçlamaktadır.

Tek katman radomlar, tek bir katmandan oluşur ve bu katman, antenlerin veya iletişim ekipmanının elektromanyetik koruma ihtiyaçlarını karşılar. Bu basit tasarım, kompakt olmayan anten tasarımları için

uygundur. Fakat radom tasarımı disiplinler arası bir süreç olduğu için, uygulama alanına göre radom türü değişkenlik gösterebilir. Tek katman radomlar, elektromanyetik geçirgenlik ve mekanik dayanıklılık açısından daha sınırlı bir kapasiteye sahiptir ve daha hafif yapılardır [9-11].

A-sandviç radomlar, iki farklı malzeme katmanının bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. İç katmanda elektromanyetik geçirgenlik için dışakilere göre düşük dielektrik katsayılı malzeme tercih edilir, dış katmanlar mekanik dayanıklılığı artırmak ve radomun aerodinamik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. [12]. B-sandviç radomlarda ise A-Sandviç yapılara kıyasla iç kısımdaki malzemenin dielektrik katsayısı daha büyüktür [13]. C-sandviç radomlar, A-sandviç ve B-sandviç radomların birleşimi olarak düşünülebilir. Bu tasarım, karmaşık ve çok yönlü uygulamalar için uygundur. [14]. Şekil 1’de şu ana kadar bahsedilen farklı radom yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1: (a) Tek katman radom yapısı (b) A-Sandviç radom yapısı (c) B-Sandviç radom yapısı (d) C-Sandviç radom yapısı.

Denklem 1-7’de ise, her biri kendi kalınlığı ve elektriksel özelliklere sahip N katman, iki ortam arasında yerleştirilecek olan radomlar için yansımaya ve empedans eşitlikleri verilmiştir. Denklemlerde, Γ yansımaya katsayısını, Z_0 boş uzayın öz empedansını, Z_m ortamın

öz empedansını ifade eder. Düzlem dalga için boş uzayın öz empedansı 377Ω olarak ifade edilir. Burada E_θ , E_ϕ ve H_θ , H_ϕ elektrik ve manyetik alan vektörlerinin bileşenlerini, ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla, boş uzayın elektrik ve manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Denklemde malzeme kalınlığı d_1 ve d_2 ile gösterilmiştir. n değeri katmanlar için öz empedansı genel olarak ifade eder. Beta (β) terimi alt indisi iki katmana göre faz sabitini temsil eder. N tane yüzey ve katman için denklem tekrarlanarak, hesap lineer formda sağlanır. Burada N temsili olarak verilmiştir. Bu senaryo, özellikle elektromanyetik dalgaların malzemeler veya yapılarla etkileşimini incelediği elektromanyetik analizde yaygın olarak kullanılır. Elektromanyetik dalga, farklı özelliklere sahip katmanlara çarptığında, dalganın bir kısmı geri yansır, bir kısmı katmanlardan geçer ve bir kısmı emilebilir veya zayıflayabilir. Yansımaya (Γ) ve iletim katsayıları (T), gelen elektromanyetik dalganın, katmanlar ve sonsuz ortamlar arasındaki sınırlarda ne kadarının yansıdığını ve iletildiğini sayısal olarak göstermek için kullanılır. Bu katsayılar, her bir katmanın kalınlığı ve elektriksel özellikleri (örneğin, dielektrik sabiti (ϵ_r) ve manyetik geçirgenlik (μ_r)) gibi faktörlere bağlıdır [15].

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \frac{E_\phi}{H_\theta} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (2)$$

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon_m}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (3)$$

$$\Gamma_0 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \quad (4)$$

$$\Gamma_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (5)$$

...

$$\Gamma_N = \frac{n_L - n_N}{n_L + n_N} \quad (6)$$

$$\Gamma \cong \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-j2\beta_1 d_1} + \Gamma_2 e^{-j2(\beta_1 d_1 + \beta_2 d_2)} + \dots + \Gamma_N e^{-j2(\beta_1 d_1 + \beta_2 d_2 + \dots + \beta_N d_N)} \quad (7)$$

$$\Gamma_N = \frac{\tilde{\Gamma}_N - \Gamma_{N-1} e^{-2jk_{n-1} t_{n-1}}}{1 + \tilde{\Gamma}_N \Gamma_{N-1} e^{-2jk_{n-1} t_{n-1}}}$$

Kompozit malzemeler genellikle cam elyaf ve diğer takviye malzemelerini içerir. Böyle tasarımlar, radomun hafif, dayanıklı ve elektromanyetik olarak şeffaf olmasını sağlar, böylece elektromanyetik dalgalar kolayca geçebilir.

Reçine, takviye malzemesini bir arada tutar, mekanik özellikleri artırır ve genel yapıyı güçlendirir [16]. Bu bağlamda, radomların yapısında reçineler önemli bir rol oynar. Reçineler aynı zamanda, radomun dayanıklılığını, çevresel koşullara karşı direncini ve elektromanyetik özelliklerini etkiler [16].

Çalışmada şu metodolojik sıra takip edilmiştir. Öncelikle merkez frekansı (f_c) seçilmiştir. C-bandı telemetri uygulamalarında kullanılmak üzere 5.8GHz frekansı tercih edilmiştir. Daha sonra tasarım-üretim kolaylığı ve maliyet etkin olması gibi avantajlarından dolayı E-Cam Elyaf/Epoksi kullanılarak tek katman radom tasarımı yapılmıştır. Sonrasında anten tasarımına geçilmiştir. Konformal anten tasarımı öncesinde konformal antene referans teşkil etmesi adına düzlemsel anten tasarımı yapılmıştır. 2x1 mikroşerit dizi düzlemsel anten tasarımı baz alınarak konformal anten tasarımına geçilmiştir. Bu kısımda düzlemsel anten

birebir boyutlarda konformal anten tasarımına aktarıldığında, elde edilen anten performansının isterleri sağlamadığı görülmüş ve yama boyutlarında optimizasyona gidilmiştir. Son olarak boyutları optimize edilen konformal anten, tek katman radoma entegre edilerek tek katman radomlu konformal antenin yönlülük, kazanç, yansıma katsayısı (S_{11}) ve Bant Genişliği (BG) performansı incelenmiş ve tasarımlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

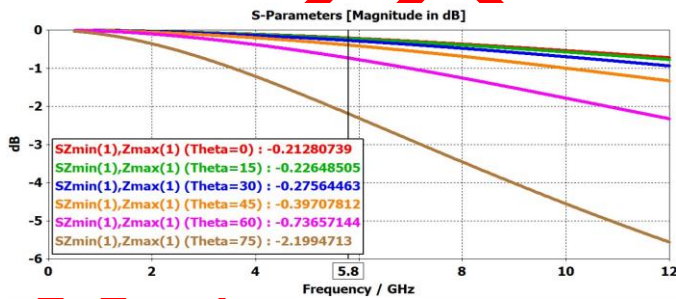
Çalışmanın ikinci bölümünde tek katman radom tasarımı, üçüncü bölümünde konformal ve düzlemsel anten tasarımları, benzetim sonuçları ve karşılaştırmaları, dördüncü bölümde radomlu konformal anten tasarımı ve benzetim sonuçları anlatılmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal anten yapıları kendi aralarında karşılaştırılmış aynı zamanda elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile de karşılaştırılarak çalışmada elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmanın V. Bölümü olan Sonuç bölümü ile makale sonuçlandırılmıştır.

2. RADOM TASARIMI (RADOM DESIGN)

Bu makaledeki tasarlanan konformal anten ile entegre kullanmak üzere, tasarım-üretim kolaylığı, düşük maliyetli olması gibi sebeplerden dolayı tek katman radom tasarlanmıştır. Anten çalışma frekansı 5.8 GHz seçildiği için anten bu frekans için tasarlanmıştır. Tasarım, CST Microwave Studio ortamında yapılmıştır. Frekans düzleminde, z-yönünde oluşturulan iki port ile birim hücre analizi sağlanmıştır.

Malzeme olarak, 1mm kalınlıklı E-Cam Elyaf/Epoksi ($\epsilon_r = 4.4$, $\tan\delta = 0.016$) tercih edilmiştir. Üretim ve elektromanyetik geçirgenlik açısından tek katman radom kalınlığı 1mm tercih edilmiştir. Elektromanyetik dalgaların bir ortamdan diğerine geçişindeki önemli bir

faktör, iletim katsayısıdır. İletim katsayısı, elektromanyetik dalgaların bir yüzeye çarptığında ne kadarının iletildiğini gösterir. Ancak, bu katsayı, dalga demetinin yüzeye düşme açısına, yani geliş açısına bağlı olarak değişir. Genelde, elektromanyetik dalgaların yüzeye dik gelmesi durumunda iletim katsayısı maksimum değere ulaşır. Ancak, geliş açısı arttıkça iletim katsayısı genellikle azalır [17]. Bu durum, dalga demetinin yüzeye olan etkileşiminin geliş açısıyla birlikte değişmesinden kaynaklanır. Dalganın geliş açısı, elektromanyetik dalgaların bir yüzeye veya ara yüze nasıl çarptığını ifade eder ve dalga ile yüzey arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu açı, gelen dalganın yüzeye nasıl yansıdığını veya kırıldığını belirlemede önemlidir. Dalganın ve yüzeye dik çizgi olan yüzey normalinin oluşturduğu açıyı ölçer. Bu açı, dalga enerjisinin bir yüzeye çarpması üzerine yansımaları veya kırılmasını tanımlarken Snell yasası gibi fiziksel yasaların uygulanmasında esastır. Şekil 2’de geliş açısına göre iletim katsayısı değişimi verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre tasarlanan radom yüzey ile 90° ’lik geliş açısı değerinde ($\theta=0^{\circ}$) (-0.21) dB’lik iletim katsayısına sahiptir.



Şekil 2: Tek katman radom için elektromanyetik dalganın geliş açısına göre iletim katsayısı değişimi.

Elektromanyetik dalgaların radomlarla etkileşimi, radom tasarımında ele alınan temel konular arasında yer alır. Bu konuların başında radom malzemesi seçimi gelir. Radom malzemesi, elektromanyetik dalgaların

yansıtılması ve iletilmesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Doğru malzeme seçimi, radomun performansını etkileyen birinci faktördür [18].

Radomun geometrisi, elektromanyetik dalgaların yüzeyi nasıl etkileşime gireceğini belirler. Doğru bir şekil seçimi, radomun etkinliğini ve sistem performansını artırabilir. Ayrıca, radomun kalınlığı ve yapısal özellikleri de elektromanyetik özellikleri etkileyen kritik faktörlerdir. Düzgün bir tasarım, elektromanyetik dalgaların radom içinden geçişini optimize eder ve sistemin elektromanyetik uyumluluğunu artırır [19].

Radomların elektromanyetik özellikleri genellikle frekansa bağlı olarak değişir. Bu nedenle, tasarım aşamasında radomun kullanılacağı frekans aralığı dikkate alınmalı ve radom malzemeleri ile geometrisi bu frekanslara uygun olarak seçilmelidir. Frekans bağımlılığı, radomun uzun vadeli performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu çalışmada tek katman radomun iletim performansının sandviç yapıya göre daha iyi oluşu, üretilebilirlik ve maliyet etkin olması gibi sebeplerden dolayı tek katman radom yapısı tercih edilmiştir ve bundan sonraki bölümde radom-anten etkileşimi ve karşılaştırması tek katman radom üzerinden sunulmuştur.

3. KONFORMAL ANTEN TASARIMI (CONFORMAL ANTENNA DESIGN;)

Konformal antenler, günümüzde birçok farklı uygulama alanında önemli bir role sahip olan yenilikçi anten tasarımı yöntemlerinden biridir. Geleneksel antenlerin sınırlamalarını aşan konformal antenler, özellikle taşıyıcı platformun yüzeyine uyum sağlama yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu özellik, özellikle askeri uygulamalarda, hava, deniz ve kara araçlarında, düşük

profilli ve aerodinamik olarak optimize edilmiş anten çözümleri sağlama potansiyeli sunmaktadır [20].

Konformal antenlerin en belirgin avantajlarından biri, düzensiz yüzeylere uyarlanabilir olmalarıdır. Bu özellik, uçak, gemi, araç gibi taşıyıcı platformların şekline uyum sağlama yeteneği anlamına gelir. Konformal antenler, aerodinamik etki nedeniyle askeri uygulamalarda sıkça tercih edilir. Ayrıca, tıbbi görüntüleme cihazları, uzaktan algılama sistemleri ve spor ekipmanları gibi alanlarda da kullanılmaktadırlar.

Konformal anten tasarımında karşılaşılan başlıca zorluk, düzlemsel formda tasarlanan anten yapısından platform yüzeyine uyumlu konformal yapıya geçişte meydana gelebilen performans düşüştür [21]. Bu durumun üstesinden, taşıyıcı yüzeye uyumlu hale getirilen antenin boyutlarında revizyona gidilerek gelinir. Bu revizyonda düzlemsel forma göre performans düşüşünün önüne geçilecek şekilde optimum anten performansını sağlayan anten boyutları hesaplanır. Bu çalışmada konformal yapıya geçişte anten performans-boyut optimizasyonu için CST simülatörü kullanılmıştır.

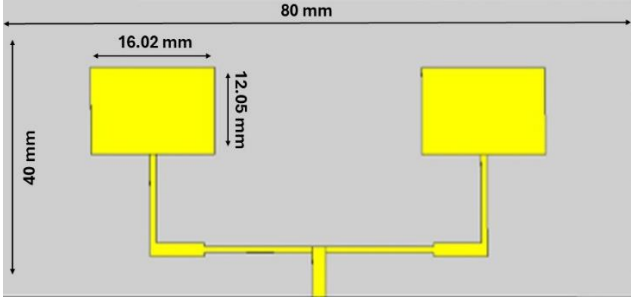
Anten elemanlarının konformal yüzeye mükemmel uyumunu sağlamak, genellikle karmaşık elektromanyetik benzetimler ve optimize edilmiş yerleştirme stratejileri gerektirir. Malzeme seçimi, elemanların konformal yüzeye bağlı olarak değişen geometrilerine uygun olmalıdır. Konformal antenlerde kullanılan malzemelerin elektromanyetik performansı, tasarımın başarısı açısından kritiktir. Bu antenlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler, genellikle elektromanyetik dalgalarla etkileşimi optimize eden iletken malzemeler ve dielektrik malzemelerdir. Malzeme seçimi, antenin genel elektromanyetik performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu

çalışmada sunulan antende TU-872 LK malzemesi, maliyet etkin ve kolay üretilebilir olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Konformal antenlerde, yatay düzlemde anten konumunu belirlemek için bükme açıları uygulanmaktadır. Bu bükme açısı, antenin kavisli şekilde görünmesini sağlar. Anten tasarımı için C bandı, L ve S bandına göre daha küçük ve hafif olması sebebiyle ön plandadır. Bu çalışmada, 5.8 GHz tercih edilmiştir. Çalışmanın, uydu haberleşmesi üzerine literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır [22].

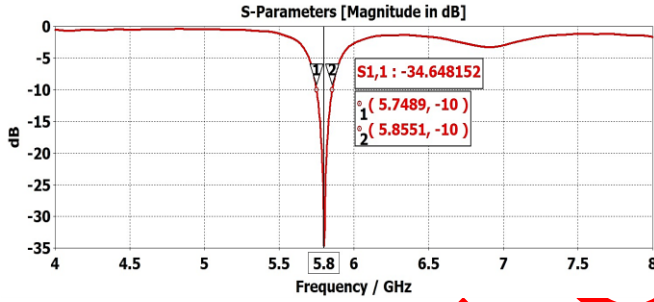
Radomlu konformal anten tasarımında tercih edilen 2x1 mikroşerit yama anten dizileri, yönlülük performanslarıyla öne çıkar. Bu anten dizileri, özellikle radar ve iletişim sistemlerinde belirli bir yöne odaklanabilme yetenekleri sayesinde hedefe yönlendirilmiş yüksek performans sağlar. Ayrıca, düşük profil ve esnek entegrasyon özellikleri, radomlu konformal antenleri aerodinamik yapılar üzerinde kullanıldıklarında platform geometrisine uyumlu ve düşük aerodinamik dirençli kılar. Mikroşerit yama anten dizileri, geniş frekans aralıklarında çalışabilme yeteneği ile çeşitli iletişim ve algılama ihtiyaçlarına uyarlanabilirler. Ek olarak, maliyet etkin üretimleri ve standart üretim teknikleriyle uyumlulukları, radomlu konformal anten tasarımlarında ekonomik ve kullanışlı bir çözüm sunar [23,24,25].

Anten tasarımı için baskı devre kolaylığından dolayı mikroşerit yapılar tercih edilmiştir. Alttaş malzeme olarak 3.8'lik ϵ_r ve 0.009'luk $\tan\delta$ elektriksel parametrelere sahip TU-872 LK tercih edilmiştir. Bu malzeme modifiye edilmiş epoksi reçine ve E-Cam içermektedir [26].



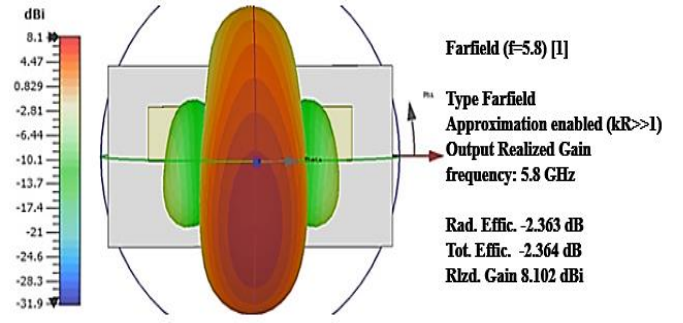
Şekil 3: 2x1 mikroşerit yama anten dizisi.

2x1 mikroşerit dizi anten Şekil 3'te gösterildiği gibi ilk olarak düzlemsel formda tasarlanmıştır. Tasarlanan antenin yama genişliği 16.02 mm, yama uzunluğu ise 12.05 mm'dir. Altaş kalınlığı 0.8 mm, uzunluğu 40 mm, genişliği ise 80 mm'dir. İletim hattı kalınlıkları, 50 Ω 'a göre hesaplanmıştır.



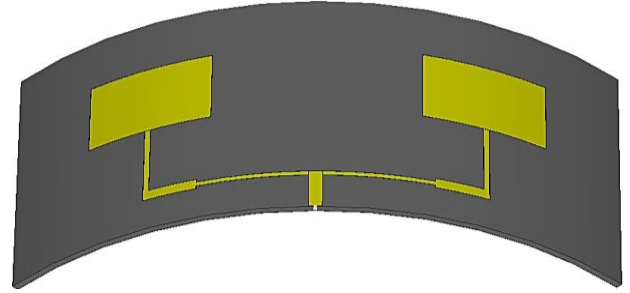
Şekil 4: Geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

Tasarlanan düzlemsel anten için Şekil 4'te gösterildiği gibi 5.8 GHz'de (-34.64 dB)'lik S_{11} elde edilmiştir. Antenin yönlülüğü 10.5 dBi ve kazancı 8.1 dBi olarak bulunmuştur. Bant Genişliği (BG) ise yaklaşık 110 MHz olarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te ise düzlemsel 2x1 dizi antenin ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Düzlemsel tasarım konformal anten tasarımı için referans oluşturmaktadır.



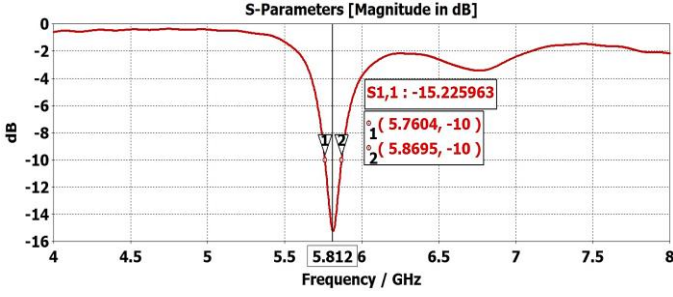
Şekil 5: Anten ışınma örüntüsü.

Bu tasarıma CST Bükme Aracı'nda (Bending Tool) 90° açıyla iki taraflı bükme ($\theta=90^\circ$) uygulanmıştır. Bu şekilde bükme yardımıyla şekillendirilen anten, bir silindirin çeyrek dairesine denk gelmektedir [27]. Oluşan yeni konformal antenin 5.8 GHz'de S_{11} ve kazanç isterlerini sağlayamadığı görülmüştür. Bunun üzerine yama boyutları azaltılarak S_{11} optimize edilmiştir. Oluşturulan yeni antenin yama boyutları 15.44x11.57 mm'dir. Tasarlanan konformal anten geometrisi Şekil 6'da S_{11} ve ışınma örüntüsü grafikleri ise sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir.

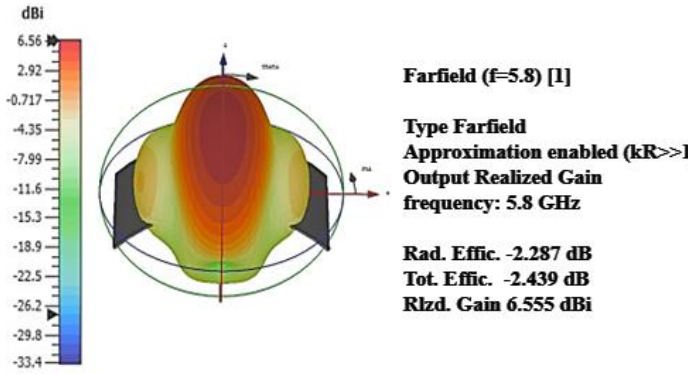


Şekil 6: Konformal anten geometrisi.

Şekil 6'ya göre konformal mikroşerit yama anten dizisi geometrisi 90° bükme (θ) açısına sahiptir. Bükme açısı, antenin yataydaki konumu hakkında bize bilgi vermektedir.



Şekil 7: Konformal Anten S_{11} grafiği.



Şekil 8: Konformal anten ışınma örüntüsü.

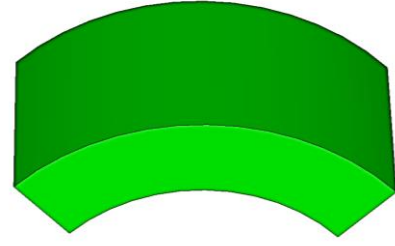
Tasarlanan konformal antenin yönlülüğü 8.99 dBi, kazancı, 6.56 dBi, S_{11} 'i (-15.22 dB) ve BG 'si ise yaklaşık olarak 110 MHz'dir.

4. RADOMLU KONFORMAL ANTEN TASARIMI (RADOM CONFORMAL ANTENNA DESIGN)

Bölüm II'de, tek katman radom tasarımı detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise, radom-konformal anten ile birleştirilerek, radom-konformal anten etkileşimi, yönlülük, kazanç, S_{11} ve BG türünden incelenmiştir.

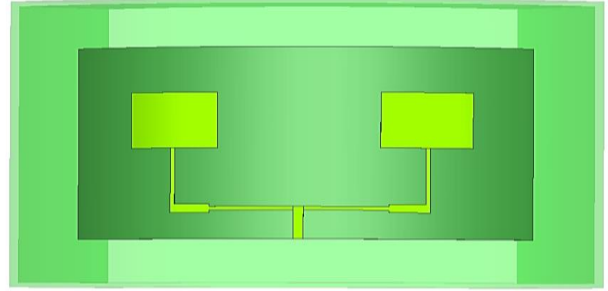
4.1 Tek Katman Radom ve Konformal Anten Entegrasyonu

Bir önceki bölümdeki elde edilen konformal anten, 1-mm E-Glass/Epoksi radom numunesinin içerisine yerleştirilerek radom-konformal anten performansı incelenmiştir.



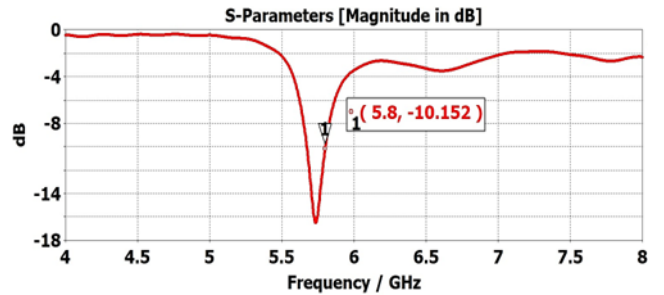
Şekil 9: 1-mm E-Glass/Epoksi radom.

Öncesinde birim hücre analizi yapılarak, iletim katsayısı elde edilen radom için anten geometrisine uygun bir biçimlendirme (bükme) sağlanmıştır. Çalışmada tasarlanan radom Şekil 9'da, radoma entegre edilmiş konformal anten ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Radom ile konformal anten, konformal anten tasarımındaki bükme açısı olan $\theta = 90^\circ$ bükme açısı ile CST ortamında birbirine entegre edilmiştir.



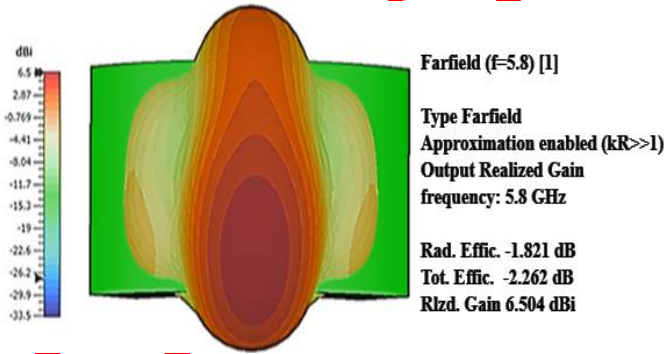
Şekil 10: Tek katman radomlu konformal anten.

Mikroşerit dizi konformal anten, radomun içine Şekil 10'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu şekilde entegre bir tasarım oluşturulmuştur.



Şekil 11: Tek katman radomlu konformal antenin S_{11} değeri.

Radomun, elektromanyetik dalgalar üzerinde etkileri önceki bölümlerde anlatılmıştı. Radomun konformal antene entegrasyonun S_{11} , yönlülük, kazanç ve BG üzerindeki etkileri benzetim ortamında gözlenmiştir. Tek katman radomlu konformal antenin S_{11} grafiği Şekil 11’de gösterilmiştir. Burada, radom entegrasyonunda, karşılaşılmaması beklenen kayıplar S_{11} parametresine yansımıştır. Diğer bir deyişle konformal anten radoma entegre edildikten sonra, radomsuz konformal antenin merkez frekansında kayma olmuştur. Bu durum tasarım hedefi olan 5.8GHz frekansındaki S_{11} değerinde yaklaşık 5dB’lik artışa sebep olmuştur. Bunun sebebi, antenden yayılan elektromanyetik dalganın, bir kısmının radom yani malzeme ortamında, bir kısmının yansıyor, emiliyor ve iletiliyor olmasıdır. Radomla entegre edilen antenlerde meydana gelen makul düzeyde performans azalışı beklenen bir durumdur. Radomun tam olarak etkisinin gözlenmesi için malzemenin, yansıma ve iletim katsayısının çıkarılması kadar, anten-radom etkileşiminin anten performansına olan etkisinin incelenmesi de önemlidir.



Şekil 12: Tek katman radomlu konformal anten ışınma örüntüsü.

Şekil 12’de tek katman radomlu konformal antene ait ışınma örüntüsü verilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, 5.8 GHz’de radomlu konformal antenin yönlülüğü 8.77 dBi, kazancı 6.5 dBi ve S_{11} değeri ise (-10.152) dB’dir. Rezonansın en iyi olduğu

kısımda S_{11} değeri -16.204 dB ve çalışma frekansı 5.742 GHz’dir. 5.8 GHz bandında radomun etkisi gösterilmesi amaçlandığından ve ISM çalışma bandı olarak seçildiğinden bu şekilde raporlanmıştır.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Makalenin bu bölümünde düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal antenlerin performansları karşılaştırılmıştır. 5.8GHz merkez frekansında düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal antenlerin yönlülük, kazanç, S_{11} ve BG karşılaştırmaları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’e göre en iyi kazanç, yönlülük ve S_{11} performansına sahip tasarım düzlemsel antendir. Antenin konformal hale getirilmesiyle kazanç ve yönlülük değerleri yaklaşık 2’şer dB azalmışken 5.8GHz frekansında S_{11} yaklaşık 19 dB azalmıştır. Anten kullanılması planlanan sabit kanat bir insansız hava platformu ile uyumlu olacak şekilde 90° bükme açısı ile konformal hale getirildiğinde tasarlanan konformal antenin isterleri karşıladığı görülmektedir. Son adımda radom ve konformal anten 90° bükme açısı ile platform ile uyumlu olacak şekilde birleştirildiğinde radomlu konformal antenin kazancı radomsuz konformal anten ile yaklaşık aynı değere sahipken, S_{11} 5dB azalarak (-10.152dB) değerini almıştır. Benzetim sonuçlarına göre radomlu konformal anten tasarımı için elde edilen bant genişliği, kazanç, yönlülük ve S_{11} sonuçlarının seçilen uygulama için yeterli olduğu ve literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Düzlemsel yapıdan konformal yapıya geçişte konformal yapıdan da radomlu konformal yapıya geçişte karşılaşılan bu performans kaybı beklenen bir durumdur. Diğer bir beklenen durumda bir radomun, bir antenin üzerine yerleştirilmesinin, radome malzemesindeki dalga zayıflaması ve radomun yansımaları nedeniyle anten kazancını azalttığıdır [28].

Sadece anten tasarımı için değil frekans seçici yüzeyler için de düzlemsel yapıdan konformal yapıya geçiş frekans tepkisini ve elektromanyetik performansı değiştirebilmektedir [29]. Nihai olarak, bu çalışma ile radomlu-konformal yapıda haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere bir anten tasarlanmıştır.

Tablo 1: Düzlemsel, konformal, radomlu konformal anten tasarımlarının performans karşılaştırması (@ 5.8 GHz)

	Yönlülük (dBi)	Kazanç (dBi)	S_{11} (dB)	BG (MHz)
Düzlemsel Anten	10.5	8.1	-34.64	110
Konformal Anten	8.99	6.56	-15.22	110
Radomlu Konformal Anten	8.77	6.50	-10.152	105

Ek olarak çalışmamızın nihai tasarımını teşkil eden konformal anten ve radomlu konformal anten performanslarının literatür ile karşılaştırılması Tablo 2’de sunulmuştur. İlk incelenen çalışmada, radomlu çift konik anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, a-sandviç ve tek katmanlı radom yapıları incelenmiştir. Üretim kolaylığı açısından tek katmanlı radom seçilmiştir. Entegre tasarım yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Radomun anten kazancına ve S_{11} parametresine olan etkisi Tablo 2’de [30]. İkinci çalışmada, frekans seçici yüzey radom tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada, radom anten etkileşimi için iki anten incelenmiştir. İncelenen antenler vivaldi ve horn antendir. Horn antenin radom

ile etkileşimi benzer şekilde Tablo 2’de karşılaştırılmıştır [31].

Karşılaştırma yapılan son çalışmada, metalmalzemeye radom yapısı incelenmiştir. Bu tasarımda, radomun anten kazancını artırması amaçlanmıştır [32]. Ayrıca, Bakır, M., çalışmasında düzlemsel yama anten yapısının, 2 mm kalınlığında Kuyars ve Cam türü radomlar altında analizleri sağlanmış ve sonuçların neredeyse aynı olduğu bilgisi paylaşılmıştır [33].

Sonuç olarak, örnekler incelendiğinde bu makaledeki çalışmanın, literatürü yakaladığı ve radom, anten tasarımıyla ilgili güncel veriler sunduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmanın anten ve radom tasarımcılarına örnekler sunması amaçlanmıştır.

Çalışmamızın ilerleyen aşamalarında ise, radom anten entegrasyonunda, radom malzemesinin anten performansına etkisini anlayabilmek adına benzetim ortamında farklı radom malzemeleri konformal anten ile birleştirilecek ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

Tablo 2: Radom entegre edilmiş-edilmemiş antenlerin karşılaştırma tablosu.

Ref.	Frekans	Kazanç (Radomsuz)	Kazanç (Radomlu)	S_{11} (Radomsuz)	S_{11} (Radomlu)
[30]	18 GHz	3.99 dB	3 dB	-22.094 dB	-15.294 dB
[31]	10 GHz	11.12 dB	10.03 dB	< -25 dB	-
[32]	6.2-6.4 GHz	7.1 dB	7.9 dB	-15 dB	-19 dB
Bu Makale	5.8 GHz	6.56 dB	6.5 dB	-13.457 dB	-10.152 dB

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, öncelikle tek katman radom tasarımı yapılmış, sonrasında 2x1 düzlemsel mikroşerit yama anten ve aynı özelliklerde konformal anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada anteni düzlemsel formdan konformal forma getirmenin anten performansına olan etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra radom ve konformal anten birleştirilerek radomun anten parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Radomlar, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan antenlerin performansını etkileyen önemli parçalardır.

Çalışmada tasarlanan tek katman radomun iletim katsayısı, 5.8 GHz’de (-0.21) dB’dir. Önerilen konformal antenin, radomsuz halinin, yönlülüğü, 8.99 dBi, kazanç, 6.56 dBi, S_{11} ’i (-15.22) dB ve BG ’si yaklaşık 110 MHz’dir. Konformal anten radomla entegre edildiğinde ise, radomun etkilerinden dolayı bu parametrelerde değişim yaşanmıştır. Radomlu anten için yönlülük 8.77 dBi, kazanç, 6.5 dBi ve 5.8 GHz’de S_{11} ’i (-10.152) dB’dir. Radomlu tasarımda hem merkez frekansı kaymıştır hem de bant genişliği 5MHz kadar azalmıştır. Radomlu tasarımın S_{11} ’inde yaklaşık 5dB’lik bir performans düşüşü meydana gelmiştir. Bu performans kayıpları radom

kaynaklıdır. Çünkü antenden yayılan elektromanyetik dalga farklı bir malzeme ortamına temas ettiğinde, makalenin giriş bölümünde verilen radom tasarımı formüllerinden de anlaşılacağı üzere, yansıma, emilim ve iletim gibi olaylarla karşılaşılacaktır. Bu gibi durumları azaltmak ve üstesinden gelmek için daha düşük dielektrik katsayısına sahip malzemeler radom tasarımında tercih edilebilir. Tercih edilen malzeme, üretilebilir olmalıdır ve frekansa göre kaybı optimal şekilde antene göre ayarlanmalıdır. Bu çalışma radom için, ucuz, kolay bulunabilir olduğu için ve üretim kolaylığı özelliklerinden dolayı E-Cam Elyaf/Epoksi ile tek katman olacak şekilde tasarlanmıştır. Radomlu konformal antenin benzetim sonuçları düzlemsel anten ve konformal anten ile karşılaştırılarak radomun etkisinin anten performansına olan etkisi açıklanmak istenilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile 5.8 GHz’de havacılık uygulamalarında kullanılacak radomlu konformal mikroşerit yama anten dizisi tasarımı önerilmiştir.

Bu çalışma, aerodinamik olarak yüzeylere uyumlu tasarlanan konformal antenin, radom tasarımı ve radomlu incelenmesini sağlamıştır. Havacılık ve uzay çalışmalarında, radomlar ve antenler bir arada kullanılmaktadır. Önerilen

anten bu çalışmalara katkı sağlamak isteyen mühendis ve araştırmacılara yol gösterecektir. Literatüre radom ve anten mühendisliği ile ilgili olan bir referans alınabilecek bir tasarım ve analiz sunulmuştur.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP

CONTRIBUTION STATEMENT)

Burak Can KIŞLA: Literatür taraması, benzetimler ve sonuçların analizi bu yazar tarafından yapılmıştır. Orijinal taslak da bu yazar tarafından hazırlanmıştır.

Bilge ŞENEL: Çalışmanın kavramsallaştırılması ve süpervizyonu ikinci yazar tarafından yapılmıştır. Kontrolörün metodolojisi, orijinal taslağın yazılması, düzenlenmesi ve gözden geçirilmesi yine bu yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Josefsson, L., Persson, P., "Conformal Array Antenna Theory and Design", Wiley-IEEE Press, 2006.
- [2] Kozakoff, D. J., Analysis of Radome-enclosed Antennas, Artech House, 2010.
- [3] Shavit, R., Radome Electromagnetic Theory and Design, Wiley, 2018.
- [4] Walton J. D., (Radome Engineering Handbook. J. D. Walton (Ed.) Marcel Dekker, New York, 1970.
- [5] Kai-Dong Hong, Shida Zhong, Xiao Zhang, Lei Zhu, Zhe Chen, Tao Yuan, A monolithic missile radome with improved radiation patterns for application in frequency modulated continuous wave radar, AEU - International

Journal of Electronics and Communications, Volume 132, 2021.

[6] Patel, Shobhitkumar Kiritkumar & Shah, Karan & Kosta, Y., Multilayer liquid metamaterial radome design for performance enhancement of microstrip patch antenna. Microwave and Optical Technology Letters, 2018.

[7] Farr David, Henderson, William "Airborne Antenna Considerations For C-Band Telemetry Systems", Sat Magazine, A.B.D., Mayıs 2014.

[8] Monica, J. & Vishnu Prakash, Dr.Jothilakshmi. (2020). A Design of Bandwidth-Enhanced Conformal Antenna for Aircraft Applications. IETE Journal of Research. 69. 1-13, 2020.

[9] H. Wang, Y. Zhao, K. Huang, T. Liu and P. Gao, "Design of a High-Performance Radome for Satellite Communication Phased Array Antennas," 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES), Beijing, China, 2018.

[10] Chethan Kumar, Habeeb Ur Rahman Mohammed and Greg Peake, mmWave Radar Radome Design Guide, Texas Instruments, 2022.

[11] Parini, Clive & Sheret, Tamara & Allen, B.. (2016). Efficient Design of a Radome for Minimised Transmission Loss. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 10, 2016.

[12] Qamar, Zeeshan & Aboserwal, Nafati & Salazar, Jorge., An Accurate Method for Designing, Characterizing, and Testing a Multi-Layer Radome for mm-Wave Applications. IEEE Access. PP. 1-1, 2020.

[13] Sivagnanam, Ilavarasu & Niranjappa, A.C. & Singh, M. & Narayana, P.A.A., An approach to the design of composite radome for airborne surveillance application. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018.

[14] Qamar, Zeeshan & Salazar, Jorge & Aboserwal, Nafati, "An Ultra-Wide Band Radome for High-Performance and Dual-Polarized Radar and Communication Systems" IEEE Access, 2020.

[15] Balanis, C., "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, Hoboken, 1989.

[16] Vera-Dimas, José & Tecpoyotl-Torres, Margarita & García-Limón, J.A. & Zezzatti, C..

Experimental test of epoxy resin as a radome for patch antennas. *Procedia Engineering*. 35. 155–164, 2012.

[17] Cheng, D. K., “Field and Wave Electromagnetics,” 2nd Edition, Pearson Education Limited, London, England, 2014.

[18] L. Zhou, Y. Pei and D. Fang, "Dual-Band A-Sandwich Radome Design for Airborne Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016.

[19] Lee, K., Chung, Y., Hong, I., & Yook, J. An effective design procedure for A-Sandwich radome., *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010.

[20] Kışla, Burak Can, Şenel. Bilge, "Havacılık Uygulamaları için C Bandı Konformal Anten Tasarımı," *URSI-TR'23 Bilimsel Kongresi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2023.

[21] M. M. H. Mahfuz and C. -W. Park, "Review of Patch Antennas used in Drone Applications," in *IEEE Access*, 2023.

[22] N. Sharma, A. Kumar, A. De and R. K. Jain, "Circularly Polarized Antenna for ISM (5.8 GHz), Satellite Communications and UWB Applications," *SPIN Noida, Hindistan*, s. 303-307 Ağustos 2021.

[23] Ngobese, B. & Kumar, P.. A high gain microstrip patch array for 5 GHz WLAN applications, 2018.

[24] Ipekoglu Y., Yucedag, O. M., "Microstrip patch antenna array design for C-band electromagnetic fence applications," 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2015, pp. 355-358.

[25] Amir, N.A., Hamzah, S.A., Ramli, K.N., & Esa, M., 2x1 microstrip patch array antenna with harmonic suppression capability, *APACE*, 2016.

[26] Taiwan Union Technology Corporation, "TU-872 LK Datasheet", Zhubei, Tayvan 2023.

[27] Dassault Systemes, "CST Studio Suite Help", 2023.

[28] Kim, T., Kumar, S., Ravikumar, C. V., Ahmad, S., Yepuganti, K., & Varma, P. S., "Evaluation of a double-lens dielectric radome using a microstrip patch antenna for electromagnetic applications", *Ain Shams Engineering Journal*, 2024.

[29] Korkut, N. A., Kara, A., & Yardım, F. E. "Conformal Frequency Selective Surfaces in

Radome Design: A Mini Review" *Savunma Bilimleri Dergisi*, 20(2), 211-222, 2024.

[30] Çor, İsmail, Çok Geniş Bantlı Doğrudan Beslenmiş Radomlu Çift Konik Anten Analiz ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2018.

[31] Topçuoğlu, Cumhuri, X Bant Frekans Seçici Yüzeyle Radom Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul, 2018.

[32] Patel, Shobhitkumar Kiritkumar & Kosta, Y. & Charola, Shreyas., Liquid metamaterial based radome design. *Microwave and Optical Technology Letters*. 60, 2018.

[33] Bakır M. Quartz Fiber Radome and Substrate for Aerospace Applications. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 2023.